

RAUL DE SIQUEIRA CARDOSO FILHO

**DESENVOLVIMENTO DE SIMULADORES PARA TREINAMENTO EM
SINTONIA DE CONTROLADORES APLICADOS A EQUIPAMENTOS
COM GRANDE RISCO DE ACIDENTE**

UBERLÂNDIA – MG
2007

RAUL DE SIQUEIRA CARDOSO FILHO

**DESENVOLVIMENTO DE SIMULADORES PARA TREINAMENTO EM
SINTONIA DE CONTROLADORES APLICADOS A EQUIPAMENTOS
COM GRANDE RISCO DE ACIDENTE**

Dissertação apresentada à Universidade
Federal de Uberlândia – Faculdade de
Engenharia Elétrica para obtenção do título de
Mestre em Ciências.

Área de Concentração:
Processamento da Informação

Orientador
Prof. Dr. Luciano Vieira Lima

Banca Examinadora
Prof. Dr. Edgard Afonso Lamounier Junior
Prof. Dr. Edilberto Pereira Teixeira

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

- C268d Cardoso Filho, Raul de Siqueira, 1936-
 Desenvolvimento de simuladores para treinamento em sintonia de
 controladores aplicados a equipamentos com grande risco de acidente /
 Raul de Siqueira Cardoso Filho. - 2007.
 84 f. : il.
- Orientador: Luciano Vieira Lima.
 Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Pro-
 grama de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
 Inclui bibliografia.
1. Controle de processo - Teses. 2. Simuladores - Teses. I. Lima,
 Luciano Vieira. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de
 Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU: 681.51

RAUL DE SIQUEIRA CARDOSO FILHO

**DESENVOLVIMENTO DE SIMULADORES PARA TREINAMENTO EM
SINTONIA DE CONTROLADORES APLICADOS A EQUIPAMENTOS
COM GRANDE RISCO DE ACIDENTE**

Dissertação apresentada à Universidade
Federal de Uberlândia – Faculdade de
Engenharia Elétrica para obtenção do título de
Mestre em Ciências

APROVADA em 09 de maio de 2007.

Prof. Dr. LUCIANO VIEIRA LIMA

UFU

Prof. Dr. EDGARD A. LAMOUNIER JUNIOR

UFU

Prof. Dr. EDILBERT PEREIRA TEIXEIRA

UNIUBE

Dr. Luciano Vieira Lima
SIGLA DEPARTAMENTO - UFU
(Orientador)

UBERLÂNDIA – MG
2007

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE EQUAÇÕES.....	ix
RESUMO.....	x
ABSTRACT.....	xi
1 INTRODUÇÃO.....	01
1.1 Motivação para desenvolver o tema do trabalho.....	01
1.2 Algumas pesquisas sobre sintonia de controladores P+I+D.....	03
1.3 Objetivos do trabalho.....	04
2 BREVE ESTUDO SOBRE VÁLVULAS DE CONTROLE E SUAS PARTES PRINCIPAIS.....	05
2.1 Introdução.....	05
2.2 Tipos de válvulas de controle.....	09
2.3 Conceito de curva característica inerente de uma válvula de controle.....	11
2.4 Conceito de curva característica instalada de uma válvula de controle.....	14
2.4.1 Desenvolvimento da equação característica instalada de uma válvula linear.....	15
2.4.2 Desenvolvimento da equação característica instalada de uma válvula igual porcentagem.....	16
2.4.3 Desenvolvimento da equação característica instalada de uma válvula parabólica.....	17
2.5 Influência da curva instalada da válvula de controle na sintonia do controlador.....	18
2.6 Desenvolvimento da equação do atraso de tempo de uma válvula de controle.....	22
3 EQUIPAMENTO PARA TESTE DE UMA VÁLVULA DE CONTROLE.....	24
3.1 Introdução.....	24
3.2 Descrição da bancada de teste da válvula de controle.....	24
3.3 Desenvolvimento da equação matemática para bancada de teste.....	26
3.4 Identificação dos elementos na tela de operação da bancada de testes.....	29
3.5 Procedimento para teste de C_v de uma válvula de controle.....	30

3.6 Procedimento para se obter a curva instalada da válvula de controle.....	32
4 DESENVOLVIMENTO DOS MODELOS MATEMÁTICOS.....	36
4.1 Introdução.....	36
4.2 Comportamento dinâmico do nível de um tanque no cilindro reto vertical.....	36
4.3 Comportamento dinâmico do nível de um tanque no cilindro reto horizontal..	39
4.4 Apresentação da equação do controlador P+I+D.....	41
4.5 Desenvolvimento da equação do atraso de tempo da válvula de controle....	42
5 DESCRIÇÃO DOS SISTEMA DE CONTROLE DE NÍVEIS DESENVOLVIDOS.....	43
5.1 Apresentação da tela de simulação do controle de nível de um tanque.....	43
5.2 Apresentação da tela de simulação do controle de nível da caldeira.....	46
5.3 Comportamento do Controle de nível da caldeira para os dados iniciais.....	47
6 EXPERIÊNCIA E TESTE DO SISTEMA DESENVOLVIDO.....	48
6.1 Para o tanque cilindro reto vertical – Teste nr. 1.....	48
6.2 Para o tanque cilindro reto vertical – Teste nr. 2.....	55
6.3 Para o tanque cilindro reto vertical – Teste nr. 3.....	59
6.4 Para o tanque cilindro reto vertical – Sintonia experimental.....	64
6.5 Conclusões sobre os métodos de sintonia de controladores.....	66
7 CONTROLE DE NÍVEL DE UMA CALDEIRA.....	66
7.1 Tanque cilíndrico reto horizontal.....	66
7.1.1 Configuração dos parâmetros da caldeira.....	67
7.1.2 Configuração da válvula de controle a ser utilizada no teste.....	68
7.1.3 Configuração Inicial para os Controladores P+I+D.....	71
7.1.4 Descrição da malha de controle de nível a 3 elementos.....	74
7.2 Sintonia da malha de controle de nível pelo método experimental.....	75
8 CONCLUSÃO.....	78
9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79
10 ANEXO A – Alguns tipos e modelos de válvula de controle.....	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Válvula de controle tipo globo e seus acessórios. Cortesia Fisher.....	05
Figura 2.2 Atuador tipo mola e diafragma Cortesia Fisher.....	06
Figura 2.3 Atuador tipo pistão retorno por mola. Cortesia da Hiter.....	06
Figura 2.4 Atuador tipo pistão dupla ação. Cortesia da Hiter.....	07
Figura 2.5 Corpo de uma válvula de controle tipo globo. Cortesia Fisher.....	07
Figura 2.6 Válvula de controle tipo globo e seus acessórios.Cortesia Fisher.....	08
Figura 2.7 Corte de uma válvula de controle tipo globo. Cortesia Fisher.....	09
Figura 2.8 Válvula de controle tipo borboleta. Cortesia Fisher.....	10
Figura 2.9 Válvula de controle tipo esfera e acessórios.Cortesia Fisher.....	10
Figura 2.10 Corpo de uma válvula de controle tipo obturador excêntrico.Cortesia Masoneilan.....	11
Figura 2.11 Válvula de controle tipo esfera segmenta e acessórios. Cortesia Fisher.....	11
Figura 2.12 Curvas características inerentes de válvulas de controle.....	12
Figura 2.13 Família de curvas instaladas de uma válvula de controle com característica inerente linear.....	16
Figura 2.14 Família de curvas instaladas de uma válvula de controle com característica inerente igual porcentagem.....	17
Figura 2.15 Família de curvas instaladas de uma válvula de controle com característica inerente parabólica.....	18
Figura 2.16 Sistema de controle de nível de um tanque para armazenamento de um líquido.....	19
Figura 2.17 Diagrama de blocos do sistema de controle do tanque de armazenamento.....	19
Figura 2.18 Gráfico mostrando a influência da curva característica instalada na sintonia do controlador.....	20
Figura 3.1 Esquemático de uma bancada para determinação do Cv de uma válvula de controle.....	25
Figura 3.2 Curva de calibração de uma válvula inerente linear.....	26

Figura 3.3 Sistema de tubulação e medidores de uma bancada de teste de Cv.....	27
Figura 3.4 Tela de simulação da bancada de testes para válvulas de controle.	30
Figura 3.5 Procedimento de teste para se obter pontos da curva inerente de uma válvula de controle.....	32
Figura 3.6 Teste para se obter pontos da curva instalada de uma válvula de controle.....	33
Figura 3.7 Teste de uma válvula inerente igual porcentagem de acordo com a tabela do fabricante.....	34
Figura 3.8 Teste mostrando as curvas e instalada de uma válvula de controle.	35
Figura 4.1 Tanque cilíndrico na posição vertical.....	37
Figura 4.2 Corte longitudinal e transversal do tubulão de uma caldeira.....	39
Figura 4.3 Balanço de massa no tubulão de uma caldeira.....	40
Figura 5.1 Identificação na tela de simulação para o controle de nível simples.	44
Figura 5.2 Identificação das funções na tela de controle de nível da caldeira...	46
Figura 6.1 Sistema de controle tende a oscilar com amplitude amplificada.....	49
Figura 6.2 Tela mostrando a variável controlada oscilando com amplitude constante e a determinação dos valores da equação de Ziegler.....	53
Figura 6.3 Determinação da estabilidade do sistema após a aplicação do método de Ziegler-Nichols.....	54
Figura 6.4 Comportamento do sistema de controle de nível para os parâmetros iniciais do controlador P+I+D.....	56
Figura 6.5 Gráfico mostrando a tentativa de se criar oscilações com amplitude constante.....	57
Figura 6.6 Gráfico mostrando a determinação do período de oscilações com amplitude constante.....	58
Figura 6.7 Teste de estabilidade do sistema de controle de nível.....	59
Figura 6.8 Influência do ganho da curva instalada da válvula na sintonia do controlador.....	60
Figura 6.9 Comportamento do sistema ao se diminuir o ganho do controlador.	61
Figura 6.10 Determinação do período de oscilação com amplitude constante pelo método de Ziegler-Nichols.....	62
Figura 6.11 Teste de estabilidade do sistema de controle.....	63
Figura 6.12 Fase inicial do método de sintonia experimental.....	65

Figura 6.13 Teste do método de sintonia experimental mostrando a resposta a uma variação do set point.....	66
Figura 7.1 Tela de configuração dos parâmetros da caldeira e seus instrumentos.....	67
Figura 7.2 Tela que permite selecionar a curva inerente e instalada da válvula de controle.....	70
Figura 7.3 Identificação dos campos da tela da caldeira.....	71
Figura 7.4 Descrição da malha de controle de nível da caldeira.....	74
Figura 7.5 Configuração dos dados da caldeira e seus controladores.....	75
Figura 7.6 Seleção das curvas inerente e instalada da válvula de controle.....	76
Figura 7.7 Gráficos mostrando o método de sintonia experimental da caldeira.	77
Figura 1A Válvula utilizada em dessuperaquecedores de vapor.....	80
Figura 2A Válvula globo aplicação em uso geral.....	80
Figura 3A Válvula globo uso geral com internos anti-cavitantes.....	81
Figura 4A Válvula globo para uso geral internos gaiola.....	81
Figura 5A Válvula globo de 3 vias convergente divergentespara.....	82

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 2.3.1 Curva característica inerente linear	13
Equação 2.3.2 Curva característica inerente igual porcentagem	13
Equação 2.3.3 Curva característica inerente parabólica	13
Equação 2.3.4 Curva característica instalada geral.....	14
Equação 2.3.5 Pressão reduzida o borboleta.....	14
Equação 2.3.6 Curva característica instalada completa.....	14
Equação 2.4.1.1 Curva característica instalada da válvula linear.....	15
Equação 2.4.2.1 Curva característica instalada da válvula =%.....	16
Equação 2.4.3.1 Curva característica instalada da válvula parabólica.....	18
Equação 2.5.1 Função de transferência global do controle de nível.....	20
Equação 2.6.1 Atraso da válvula de controle.....	23
Equação 3.3.1 Modelo matemático da bancada de teste.....	28
Equação 4.2.1 Vazão de descarga do tanque.....	38
Equação 4.2.2 Modelo matemático do comportamento do nível no tanque.....	38
Equação 4.2.3 Modelo matemático do comportamento do nível na caldeira.....	40
Equação 4.2.4 Algoritmo de controle P+I+D no domínio do tempo.....	41
Equação 4.2.5 Algoritmo de controle P+I+D discretode controle.....	41

RESUMO

DESENVOLVIMENTO DE SIMULADORES PARA TREINAMENTO EM SINTONIA DE CONTROLADORES APLICADOS A EQUIPAMENTOS COM GRANDE RISCO DE ACIDENTE

O objetivo deste trabalho foi o de desenvolver simuladores dinâmicos em tempo real para utilizá-los como ferramenta de apoio em cursos de nível técnico de instrumentação e controle de processos. Os simuladores desenvolvidos foram os seguintes:

- simulador de uma bancada de testes para válvulas de controle. Nesta simulação são apresentados os conceitos de C_v , curva inerente e instalada de uma válvula de controle bem como o procedimento de operação da bancada
- simulador em tempo real de um controle de nível P+I+D para um tanque cilindro reto na posição vertical, nesta fase são apresentados os métodos de sintonia de Ziegler-Nichols para sistemas com diferentes tempos de resposta e simulado qual a influência do ganho da válvula de controle na sintonia encontrada. Nesta fase, apresentamos um sistema com tempo de resposta rápido. A mesma simulação é feita utilizando-se o mesmo sistema com tempo de resposta maior. Durante a simulação é mostrada a influência do ganho da válvula no desempenho do controle e qual a razão desta influência. Apresentam-se as vantagens e desvantagens do método de sintonia de Ziegler-Nichols nas aplicações práticas.
- simulador em tempo real do controle de nível a três elementos de uma caldeira. Nesta fase, é mostrado um método empírico para sintonia de controlador. Este método apresenta vantagens de ordem prática em relação ao método de Ziegler-Nichols.
- este trabalho é a de permitir que determinados tipos de análises sobre o comportamento de sistemas dinâmico, bem como suas soluções podem ser executados nas salas de aula, sem as preocupações e cuidados sobre segurança, que normalmente ocorrem, quando realizados em ambientes industriais. A maior contribuição do trabalho é a de incluir nas aulas práticas a apresentação dos métodos experimentais, métodos estes, como o próprio nome indica, só podem ser

realizados no equipamento real. Acredita-se que a implementação de simuladores, em tempo real, traria como benefício imediato uma redução substancial nos custos de implantação de plantas piloto utilizadas para o desenvolvimento de aulas práticas.

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF SIMULATORS TO BE USED TO TRAINING THE TUNNING OF CONTROLLERS OF EQUIPMENTS WITH HIGH RISK OF ACCIDENTS.

