



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

Laboratório de Controle e Automação II

Roteiro de Aula  
Sistemas digitais de controle distribuído

Professora: Maria Auxiliadora Muanis Persechini  
Bolsista PID: Darlan Gonçalves da Rosa

Novembro de 2002

# **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 geograficamente. Um sistema distribuído é composto por diversos elementos (por exemplo: 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 *Fieldbus*. Dessa forma, os alunos ficarão familiarizados com uma das tecnologias de sistemas distribuídos, sendo capazes de projetar e implementar sistemas com características similares.

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 seis aulas (três semanas), assim distribuídas:

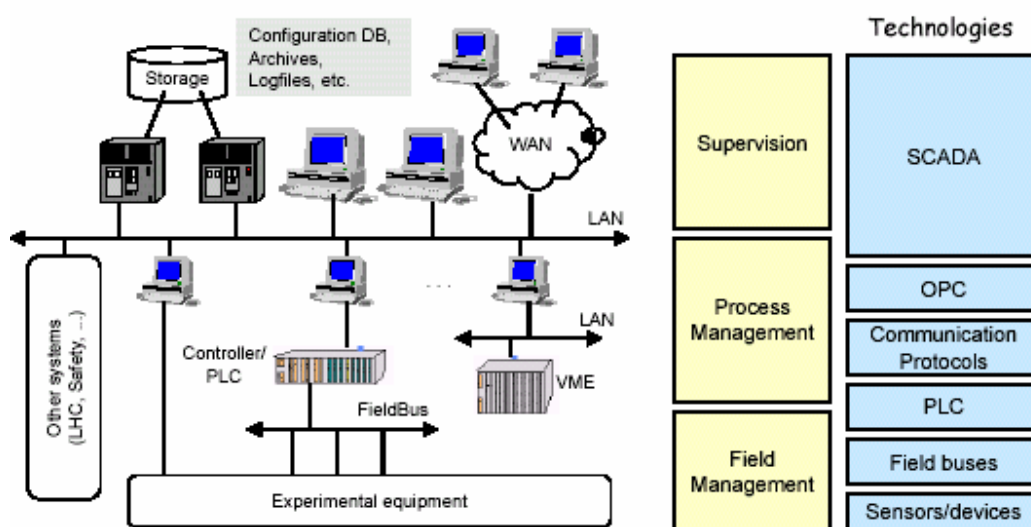
- Primeira e segunda aulas: Estudar os documentos do processo e da rede *fieldbus* para conhecer e entender o sistema de tanques interativos e as ferramentas para configuração e operação. Ao final, colocar o sistema em operação para verificar seu funcionamento.
- Terceira a sexta aulas: Definir e implementar uma estratégia de controle, diferente da estratégia já projetada, para o sistema de tanques.

### **2 Sistemas distribuídos**

Redes industriais para automação são um grande conjunto de produtos de software, hardware e protocolos utilizados para comunicação entre plataformas de computadores e dispositivos utilizados em aplicações de automação industrial.

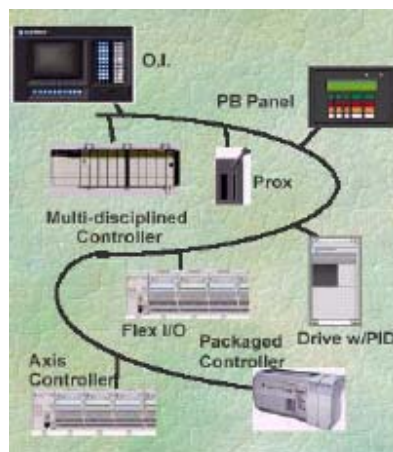
Os avanços nas tecnologias de redes têm afetado profundamente a indústria de Automação Industrial. Muitas redes de automação começaram a partir de uma simples conexão serial RS-232 ou RS-485. Ao longo dos anos, os fornecedores de equipamentos para automação foram melhorando seus projetos, desenvolvendo seus próprios meios, protocolos e hardware, para incorporar as características requeridas na indústria, como determinismo, confiabilidade, etc.

As figuras 1 e 2 apresentam configurações típicas de sistemas distribuídos para automação industrial. Na figura 1, está representada uma configuração onde os instrumentos e dispositivos estão distribuídos de forma hierarquizada em diferentes redes. O sistema representado pela figura 2 indica uma única rede onde todos os equipamentos e instrumentos estão interligados.



