

CONTROLE DE PROCESSOS INDUSTRIAIS

Estratégias convencionais

CLAUDIO GARCIA

VOLUME 1

Blucher

Claudio Garcia

CONTROLE DE PROCESSOS INDUSTRIAIS

VOLUME 1 – ESTRATÉGIAS CONVENCIONAIS

Controle de processos industriais – volume 1: estratégias convencionais

© 2017 Claudio Garcia

Editora Edgard Blücher Ltda.

Blucher

Rua Pedroso Alvarenga, 1245, 4º andar
04531-934 – São Paulo – SP – Brasil
Tel.: 55 11 3078-5366
contato@blucher.com.br
www.blucher.com.br

Segundo Novo Acordo Ortográfico, conforme
5. ed. do *Vocabulário Ortográfico da Língua
Portuguesa*, Academia Brasileira de Letras,
março de 2009.

É proibida a reprodução total ou parcial por
quaisquer meios sem autorização escrita da
editora.

Todos os direitos reservados pela Editora
Edgard Blücher Ltda.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Angélica Ilacqua CRB-8/7057

Garcia, Claudio
Controle de processos industriais : volume 1 :
estratégias convencionais / Claudio Garcia. – São Paulo :
Blucher, 2017.
600 p. : il.

Bibliografia
ISBN 978-85-212-1185-3

1. Automação industrial 2. Processos de fabricação 3.
Controle de processo I. Título.

17-0510

CDD 681.7

Índice para catálogo sistemático:
1. Automação industrial : controle de processo

CONTEÚDO

PARTE I – INTRODUÇÃO E CONTROLE POR REALIMENTAÇÃO	19
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO E DEFINIÇÕES GERAIS	21
1.1 Áreas em que se aplicam técnicas de automação e controle	21
1.2 Definições relativas a controle de processos	22
1.2.1 Indústrias de processo	22
1.2.2 Controle automático	23
1.2.3 Controle de processos.....	23
1.2.4 Objetivos do controle automático de processos.....	24
1.2.5 Distinção entre controle de processos e controle de servomecanismos	25
1.2.6 Tipos de processos industriais	25
1.2.7 Tipos de controle	26
1.2.8 Controlador	27
1.3 Evolução histórica dos sistemas de controle de processos	28
1.3.1 Instrumentação analógica.....	28
1.3.2 Instrumentação digital	30

1.3.3	Resumo dos eventos mais importantes na evolução do controle de processos	40
	Referências	41
CAPÍTULO 2 – A MALHA DE CONTROLE POR REALIMENTAÇÃO		43
2.1	Controle por realimentação (<i>feedback</i>).....	44
2.1.1	Representação de malhas de controle por realimentação	45
2.1.2	Nomenclatura clássica utilizada em malhas de controle por realimentação	49
2.1.3	Funções de transferência de malhas fechadas típicas de controle de processos	51
2.2	Realimentação negativa	52
2.2.1	Exemplo de análise de realimentação negativa em uma malha de controle.....	54
2.2.2	Ensaio de malha de controle de trocador de calor com realimentações negativa e positiva.....	55
	Referências	60

PARTE II – EMBASAMENTO TEÓRICO SOBRE CONTROLE DE PROCESSOS.. 61

CAPÍTULO 3 – OBTENÇÃO DE MODELOS APROXIMADOS DE PROCESSOS INDUSTRIAIS		63
3.1	Seleção do método mais adequado para a modelagem empírica	63
3.2	Elementos característicos de modelos aproximados de processos industriais....	65
3.2.1	Elemento ganho	65
3.2.2	Elemento integrador	66
3.2.3	Elemento atraso de transferência ou sistema de primeira ordem.....	69
3.2.4	Elemento atraso de transporte ou tempo morto.....	82
3.2.5	Elemento oscilador amortecido.....	84
3.2.6	Sistema avanço/atraso (<i>lead/lag</i>)	87

3.2.7	Resumo dos elementos característicos que constituem os processos industriais	90
3.3	Sistemas bicapacitivos e multicapacitivos	91
3.3.1	Sistemas bicapacitivos sem interação	92
3.3.2	Sistemas bicapacitivos com interação	99
3.3.3	Resposta analítica ao degrau de sistemas de segunda ordem	105
3.3.4	Parâmetros que caracterizam sistemas de segunda ordem subamortecidos	107
3.3.5	Sistemas de ordem elevada ou multicapacitivos	111
3.4	Modelagem aproximada típica de processos industriais	115
3.5	Técnicas de estimação de modelos aproximados de baixa ordem a partir da curva de reação do processo	117
3.5.1	Estimação dos parâmetros de processos de segunda ordem superamortecidos	117
3.5.2	Aproximação de sistemas superamortecidos de segunda ordem ou superior por atraso de transferência mais tempo morto	129
3.6	Exemplos de obtenção de modelos de baixa ordem a partir da curva de reação do processo	134
3.6.1	Modelo aproximado de sistema de primeira ordem com tempo morto	134
3.6.2	Sistema superamortecido de segunda ordem ou superior aproximado por modelo de primeira ordem com tempo morto	135
3.6.3	Modelo aproximado de sistema de segunda ordem subamortecido ...	139
3.6.4	Modelo aproximado de sistema de segunda ordem superamortecido – caso 1	144
3.6.5	Modelo aproximado de sistema de segunda ordem superamortecido – caso 2	149
3.6.6	Modelo aproximado de sistema de segunda ordem superamortecido – caso 3	150
3.6.7	Modelo aproximado de processo integrador	154
3.7	Procedimento simplificado de teste de um processo	157

3.7.1 Exemplo de aplicação do procedimento simplificado de teste de um processo.....	158
Referências	160

CAPÍTULO 4 – ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE SISTEMAS DE CONTROLE161

4.1 Estabilidades absoluta e relativa	161
4.1.1 Estabilidade absoluta	161
4.1.2 Exemplo da análise de estabilidade absoluta empregando-se especificações no domínio da frequência.....	162
4.1.3 Estabilidade relativa.....	165
4.1.4 Exemplo de análise de estabilidade relativa empregando-se especificações no domínio da frequência.....	167
4.2 Processos autorregulados e não autorregulados.....	172
4.2.1 Processo não autorregulado	172
4.2.2 Exemplo da análise de estabilidade de um processo não autorregulado	174
4.2.3 Processo autorregulado.....	180
4.2.4 Exemplo da análise de estabilidade de um processo autorregulado.....	183
4.3 Origem das oscilações contínuas em um sistema de controle.....	187
4.4 Análise de estabilidade de sistemas de primeira, segunda e terceira ordem	194
4.5 Efeito do tempo morto na estabilidade de um sistema	199
4.5.1 Exemplo de análise de estabilidade de processo constituído por ganho mais tempo morto	201
4.5.2 Diagrama de Nyquist de processos de primeira ordem e com tempo morto.....	210
4.5.3 Aproximações para o cálculo do tempo morto.....	211
4.5.4 Análise de estabilidade de sistema com tempo morto via aproximação de Padé.....	213
4.6 Exemplos de análise de estabilidade absoluta.....	216

4.6.1	Exemplo da análise de estabilidade de uma malha de controle a partir da curva de reação do processo.....	216
4.6.2	Exemplo da análise de estabilidade de uma malha de controle de um trocador de calor – caso 1.....	219
4.6.3	Exemplo da análise de estabilidade de uma malha de controle de um trocador de calor – caso 2.....	227
4.6.4	Exemplo da análise de estabilidade de uma malha de controle de um processo térmico	235
Referências		248

CAPÍTULO 5 – CRITÉRIOS DE ANÁLISE DE DESEMPENHO DE SISTEMAS DE CONTROLE249

5.1	Critérios de avaliação do comportamento de sistemas em regime transitório	251
5.2	Análise do erro em regime permanente	251
5.2.1	Exemplo de análise de erro em regime permanente em uma malha de controle de temperatura de um aquecedor – caso 1.....	253
5.2.2	Exemplo de análise de erro em regime permanente em uma malha de controle de temperatura de um aquecedor – caso 2.....	254
5.2.3	Exemplo de análise de erro em regime permanente em uma malha de controle de nível em tanque	260
5.2.4	Exemplo da análise de erro em regime permanente em uma malha de controle de temperatura de um trocador de calor – caso 1	269
5.2.5	Exemplo de análise de erro em regime permanente em uma malha de controle de temperatura de um trocador de calor – caso 2	270
5.2.6	Exemplo de análise de erro em regime permanente e de resposta transitória em uma malha de controle	275
5.3	Critérios de comparação de desempenho de sistemas de controle	278
5.3.1	Exemplo de utilização dos critérios de comparação de desempenho de malhas de controle	279
5.4	Variabilidade da malha de controle	287
5.5	Análise de desempenho e auditoria em malhas de controle.....	288
5.5.1	Desempenho de malhas de controle	290

5.5.2	Avaliação de desempenho de malhas de controle	292
5.5.3	Evolução histórica dos métodos de avaliação de desempenho de malhas de controle	293
5.5.4	Índices usados na análise de desempenho de malhas de controle....	294
5.5.5	Auditoria em malhas de controle	298
	Referências	300

PARTE III – CONTROLADORES *ON/OFF* E PID303

CAPÍTULO 6 – CONTROLE DO TIPO *ON/OFF*.....305

6.1	Controle <i>on/off</i>	305
6.2	Controle <i>on/off</i> com zona morta.....	309
6.3	Controle de três zonas ou de três estados	314