The objective of this work is to develop real time dynamic simulators to use them as supporting tools in instrumentation and process control technical courses. The developed simulators are as following :

- simulator for the equipment to test control valves showing all the accessories necessary to test a control valve. In this phase the concepts of C_v , curves inherent and installed of a control valve are introduced.
- simulator in real time of a level control using P+I+D controller for a tank with the form of cylinder in the vertical position, in this phase the Ziegler-Nichols tuning methods are presented for systems with different response times and which are the influence of the control valve gain in the calculated tuning parameters. In this phase a system with fast response are presented. The same simulation is made using the same system with larger response time. During this simulation the influence of the gain of the valve is shown in the process response of the control and what is procedure to solve this problem. At this part, the advantages and disadvantages of the Ziegler-Nichols tuning methods in a practical applications.
- simulator in real time of three elements level control for a boiler. In this phase a experimental method is showing for controller's tuning parameters. The experimental method presents advantages of practical order in reference of Ziegler-Nichols method.
- This work was developed to permits to analyse the behaviour of dynamic system as well to study solutions that can do in the classroom without the concerns about safety which normally occurs in the industrial environment. The great target of this work is to show in the classroom experimental methods, as the own name indicates, only can be done in the real equipment. Also we believe that significant cost reduction can be achieve if simulators are used instead pilots plants.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação para desenvolver o tema do trabalho

Os sistemas de controle dos processos industriais são fundamentais para que uma unidade industrial possa operar com produtividade, qualidade e segurança em relação ao pessoal, aos equipamentos e ao meio ambiente.

Os custos envolvidos no projeto, equipamentos, instalação, comissionamento, partida e pré-operação de uma nova fábrica justificam por si só, o desenvolvimento de novas ferramentas para apoio e treinamento de pessoal responsável em manter esses equipamentos em operação e no ótimo de seu desempenho.

Para que o desempenho ótimo na operação de uma unidade industrial possa ser atingido, é necessário e imprescindível que os controladores de seus sistemas de controle de processo estejam adequadamente sintonizados e que seus equipamentos e estratégias de suas malhas de controle tenham sido devidamente projetados.

Uma motivação que nos levou a desenvolver este trabalho foi a tentativa de apresentar, de forma mais prática e objetiva os conceitos de válvulas de controle e suas curvas, métodos práticos de sintonia de controladores P+I+D e o controle de nível de caldeiras.

A expectativa esperada, é que a utilização das ferramentas, desenvolvidas neste trabalho, sejam de grande valia para a transferência de informações e conceitos para os estudantes de nível técnico, da área de instrumentação e controle de processos industriais, facilitando de certa forma o entendimento e esclarecendo dúvidas, que normalmente ocorrem na prática com relação aos temas abordados.

No mercado de simuladores dinâmicos de sistemas de controle de processos, existem boas ferramentas, mais completas e complexas que poderiam ser utilizadas com essa finalidade, porém seus custos de aquisição e grau de complexidade são proibitivos para aplicações didáticas. Normalmente elas mesmas, são utilizadas por algumas empresas na fase de projeto e treinamento de seu pessoal, visando assim, uma melhoria na qualidade do projeto e uma redução nos tempos de

comissionamento e partida das diversas unidades que compõem uma planta industrial.

Tendo em vista que, previamente, a implantação do projeto, informações importantes a respeito do funcionamento e operação do processo podem ser conhecidas e utilizadas, tais como: parâmetros de sintonia dos controladores, avaliação do desempenho e conseqüentemente possíveis erros nas estratégias de controle utilizadas, dimensionamento adequado dos equipamentos, treinamento dos operadores e etc. O conhecimento antecipado das informações, disponibilizadas pela simulação, tem como resultado um impacto direto nos custos do projeto, instalação e operação, tendo em vista que, na implantação de um projeto nesta área (bem como em qualquer etapa de um setor produtivo), as informações e observações extraídas de um simulador real sobre o funcionamento e operação do processo são extremamente relevantes, citando entre elas: os parâmetros ótimos de sintonia dos controladores, sob condições simuladas, avaliação do desempenho e conhecimento prévio de possíveis erros nas estratégias de controle utilizadas, no dimensionamento adequado dos equipamentos e nas estratégias de treinamento dos operadores.

Durante minha experiência profissional, como instrutor na área de treinamento em automação e controle de processo, ficou evidente que, a maneira mais didática de se passar informações e conceitos sobre um determinado assunto, é fazer com que o aluno vivencie todas as experiências, que provavelmente irão ocorrer na sua vida profissional, isto desperta no aluno um interesse adicional pelo tema apresentado. Como um dos módulos do curso de automação é transmitir as informações e conceitos de como sintonizar controladores e a melhor maneira de fazê-lo, acreditamos que o desenvolvimento de simuladores permitiria ao aluno vivenciar todas as experiências que ocorrem, na vida prática, quando da sintonia de controladores. Na prática, esta sintonia é realizada com o processo em operação normal, portanto, implicando geralmente em riscos e pressões, que o profissional tem que enfrentar, para realizar esta tarefa. Acredita-se, que um treinamento realizado mais próximo das condições reais que ocorrem na indústria, através de simuladores irá desenvolver no profissional uma maior confiança e tranquilidade na execução das tarefas diárias de sua profissão, preparando-o não apenas para as situações normais de operação, mas também, para reagir a imprevistos com um maior índice de certeza para executar essa tarefa.

A simulação de controles de processos, com a finalidade de treinamento e apoio ao projeto não é nova. Antes do advento dos computadores digitais essas simulações eram realizadas em computadores analógicos (WEYRICK, 1986), que apresentavam a solução de sistemas de equações diferenciais em tempo real, as quais representavam o modelo matemático do sistema em estudo. Esses computadores eram extremamente dispendiosos e com grande complexidade e dificuldade em sua programação efetivada por “hardware” através de ligações apropriadas entre os diversos blocos operacionais.

Com o advento dos computadores digitais, esse tipo de simulação ficou grandemente facilitada, pois permite que os modelos matemáticos de processos e controladores pudessem ser programados, executados e visualizados em tempo real, de tal forma que, muitas dúvidas sobre estratégias de malhas de controle e sintonia de controladores puderam ser mais facilmente esclarecidas.

1.2 Algumas pesquisas sobre sintonia de controladores P+I+D

Algumas pesquisas foram feitas com objetivo de se verificar quantos trabalhos foram realizados e teorias desenvolvidas no campo de sintonia de controladores. A seguir, são apresentados aqueles que consideramos os mais importantes, tais como:

- Método de Ziegler-Nichols para malha fechada (COUGHANOWR; KOPPEL, 1965);
- Método de Shinskey para malha fechada (MATLEY, 1986);
- Método de Cohen-Coon para malhas fechadas (MATLEY, 1986);
- Método prático ou experimental para malhas fechadas (MATLEY, 1986);
- Método da curva de reação para malha aberta (MATLEY, 1986).

O programa de simulação para a sintonia dos parâmetros do controlador foi desenvolvido baseado no método de Ziegler-Nichols e no método prático, por razões que serão apresentadas no decorrer da apresentação do trabalho.

1.3 Objetivos do trabalho

Este trabalho tem por objetivo apresentar os conceitos e implementar simuladores para os assuntos sintonia de controladores P+I+D e válvulas de controle para cursos de instrumentação e automação industrial para a formação profissional de técnicos especializados dedicados a esta área.

Utilizando este tipo de ferramenta, simuladores ou programas semelhantes, é possível ao instrutor direcionar o aluno a conceitos importantes na área de controle de processos, tais como:

- apresentação de tipos e principais partes de uma válvula de controle;
- comportamento dinâmico da válvula de controle;
- a influência da curva instalada da válvula de controle nos parâmetros de sintonia do P+I+D;
- o conceito de ganho, integral e derivada;
- a influência da constante de tempo de uma válvula de controle nos parâmetros de sintonia P+I+D;
- quais os riscos e desvantagens da aplicação de métodos em malha fechada para determinação dos parâmetros de sintonia;
- método prático ou experimental de sintonia;
- como na prática, as telas de sintonia são apresentadas pelos Sistemas Digitais de Controle Distribuído - SDCCD e Sistemas Supervisórios.

O trabalho foi desenvolvido apresentando-se na primeira fase o controle de nível de um tanque de armazenamento de um líquido e posteriormente, o controle de nível a três elementos do tubulão de vapor de uma caldeira. Foi escolhido o controle de nível de uma caldeira, por ser este, um equipamento utilizado praticamente em quase todas as plantas industriais.

O presente trabalho, além de poder ser utilizado em cursos presenciais pode também ser aplicado em cursos de EAD – Ensino A Distância, no qual a simulação é um excelente recurso para integrar teoria e prática, principalmente em temas em que o risco pessoal é elevado nos processos práticos reais e o custo é um fator impeditivo para capacitar o aluno e fornecer-lhe habilidades nestas áreas.

2 BREVE ESTUDO SOBRE VÁLVULAS DE CONTROLE E SUAS PARTES PRINCIPAIS

2.1 Introdução

As válvulas de controle representam papel de fundamental importância no bom desempenho do sistema de controle, pois é através dela que a energia é manipulada para o processo que está sendo controlado, para atender os requisitos exigidos pelo sistema de controle.

Na terminologia de controle, as válvulas recebem a designação de elemento final de controle, pois se pensarmos em atribuir um sentido para os sinais entre os diversos elementos que compõem a malha de controle, a válvula de controle seria o último elemento, daí sua denominação de elemento final de controle.

A válvula de controle é um dispositivo eletro-mecânico de construção sofisticada, sendo constituída por elementos mecânicos, pneumáticos, elétricos e eletrônicos, que interagem entre si, dando funcionamento adequado e previsto para a válvula. Na Figura 2.1 é mostrada uma válvula de controle e seus principais acessórios.

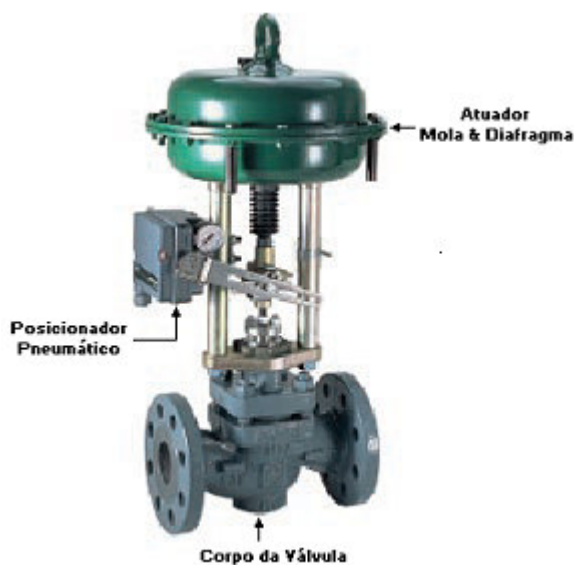


Figura 2.1 – Válvula de controle tipo globo e seus acessórios. Cortesia da Fisher

A seguir, são descritas as partes principais de uma válvula de controle, que são:

- **Atuador**

É o sistema responsável pelo movimento de abertura da válvula de controle. É através do atuador que fornecemos potência a válvula. Pode ser eletro-mecânico ou pneumático-mecânico. No caso do eletro-mecânico o movimento é gerado por um motor elétrico e usualmente esse tipo de válvula não é utilizada em controle, devido a baixa velocidade de abertura e fechamento. O atuador pneumático é o mais utilizado para válvulas de controle e podem ser:

- diafragma com retorno por mola;

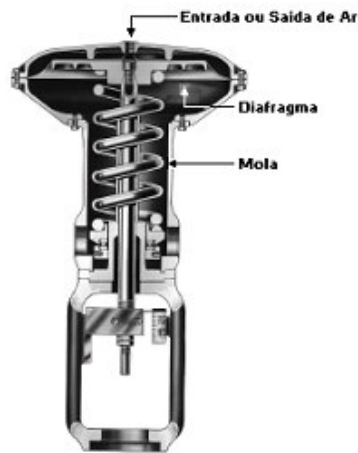


Figura 2.2 – Atuador tipo mola e diafragma Cortesia da Fisher

- pistão retorno por mola;

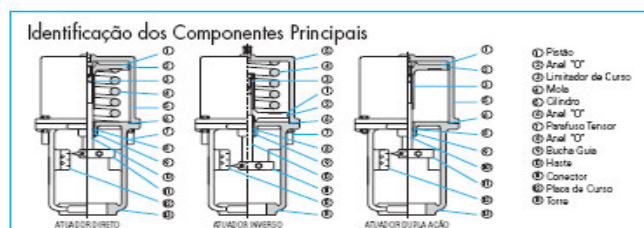


Figura 2.3 – Atuador tipo pistão retorno por mola Cortesia da Hiter

- pistão de dupla ação.

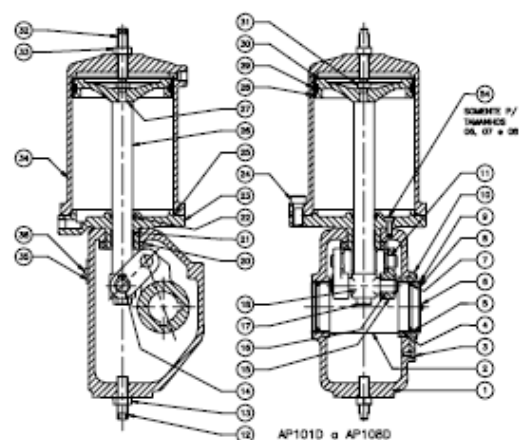


Figura 4 - ATUADOR DUPLA AÇÃO SEM VOLANTE - AP101D a AP108D.

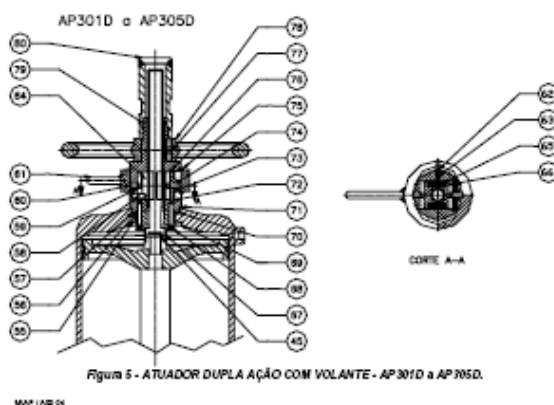


Figura 5 - ATUADOR DUPLA AÇÃO COM VOLANTE - AP301D a AP305D.

Figura 2.4 – Atuador tipo pistão dupla ação Cortesia da Hiter

• Corpo da Válvula de Controle

É o elemento mecânico da válvula por onde escoa o fluído de processo, que pode ser manipulado, através de elementos internos ao corpo, para fornecer ou retirar energia do processo (ex: variando a vazão através da válvula). Pode ser forjado ou fundido em aço carbono, aço inoxidável ou ligas nobres. No seu interior estão alojados o obturador e a sede da válvula. Na Figura 2.5 mostramos o corpo de uma válvula de controle do tipo globo. Nas extremidades do corpo estão os flanges que permitem conectar a válvula aos contra-flanges fixados na tubulação.



Figura 2.5 – Corpo de uma válvula de controle tipo globo Cortesia da Fisher

- **Acessórios da Válvula de Controle**

A válvula de controle pode apresentar os seguintes acessórios:

- ***Posicionador***

Sistema que garante que a válvula assuma a posição definida pelo controlador. Possui um sistema de retro-alimentação da posição da válvula, que verifica se a posição em que a válvula se encontra é aquela requerida pelo controlador. Os posicionadores podem ser pneumáticos ou eletro-pneumáticos.

Na Figura 2.6 apresenta-se uma válvula de controle completa com alguns de seus principais acessórios. O posicionador, como, anteriormente mencionado, é o elemento responsável em posicionar a abertura ou fechamento válvula de acordo com sinal recebido do controlador, com a finalidade da válvula executar com fidelidade o comando recebido do controlador. Na grande maioria das vezes, o fluído utilizado para dar potência ao posicionador é ar comprimido. Outros fluidos podem ser utilizados como, como por exemplo sistemas óleo-hidráulicos ou elétricos.

