



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
CAMPUS IV - ARAXÁ

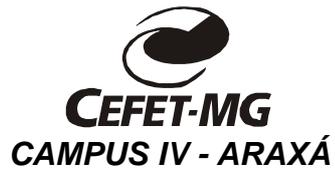
ENGENHARIA DE AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

**HENRIQUE COUTINHO FERREIRA**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA SUPERVISÓRIO PARA A  
PLANTA DE NÍVEL DO LABORATÓRIO DE AUTOMAÇÃO**

ARAXÁ

2011



**HENRIQUE COUTINHO FERREIRA**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA SUPERVISÓRIO PARA A  
PLANTA DE NÍVEL DO LABORATÓRIO DE AUTOMAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais / Campus IV - Araxá, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Automação Industrial.

Orientador: Prof. MARCOS CÍCERO FARIA

Co-Orientador: Prof. HENRIQUE JOSÉ AVELAR

ARAXÁ

2011

*Posso tudo naquele que me fortalece.*  
Filipenses 4.13

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais, Mara Cristina Salgado Góes e Marcos Góes Ferreira, por todo suporte que me deram durante o curso, incentivando-me com seus conselhos, apoiando-me nas horas de dificuldades.

Agradeço aos meus companheiros de sala que estiverem comigo nos momentos difíceis e nos alegres, pelas muitas horas de estudo em grupo que compartilhamos e que muito me ajudaram.

Aos professores com os quais tive aulas, mesmo que por pouco tempo, pelo comprometimento e empenho de cada um para a melhoria do curso.

Ao meu co-orientador Prof. Henrique pela valiosa ajuda no desenvolvimento deste trabalho.

Ao amigo Angelo que tanto me ajudou durante a programação do LabView para a construção do sistema supervisorio.

Especialmente à DEUS, que sempre me guiou os passos, dando-me saúde, coragem e harmonia para que não desistisse dessa importante jornada de minha vida.

## RESUMO

Os processos industriais com o passar do tempo aumentam sua complexidade e número de variáveis devido ao constante avanço tecnológico e a exigência de produtos com maior qualidade. Por isso fica complicado para as pessoas envolvidas no monitoramento e controle do processo a sua plena compreensão. Tendo em vista esse problema é que os sistemas supervisórios foram criados, fazendo com que todo o processo seja visualizado através de interfaces gráficas, tornando-o de mais fácil entendimento e amigável para os operadores e usuários. Existem muitos softwares supervisórios no mercado cada qual com sua complexidade e robustez. A escolha de qual supervisório a ser usado depende muito das características do processo a ser controlado e das necessidades da empresa, visando um melhor custo benefício. As variáveis mais comuns na indústria são temperatura, vazão, nível e pressão, sendo de grande importância, nos mais diversos setores industriais, o seu controle. O objetivo deste trabalho é a criação de um sistema supervisório através do software LabView, para uma planta de nível do laboratório de automação do Campus IV – CEFET MG, encontrando a sua função de transferência, a criação de interfaces gráficas e realização do controle do nível por PID.

**Palavras-chave:** Sistema supervisório. LabView. Função de transferência. Controlador PID.

## ABSTRACT

Industrial processes over time increase their complexity and number of variables due to constant technological advance and the demand of products with higher quality. So it gets complicated for people involved in monitoring and process control their full understanding. In view of this problem is that the supervisory systems were created, making the whole process is visualized through graphical interfaces, making it easier to understand and more friendly for operators and users. There are many supervisory systems in the market each with its complexity and robustness. The choice of which supervisory to use depends largely on the characteristics of the process to be controlled and needs of the company aiming at a better cost benefit. The most common variables in the industry are temperature, flow, level and pressure, being of great importance in various industrial sectors, its control. The objective of this work is the creation of a supervisory system using LabView software to a level plant of the automation laboratory of CEFET MG college, campus IV, finding its transfer function, the creation of graphical interfaces and implementation level control by PID.

**Keywords:** Supervisory system. LabView. Function transfer. PID controller.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Evolução dos sistemas de controle desde o final do século XIX .....	3
FIGURA 2 – Classificação geral dos sistemas .....	4
FIGURA 3 – Processo a ser controlado .....	8
FIGURA 4 – Sistema em malha aberta .....	9
FIGURA 5 – Sistema típico de troca de calor em malha aberta .....	9
FIGURA 6 – Sistema em malha fechada manual .....	10
FIGURA 7 – Sistema em malha fechada com retroação negativa .....	10
FIGURA 8 – Processo típico de troca de calor usando controle automático .....	11
FIGURA 9 – (a) Sistema de nível líquido .....	16
FIGURA 9 – (b) curva de altura do nível <i>versus</i> vazão. ....	16
FIGURA 10 – (a) Diagrama de blocos de um sistema de 1ª ordem .....	23
FIGURA 10 – (b) diagrama de blocos simplificado .....	23
FIGURA 11 – Curva exponencial de resposta .....	24
FIGURA 12 – Controle de temperatura com vapor atuado por válvula solenóide .....	27
FIGURA 13 – Resposta de um controle Liga-Desliga .....	27
FIGURA 14 – Resposta proporcional a um degrau de amplitude A .....	28
FIGURA 15 – Resposta para diferentes valores do ganho proporcional .....	29
FIGURA 16 – Resposta de um controlador PI a um degrau de amplitude A .....	31
FIGURA 17 – Resposta de um controlador PI para diferentes valores de $t_i$ .....	32
FIGURA 18 – Resposta de um controlador PD a uma variação em rampa de inclinação A .....	33
FIGURA 19 – Resposta de um controlador PD para diferentes valores de $t_d$ .....	34
FIGURA 20 – Resposta de um controlador PID .....	35
FIGURA 21 – Pirâmide da automação .....	37
FIGURA 22 – Estação de IHM .....	38
FIGURA 23 – Planta de nível do laboratório de Automação .....	40
FIGURA 24 – Sinóptico da planta de nível .....	40
FIGURA 25 – Resposta ao degrau da planta de nível .....	42
FIGURA 26 – Diagrama P&ID do processo .....	43
FIGURA 27 – Legenda P&ID do processo .....	44

FIGURA 28 – Formato de transmissão da comunicação serial.....	46
FIGURA 29 – Configuração do valor do nível .....	48
FIGURA 30 – Painel Frontal.....	49
FIGURA 31 – Diagrama de bloco.....	50
FIGURA 32 – Ícones e conectores.....	50
FIGURA 33 – Painel frontal – G(s).....	51
FIGURA 34 – Diagrama de Blocos – G(s).....	52
FIGURA 35 – Painel frontal e Diagrama de Blocos – PID.....	52
FIGURA 36 – Resposta ao degrau para o sistema .....	53
FIGURA 37 – Painel Frontal - Supervisório.....	54
FIGURA 38 – Diagrama de Blocos – Sistema Desligado .....	56
FIGURA 39 – Diagrama de Blocos – Supervisório em Manual .....	56
FIGURA 40 – Diagrama de Blocos – Supervisório em Automático .....	58
FIGURA 41 – Simulação como supervisório em Automático .....	59
FIGURA 42 – Arquivo que guarda o valor do Nível.....	59
FIGURA 43 – Simulação como supervisório em Manual .....	60

## LISTA DE SIGLAS

CI	Circuito integrado
TTL	Logic Transistor-Transistor (Lógica Transistor-Transistor)
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor (Semicondutor Metal-Óxido Complementar)
PLC	Programmable Logic Controller (Controlador Lógico Programável)
PID	Proporcional Integral Derivativo
ISA	International Society of Automation (Sociedade Internacional da Automação)
P&ID	Piping & Instrument Diagram (Diagrama de tubulação e instrumentação)
LABVIEW	Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench
VI	Virtual Instrument (Instrumento Virtual)

## LISTA DE SIMBOLOGIA

$\Leftrightarrow$  - se e só se; se

$\tau$  - constante de tempo

$\Re$  - números reais

$\vee$  - ou

$\in$  - está em; é um elemento de; pertence a

$\mathbb{C}$  - números complexos

$\mathbb{N}$  - números naturais

$\exists$  - existe

$\forall$  - para todos; para qualquer; para cada

PV - Process variable (variável controlada)

MV - Manipulated variable (variável manipulada)

SP - set point (ponto de ajuste)

E - erro

T - constante de tempo

t - tempo

mA - mili ( $10^{-3}$ ) Amperes

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b> .....	v
<b>ABSTRACT</b> .....	vi
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	vii
<b>LISTA DE SIGLAS</b> .....	ix
<b>LISTA DE SIMBOLOGIA</b> .....	x
<b>I INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1 OBJETIVOS .....	1
1.2 JUSTIFICATIVA .....	1
1.3 METODOLOGIA .....	1
<b>II SISTEMAS DE CONTROLE</b> .....	2
2.1 PERSPECTIVA HISTÓRICA .....	2
2.2 CLASSIFICAÇÃO DE SISTEMAS .....	4
2.3 SISTEMAS DE CONTROLE EM MALHA ABERTA E FECHADA .....	6
2.3.1 Controle em Malha Aberta .....	8
2.3.2 Controle em Malha Fechada .....	9
<b>III MODELAGEM MATEMÁTICA E RESPOSTA A EXCITAÇÃO</b> .....	12
3.1 MODELAGEM NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA .....	13
3.1.1 Função de Transferência .....	13
3.1.2 Modelagem Matemática de Sistemas de Nível de Líquidos .....	15
3.2 ANÁLISE DE RESPOSTA TRANSITÓRIA E DE REGIME ESTACIONÁRIO .....	21
3.2.1 Sistemas de Primeira Ordem .....	22
<b>IV AÇÕES DE CONTROLE</b> .....	25
4.1 INTRODUÇÃO .....	25
4.2 AÇÕES DE CONTROLE .....	26
4.2.1 Controle Liga-Desliga (On-Off) .....	27
4.2.2 Controle Proporcional (P) .....	28
4.2.3 Controle Proporcional Integral (I) .....	30
4.2.4 Controle Proporcional Derivativo (PD) .....	32
4.2.5 Controle Proporcional Integral Derivativo (PID) .....	34

<b>V SISTEMAS SUPERVISORIOS</b> .....	36
5.1 IHM .....	37
5.2 SCADA.....	39
5.3 PROCESSO.....	39
5.3.1 Função de Transferência da Planta de Nível.....	42
5.4 VARIÁVEIS DO PROCESSO.....	43
5.5 AQUISIÇÃO DE DADOS.....	44
5.5.1 Comunicação por Polling.....	45
5.5.2 Comunicação por Interrupção.....	45
5.5.3 Comunicação Serial.....	45
5.5.4 Protocolo de Comunicação da Planta de Nível .....	47
<b>VI LABVIEW</b> .....	49
6.1 FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA.....	51
6.1.1 Painel Frontal .....	51
6.1.2 Diagrama de Blocos .....	52
6.1.3 Simulação .....	53
6.2 COMUNICAÇÃO E CONTROLE DA PLANTA .....	54
6.2.1 Painel Frontal .....	54
6.2.2 Diagrama de Blocos .....	55
6.2.3 Simulação .....	58
6.3 RESULTADOS ENCONTRADOS.....	60
<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b> .....	62
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	63
<b>ANEXOS</b> .....	64

# I INTRODUÇÃO

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver um sistema supervisório através do software LabView, que consiste em: elaboração de uma tela gráfica, levantamento da função de transferência do processo e a criação de um sistema supervisório para controle do nível através de um controlador PID.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

O curso de Engenharia de Automação Industrial do CEFET/MG - Campus IV / Araxá possui um conjunto de plantas industriais do fabricante Ditacta, mas, o acesso a programação dessas plantas não foi viabilizado. Diante da impossibilidade de mudar essa programação do controlador nem tampouco efetuar modificações, um supervisório precisa ser desenvolvido visando uma melhor interação e possibilidade de mudanças na estrutura da programação quando se fizer necessário.

## 1.3 ESTRUTURA

No capítulo dois será descrito como se divide os tipos de sistemas existentes e conceitos básicos da automação serão introduzidos. O capítulo três trata de funções de transferência e o método para encontrá-las conforme o sistema estudado (nível). No capítulo quatro o controle Proporcional Derivativo e Integrativo (PID) é apresentado com suas respectivas influencias em controle de processos. No capítulo cinco expõem-se o conceito de sistemas supervisórios, as partes necessárias para a sua composição e faz-se o levantamento da função de transferência da planta de nível. No capítulo seis o supervisório utilizado, as simulações da função de transferência e do supervisório são apresentados juntamente com seus respectivos resultados.

## II SISTEMAS DE CONTROLE

A automação é uma área recente da engenharia e tem como objetivo proporcionar melhorias na qualidade do processo, evitar desperdícios, trazer mais segurança às pessoas envolvidas com a mesma, facilitar as constantes mudanças nas plantas industriais, dentre outros. Há que se considerar que com o desenvolvimento da indústria uma grande quantidade de produtos foi produzida em um curto espaço de tempo, fazendo com que a automação evoluísse rapidamente. Para um adequado uso e aproveitamento da automação é preciso ter um entendimento dos tipos de processos existentes e assim saber qual o melhor controle a ser aplicado. Para tanto, conhecer como os sistemas são divididos é de suma importância.

### 2.1 PERSPECTIVA HISTÓRICA

Os primeiros sistemas de controle foram desenvolvidos durante a Revolução Industrial, no final do século XIX. As funções de controle eram implementadas por engenhosos dispositivos mecânicos, os quais automatizavam tarefas críticas e repetitivas das linhas de montagem da época. Os dispositivos eram desenvolvidos para cada tarefa especificamente e, devido à natureza mecânica, tinham uma vida útil pequena.

Na década de 20, os dispositivos mecânicos foram substituídos pelos relés e contadores. A lógica a relés viabilizou o desenvolvimento de funções de controle mais complexas e sofisticadas. Desde então, os relés tem sido empregados em um grande número de sistema de controle em todo mundo. Eles se mostraram uma alternativa de custo viável, especialmente para automação de pequenas máquinas com um número limitado de transdutores e atuadores. Contudo na indústria moderna a lógica a relés e a contadores é raramente adotada.

O desenvolvimento da tecnologia dos Circuitos Integrados (CIs) possibilitou uma nova geração de sistemas de controle. Em comparação com os

relés, os CIs baseados nas tecnologias Logic Transistor-Transistor (TTL - Lógica Transistor-Transistor) ou Complementary Metal-Oxide-Semiconductor (CMOS - Semicondutor Metal-Óxido Complementar) são muito menores, mais rápidos e possuem uma vida útil muito maior. Em muitos sistemas de controle, que utilizam relés e CIs, a lógica de controle ou algoritmo, é definida permanentemente pela interligação elétrica. Sistemas com lógica definida pela interligação elétrica são de simples implementação, mas o trabalho de alterar o seu comportamento ou lógica é complexo e demorado.

No início da década de 70, os primeiros computadores comerciais começaram a ser utilizados como controladores em sistemas de controle de grande porte. Pelo fato de o computador ser programável, ele proporciona uma grande vantagem em comparação com a lógica por interligação elétrica utilizada em sistemas com relés e CIs. No entanto, os primeiros computadores eram grandes, caros, difíceis de programar e muito sensíveis para utilização em ambientes “hostis” como os encontrados em muitas plantas industriais. O Programmable Logic Controller (PLC) ou Controlador Lógico Programável (CLP) foi desenvolvido a partir de uma demanda existente na indústria automobilística norte-americana. Com a evolução dos computadores foram desenvolvidos sistemas supervisórios que tornaram a interação de controle do processo mais amigável e fácil para os operadores. A FIG. 1 ilustra esse processo de evolução.

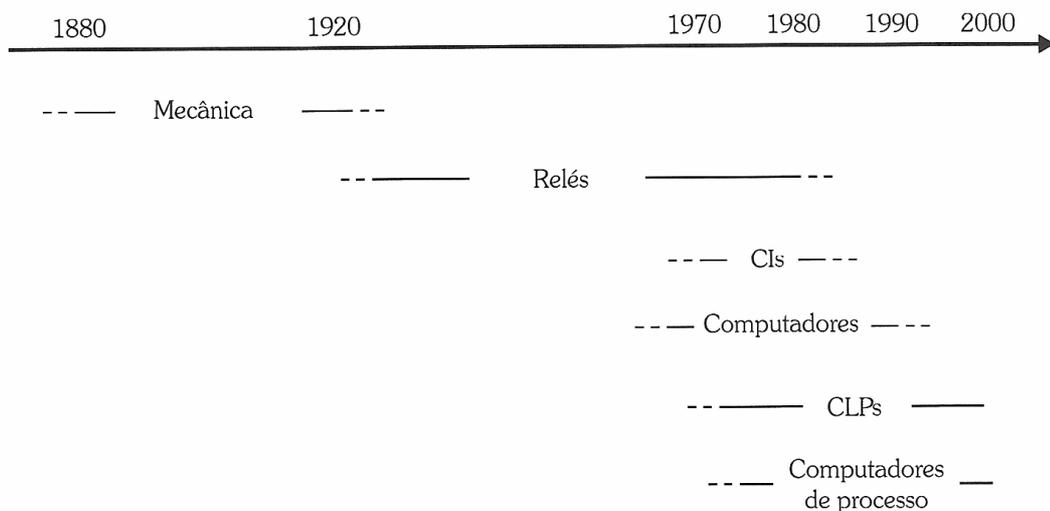


FIGURA 1 - Evolução dos sistemas de controle desde o final do século XIX.

Fonte: FRANCHI & CAMARGO, 2008, p. 23.

## 2.2 CLASSIFICAÇÃO DE SISTEMAS

Segundo Montgomery (2004) sistemas são definidos como uma parte limitada do universo caracterizada por meio de um conjunto finito de variáveis que podem ser associadas às grandezas físicas que as identifica. Num contexto mais amplo, sistemas são conjuntos de elementos, materiais ou imateriais, entre os quais se podem definir uma relação e que operam com uma estrutura organizada. Os sistemas podem ser classificados de acordo com a FIG. 2:

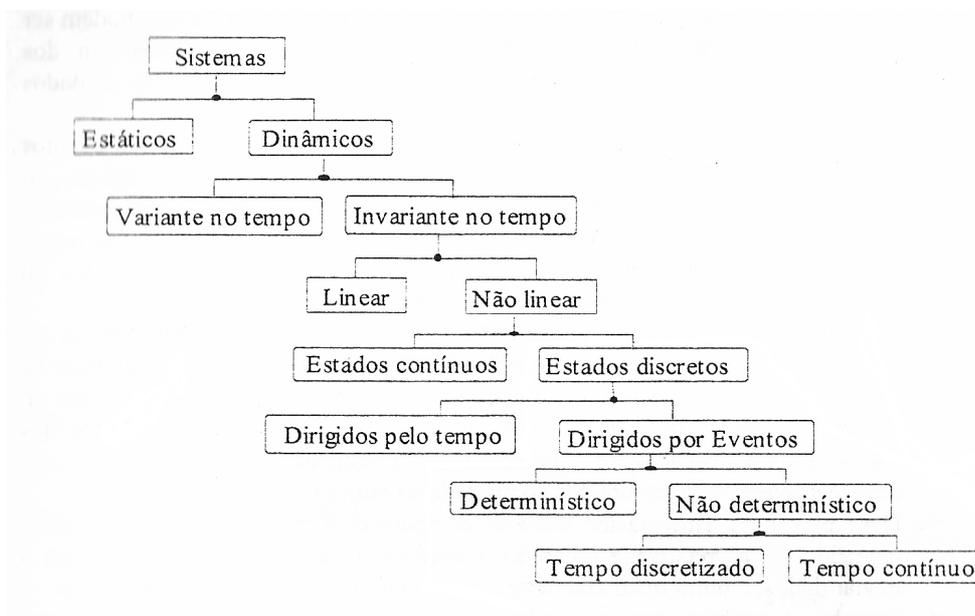


FIGURA 2 - Classificação geral dos sistemas

Fonte: MONTGOMERY, 2004, p. 2.

- *Estático e Dinâmico* - nos sistemas estáticos a saída é independente dos valores passados da entrada. Nos sistemas dinâmicos, a saída depende dos valores passados da entrada. Os comportamentos dos sistemas dinâmicos são geralmente descritos por meio de equações diferenciais e o comportamento dos sistemas estáticos através de equações algébricas.
- *Variante no Tempo e Invariante no Tempo* - um sistema invariante no tempo satisfaz à condição:

$$y(t) = g(u(t)) \Leftrightarrow y(t - \tau) = g(u(t - \tau)) \quad (1)$$

Nessa expressão  $y(t)$  é o vetor de saída,  $g(\cdot)$  é a transformação que o sistema realiza sobre  $u(t)$ , vetor aplicado à sua entrada. A invariância no tempo significa que um deslocamento temporal da entrada,  $u(t - \tau)$ , resulta em um mesmo deslocamento temporal da saída,  $y(t) = (t - \tau)$ , sem afetar a transformação  $g(\cdot)$

- *Lineares e Não Lineares* - um sistema linear satisfaz ao princípio da superposição que pode ser expresso através da condição:

$$g(a_1u_1 + a_2u_2) = a_1g(u_1) + a_2g(u_2) \quad (2)$$

Na equação acima,  $u_1$  e  $u_2$  são dois vetores de entrada;  $a_1$  e  $a_2$  são duas constantes; e  $g(\cdot)$  representa a transformação que o sistema realiza sobre um vetor aplicado na sua entrada, ou seja, o sistema pode ser analisado individualmente.