CAPÍTULO 7 – O CONTROLADOR PID ANALÓGICO321

7.1	Modo proporcional	323
7.1.1	Análise do modo proporcional em malha aberta	323
7.1.2	Exemplos de aplicação de controlador proporcional em malha aberta.....	327
7.1.3	Análise do modo proporcional em malha fechada	331
7.1.4	Efeito do ganho proporcional do controlador no erro em regime permanente	335
7.1.5	Exemplo de atuação de controle P em malha fechada com ganho fixo	337
7.1.6	Exemplo de atuação de controle proporcional em processo com tempo morto.....	338
7.1.7	Exemplo de atuação de controle proporcional em malha fechada conforme se varia o ganho.....	339
7.1.8	Exemplo de eliminação do erro estacionário por alteração no <i>manual reset</i>	341
7.1.9	Implementação de controlador proporcional analógico.....	343

7.2	Modo integral.....	343
7.2.1	Definição do parâmetro que caracteriza o modo integral	344
7.2.2	Exemplo de atuação de um controlador PI operando em malha aberta.....	345
7.2.3	Exemplo de cálculo dos parâmetros de sintonia de um controlador PI operando em malha aberta	346
7.2.4	Análise em frequência de controlador PI operando em malha aberta.....	348
7.2.5	Exemplo de atuação de controladores I e PI operando em malha fechada	352
7.2.6	Análise do comportamento do controlador PI operando em malha fechada.....	354
7.2.7	Efeito da ação integral sobre o erro em regime permanente	356
7.2.8	Exemplos do efeito do modo integral sobre o erro em regime permanente	358
7.2.9	Comparação do comportamento de controladores P, I e PI em malha fechada.....	360
7.2.10	Vantagens e inconvenientes do modo integral.....	362
7.2.11	Saturação do modo integral e técnicas <i>anti-reset windup</i>	362
7.2.12	Exemplo de aplicação de técnicas de antissaturação do modo integral.....	366
7.2.13	Implementação de controlador PI analógico	370
7.3	Modo derivativo.....	371
7.3.1	Definição do parâmetro que caracteriza o modo derivativo.....	371
7.3.2	Exemplo de aplicação de controlador PD operando em malha aberta.....	372
7.3.3	Análise em frequência de controlador PD operando em malha aberta.....	373
7.3.4	Análise do comportamento do controlador PD operando em malha fechada.....	377
7.3.5	Vantagens e inconvenientes do modo derivativo	378

7.3.6	Implementação de controlador PD analógico.....	378
7.4	Algoritmo PID analógico.....	379
7.4.1	Análise em frequência de controlador PID operando em malha aberta.....	380
7.4.2	Vantagens e desvantagens de cada um dos modos do controlador PID.....	382
7.4.3	Vantagens e inconvenientes de se adicionar o modo D a controladores PI.....	389
7.4.4	Implementação de controlador PID analógico.....	392
7.4.5	Variantes do controlador PID analógico tradicional.....	393
7.5	Versões melhoradas do controlador PID analógico.....	398
7.5.1	Algoritmo PID com dois graus de liberdade – PID-2DoF.....	398
7.5.2	Algoritmo PI-PD	401
7.6	Seleção dos modos de controle segundo a aplicação	403
7.6.1	Ações de controle comumente usadas nas principais variáveis de processos industriais.....	404
7.7	Transferência auto/manual (A/M) e manual/automática (M/A).....	407
7.8	Tipos de saída de controladores PID	407
	Referências	408

CAPÍTULO 8 – PROJETO E SINTONIA DE CONTROLADORES PID

ANALÓGICOS409

8.1	O que se busca ao sintonizar um controlador.....	409
8.1.1	CrITÉRIOS de desempenho desejáveis da malha de controle	409
8.1.2	Efeitos na malha de controle de cada um dos três parâmetros de sintonia de um controlador PID	410
8.1.3	CrITÉRIOS normalmente empregados para avaliar o desempenho da sintonia de um controlador.....	411
8.2	Projeto e sintonia de controladores PID.....	412
8.2.1	Sintonia de controladores PID por tentativa e erro	413
8.2.2	Método das oscilações contínuas ou mantidas de Ziegler e Nichols..	416

8.2.3	Método da curva de reação do processo de Ziegler e Nichols	421
8.2.4	Relação entre ganho limite e período limite e os parâmetros de um processo de primeira ordem com tempo morto	424
8.2.5	Método CHR.....	427
8.2.6	Método de Cohen-Coon	428
8.2.7	Método 3C	428
8.2.8	Relações de sintonia baseadas em critérios de erro integrado.....	429
8.2.9	PID modificado com ponderação no valor desejado na ação P	431
8.2.10	Método da curva de reação do processo de Åström e Hägglund	435
8.2.11	Método das oscilações contínuas de Åström e Hägglund.....	437
8.2.12	Método da síntese direta ou sintonia lambda	438
8.2.13	Controle por modelo interno (IMC – <i>internal model control</i>).....	446
8.2.14	Comentários acerca dos métodos da síntese direta e IMC.....	453
8.2.15	Controle por modelo interno simples (SIMC – <i>simple internal model control</i>).....	453
8.2.16	Sintonia de controladores para processos integradores.....	458
8.2.17	Sintonia de controladores PID com 2 graus de liberdade (PID-2DoF) ...	462
8.2.18	Sintonia de controladores PI-PD	465
8.3	Exemplos de aplicação dos métodos de projeto e sintonia de controladores PID.....	467
8.3.1	Exemplo de diferentes sintonias aplicadas ao modelo de um trocador de calor	467
8.3.2	Exemplo de ajuste usando métodos da curva de reação do Processo de Z-N, síntese direta e SIMC aplicados para controlar um trocador de calor	472
8.3.3	Exemplo de ajuste com métodos de Cohen-Coon e ITAE para controlar um CSTR	475
8.3.4	Exemplo de controlador sintonizado pelos métodos CHR e das oscilações contínuas de Ziegler-Nichols.....	478
8.3.5	Exemplo de ajuste usando métodos da síntese direta e IMC aplicados para controlar uma caldeira.....	483

8.3.6	Exemplo de sintonia de controlador PID incluindo análise de estabilidade e verificação do erro em regime permanente	486
8.3.7	Exemplo de sintonia de controlador PID aplicando os métodos da curva de reação do processo e de Ziegler-Nichols e Åström-Hägglund	501
8.3.8	Exemplo de sintonia de controlador PID aplicado a processo integrador	504
8.4	Métodos de sintonia automática de controladores PID.....	510
8.4.1	Método da realimentação por relé de Åström e Hägglund	511
8.4.2	Exemplo de aplicação das técnicas de autossintonia de controladores PID	517
8.5	Recomendações sobre a sintonia de controladores PID	521
8.6	Comparação entre os métodos de sintonia de controladores PID.....	521
	Referências	522

PARTE IV – APLICAÇÃO DE DIFERENTES CONTROLADORES EM UM TROCADOR DE CALOR525

CAPÍTULO 9 – EXEMPLO DE APLICAÇÃO DE DIFERENTES CONTROLADORES EM UM TROCADOR DE CALOR527

9.1	APRESENTAÇÃO DOS DADOS DO TROCADOR DE CALOR.....	527
9.1.1	Dados das variáveis de entrada	528
9.1.2	Características do sensor mais transmissor de temperatura (TE + TT)	529
9.1.3	Características do conversor I/P mais válvula de controle (TX + TV)	529
9.2	Modelagem matemática do sistema completo.....	529
9.2.1	Modelagem do trocador de calor	529
9.2.2	Modelagem da transmissão do sinal de temperatura medida	530
9.2.3	Modelagem do conjunto conversor I/P + válvula de controle	530
9.2.4	Definição das condições iniciais.....	532
9.2.5	Modelo do sistema implementado na plataforma Matlab/Simulink....	532
9.3	Simulações realizadas em malha aberta	535

9.3.1	Influência da saída do controlador e das variáveis de perturbação na variável medida	535
9.3.2	Análise da ação da planta mais sua instrumentação	537
9.3.3	Geração de modelos aproximados de baixa ordem do processo	538
9.4	Simulações realizadas em malha fechada para obter parâmetros para realizar sintonias	542
9.4.1	Processo levado ao limiar da estabilidade usando um controlador P...	543
9.4.2	Emprego do método de realimentação por relé.....	546
9.5	Simulações realizadas com diferentes controladores	547
9.5.1	Testes de controladores <i>on/off</i> e <i>on/off</i> com zona morta.....	547
9.5.2	Testes de controlador P com diferentes sintonias	551
9.5.3	Testes de controlador PI com diferentes sintonias	553
9.5.4	Testes de controlador PD com diferentes sintonias	564
9.5.5	Testes de controlador PID com diferentes sintonias.....	571
9.5.6	Testes de controlador PID-2DoF.....	580
9.5.7	Testes de controlador PI-PD.....	582
9.6	Comparação do desempenho dos controladores e sintonias testados neste capítulo.....	584
	Referências.....	586

APÊNDICE – SIMBOLOGIA E NOMENCLATURA USADAS EM INSTRUMENTAÇÃO INDUSTRIAL.....587

Referências	599
-------------------	-----

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO E DEFINIÇÕES GERAIS

Este capítulo visa conceituar o que é controle de processos, mostrar a evolução histórica dos sistemas industriais de controle e apresentar um panorama das técnicas de controle existentes e sua aplicação em processos industriais.