O posicionador tem também como função aumentar a potência fornecida o atuador e obedecer fielmente os comandos enviados pelo controlador.

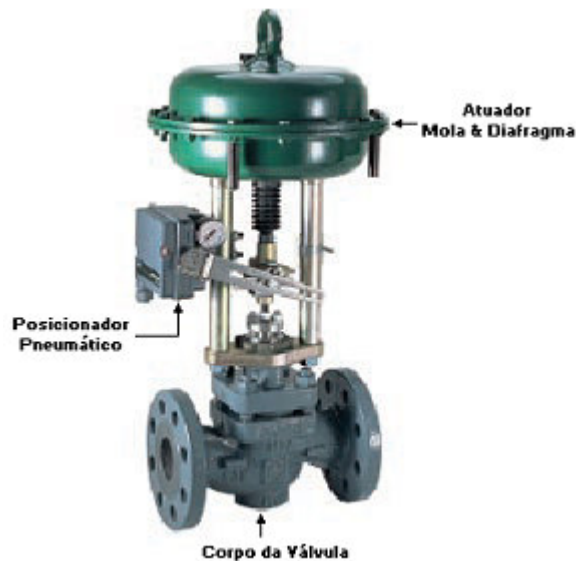


Figura 2.6 – Válvula globo e seus acessórios Cortesia da Fisher

- ***Transmissor de posição***

É o dispositivo responsável em enviar a posição da válvula para um sistema remoto, que pode um painel ou computador remoto. É utilizado apenas para indicar

ao operador a posição da válvula e não participa do controle. Pode ser pneumático ou eletrônico.

- ***Chaves Fim de Curso***

Tem por função enviar um sinal discreto, que possibilita a indicação remota da posição aberta ou fechada da válvula de controle. Não indica as posições intermediárias, como a sua própria designação indica.

2.2 Tipos de válvulas de controle

No mercado de equipamentos de instrumentação estão disponíveis vários tipos de válvulas de controle, cada tipo adequado para determinada aplicação ao processo e a custos.

De uma maneira geral, no projeto, as válvulas são dimensionadas para atender determinadas condições de operação e através dos resultados obtidos, os seus diâmetros são selecionados. O dimensionamento e escolha das válvulas de controle estão fora do escopo deste trabalho. Os tipos mais comuns de válvulas de controle encontradas no mercado são:

- Válvulas de controle tipo globo, são robustas e fabricadas nos diâmetros de 1" até 12". Na Figura 2.7 mostramos em corte, uma válvula de controle tipo globo com atuador mola e diafragma.

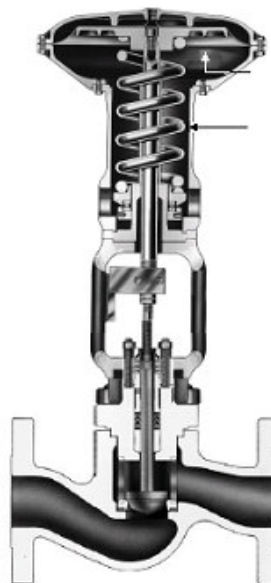


Figura 2.7 – Corte de uma válvula de controle tipo globo Fisher

- Válvulas de controle tipo gaiola, são robustas e fabricadas nos diâmetros de 0.5" até 12";
- Válvulas de controle tipo borboleta, são válvulas mais utilizadas em linhas de grande diâmetro e para quedas de pressão não muito elevadas. Existem válvulas borboletas de pequeno diâmetro, que algumas vezes são utilizadas. Na Figura 2.8 mostramos uma válvula de controle tipo borboleta, acompanhada dos acessórios, um posicionador pneumático, manômetros que indicam as pressões de ar comprimido e seu filtro regulador.



Figura 2.8 – Válvula de controle tipo borboleta e seus acessórios Cortesia da Fisher

- Válvulas de controle tipo esfera, são utilizadas em sistemas onde se deseja estanqueidade da válvula. São mais utilizadas em sistemas de intertravamento de segurança;



Figura 2.9 – Válvula de controle tipo esfera e acessórios Cortesia da Fisher

- Válvulas de controle tipo obturador excêntrico;

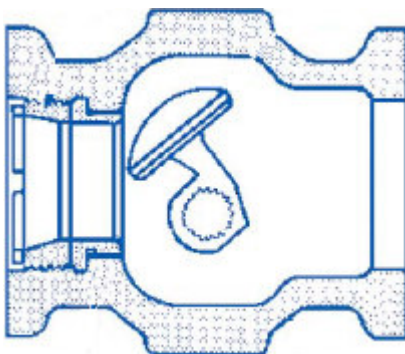


Figura 2.10 – Corpo de uma válvula de controle tipo obturador excêntrico Cortesia da Masoneilan

- Válvulas de controle tipo esfera segmentada. Utilizadas principalmente em produtos com viscosidade muito alta, tais como diversos tipos de polpa. Na Figura 2.11 pode-se observar uma válvula de controle tipo esfera segmentada, também acompanhada de seus acessórios que são: posicionador pneumático, filtro regulador de ar de suprimento para o posicionador e seus respectivos manômetros.



Figura 2.11 – Válvula de controle tipo esfera segmentada e acessórios Cortesia da Fisher

2.3 Conceito de curva característica inerente de uma válvula de controle

A curva característica inerente de uma válvula de controle é uma das informações de suma importância para o projetista de sistema de controle de processos industriais. Essa informação é obtida e disponibilizada pelo fabricante da válvula ao pessoal de projeto.

O fabricante publica os dados da curva inerente das válvulas de sua linha de fabricação através de catálogos técnicos na forma de tabelas ou gráficos.

A curva característica inerente de uma válvula de controle informa ao projetista qual a vazão em galões por minuto (gpm), para uma dada abertura da válvula, em determinada condição de operação da válvula de controle.

Define-se como coeficiente de vazão (C_v) de uma válvula de controle, a vazão em galões por minuto (gpm) de água a 60°F que pode escoar através da válvula, sujeita a uma diferença de pressão de 1 libra por polegada quadrada (psi), nas condições de regime permanente, isto é, a vazão e abertura da válvula permanecem constantes.

Na Figura 2.12 vemos as características inerentes disponibilizadas pelos fabricantes de válvulas de controle. As válvulas mais utilizadas na prática são aquelas com características lineares e igual porcentagem. Quando essas válvulas são instaladas no processo, elas trabalharão sob condições diferentes daquelas obtidas na bancada de teste. Quando essas válvulas são instaladas no processo, elas apresentam uma curva denominada de característica instalada, a qual vem a ser uma deformação da curva característica inerente, provocada pelas condições do processo.

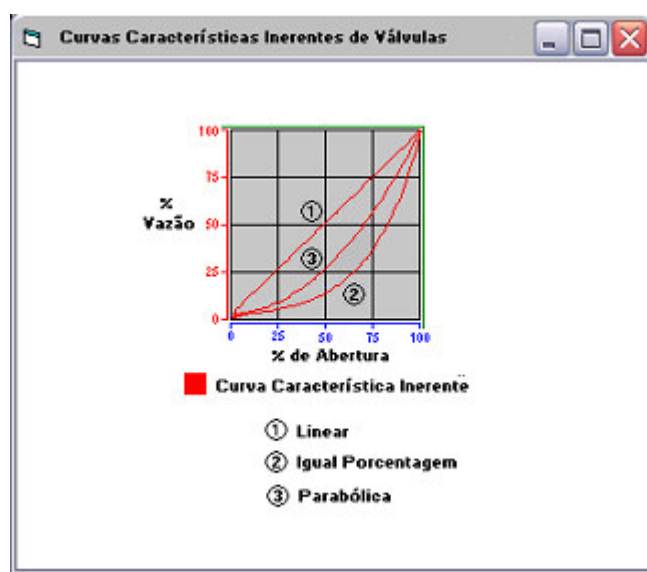


Figura 2.12 – Curvas características inerentes de válvulas de controle

No próximo capítulo será tratado desse assunto com maiores detalhes, incluindo o desenvolvimento de um simulador para essa finalidade.

A curva característica inerente apresenta a vazão que a válvula pode permitir sob as condições de indicadas na definição do coeficiente de vazão (C_v). Quando a válvula é instalada e colocada sob condições de operação, para a qual foi projetada, sua vazão não obedece a curva inerente, mas sim uma das curvas de uma família de curvas, denominada de curva instalada. A curva instalada da válvula de controle é gerada pela deformação da curva inerente.

Com o objetivo de explorar um pouco mais as curvas desenvolvidas pelas válvulas de controle, iremos apresentar as equações que representam essas curvas. As equações mencionadas foram utilizadas nas simulações desenvolvidas para apresentações mais próximas da prática de sintonia de controladores e utilizadas para mostrar a influência dessas curvas na sintonia dos controladores.

As equações das curvas características inerentes de válvulas de controle são as seguintes:

Nas equações abaixo foi utilizada a seguinte nomenclatura

μ_o = vazamento pela válvula quando totalmente fechada

n = % de abertura da válvula

μ_B = porcentagem da vazão

1. Equação para válvula com característica inerente linear

$$\mu_B = (1 - \mu_o)n + \mu_o \quad (2.3.1)$$

Neste caso, a vazão através da válvula de controle é diretamente proporcional a sua abertura.

2. Equação para a válvula com característica inerente igual porcentagem

Neste caso, o incremento em porcentagem dado a abertura da válvula é igual ao mesmo incremento em porcentagem da vazão através da válvula.

$$\mu_B = \mu_o^{(1-n)} \quad (2.3.2)$$

3. Equação para a válvula de controle com característica inerente parabólica

Neste caso, a vazão varia de forma quadrática com a abertura, como mostrado na equação abaixo.

$$\mu_B = (1 - \mu_o)n^2 + \mu_o \quad (2.3.3)$$

2.4 Conceito de curva característica instalada de uma válvula de controle

A curva característica instalada de uma válvula de controle, como mencionado anteriormente, é a deformação que ocorre na curva inerente da válvula, ocasionada por alterações nas condições de operação em que a válvula está sujeita e em particular nas perdas de carga singular e distribuída, devido o arranjo da instalação. Lembramos que na curva inerente, por definição, a queda de pressão na válvula é constante, e igual a 1 psi, conseqüentemente o arranjo da tubulação não está sendo considerado.

A curva instalada de uma válvula de controle é o resultado do sistema no qual a válvula está instalada. Influi na curva instalada da válvula as perdas de carga na tubulação e equipamentos a montante e a jusante da válvula. A equação abaixo, é válida para o sistema como um todo, e define quais variáveis influem na característica instalada da válvula.

A seguinte nomenclatura foi utilizada para as equações mencionadas:

μ_R = vazão relativa para a curva instalada

μ_B = vazão relativa para a curva inerente

$\Delta P_{ValvVazMax}$ = queda de pressão na válvula na vazão máxima

$\Delta P_{SistVazMax}$ = queda de pressão na válvula na vazão máxima

$$\mu_R = \sqrt{\frac{1}{(1-Pr) + \frac{Pr}{\mu_B^2}}} \quad (2.3.4)$$

sendo

$$Pr = \frac{\Delta P_{ValvVazMax}}{\Delta P_{ValvVazMax} + \Delta P_{SistVazMax}} \quad (2.3.5)$$

substituindo temos:

$$\mu_R = \sqrt{\frac{1}{\left(1 - \frac{\Delta P_{ValvVazMax}}{\Delta P_{ValvVazMax} + \Delta P_{SistVazMax}}\right) + \frac{\Delta P_{ValvVazMax}}{\mu_B^2 (\Delta P_{ValvVazMax} + \Delta P_{SistVazMax})}}} \quad (2.3.6)$$

A equação acima é geral e nos permite obter a curva instalada de uma válvula de controle tendo como entrada o valor μ_B das curvas inerentes, esses valores são obtidos de cada um dos tipos de válvula anteriormente discutidos.

A seguir iremos considerar em detalhes, o desenvolvimento da curva instalada para cada tipo de válvula. Os desenvolvimentos são análogos para cada válvula, porém aproveitaremos a oportunidade para utilizar os resultados obtidos nesta fase de estudo, no desenvolvimento dos simuladores que utilizados no treinamento. Durante esta fase, se houverem dúvidas nos conceitos apresentados, elas poderão ser esclarecidas mais facilmente.

2.4.1 Desenvolvimento da equação da curva característica instalada de uma válvula linear

Combinando a equação geral para a curva instalada e a inerente de uma válvula linear, obtemos a equação básica, que representa a família de curvas da característica instalada de uma válvula de controle com característica inerente linear. A família de curvas foi obtida variando-se o valor de Pr de 1 que representa a curva inerente até $Pr = 0.02$. O valor limite aceitável, postulado por Lovett¹ é de $Pr=0.05$, foi escolhido $Pr=0.02$ por motivos didáticos. A família de curvas instaladas apresentada, é adequada para introduzir o conceito de ganho da válvula de controle. Na aula prática será mostrado como o ganho da válvula pode influir na estabilidade do sistema de controle.

- **Característica Instalada de uma válvula com Curva Inerente Linear:**

$$Pr = \frac{\Delta P_{ValvVazMax}}{\Delta P_{ValvVazMax} + \Delta P_{SistVazMax}}$$

$$\mu_B = (1 - \mu_O)n + \mu_O$$

$$\mu_R = \sqrt{\frac{1}{\left(1 - \frac{\Delta P_{ValvVazMax}}{\Delta P_{ValvVazMax} + \Delta P_{SistVazMax}}\right) + \frac{\Delta P_{ValvVazMax}}{(\Delta P_{ValvVazMax} + \Delta P_{SistVazMax})(\mu_B = (1 - \mu_O)n + \mu_O)^2}}}$$

(2.4.1.1)

Na Figura 2.13 é mostrada a família de curvas características instalada de uma válvula com característica inerente linear.



Figura 2.13 – Família de curvas instaladas de uma válvula com característica inerente linear

2.4.2 Desenvolvimento da equação da curva característica instalada de uma válvula igual porcentagem

Analogamente, à obtenção da família de curvas instaladas da válvula linear, podemos estabelecer a família de curvas instalada para a válvula igual porcentagem. Essas famílias de curvas são mostradas na Figura 2.14

$$Pr = \frac{\Delta P_{\text{ValvVazMax}}}{\Delta P_{\text{ValvVazMax}} + \Delta P_{\text{SistVazMax}}}$$

$$\mu_B = \mu_O^{(1-n)}$$

$$\mu_R = \sqrt{\frac{1}{\left(1 - \frac{\Delta P_{\text{ValvVazMax}}}{\Delta P_{\text{ValvVazMax}} + \Delta P_{\text{SistVazMax}}}\right)} + \frac{\Delta P_{\text{ValvVazMax}}}{(\Delta P_{\text{ValvVazMax}} + \Delta P_{\text{SistVazMax}})(\mu_B = \mu_O^{(1-n)})^2}}$$

(2.4.2.1)

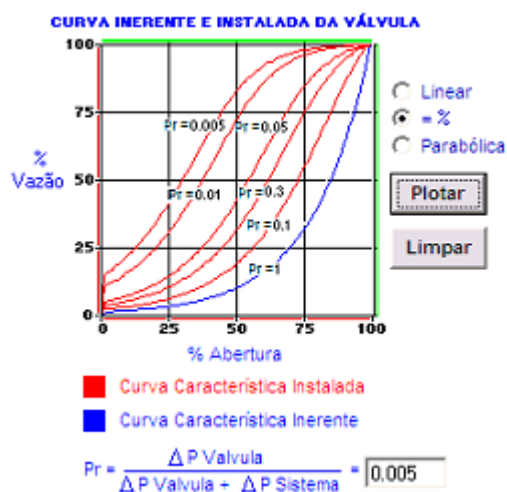


Figura 2.14 – Família de curvas instaladas de uma válvula com característica inerente igual porcentagem

Comparando a família de curvas instaladas da válvula linear e da igual porcentagem, observamos que a válvula linear apresenta, de uma forma geral, um ganho maior do que a de igual porcentagem, o que nos leva a concluir que a utilização da válvula igual porcentagem, durante a fase de projeto, se não tivermos dados suficientes ou mais precisos para a escolha da curva, o mais adequado seria selecionar uma válvula igual porcentagem.