- *Estado Contínuo e Estado Discreto* - em sistemas de estado contínuo as componentes do vetor de estado  $x = [x_1 \dots x_i \dots x_n]^T$  são variáveis reais ou complexas, isto é,  $x_i \in R \vee x_i \in C, i = 1, \dots, n$ . Já em sistemas de estado discreto, as componentes do vetor de estado são variáveis inteiras.
- *Dependente do Tempo e Dependente de Eventos* - em sistemas dependentes do tempo, o vetor estado muda com o tempo. Em sistemas dependentes de eventos, o vetor de estado somente é modificado quando ocorrem determinados eventos assíncronos que provocam transições de estado, isto é, após a ocorrência de um evento o estado permanece inalterado até que outro evento ocorra.
- *Determinísticos e Não Determinístico (Estocásticos)* - um sistema é dito estocástico se uma ou mais de suas variáveis for aleatória. Nesse caso, o vetor de estado do sistema é descrito por um processo estocástico e uma descrição probabilística necessária para caracterizar o comportamento do sistema.
- *Tempo Contínuo e Tempo Discreto* - um sistema é dito de tempo contínuo e as componentes do vetor de estado  $X(t) = [x_1(t) \dots x_i(t) \dots x_n(t)]^T$  são definidas a qualquer instante de tempo, isto é,  $\forall t \in R; \exists x_i(t); i = 1; \dots, n$ :

Em um sistema de tempo discreto as componentes do vetor de estado somente são definidas em certos instantes de tempo, ou seja,  $\forall t \in N; \exists x_i(t); i = 1; \dots, n$ :

Em sua estrutura os sistemas físicos apresentam componentes que interagem entre si. Cada componente também pode ser considerado um sistema com características próprias, ou seja, um subsistema cujo comportamento pode ser descrito independentemente de seus demais componentes, exceto pelas suas interações. Cada componente tem seu próprio conjunto de estados ou configuração interna e isso é uma informação necessária para descrever o comportamento futuro do sistema. Frequentemente, o estado de um componente depende dos seus estados passados. Logo, os estados de um componente definem uma trajetória no tempo e proporcionam uma informação a respeito de sua descrição.

Em geral, os componentes de um sistema são concorrentes e essa concorrência é definida pelas atividades paralelas que podem ser realizadas pelos seus vários componentes. Assim, num mesmo instante de tempo podem ocorrer mudanças de estado em vários subsistemas. A temporização das atividades realizadas nos diversos componentes pode ser complexa e, conseqüentemente, a descrição de suas interações pode se tornar difícil. Por isso, o estudo dos sistemas requer o desenvolvimento de modelos que permitam analisar o comportamento das variáveis e definir suas características.

### 2.3 SISTEMAS DE CONTROLE EM MALHA ABERTA E FECHADA

O controle automático tem desempenhado um papel fundamental no avanço da engenharia e da ciência. Além da grande importância em sistemas de aeronaves e robóticos, o controle automático tem se tornado parte integrante dos processos industriais e de produção. O controle automático, a título de exemplo, é essencial no controle numérico de máquinas-ferramentas nas industriais manufatureiras, em operações industriais como controle de pressão, de temperatura, nível, etc. Assim, são viabilizados meios para aperfeiçoar o desempenho dos sistemas dinâmicos, melhorar a produtividade, diminuir o trabalho árduo de rotinas de operações manuais repetitivas e, obrigatoriamente os engenheiros precisam dominar os conhecimentos inerentes a essa área. Segundo Aguirre,

*Controle é a parte do conhecimento que estuda maneiras sistemáticas de descrever sistemas e de sintetizar ações tais que esses sistemas se comportem de maneira previamente determinada e a automação estuda maneiras de implementar e de realizar ações para tornar um sistema ou processo automático, sendo que tais ações podem, ou não, ter tido sua origem na área de controle (AGUIRRE, 2007, p. 7).*

Antes de definir e comparar o controle em malha aberta ou malha fechada alguns conceitos fundamentais são necessários:

- *Variável controlada e variável manipulada:* A *variável controlada (PV)* é a grandeza ou condição que é medida e controlada, como por exemplo, o nível ou a temperatura de um tanque. A *variável manipulada (MV)* é a grandeza ou a condição modificada pelo controlador, de modo que afete o valor da variável controlada. Normalmente, a variável controlada é a saída do sistema. Controlar significa medir o valor da variável controlada do sistema e utilizar a variável manipulada para corrigir ou limitar os desvios do valor medido a partir de um valor desejado.
- *Ponto de ajuste:* Ponto de ajuste, mais conhecido por *set-point (SP)*, é o valor desejado para a variável controlada.
- *Sistemas a controlar ou plantas:* Qualquer objeto físico a ser controlado (como o nível de um tanque)
- *Processos:* De acordo com Ogata, no dicionário Merriam-Webster,

*Processo é uma operação natural de progresso contínuo ou um desenvolvimento caracterizado por uma série de modificações graduais que se sucedem umas às outras de modo relativamente estável, avançando em direção a determinado resultado ou objetivo; ou uma operação contínua progressiva, artificial ou voluntária, que consiste em uma série de ações ou movimentos controlados, sistematicamente destinados a atingir determinados fins ou resultados (OGATA, 2007, p. 2).*

Pode-se considerar de uma forma mais simples que processo é toda operação a ser controlada. O processo a ser controlado pode ser representado por um bloco onde a relação de entrada-saída representa uma relação de causa e efeito do processo como mostrado na FIG. 3.



FIGURA 3 - Processo a ser controlado  
 Fonte: DORF & BISHOP, 2001, p. 2.

- *Sistemas* - Um sistema é combinação de componentes que agem em conjunto para atingir determinado objetivo. A idéia sistema não fica restrita apenas a algo físico. Dessa maneira, a palavra 'sistema' pode ser empregada para se referir a sistemas físicos, biológicos, econômicos e outros.
- *Distúrbios* - Um distúrbio é um sinal que tende a afetar de maneira adversa o valor da variável de saída de um sistema. Um distúrbio gerado dentro de um sistema será chamado de distúrbio interno, enquanto um distúrbio externo é aquele gerado fora do sistema e que se comporta com um sinal de entrada do sistema.
- *Elemento Final de Controle* - Dispositivo que age na variável manipulada para o controle da variável do processo.

### 2.3.1 Controle em Malha Aberta

Sistemas em malha aberta, mostrado na FIG. 4, são aqueles em que a informação sobre a variável controlada não é utilizada para ajustar quaisquer das variáveis de entrada, visando compensar as variações que ocorrem nas variáveis do processo e que influenciam na variável controlada. Nos sistemas de controle de malha aberta o sinal de saída não é medido nem realimentado para a comparação com a entrada. Em qualquer sistema de controle de malha aberta, a saída não é comparada com a entrada de referência. Assim, cada entrada de referência corresponde uma condição fixa de operação. Dessa maneira, a precisão do sistema depende de uma calibração.

Na presença de distúrbios, um sistema de controle de malha aberta não vai executar a tarefa desejada. O sistema de malha aberta somente poderá ser utilizado na prática se a relação entre a entrada e a saída for conhecida e se não houver nenhum distúrbio interno ou externo.

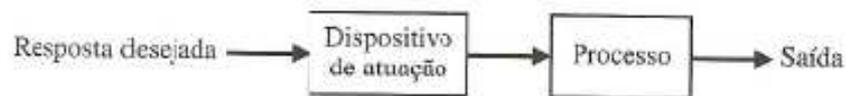


FIGURA 4 - Sistema em malha aberta  
Fonte: DORF & BISHOP, 2001, p. 2.

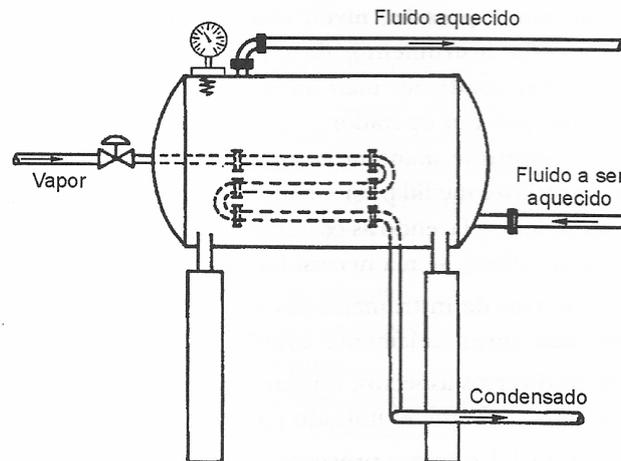


FIGURA 5 – Sistema típico de troca de calor em malha aberta  
Fonte: BEGA et al, 2006, p. 2.

Como mostrado na FIG. 5, a variável controlada (temperatura do fluido aquecido na saída do trocador de calor) não é medida e utilizada para a realimentação e compensação na entrada (vazão de vapor).

### 2.3.2 Controle em Malha Fechada

Em um sistema em malha fechada ou sistema de controle com realimentação há uma relação de comparação entre a saída e a entrada de referência (SP) de maneira que a variável controlada do processo seja mantida dentro dos limites estabelecidos, ou seja, o sistema de controle em malha fechada regula a variável controlada, fazendo correções na variável manipulada. O sinal de erro atuante, diferença entre o sinal de entrada e o de realimentação, realimenta o controlador minimizando o erro e acertando a saída do sistema ao valor desejado (erro ou off set = valor do ponto e ajuste – valor medido na variável controlada):

$$E = SP - PV \quad (3)$$

O controle em malha fechada pode ser realizado por um operador humano (*controle manual*) ou pelo uso de instrumentação (*controle automático*).

a) *Sistema de controle em malha fechada manual:*

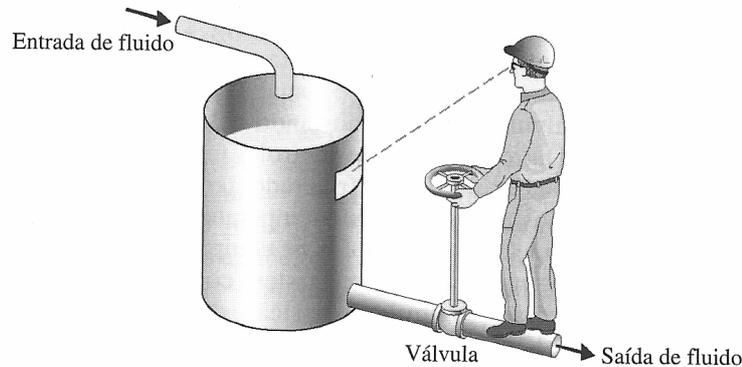


FIGURA 6 - Sistema em malha fechada manual  
Fonte: DORF & BISHOP, 2001, p. 8.

Na FIG. 6 o operador terá como função medir o nível (variável controlada) e corrigir a vazão de saída de água do tanque através da abertura da válvula (variável manipulada), de forma a manter o nível (variável controlada) no valor desejado (set-point). Ou seja, o operador irá medir o nível através da janela na parede lateral do reservatório, este sinal será comparado mentalmente com o nível desejado, que está armazenado em seu cérebro, e com base na diferença entre estes dois valores (erro ou offset), o operador fará a computação (definirá como e quanto irá atuar) para em seguida, atuar na válvula fazendo a correção.

b) *Sistema de controle em malha fechada automático:*

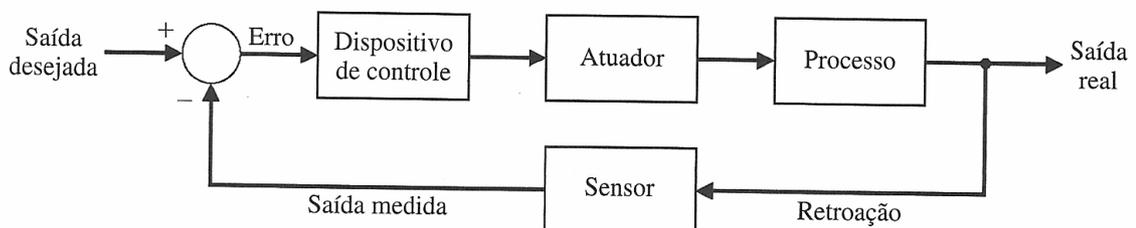


FIGURA 7 - Sistema em malha fechada com retroação negativa  
Fonte: DORF & BISHOP, 2001, p. 8.

O sistema mostrado na FIG. 7 é um sistema de controle de retroação negativa, porque a saída é subtraída da entrada e a diferença é usada como sinal de entrada para o controlador. Na a FIG. 8 a medição é feita pelo Transmissor de Temperatura (TT); a comparação do valor medido pelo TT com o ponto de ajuste dado pelo operador, SP, para obtenção do valor do erro e a computação (que irá considerar os ajustes e tipos de ações de controle utilizadas) são executadas pelo Controlador de Temperatura (TRC), enquanto a correção será efetivada pela Válvula de Controle (TV), com base no sinal recebido do TRC.

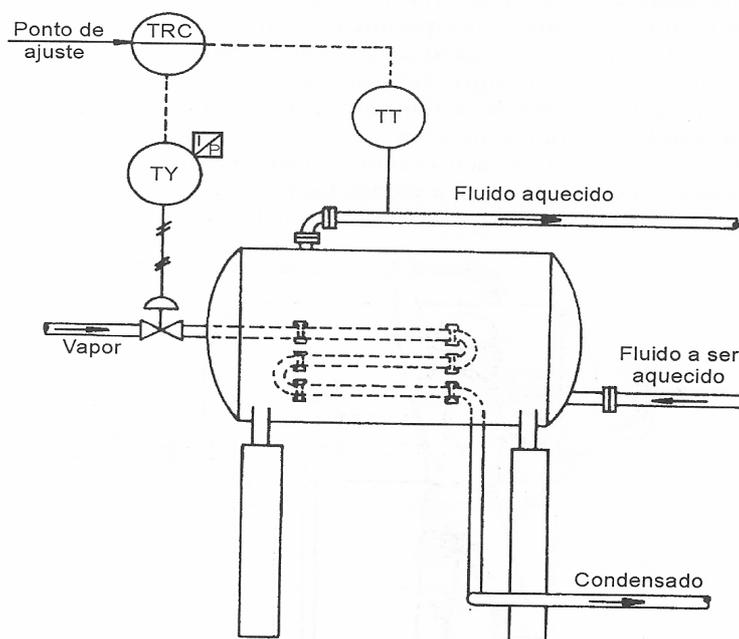


FIGURA 8 - Processo típico de troca de calor usando controle automático  
Fonte: BEGA et al, 2006, p. 4.

onde:

TRC: Temperature Record Control (Controlador Registrador de Temperatura)

TT: Transmit Temperature (Transmissor de Temperatura)

TY: Convert Temperature (Conversor de Temperatura)

IP: Conversor Corrente / Pressão

### III MODELAGEM MATEMÁTICA E RESPOSTA A EXCITAÇÃO

Modelos matemáticos têm sido usados ao longo da história para os mais diversos fins, como explicar fenômenos observados tanto na natureza quanto em sistemas sociais, equipamentos etc. Modelagem matemática é a área do conhecimento que estuda maneiras de desenvolver e implementar modelos matemáticos de sistemas reais. Um modelo matemático de um sistema real é um análogo matemático que representa algumas das características observadas de tal sistema.

Há duas abordagens para a análise de um sistema. A primeira é conhecida como técnica clássica, ou no domínio de frequência. Esta abordagem é baseada na transformação de uma equação diferencial em uma função de transferência, gerando assim um modelo matemático do sistema que relaciona algebricamente uma representação da saída a uma representação da entrada. A substituição de uma equação diferencial por uma equação algébrica não somente simplifica a representação de subsistemas individuais, mas também simplifica a modelagem de subsistemas interconectados.

A principal desvantagem da abordagem clássica é a sua aplicabilidade limitada: só pode ser usada em sistemas lineares e invariantes no tempo ou em sistemas que possam ser aproximados com tal. A maior vantagem das técnicas no domínio da frequência é que elas fornecem rapidamente informação sobre a estabilidade e sobre a resposta transitória e por isso pode-se ver o efeito produzido pela alteração de parâmetros do sistema até obter um projeto aceitável.

Com o passar do tempo a complexidade dos sistemas de controle foram aumentando e a modelagem de sistemas usando equações diferenciais lineares e invariantes no tempo e as funções de transferência subsequentes se tornam inadequadas. A abordagem no espaço de estados (também conhecida como abordagem moderna ou no domínio do tempo) constituiu um método unificado de modelagem, análise e projeto de uma gama ampla de sistemas.

### 3.1 MODELAGEM NO DOMÍNIO DA FREQUENCIA

A maioria dos processos industriais é modelada pelo domínio da frequência e o primeiro passo para se levantar a função de transferência é conhecer-se bem o processo. As equações diferenciais que descrevem o desempenho dinâmico de um sistema são obtidas utilizando-se as leis físicas do processo. Esta abordagem se aplica bem a sistemas mecânicos elétricos, fluidos e termodinâmicos.

Uma grande maioria de sistemas físicos é linear dentro de certa gama de valores das variáveis. Contudo, todos os sistemas se tornam em última análise não-lineares à medida que os valores das variáveis crescem sem limites.

#### 3.1.1 Função de Transferência

A função de transferência de um sistema representado por uma equação diferencial linear invariante no tempo é definida como a relação entre a transformada de Laplace da saída (função de resposta – response function) e a transformada de Laplace da entrada (função de excitação – driving function), admitindo-se todas as condições iniciais nulas.

Considerando o sistema linear invariante no tempo, definido pela seguinte equação diferencial:

$$\begin{aligned} a_0 y^{(n)} + a_1 y^{(n-1)} + \dots + a_{n-1} \dot{y} + a_n y \\ = b_0 x^{(m)} + b_1 x^{(m-1)} + \dots + b_{m-1} \dot{x} + b_m x \end{aligned} \quad (n \geq m) \quad (4)$$

Onde  $y$  é a saída do sistema e  $x$  é a entrada.

A função de transferência desse sistema é a relação entre a transformada de Laplace da saída e a transformada de Laplace de entrada, quando todas as condições iniciais são zero ou nulas.

$$G(s) = \frac{L(\text{saída})}{L(\text{entrada})} \Bigg|_{\text{condições iniciais nulas}} \quad (5)$$

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \dots + b_{m-1} s + b_m}{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n} \quad (6)$$

Utilizando o conceito de função de transferência, é possível representar a dinâmica de um sistema por meio de uma equação algébrica em  $s$ . Se a maior potência de  $s$  no denominador da função de transferência for igual a  $n$ , o sistema será denominado sistema de ordem  $n$ . O polinômio no denominador  $X(s)$  quando igualado a zero, é chamado de polinômio característico porque as raízes desta equação determinam o caráter da resposta temporal. As raízes desta equação característica são também chamadas os **pólos** do sistema. As raízes do polinômio no numerado  $Y(s)$  são chamadas **zeros** do sistema. Pólos e zeros constituem frequências críticas. Nos pólos, a função  $G(s)$  se torna infinita, enquanto que nos zeros a função se torna igual a zero.

A aplicabilidade do conceito de função de transferência é limitada a sistemas de equações diferenciais lineares invariantes no tempo. O método da função de transferência, entretanto, é amplamente utilizado na análise e no projeto desses sistemas. Portanto alguns comentários devem ser levados em consideração:

1. A função de transferência de um sistema é um modelo matemático que constitui um método operacional para expressar a equação diferencial que relaciona a variável de saída à variável de entrada.
2. A função de transferência é uma propriedade inerente ao sistema, independente da magnitude e da natureza da função de entrada ou de excitação.
3. A função de transferência inclui as necessidades para relacionar a entrada à saída; entretanto, não fornece nenhuma informação relativa à estrutura física do sistema. (As funções de transferência de diversos sistemas fisicamente diferentes podem ser idênticas).
4. Se a função de transferência de um sistema for conhecida, a saída ou resposta poderá ser estudada para várias maneiras de entrada, visando ao entendimento da natureza do sistema.
5. Se a função de transferência de um sistema não for conhecida, ela pode ser determinada experimentalmente com o auxílio de entradas conhecidas e do

estudo das respectivas respostas do sistema. Uma vez determinada, a função de transferência fornece uma descrição completa das características dinâmicas do sistema, independentemente de sua descrição física.

### 3.1.2 Modelagem Matemática de Sistemas de Nível de Líquidos

Na análise de sistemas que envolvem o fluxo de fluidos, é necessário dividir os regimes e fluxo em fluxo laminar e fluxo turbulento, de acordo com o valor do número de Reynolds. Se o número de Reynolds for maior que 4.000, então o sistema será turbulento. O sistema é laminar se esse valor for menor do que aproximadamente 2.000. No caso laminar, o fluxo ocorre em linhas de escoamento, sem turbulência. Sistemas que envolvem fluxo laminar podem ser representados por equações diferenciais lineares.

Processos industriais envolvem, frequentemente, o fluxo de líquidos ao longo de tubos de conexão e de reservatórios. O fluxo nesses processos é geralmente turbulento e não laminar. Os sistemas que envolvem fluxo turbulento são frequentemente representados por equações diferenciais não-lineares.