<http://hcb-comp.web.cern.ch/hcb-comp/general/talks/Powerpoint/ControlsJan99.ppt>

**Figura -1 Configuração típica de um sistema distribuído e hierarquizado**



**Figura - 2 Configuração de um sistema distribuído "flat"**

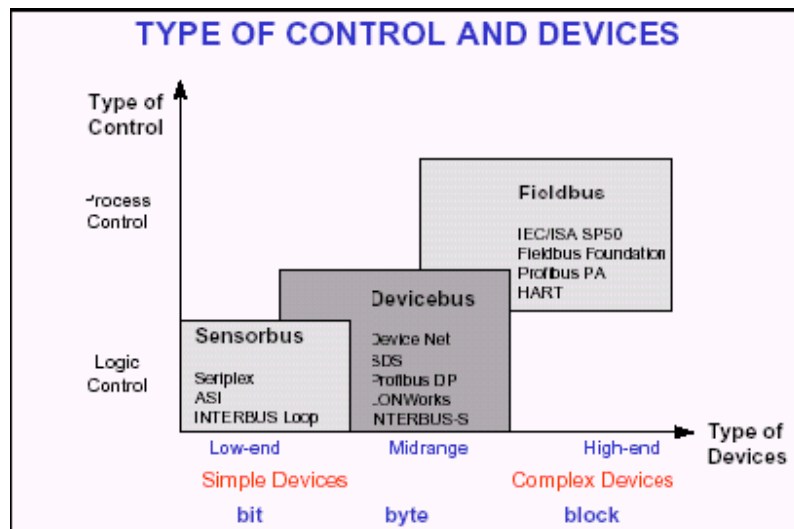
As redes industriais são normalmente classificadas pelo tipo de equipamento conectado a elas e pelo tipo de dados que trafega pela rede. Os dados podem ser bits, bytes ou blocos.

As redes cujo protocolo é apresentado com dados em formato de bits transmitem sinais discretos contendo simples condições ON/OFF. As redes cujo protocolo é apresentado com dados no formato de byte podem conter pacotes de informações discretas e/ou analógicas. As redes cujo protocolo é apresentado com dados em formato de bloco são capazes de transmitir pacotes de informação de tamanhos variáveis

As redes industriais podem ser classificadas da seguinte forma:

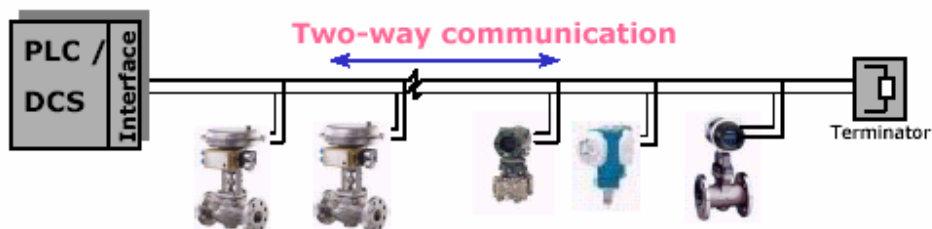
- Redes *Sensorbus* :  
A rede *sensorbus* conecta instrumentos simples e pequenos diretamente à rede. Os instrumentos deste tipo de rede necessitam de comunicação rápida em níveis discretos e são tipicamente sensores e atuadores de baixo custo. Estas redes não almejam cobrir grandes distâncias, sua principal preocupação é manter os custos de conexão tão baixos quanto for possível. Exemplos típicos de rede *sensorbus* incluem Seriplex, ASI e CAN
- Redes *Devicebus*:  
A rede *devicebus* preenche o espaço entre redes *sensorbus* e *fieldbus* e pode cobrir distâncias de até 500 m. Os equipamentos conectados a esta rede terão mais pontos discretos, alguns dados analógicos ou uma mistura de ambos. Além disso, algumas destas redes permitem a transferência de blocos em uma menor prioridade comparado aos dados no formato de bytes. Estas redes tem os mesmos requisitos de transferência rápida de dados da rede *sensorbus*, mas consegue gerenciar mais equipamentos e dados. Alguns exemplos de redes deste tipo são DeviceNet, Smart Distributed System (SDS), Profibus DP, LONWorks e INTERBUS-S.
- Redes *Fieldbus*:  
A rede *fieldbus* interliga os equipamentos de I/O mais inteligentes e pode cobrir distâncias maiores. Os equipamentos acoplados à rede possuem inteligência para desempenhar funções específicas de controle tais como controle PID, controle de fluxo de informações e processos. Os tempos de transferência podem ser maiores que as outras redes, mas a rede deve ser capaz de comunicar-se para vários tipos de dados (discreto, analógico, parâmetros, programas e informações do usuário). Exemplos de redes *fieldbus* incluem IEC/ISA SP50, Fieldbus Foundation, Profibus PA.