2.4.3 Desenvolvimento da equação da curva característica instalada de uma válvula inerente parabólica

Analogamente aos procedimentos para obtenção da família de curvas instaladas para as válvulas linear e igual porcentagem obtemos a família de curvas para a válvula parabólica. Atualmente, este tipo de curva inerente foi abandonada por alguns fabricantes de válvulas, porém está sendo mencionada, porque existem projetos mais antigos que utilizaram este tipo de válvula e que estão em operação até os dias atuais. Considerando a equação geral para a curva instalada e a equação inerente de uma válvula parabólica mostrada no item 2.3 obtemos a família de curvas instalada deste tipo de válvula. Na Figura 2.15 mostramos a família de curvas para este tipo de válvula.

$$\mu_B = (1 - \mu_O)n^2 + \mu_O$$

$$Pr = \frac{\Delta P_{ValvVazMax}}{\Delta P_{ValvVazMax} + \Delta P_{SistVazMax}}$$

$$\mu_R = \sqrt{\frac{1}{\left(1 - \frac{\Delta P_{ValvVazMax}}{\Delta P_{ValvVazMax} + \Delta P_{SistVazMax}}\right) + \frac{\Delta P_{ValvVazMax}}{(\Delta P_{ValvVazMax} + \Delta P_{SistVazMax})(\mu_B = (1 - \mu_O)n^2 + \mu_O)^2}}}$$

(2.4.3.1)

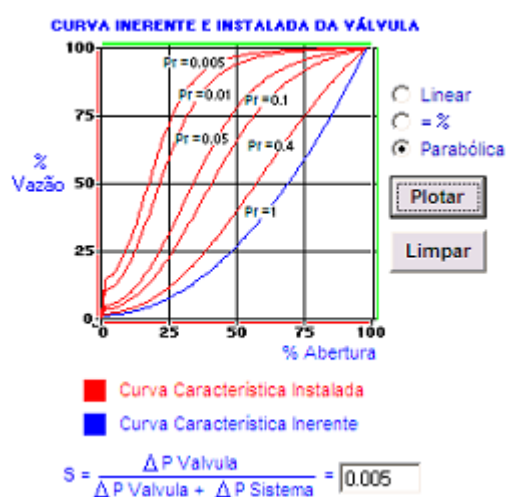


Figura 2.15 – Família de curvas instaladas de uma válvula com característica inerente parabólica

Comparando as famílias de curvas das válvulas linear, igual porcentagem e parabólica vemos que esta última apresenta um ganho intermediário entre a linear e a igual porcentagem.

2.5 Influência da curva instalada da válvula de controle na sintonia de um controlador P + I + D

A Figura 2.16 apresenta um esquema de um sistema de controle de nível de um tanque de armazenamento de um líquido. No esquema indicamos os principais elementos que representam uma malha de controle de nível, que são:

- Tanque para armazenamento do líquido, denominado como processo a ser controlado;
- Transmissor de nível do tanque com tag LT-2004;
- Controlador de nível do tanque com tag LIC-2004;
- Válvula de controle com tag LV-2004;

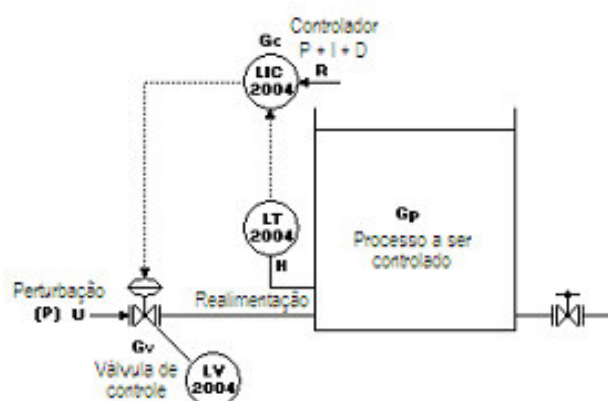


Figura 2.16 – Sistema de controle de nível de um tanque para armazenamento de líquidos

As setas mostradas no desenho esquemático indicam o sentido do fluxo de sinais através da malha de controle. Observamos que a válvula de controle é o último elemento que compõe a malha de controle e em virtude disso é denominada de elemento final de controle, como anteriormente mencionado.

Na Figura 2.17 é apresentado o diagrama de blocos do sistema da figura 2.5.1 identificando as funções de transferência para cada elemento. Na figura abaixo está separado por um quadrado pontilhado o controlador P+I+D.

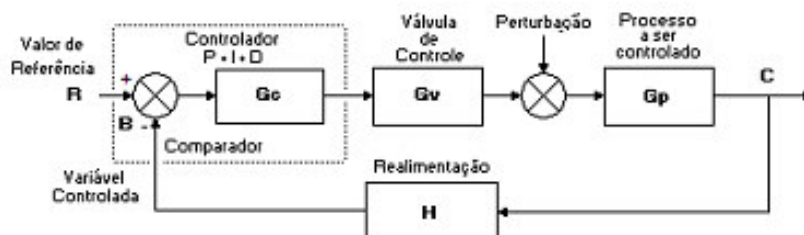


Figura 2.17 – Diagrama de blocos do sistema de controle do tanque de armazenamento

A função de transferência global do diagrama de blocos da Figura 2.17 é representada abaixo e admitiu-se que a perturbação $U = 0$.

$$\frac{C}{R} = \frac{G_C \cdot G_V \cdot G_P \cdot H}{1 + G_C \cdot G_V \cdot G_P \cdot H} \quad (2.5.1)$$

Na função de transferência global indicada na equação 2.5.1 observa-se que o ganho G_V da válvula de controle interfere na estabilidade do sistema de controle, pois os parâmetros ótimos de sintonia são definidos admitindo-se constante o produto dos ganhos G_C , G_V , G_P e H do sistema.

Para mostrar através de simulação as afirmações feitas na Figura 2.18 foi utilizada uma válvula linear com característica instalada com $P_r = 0.8$ e $P_r = 0.01$. A escolha da diferença de valores de P_r foi exagerada com a finalidade de se acentuar a instabilidade do sistema de controle.

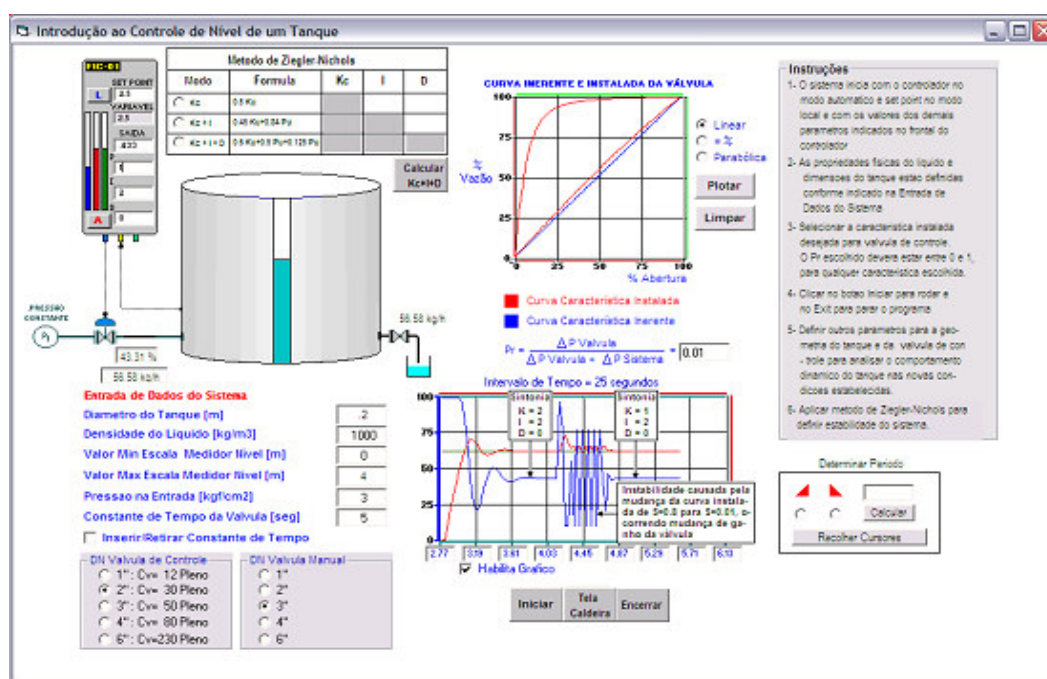


Figura 2.18 – Gráfico mostrando a influência da curva característica instalada na sintonia do controlador

No gráfico da Figura 2.18 mostra-se, antes da oscilação acentuada, a resposta do sistema de controle de nível do tanque, quando os parâmetros sistema estavam configurados conforme indicado na tabela abaixo.

No gráfico esta fase está representada na primeira parte do gráfico, na região que precede as oscilações de grande amplitude. Nesta região o controlador $P + I$ foi sintonizado para atender um sistema cuja curva instalada da válvula de controle tinha o valor de $P_r = 0.8$.

Tabela 2.5.1 – Parâmetros do sistema de controle na Configuração I

CONTROLADOR	VALOR
GANHO	2.0
INTEGRAL	2.0 segundos por repetição
DERIVADA	0
Pr (Curva Instalada)	0.8

Após a ter sido alterada a curva instalada da válvula de controle de $Pr = 0.8$ para $Pr = 0.01$, o sistema de controle apresentou instabilidade que é mostrada no gráfico da Figura 2.18, esta instabilidade está indicada na região onde ocorrem grandes oscilações da variável controlada.

Para que o sistema de controle encontre novamente sua estabilidade é necessário reajustar a sintonia do controlador para os novos parâmetros, que são indicados na Tabela 2.5.2.

Tabela 2.5.2 – Parâmetros do sistema de controle na Configuração II

CONTROLADOR	VALOR
GANHO	1.0
INTEGRAL	2.0 segundos por repetição
DERIVADA	0
Pr (Curva Instalada)	0.01

Do exposto, pode-se observar que quando se muda a curva instalada da válvula de controle $Pr = 0.8$ para $Pr = 0.01$, aumenta-se o seu ganho, o que significa dizer que para uma mesma variação no sinal de saída do controlador, ocorre uma grande variação na vazão manipulada pela válvula. Para compensar esse aumento no ganho global do sistema ter-se á que diminuir o ganho de um de seus elementos. O elemento da malha de controle adequado para sofrer esta alteração é o ganho é o controlador.

Após a alteração do ganho do controlador de $G_c = 2.0$ para $G_c = 1.0$, observando a Figura 2.18, observa-se que as grandes oscilações mostradas no gráfico desaparecem, e a estabilidade do sistema é retomada.

2.6 Desenvolvimento da equação do atraso de tempo de uma válvula de controle

A válvula de controle não responde imediatamente o comando enviado pelo controlador, devido a atrasos que ocorrem nos sistemas mecânicos e pneumáticos da válvula. Na tentativa de tornar a simulação mais realista, foi incluída, uma equação que representa este atraso. Para esclarecer, existe um intervalo de tempo para a válvula se mover de uma posição para outra. Neste caso a válvula de controle apresenta um transitório, cuja constante de tempo é medida entre dois e cinco segundos.

Neste trabalho considera-se uma equação diferencial de primeira ordem para representar o transitório da válvula de controle. O atraso do processamento dos sinais recebidos ou enviados pelos instrumentos, podem ocorrer devido a cinco fatores principais:

- Devido ao tipo de instalação do instrumento;
- Devido a característica construtiva do instrumento;
- Devido ao tipo de variável medida (por exemplo temperatura é mais lenta do que a medição de pressão de um líquido);
- Devido ao tipo de instrumentos utilizados (por ex: instrumentos pneumáticos são mais lentos do que os eletrônicos);
- Para as válvulas de controle a atuação pneumática é mais lenta que a atuação hidráulica.

A equação para representar esse atraso de tempo é uma equação diferencial de primeira ordem, sendo o sinal de entrada no posicionador da válvula, a função forçadora. Este sinal é gerado pelo controlador $P + I + D$.

Em seguida, passaremos a identificar os elementos que compõem a equação que representa o atraso de primeira ordem para a válvula de controle:

As variáveis que compõe o filtro são identificadas como segue:

- u : Sinal de entrada no posicionador da válvula de controle
 $\frac{dx}{dt}$: Taxa de variação da posição do obturador da válvula
 x : Posição do obturador da válvula
 C_T : Constante de tempo da válvula de controle

$$\frac{dx}{dt} = \frac{1}{C_T} (u - x) \quad (2.6.1)$$

A transferência do sinal de saída do controlador para a posição final de abertura da válvula de controle obedece à equação mostrada acima. Na simulação do sistema de controle esta equação faz parte do sistema de equações diferenciais que deverá ser resolvido pelo método de Euler (LUYBEN, 1986).

References

- 1 Lovett, O.P., April 1964 " Valve Flow Characteristic", ISA Journal : 11: 65-67 mencionado ISA Handobook of Control Valves – Chapter : Characteristics Valves Curves

3 EQUIPAMENTO PARA TESTE DO CV DE UMA VÁLVULA DE CONTROLE

3.1 Introdução

Inicia-se este capítulo apresentando-se a definição de Cv de uma válvula de controle:

- **Definição do coeficiente de vazão Cv de uma válvula de controle**

Coeficiente de vazão Cv de uma válvula de controle é a vazão medida em galões por minuto (gpm) de água a 60°F que escoar através da válvula, sujeita a uma diferença de pressão de uma libra por polegada quadrada (psi), nas condições de regime permanente, isto é, vazão e abertura da válvula permanecem constantes durante a medição.

3.2 Descrição da bancada de testes para válvulas de controle

Neste capítulo, serão descritos os diversos equipamentos que fazem parte da bancada de teste de válvulas de controle utilizada para determinar o Cv e conseqüentemente a curva característica inerente de uma válvula de controle. Na Figura 3.1 é apresentado o desenho esquemático da bancada de testes para válvulas de controle.

A bancada de teste para válvulas de controle é constituída pelos principais dispositivos:

- **Reservatório contendo água**

Pela definição de C_v a água neste reservatório deverá estar a temperatura de 60 °F. Em geral, o teste é realizado na temperatura ambiente e o C_v medido é posteriormente corrigido para 60 °F e a densidade da água para 1000 kg/m³.