#### a) Resistência e capacitância de sistemas de nível de líquido

Considerando o fluxo ao longo de uma tubulação curta, que conecta dois reservatórios, a resistência  $R$  ao fluxo nessa tubulação ou restrição é definida como a variação na diferença de nível (a diferença entre o nível dos líquidos nos dois reservatórios) necessária para causar a variação unitária na taxa de escoamento, isto é,

$$R = \frac{\text{variação na diferença de nível, m}}{\text{variação na vazão, m}^3/\text{s}} \quad (7)$$

Como a relação entre a taxa de escoamento e a diferença de nível difere do fluxo laminar para o fluxo turbulento, é considerado ambos os casos. Considerando o sistema de nível da FIG. 9(a), o líquido flui em uma válvula de restrição, na lateral do reservatório. Se o fluxo nessa restrição for laminar, a relação

entre a vazão em regime permanente e altura do nível em regime permanente na restrição será dada por:

$$Q = KH \quad (8)$$

onde:

$Q$  = vazão em volume em regime permanente,  $m^3/s$

$K$  = coeficiente,  $m^2/s$

$H$  = altura do nível em regime permanente, m

Para o fluxo laminar, a resistência  $R_l$  é obtida como:

$$R_l = \frac{dH}{dQ} = \frac{H}{Q} \quad (9)$$

A resistência no escoamento laminar é constante e análoga à resistência elétrica.

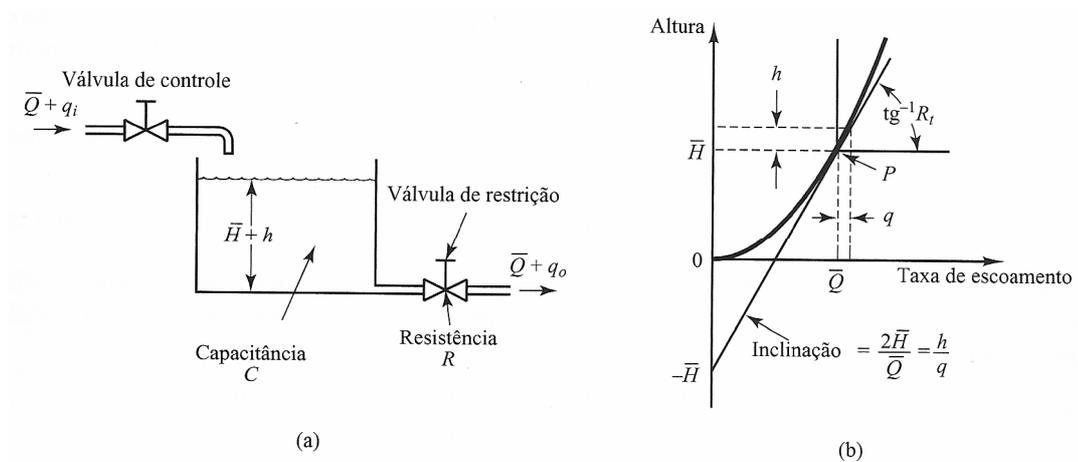


FIGURA 9 - (a) Sistema de nível líquido; (b) curva de altura do nível *versus* vazão  
Fonte: OGATA, 2007, p. 125

Se o fluxo na restrição for turbulento, a taxa de escoamento em regime permanente será dada por:

$$Q = K\sqrt{H} \quad (10)$$

A resistência  $R_t$  para o fluxo turbulento é obtida como:

$$R_t = \frac{dH}{dQ} \quad (11)$$

Utilizando a equação (10), obtém-se:

$$dQ = \frac{K}{2\sqrt{H}} dH \quad (12)$$

Tem-se:

$$\frac{dH}{dQ} = \frac{2\sqrt{H}}{K} = \frac{2\sqrt{H}\sqrt{H}}{Q} = \frac{2H}{Q} \quad (13)$$

Assim,

$$R_t = \frac{2H}{Q} \quad (14)$$

O valor da resistência  $R_t$  do fluxo turbulento depende da taxa de escoamento e da altura do nível do líquido. Entretanto, o valor de  $R_t$  pode ser considerado constante se as variações da altura do nível e da taxa de escoamento forem pequenas.

Utilizando a definição de resistência para o caso de fluxo turbulento, a relação entre Q e H pode ser dada por:

$$Q = \frac{2H}{R_t} \quad (15)$$

Essa linearização é válida desde que as variações da altura do nível e da taxa de escoamento em relação aos respectivos valores de regime permanente sejam pequenas. Em muitos casos práticos, o valor do coeficiente K na equação (10), que depende do coeficiente de fluxo na área de restrição, não é conhecido. Então, a resistência pode ser determinada pela construção do gráfico da curva que mostra a altura do nível *versus* a taxa de escoamento, com base em dados

experimentais e medindo-se a inclinação da curva no ponto de operação. Na FIG. 9(b) P é o ponto de operação em regime permanente.

A linha tangente à curva no ponto P cruza o eixo das ordenadas no ponto  $(0, -\bar{H})$ . Assim, a inclinação dessa linha tangente é  $2 \cdot (\bar{H}/\bar{Q})$ . Como a resistência  $R_t$  no ponto de operação P é dada por  $2 \cdot (\bar{H}/\bar{Q})$  ela é a inclinação da curva no ponto de operação.

Considerando a condição de operação nas proximidades do ponto P, definindo uma pequena variação do valor da altura do regime permanente como  $h$  e uma pequena variação correspondente da taxa de escoamento como  $q$ , ter-se-á a inclinação da curva no ponto P que pode ser dado por:

$$\text{Inclinação da curva no ponto P} = \frac{h}{q} = \frac{2\bar{H}}{\bar{Q}} = R_t \quad (16)$$

A aproximação linear tem como base o fato de que a curva real não difere muito da sua linha tangente, se a condição de operação não variar muito. A capacitância  $C$  de um reservatório é definida como a variação na quantidade de líquido armazenado necessária para causar uma mudança unitária no potencial (altura). (O potencial é a grandeza que indica o nível de energia do sistema.)

$$C = \frac{\text{variação na quantidade de líquido armazenado, m}^3}{\text{variação na altura, m}} \quad (17)$$

A capacidade ( $\text{m}^3$ ) e a capacitância ( $\text{m}^2$ ) são diferentes. A capacitância do reservatório é igual à sua secção transversal. Se esta for constante, a capacitância será constante para qualquer altura do nível.

*b) Modelagem de sistemas de nível de líquido*

Considerando o sistema da FIG. 9(a) as variáveis são definidas como se segue:

$\bar{Q}$  = vazão em regime permanente (antes de ocorrer alguma variação),  $\text{m}^3/\text{s}$

$q_i$  = pequeno desvio da taxa de escoamento de entrada em relação a seu valor de regime permanente, m<sup>3</sup>/s

$q_o$  = pequeno desvio da taxa de escoamento de saída em relação a seu valor de regime permanente, m<sup>3</sup>/s

$\bar{H}$  = altura no nível em regime permanente (antes que ocorra alguma variação), m

H = pequeno desvio de nível a partir de seu valor de regime permanente, m

Um sistema poderá ser considerado linear se o fluxo for laminar. Se o fluxo for turbulento, o sistema poderá ser linearizado, desde que as alterações nas variáveis sejam pequenas. Com base na hipótese de que o sistema seja linear ou linearizado, a equação diferencial desse sistema pode ser obtida. Como o fluxo de entrada menos o fluxo de saída durante um pequeno intervalo de tempo  $dt$  é igual à quantidade adicional armazenada no reservatório, tem-se que:

$$Cdh = (q_i - q_o)dt \quad (18)$$

A partir da definição de resistência, a relação entre  $q_o$  e  $h$  é dada por:

$$q_o = \frac{h}{R}$$

A equação diferencial desse sistema para um valor constante de R torna-se:

$$RC \frac{dh}{dt} + h = Rq_i \quad (19)$$

RC é a constante de tempo do sistema. Tomando a transformada de Laplace de ambos os membros da equação (19) e considerando condições iniciais nulas, obtém-se:

$$(RCs + 1)H(s) = RQ_i(s) \quad (20)$$

onde:

$$H(s) = L[h] \quad \text{e} \quad Q_i(s) = L[q_i] \quad (21)$$

Se  $q_i$  for considerada a entrada e  $h$  a saída, a função e transferência do sistema é:

$$\frac{H(s)}{Q_i(s)} = \frac{R}{RCs + 1} \quad (22)$$

Entretanto, se  $q_o$  for admitida como a saída e a entrada permanecer a mesma, a função de transferência será:

$$\frac{Q_o(s)}{Q_i(s)} = \frac{1}{RCs + 1} \quad (23)$$

Sendo  $RC$  a constante de tempo  $T$  do sistema. Substituindo  $RC$  por  $T$  e chamando  $Q_o$  de  $C(s)$  e  $Q_i$  de  $R(s)$  tem-se:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{Ts + 1} = G(s) = \frac{1}{Ts + 1} \quad (24)$$

onde:

$C(s)$  = Saída do sistema

$R(s)$  = Entrada do sistema

$G(s)$  = Função de Transferência

$T$  = Constante de Tempo

### 3.2 ANÁLISE DE RESPOSTA TRANSITÓRIA E DE REGIME ESTACIONÁRIO

O primeiro passo para a análise de um sistema de controle é a obtenção de um modelo matemático do sistema. Com esse modelo em mãos é possível analisar o desempenho do sistema a partir dos vários métodos disponíveis. Geralmente o sinal de entrada do sistema não é conhecido. Então se deve ter uma base de comparação, estabelecendo detalhes de sinais de entrada conhecidas e em seguida comparando as respostas com esses sinais.

Os sinais de entrada de teste geralmente utilizados são as funções degrau, rampa, impulso, senoidais. Com esses sinais de teste, a análise matemática do sistema de controle pode ser obtida facilmente, uma vez que esses sinais são funções de tempo simples. Podem-se determinar quais desses sinais típicos de entrada devem ser utilizados na análise das características do sistema, pelo comportamento da entrada a que o sistema será submetido com maior frequência.

#### *a) Resposta transitória e resposta estacionária*

A resposta temporal de um sistema de controle é constituída de duas partes: a resposta transitória e a resposta estacionária. Resposta temporal é aquela que vai do estado inicial ao estado final e resposta estacionária é o comportamento do sinal de saída do sistema à medida que  $t$  tende ao infinito. Assim tem-se:

$$c(t) = c_{tr}(t) + c_{ss}(t) \quad (25)$$

onde:

$c(t)$  = resposta temporal;

$c_{tr}(t)$  = resposta transitória

$c_{ss}(t)$  = resposta estacionária

#### *b) Estabilidade absoluta, estabilidade e erro estacionário.*

No projeto de um sistema de controle é necessário prever seu comportamento dinâmico a partir do conhecimento de seus componentes. A principal característica mais importante do comportamento dinâmico de um sistema

de controle é a estabilidade absoluta, isto é, se o sistema é instável ou estável. Um sistema de controle está em equilíbrio se, na ausência de qualquer distúrbio ou sinal de entrada, a saída permanece no mesmo estado. Um sistema de controle linear e invariante no tempo é estável se a saída sempre retorna ao estado de equilíbrio quando o sistema é submetido a uma condição inicial.

Um sistema de controle linear e invariante no tempo é criticamente estável se as oscilações do sinal de saída se repetirem de maneira contínua. É instável se a saída divergir sem limites a partir do estado de equilíbrio quando o sistema for sujeito a uma condição inicial. Outros comportamentos importantes do sistema são a estabilidade relativa e o erro estacionário. Quando um sistema físico é submetido a um sinal de entrada, ele não segue a entrada imediatamente, mas apresenta uma resposta transitória antes que o regime permanente seja obtido. A resposta transitória de um sistema de controle prático apresenta frequentemente oscilações amortecidas antes de atingir o estado permanente. Se o sinal de saída de um sistema em regime permanente não coincidir exatamente com a entrada, diz-se que o sistema apresenta um erro estacionário. Esse erro é o indicativo da precisão do sistema.

### 3.2.1 Sistemas de Primeira Ordem

De acordo com o sistema de primeira ordem mostrado na FIG. 10(a), esse sistema pode representar um circuito RC, um sistema térmico ou um sistema de nível. A FIG. 10(b) mostra um diagrama de blocos simplificado em malha aberta. A relação entrada-saída é dada por:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{Ts + 1} \quad (26)$$

Todos os sistemas que têm a mesma função de transferência vão apresentar a mesma saída em resposta à mesma excitação. Para um dado sistema físico, pode ser dada uma interpretação física à resposta matemática.

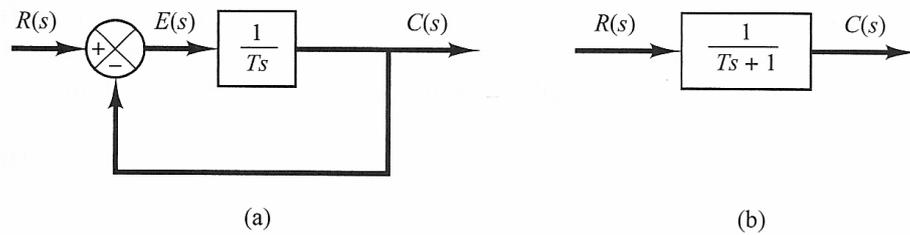


FIGURA 10(a): Diagrama de blocos de um sistema de 1ª ordem; (b) diagrama de blocos simplificado  
Fonte: OGATA, 2007, p. 181.

a) *Resposta ao degrau unitário do sistema de primeira ordem.*

Para qualquer resposta a qualquer sinal de entrada de um sistema deve-se considerar as condições iniciais nulas. A transformada de Laplace da função degrau unitário é  $1/s$ . Substituindo  $C(s) = 1/s$  na equação 24, é obtido:

$$C(s) = \frac{1}{Ts + 1} \times \frac{1}{s} \quad (27)$$

Expandindo em frações parciais:

$$C(s) = \frac{1}{s} - \frac{T}{Ts + 1} = \frac{1}{s} - \frac{1}{s + (1/T)} \quad (28)$$

Aplicando-se a transformada inversa de Laplace na equação acima, tem-se:

$$c(t) = 1 - e^{-t/T}, \quad \text{para } t \geq 0 \quad (29)$$

A equação 29 estabelece que, inicialmente, a resposta  $c(t)$  é zero e no fim se torna unitária. Uma característica importante de uma curva de resposta exponencial  $c(t)$  é que em  $t = T$  o valor de  $c(t)$  é 0,632 ou a resposta  $c(t)$  alcançou 63,2% de sua variação total. Substituindo-se  $t = T$  em  $c(t)$ , tem-se:

$$c(t) = 1 - e^{-1} = 0,632 \quad (30)$$

Quanto menor a constante de tempo  $T$ , mais rapidamente o sistema responde e a inclinação da linha tangente em  $t = 0$  é  $1/T$ , uma vez que

$$\left. \frac{dc}{dt} \right|_{t=0} = \frac{1}{T} \times e^{-t/T} \Big|_{t=0} = \frac{1}{T} \quad (31)$$

A saída alcançaria o valor final em  $t = T$  se fosse mantida a velocidade inicial de resposta. A partir da Equação (30), é observado que a inclinação da curva de resposta  $c(t)$  decresce monotonicamente de  $1/T$  em  $t = 0$  a zero em  $t = \infty$ .

A curva exponencial de resposta  $c(t)$  dada pela Equação (29) é mostrada na FIG. 11. Em uma constante de tempo, a curva da resposta exponencial vai de 0 a 63,2% do valor final. Em duas constantes de tempo, a resposta atinge 86,5% da resposta final. Para  $t = 3T$ ,  $4T$  e  $5T$ , a resposta alcança 95%, 98,2% e 99,3%, respectivamente, da resposta final. Assim, para  $t \geq 4T$ , a resposta se mantém a 2% do valor final. Como se vê na Equação (29), o estado permanente é alcançado matematicamente somente depois de um tempo infinito. Na prática, entretanto, é razoável que o tempo estimado seja o intervalo de tempo necessário para a curva alcançar e permanecer a 2% da linha final, que é de quatro constantes de tempo.

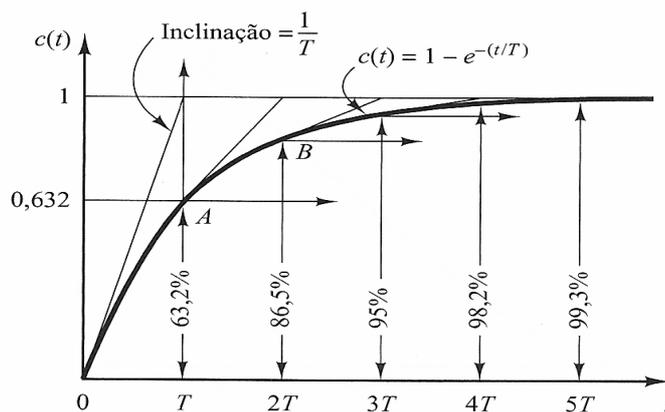


FIGURA 11 – Curva exponencial de resposta  
Fonte: OGATA, 2007, p. 181.

O desenvolvimento das equações acima foi feito para um degrau unitário. Porém, na prática a mudança do set point que seria o degrau de excitação, não é unitário. Existe um ganho, que seria a divisão do sinal de excitação (degrau) pelo valor da resposta quando ela atinge o regime permanente. Portanto a função de transferência para um sistema de primeira ordem é dada pela equação 32:

$$G(s) = \frac{X}{Ts + 1} \quad (32)$$

onde:

$X$  = ganho do sistema

$T$  = constante de tempo do sistema

## IV AÇÕES DE CONTROLE

### 4.1 INTRODUÇÃO

Apesar da contínua modernização dos processos de fabricação e manufatura, a maioria das leis e princípios de medição e de controle dos processos industriais se conserva intactas até os dias de atuais. Entretanto, tanto os instrumentos que utilizam esses princípios se atualizaram tecnologicamente, como também novas tecnologias de medição foram introduzidas, somando-se às já existentes.

Desta maneira, as variáveis de processos atualmente podem ser medidas com precisão incrivelmente maior do que há alguns anos. Os sinais de transmissão dos valores na década de 70 eram essencialmente pneumáticos, bem como os instrumentos receptores de sinais, dos quais os principais representantes se constituíam nos controladores (componente central de uma malha de controle).

As funções de uma malha de controle eram feitas através por relés e contadores, para em conjunto, determinarem o resultado requerido. O desenvolvimento da tecnologia dos Circuitos Integrados (CIs) possibilitou uma nova geração de sistemas de controle e com a introdução dos microprocessadores os sistemas de controle digital surgiram e, atualmente, dominam as aplicações de medição, controle e monitoração nas mais modernas indústrias de processamento.

As funções de monitoração e controle, atualmente, são transmitidas não mais através da interligação “ponto a ponto” (par de fios conectando dois equipamentos) dos instrumentos mencionados, mas por meio de comunicação em rede digital.

Este rápido retrospecto da evolução tecnológica dos sistemas de controle visa lembrar que, apesar de toda essa evolução, não se pode deixar de lado os conhecimentos básicos de medição e controle, pois por mais modernas que sejam as ferramentas, a teoria básica de controle é fundamental, e dela não se pode abrir mão.

Segundo BEGA,

*Controlar um processo industrial, significa, basicamente, manter os valores das variáveis do processo dentro de uma faixa aceitável para a sua operação conveniente; mais ainda, buscar dentro de cada faixa, o valor ótimo para cada variável (BEGA et al, 2006, p. 435).*

Numa planta industrial, envolvem-se pesquisa, engenharia básica, projeto detalhado, montagem, comissionamento, pré-operação, manutenção, pesquisa, etc. Dentre todos esses aspectos, o controle de processos destina-se basicamente a:

- Manter os processos em seus pontos operacionais mais eficientes e econômicos;
- Prevenir condições instáveis no processo que podem por em risco pessoas e/ou equipamentos;
- Exibir dados sobre o processo aos operadores da planta, para que se possa conservar o ritmo seguro e eficiente.

Para a realização de um controle eficiente, utilizam-se os conceitos básicos, associados às técnicas de controle por realimentação (*feedback*), que se constitui no recurso mais utilizado em controle de processos (ver capítulo 2) complementado por técnicas avançadas, como controle por antecipação (*feedforward*), controle em cascata, controle de razão, controle seletivo e controle em faixa dividida.

## 4.2 AÇÕES DE CONTROLE

O controlador é o componente que toma as decisões sobre como o elemento final de controle deverá manipular a variável responsável por manter a variável do processo no valor desejado. Ele recebe do transmissor o sinal correspondente à variável do processo e através de um mecanismo de comparação computa um eventual desvio em relação ao valor desejado (SP), ou seja, um erro.

#### 4.2.1 Controle Liga-Desliga (On-Off)

Este controle é normalmente empregado em processos que podem admitir certa oscilação contínua da variável de controle em torno do valor desejado. A saída de um controlador liga e desliga, à medida que o sinal de erro passa pelo zero, ou seja, quando a variável passa pelo ponto de ajuste. O elemento final de controle neste caso é normalmente uma válvula solenóide, a qual assume duas posições extremas, aberta ou fechada.