A figura 3 mostra a distribuição das redes de acordo com o tipo de dispositivo e o tipo de controle. Nesta figura pode-se observar que existe superposição das redes em termos de aplicabilidade e que, a medida que os dispositivos se tornam mais complexos, o tipo de controle que pode ser exercido também se torna mais complexo.



**Figura 3 - Características das redes de automação**

As redes *fieldbus* são redes do tipo LAN (Local Area Network ) de tecnologia aberta, totalmente digital e comunicação bidirecional, dedicadas a interligação de dispositivos inteligentes para a indústria de processos. Permite que diversos instrumentos possam ser conectados a um único para de fios, como mostra a figura 4.



**Figura 4 - Configuração típica de uma rede *fieldbus***

As características específicas da rede *fieldbus* da Smar, utilizada no sistema de tanques interativos, estão detalhadas no seguinte documento:

*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>

### **3 STEC-NVT - Sistema de Tanques para Estudos de Controle de Nível, Vazão e Temperatura**

#### **3.1 Processo**

O STEC-NVT, conforme a mostra Figura 5, 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.

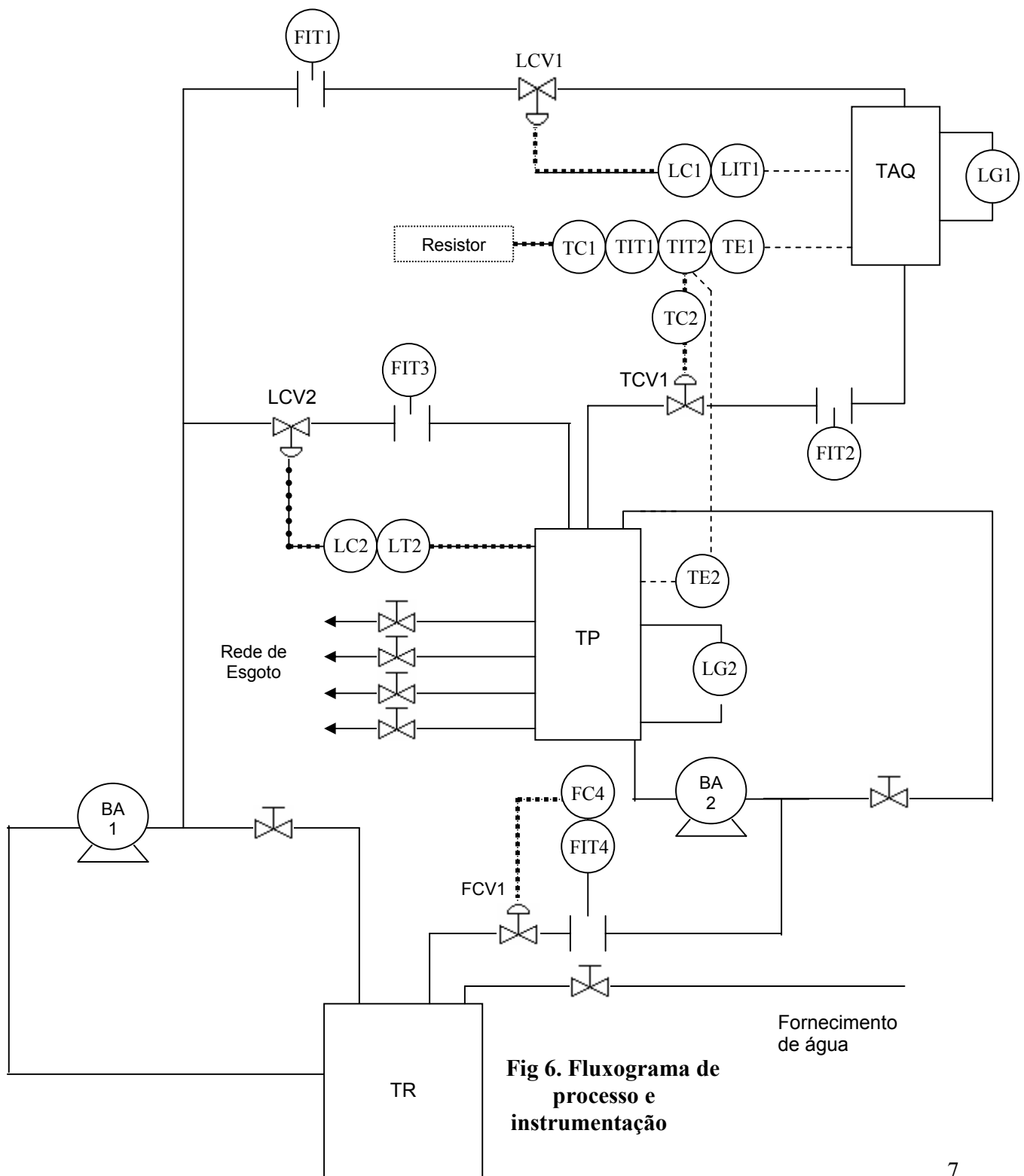
Tanto o Tanque de Produto como o Tanque Reservatório tem um circuito hidráulico que permite fazer a recirculação da água no tanque. O Tanque de Produto tem ainda quatro válvulas manuais que permitem mandar a água para a saída de esgoto, podendo, ser usadas para simular perturbações.