1.1 ÁREAS EM QUE SE APLICAM TÉCNICAS DE AUTOMAÇÃO E CONTROLE

Apresentam-se, a seguir, as áreas em que se aplicam técnicas de automação e controle. Percebe-se que o controle de processos industriais corresponde a uma delas.

a) Controle de processos industriais:

- química e petroquímica;
- papel e celulose;
- alimentícia e farmacêutica;
- siderúrgica e metalúrgica;
- naval (propulsão);
- mineração e cimento;
- têxtil;
- tratamento de água e efluentes;
- nuclear.

b) Manufatura:

- montadoras de automóveis;

- fabricantes de equipamentos eletroeletrônicos;
 - envasamento e embalagem de produtos.
- c) Sistemas elétricos:
- geração e distribuição de energia elétrica;
 - controle de motores e geradores.
- d) Sistemas de transporte:
- controle de tráfego aéreo;
 - controle de tráfego ferroviário;
 - controle de tráfego metroviário.
- e) Controle embarcado:
- aviões, foguetes e mísseis;
 - automóveis, trens e metrô;
 - embarcações de superfície e submersíveis.
- f) Automação de serviços:
- automação predial/*shopping centers*;
 - automação bancária e de escritórios;
 - automação de supermercados;
 - automação hospitalar.

1.2 DEFINIÇÕES RELATIVAS A CONTROLE DE PROCESSOS

Nesta seção, são apresentados conceitos relativos ao controle de processos.

1.2.1 INDÚSTRIAS DE PROCESSO

Seu esquema básico é mostrado na Figura 1.1. São indústrias que lidam com fluidos (ou sólidos fluidizados). Nelas, as principais variáveis de processo são: pressão, vazão, temperatura, nível, densidade, pH, condutividade, peso, variáveis analíticas (composição) etc. Exemplos de indústrias de processo são citados na alínea “a” da Seção 1.1.



Figura 1.1 – Esquema básico de uma indústria de processo.

1.2.2 CONTROLE AUTOMÁTICO

O modo de continuamente manter certas variáveis físicas ou químicas de um processo nos valores desejados, sem ação humana direta, é intitulado controle automático, que pode ser definido como a técnica de balancear o fornecimento de matéria ou energia em função da demanda, ao longo do tempo, a fim de manter o processo em alguma condição de operação predefinida. O controle automático visa manter certas condições que assegurem o funcionamento adequado e seguro do processo e a consequente obtenção de produtos dentro das especificações qualitativas e quantitativas desejadas.

Destaca-se, a seguir, a diferença entre controle automático e automação. No controle automático, cada malha atua independentemente das demais, obedecendo a valores impostos pelo homem ou por um mecanismo programador. A automação, por outro lado, concentra em um único processador de dados (computador) as informações concernentes a todas as malhas de controle, criando um sistema de alta complexidade, o qual interpreta e processa todos os dados recebidos e gera sinais de saída, visando à otimização do processo industrial e, conseqüentemente, ao aumento da produção.

1.2.3 CONTROLE DE PROCESSOS

O controle automático aplicado às indústrias de processo é intitulado controle de processos. Controlar um processo é fazer com que suas variáveis interajam de modo ordenado, mantendo-as o mais próximo possível de valores considerados ideais, diuturnamente. Saber quando, como e quanto mudar o valor de uma variável para obter uma melhor resposta do sistema constitui o problema central de uma estratégia de controle.

Todo sistema de controle tem uma variável controlada (que é medida via sensor-transmissor), uma variável manipulada (sobre a qual se atua por meio do elemento final de controle), além do controlador. Na Figura 1.2, vê-se uma malha típica de controle.

Na Figura 1.2, TE-01 e TT-01 representam o par sensor-transmissor, TIC-01 é o controlador e TY-01 e TV-01 correspondem ao sistema de atuação, composto por um conversor I/P (corrente para pressão) e uma válvula de controle pneumática. A simbologia e a nomenclatura padrão ISA empregadas são apresentadas no Apêndice – Simbologia e nomenclatura usadas em instrumentação industrial.

Conhecer a instrumentação industrial é essencial para o controle de processos. Traçando-se uma analogia entre a malha de controle e o corpo humano, o controle equivale à mente (inteligência), enquanto a instrumentação atua como sistema nervoso e muscular, coletando e enviando as informações das variáveis controladas para o sistema de controle e respondendo aos comandos deste último, agindo sobre as variáveis manipuladas. Já o sistema computacional corresponde aos equipamentos e *softwares* básicos usados para que o *software* aplicativo (algoritmos de controle) possa ser executado. Nesse caso, na analogia com o corpo humano, o sistema computacional equivale ao cérebro.

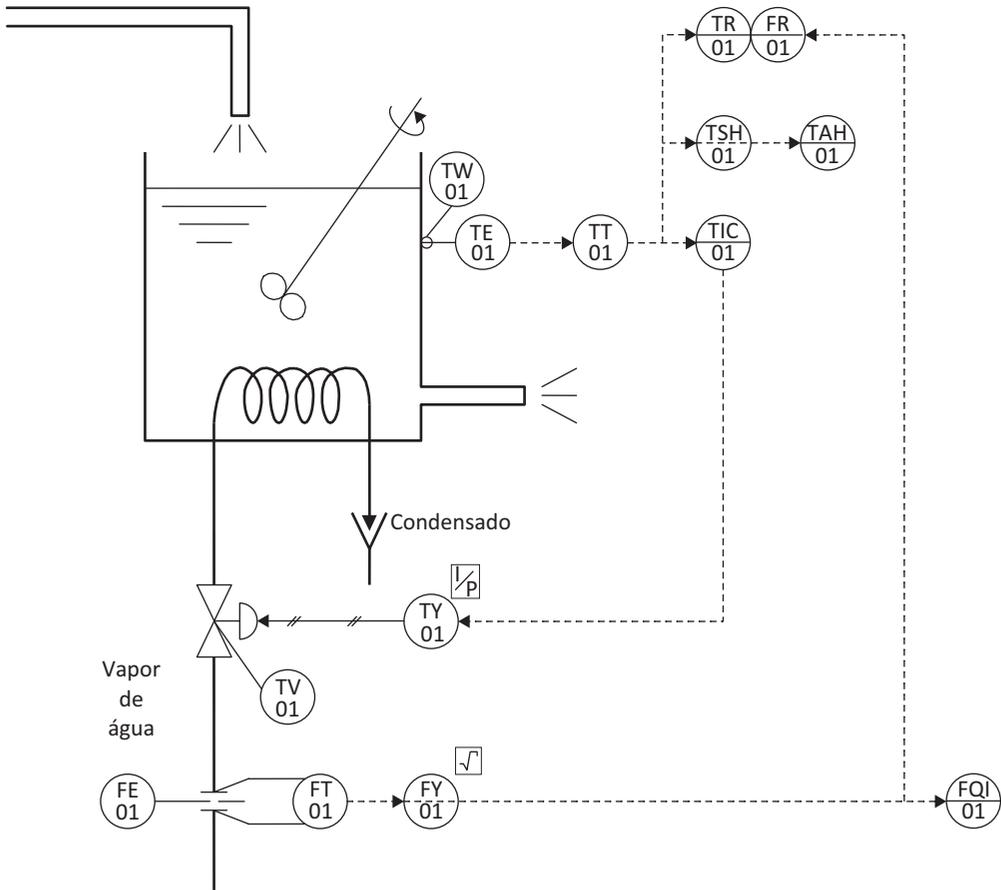


Figura 1.2 – Sistema típico de controle.

1.2.4 OBJETIVOS DO CONTROLE AUTOMÁTICO DE PROCESSOS

O objetivo do controle de processos é que todo produto fabricado siga certas especificações, baseadas em critérios de qualidade e uniformidade. Para tal, é preciso que as condições do processo sejam mantidas o mais próximo possível do que foi definido como ideal. Como a atuação humana é sujeita a erros ou distrações, conclui-se que o controle automático, que continuamente mantém a variável controlada próxima a um valor desejado (ou *set point*), é a melhor solução para manter os mais rígidos padrões de qualidade. O controle automático também propicia o aumento dos rendimentos operacionais, pois, como os padrões de qualidade são mantidos dentro do especificado, a quantidade de material rejeitado diminui, economizando, assim, matéria-prima, mão de obra e energia.

O controle automático de processos industriais mudou o relacionamento do homem com o processo, liberando-o de tarefas sistemáticas, repetitivas e sem interesse intelectual para tarefas mais nobres, nas quais ele pode desenvolver sua imaginação e sua criatividade.

O principal objetivo do controle automático é manter, ao longo do tempo, a variável controlada o mais próximo possível do valor desejado. Como os processos industriais usualmente operam continuamente, suas variáveis controladas tendem a se afastar dos *set points*, pelo efeito de perturbações no processo ou por mudanças no valor desejado. Assim, o controle automático deve realizar duas tarefas básicas:

- a) fazer a variável controlada acompanhar variações no valor desejado o mais de perto possível. Nesse caso, diz-se que o controlador está operando no **modo servo**;
- b) minimizar os efeitos de distúrbios externos, buscando sempre manter a variável controlada o mais próximo possível do valor desejado, rejeitando assim as perturbações. Nesse caso, diz-se que o controlador está operando no **modo regulatório**.

1.2.5 DISTINÇÃO ENTRE CONTROLE DE PROCESSOS E CONTROLE DE SERVOMECANISMOS

Ambos se baseiam no princípio da realimentação. Geralmente, o controle de processos é do tipo regulatório, visando manter a saída do processo (variável controlada) próxima ao valor desejado, o qual é constante ou varia lentamente no tempo. Os sistemas de controle de processo são projetados para minimizar os efeitos de perturbações (variações de carga) no sistema, buscando manter a saída do processo o mais próximo possível do *set point*. As variáveis de processo que normalmente se controla são pressão, temperatura, nível, vazão, densidade, pH etc. Por outro lado, os servomecanismos são projetados para fazer com que a saída do sistema siga fielmente as mudanças no valor de referência. Nos servomecanismos, a variável controlada é normalmente uma posição mecânica ou suas derivadas no tempo, como velocidade ou aceleração.