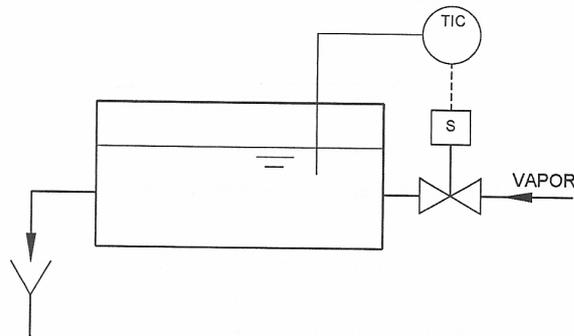


FIGURA 12 – Controle de temperatura com vapor atuado por válvula solenóide  
Fonte: BEGA et al, 2006, p. 460.

Nesse sistema, quando a temperatura se afasta do ponto de ajuste, aumentando, a válvula solenóide se encontra fechada e a saída do controlador é 0%. Nessa situação a temperatura atinge um valor máximo, a partir do qual começa a diminuir até encontrar novamente o ponto de ajuste. Neste instante, a saída do controlador passa para 100%, abrindo a válvula solenóide, que admite vapor no sistema. A partir desse momento, a temperatura atinge um mínimo e começa a aumentar novamente, até atingir novamente o ponto de ajuste. Observa-se que o controle liga-desliga leva a variável a oscilar em torno do ponto de ajuste:

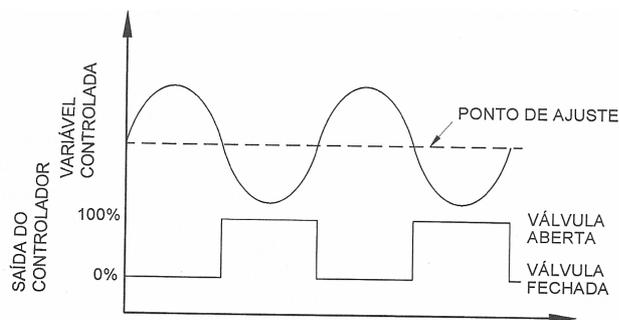


FIGURA 13 – Resposta de um controle Liga-Desliga  
Fonte: BEGA et al, 2006, p. 460.

#### 4.2.2 Controle Proporcional (P)

Esse controlador oferece uma saída proporcional ao erro  $e(t)$ . A equação que representa esta ação de controle pode ser descrita como:

$$m(t) = K_c \cdot e(t) + b \quad (33)$$

onde:

$m(t)$  = sinal de saída do controlador;

$K_c$  = ganho proporcional;

$e(t)$  = erro (SP – variável medida);

$b$  = constante do controlador

O valor de  $b$  é uma constante sendo o valor do inicial do controlador. Ele é chamado de bias e é obtido deixando a saída em modo manual e encontrando um valor onde a vazão de saída seja igual à de entrada. A resposta de um controlador proporcional a uma variação degrau no erro (sistema em malha aberta) é representada na FIG. 14.

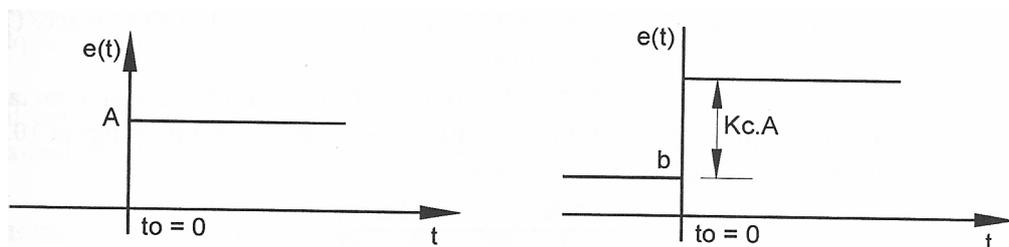


FIGURA 14 – Resposta de um controlador proporcional a um degrau de amplitude  $A$   
Fonte: BEGA et al, 2006, p. 463.

Na FIG. 14, no instante  $t_0 = 0$ , com o sistema em malha aberta, foi introduzido um erro de amplitude  $A$ . No modo proporcional, a saída do controlador varia de  $b$  para  $b + K_c \cdot A$  (variação de  $K_c \cdot A$ ), no instante em que o erro  $e(t)$  muda de zero para  $A$ . Nota-se que a saída foi multiplicada por  $K_c$  (ganho proporcional do controlador).

A partir desse ponto, a saída do controlador proporcional é constante, uma vez que o erro  $e(t)$  se mantém fixo no valor  $A$ . O modo proporcional não

apresenta nenhum componente dinâmico, ou seja, sua atuação só depende do valor do erro, independente de sua velocidade ou do tempo da duração do valor deste erro. Assim, a saída do controlador não varia quando o erro está fixo e, sim, quando o erro está variando.

Outro termo também usado para controlador proporcional é o de Banda Proporcional (BP) que é definida como sendo o erro requerido para movimentar a válvula de controle desde totalmente aberta até totalmente fechada. A banda proporcional é normalmente representada em porcentagem da faixa da variável medida.

Considerando agora, um sistema de controle em malha fechada, pode-se mostrar, de acordo com a FIG. 15, a curva de resposta de um controlador proporcional com diversos valores de ganho proporcional ( $K_c$ ).

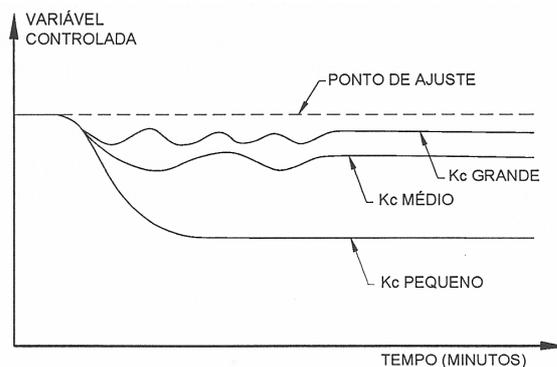


FIGURA 15 – Resposta de um controlador P para diferentes valores do ganho proporcional  
Fonte: BEGA et al, 2006, p. 465.

À medida que se aumenta o ganho proporcional ( $K_c$ ), o erro diminui e o sistema responde de forma mais rápida. O ganho deve então ser ajustado para o maior valor possível. Entretanto, ao mesmo tempo em que o erro diminui com o aumento do ganho proporcional, aumentam as oscilações e o tempo para a estabilização da variável. Este fato é limitante em relação ao valor do ganho proporcional, já que o valor excessivo de  $K_c$  pode levar o processo à instabilidade.

A ação do proporcional isolada não é suficiente para que a variável do processo retorne ao valor desejado após uma determinada variação da carga. O que ocorre é que a variável se estabiliza em um valor sempre diferente do desejado. Esse afastamento recebe o nome de offset.

### 4.2.3 Controle Proporcional - Integral (PI)

Esta ação de controle elimina o erro  $e(t)$  de forma automática, de forma que a saída do controlador é função da integral do erro, ou seja, a velocidade da correção é proporcional ao erro  $e(t)$ .

Ação integral normalmente é utilizada em conjunto com a ação proporcional, pois a velocidade de resposta da ação integral de forma isolada é lenta, sendo muito longo o tempo para a estabilização da variável. Obtém-se, então, o controlador PI, cuja equação que é:

$$m(t) = K_c \cdot e(t) + \frac{K_c}{\tau_i} \int_0^t e(t) dt + b \quad (34)$$

onde:

$m(t)$  = sinal de saída do controlador;

$K_c$  = ganho proporcional;

$e(t)$  = erro (SP – variável medida);

$\tau_i$  = tempo integral, min;

$b$  = constante do controlador

Foi acrescentado à ação proporcional o termo integral, que é proporcional à integral do erro. Os valores dos parâmetros  $K_c$  e  $\tau_i$  podem ser ajustados no controlador, através dos botões de ajuste nos controladores convencionais, ou por programação, nos controladores e sistemas digitais. De qualquer forma produzem o mesmo efeito sobre a variável do processo, mudando apenas o caminho pelo qual se obtêm os ajustes.

Quando  $e(t) = 0$ ,  $m(t) = b$ .

Quando  $e(t) = A$ , a equação (33) toma a forma:

$$m(t) = K_c \cdot A + \frac{A \cdot K_c}{\tau_i} \cdot t + b \quad (35)$$

A resposta do controlador assume a forma da FIG. 16. Até o instante  $t_0 = 0$ , a variável encontra-se no estado estacionário, sendo o desvio  $e(t)$  em relação ao valor desejado, igual a zero. O sinal de saída do controlador, nesta condição,

assume o valor “b”. Subitamente, porém o processo é submetido a uma variação em degrau de amplitude A. O controlador ativa o seu sinal de saída, que passa instantaneamente do valor “b”, para  $b + K_c \cdot A$ .

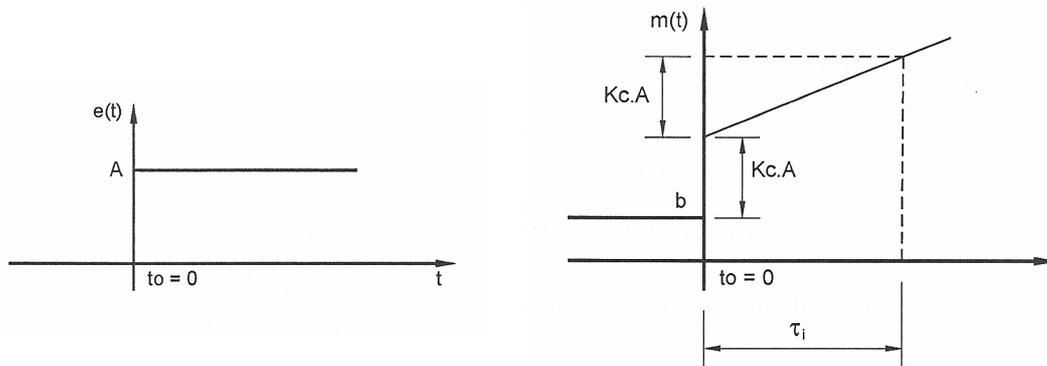


FIGURA 16 – Resposta de um controlador PI a um degrau de amplitude A  
Fonte: BEGA 31L 31L, 2006, p. 467.

A partir desse momento, analisando-se a forma de onda da equação do controlador PI, para  $e(t) = A$  (após o degrau), nota-se que a saída do controlador segue a equação de uma reta,  $m(t) = (A \cdot K_c / \tau_i) \cdot t$ , variando linearmente a uma velocidade de variação igual a  $A \cdot K_c / \tau_i$ . Graficamente,  $A \cdot K_c / \tau_i$ , representa o coeficiente angular da reta em questão, sendo que sua inclinação pode ser alterada, ou ajustando-se o ganho proporcional  $K_c$ , ou alterando-se o parâmetro  $\tau_i$  (tempo integral). Alterar a inclinação da reta significa variar a velocidade com que o controlador responde em relação ao desvio da variável do processo.

Na prática, utiliza-se o inverso do parâmetro  $\tau_i$ , ou seja,  $1/\tau_i$ , designado como taxa de integração (reset rate), expressa como repetições/ minuto. O parâmetro  $\tau_i$  tem um significado físico que pode ser melhor visualizado através do gráfico da resposta do controlador. Se a partir da interseção da reta com o eixo  $m(t)$ , neste próprio eixo, for projetado o valor de  $K_c \cdot A$  como mostrado na FIG. 16, verifica-se que este valor é atingido após decorrido um intervalo de tempo igual  $\tau_i$ . Isto representa o tempo decorrido para que a ação P seja repetida, até que o desvio seja eliminado.

A ação PI devido à sua característica de variar a saída sempre que houver erro, faz com que se elimine o offset quando o processo atingir um valor

estável. A FIG. 17 mostra curvas de reposta em malha fechada de um controlador PI para um valor constante de ganho proporcional ( $K_c$ ), variando-se o tempo integral  $\tau_i$ .

Quando o valor de  $\tau_i$  é grande, a aproximação da variável em relação ao ponto de ajuste é lenta. Quando  $\tau_i$  é pequeno (excesso de correção), a variável oscila e demora a estabilizar.

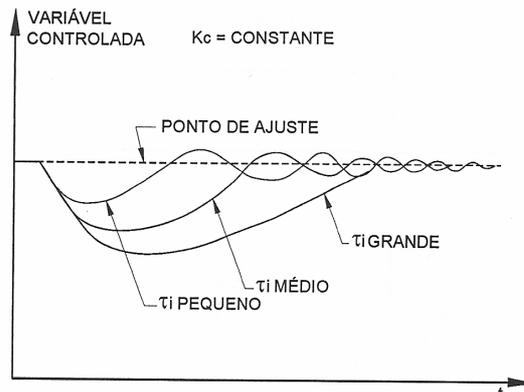


FIGURA 17 – Resposta de um controlador PI a um degrau de amplitude A  
Fonte: BEGA 32L 32L, 2006, p. 467.

O ajuste ideal para o valor de  $\tau_i$  é, na verdade, aquele que elimina o erro num menor tempo possível. Na ação integral o controlador continua integrando e alterando sua saída mesmo fora da faixa operacional do processo.

#### 4.2.4 Controle Proporcional – Derivativo (PD)

A ação de derivativa, na prática, não pode ser usada isoladamente, sendo aplicada normalmente em conjunto com a ação proporcional, resultando na ação PD. A saída da ação proporcional é proporcional ao erro  $e(t)$ . A saída da ação derivativa, entretanto, é função da derivada do erro  $e(t)$  em relação ao tempo. A equação que representa a ação derivativa é:

$$m(t) = b + K_c \cdot e(t) + K_c \cdot \tau_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (36)$$

onde:

$m(t)$  = sinal de saída do controlador;

$K_c$  = ganho proporcional;

$e(t)$  = erro (SP – variável medida);

$\tau_d$  = tempo derivativo, min;

b = constante do controlador.

A análise da chamada ação derivativa é feita normalmente através de uma variação do tipo rampa da variável do processo, uma vez que a resposta do controlador neste caso é proporcional à derivada do erro, o que impossibilita a análise através de uma variação em degrau, tendo em vista que a derivada de uma constante é igual a zero.

Considerando-se um desvio em rampa na forma  $e(t) = A \cdot t$ , a resposta desta ação de controle é representada pela equação:

$$m(t) = b + K_c \cdot A \cdot t + K_c \cdot \tau_d \cdot \frac{dA \cdot t}{dt} \quad (37)$$

Foi adicionada ao termo proporcional outra parcela, que é proporcional à derivada do erro, ou seja, à sua velocidade de variação. Esta ação também recebe o nome de ação antecipatória, devido ao seu caráter de realmente iniciar a ação corretiva logo que o erro começa a variar.

A análise da resposta desta ação de controle é feita com base numa variação em rampa do erro em relação ao tempo, conforme FIG. 18.

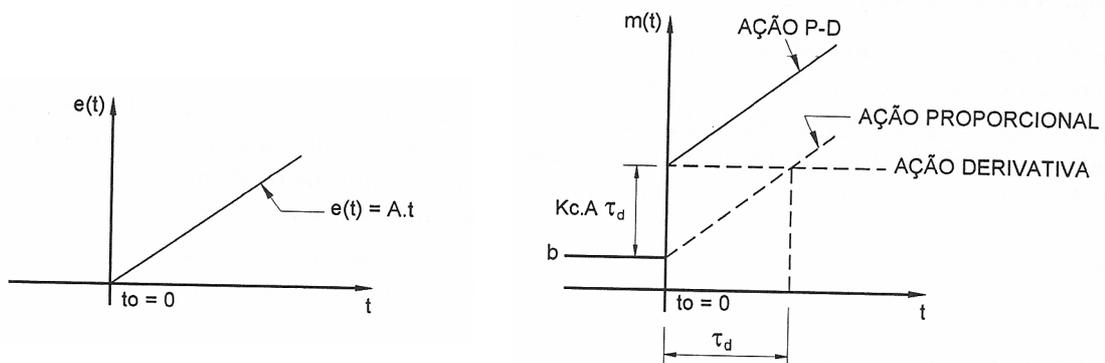


FIGURA 18 – Resposta de um controlador PI a um degrau de amplitude A  
Fonte: BEGA et al, 2006, p. 468.

A saída da ação derivativa se antecipa em relação à ação proporcional, de um valor  $\tau_d$ , que é chamado de tempo derivativo. Na prática, este tempo derivativo representa o tempo que a saída da ação proporcional leva para atingir a saída do modo derivativo.

Considerando-se o sistema de controle em malha fechada, pode-se constatar, pela FIG. 19, que a aplicação da ação derivativa não elimina o erro, ou

seja, tal como a ação proporcional de modo isolado ainda persiste um dado offset, ou afastamento da variável do processo em relação ao valor desejado.

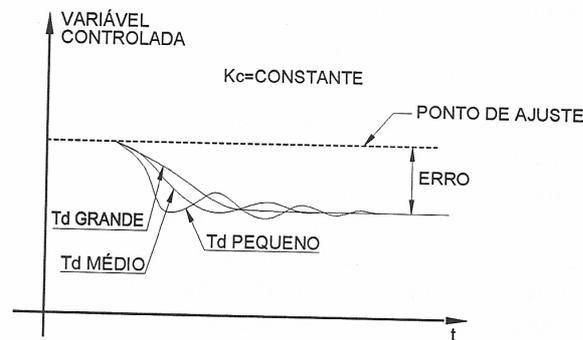


FIGURA 19 – Resposta de um controlador PI a um degrau de amplitude A  
Fonte: BEGA et al, 2006, p. 467.

O aumento do tempo derivativo  $\tau_d$  melhora a estabilidade do processo, com baixa velocidade de resposta, pela sua característica de antecipação ou oposição às variações. Pequenos valores de  $\tau_d$  melhoram a velocidade de resposta, mas comprometem a estabilidade, aumentando a oscilação.

#### 4.2.4 Controle Proporcional - Integral - Derivativo (PID)

O controlador proporcional, integral, derivativo, PID, combina as características de estabilidade conferida pelo controle proporcional mais derivativo com as características de eliminação do erro oferecidas pelo controle proporcional mais integral. A saída do controlador PID é representada pela equação:

$$m(t) = b + K_c \cdot e(t) + K_c \cdot \tau_d \cdot \frac{de(t)}{dt} + \frac{K_c}{\tau_i} \int_0^t e(t) dt \quad (38)$$

Essa ação de controle tem seu ajuste de certo modo dificultado, uma vez que é necessário o acerto de três parâmetros, ou seja, o ganho proporcional ( $K_c$ ), o tempo integral ( $\tau_i$ ) e o tempo derivativo ( $\tau_d$ ). Como a ação derivativa torna o controlador mais difícil de sintonizar, o controle de três modos (PID) deverá ser utilizado somente em determinados processos que realmente tenham seu desempenho bastante aumentado.

A FIG. 20 representa as curvas de resposta das três ações de controle, P, PI, PID, em malha fechada, o que possibilita a análise do efeito de cada ação na resposta do sistema de controle (variável controlada em relação ao tempo).

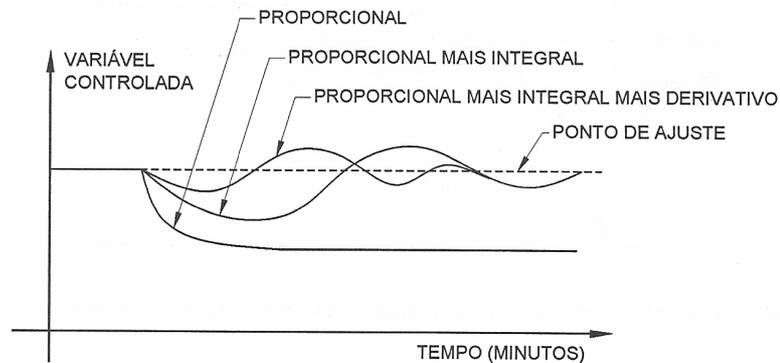


FIGURA 20 – Resposta de um controlador PI a um degrau de amplitude A  
 Fonte: Fonte: BEGA et al, 2006, p. 467.

A análise do gráfico mostra que a combinação PID produz maiores oscilações no sistema, mas diminui o tempo para estabilização da variável. A escolha da melhor ação de controle a aplicar é função de uma série de fatores que devem ser analisados por conhecedores do processo e da operação da planta.

Existem algumas proposições que constam dos Critérios de Projeto e Guias de Seleção e Especificação de Instrumentos e Sistemas de Controle, os quais fazem parte da padronização das empresas (indústrias de processo e empresas de engenharia). Tais proposições são normalmente levadas em conta quando se especificam os controladores como uma primeira aproximação.

A definição das ações de controle e os correspondentes ajustes dos parâmetros dos controladores, entretanto, são sempre objeto de análise um pouco mais criteriosa por parte do pessoal envolvido na operação e engenharia da planta.

## V SISTEMAS SUPERVISÓRIOS

Os sistemas supervisórios começaram a ser utilizados nas últimas décadas do século 20, inseridos numa realidade de capacidade computacional limitada e pouco acessível, o que dificultou o uso massivo da recente tecnologia. Com o passar dos anos, no entanto, os computadores tornaram-se cada vez mais potentes e tiveram seu custo sensivelmente reduzido devido à produção em série de seu hardware para atender à crescente demanda mundial. Na década de 90 já havia dezenas de fabricantes de sistemas supervisórios disputando o crescente mercado industrial.

O uso do supervisório abriu um universo de possibilidades. Ao tornar a operação de suas plantas mais eficiente e confiável, através da visualização dos dados de processo em tempo real, as indústrias passaram a basear seus relatórios e ferramentas gerenciais nos dados provindos do sistema de supervisão.