**Fig 5. Sistemas de tanques STEC**

#### **3.2 Instrumentação**

A figura 6 representa a instrumentação do sistema de tanques detalhado a seguir.



**Fig 6. Fluxograma de processo e instrumentação**

## **Atuadores**

### **Bombas: Centrífugas:**

O sistema possui duas bombas: B1 e B2, ambas de ¼ CV.

B1 está ligada à saída do TR e permite a transferência da água do TR para os tanques TAQ, por meio da válvula automática LCV1, e TP, por meio da válvula automática LCV2.

Usando essa bomba também é possível fazer a água recircular 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: a vazão de água na saída do TAQ é impulsionada pela força de gravidade, assim, ela é bastante influenciada pelo nível do TAQ.

### **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 acionamento pneumático e sinal de controle 4-20 mA. A variação do sinal de controle (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.

## **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 *fieldbus*. Cada Transmissor/Controlador de temperatura, TT302, conecta até dois sinais vindos de termoresistências 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 LD 302. Todos os quatro transmissores LD 302 estão interligados à rede *fieldbus*.

#### 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 *fieldbus*.

### **3.3 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 resistor de aquecimento que atua na taxa de transferência de calor.

### 3.4 Estrutura da rede *Fieldbus*

Os instrumentos conectados à rede *fieldbus* 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 *fieldbus* interage com o CLP (LC700 da Smar) através de um cartão *fieldbus* “scanner” FB700, conectado ao rack do CLP. O CLP é responsável pelo intertravamento do sistema, garantindo assim a segurança operacional. A configuração da rede *fieldbus* é feita em um computador por meio de um software específico (SYSCON) e enviada aos instrumentos. A comunicação entre o computador e a rede *fieldbus* é realizada através de um módulo específico para gerenciamento da rede DF1302 (Fieldbus Universal Bridge). Este dispositivo permite a comunicação da rede Fieldbus como os aplicativos por meio da rede Ethernet e protocolo OPC.

A configuração da rede *Fieldbus* para o processo, representado pela figura 6, pode ser observada na figura 7.