Por exemplo, para um chuveiro elétrico residencial, no qual se deseja manter a temperatura da água quente constante, tem-se um típico sistema de controle de processo, ao passo que o sistema de comando do leme de um navio é um exemplo clássico de um servomecanismo, pois as variações de direção impostas ao timão são amplificadas de modo a permitir o posicionamento correto do leme com um mínimo de esforço do piloto.

1.2.6 TIPOS DE PROCESSOS INDUSTRIAIS

Pode-se dividir os processos industriais nos seguintes tipos:

- processos contínuos: envolvem fluidos ou sólidos fluidizados;
- processos batelada (*batch*): são processos contínuos, mas que operam apenas por algum tempo, o suficiente para concluir a operação desejada sobre o produto, como ocorre em misturadores, reatores químicos etc. Exemplos são a vulcanização da borracha ou a pasteurização do leite, as quais não são feitas continuamente, mas em lotes;

- processos discretos: envolvem a produção de peças contáveis, como a que ocorre na indústria de manufatura. A montagem de um carro é um processo desse tipo.

1.2.7 TIPOS DE CONTROLE

Há dois tipos básicos de controle: discreto e contínuo. O controle discreto abrange as técnicas de intertravamento e sequenciamento. O controle contínuo divide-se em controle em malha aberta e controle em malha fechada ou automático.

1.2.7.1 Controle em malha aberta

Não se usa a saída para alterar a ação de controle. Corresponde ao controle manual, por exemplo, um aquecedor elétrico para ambientes domésticos, em que o usuário ajusta a posição de um botão; ou a sistemas de controle pré-programados, como os existentes, por exemplo, em uma máquina de lavar, que sempre executa a mesma sequência de operações, independentemente do estado de limpeza da roupa.

1.2.7.2 Controle em malha fechada ou automático

Subdivide-se em três tipos:

- realimentação (*feedback*): compara a saída (variável controlada C) com a entrada R (ponto de ajuste, valor desejado, valor de referência ou *set point*) e atua em função desse desvio, como mostra a Figura 1.3. Nesse caso, primeiro ocorre o desvio, depois a correção, isto é, o sistema só corrige o erro após ele ocorrer.

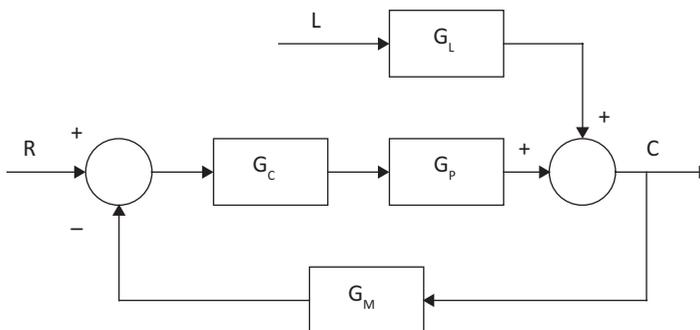


Figura 1.3 – Malha típica de controle por realimentação.

- pré-alimentação (antecipatório ou *feedforward*): executa a correção da variável controlada diretamente, sem medi-la, em função das perturbações realizadas sobre o processo com base em um modelo do processo, conforme apresentado

na Figura 1.4. Nesse caso, o erro é minimizado, pois o sistema de controle se antecipa a ele, exigindo, portanto, conhecimento do comportamento do sistema.

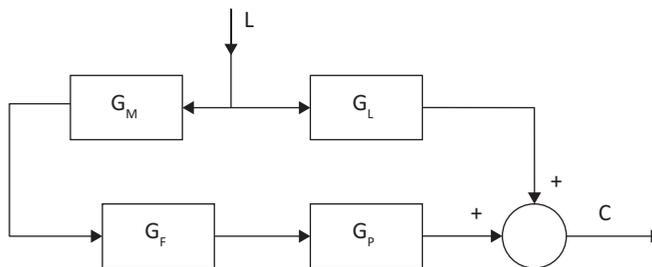


Figura 1.4 – Malha típica de controle por pré-alimentação.

- realimentação + pré-alimentação (*feedback + feedforward*): mistura dos dois, em que o controle por pré-alimentação realiza o controle “grosso”, ao passo que o controle por realimentação realiza o controle “fino”, provendo as eventuais correções para as imprecisões existentes no modelo adotado para o algoritmo *feedforward*.

As principais vantagens do controle em malha fechada são a insensibilidade a perturbações externas e as variações em parâmetros do sistema. Já a desvantagem da operação em malha fechada é a possibilidade de perda de estabilidade causada, em geral, por ganhos elevados, como ocorreria, por exemplo, caso um motorista, dirigindo seu carro em uma estrada, aplicasse correções acentuadas de direção sempre que notasse algum erro de rumo. No entanto, nesse caso, o controle em malha aberta seria impraticável, já que haveria a necessidade do conhecimento prévio de toda a trajetória.

1.2.8 CONTROLADOR

Controlador é um instrumento cuja saída se altera para regular uma variável controlada. Sua função é manter automaticamente uma variável do processo em um valor desejado por meio de um sinal de saída continuamente variável. Ele pode ser um instrumento separado, analógico ou digital, ou pode ser o equivalente desse instrumento em um sistema digital de controle compartilhado. Os controladores são usualmente classificados segundo a forma de energia que usam, isto é, elétrica, hidráulica, pneumática, mecânica etc.

Em um controlador, a modificação da saída é automática em resposta a uma variável de processo medida. Como exemplo, considere a geladeira doméstica, em que o

usuário escolhe um nível de “frio” por meio de um botão e a temperatura se mantém aproximadamente constante, a despeito de perturbações externas, como variações da temperatura ambiente, entrada de massa de ar quente provocada pela abertura de porta, armazenamento de alimentos à temperatura ambiente etc. Em um controlador em manual ou em estação de comando manual, a saída só pode ser alterada por ajuste manual.

1.3 EVOLUÇÃO HISTÓRICA DOS SISTEMAS DE CONTROLE DE PROCESSOS

Nos últimos oitenta anos, as técnicas de controle na indústria de processos evoluíram muito, tendo como responsáveis dois fatores: as necessidades do usuário e os avanços tecnológicos. Um dos fatores que influenciou nas necessidades do usuário foi o aumento no tamanho e na complexidade dos processos industriais, bem como o custo da matéria-prima e da energia para processá-la. Os enormes avanços tecnológicos dos últimos anos permitiram a evolução até os sistemas de otimização integrados de uma planta industrial.

Esta seção está dividida em duas partes: uma relativa à instrumentação analógica e a outra, à instrumentação digital.

1.3.1 INSTRUMENTAÇÃO ANALÓGICA

1.3.1.1 Medição local e controle manual

A Revolução Industrial começou na segunda metade do século XVIII, na Inglaterra, com o surgimento da máquina a vapor. Nessa época, em 1775, James Watt criou um mecanismo (regulador de Watt) para regular a velocidade dessas máquinas. Esse trabalho é considerado como uma das primeiras aplicações da realimentação, um elemento essencial no controle automático. Na segunda metade do século XIX e início do século XX, foram lançados no mercado os indicadores locais (termômetros de mercúrio, manômetros tipo Bourdon, colunas em U) usados em controle manual local. Alguns instrumentos dessa época são usados até hoje, como o primeiro tubo Venturi industrial, feito por Clemens Herschel no final do século XIX, e a primeira placa de orifício, construída em 1903, nos Estados Unidos, por T. R. Weymouth com tomadas *flange taps*. Então, lentamente, começaram a surgir outros instrumentos que usavam a realimentação para o controle de processos industriais, todos eles puramente mecânicos. No entanto, até 1930, o controle de processos se resumia a esporádicas tentativas individuais, sem obedecer a teorias ou princípios definidos, pois eram poucas as indústrias a serem servidas ou interessadas no tema. Nessa época, realmente havia controle distribuído com uma filosofia similar à de hoje, pois os operadores e os instrumentos eram todos distribuídos pela planta e os ajustes eram manuais.

1.3.1.2 Controle local

Durante a década de 1930, foram criados os primeiros dispositivos mecânicos de controle local, usados em instrumentos conhecidos como “caixa-preta” ou “caixa grande” em virtude de suas dimensões, $\cong 420 \text{ mm} \times 350 \text{ mm} \times 140 \text{ mm}$. Esses instrumentos recebiam dentro de si o fluido de processo (nos casos de medição de vazão, pressão ou nível) ou operavam com sistemas termais (no caso de medição de temperatura). Eles eram totalmente mecânicos, dispensando alimentação pneumática ou elétrica. Não havia ainda a transmissão de sinais. Em 1933, a Taylor Instrument Company, empresa fundada em 1857 e atualmente parte da ABB, introduziu o modelo Fulscope 56R, o primeiro controlador pneumático com modo proporcional do mundo. Em 1934-1935, a Foxboro Company, atualmente parte do grupo Schneider, lançou o controlador pneumático modelo 40, o primeiro controlador proporcional-integral do mercado. Em 1940, a Taylor lançou o modelo Fulscope 100, o primeiro controlador pneumático a operar no modo proporcional-integral-derivativo (PID).