Visto essa constante evolução dos sistemas supervisórios a automação em si, também foi evoluindo exigindo a realização de muitas funções. A FIG. 21 representa a chamada Pirâmide de Automação, com os diferentes níveis de automação encontrados em uma planta industrial.

Os sistemas supervisórios se encontram no nível três da pirâmide de automação sendo o mais alto grau da automação. A partir do nível quatro entra a parte de gerenciamento. Sistemas supervisórios são sistemas digitais de monitoração e operação da planta que gerenciam variáveis de processo. Essas são atualizadas continuamente e podem ser guardadas em banco de dados locais ou remotos pra fins de registro histórico. Os sistemas supervisórios podem ser classificados basicamente quanto à complexidade, robustez e número de entradas e saídas monitoradas. Os dois grandes grupos atualmente conhecidos são:

- Human Machine Interface (HMI) ou Interface Homem-Máquina (IHM)
- SUPERVISORY CONTROL AND DATA ACQUISITION (SCADA) (Aquisição de Dados e Controle do Supervisório)

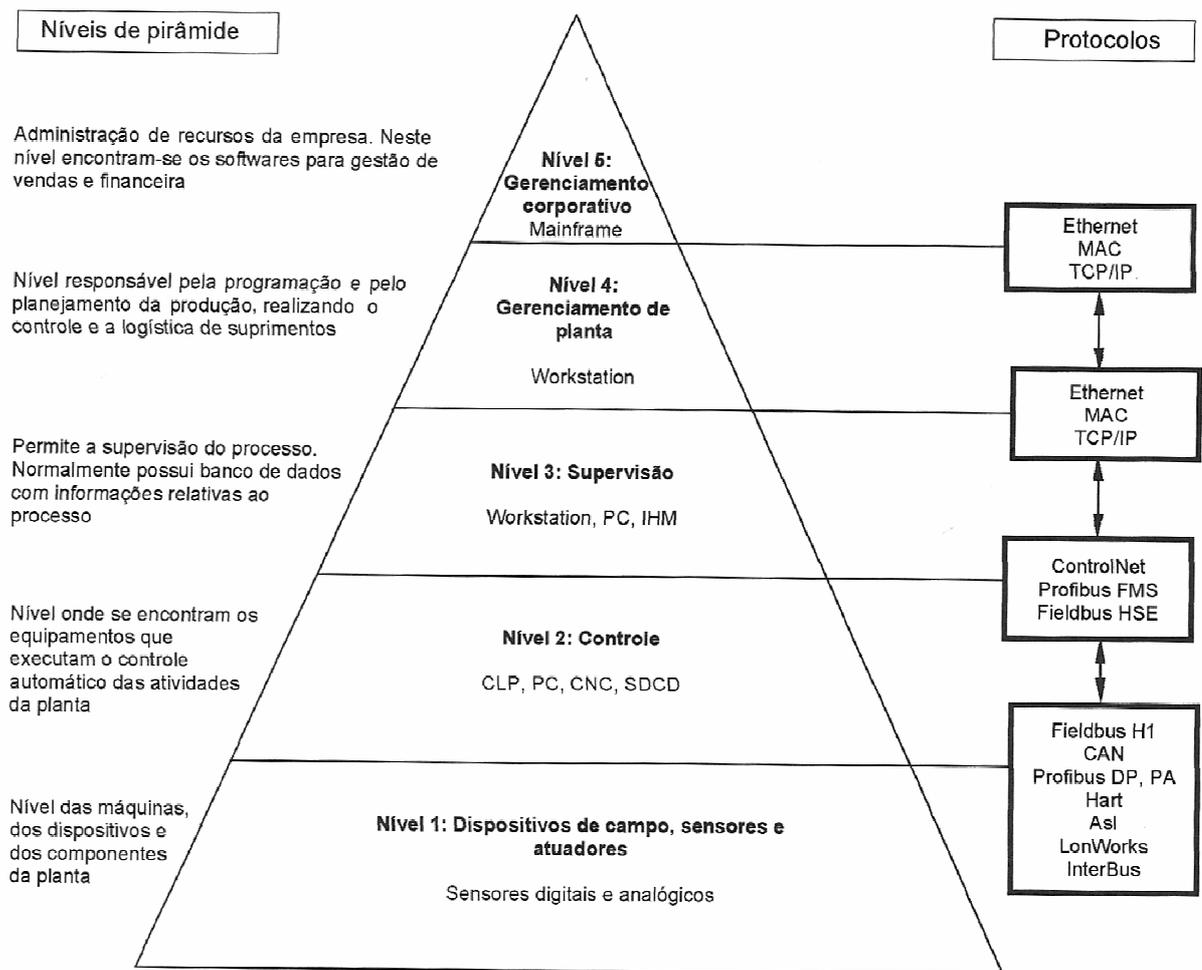


FIGURA 21 – Pirâmide da automação  
Fonte: MORAES & CASTRUCCI, 2007, p. 13.

## 5.1 IHM

São sistemas normalmente utilizados em automação no chão-de-fábrica, geralmente caracterizado por um ambiente agressivo. Possuem construção extremamente robusta, resistente a jato de água direto, umidade, temperatura e poeira de acordo com o IP (grau de proteção) necessário. Algumas IHMs modernas têm incorporado às suas características-padrão a capacidade para gerenciamento de uma quantidade maior de variáveis. A aplicação de IHMs pode ir desde simples máquinas de lavar pratos até cabines das aeronaves de helicópteros. Neste último caso as IHMs são extremamente especializadas para a função a que se destinam.

Assim, a IHM está normalmente próxima à linha de produção, instalada na estação de trabalho, traduzindo os sinais vindos do CLP para sinais gráficos de fácil entendimento. Antigamente a melhor integração do homem com o processo industrial era constituída por um grande painel que utilizava com frequência anunciadores de alarmes, sinaleiros, chaves seletoras e botoeiras que permitiam comandar ou visualizar estados definidos como ligado ou desligado, alto ou baixo, temperatura elevada ou normal.

Como o desenvolvimento tecnológico para atender a essa demanda, surgiram os displays e as chaves digitais. Os displays permitiam visualizar os valores das variáveis do processo e as chaves possibilitam mudar os parâmetros predefinidos, como por exemplo, valores temporizados ou contadores. No entanto, esse tipo de interface trazia dois problemas: o primeiro era a dimensão da superfície do painel, que muitas vezes necessitava ser ampliada somente para alojar tantos botões ou informações que eram necessárias, e o segundo toda a complexa fiação para interligar os sensores e atuadores aos displays e chaves digitais.

Uma IHM é um hardware industrial composto normalmente por uma tela de cristal líquido e um conjunto de teclas para navegação ou inserção de dados que utiliza um software proprietário para sua programação. A FIG. 22 mostra um exemplo de uma IHM.



FIGURA 22 – Estação de IHM

Fonte: [http://www.quebarato.com.br/clp-com-ihm-incorporada-programa-aplicativo\\_\\_D47FA.html](http://www.quebarato.com.br/clp-com-ihm-incorporada-programa-aplicativo__D47FA.html)

## 5.2 SCADA

O sistema SCADA são sistemas configuráveis, destinados à supervisão, controle de variáveis de entrada e saída digitais e analógicas distribuídas e à aquisição de dados de plantas industriais. Sua aplicação tem sido implementada tanto na área civil quanto industrial. Esses sistemas visam à integridade física das pessoas, equipamentos e produção, consistindo muitas vezes em sistemas redundantes de hardware e meio físico (canal de informação) e permitindo pronta identificação de falhas. A interação do operador com o processo é garantida através de interfaces gráficas que permitem uma interação amigável.

A base de hardware pode ser um PC comum, que facilita e otimiza os custos de hardware. Esses sistemas possibilitam configurar os arquivos de alarmes e eventos, além de relatórios e interfaces para controle de receitas e funções avançadas através da escrita de scripts.

No desenvolvimento dos sistemas supervisórios é necessário algumas etapas a se seguir:

- Entendimento do processo.
- Variáveis do processo.
- Planejamento da base de dados.
- Planejamento de alarmes.
- Desenho de telas.
- Gráfico de tendências.
- Planejamento do sistema de segurança.
- Padrão Industrial de desenvolvimento (Windows).

## 5.3 PROCESSO

O processo a ser controlado é o nível de um tanque. A FIG. 23 mostra a foto da planta de nível do laboratório de Automação Do CEFET/MG – Campus IV.



FIGURA 23 Planta de nível do laboratório de Automação  
Fonte: Elaboração Própria

O sistema é constituído por vários elementos conforme a FIG. 23 ilustra.

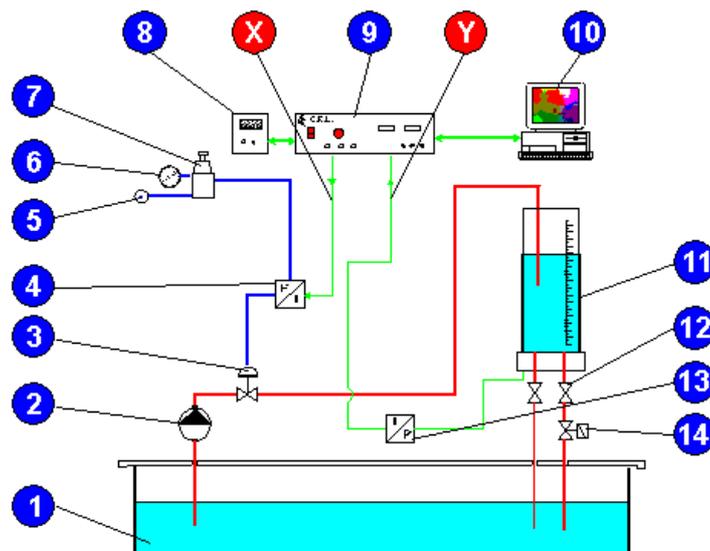


FIGURA 24 – Sinóptico da planta de nível  
Fonte: Material didático da Ditacta.

onde:

1. Reservatório
2. Bomba centrífuga
3. Válvula pneumática proporcional
4. Transdutor I/P
5. Alimentação de ar comprimido
6. Manômetro de baixa pressão
7. Regulador de pressão manual
8. Regulador eletrônico
9. Unidade de condicionamento
10. Computador
11. Tanque de água
12. Válvula de drenagem
13. Transdutor P/I (sensor de nível)
14. Válvula solenóide
- X. Sinal atuante (MV)
- Y. Sinal medido (PV)

Descrição do processo: Através de uma bomba centrífuga (2) alimentada por um motor com rotação constante, água é bombeada de um reservatório (1) para dentro de um tanque (11). Como visto no Capítulo 3, o nível de um tanque é controlado pela proporção entre a vazão de água que entra no tanque e a que sai. Isso é conseguido através do controle da abertura de uma válvula pneumática (3) que limita a vazão de entrada. Para a inserção de distúrbios no sistema, as válvulas solenóide (14) e manual (12) são usadas. Um sinal Y (4-20mA - PV) enviado por um sensor piezo resistivo é convertido para o formato digital e posteriormente enviado na forma de comunicação serial pela caixa de condicionamento (9) para o computador (10). Através de um controlador PID interno o computador envia um sinal de controle para a caixa de condicionamento o converter em sinal analógico X (4-20mA - MV) e o enviar para um conversor corrente para pressão (4) atuar na válvula pneumática (3), Através desse ciclo o nível do tanque é controlado.

### 5.3.1 Função de transferência da Planta de Nível

Nível é um sistema invariante no tempo e linear conforme a classificação vista de sistemas no capítulo dois na FIG. 2 e de acordo com o item 3.1.1 do capítulo três foi visto que se pode levantar a função de transferência de um processo aplicando-se uma entrada conhecida e observando a resposta do sistema. No caso de sistemas de nível a entrada mais comum é um degrau.

Para o levantamento da função de transferência algumas etapas foram seguidas. Primeiramente com o sistema em malha aberta foi aplicado um degrau no sinal atuante (válvula) e observado a resposta do nível. Com os resultados encontrados foi feito um gráfico no Excel para o levantamento da curva característica conforme FIG. 25.

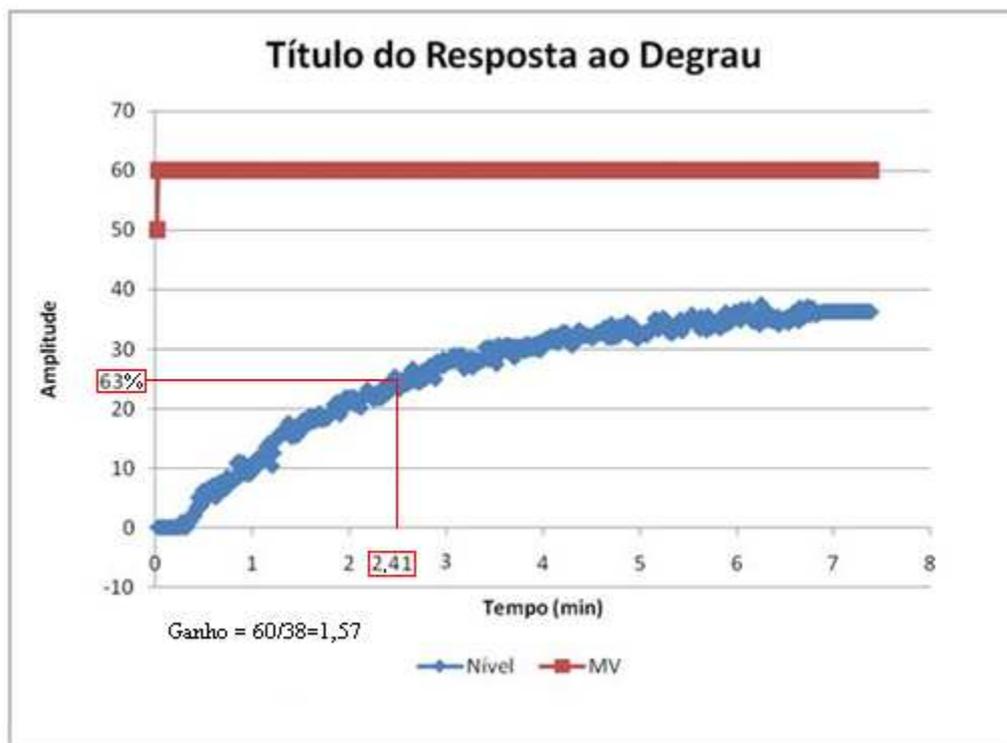


FIGURA 25 – Resposta ao degrau da planta de nível  
Fonte: Elaboração própria.

Utilizando os métodos descritos no Capítulo 3 a função de transferência encontrada para a planta de nível foi:

$$G(s) = \frac{1,57}{2,41s+1} \quad (39)$$

## 5.4 VARIÁVEIS DO PROCESSO

Um dos quesitos para o desenvolvimento de um supervisor é o pleno conhecimento das variáveis do processo. A melhor maneira de se visualizar todas as variáveis de um processo é através de fluxogramas de engenharia Piping & Instrument Diagram (P&IDs - Diagrama de tubulação e instrumentação), em que equipamentos, tubulações e instrumentos são representados com riqueza de detalhes e permitem mostrar um retrato completo do processo. Deve mostrar:

- Todos os equipamentos, nas proporções relativas das suas dimensões físicas e nas posições da instalação física.
- Dispositivos de alívio de pressão, como válvulas de segurança, de alívio de pressão e de vácuo de tanques, com suas dimensões e pressões de ajuste.
- Itens de equipamentos, tubulações e instrumentos.
- Todos os itens que afetam a funcionalidade do processo, como drenos, pontos de amostragem, reduções etc.

Os símbolos de P&ID devem seguir a norma da International Society of Automation A5.1 (ISA– Sociedade Internacional da Automação). A FIG. 26 ilustra o P&ID da planta de nível.

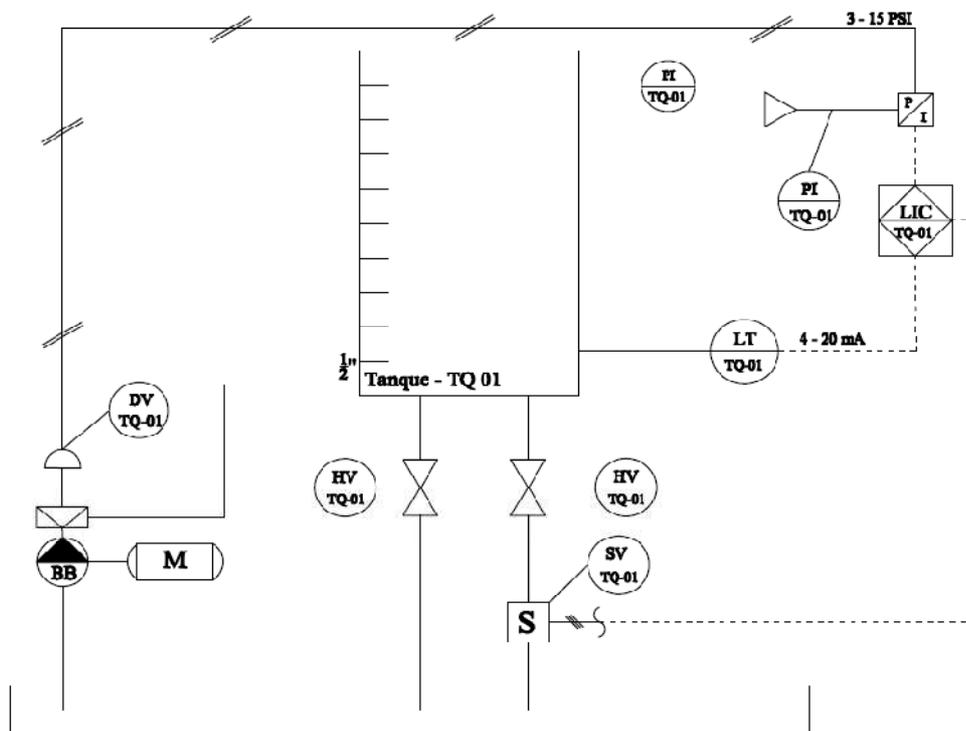


FIGURA 26 – Diagrama P&ID do processo

Fonte: Elaboração Própria

A FIG. 27 representa a legenda do P&ID do processo:

<b>LIC - Controlador Indicador de Nível</b>		<b>- Sinal Pneumático</b>
<b>LT - Transmissor de Nível</b>		<b>- Conversor Corrente / Pressão</b>
<b>PI - Indicador de Pressão</b>		<b>- Válvula Diafragma</b>
 <b>- Compressor</b>		<b>- Válvula Solenóide</b>
<b>SV - Válvula Solenóide</b>		<b>- Bomba Centrífuga</b>
<b>DV - Válvula Diafragma</b>		
<b>— — — - Sinal Elétrico</b>		
<b>HV - Válvula Manual</b>		

FIGURA 27 - Legenda P&ID do processo  
Fonte: Elaboração Própria

Todos os símbolos seguiram norma da ISA A5.1. Outros símbolos se encontram nos anexos 4, 6 e 7.

## 5.5 AQUISIÇÃO DE DADOS

Existem vários tipos de comunicação entre o sistema supervisorio e os instrumentos do processo. Os mais comuns são: comunicação por polling, comunicação por interrupção e comunicação serial ou paralela. Na comunicação paralela, os dados são enviados diretamente do transmissor ao receptor simultaneamente.

Na comunicação em série, o transmissor envia dados bit a bit. A forma de comunicação entre o supervisorio e a planta, ou seja, a forma como o supervisorio recebe o valor do nível e transmite o valor para controle da abertura da válvula, se dá por meio da comunicação serial. A porta serial do dispositivo receptor faz o processo inverso, recebe cada bit do dado e, ao completar o recebimento dos 8 bits, envia o dado ao computador.

### 5.5.1 Comunicação por consulta (polling)

Neste modo de comunicação designado por mestre / escravo a estação central (Master) tem o controle absoluto das comunicações, efetuando sequencialmente a leitura dos dados de cada estação remota (Slave), que apenas responde à estação central após a recepção de um pedido, ou seja, em *half-duplex* (canal físico onde a informação flui nos dois sentidos, mas não ao mesmo tempo).

Cada estação remota é identificada por um endereço único. Caso uma estação remota não responda durante um período de tempo predeterminado às solicitações que lhe são dirigidas pela estação central, novas tentativas de polling serão realizadas antes de se declarar time-out e se avançar para a próxima estação.

### 5.5.2 Comunicação por interrupção

Nesse modo de comunicação, a estação remota monitora os seus valores de entrada e, quando detecta alterações significativas ou valores que ultrapassem os limites definidos, inicia a comunicação com a estação central e a consequente transferência de dados.

O sistema é implementado de modo a permitir a detecção de erros e a recuperação de colisões. Antes de iniciar a transmissão a estação remota verifica se o meio está ocupado por outra estação, aguardando um tempo programado antes de efetuar nova tentativa de transmissão. Em caso de colisões excessivas, em que o sistema é gravemente afetado, a estação remota cancela a transmissão, aguardando que a estação central proceda à leitura dos valores através de polling.

### 5.5.3 Comunicação serial

Existem dois tipos de comunicação serial: síncrona e assíncrona. No primeiro tipo, há um canal de transmissão de dados e um canal de sincronismo, que mostra ao receptor onde começa e onde termina cada conjunto de dados que está

sendo transmitido pelo canal de dados. Em sistemas assíncronos, a informação e sincronismo trafegam por um canal único. O transmissor e o receptor devem ser configurados antecipadamente para que a comunicação se estabeleça a contento.