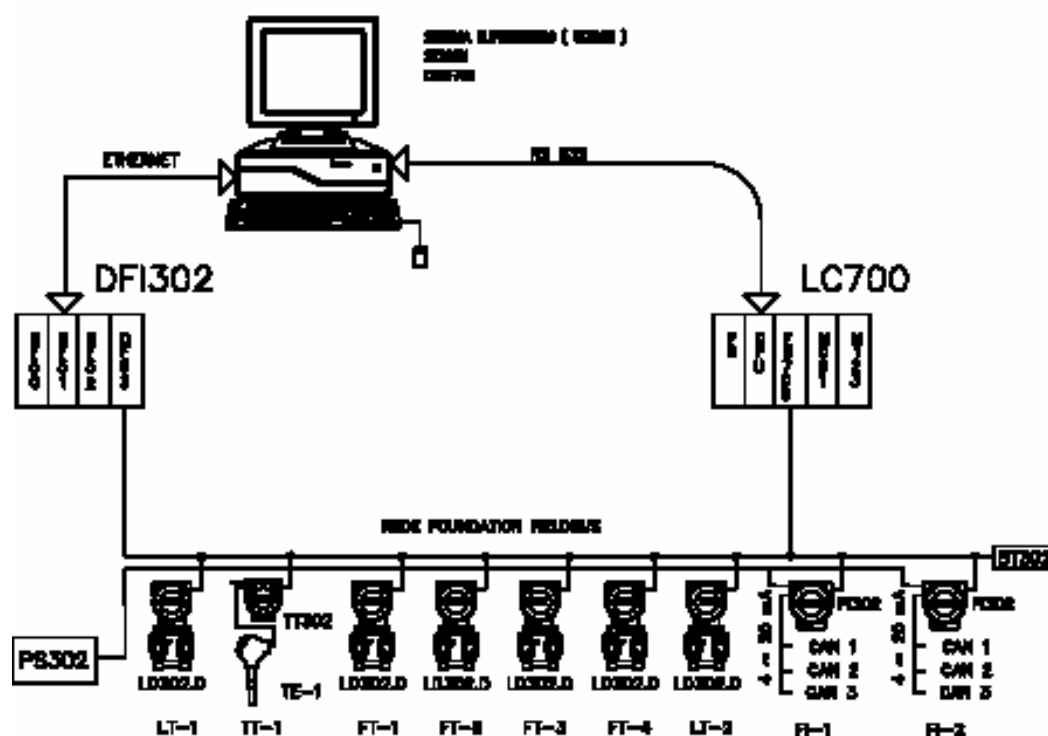


Figura 7 Configuração da rede *fieldbus*

Os dispositivos interligados à rede *fieldbus* são:

LD302 - LT1 – transmissor/controlador de nível do TAQ;

LD302 - LT2 – transmissor/controlador de nível do TP ;

TT302 - TT1 – transmissor/controlador temperatura do TP e transmissor de temperatura 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.

### 3.5 Implementação da estratégia de controle na rede Fieldbus

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

As variáveis controladas (LT1, LT2, TT1, TT2 e FT4) não 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 a variação na abertura da válvula de 0 a 100%, e no caso da temperatura, a atuação de 0 a 10 V corresponde a variação no ângulo de disparo de 0 a 180 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 *fieldbus* 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 *fieldbus* 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 0 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 10 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, 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:

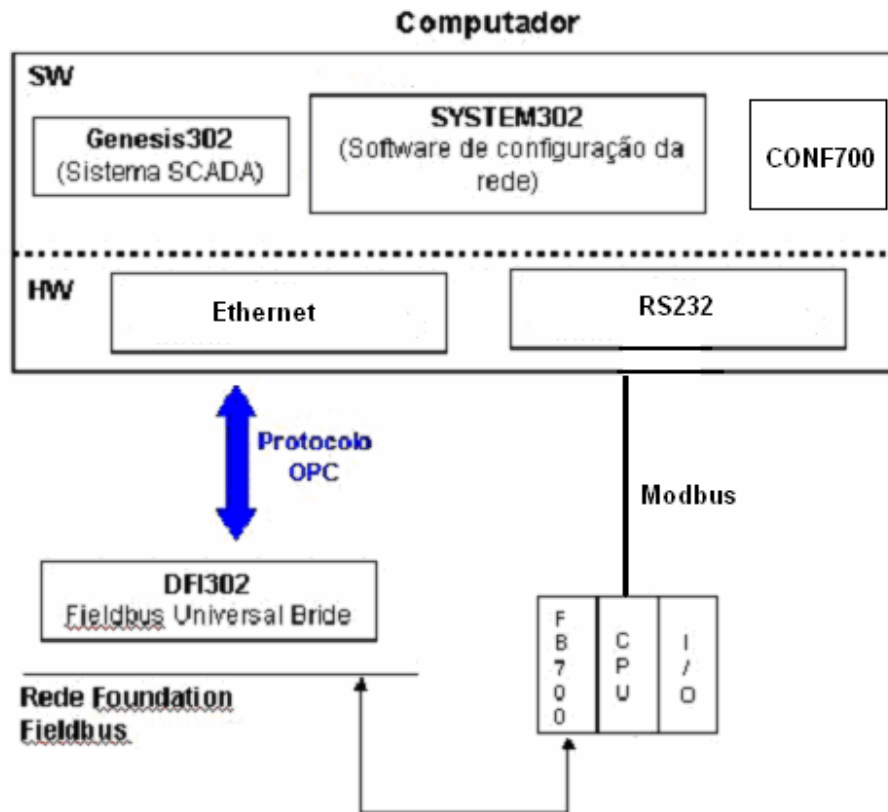
A temperatura do TP é lida pelo sensor de temperatura TE1 do transmissor/controlador TT1 e controlada pelo PID do próprio TT1. O valor gerado para a variável manipulada é enviado para o dispositivo conversor FI302, que converte o valor em sinal de corrente e envia para a válvula TCV1. Já a temperatura do TAQ é lida pelo sensor de temperatura TE2, 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 termoresistências 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.