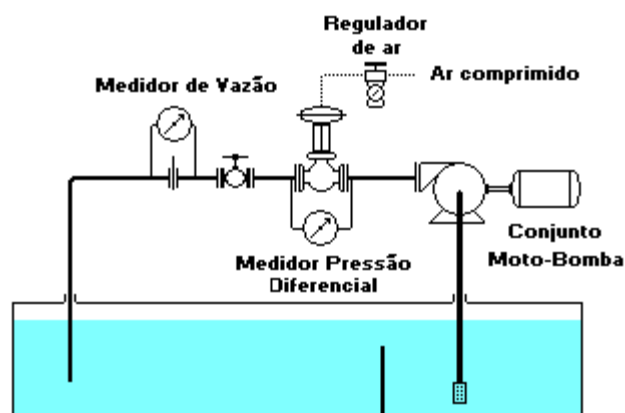


Figura 3.1 – Esquemático de uma bancada para determinação do C_v de uma válvula de controle

- **Um conjunto moto-bomba**

O tipo de bomba utilizada é a centrífuga porque é necessário variar a vazão do sistema. Uma bomba de volume constante não seria adequada.

- **Válvula Manual**

A válvula manual é utilizada para que se possa variar a vazão do sistema. Durante o teste a vazão do sistema é ajustada em valores convenientes conforme será visto no procedimento e simulação do teste da válvula.

- **Medidor de vazão**

Tem por finalidade medir a vazão que atravessa o sistema em galões por minuto (gpm). O medidor deve ter uma precisão adequada, pois caso contrário introduziria erros na medição, que seriam desaconselháveis.

- **Medidor de pressão diferencial**

Tem por finalidade medir a pressão diferencial no corpo da válvula. O instrumento mais indicado para medir essa pressão diferencial seria uma coluna em

U preenchida com água. O vidro da coluna deve ser especial pois podem ocorrer altas pressões no sistema.

- **Válvula de controle a ser testada**

A válvula a ser testada deve estar adequadamente calibrada, pois caso contrário as medições poderiam ser totalmente inadequadas.

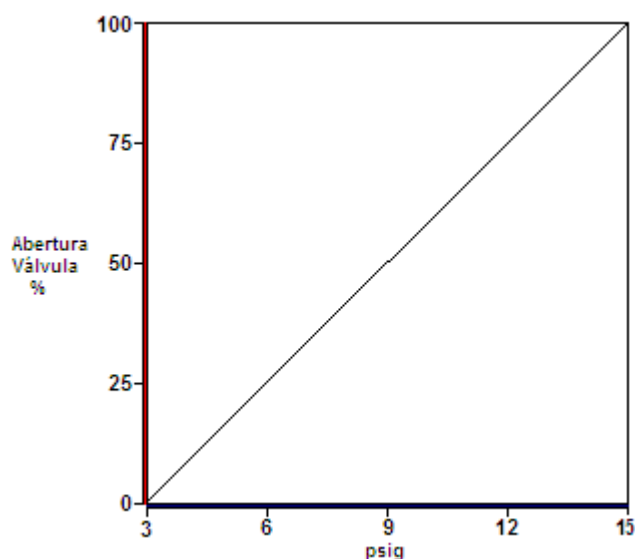


Figura 3.2 – Curva de calibração de uma válvula inerente linear

Na Figura 3.2 demonstra-se a curva de calibração para uma válvula de controle com característica linear, coloca-se abscissa o sinal pneumático enviado para o posicionador e na ordenada a abertura da válvula.

3.4 Desenvolvimento da equação matemática para bancada de teste

As equações desenvolvidas para simular a bancada de teste de válvulas de controle foram baseadas no sistema indicado na Figura 3.3 Para efeito de clareza manteve-se a mesma figura da tela de simulação da bancada de teste. Considerou-se que o medidor de vazão não apresenta perda de carga.

O desenvolvimento matemático é apresentado de forma mais detalhada por motivos didáticos.

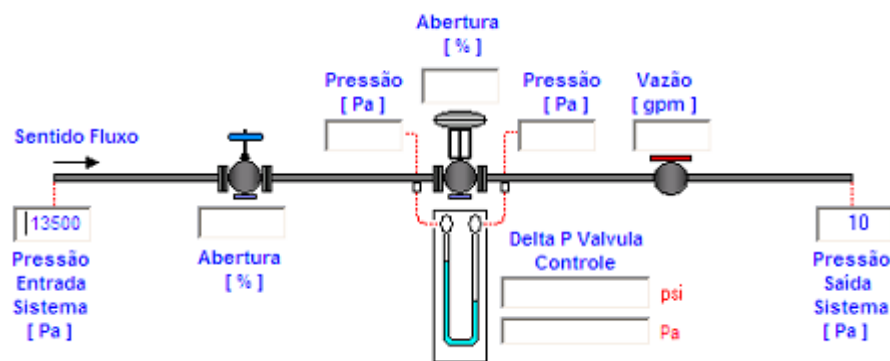


Figura 3.3 – Sistema de tubulação e medidores de uma bancada de teste de Cv

Aplicando-se a equação de Bernoulli e mais as perdas de carga singulares e distribuídas do sistema da Figura 3.3, entre os pontos indicados como “Pressão Entrada do Sistema” e “Pressão Saída Sistema”, representados pelos índices 1 e 2 , respectivamente, tem-se:

v_1 = velocidade média da água a montante da válvula de controle [m/s]

v_2 = velocidade média da água a jusante da válvula de controle [m/s]

p_1 = pressão na entrada do sistema [N/m²]

p_2 = pressão na saída do sistema [N/m²]

ω = peso específico da água [N/m³]

D = diâmetro interno da tubulação [m]

z_1 = altura do fluido em relação a referência [m]

z_2 = altura do fluido em relação a referência [m]

g = aceleração da gravidade [m/s²]

f_L = fator de atrito [adimensional]

C_v = coeficiente de vazão da válvula de controle [gpm]

ρ_R = densidade relativa do fluido [kg/m³]

q_v = vazão em volume através da válvula de controle [m³/s]

A_T = área interna da tubulação [m²]

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\omega} + z_1 = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\omega} + z_2 + \frac{f_L L_{MON} v_1^2}{2gD} + \frac{f_L L_{JUS} v_2^2}{2gD} + 340 f_L \frac{v^2}{2g} + \frac{q_v^2 \rho_R}{C_v^2}$$

admitindo – se constante o diâmetro da tubulação temos :

$v_1 = v_2 = v$, substituindo temos :

$$\frac{v^2}{2g} + \frac{p_1}{\omega} + z_1 = \frac{v^2}{2g} + \frac{p_2}{\omega} + z_2 + \frac{f_L L_{MON} v^2}{2gD} + \frac{f_L L_{JUS} v^2}{2gD} + 340 f_L \frac{v^2}{2g} + \frac{q_v^2 \rho_R}{C_v^2}$$

pela equação da continuidade temos : $q_v = A_T v \therefore v = \frac{q_v}{A_T} \therefore v^2 = \frac{q_v^2}{A_T^2}$

como $A_T = \frac{\pi D_T^2}{4} \therefore A_T^2 = \frac{\pi^2 D_T^4}{16}$ substituindo temos $v^2 = \frac{16 q_v^2}{\pi^2 D_T^4}$ e rearranjando

$$\frac{p_1}{\omega} + z_1 = \frac{p_2}{\omega} + z_2 + \frac{16 f_L L_{MON} q_v^2}{2g \pi^2 D_T^5} + \frac{16 f_L L_{JUS} q_v^2}{2g \pi^2 D_T^5} + 340 f_L \frac{16 q_v^2}{2g \pi^2 D_T^5} + \frac{q_v^2 \rho_R}{C_v^2}$$

$$q_v = \sqrt{\frac{\frac{p_1 - p_2}{\omega}}{\frac{16 f_L L_{MON}}{2g \pi^2 D_T^5} + \frac{16 f_L L_{JUS}}{2g \pi^2 D_T^5} + 340 f_L \frac{16}{2g \pi^2 D_T^5} + \frac{\rho_R}{C_v^2}}}$$

3.4 Identificação dos Elementos na Tela de Operação da Bancada de Teste

Neste parágrafo, iremos descrever o procedimento para testar uma válvula de controle na bancada. Com o objetivo didático, foi desenvolvido um simulador que permite executar passo a passo as operações necessárias para o teste de Cv da válvula.

Primeiramente, na Figura 3.4 será apresentada a tela do simulador, a partir da qual iremos identificar os procedimentos de utilização da tela e testes de Cv da válvula de controle.

A seguir, serão descritos os diversos componentes da tela de simulação da bancada de teste da válvula de controle:

- **Item 01**

Sob o título “Balanço da Perda de Carga do Sistema”, são mostradas as perdas de carga para cada componente de interesse do sistema hidráulico. As perdas de cada elemento individualmente são somadas e comparadas com a perda de carga total disponível.

A subtela é ativada toda vez que escolhidas as aberturas das válvulas no item 07 é pressionado o botão “Testar Cv” no item 05.

A subtela é ativada toda vez que escolhidas as aberturas das válvulas no item 07 é pressionado o botão “Testar Cv” no item 05.

- **Item 02**

Neste gráfico são mostradas as curvas características inerentes e instaladas da válvula de controle testada.

- **Item 03**

Permite selecionar se a válvula testada tem característica inerente ou igual porcentagem.

- **Item 04**

Nesta simulação foi escolhida uma válvula de controle com diâmetro nominal de duas polegadas. Esta válvula utiliza diversos tamanhos para sua sede e obturadores. Neste item podem ser escolhidos os diversos tipos de internos com seus respectivos Cv's.

- **Item 05**

Após terem sido carregados os dados necessários utilizando-se este botão se inicia o programa

- **Item 06**

Com o objetivo de agilizar a apresentação, esta tabela foi montada previamente, utilizando-se o próprio simulador permite apresentar as curvas finas de uma válvula com característica inerente igual porcentagem.

- **Item 07**

Apresenta a equação para cálculo de Pr , utilizando-se informações do simulador.

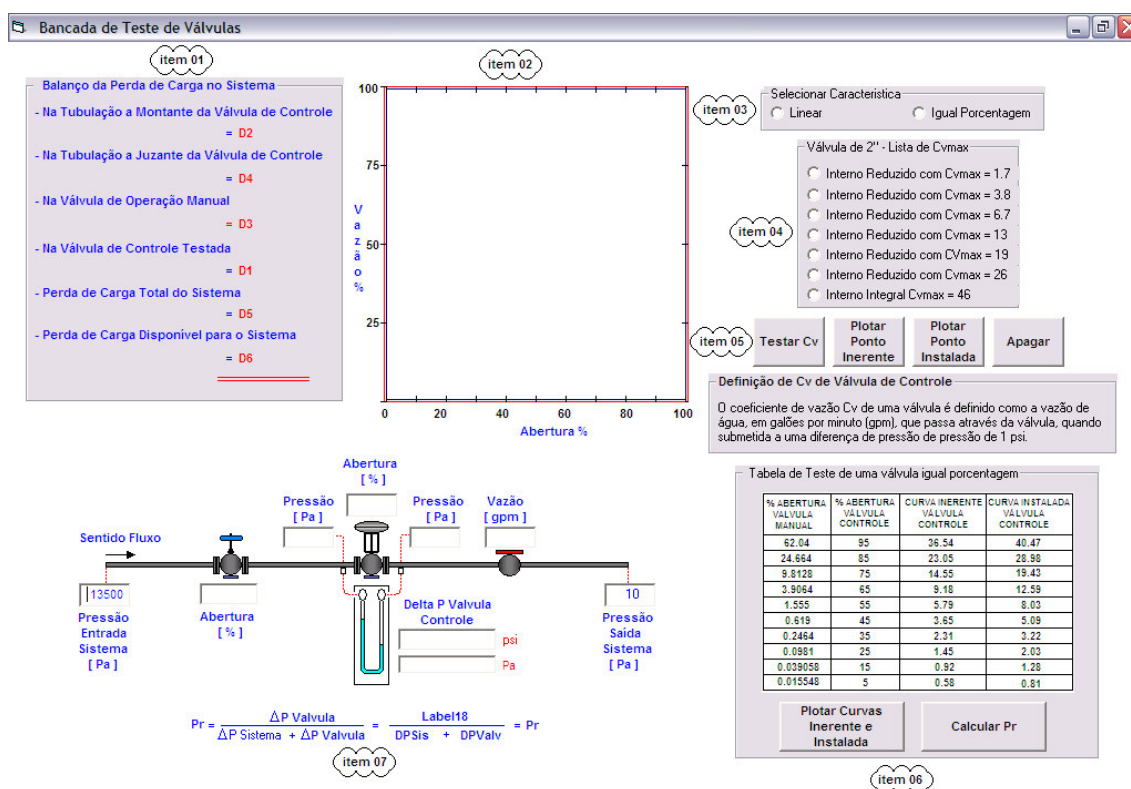


Figura 3.4 – Tela de simulação da bancada de testes para válvulas de controle

3.5 Procedimento para Teste de Cv de uma Válvula de Controle

A seguir descreveremos o procedimento para simulação de um teste, que seria executado em uma bancada para verificação dos valores de Cv de uma válvula de controle. A descrição do procedimento deve ter como referência a Figura 3.4 Após a instalação na bancada da válvula a ser testada, procede-se como segue:

- **Procedimento para se obter pontos da curva inerente:**

- **Passo 01**

Ajusta-se em 95% a abertura da a válvula de controle. No simulador este valor é digitado no campo “Abertura %” indicado na tela, sobre a figura da válvula de controle.

- **Passo 02**

Ajusta-se a abertura da válvula manual até que se obtenha no medidor de pressão diferencial, a leitura de 1 psig. Na tela o medidor está instalado entre a entrada e a saída da válvula de controle. No simulador este valor é digitado no campo inferior sob a válvula manual, como porcentagem de abertura.

- **Passo 03**

Após ter sido ajustada a pressão diferencial para 1 psig, pressiona-se o botão “ Testar Cv “, o qual executa a simulação para as condições descritas anteriormente.

- **Passo 04**

Para se plotar o ponto calculado, pressiona-se o botão “Plotar Ponto Inerente“. Feito isso um ponto no gráfico é obtido. Este ponto corresponde ao Cv da válvula, que é obtido através da leitura no medidor de vazão. A vazão lida, em galões por minuto, é o Cv da válvula, para a condição de abertura da válvula de controle, previamente estabelecida.

Repetindo-se os passos acima descritos, obtém-se o Cv da válvula de controle para outras aberturas. Na prática, variando-se a abertura da válvula de controle de 10 em 10%, obtém-se a curva uma com precisão aceitável para verificarmos a curva inerente de uma válvula de controle. No próximo parágrafo descreve-se o conceito de curva instalada de uma válvula de controle.