Como a porta serial do micro é do tipo assíncrona, isso significa que, pelo mesmo fio onde os dados são transmitidos, são transmitidos os sinais de sincronismo, isto é, os sinais que indicam o início e o final da transmissão. Esses sinais são chamados, respectivamente, *start bit* e *stop bit*. A porta serial transmite dados em grupos de 8 bits.

O formato da transmissão de dados em série pode ser visto na Figura 28. O *start bit* é um sinal que o transmissor envia ao receptor de modo a orientá-lo sobre o início do conjunto de dados. Quando a porta serial está ociosa, mantém a sua saída em 1. Na transmissão do *start bit*, esse sinal passa de 1 para 0, ou seja, o *start bit* tem valor lógico 0. Normalmente tem-se 8 bits de dados, um a um. O bit de paridade é opcional, porém aumenta a confiabilidade, uma vez que é mais fácil ocorrerem erros em comunicação serial. O *stop bit* indica que o conjunto terminou. Após ser enviado esse conjunto, um novo conjunto é transmitido.

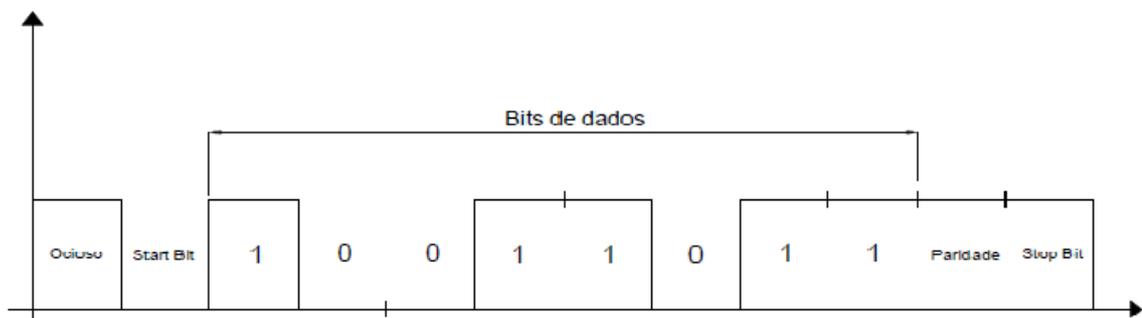


FIGURA 28 - Formato de transmissão da comunicação serial

Fonte: Elaboração Própria

Primeiro é enviado o bit menos significativo do dado (o de menor “peso” - LSB) e, por último, o bit mais significativo (o de maior “peso” - MSB). Na representação da FIG. 28 está sendo transmitido o dado D9h (11011001b).

Os valores da comunicação podem variar. A quantidade de bits de dados, a utilização ou não de bit de paridade e o seu tipo e o tamanho do pulso de *stop bit* deverão ser conhecidos, bem como a velocidade de transmissão. Se o transmissor enviar um dado utilizando um padrão e o receptor tentar recebê-lo utilizando um

padrão diferente, a comunicação não se concretizará. Com isso, o transmissor e receptor deverão estar trabalhando sob um mesmo protocolo de comunicação.

Todas essas variáveis apresentadas deverão ser bem conhecidas e, tanto o transmissor quanto o receptor deverão ser pré-programados a utilizá-las durante a comunicação. Elementos envolvidos na comunicação serão apresentados a seguir:

- *Start Bit*: o tamanho do *start bit* é fixo e tem valor lógico 0. Quando a porta serial está ociosa, mantém um valor lógico 1 em sua saída. A transição de 1 para 0 indica o início do *start bit*, ou seja, o início da transmissão serial.
- *Dados*: é a informação que se deseja saber. Normalmente possuem 8 bits.
- *Paridade*: pode ter ou não e serve para a detecção de erro na transmissão. Quando a paridade é escolhida, deve-se definir se será utilizada paridade par (even) ou ímpar (odd). No exemplo da FIG. 28, está sendo usada paridade par, onde incluímos um 1 a mais para que o número total de bits fosse par.
- *Stop Bit*: Indica o fim da transmissão do conjunto de dados.
- *Taxa de transferência (Baud Rate)*: refere-se à velocidade com que os dados são enviados. É medida em bits por segundos (bps). Valores típicos são 300, 1.200, 2.400, 9.600, 19.200, 38.400, 57.600 e 115.200 bps.

Essas variáveis constituem um protocolo. O protocolo mais utilizado é o 8N1 (8 bits de dados, None - nenhuma paridade - e 1 *stop bit*)

#### 5.5.4 Protocolo de comunicação da planta de nível

O protocolo para a comunicação entre a planta de nível e o supervisor ocorre da seguinte maneira:

Existem dois canais: AN0 e o AN1. O sinal enviado para o canal AN0 é o sinal que irá para a válvula pneumática (MV). O sinal enviado para o AN1 é o sinal que irá para a válvula solenóide (distúrbio).

A seguinte sequência em HEXADECIMAL deve ser enviada para se receber o valor do sensor, que é o valor do nível:

- 080F: comando para a calibração do conversor AD
- 0010: comando para ler o canal 0
- 05: Inicia a comunicação
- 06: pede o byte LSB
- 07: pede o byte MSB

Total de bits de dados recebidos: 16 bits

Do total de 16 bits apenas 12 bits são o valor do nível, de acordo com a FIG. 29. Os quatro primeiros bits do byte MSB são para expor se o sinal é negativo ou positivo:

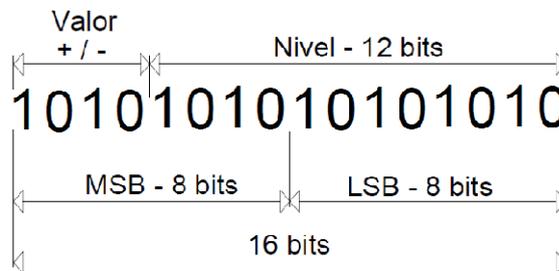


FIGURA 29 - Configuração do valor do nível  
Fonte: Elaboração Própria

Já o protocolo para envio do comando em HEXADECIMAL para o acionamento da válvula pneumática é o seguinte:

AX BX CX

Onde cada X tem 4bits de um total de 12 bits representativo do valor da variável ( $4 \times 3 = 12$  bits (4095)). Os 4 bits que vão com 'C' são a parte mais significativa dos 12bits de sinal, sendo que para a abertura de 100% da válvula deve ser mandado o comando AFBFCF e para o fechamento da válvula o comando A0B0C0 deve ser enviado. Características da comunicação serial da planta:

Taxa de Transferência: 19200 bps

Dados: 8 bits

Paridade: Sem paridade

## VI LABVIEW

Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench (LabView), é um software aplicativo para a criação de sistemas supervisórios baseado na linguagem G (linguagem de programação gráfica) que emprega ícones ao invés de textos para criar aplicações, diferentemente das linguagens de programação baseadas em textos (linhas de comando), onde as instruções determinam a execução do programa.

Os programas no LabView são chamados de Instrumentos Virtuais, ou VI's, porque sua aparência e operação imitam instrumentos físicos. Cada VI tem funções que manipulam a entrada pela interface do usuário ou de outras fontes e indicam essa informação ou a movem para outros arquivos ou outros computadores.

Um VI contém os três seguintes componentes:

- Painel Frontal – A FIG. 30 ilustra a janela do painel frontal. Ele serve como interface para o usuário e é construído com controles e indicadores, que são os terminais interativos de entrada e saída do VI, respectivamente. Os controles são dispositivos de entrada, como botões e teclas. Os indicadores são gráficos, LED's, ou indicadores, representando a saída das informações.

Os controles simulam dispositivos de entrada do instrumento e de dados da fonte do diagrama de bloco do VI. Os indicadores simulam dispositivos de saída do instrumento e visualizam dados que o bloco adquire ou gera.

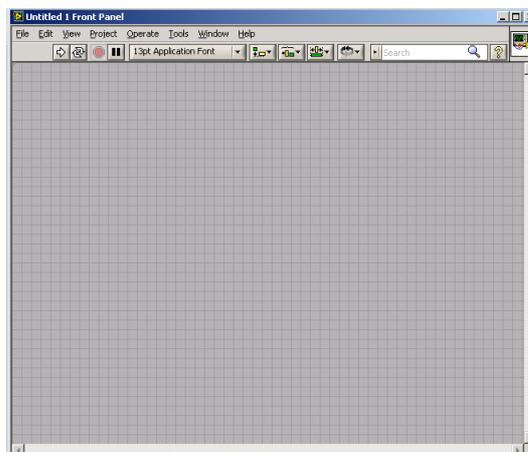


FIGURA 30 - Painel Frontal  
Fonte: Elaboração Própria

- Diagrama de Blocos – Contém o código fonte gráfico que define o funcionamento do VI. Depois de construir o painel frontal, o código é adicionado usando representações gráficas das funções para controlar os objetos do painel frontal. O diagrama de bloco contém esse código fonte gráfico. A FIG. 31 mostra a janela do diagrama de bloco.

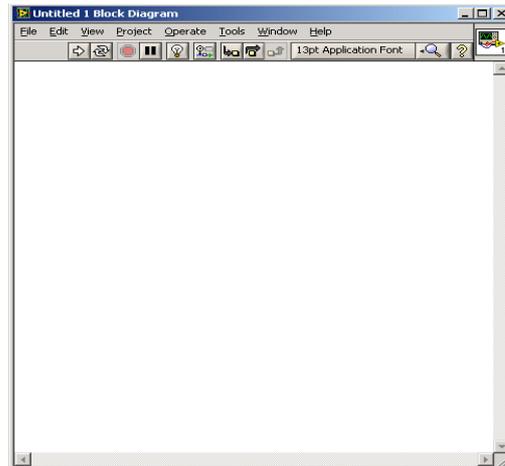


FIGURA 31 - Diagrama de bloco  
Fonte: Elaboração Própria

- Ícone e conector – Identificam o VI de modo ele possa ser usado em outro VI. Um VI dentro de outro VI é chamado de Sub-VI. Um Sub-VI corresponde a uma subrotina em linguagens de programação baseadas em texto. A FIG. 32 ilustra o ícone e os conectores de um VI.

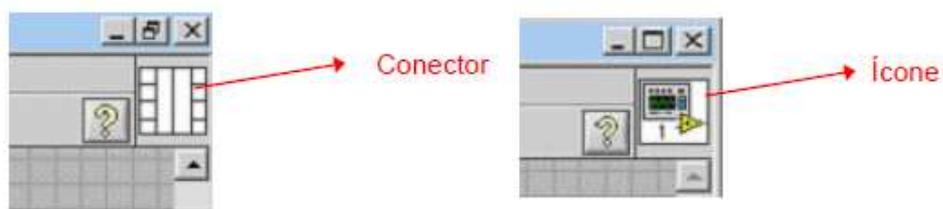


FIGURA 32 - Ícones e conectores  
Fonte: Elaboração Própria

## 6.1 FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA

O LabView possui uma parte do software reservada para simulações. No item 5.3.1 foi encontrado a função de transferência da planta de nível. Foi então elaborado um VI para verificar se a função de transferência encontrada terá a resposta esperada para o processo de nível no software LabView.

### 6.1.1 Painel Frontal

A FIG. 33 ilustra o painel frontal do VI.

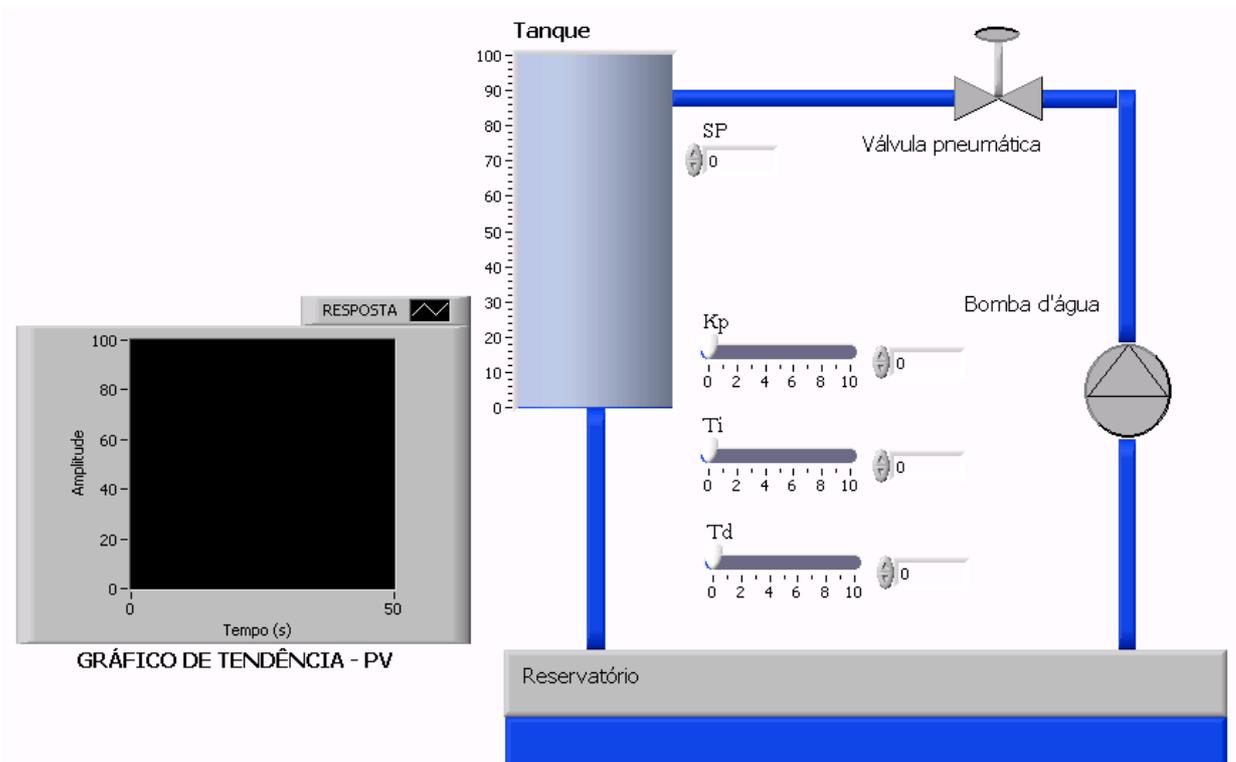


FIGURA 33 - Painel frontal – G(s)  
Fonte: Elaboração Própria

Esse painel representa a bomba d'água que retira a água do reservatório, a válvula pneumática, os ganhos PID e um gráfico de tendência para a visualização da resposta ao degrau aplicada ao sistema. Nesse diagrama podem-se modificar os ganhos PID e ajustar o SP (set point) desejado.

### 6.1.2 Diagrama de Blocos

A FIG. 34 ilustra o diagrama de blocos do VI.

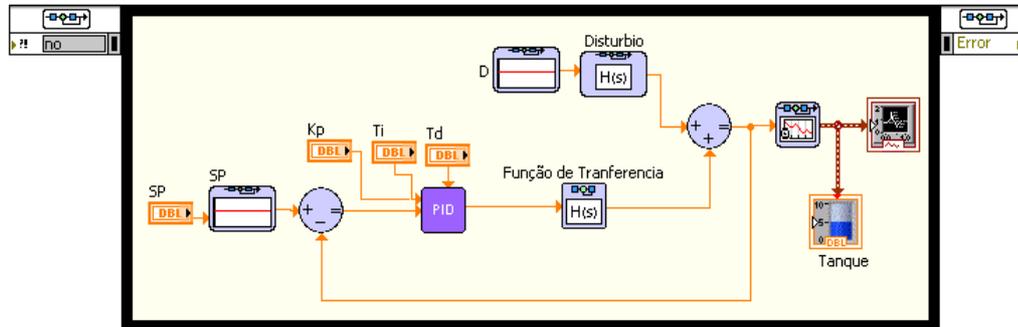


FIGURA 34 - Diagrama de Blocos – G(s)

Fonte: <http://www.che.utexas.edu/course/che360/links.html>.

Todo item no painel frontal tem o seu correspondente no diagrama de blocos, com exceção das tubulações e bomba d'água em que não é feito o controle. O sistema é realimentado pelo resultado da soma do distúrbio e função de transferência e com a comparação entre o SP o PID age sobre o erro.

O bloco PID é como se fosse uma sub-rotina na linguagem de texto, sendo assim em correspondência com o LabView, um sub-VI. Ele é composto de uma VI em que foram montados os seus ícones e conectores, com o seu painel frontal e diagrama de blocos, como ilustra a FIG. 35.

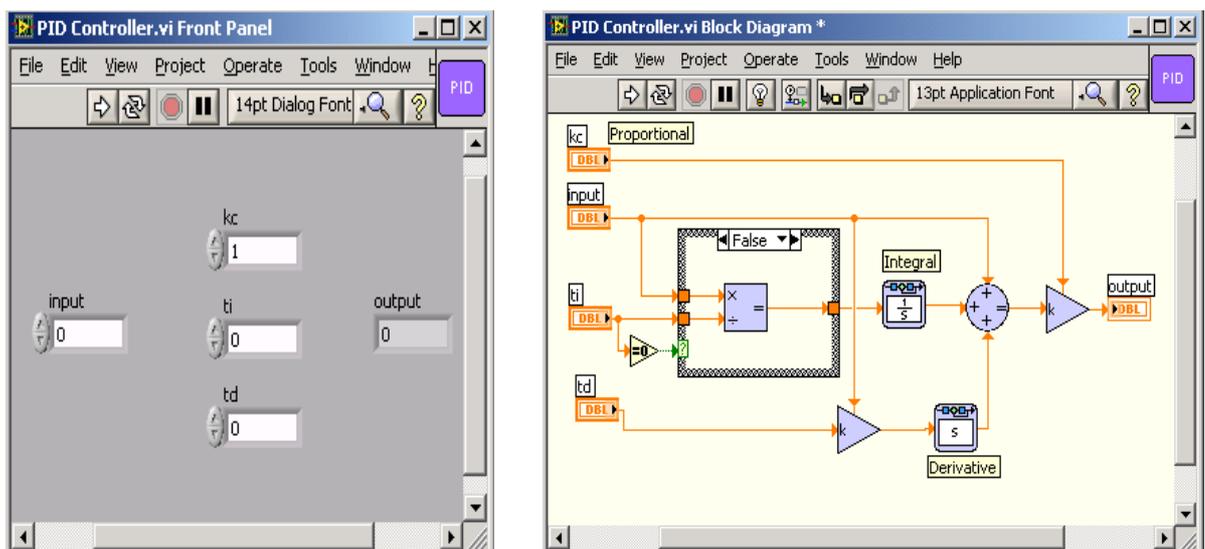


FIGURA 35 - Painel frontal e Diagrama de Blocos – PID

Fonte: <http://www.che.utexas.edu/course/che360/links.html>.

O diagrama de blocos ilustra a lógica utilizada para a simulação. Como visto no capítulo IV o tempo integral é o inverso do ganho da integral do erro e o tempo derivativo é o ganho da derivada do erro. Usando as transformadas de Laplace vê-se que a ação integral age no denominador da função de transferência ( $1/s$ ), modificando os seus pólos, e a ação derivativa age no numerador da função de transferência ( $s$ ), modificando os seus zeros. A ação proporcional apenas adiciona um ganho ao erro. Essas são, portanto, as características de um controlador PID que através da soma dessas três ações, age da melhor maneira para resultar em uma saída que faça com que o erro seja igual a zero.

### 6.1.3 Simulação

A FIG. 36 representa a simulação a um degrau, que é o sinal mais comum encontrado em sistemas de nível (mudança de SP, por exemplo).