O conceito de “controle distribuído” surgiu com os controladores do tipo “caixa grande”, que eram fisicamente espalhados pela planta. Os elementos individuais de controle, como reguladores mecânicos, eram localizados próximos aos equipamentos de processo a serem controlados. As ações típicas de controle eram executadas localmente pelos operadores, e a total “integração” entre controle e operação da planta se baseava, praticamente, na troca de informações verbais. Esses procedimentos eram viáveis pois as plantas eram geograficamente pequenas, e os processos, poucos complexos. No final da década de 1920 surgiram os controladores pneumáticos de conexão direta ao processo, porém, a filosofia de operação não foi alterada: controlador e interface com o operador permaneciam no campo.

Na década de 1930 houve um aumento no tamanho das plantas e na complexidade dos processos a serem controlados. A necessidade de melhorar a operação global da planta disparou um movimento no sentido das salas de controle centralizadas, que somente se tornou possível com o surgimento da transmissão pneumática, em que as variáveis de processos eram convertidas em sinais pneumáticos padronizados e transmitidos até a sala de controle, onde eram manipulados, e o resultado, retransmitido até os atuadores no processo. A grande vantagem dessa filosofia era que todas as informações importantes referentes a um dado processo estavam agrupadas, permitindo análise e ação mais precisas do ponto de vista econômico.

1.3.1.3 Transmissão pneumática e eletrônica

Na primeira metade da década de 1940, foram desenvolvidos instrumentos usando técnicas pneumáticas. Graças à transmissão pneumática, os instrumentos não recebiam mais dentro de si o fluido de processo e podiam ser montados a uma certa distância (até 50 m ou 60 m) do transmissor. Assim, surgiram as primeiras salas de

controle. Os instrumentos ainda eram do tipo “caixa grande”. Durante a Segunda Guerra Mundial, controladores pneumáticos PID estabilizaram servomecanismos de controle de tiro de armas de fogo, bem como auxiliaram a produzir borracha sintética, combustível de aviação de alta octanagem e U-235 para criar a primeira bomba atômica (VANDOREN, 2003). Na segunda metade da década de 1940, houve um significativo avanço tecnológico em virtude da guerra, o que levou ao surgimento da transmissão eletrônica.

A transmissão eletrônica permitiu substituir os sinais pneumáticos por elétricos e eliminou os atrasos inerentes aos sistemas pneumáticos. Um passo importante na tecnologia eletrônica analógica foi o surgimento dos sistemas de “arquitetura dividida”, em que a parte responsável pela interface com o operador era montada no painel da sala de controle, e toda a parte eletrônica responsável pela manipulação de sinais e execução dos cálculos e controles era alocada em armários em uma sala auxiliar anexa. A alta velocidade da transmissão eletrônica tornou possível um maior distanciamento da sala de controle da área de processo em relação à tecnologia pneumática. As salas de controle típicas da década de 1950 continham grandes painéis separados para cada unidade da planta. Havia ainda painéis de alarmes.

1.3.1.4 Miniaturização dos instrumentos

Na década de 1950, e, em particular, a partir de 1954, com o advento dos circuitos a semicondutores, a instrumentação eletrônica tomou um grande impulso. Durante essa década, reduziu-se o tamanho dos instrumentos pneumáticos/eletrônicos de painel para 6 × 6 polegadas e, em seguida, para 3 × 6 polegadas, diminuindo a dimensão dos painéis. Esse avanço viabilizou-se pelo uso de componentes a semicondutores (principalmente amplificadores operacionais) e circuitos impressos (pneumáticos e eletrônicos). Em 1951, a Swartwout Company, atualmente parte da Prime Measurement Products, introduziu a linha Autronic, com os primeiros controladores eletrônicos baseados em tecnologia de tubos a vácuo. Em 1959, a Bailey Meter Company, atualmente parte da ABB, lançou o primeiro controlador eletrônico totalmente baseado em estado sólido. Os componentes eletrônicos em estado sólido usam semicondutores, como transistores e diodos. Em 1969, a Honeywell introduziu a linha Vutronik de controladores com a ação derivativa calculada a partir do valor negativo da variável controlada em vez do erro, visando eliminar o salto derivativo (ver detalhes no Capítulo 7). A miniaturização atingiu seu auge na década de 1970 com os instrumentos de 1 × 6 polegadas e arquitetura dividida, em que a indicação era feita no frontal dos painéis de controle e o controle propriamente dito era executado em um armário (*rack*) auxiliar.

1.3.2 INSTRUMENTAÇÃO DIGITAL

A década de 1960 viu surgirem os sistemas digitais de controle. Durante aproximadamente vinte anos, as aplicações de controle digital foram do tipo controle centraliza-

do, ou seja, com o computador reunindo todas as suas tarefas em um único processador, eventualmente redundante. Os computadores foram usados de três modos, e, para ilustrá-los, utiliza-se o esquema da Figura 1.5, que corresponde a uma malha típica de controle por realimentação.

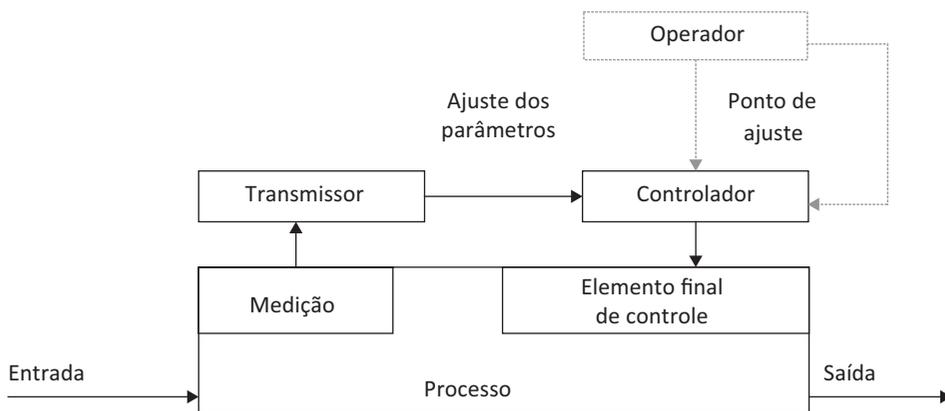


Figura 1.5 – Malha típica de controle por realimentação.

As primeiras tentativas de uso de computadores em instalações industriais foram em funções de monitoração (sem controle de malha fechada), por meio dos **sistemas digitais de aquisição de dados** (DAS – *data acquisition systems*) ou *data loggers*, que coletavam dados do processo e os emitiam como relatórios periódicos (ver Figura 1.6).

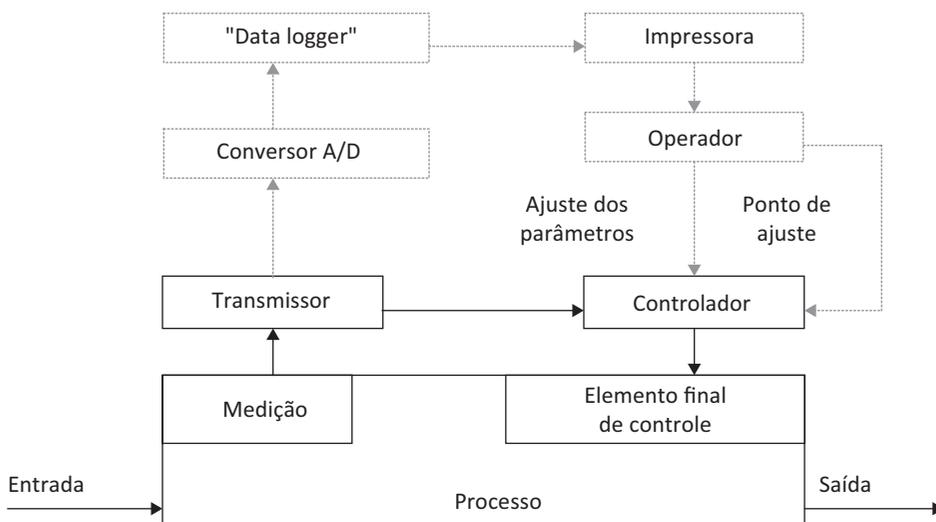


Figura 1.6 – Sistema típico de aquisição de dados.

Havia *data loggers* que chegavam, inclusive, a efetuar cálculos, determinando alterações na operação da planta, como modificações em equipamentos, em parâmetros ou nos pontos de ajuste dos controladores. Nesse caso, o computador não exercia controle direto, mas agia por meio do operador, caracterizando um sistema de malha aberta. A primeira aplicação industrial de um sistema digital de aquisição de dados para monitoração da planta foi na termoeletrica de Sterlington, Louisiana, em setembro de 1958.

Outra aplicação de controle por computador, em que há comunicação direta entre o computador e o processo, é chamada de **controle supervísório** ou **controle do valor desejado** (SPC – *set point control*). Nesse sistema, o computador recebe os sinais dos instrumentos de medição, calcula as melhores condições de operação e, automaticamente, ajusta o valor de referência dos controladores, correspondendo às condições de maior eficiência da planta. Os sinais eram enviados diretamente aos controladores ou, então, aos operadores, que deviam inseri-los nos controladores, conforme a Figura 1.7.