Na Figura 3.5 foi escolhida uma válvula para ser testada, com curva inerente igual porcentagem e Cv máximo de 46 galões por minuto. Observando-se a figura nota-se que os seguintes valores foram obtidos no simulador:

Tabela 3.5.1 – Dados da tabela do simulador

DESCRIÇÃO NO SIMULADOR		VALOR	UNIDADE
Abertura da válvula de controle	=	95	%
Abertura da válvula manual	=	62.04	%
Diferença de pressão na válvula de controle	=	1.0021995	psig

Vazão através do sistema	=	36.54 gpm	gpm
Valor de vazão plotada no gráfico	$\cong$	79% $\Rightarrow 0.79 \cdot 46 = 36.34$	gpm
Valor real do Cv na tabela	=	36.54	gpm

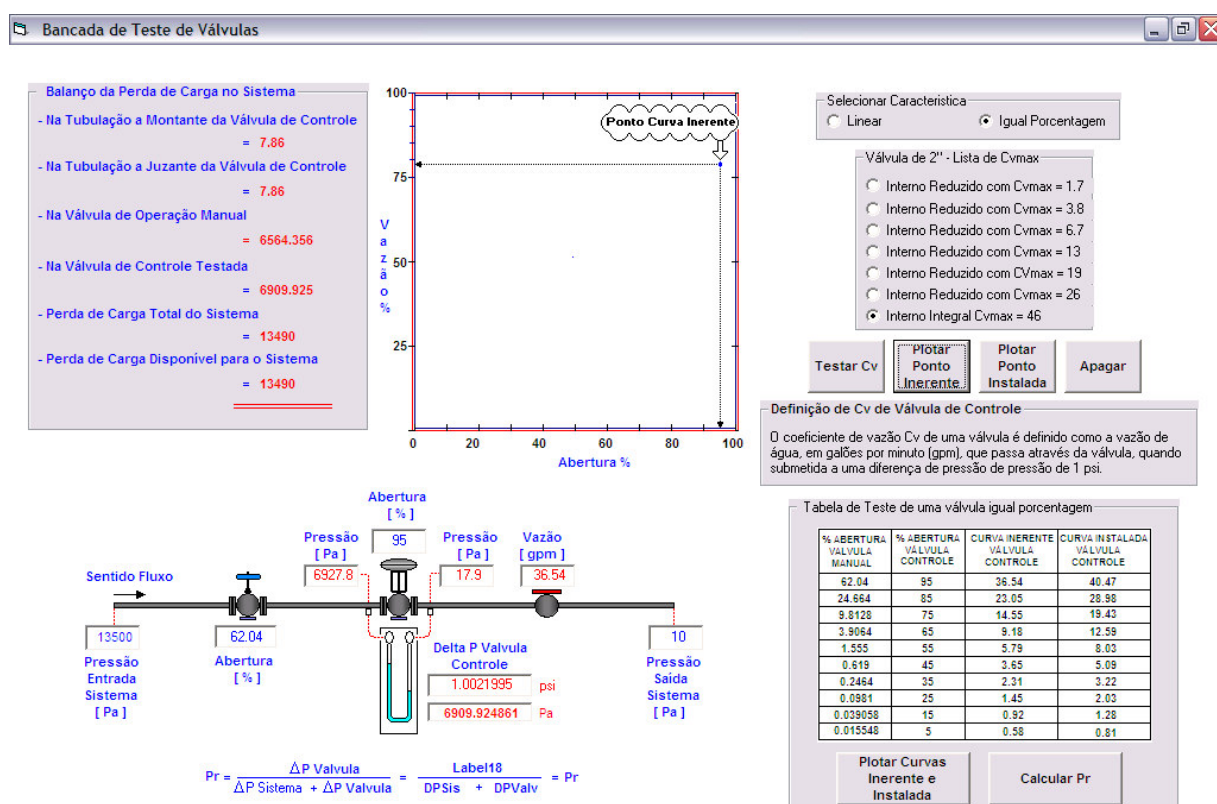


Figura 3.5 – Procedimento de teste para se obter pontos da curva inerente de uma válvula de controle

3.6 Procedimento para se obter os pontos curva Instalada da Válvula de Controle

Para se obter o ponto da curva instalada correspondente ao da curva inerente, deve-se proceder como segue:

- Primeiramente executa-se o procedimento anterior para se obter o ponto da curva inerente;
- Ajusta-se a abertura da válvula manual para 100%, isto é, abre-se a válvula manual totalmente;
- Pressiona-se o botão “Testar Cv”;
- Pressiona-se o botão “Plotar Ponto Instalada”.

Na Figura 3.5 mostrou-se que foi escolhida uma válvula de controle com curva inerente igual porcentagem e com Cv máximo de 46 gpm. O resultado obtido na tela da simulação, foi de um Cv de 36.54 gpm para a abertura de 95% da válvula de controle e uma abertura de 62.04% para a válvula manual, para se poder obter a diferença de pressão aproximada de 1 psi na válvula de controle. O ponto indicado na figura 3.5.1 é um ponto da característica inerente da válvula.

Na Figura 3.6 são mostradas na tela no simulador as condições para obter um ponto da curva instalada da válvula de controle. Observa-se que a abertura da válvula manual foi alterada para 100% e que a vazão através do sistema passou de 36.54 para 40.47 gpm.

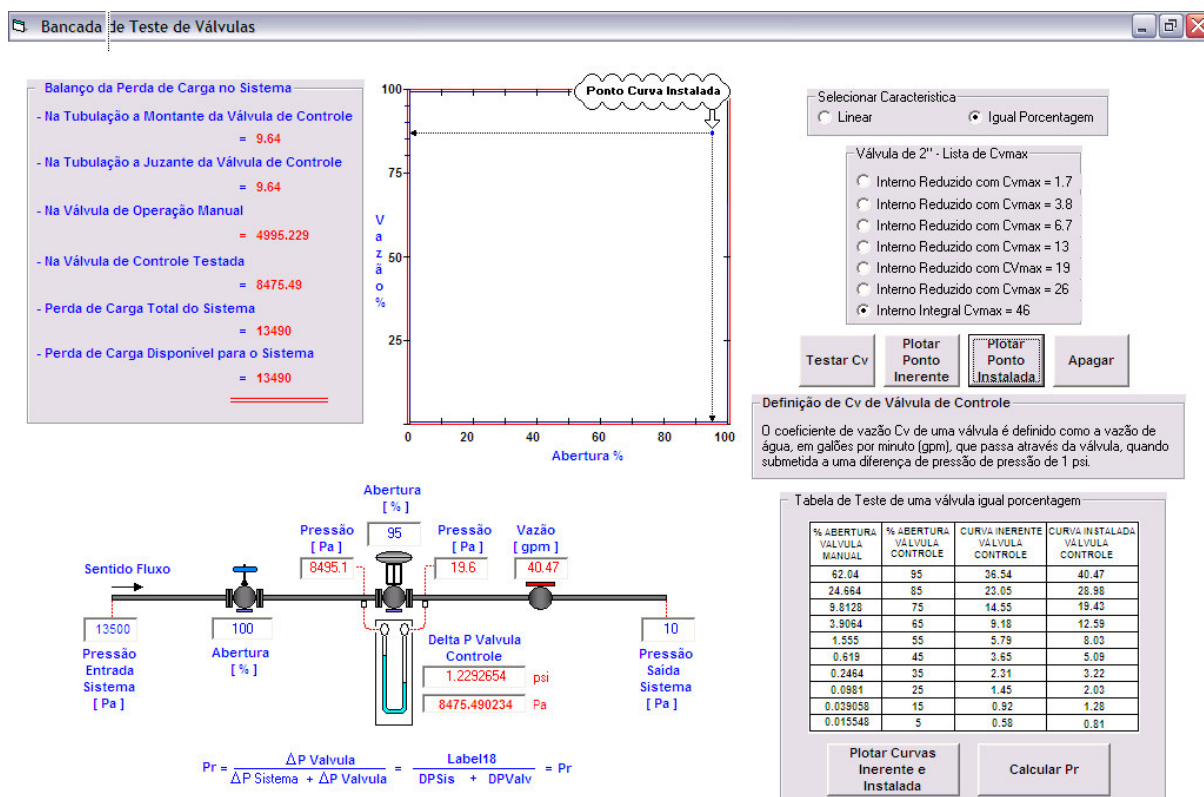


Figura 3.6 – Teste para se obter pontos da curva instalada de uma válvula de controle

Os demais parâmetros como as pressões nos diferentes pontos do sistema foram alterados e são indicados na listagem ao lado esquerdo da tela de simulação. A unidade de todas as pressões do sistema é Pascal, com exceção do ΔP na válvula de tem indicação em psig.

Tabela 3.6.1 – Dados da tabela do simulador

DESCRIÇÃO NO SIMULADOR		VALOR	UNIDADE
Abertura da válvula de controle	=	95	%
Abertura da válvula manual	=	100	%
Diferença de pressão na válvula de controle	=	1.0021995	psig
Vazão através do sistema	=	40.47	gpm
Valor de vazão plotada no gráfico	$\cong$	87% $\Rightarrow 0.87 \cdot 46 = 40.02$	gpm
Valor real do Cv na tabela	=	40.47 gpm	gpm

Na tabela acima estão indicados os valores obtidos no simulador por ocasião do levantamento de um ponto da curva instalada da válvula de controle.

Na Figura 3.7 são mostrados todos os pontos indicados na tabela a direita. Desses pontos, aqueles que possuem menor ordenada são os da característica inerente e os de maior da característica instalada da válvula.

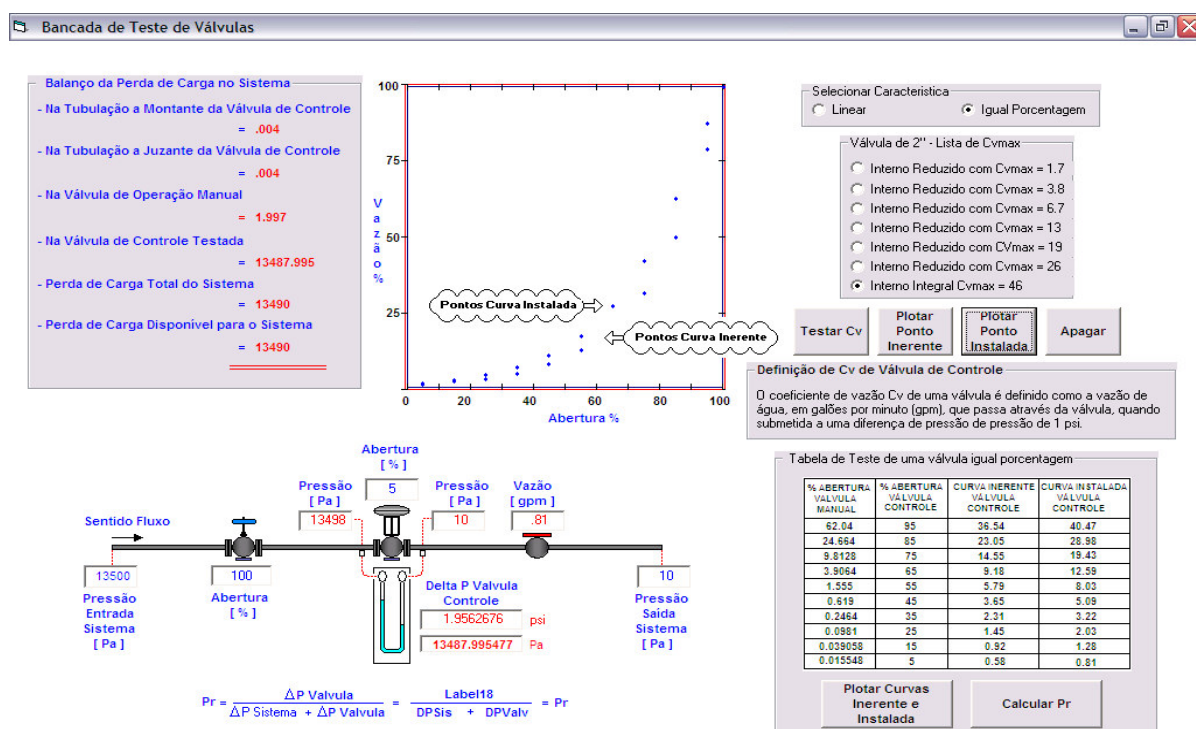


Figura 3.7 – Teste de uma válvula inerente igual porcentagem de acordo com a tabela do fabricante

Esse exercício deverá ser executado durante a aula, pois com ele o procedimento de teste é assimilado juntamente com alguns conceitos importantes sobre válvulas de controle.

Para se obter as curvas inerente e instalada da válvula igual porcentagem da Figura 3.8 é necessário pressionar o botão “Plotar Curvas Inerentes e Instalada”, feito isto, a tabela que contém esse botão é plotada no gráfico. Na parte inferior da Figura 3.8 apresentamos a equação que representa o número Pr e como esse número é calculado, como pode-se observar, o número Pr é definido com as válvulas manual e automática totalmente abertas.

Por motivos didáticos e como exemplo de procedimento o número Pr foi calculado utilizando-se as quedas de pressões da própria bancada de teste, porém salienta-se que na fase de projeto o número Pr é calculado em função do arranjo da tubulação aonde a válvula deverá ser instalada.

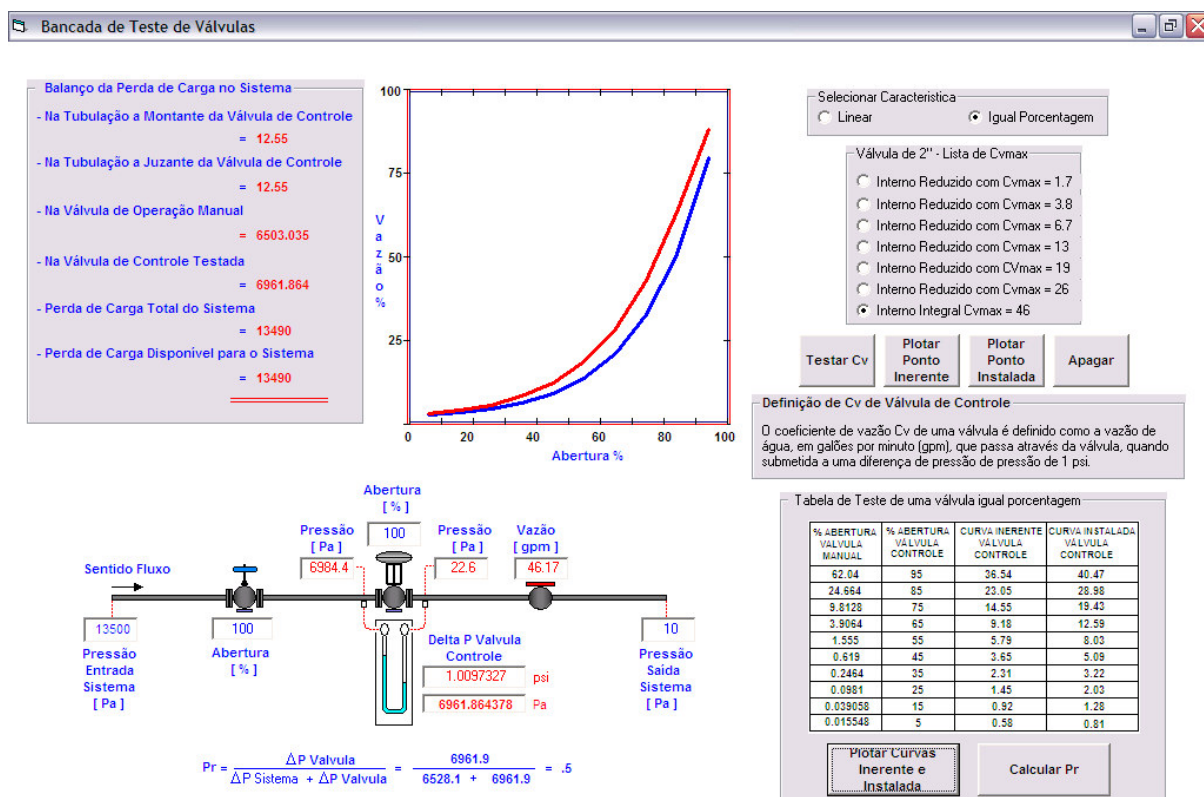


Figura 3.8 – Teste mostrando as curvas inerente e instalada de uma válvula de controle

Nesse capítulo concluí-se o estudo sobre os principais conceitos de uma válvula de controle e nos próximos será discutida sua influência no desempenho de um sistema de controle, através de simulações de sistemas de controle de nível.