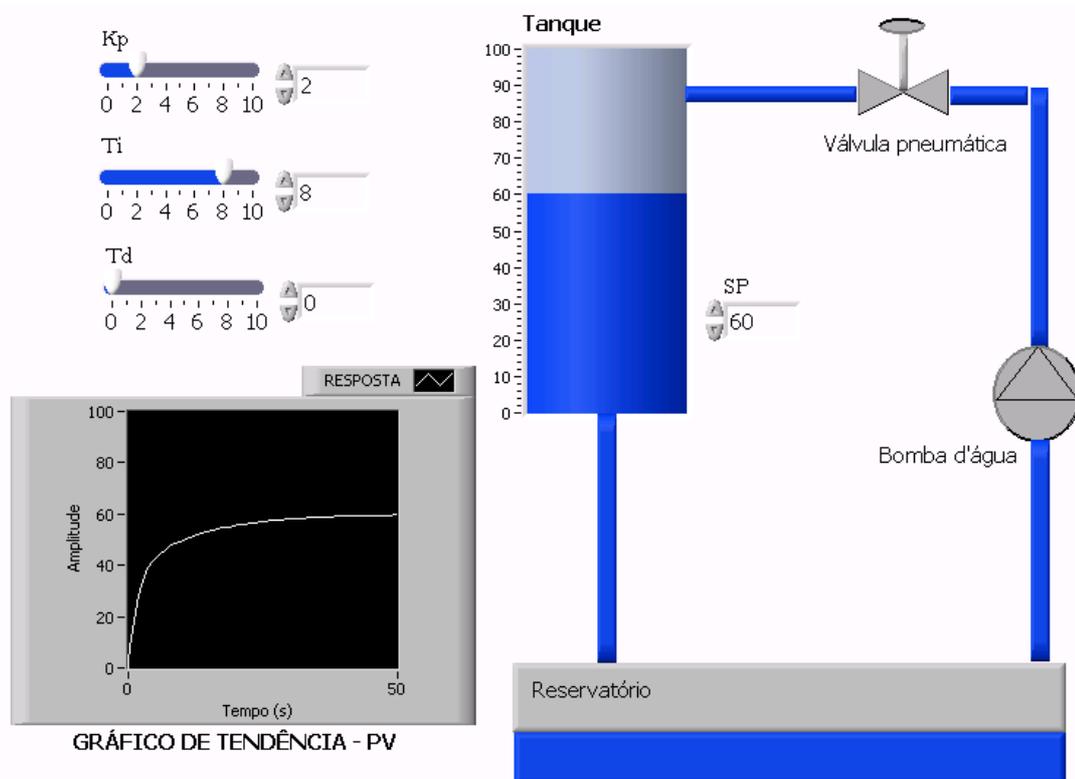


FIGURA 36 - Resposta ao degrau para o sistema  
Fonte: Elaboração Própria

Foi estipulado um SP de 60 para a simulação e pelo gráfico da FIG. 36 vê-se que a curva é característica de um sistema de 1º ordem. Essa primeira simulação foi feita sem distúrbio inserido no sistema e com um  $K_p$  de 2 e um  $T_i$  de 8. A ação derivativa não foi usada, pois controle de nível não necessita desta ação. Mais simulações foram feitas com e sem distúrbio e para todas elas, o controle foi feito eficientemente. Modificando o ganho  $K_p$  e o tempo  $T_i$  vê-se que a partir de um  $T_i = 30$  o sistema começa a oscilar, mas sem perder a estabilidade e para um  $K_p = 1$  o sistema oscila até encontrar a estabilidade e perde a estabilidade com um  $K_p = 16$ .

## 6.2 COMUNICAÇÃO E CONTROLE DA PLANTA

Na seção 6.1 foi visto a simulação da função de transferência encontrada e sua resposta, sem ser feito o controle real do nível. Foi então elaborado um VI que é o supervisor da planta.

### 6.2.1 Painel Frontal

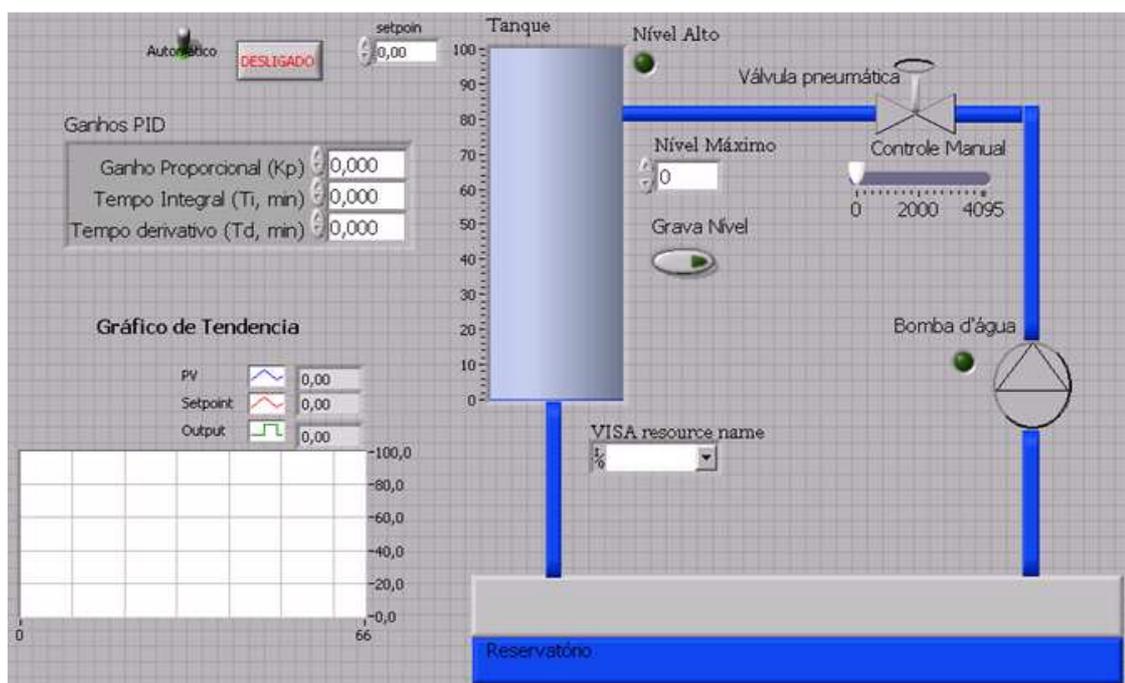


FIGURA 37 - Painel Frontal – Supervisor  
Fonte: Elaboração Própria

Esse VI representado pela FIG. 37, é o supervisório propriamente dito. Vê-se um botão de liga e desliga, outro para a escolha se o controle será manual ou automático, os ganhos PID, o gráfico de tendência e a porta serial para a comunicação com a planta. Além disso, foi elaborado um sistema em que o usuário escolha um nível máximo, juntamente com um alarme para a sua visualização, quando atingido. Há a possibilidade de o usuário gravar o nível do tanque pressionando o botão Grava Nível. Para a montagem das figuras do supervisório foi usado o próprio LabView pois ele possui ferramentas para parte gráfica.

### 6.2.2 Diagrama de Blocos

As figuras que se seguem representam o diagrama de blocos do supervisório. Dependendo de qual botão estiver acionado lógicas diferentes serão executadas. O primeiro passo para a elaboração desse supervisório foi o botão liga desliga, ele habilita todo o sistema a ser executado, funcionando como se fosse uma condição geral de funcionamento do supervisório. Existem no LabView as chamadas “estruturas” em que a programação é feita. A estrutura *Case* (semelhante às declarações condicionais ou declarações *if, then, else* em linguagens de programação baseadas em texto), usada na lógica do botão liga desliga, tem dois subdiagramas ou condições. Apenas um subdiagrama pode ser visto de cada vez e a estrutura executa apenas uma condição por vez. Um valor de entrada determina qual subdiagrama será executado, que no caso do botão liga desliga quando ligado (*true*), executa a estrutura *sequence* e quando desligado, fecha a válvula, desliga o LED da bomba e do alarme conforme FIG. 38.

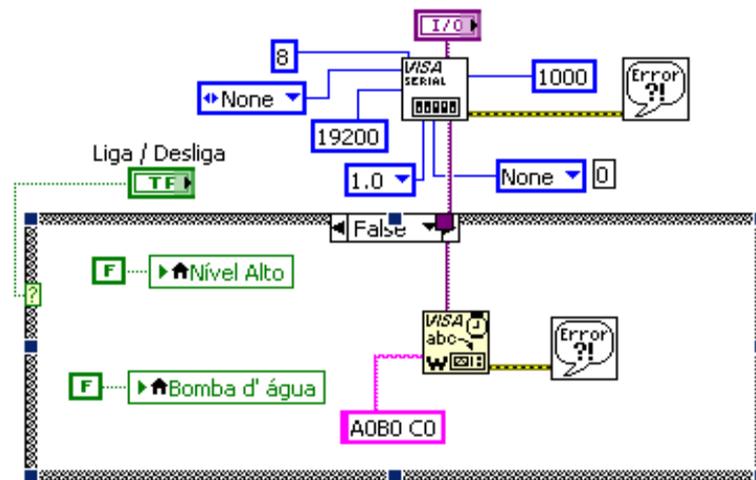


FIGURA 38 - Diagrama de Blocos – Sistema Desligado  
Fonte: Elaboração Própria

Uma vez acionado o botão liga desliga a condição do botão manual automático será verificada. Se o controle estiver no manual a condição *false* será executada como mostra a FIG. 39.

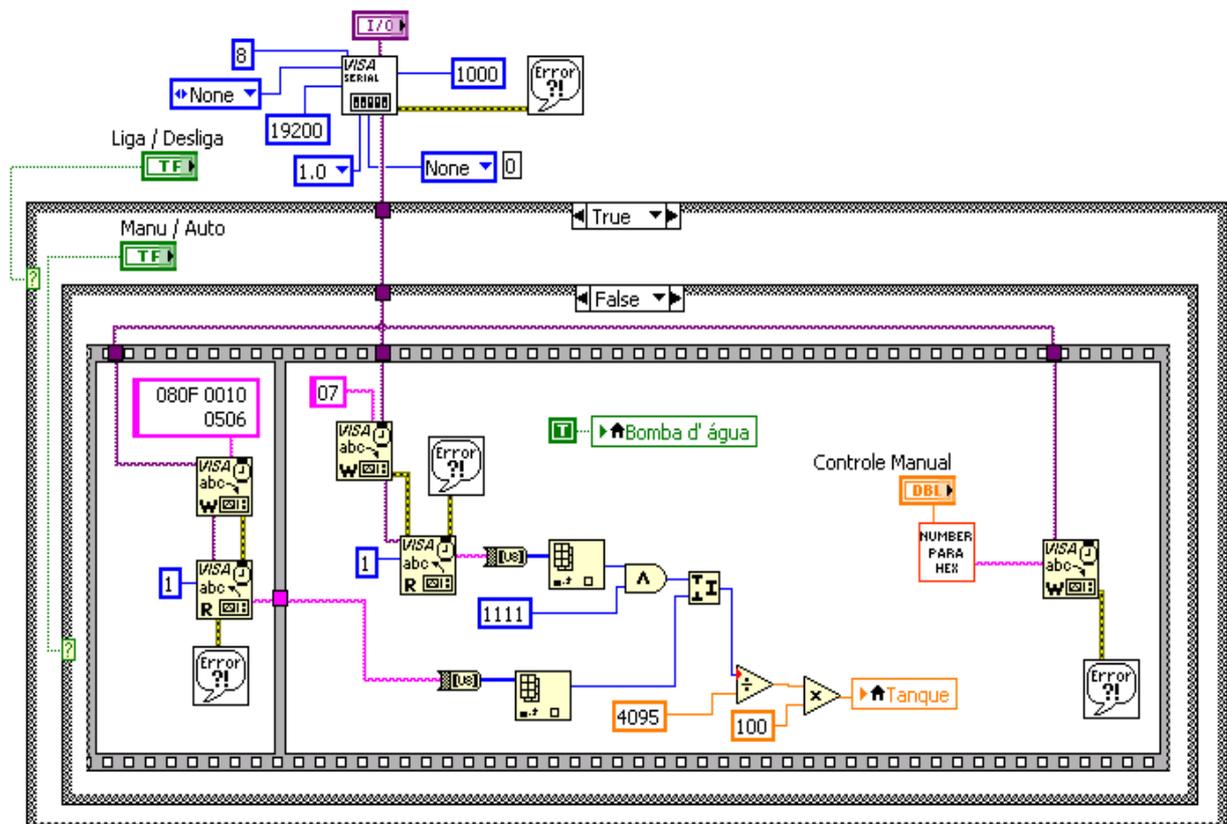


FIGURA 39 - Diagrama de Blocos – Supervisório em Manual  
Fonte: Elaboração Própria

Dentro do *case false* existe uma estrutura *sequence*. Ela executa o quadro 0, depois o quadro 1, depois o quadro 2, e assim por diante. Essa estrutura não completa sua execução nem retorna nenhum dado até que o último quadro seja executado. No caso desse supervisor a estrutura *sequence* contém dois quadros. No primeiro quadro o comando para a leitura do valor do primeiro byte do nível é pedido através da função VISA WRITE, que é a função que escreve na porta serial os valores que atendem ao protocolo necessário para aquisição do valor do nível. Depois do recebimento desse byte através da função VISA READ o segundo quadro será executado.

No segundo quadro o segundo byte do valor do nível é requisitado e é feita uma lógica para a quebra dos dois bytes em uma *string* de 12 bits, que é o valor do nível e logo após ele é atualizado no tanque. Depois disso, o valor digitado em controle manual é transformado no protocolo visto na seção 5.5.4 pelo sub VI “NUMBER to HEX” e a abertura ou fechamento da válvula é feita.

Se o controle estiver no automático a mesma estrutura *sequence* da condição manual será executada como mostra a FIG. 40. A diferença dessa vez é que há um controlador PID. Nesse quadro existe um alarme que verifica se o valor do nível está maior que o especificado pelo usuário e, se estiver, uma sirene será ligada e um LED de alerta se acenderá. Existe a possibilidade de gravar o nível, que verifica se o botão “grava nível” foi apertado, gravando o nível juntamente com a hora e o dia ocorrido em um arquivo bloco de notas em local determinado pelo usuário. A FIG. 39 mostra o programa para o sistema em automático.

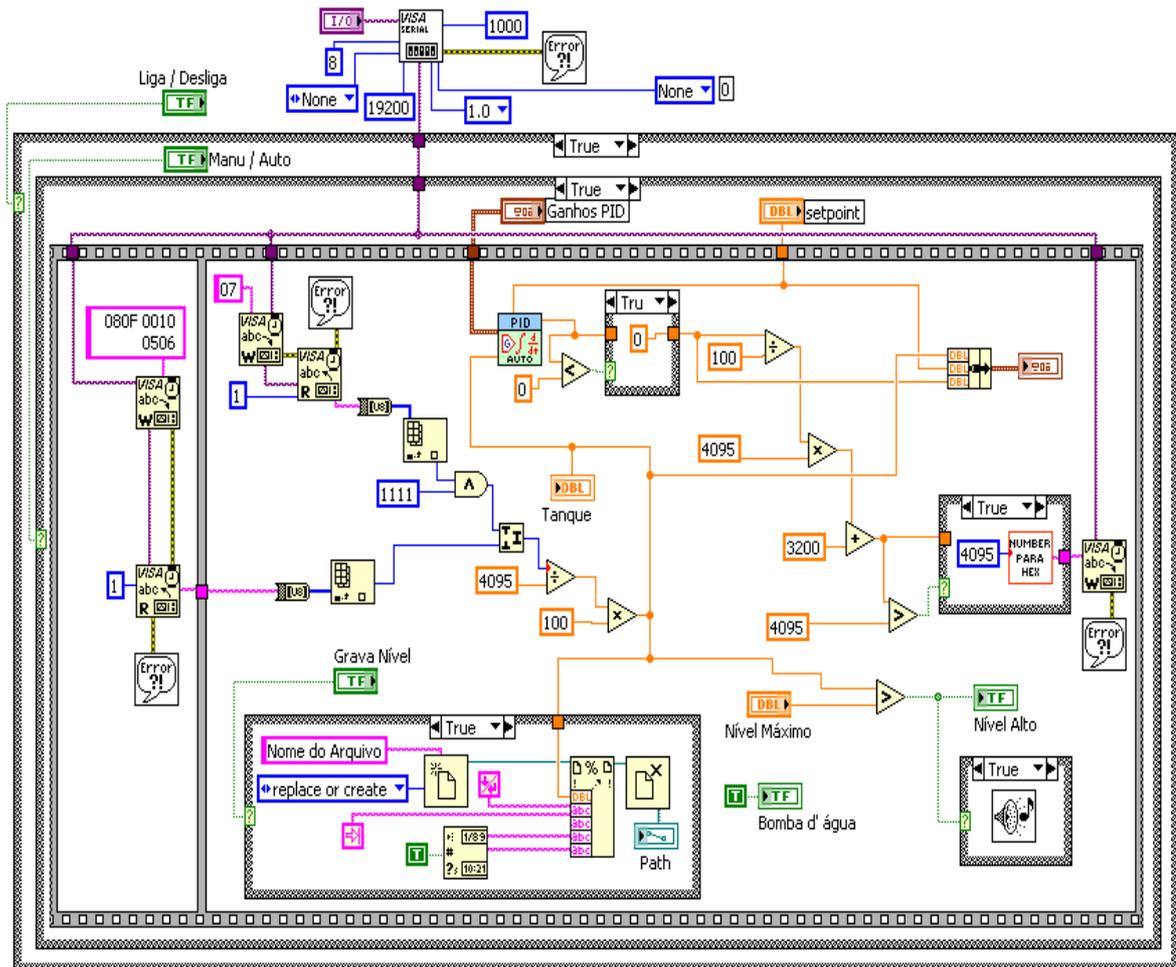


FIGURA 40 - Diagrama de Blocos – Supervisório em Automático  
Fonte: Elaboração Própria

Uma importante observação a ser feita é que a válvula pneumática com problemas mecânicos e por isso foi preciso adicionar um valor (3.200) que serve como o ponto inicial de sua abertura, ou seja, esse é o valor com o qual a válvula começa a obter alguma abertura.

### 6.2.3 Simulação

É nessa parte que o supervisório foi executado para a verificação de seu funcionamento. Foram feitas simulações tanto para o controle manual como para o automático e o controle do nível ocorreu de forma satisfatória. A FIG. 41 mostra a simulação feita para um SP de 30, com ganho  $K_p = 3$ .

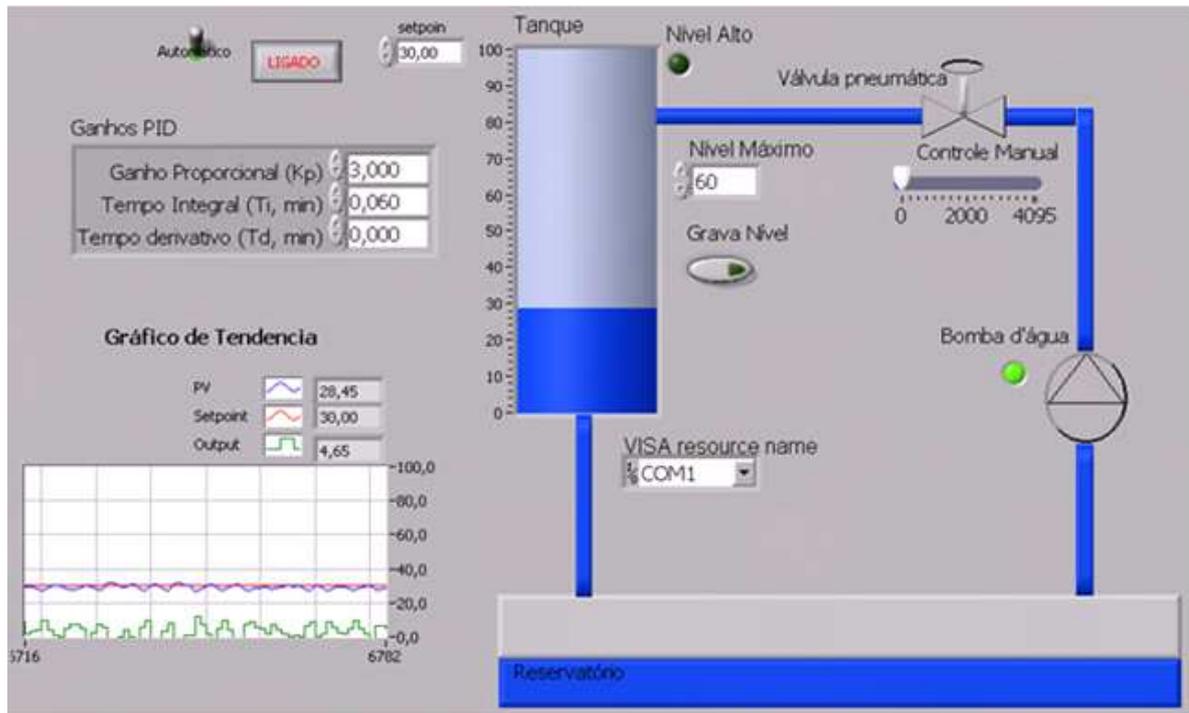


FIGURA 41 - Simulação como supervisório em Automático  
Fonte: Elaboração Própria

Observa-se que o nível estipulado foi atingido e através do gráfico de tendência pode-se ver em tempo real o valor de cada variável (PV, MV – Output e SP). Como esse VI também grava o nível do tanque, servindo como uma base de dados, quando o botão grava nível é apertado um arquivo tipo bloco de notas é gerado constando o valor do nível, com data e hora ocorrida como ilustra a FIG. 42.

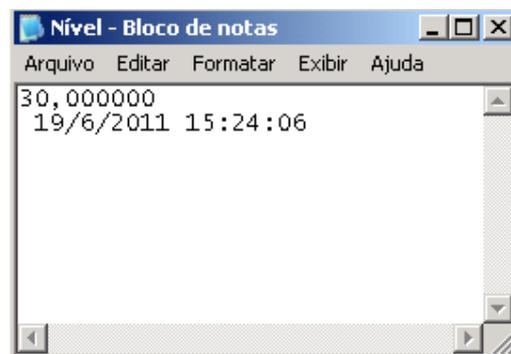


FIGURA 42 - Arquivo que guarda o valor do Nível  
Fonte: Elaboração Própria

No controle manual a abertura da válvula é controlada através da barra de controle manual. A faixa de atuação da válvula é de 0 a 4095 que correspondem aos 12 bits do valor do nível. Com o controle em manual o controle do nível se deu de forma mais difícil, devido a não linearidade da válvula, o que dificultou determinar a abertura ideal para que a válvula gere uma vazão que faça com que o nível fique no valor desejado. A FIG. 43 mostra o sistema em manual.