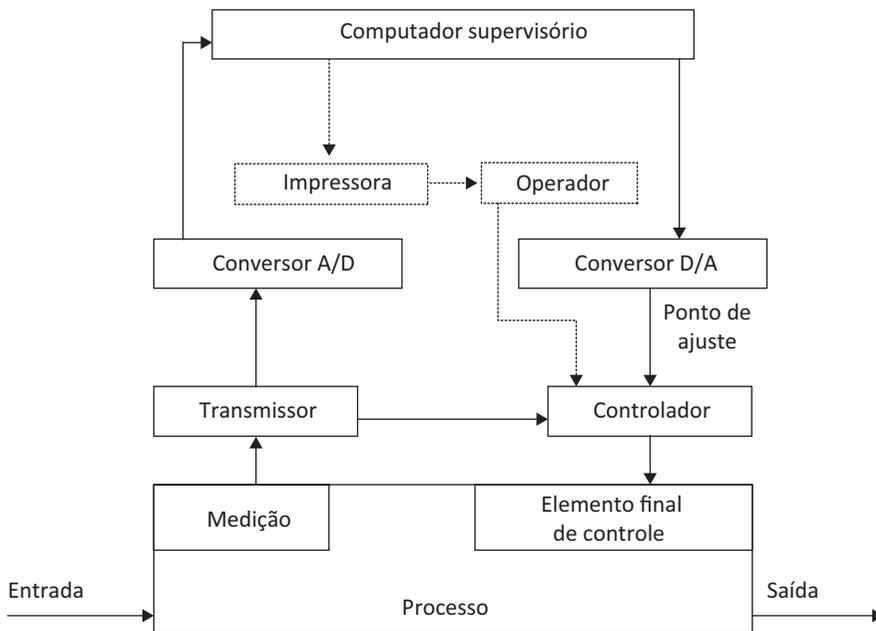


Figura 1.7 – Sistema de controle supervísório (SPC – *set point control*).

A primeira aplicação industrial de um sistema SPC foi na refinaria de Port Arthur (Texaco), Texas, com um computador RW300 da empresa Ramo-Wooldridge (hoje TRW), implantado em março de 1959. A primeira planta química com um sistema SPC foi a planta de amônia da Monsanto em Luling, Louisiana, com partida em abril de 1960. Logo em seguida, veio a planta de acrilonitrato da B. F. Goodrich em Calvert, Kentucky, ambas com computador RW300. A primeira termoeletrica com um sistema

SPC foi instalada em Huntington Beach, Califórnia, com computador GE-310 da General Electric, que partiu em 1961. A primeira planta siderúrgica a usar um SPC foi a Great Lakes Steel Co., em Detroit, Michigan, com partida também em 1961.

Outra aplicação de controle por computador é o controle digital direto (DDC – *direct digital control*), em que o computador substitui os controladores, recebendo diretamente os sinais das variáveis de processo, executando os algoritmos de controle e enviando os sinais de atuação aos elementos finais de controle, como mostra a Figura 1.8.

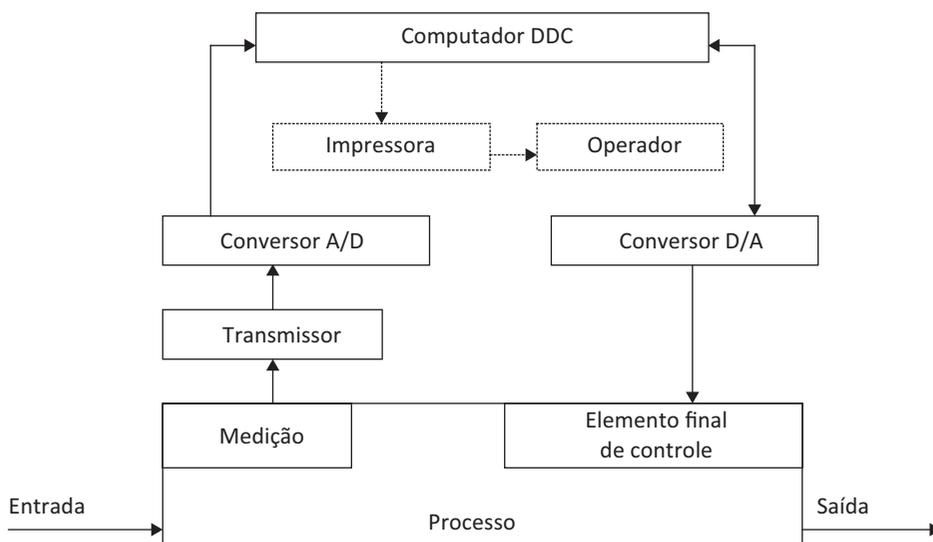


Figura 1.8 – Sistema de controle DDC (*direct digital control*).

Embora a Figura 1.8 mostre apenas uma malha, o computador é compartilhado no tempo entre muitas malhas de controle, em um ciclo contínuo de varredura das diversas malhas a ele acopladas. O DDC é, na realidade, o que se pode chamar de um controle digital concentrado, por haver um único computador controlando digitalmente várias malhas. O inconveniente desse tipo de aplicação é que, em caso de falha do computador, perde-se o controle da planta e corre-se todos os riscos associados a esse evento. Nos casos de controle supervisão e de controle digital direto, o computador fecha a malha de controle, permitindo otimizações, modelagens ou execução de funções de controle especiais normalmente não disponíveis nos sistemas analógicos convencionais.

As primeiras aplicações industriais do DDC ocorreram em 1962, uma na ICI (Imperial Chemical Industries), na Inglaterra, em uma planta de soda, usando um computador ARGUS100 da Ferranti, e a outra em uma planta de etileno da Monsanto no Texas, para controlar duas colunas de destilação, usando um computador RW300. Outro sistema DDC foi instalado em uma petroquímica em 1963 e, por questões de

segurança, foi mantido todo o painel analógico como *backup* no caso de o computador falhar, pois na época sua confiabilidade era baixa. Esse sistema tinha o problema de centralizar suas tarefas em uma única CPU (unidade central de processamento) e, em caso de falha, a consequência era a parada de tudo o que estivesse rodando no computador. Para solucionar esse problema, era preciso utilizar todo o painel analógico como *backup* ou outro computador idêntico como *hot standby*, o que inviabilizava economicamente o projeto de controle.

Até 1964, todas as grandes empresas norte-americanas já haviam tentado pelo menos uma aplicação de controle digital por computador. A primeira tentativa no Brasil de usar um computador no controle de processos industriais ocorreu na planta de produção de eteno e acetileno da Union Carbide em Cubatão, São Paulo, em 1971. A ideia era produzir esses dois produtos usando tecnologia própria (processo Wulff). Foram usados computadores da Westinghouse, mas, ao colocar em operação a unidade, o processo não funcionou a contento e o eteno gerado ficou fora das especificações. A unidade foi desativada pouco tempo depois (VALSANI, 1988).

As tentativas de implantar controle de processos por computador na década de 1960 e meados da década de 1970 não obtiveram os resultados esperados, principalmente pelos seguintes motivos:

- preço excessivamente alto (tanto do *hardware* como do *software*);
- falta de confiabilidade (necessidade de *backup* analógico ou redundância de computadores, aumentando o custo da instalação);
- no caso do DDC, concentrava-se a responsabilidade de operação da planta em um único equipamento.

As configurações SPC e DDC apresentaram vantagens inegáveis, mas também trouxeram preocupações quanto à confiabilidade, tanto em nível de *hardware* como de *software*. Apesar dos custos de *hardware* decrescentes, os custos de programação, por seu caráter de especialidade por aplicação, vinham crescendo assustadoramente. Se, de um lado, o usuário não queria abrir mão das potencialidades que os computadores lhe ofereciam, por outro lado, ele procurava evitar riscos inerentes que essa tecnologia ainda não estava em condições de eliminar. Foi com o surgimento das técnicas de microcircuitos e, em especial, dos microprocessadores, que os fabricantes de sistemas se motivaram a desenvolver novos conceitos em equipamentos para controle de processos.

Surgiu, então, a ideia de se ter um **sistema digital de controle distribuído (SDCD)**, em que se teria um computador controlando cada variável (*single loop integrity*) ou um grupo pequeno de variáveis. O SDCD, na realidade, retorna conceitualmente ao início da era do controle automático, pois, nessa época, a inteligência era fisicamente distribuída pela planta nos operadores, que monitoravam a indicação local de algum instrumento e acionavam manualmente algum elemento final de controle. Atualmente, essa distribuição de inteligência é executada por meio dos microprocessadores, que,

mesmo estando concentrados na própria sala de controle, recebem os sinais provenientes do campo e os processam, em pequenos grupos ou mesmo individualmente, retornando ao campo os sinais de atuação para os elementos finais de controle. Com o SDCD, o controle é distribuído e apenas a supervisão da planta é centralizada nas telas dos consoles de operação na sala de controle. O SDCD é, basicamente, composto por quatro elementos: estação de operação, estação de controle, interface com o computador de processo e via comunicação de dados.

Esse conceito de controle distribuído tornou-se viável a partir da década de 1970, com o advento dos microprocessadores. No início dessa década, surgiram os circuitos integrados LSI, com a compactação de milhares de circuitos em uma única pastilha (*chip*). Em seguida, apareceram os microprocessadores (o 8080 da Intel é de 1974, e o Z80 da Zilog é de 1976), barateando ainda mais os sistemas digitais.

A Honeywell (Estados Unidos), a Yokogawa (Japão) e a Controle Bailey (França) iniciaram estudos para um novo sistema de controle digital, descentralizando as funções, melhorando a confiabilidade, reduzindo os custos e diminuindo o gigantismo dos painéis convencionais. A Honeywell saiu na frente (1975), lançando o famoso TDC-2000, que chegou a controlar cerca de 200.000 malhas em todo o mundo.