4 DESENVOLVIMENTO DOS MODELOS MATEMÁTICOS

4.1 Introdução

O objetivo deste capítulo é apresentar o desenvolvimento dos modelos matemáticos que foram utilizados para simulação dos sistemas de controle de níveis do tanque e da caldeira. Para uma apresentação introdutória dos conceitos de controle foram desenvolvidos os seguintes sistemas:

- Sistema de controle de nível de um tanque para armazenamento de um líquido. Para esse sistema foi desenvolvido o modelo matemático para um tanque considerando sua forma geométrica igual a de um cilindro reto na posição vertical. Esse primeiro sistema será utilizado para introduzir conceitos de controle os seguintes conceitos de controle:

- Conceito de ganho, ação integral e derivativa de um controlador P+I+D;
- Método de Ziegler-Nichols para sintonia do controlador P+I+D (KINNEY, 1986, p.160);
- Influência da curva instalada da válvula de controle na estabilidade do sistema de controle;
- Influência do tempo de resposta do sistema na estabilidade do controle;
- Conceito de capacitância fluída do tanque;
- Vantagens e desvantagens da utilização do método de Ziegler na prática;
- Método empírico e suas vantagens;
- Sistema a três elementos para controle de nível de uma caldeira.

Esta apresentação se refere ao controle de nível de uma caldeira a três elementos, como já mencionado anteriormente, foi escolhida uma caldeira por ser este um equipamento industrial extremamente utilizado e cuja malha de controle é relativamente complexa e apresentando um grau de dificuldade maior em sintonizar seus controladores, pois são controladores que estão interligados e conhecidos como controladores em cascata.

4.2 Comportamento dinâmico do nível de um tanque formato cilindro reto vertical

O modelo matemático para o tanque foi desenvolvido aplicando-se o balanço de massa, tendo como referência a Figura 4.1, temos:

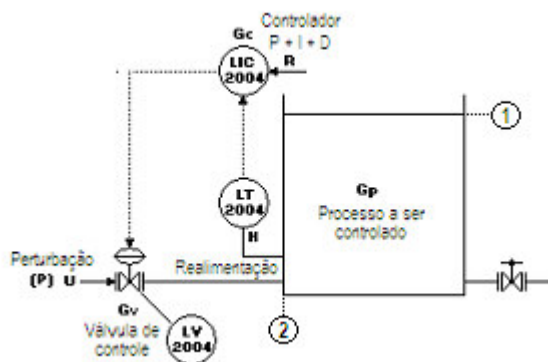


Figura 4.1 – Tanque cilíndrico na posição vertical

Aplicando Bernoulli entre os pontos 1 e 2 indicados na Figura 4.1 e desprezando-se as perdas e supondo o ponto 2 aberto para a atmosfera temos:

Nomenclatura das variáveis

v_1 = velocidade do líquido no interior do tanque $[m/s]$

v_2 = velocidade do líquido na descarga do tanque $[m/s]$

p_1 = pressão atmosférica na parte superior do tanque $[N/m^2]$

p_2 = pressão atmosférica na descarga inferior do tanque $[N/m^2]$

g = aceleração da gravidade $[m/s^2]$

ω = peso específico do líquido $[N/m^3]$

A_o = área do orifício na descarga $[m^2]$

d_o = diâmetro do orifício na descarga $[m]$

z_1 = cota superior do nível do tanque $[m]$

z_2 = cota inferior $\equiv$ cota de referência $[m]$

h = altura da coluna de líquido $[m]$

m_E = vazão em massa de alimentação do tanque $[kg/s]$

m_V = vazão em volume de alimentação do tanque $[m^3/s]$

m_S = vazão em massa de descarga do tanque $[kg/s]$

D_T = diâmetro interno do tanque $[m]$

dh/dt = taxa de variação do nível de líquido no tempo $[m/s]$

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\omega} + z_1 = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\omega} + z_2$$

considerando

$$v_1 \cong 0; p_1 = 0; p_2 = 0; z_2 = 0 \text{ temos :}$$

$$z_1 = \frac{v_2^2}{2g} \therefore v_2^2 = 2gz_1 \therefore v_2 = \sqrt{2gz_1}$$

fazendo $h = z_1$ e substituindo na equação acima temos :

$$v_2 = \sqrt{2gz_1}$$

$$\text{calculando a área do orifício de desc arg a temos : } A_O = \frac{\pi d_O^2}{4}$$

pela equação da continuidade sabemos que $m_S = \rho \cdot v_2 \cdot A_O$ por tan to

$$m_S = \rho \frac{\pi d_O^2}{4} \sqrt{2gz_1}, \text{ fazendo } z_1 = h \text{ e substituindo temos :}$$

$$m_S = \rho \frac{\pi d_O^2}{4} \sqrt{2gh} \text{ que repre sen ta a vazão em massa na desc arg a do tan que}$$

de sen volvimento do mod elo matemático do comportamento dinâmico do nível, aplicando o balanço de massa ao sistema temos :

$$\frac{dm}{dt} = m_E - m_S \text{ mas } m = \rho \cdot A_T \cdot h \text{ substituindo temos :}$$

$$\frac{d(\rho \cdot A_T \cdot h)}{dt} = m_E - m_S \text{ sendo } \rho \text{ e } A_T \text{ cons tan tes temos :}$$

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{\rho A_T} (m_E - m_S) \text{ sendo } m_E \text{ a função forçadora e } m_S = \rho \frac{\pi d_O^2}{4} \sqrt{2gh} \text{ substituindo temos :}$$

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{\rho A_T} \left(m_E - \rho \frac{\pi d_O^2}{4} \sqrt{2gh} \right) \text{ mas } m_E = \rho \cdot m_V \therefore \frac{dh}{dt} = \frac{1}{\rho A_T} \left(\rho m_V - \rho \frac{\pi d_O^2}{4} \sqrt{2gh} \right) \text{ por tan to}$$

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{A_T} \left(m_V - \frac{\pi d_O^2}{4} \sqrt{2gh} \right)$$

Portanto a equação que descreve o comportamento dinâmico do nível em um tanque cilindro reto:

(4.2.1)

$$\frac{dh}{dt} = \frac{4}{\pi D_T^2} \left(m_V - \frac{\pi d_O^2}{4} \sqrt{2gh} \right) \quad (4.2.2)$$

4.3 Comportamento dinâmico do nível em um tanque formato cilindro reto horizontal

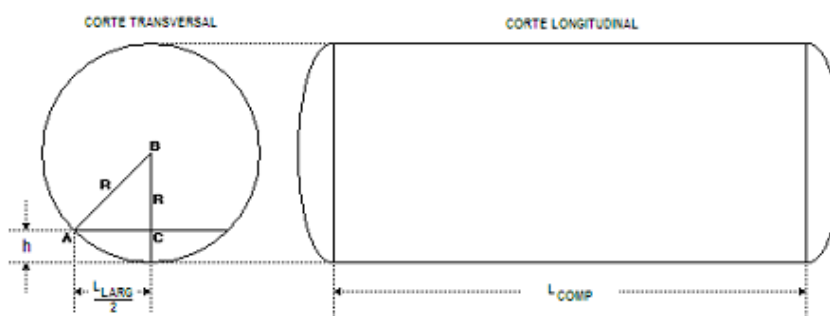


Figura 4.2 – Corte longitudinal e transversal do tubulão de uma caldeira

Para que se possa desenvolver o modelo matemático para o comportamento do nível no interior do tubulão de vapor de uma caldeira, é apresentado na **Figura 4.2** os cortes transversal e longitudinal do tubulão. A dificuldade em modelar o nível da caldeira é sabermos que a capacitância fluída varia com a posição da altura h do nível. Aplicando o teorema de Pitágoras ao triângulo ABC mostrado na figura, tem-se:

Nomenclatura das variáveis

R = raio do tanque [m]

h = altura do nível no interior do cilindro [m]

L_{larg} = comprimento da corda perpendicular a altura do líquido [m]

L_{comp} = comprimento total do tubulão de vapor da caldeira [m]

$$R^2 = (R - h)^2 + \left(\frac{L_{\text{larg}}}{2}\right)^2$$

$$R^2 = R^2 - 2Rh + h^2 + \frac{L_{\text{larg}}^2}{4}$$

$$\frac{L_{\text{larg}}^2}{4} = 2Rh - h^2$$

$$L_{\text{larg}}^2 = 8Rh - 4h^2 = 4h(2R - h)$$

portanto

$$L_{\text{larg}} = 2\sqrt{h(2R - h)}$$

Se pretende ao desenvolver esta equação, colocar a variável largura transversal do nível em função da altura h do nível.

Tendo como referência a Figura 4.3 abaixo e aplicando o balanço de massa para o sistema mostra-se como a acumulação de água no interior do tubulão de vapor ocorre em função da diferença entre as vazões de saída de vapor e entrada da água de alimentação, portanto:

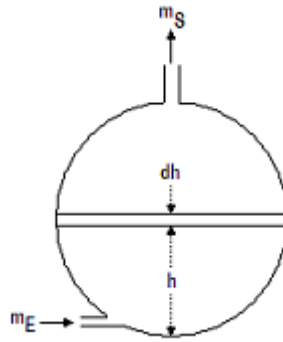


Figura 4.3 – Balanço de massa no tubulão de uma caldeira

$$\begin{aligned} \frac{dm}{dt} &= m_E - m_S \text{ mas } dm = \rho \cdot L_{\text{comp}} \frac{d(L_{\text{larg}} \cdot h)}{dt} \text{ substituindo temos :} \\ \rho \cdot L_{\text{comp}} \frac{d(L_{\text{larg}} \cdot h)}{dt} &= m_E - m_S \therefore \frac{d(L_{\text{larg}} \cdot h)}{dt} = \frac{1}{\rho \cdot L_{\text{comp}}} (m_E - m_S) \therefore \\ h \frac{d(L_{\text{larg}})}{dt} + L_{\text{larg}} \frac{dh}{dt} &= \frac{1}{\rho \cdot L_{\text{comp}}} (q_E - q_S) \text{ como } L_{\text{larg}} = 2\sqrt{h(2R - h)}, \text{ substituindo temos :} \\ h \frac{d(2\sqrt{h(2R - h)})}{dt} + 2\sqrt{h(2R - h)} \frac{dh}{dt} &= \frac{1}{\rho \cdot L_{\text{comp}}} (m_E - m_S), \text{ derivando temos :} \\ \frac{d(2\sqrt{h(2R - h)})}{dt} = \frac{d(\sqrt{4h(2R - h)})}{dt} &= \frac{1}{2} (4h(2R - h))^{-\frac{1}{2}} \frac{d(4h(2R - h))}{dt} \\ \frac{d(2\sqrt{h(2R - h)})}{dt} &= \frac{1}{2} (4h(2R - h))^{-\frac{1}{2}} \frac{d(8Rh - 4h^2)}{dt}, \text{ sendo } \frac{d(8Rh - 4h^2)}{dt} = \frac{8Rdh}{dt} - \frac{8dh}{dt} \\ \frac{d(2\sqrt{h(2R - h)})}{dt} &= \frac{1}{2} (4h(2R - h))^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{8Rdh}{dt} - \frac{8dh}{dt} \right) = \frac{1}{2} (4h(2R - h))^{-\frac{1}{2}} (8R - 8) \frac{dh}{dt} \\ h \frac{1}{2} (4h(2R - h))^{-\frac{1}{2}} (8R - 8) \frac{dh}{dt} + 2\sqrt{h(2R - h)} \frac{dh}{dt} &= \frac{1}{\rho \cdot L_{\text{comp}}} (m_E - m_S), \text{ evidenciando } \frac{dh}{dt} \text{ temos :} \\ \frac{dh}{dt} \left(h \frac{1}{2} (4h(2R - h))^{-\frac{1}{2}} (8R - 8) + 2\sqrt{h(2R - h)} \right) &= \frac{1}{\rho \cdot L_{\text{comp}}} (m_E - m_S), \text{ por tan to} \end{aligned}$$

A equação 4.2.3 ac

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{\rho \cdot L_{\text{comp}} \left(4h(4h(2R - h))^{-\frac{1}{2}} (R - 1) + 2\sqrt{h(2R - h)} \right)} (m_E - m_S) \quad (4.2.3)$$

A equação 4.2.3 acima representa o comportamento dinâmico do nível da caldeira em função de suas vazões de entrada de água e saída de vapor saturado. No desenvolvimento da referida equação não estão sendo considerados os efeitos termodinâmicos causados pela ebulição da água. O modelo é aproximado e tem por objetivo ser utilizado na simulação do controle de nível da caldeira.

4.4 Apresentação da equação do controlador P +I +D

A equação ideal para o controlador P + I + D é indicada abaixo:

Nomenclatura das variáveis

$u(t)$:	função de controle ou seja a saída do controlador
$e(t)$:	erro observado no instante t
K :	ganho do controlador
T_I :	tempo de integração
T_D :	tempo derivativo

$$u(t) = K[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_D \frac{de(t)}{dt}] \quad (4.2.4)$$

Os controladores analógicos tipo P+I+D, por sua grande utilização industrial, foram os primeiros a ter um assemelhado digital. Para sua aplicação em computadores a equação do controlador foi discretizada. A seguir, foi desenvolvida a discretização, como segue:

Para pequenos intervalos de amostragem T_o esta equação pode ser discretizada substituindo-se a derivada por uma diferença de primeira ordem e a integral por um somatório, seguindo-se a aproximação retangular ou trapezoidal.

Aplicando-se a integração retangular temos:

O algoritmo acima gera a função de controle $u(k)$ diretamente baseando-se nos valores de $e(t)$ e é conhecido como um algoritmo de posição.

No processamento digital procura-se em geral, algoritmos recursivos, mais facilmente implementados, assim usando-se a equação acima para $u(k)$ e $u(k-1)$ obtem-se:

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$$

$$\Delta u(k) = K[e(k) - e(k-1)] + \frac{KT_O}{T_I} e(k) + \frac{T_D}{T_O} [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (4.2.5)$$

O algoritmo acima fornece apenas a variação da função de controle, e por isso é conhecido como algoritmo de velocidade.

4.5 Desenvolvimento da equação do atraso de tempo de uma válvula de controle

A válvula de controle não responde imediatamente a um comando enviado pelo controlador, existe um determinado intervalo de tempo para a válvula se mover de uma posição inicial para uma final, ou seja, ao receber um comando do controlador a válvula de controle apresenta um transitório.

Neste trabalho é utilizada uma equação diferencial de primeira ordem para representar o transitório da válvula de controle.

O atraso no processamento dos sinais recebidos ou enviados pelos instrumentos, considera-se que podem ocorrer devido a diversos fatores, sendo os principais:

- devido ao tipo específico de instalação do instrumento;
- devido a característica construtiva do próprio instrumento.

Para representar esse atraso é considerada uma equação diferencial de primeira ordem, sendo a função forçadora o sinal de entrada no posicionador da válvula de controle. Este sinal é gerado pelo controlador P+I+D.

Em seguida passa-se a identificar os elementos da equação que representam um atraso de primeira ordem para a válvula de controle:

As variáveis que compõem o filtro são identificadas como segue:

u	sinal de entrada no posicionador da válvula de controle
$\frac{dx}{dt}$	taxa de variação da posição do obturador da válvula
x	posição do obturador da válvula
C_T	constante de tempo da válvula de controle

A transferência do sinal de saída do controlador para a posição final da abertura da válvula de controle obedece a equação mostrada abaixo:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{1}{C_T} (u - x)$$

No modelo esta equação faz parte do sistema de equações diferenciais que deverá ser resolvido pelo método de Euler (LUYBEN, 1987, p.132).