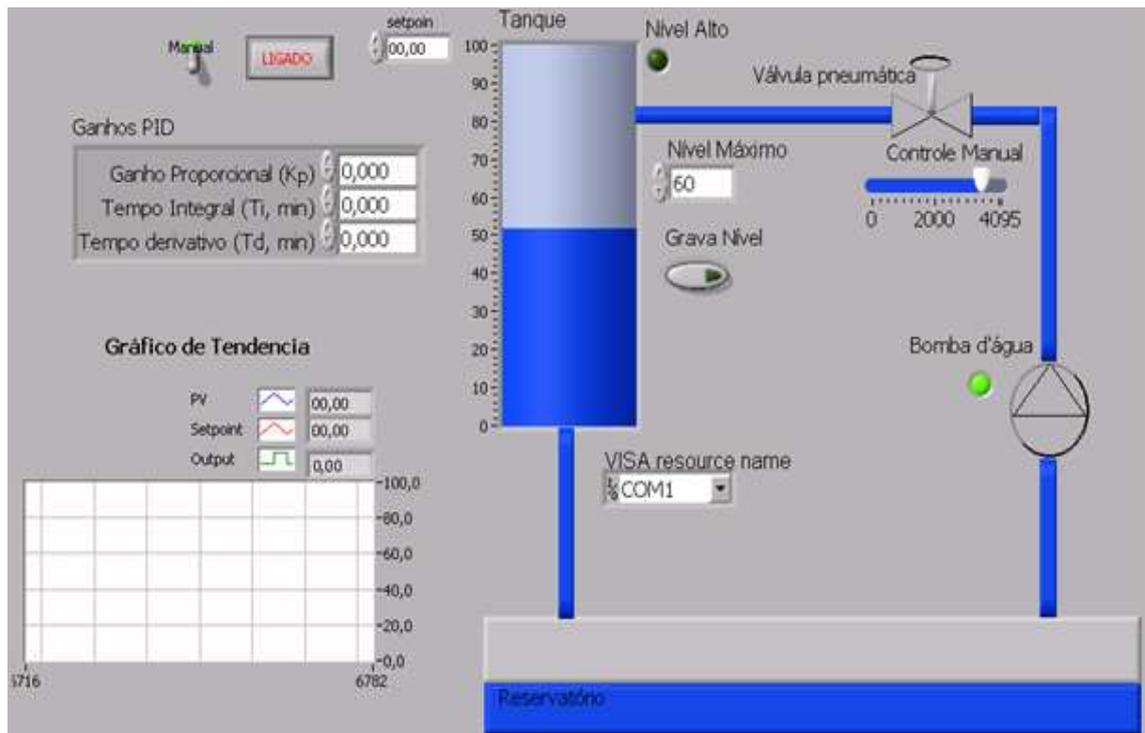


FIGURA 43 - Simulação como supervisor em Manual  
Fonte: Elaboração Própria

### 6.3 RESULTADOS ENCONTRADOS

O levantamento da função de transferência foi o primeiro resultado obtido. Pelo método abordado, foi constatado que a função de transferência encontrada na seção 5.3.1 está de acordo com a teoria para sistemas de nível, devido à correspondência com parte de simulação na seção 6.1.

Várias simulações foram feitas, tanto na parte teórica quanto na parte prática. Na parte da simulação teórica no item 6.1, todos os resultados foram os

desejados, pois o LabView correspondeu à resposta esperada para sistemas de primeira ordem. Na parte da simulação prática, na seção 6.2, onde foi simulado o sistema supervisorio em si, todos os resultados convergiram para o objetivo final. O controle do nível se deu de forma satisfatória, pois o nível digitado no SP foi o alcançado. As demais funções, como geração de alarme, gravação do valor do nível e controle manual se realizaram de forma pretendida, atendendo os requisitos para a criação de um sistema supervisorio.

O resultado final, a criação de um supervisorio para a planta de nível e o seu controle, foi atingido e todas as simulações corresponderam ao resultado esperado.

## CONCLUSÃO TRABALHOS FUTUROS

Esse Trabalho de Conclusão de Curso foi um excelente exercício profissional, pois exigiu o desenvolvimento de habilidades que terei que ter quando estiver no mercado de trabalho. Tive que buscar a resolução de problemas, pensando em um resultado final, fazendo com que procurasse de todas as maneiras alguma forma para suas resoluções. Desenvolvi um pensamento crítico sobre como agir em situações onde não se vê solução para os problemas e amadureci muito com isso. Apliquei conhecimentos estudados durante todo curso e pelo árduo trabalho desenvolvido tive a satisfação de conseguir obter o objetivo final.

A área de sistemas supervisórios é uma ampla área de conhecimento na automação e merece atenção especial porque as empresas de ponta fazem o uso dessa incrível ferramenta para o controle e monitoramento da produção. Apesar de haver muitos fabricantes, o entendimento de um software supervisório é de grande valia, pois o princípio básico de funcionamento entre eles não se diferencia muito.

Uma sugestão para um trabalho futuro seria a criação de um supervisório para a planta de nível que invés de controlar - lá usando um controlador PID, usasse um controlador *fuzzy*, pois o *LabView* possui ferramentas para esse tipo de controle.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIRRE, L. A. **Enciclopédia de Automação / Controle e Automação**. v. II. São Paulo: BLUCHER, 2007.

BEGA, E. A. et al. **Instrumentação Industrial**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2006.

CLP COM IHM INCORPORADA PROGRAMA APLICATIVO - Feira de Santana. Disponível em: <[http://www.quebarato.com.br/clp-com-ihm-incorporada-programa-aplicativo\\_\\_D47FA.html](http://www.quebarato.com.br/clp-com-ihm-incorporada-programa-aplicativo__D47FA.html)>. Acesso em: 18 mai. 2011.

DORF, R. C. & BISHOP, R. H. **Sistemas de Controle Moderno**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

DUNIA, R.; DEAN, E. and EDGAR, T. **Introduction to LabVIEW for Control Design & Simulation**. 2009. Disponível em: <<http://www.che.utexas.edu/course/che360/links.html>>. Acesso em: 25 fev. 2011.

FRANCHI, C. M. & CAMARGO, V. L. A. **Controladores Lógicos Programáveis**. São Paulo: Érica, 2008.

MONTGOMERY, E. **Introdução aos Sistemas a Eventos Discretos e à Teoria de Controle Supervisório**. Rio de Janeiro: Alta Books, 2004.

MORAES, C. C. & CASTRUCCI, P. L. **Engenharia de Automação Industrial**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 4 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2007.

## ANEXOS

## ANEXO 1

## Pares de transformadas de Laplace

	$f(t)$	$F(s)$
1	Impulso unitário $\delta(t)$	1
2	Degrau unitário $1(t)$	$\frac{1}{s}$
3	$t$	$\frac{1}{s^2}$
4	$\frac{t^{n-1}}{(n-1)!} \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$	$\frac{1}{s^n}$
5	$t^n \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$	$\frac{n!}{s^{n+1}}$
6	$e^{-at}$	$\frac{1}{s+a}$
7	$te^{-at}$	$\frac{1}{(s+a)^2}$
8	$\frac{1}{(n-1)!} t^{n-1} e^{-at} \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$	$\frac{1}{(s+a)^n}$
9	$t^n e^{-at} \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$	$\frac{n!}{(s+a)^{n+1}}$
10	$\text{sen } \omega t$	$\frac{\omega}{s^2 + \omega^2}$
11	$\text{cos } \omega t$	$\frac{s}{s^2 + \omega^2}$
12	$\text{senh } \omega t$	$\frac{\omega}{s^2 - \omega^2}$
13	$\text{cosh } \omega t$	$\frac{s}{s^2 - \omega^2}$

Fonte: OGATA, 2007, p. 14.

## ANEXO 2

## Pares de transformadas de Laplace

14	$\frac{1}{a}(1 - e^{-at})$	$\frac{1}{s(s+a)}$
15	$\frac{1}{b-a}(e^{-at} - e^{-bt})$	$\frac{1}{(s+a)(s+b)}$
16	$\frac{1}{b-a}(be^{-bt} - ae^{-at})$	$\frac{s}{(s+a)(s+b)}$
17	$\frac{1}{ab}\left[1 + \frac{1}{a-b}(be^{-at} - ae^{-bt})\right]$	$\frac{1}{s(s+a)(s+b)}$
18	$\frac{1}{a^2}(1 - e^{-at} - ate^{-at})$	$\frac{1}{s(s+a)^2}$
19	$\frac{1}{a^2}(at - 1 + e^{-at})$	$\frac{1}{s^2(s+a)}$
20	$e^{-at} \text{sen } \omega t$	$\frac{\omega}{(s+a)^2 + \omega^2}$
21	$e^{-at} \text{cos } \omega t$	$\frac{s+a}{(s+a)^2 + \omega^2}$
22	$\frac{\omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} \text{sen } \omega_n \sqrt{1-\zeta^2} t \quad (0 < \zeta < 1)$	$\frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$
23	$-\frac{1}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} \text{sen}(\omega_n \sqrt{1-\zeta^2} t - \phi)$ $\phi = \text{tg}^{-1} \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}$ $(0 < \zeta < 1, \quad 0 < \phi < \pi/2)$	$\frac{s}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$
24	$1 - \frac{1}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} \text{sen}(\omega_n \sqrt{1-\zeta^2} t + \phi)$ $\phi = \text{tg}^{-1} \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}$ $(0 < \zeta < 1, \quad 0 < \phi < \pi/2)$	$\frac{\omega_n^2}{s(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)}$
25	$1 - \text{cos } \omega t$	$\frac{\omega^2}{s(s^2 + \omega^2)}$
26	$\omega t - \text{sen } \omega t$	$\frac{\omega^3}{s^2(s^2 + \omega^2)}$
27	$\text{sen } \omega t - \omega t \text{cos } \omega t$	$\frac{2\omega^3}{(s^2 + \omega^2)^2}$
28	$\frac{1}{2\omega} t \text{sen } \omega t$	$\frac{s}{(s^2 + \omega^2)^2}$
29	$t \text{cos } \omega t$	$\frac{s^2 - \omega^2}{(s^2 + \omega^2)^2}$
30	$\frac{1}{\omega_2^2 - \omega_1^2} (\text{cos } \omega_1 t - \text{cos } \omega_2 t) \quad (\omega_1^2 \neq \omega_2^2)$	$\frac{s}{(s^2 + \omega_1^2)(s^2 + \omega_2^2)}$
31	$\frac{1}{2\omega} (\text{sen } \omega t + \omega t \text{cos } \omega t)$	$\frac{s^2}{(s^2 + \omega^2)^2}$

Fonte: OGATA, 2007, p. 15.

### ANEXO 3

#### Identification Letters

	FIRST-LETTER (4)		SUCCEEDING-LETTERS (3)		
	MEASURED OR INITIATING VARIABLE	MODIFIER	READOUT OR PASSIVE FUNCTION	OUTPUT FUNCTION	MODIFIER
A	Analysis (5,19)		Alarm		
B	Burner, Combustion		User's Choice (1)	User's Choice (1)	User's Choice (1)
C	User's Choice (1)			Control (13)	
D	User's Choice (1)	Differential (4)			
E	Voltage		Sensor (Primary Element)		
F	Flow Rate	Ratio (Fraction) (4)			
G	User's Choice (1)		Glass, Viewing Device (9)		
H	Hand				High (7, 15, 16)
I	Current (Electrical)		Indicate (10)		
J	Power	Scan (7)			
K	Time, Time Schedule	Time Rate of Change (4, 21)		Control Station (22)	
L	Level		Light (11)		Low (7, 15, 16)
M	User's Choice (1)	Momentary (4)			Middle, Intermediate (7,15)
N	User's Choice (1)		User's Choice (1)	User's Choice (1)	User's Choice (1)
O	User's Choice (1)		Orifice, Restriction		
P	Pressure, Vacuum		Point (Test) Connection		
Q	Quantity	Integrate, Totalize (4)			
R	Radiation		Record (17)		
S	Speed, Frequency	Safety (8)		Switch (13)	
T	Temperature			Transmit (18)	
U	Multivariable (6)		Multifunction (12)	Multifunction (12)	Multifunction (12)
V	Vibration, Mechanical Analysis (19)			Valve, Damper, Louver (13)	
W	Weight, Force		Well		
X	Unclassified (2)	X Axis	Unclassified (2)	Unclassified (2)	Unclassified (2)
Y	Event, State or Presence (20)	Y Axis		Relay, Compute, Convert (13, 14, 18)	
Z	Position, Dimension	Z Axis		Driver, Actuator, Unclassified Final Control Element	

NOTE: Numbers in parentheses refer to specific explanatory notes in [Section 5.1](#).

Fonte: Tabela de Letters ISA\_5.1-1984 (R1992), p. 21.

## ANEXO 4

### Instrument line symbols

(1) INSTRUMENT SUPPLY * OR CONNECTION TO PROCESS	
(2) UNDEFINED SIGNAL	
(3) PNEUMATIC SIGNAL **	
(4) ELECTRIC SIGNAL	
(5) HYDRAULIC SIGNAL	
(6) CAPILLARY TUBE	
(7) ELECTROMAGNETIC OR SONIC SIGNAL *** (GUIDED)	
(8) ELECTROMAGNETIC OR SONIC SIGNAL *** (NOT GUIDED)	
(9) INTERNAL SYSTEM LINK (SOFTWARE OR DATA LINK)	
(10) MECHANICAL LINK	
<u>OPTIONAL BINARY ( ON-OFF ) SYMBOLS</u>	
(11) PNEUMATIC BINARY SIGNAL	
(12) ELECTRIC BINARY SIGNAL	

NOTE: 'OR' means user's choice. Consistency is recommended.

\* The following abbreviations are suggested to denote the types of power supply. These designations may also be applied to purge fluid supplies.

AS - Air Supply	} Options	HS - Hydraulic Supply
IA - Instrument Air		NS - Nitrogen Supply
PA - Plant Air		SS - Steam Supply
ES - Electric Supply		WS - Water Supply
GS - Gas Supply		

The supply level may be added to the instrument supply line, e.g., AS-100, a 100-psig air supply; ES-24DC, a 24-volt direct current power supply.

\*\* The pneumatic signal symbol applies to a signal using any gas as the signal medium. If a gas other than air is used, the gas may be identified by a note on the signal symbol or otherwise.

\*\*\* Electromagnetic phenomena include heat, radio waves, nuclear radiation, and light.

Fonte: Tabela de Letters ISA\_5.1-1984 (R1992), p. 28.

## ANEXO 5

## General instrument or function symbols

	PRIMARY LOCATION ***NORMALLY ACCESSIBLE TO OPERATOR	FIELD MOUNTED	AUXILIARY LOCATION ***NORMALLY ACCESSIBLE TO OPERATOR
DISCRETE INSTRUMENTS	1 *  IP1**	2 	3 
SHARED DISPLAY, SHARED CONTROL	4 	5 	6 
COMPUTER FUNCTION	7 	8 	9 
PROGRAMMABLE LOGIC CONTROL	10 	11 	12 

\* Symbol size may vary according to the user's needs and the type of document. A suggested square and circle size for large diagrams is shown above. Consistency is recommended.

\*\* Abbreviations of the user's choice such as IP1 (Instrument Panel #1), IC2 (Instrument Console #2), CC3 (Computer Console #3), etc., may be used when it is necessary to specify instrument or function location.

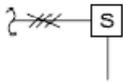
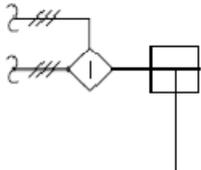
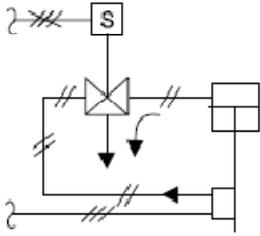
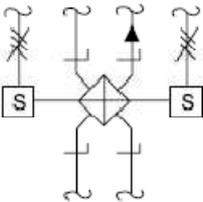
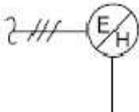
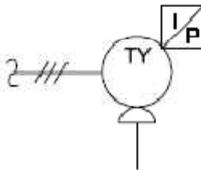
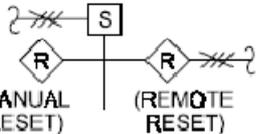
\*\*\* Normally inaccessible or behind-the-panel devices or functions may be depicted by using the same symbol but with dashed horizontal bars, i.e.



Fonte: Tabela de Letters ISA\_5.1-1984 (R1992), p. 29.

## ANEXO 6

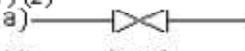
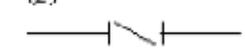
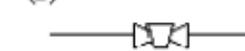
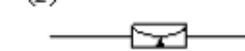
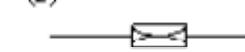
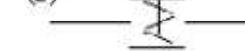
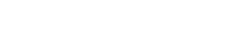
## Símbolos de atuadores

<p>11</p>  <p><b>SOLENOID</b></p>	<p>12</p>  <p><b>PREFERRED ALTERNATIVE. A BUBBLE WITH INSTRUMENT TAGGING, E.G., TY-I, MAY BE USED INSTEAD OF THE INTERLOCK SYMBOL</b></p>  <p><b>CYLINDER WITH POSITIONER AND OVERRIDING PILOT VALVE</b></p>	<p>13</p>  <p><b>SINGLE-ACTING CYLINDER (IMPLIED I/P)</b></p>
<p>14</p>  <p><b>DUAL SOLENOIDS SWITCHING 4-WAY HYDRAULIC VALVE</b></p>	<p>15</p>  <p><b>ELECTROHYDRAULIC</b></p>	<p>16</p>  <p><b>VALVE ACTUATOR WITH ATTACHED ELECTRO-PNEUMATIC CONVERTER</b></p>
<p>17</p>  <p><b>LATCH-TYPE ACTUATOR WITH RESET (SHOWN TYPICALLY FOR SOLENOID ACTUATOR AND TYPICALLY WITH ELECTRIC SIGNAL FOR REMOTE RESET, WITH MANUAL RESET ALTERNATIVE)</b></p>	<p>18</p>  <p><b>FOR PRESSURE RELIEF OR SAFETY VALVES ONLY; DENOTES A SPRING, WEIGHT, OR INTEGRAL PILOT</b></p>	<p>19</p>  <p><b>HAND ACTUATOR OR HANDWHEEL</b></p>

Fonte: Actuator symbols ISA\_5.1-1984 (R1992), p. 33.

## ANEXO 7

## Válvulas

No	Símbolo (1)	Descrição
1	(1) (2) a)  b) 	Válvula de duas vias genérica. Válvula globo direta. Válvula gaveta.
2	(2) 	Válvula ângulo de duas vias genérica. Válvula globo ângulo.
3	(2) 	Válvula de três vias genérica. Válvula globo de três vias. Setas indicam caminho de falha ou vazão não atuada.
4	(2) 	Válvula de três vias genérica. Válvula plug ou esfera com quatro vias. Setas indicam caminho de falha ou vazão não atuada.
5	(2) 	Válvula borboleta
6	(2) 	Válvula esfera.
7	(2) 	Válvula plug
8	(2) 	Válvula com disco rotativo excêntrico.
9	(2) 	Válvula diafragma.
10	(2)	Válvula diafragma.
11	(2)	Válvula pinch.
12	(2)	Válvula com foles selados.
13	(2)	Damper genérico. Basculante genérico
14	(2)	Damper com lâminas paralelas. Basculante com lâminas paralelas
15	(2)	Damper com lâminas opostas. Basculante com lâminas opostas

Fonte: Tabela de Letters ISA\_5.1-1984 (R1992), p. 37.

## ANEXO 8

### Especificações do sensor da planta de Nível

ZÜRICH PSI.420

---

• Transmissor de Pressão Industrial

O PSI.420 é um transmissor de alta performance, seu sensor é totalmente em aço inox AISI 316/304. Compatível com a grande parte dos fluidos industriais em processos pneumáticos, hidráulicos, gases corrosivos. A eletrônica microcontrolada, garante precisão e durabilidade aliada a um sensor Piezorresistivo, onde as técnicas de fabricação são as mais atuais.

**Características:**

- Grau de proteção do Invólucro IP-65 (opcional IP-68 prensa capa)
- Material do Invólucro aço inox AISI 304 (316 opcional)
- Faixa: de vácuo a 1600 Bar
- Vedações anéis O'ring, borracha nitrílica
- Conector DIN 43660
- Tipo de Sensor Piezorresistivo
- Sobrepressão (em pico) 1 x Fundo de escala (para especificar)
- Sinal de Saída 4 - 20mA
- Precisão do Sinal 0,1%
- Resolução da Saída Analógica Infinita
- Temperatura do Fluido -10 +80°C (opcional até 400°C)
- Temperatura do Invólucro 55°C
- Zero e Span Ajustáveis 20% F.E. (Per PUSH BUTTON)
- Ajuste de 0,01mA por pulso
- Vida Útil 70 x 10<sup>6</sup>
- Precisão, Histerese, Repetibilidade, Linearidade 0,25% F.E. (Opcional: 0,05% F.E. ou 0,1% F.E.)
- Alimentação 9 a 30 Vcc
- Proteção total contra a rádio frequência (RF) e inversão de polaridade

**Aplicações**

Processos: Hidráulicos, Pneumáticos, Líquidos e Gases corrosivos ou não

1

ZÜRICH PSI.420 REF. 01.00

Fonte: Planta Didacta.