O ano de 1975 marca o início da utilização do SDCD, com lançamentos quase simultâneos na Europa, nos Estados Unidos e no Japão. Com a distribuição da inteligência, viabilizada pelo baixo custo dos microprocessadores, atingiu-se uma confiabilidade similar aos sistemas analógicos, ao mesmo tempo que se oferecia toda a potencialidade dos sistemas digitais, especialmente sua flexibilidade, conferida pelas funções reprogramáveis. Aos SDCD, juntaram-se desenvolvimentos importantes em controle sequencial e combinatório (intertravamentos), dispondo-se de equipamentos designados como controladores lógicos programáveis (CLP).

O CLP foi criado em resposta à demanda da indústria automotiva norte-americana. Antes do CLP, a lógica de intertravamento e sequenciamento para segurança e controle na produção de automóveis era realizada por relés, temporizadores e controladores dedicados. O procedimento de atualização de tais equipamentos para que se adaptassem aos novos modelos de automóveis lançados anualmente demandava um tempo enorme e era muito caro, pois era comum a necessidade de se fiar novamente o sistema de segurança e controle.

Em 1968, a GM Hydramatic (divisão de transmissão automática da General Motors) lançou uma solicitação de propostas para um sistema eletrônico que pudesse substituir os sistemas de relés e temporizadores. A proposta vencedora foi da Bedford Associates de Boston, Massachusetts. O primeiro CLP foi intitulado 084, pois se tratava do 84º projeto da Bedford. Essa empresa criou uma nova companhia dedicada a desenvolver, produzir, vender e prestar serviços a esse novo produto. Essa nova empresa foi chamada Modicon (Modular Digital Controller). Uma das pessoas que trabalhou nesse projeto foi Dick Morley, considerado o “pai” dos CLP. A marca Modicon foi vendida em 1977 para a Gould Electronics, depois, para a empresa alemã AEG e, posteriormente, para a Schneider Electric, sua atual proprietária.

Os CLP, também conhecidos como PLC (*programmable logic controllers*) ou PC (controladores programáveis) são pequenos computadores usados para automação de processos industriais. Em vez de usarem um computador de uso geral, os CLP são projetados para suportar condições adversas, como temperaturas elevadas por longos períodos de tempo, atmosferas com poeira ou pó, imunidade a ruído elétrico e resistência à vibração e impactos. Ele é um sistema que opera em tempo real, pois as saídas devem ser geradas em resposta às entradas dentro de limites de tempo bem restritos. Os CLP surgiram para substituir os painéis com relés, diminuindo assim o alto consumo de energia, a difícil manutenção, a complicada modificação de comandos e as custosas alterações na fiação. Atualmente, um único CLP pode substituir milhares de relés e temporizadores. Os CLP estão bem adaptados a uma certa gama de tarefas de automação, as quais são tipicamente processos industriais de manufatura. O problema central em um projeto normalmente é expressar a sequência desejada de operações.

Alguns CLP modernos, bastante poderosos, estão disponíveis por poucas centenas de reais. Isso os torna economicamente viáveis para aplicações em pequenos sistemas de controle. No entanto, para processos cujo controle é muito complexo, como os empregados em algumas indústrias químicas ou petroquímicas, podem ser requeridos algoritmos e desempenho acima da capacidade mesmo dos CLP mais sofisticados. Sistemas de controle com velocidades extremamente altas, como o controle de voo em aviões, podem exigir soluções customizadas.

Os principais fornecedores mundiais de CLP são: ABB, Koyo, Honeywell, Modicon (Schneider), Allen Bradley (Rockwell), Omron, General Electric Fanuc, Siemens, Mitsubishi, Tesco Controls e Panasonic (Matshushita). Já no Brasil, há a Atos e a Altus.

O início dos anos 1980 foi marcado pela introdução dos controladores digitais de malha única (SLC – *single loop controllers*), decorrência da contínua redução do preço dos microprocessadores. Esse tipo de controlador comporta-se exatamente como o analógico. A diferença fundamental está na capacidade muito maior de realizar funções, podendo ter: ganho linear, ganho adaptativo, *bias*, linearização, relação, compensação de vazão, alarmes, extração de raiz quadrada, limites cruzados etc. Qualquer uma dessas funções pode ser inserida na malha por meio de programação do controlador.

O SLC se apresenta de forma extremamente parecida com um controlador analógico, com algumas melhorias, como a apresentação analógica (*bar graphs*) e numérica das variáveis, a minimização de peças móveis etc. Nos SLC, é geralmente possível agrupar muitas funções que seriam executadas por módulos individuais em instrumentação analógica convencional. Além do algoritmo de controle propriamente dito, funções lógicas, aritméticas e de controle auxiliar são reunidas no mesmo instrumento, geridas por um único microprocessador. Atualmente, há fabricantes que colocam diversas malhas de controle no mesmo instrumento (até quatro), constituindo os MLC (*multi-loop controller*).

Em termos da cronologia do desenvolvimento de controladores digitais de malha única, em 1964, a Taylor Instruments lançou o primeiro controlador digital SLC, mas não promoveu uma comercialização agressiva do mesmo. Em 1975, a Process Systems,

atualmente MICON Systems, introduziu o controlador P-200, o primeiro controlador PID baseado em microprocessador (VANDOREN, 2003).

Além dos SDCD de grande porte, destinados ao controle de processos de médio e grande porte, existem configurações reduzidas, que condizem com instalações de menor porte. Nos SDCD reduzidos, utilizam-se, basicamente, controladores do tipo SLC para executar os algoritmos de controle, interliga-se esses controladores por meio de um acoplamento cablado e emprega-se uma IHM (interface homem/máquina) simplificada, utilizando normalmente microcomputadores compatíveis com PC. O sistema assim reduzido permanece distribuído funcionalmente e possui muitas das vantagens da instrumentação digital, principalmente na riqueza dos algoritmos de controle disponíveis.

A título de curiosidade, em 1980, apesar de todo o avanço da indústria eletrônica analógica e digital, cerca de 50% dos instrumentos vendidos nos Estados Unidos ainda eram pneumáticos. No Brasil, em pesquisa feita pela Abiquim (Associação Brasileira da Indústria Química e de Produtos Derivados) no início de 1986 junto às indústrias do ramo químico, constatou-se que metade delas ainda operava com instrumentação pneumática.

Na transmissão dos sinais entre transmissores, controladores e atuadores, a primeira forma de comunicação foi via sinais pneumáticos, que operavam com ar comprimido em uma tubulação de aço inox ou vinil de 1/4 a 3/8 polegadas. Em seguida, surgiu a transmissão eletrônica analógica, em que um par de fios de cobre conduzia um sinal em corrente ou tensão. A confiabilidade e a segurança com a transmissão de 4 mA a 20 mA fizeram com que esta se tornasse o padrão para a transmissão de sinais. Por muito tempo, o envio de apenas uma informação (a variável medida) por instrumento foi suficiente para as indústrias.

A partir de 1982, iniciou-se o desenvolvimento de uma tecnologia denominada *fieldbus*, que consiste basicamente em um barramento de comunicação digital para interligar, por meio de um simples par de fios, equipamentos de controle de campo e sala de controle. Estes consistem em transmissores inteligentes equipados com microprocessadores, que podem executar uma série de funções: autodiagnóstico, algoritmos matemáticos e de controle PID, totalização etc. As principais vantagens dessa tecnologia consistem na redução do custo da fiação e na eliminação da estação de controle.

Em 1986, surgiu o protocolo HART (*highway addressable remote transducer*), que permitiu sobrepor um sinal digital sobre o analógico e foi uma forma de comunicação bastante usada pelos fabricantes de instrumentos. O padrão de comunicação passou de puramente analógico para digital e, com isso, mais de uma informação podia ser transmitida por instrumento. O HART é um protocolo especialmente desenvolvido para instrumentação industrial, que permite a comunicação digital pela malha de controle simultaneamente com a comunicação analógica de 4 mA a 20 mA. Uma de suas vantagens, portanto, é manter-se compatível com a fiação já existente, pois a comunicação digital ocorre sobre a mesma malha analógica, sem, no entanto, prejudicar o sinal analógico padrão. Esse protocolo fornece diversas informações sobre o instrumento (valores de calibração, data da última calibração, qualidade da medida e defeito

no próprio instrumento, dentre outros), e não somente a variável medida. Neste caso, o sinal analógico, com sua maior velocidade de atualização, continua sendo usado para controle. A comunicação digital fornece ao usuário informações sobre processo, diagnóstico e manutenção do instrumento, além de possibilitar ao usuário o acesso remoto ao instrumento (proporcionando, por exemplo, a mudança de calibração). É o que se define como **instrumento inteligente**.

Com isso, a indústria não somente automatizava a unidade, em termos de controle das malhas, mas passou a monitorar os seus ativos, podendo prever manutenção e substituição de partes defeituosas antes de elas virarem possíveis falhas. Até meados dos anos 1990, essa transmissão digital superimposta ao sinal analógico reinou absoluta, quando foi implantada a primeira rede puramente digital de instrumentos de campo. Essa evolução trouxe economia nas instalações e na capacidade de ampliação do parque instalado nas indústrias de processo, bem como uma maior quantidade e qualidade de informações obtidas dos instrumentos. Nos últimos anos, foram criadas formas de comunicação digital com os instrumentos de campo, e, atualmente, a comunicação digital com os instrumentos inteligentes de campo usa não só o protocolo HART, mas também redes locais tipo *fieldbus*. Atualmente, há dezenas de protocolos digitais de comunicação de rede; os de maior destaque são: Modbus-RTU, Profibus DP e Fieldbus Foundation. Dentre essas redes locais, uma bastante conhecida e já padronizada é a *Fieldbus* da Fieldbus Foundation, que é um elo de comunicação serial e digital entre os equipamentos de automação primários, localizados junto ao processo e ao nível de controle imediatamente superior, na sala de controle. Os equipamentos de automação primários normalmente possuem uma capacidade reduzida de processamento, realizada por meio de microprocessadores ou microcontroladores. A *fieldbus* pretende atender tanto processos discretos quanto contínuos, unificando as duas áreas em um único padrão.