5 DESCRIÇÃO DOS SISTEMAS DE CONTROLE DE NÍVEL DESENVOLVIDOS

5.1 Apresentação da tela de simulação do controle de nível de um tanque

Iniciar-se-á a análise dos sistemas de controle de nível através de uma apresentação preliminar, utilizando-se para isso, um sistema de controle de nível simples. Com isso, pretende-se familiarizar o aluno com as informações e uso das telas gráficas apresentadas, isto é, o objetivo principal é informar o que segue:

- como se configura a geometria de um tanque, isto é seu diâmetro;
- como se seleciona as diversas curvas instaladas para a válvula de controle de nível;
- como a sintonia do controlador interfere na resposta do sistema de controle;
- como se aplica o método de sintonia do sistema de controle;
- como o sistema de controle responde a uma mudança da curva instalada da válvula.

Nesta fase da apresentação do simulador, a intenção é dar uma idéia geral de como operar o aplicativo e quais são os recursos disponíveis.

O sistema de controle é constituído por uma malha de controle P+I+D simples, isto é, uma malha que possui um elemento primário (medidor de nível), um controlador e um elemento final de controle (válvula de controle).

O elemento primário mede o nível do tanque, informa este nível ao controlador que o compara com o *set point* desejado pelo operador e se houver desvio entre o nível medido e o *set point*, envia esse erro para o algoritmo P+I+D, que processa esse erro e envia a correção para a válvula de controle, que está instalada na linha de alimentação do tanque.

Na Figura 5.1 é apresentado o *layout* para a tela gráfica do controle de nível simples aonde podem ser identificados os seguintes itens de operação e visualização das variáveis do sistema de controle.

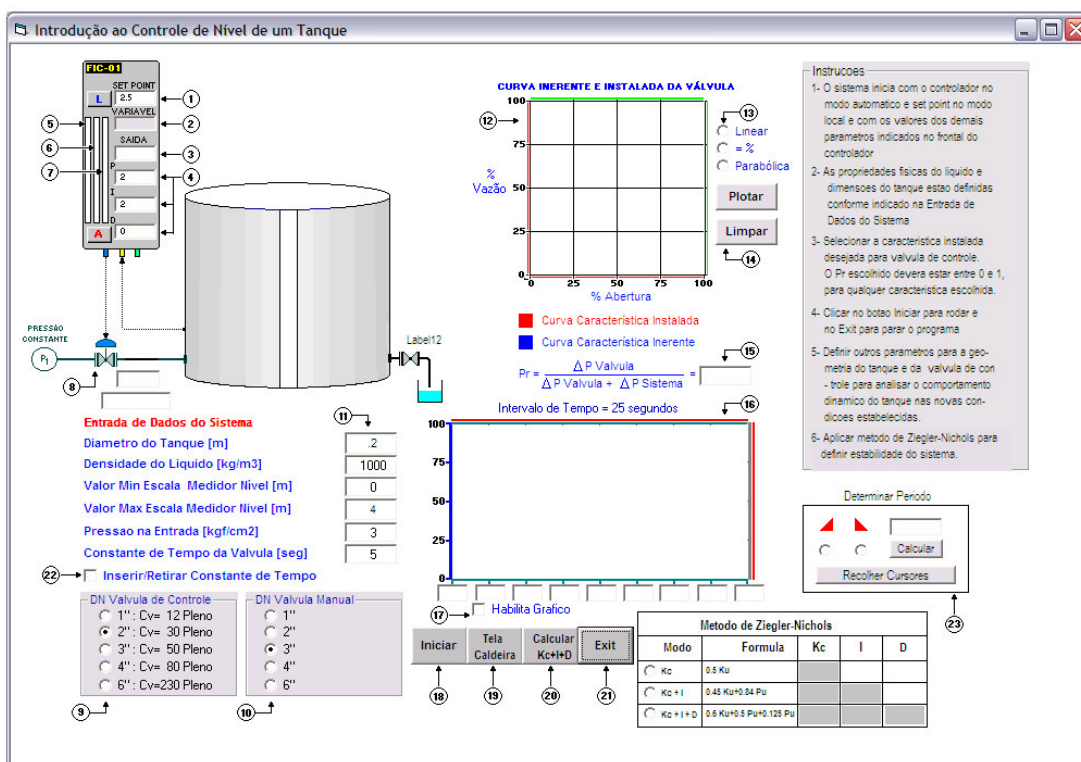


Figura 5.1 – Identificação na tela de simulação para o controle de nível a um elemento

Tabela 5.1.1 – Indicação dos principais pontos da tela gráfica do simulador

ITEM	DESCRIÇÃO
1	: Permite visualizar e alterar o valor do <i>set point</i> do controlador
2	: Visualização do valor do nível que esta sendo medido
3	: Visualização da saída do controlador para a válvula de controle
4	: Permite alterar e visualizar os parâmetros K(ganho), I(integral) e D(derivada) do controlador
5	: Gráfico de barras para saída do controlador para a válvula de controle
6	: Gráfico de barras para a variável controlada, no caso nível
7	: Gráfico de barras para o <i>set point</i>
8	: Indicação abertura e da vazão da válvula de controle
9	: Seleção do máximo Cv da válvula de controle
10	: Seleção da abertura da válvula manual
11	: Permite configurar os parâmetros do sistema tais como: diâmetro do tanque, densidade do fluido, valores mínimo e máximo do range do controlador de nível, pressão na entrada da válvula e ativar e desativar tempo de resposta da válvula.
12	: Visualização das curvas características inerente e instalada de uma válvula de controle
13	: Permite selecionar a curva linear, igual porcentagem e parabólica para a válvula de controle
14	: Limpa a área da janela
15	: Permite a entrada do valor Pr
16	: Apresenta o gráfico de tendências das variáveis <i>set point</i> , variável controlada e saída do controlador
17	: Ativa e desativa gráficos de tendência
18	: Ativa o programa
19	: Comuta a tela gráfica de nível para a tela gráfica da caldeira
20	: Calcula o ganho, integral e derivada pelo método de Ziegler-Nichols
21	: Encerra o programa
22	: Ativa e desativa a constante de tempo para a válvula de controle
23	: Utilidade utilizada para se medir um tempo selecionado no gráfico de tendências

Como pode-se observar na Figura 5.1, os parâmetros iniciais do controlador estão ajustados para ganho = 0.2; integral = 0.2 e derivativo = 0. Os parâmetros iniciais são escolhidos de forma conservadora com a finalidade de não iniciar o sistema controlado com grandes oscilações, pois isso poderia danificar os equipamentos conectados ao tanque e que não são mostrados no simulador. Antes de iniciar a simulação devem ser escolhidas as curvas inerente e instalada da válvula de controle. Como anteriormente apresentado para obter a curva inerente deve-se escolher $P_r = 1$ e para a curva instalada um valor de P_r maior que zero e menor que 1 para a curva instalada.

Para *set point* de nível do controlador, conforme pode-se ver na Figura 5.1, foi escolhido o valor de 2.5 metros, isto significa que o controlador, dependendo das perturbações introduzidas tentará, manter o valor do nível no tanque em 2.5 metros, modulando a abertura da válvula de controle, na tentativa de atingir esse objetivo.

O diâmetro do tanque escolhido foi dois metros e o diâmetro da tubulação de alimentação de água para o tanque foi escolhido em duas polegadas e a de descarga do tanque em três polegadas. O escoamento é feito por gravidade, isto é pela pressão da coluna de água no interior do tanque.

5.2 Apresentação da tela de simulação do controle de nível da caldeira

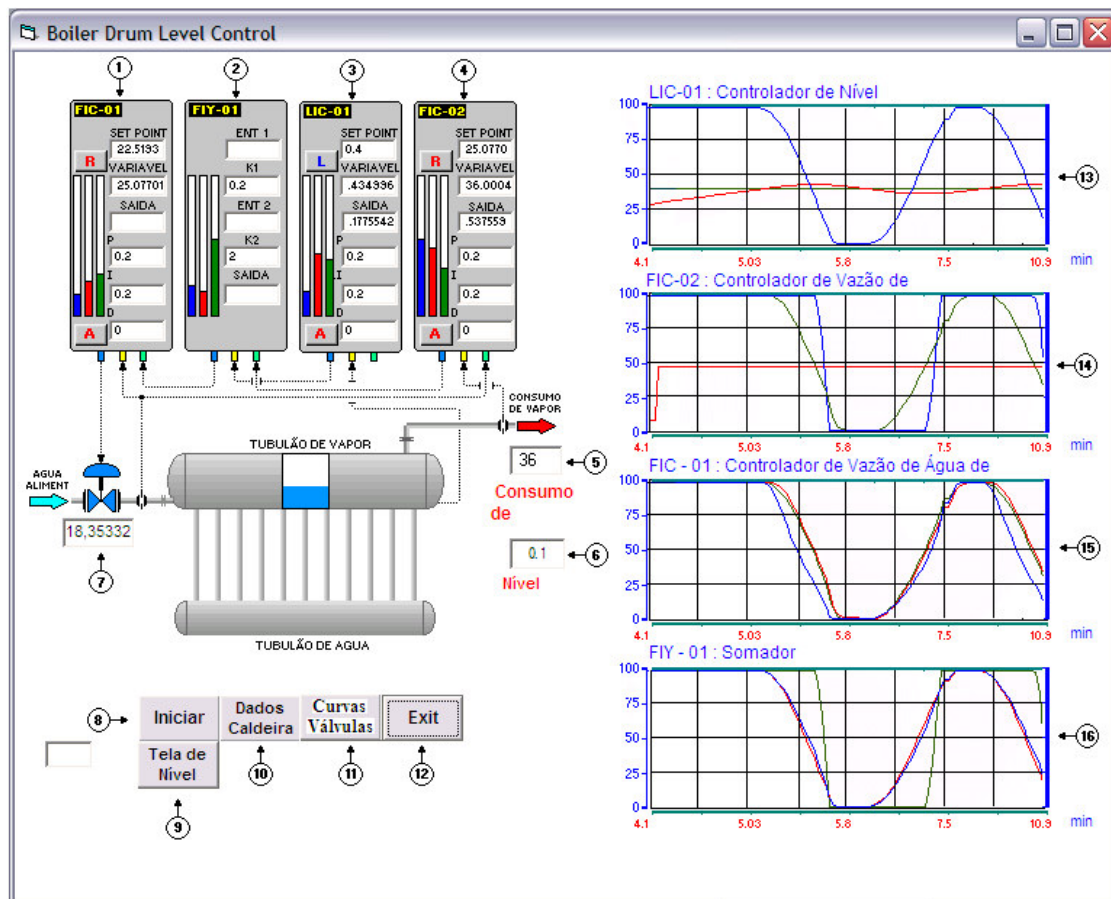


Figura 5.2 – Identificação das funções na tela de controle de nível da caldeira

Como apresentação final, será mostrado um sistema de controle de nível a três elementos de uma caldeira. Para isso, será apresentada uma tela gráfica do controle de nível e a forma para configurá-la. A operação e o significado dos itens para leitura e entrada de dados das variáveis do sistema é descrita na tabela abaixo.

O procedimento para carregamento dos dados e configuração desta tela será apresentado em detalhes no Capítulo 6

Na Figura 5.2 apresenta-se o *layout* para a tela gráfica do controle de nível da caldeira onde podem ser identificados os seguintes itens de operação e visualização das variáveis do sistema de controle.

Tabela 5.2.1 – Indicação dos principais pontos da tela gráfica de simulação da caldeira

ITEM	DESCRIÇÃO
1	: Controlador de vazão de água de alimentação da caldeira
2	: Somador
3	: Controlador de nível de água da caldeira
4	: Controlador com a função antecipatória, informando que houve variação na vazão do vapor de saída
5	: Indicação do consumo de vapor da caldeira
6	: Entrada do valor inicial do nível da caldeira
7	: Indicação da vazão de água de alimentação para a caldeira
8	: Inicia a aplicação
9	: Abre a tela de nível do tanque simples
10	: Habilita uma tela para entrada de dados da caldeira tais como : diâmetro e comprimento do tubulão de vapor, densidade da água no interior do tubulão
11	: Permite selecionar a válvula de controle desejada
12	: Encerra o programa
13	: Gráfico de tendências do controlador de nível mostrando <i>set point</i> , variável controlada e saída para a válvula
14	: Gráfico de tendências do controlador de vazão de vapor de saída mostrando <i>set point</i> , variável controlada e saída para a válvula
15	: Gráfico de tendências do controlador de vazão de água de alimentação mostrando <i>set point</i> , variável controlada e saída para a válvula
16	: Somador

5.3 Comportamento do Controle de Nível da Caldeira para o Dados Iniciais dos Controladores

Após ter sido implementada a configuração preliminar, inicia-se a simulação, como mostrado na tela da Figura 5.2. Nesta tela, mostramos que os ajustes iniciais dos controladores não são adequados devido as oscilações que as variáveis controladas apresentam.

A Figura 5.2 está sendo apresentada para mostrar as grandes oscilações que podem ocorrer em um sistema quando seus controladores não estão adequadamente sintonizados. O objetivo desta apresentação é demonstrar os métodos de sintonia dos parâmetros dos controladores.

Como dito anteriormente, os principais métodos que foram utilizados para sintonia dos controladores, foram:

- **Método de Ziegler-Nichols**

Apresenta a desvantagem de ter que provocar no sistema de controle oscilações com amplitude constante e a partir dessas oscilações obter parâmetros que permitem calcular os melhores valores dos parâmetros nos controladores. Na

maioria dos casos essas oscilações são de grande amplitude e frequência e não permitidas pelo pessoal responsável pela operação da unidade.

- **Método Empírico**

Não apresenta a desvantagem das oscilações de grande amplitude e frequência. O método empírico está apoiado em parte no método de Ziegler-Nichols e em parte no método da tentativa, que busca o decaimento da oscilação de $\frac{1}{4}$ de amplitude conhecido como QAD (Quarter Amplitude Decay) (KINNEY, 1986, p.160).

6 EXPERIÊNCIA E TESTE DO SISTEMA DESENVOLVIDO

6.1 Tanque cilindro reto na posição vertical – Teste nr.1

Os testes para o tanque de armazenamento na forma de cilindro reto na posição vertical serão conduzidos atendendo as seguintes etapas:

CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA PARA O TESTE NR. 1

- 1 : Seleciona-se a válvula com característica inerente linear e com $Pr = 0.7$
 - 2 : Não será considerado atraso na resposta da válvula de controle
 - 3 : Considera-se um reservatório com diâmetro de 0.2 metros
 - 4 : Considera-se um líquido com densidade de 1000 kg/m³
 - 5 : A pressão da água de alimentação é de 6 kgf/cm²
-

O resultado do teste nr. 1 é demonstrado na Figura 6.1, em que são indicadas as seguintes variáveis que representam o sistema de controle:

- *Set point* de nível, está indicado no terceiro *bargraph* do controlador contador, contado da esquerda para a direita (cor verde);
- Variável de processo, ou seja, o nível no tanque, no *bargraph* do meio (cor vermelha);
- Saída do controlador para a válvula de controle, no primeiro *bargraph*, contado a partir da esquerda para a direita (cor azul).

Observando a Figura 6.1, vê-se que sistema de controle, para os parâmetros de sintonia ajustados, atinge rapidamente a estabilidade, isto é, a variável controlada, se iguala ao *set point*, em aproximadamente um minuto, com um quarto