### **3.6 Sistema de supervisão**

O sistema de supervisão utilizado no STEC/MTV é GENESIS 32, da Iconics, funcionando em ambiente Windows XP. O Genesis 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, e para armazenar dados históricos.

A comunicação entre o sistema de supervisão e a rede *fieldbus* é via rede Ethernet e protocolo OPC, da mesma forma que o aplicativo de configuração.

A figura 8 mostra o fluxo de comunicação durante a configuração e supervisão do sistema.



**Fig. 8 Fluxo de informação no STEC**

#### 4 Atividades práticas

- 1- Estudar o documento de descrição do processo para conhecer e entender o sistema de tanques interativos
- 2- Utilizar a descrição do processo para identificar na planta os seguintes elementos do sistema
  - Três tanques (reservatório TR, aquecedor TAQ e produto TP);
  - Duas bombas (B1 e B2)
  - Quatro válvulas de controle de vazão
  - Dois transmissores de nível
  - Dois transmissores de temperatura

- Quatro transmissores de vazão
  - Um circuito de aquecimento
- 3- Utilizar o diagrama representativo da arquitetura do sistema (figuras 7 e 8) para identificar na planta os seguintes elementos:
    - Micro computador para configuração/operação do sistema
    - Controlador lógico programável LC700
    - Cartões de I/O do controlador LC700
    - Instrumentos da rede *fieldbus*
    - Interface entre o computador e a rede *fieldbus*
    - Interface entre o computador e o CLP
    - Interface entre o CLP e a rede *fieldbus*
  - 4- Utilizar os programas de configuração Syscon (para a rede Fildbus) e Conf700 (para o controlador) para estudar e entender a estratégia de controle implementada.
  - 5- Colocar o sistema em operação para verificar seu funcionamento e operação, para isto siga o roteiro com os procedimentos de parada e partida em anexo.
  - 6- Levando em consideração as características de sistema distribuído do STEC e os documentos estudados, definir, implementar e testar uma malha de controle diferente das malhas já projetadas.

## 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.pfd>

*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/>

## ANEXO I

### PROCEDIMENTOS DE PARTIDA DO STEC

1. Verificar o nível do reservatório externo. O Reservatório deve estar cheio
2. Verificar o nível do reservatório de aquecimento. Mínimo de 300 mm para ligar o resistor de aquecimento
3. Fechar válvula manual de vazão de saída do tanque de aquecimento
4. Fechar a válvula de alívio da tubulação de ar comprimido.
5. Ligar o computador
6. Ligar a instrumentação.
7. Inicializar o aplicativo de configuração da rede Fieldbus Syscom
8. Verificar, e se necessário alterar, os parâmetros de configuração dos equipamentos.
9. Carregar a nova configuração caso os parâmetros tenha sido alterados
10. Ligar o compressor e esperar a pressão de ar atingir 2 bar
11. Ligar as bombas
12. Abrir a válvula manual de vazão de saída do tanque de aquecimento
13. Inicializar o aplicativo de supervisão Wizcon (login: usuario pass: stec)
14. Ligar o resistor apenas se for trabalhar com controle de temperatura
15. Visualizar os gráficos de tendência e alterar o valor de referência das malhas por meio do Wizcon

### PROCEDIMENTOS DE PARADA DO STEC

1. Desligar o resistor
2. Desligar as bombas
3. Fechar a válvula manual de vazão de saída do tanque de aquecimento
4. Desligar a instrumentação
5. Sair do aplicativo de supervisão e desligar o computador
6. Desligar o compressor
7. Abrir a válvula de alívio da tubulação de ar comprimido

### Parâmetros de referência para operação

Malha	Kp	Ti (minutos)	Td (minutos)	Faixa de variação do SP
Vazão de entrada no tanque de produto	0,275	0,05	0	15-35 l/minuto
Nível do tanque de produto	15	0,08	0,2	300-500 mm
Nível do tanque de aquecimento	8	0,11	0,3	300-400 mm
Temperatura no tanque de produto	12	3,07	9,21	28-32 °C
Temperatura no tanque de aquecimento	10,04	8,64	0	40-45 °C