Os transmissores digitais microprocessados, conhecidos como **transmissores inteligentes**, foram lançados no mercado por volta de 1985 e podem se comunicar digitalmente, ser calibrados à distância, incluindo opções de cálculo local (como extração de raiz quadrada), e até mesmo executar algoritmos PID, dispensando os controladores. Existem também as válvulas inteligentes que dispõem de posicionadores microprocessados. Os instrumentos de campo microprocessados têm as seguintes características:

- confiabilidade e precisão das medidas ampliadas;
- função de autodiagnóstico incorporada;
- verificação e calibração remotas;
- capacidade de processamento de dados (alguns dispõem do algoritmo PID).

Enquanto as décadas de 1970 e 1980 foram dominadas por sistemas proprietários, na década de 1990 houve uma revolução do *hardware* por meio dos sistemas abertos (*open system architecture*). Um dos impulsionadores da tecnologia dos sistemas abertos foi a programação orientada a objeto (OOP – *object oriented programming*),

estruturada de forma que módulos do programa pudessem ser usados diversas vezes, economizando tempo de programação e tornando o *software* mais confiável. Por meio da programação orientada a objeto, a Microsoft desenvolveu o sistema operacional Windows, que promoveu o conceito de sistemas abertos em aplicações de controle de processos.

Os sistemas digitais de controle continuam evoluindo, e essa evolução tem gerado, desde 1995, um novo conceito de SDCD. Trata-se de sistemas com recursos mais avançados que os SDCD tradicionais, incluindo as seguintes facilidades adicionais:

- algoritmos de controle avançado (controle preditivo, controle *fuzzy*, PID autoajustável etc.) já incorporados no sistema;
- algoritmos para análise estatística de certas variáveis do processo, por exemplo, a variabilidade (oscilações da variável controlada em torno do valor de referência);
- *softwares* de diagnóstico que se comunicam com os instrumentos inteligentes de campo (válvulas e transmissores), permitindo que se executem, inclusive, programas de manutenção preditiva em função dos desgastes verificados nos instrumentos.

Para a maioria das aplicações de automação industrial, as redes que interligam sensores, controladores e atuadores utilizam cabeamento para se comunicar. No entanto, ao se usar cabos para interligar dispositivos espalhados a longas distâncias, deve-se considerar o custo dessa instalação (cabos, eletrodutos, condolentes, suportes, mão de obra etc.). Levando-se em conta um elevado número de sensores e atuadores, comuns em instalações industriais, pode-se supor que normalmente o uso de cabos leva a problemas de manutenção com o passar do tempo. A **comunicação sem fio** ou *wireless* (via rádio) tornou-se uma ótima opção, reduzindo o custo da instalação e eliminando pontos sujeitos a manutenção, sendo a última grande evolução na automação de processos industriais.

A tecnologia de transmissão industrial sem fio pode ser considerada um desdobramento dos atuais protocolos comerciais, como o Wi-Fi e o Bluetooth, pois eles possuem a mesma estrutura de transmissão baseada nas camadas ISO-OSI (estrutura de camadas na qual foram desenvolvidas as redes fiada e sem fio), as mesmas frequências de operação e as técnicas de espalhamento espectral. Entretanto, essa tecnologia apresenta as vantagens de ser otimizada para a indústria, preocupando-se com questões como segurança operacional, consumo de energia, custo e confiabilidade (RIEGO, 2009). Essa nova classe de rede de sensores sem fio (*wireless sensor network*) teve um desenvolvimento considerável recentemente. Ela consiste basicamente em nós individuais que são capazes de interagir entre si, medindo, monitorando ou controlando variáveis de processos industriais. Essas redes sem fio são atraentes e capazes de se adaptar a diversas áreas de aplicação da automação, além da industrial. A automação predial, por exemplo, recebe muito bem essa tecnologia, sem esquecer da parte da medição de consumo residencial (água, gás, eletricidade), por meio de medidores dotados dessa tecnologia, permitindo a leitura do consumo

à distância com rapidez e segurança.

Entre os ganhos obtíveis, há a redução de custos de instalação, manutenção e gerenciamento da rede. Dentre os desafios a serem superados, há a insegurança dos usuários frente a essa nova tecnologia, conforme citado em Schweitzer (2008): “os usuários ainda estão confusos quanto às potencialidades e às ciladas que um mundo *wireless* pode oferecer”. Por se tratar de tecnologia ainda muito nova, as redes industriais sem fio estão em fase de consolidação de normatização e aceitação no mercado. Na atualidade, despontam as normas ISA100.11a e WirelessHART para protocolos de comunicação de redes sem fio, como as que possuem aceitação no mercado industrial e que tentam uma forma de coexistir, buscando para isso a interoperabilidade entre elas. Ressalta-se que todos os tipos de transmissão (exceto a pneumática, que praticamente está extinta) perduram até hoje, instalados nas indústrias de processo ao redor do mundo, e a transmissão sem fio já aparece funcionando em algumas aplicações (RIEGO, 2009).

1.3.3 RESUMO DOS EVENTOS MAIS IMPORTANTES NA EVOLUÇÃO DO CONTROLE DE PROCESSOS

A Tabela 1.1 resume os eventos mais importantes na evolução do controle na indústria de processos.

Tabela 1.1 – Evolução dos sistemas de controle

DATA	EVENTO
1934	Comercialização pela Foxboro do primeiro controlador PI
1935	Controladores pneumáticos locais tipo “caixa grande” dominam o mercado
1938	Surgem os transmissores pneumáticos, tornando possível as salas de controle centralizadas
1958	Os primeiros controladores eletrônicos são apresentados no “ISA’s 13th Annual Show” na Filadélfia; surgimento do primeiro computador para monitoração na área de energia elétrica
1959	Primeiro computador supervisório em refinaria
1963	Instalado o primeiro sistema de controle DDC
1970	Surge no mercado o primeiro CLP; a venda da instrumentação eletrônica ultrapassa a pneumática
1975	Surgem no mercado os primeiros SDCD: Yokogawa (Centum) e Honeywell (TDC 2000)
1981	O primeiro controlador autossintonizável é comercializado pela Leeds Northrup
1982	Início do desenvolvimento da tecnologia <i>fieldbus</i>
1990	Início do desenvolvimento dos sistemas abertos: <i>open system architecture</i>

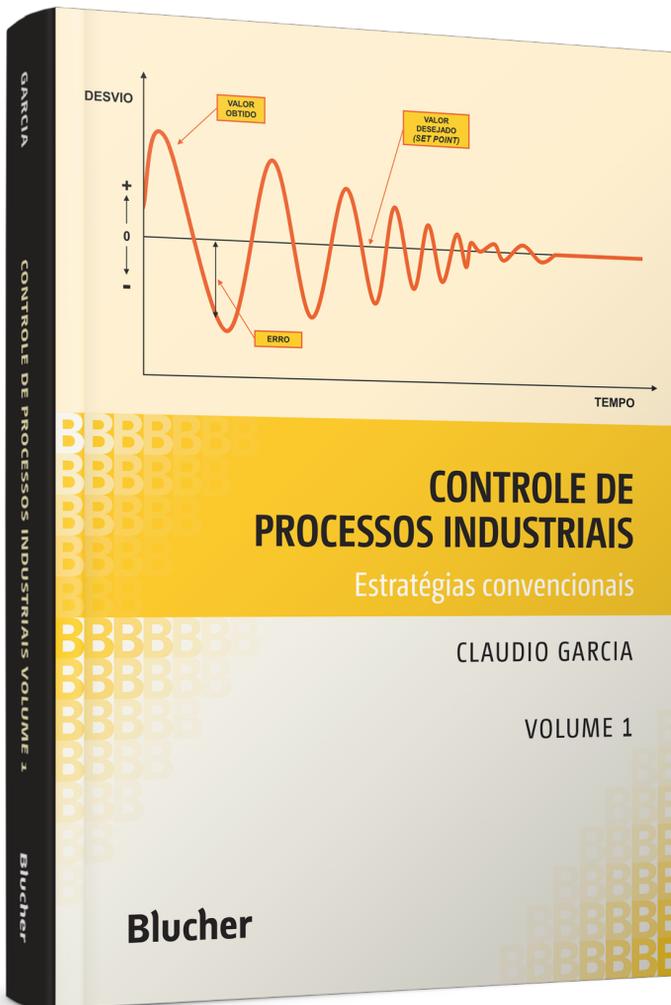
REFERÊNCIAS

RIEGO, H. B. **Redes sem fio na indústria de processos**: oportunidades e desafios. 2009. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

SCHWEITZER, P. A bela e a fera. **Revista Intech**, São Paulo, n. 101, p. 28-30, 2008.

VALSANI, F. **Polietileno**: 30 anos de Brasil. São Paulo: Rios, 1988.

VANDOREN, V. J. More than 60 years after the introduction of proportional-integral-derivative controllers, they remain the workhorse of industrial process control. **Control Engineering**, Oak Brook, n. 10, out. 2003.



Clique aqui e:

Veja na loja

Controle de Processos Industriais - Vol. 1

Estratégias Convencionais

Claudio Garcia

ISBN: 9788521211853

Páginas: 600

Formato: 17 x 24 cm

Ano de Publicação: 2017

Peso: 0.954 kg