



SBA 
PRESS

JULIO ELIAS NORMEY-RICO
MARCELO MENEZES MORATO

INTRODUÇÃO AO CONTROLE DE PROCESSOS

Blucher



sociedade brasileira de
AUTOMÁTICA

Julio Elias Normey-Rico
Marcelo Menezes Morato

Introdução ao controle de processos

Introdução ao controle de processos

© 2021 Julio Elias Normey-Rico e Marcelo Menezes Morato

Editora Edgard Blücher Ltda.

Publisher Edgard Blücher

Editor Eduardo Blücher

Coordenação editorial Jonatas Eliakim

Produção editorial Bonie Santos

Diagramação Autores

Revisão de texto Maurício Katayama

Capa Leandro Cunha

Imagem da capa iStockphoto

Editora Blucher

Rua Pedroso Alvarenga, 1245, 4^o andar

CEP 04531-934 – São Paulo – SP – Brasil

Tel.: 55 11 3078-5366

contato@blucher.com.br

www.blucher.com.br

Segundo o 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

Normey-Rico, Julio Elias

Introdução ao controle de processos / Julio Elias Normey-Rico e Marcelo Menezes Morato. – São Paulo: Blucher, 2021. 708 p. : il.

Bibliografia

ISBN 978-65-5506-158-1 (impresso)

ISBN 978-65-5506-159-8 (eletrônico)

1. Engenharia industrial 2. Controle de processos 3. Controle automático 4. Automação industrial I. Título. II. Morato, Marcelo Menezes

21-3579

CDD 629.8

Índice para catálogo sistemático: 1. Engenharia industrial - Controle de processos

Conteúdo

1	Introdução	19
I	Processos e sistemas	23
2	Processos	25
2.1	Introdução	25
2.1.1	Diagrama de blocos	29
2.2	Controle de processos?	33
2.3	Entendendo o controle de processos	36
2.3.1	Exemplos de processos e suas variáveis	40
2.3.2	Processos monovariáveis e multivariáveis	44
2.3.3	Controle em malha fechada manual e automático	45
2.4	Comentários finais	51
2.5	Leitura complementar	51
3	Sinais e sistemas	55
3.1	Sinais, sistemas e modelos	55
3.2	Modelos e diagramas	62
3.3	Sinais: representação e utilização	68
3.3.1	Sinal degrau	71
3.3.2	Sinal rampa	72
3.3.3	Sinal pulso unitário	76

3.3.4	Sinais senoidais	77
3.3.5	Sinal discreto de potenciação	78
3.3.6	Sinal exponencial	79
3.4	Sinais: energia	82
3.5	Sinais: operações e transformações	85
3.5.1	Amostragem	87
3.5.2	Interpolação	90
3.5.3	Processamento digital	94
3.6	Comentários finais	97
3.7	Leitura complementar	97
4	Propriedades de sistemas	101
4.1	Classificação de sistemas	101
4.2	Sistemas contínuos e discretos	102
4.3	Sistemas causais e não causais	105
4.4	Sistemas invariantes e variantes no tempo	107
4.5	Sistemas lineares	112
4.6	Estabilidade de sistemas	119
4.7	Comentários finais	128
4.8	Leitura complementar	129
II	Modelos e respostas no tempo	135
5	Modelagem	137
5.1	Princípios básicos da modelagem	137
5.2	Exemplos de modelagem de processos contínuos	140
5.3	Exemplos de modelagem de sistemas discretos	147
5.4	Análise de processos: modelos estáticos e dinâmicos	150
5.4.1	Regime transitório e regime permanente	163
5.5	Simulação de processos	165

5.6	Ajuste de modelos a partir de dados experimentais	171
5.7	Modelos lineares aproximados de sistemas não lineares . . .	174
5.7.1	Um exemplo motivador	175
5.7.2	Aproximação de Taylor de primeira ordem para mo- delos dinâmicos	186
5.7.3	Caso discreto	188
5.8	Comentários finais	193
5.9	Leitura complementar	193
6	Resposta no tempo de sistemas lineares de primeira ordem	211
6.1	Abordagem intuitiva	212
6.2	Sistemas contínuos	222
6.2.1	Equação diferencial ordinária	222
6.2.2	Solução da EDO: casos estável e instável	223
6.2.3	Solução da EDO: caso integrador	232
6.3	Sistemas discretos	234
6.3.1	Solução da EaD	235
6.3.2	Casos para a solução da EaD: estável, instável e inte- grador	239
6.4	Resposta de sistemas amostrados	243
6.5	Comentários finais	257
6.6	Leitura complementar	258
7	Fechando a malha: controle por realimentação de saída	269
7.1	Os objetivos do controle de processos	269
7.2	Os sistemas de controle (do nível 1)	277
7.3	Controle em malha aberta e malha fechada	280
7.3.1	Requisitos de operação	285
7.3.2	Modelos aproximados com atraso de transporte . . .	294
7.3.3	Aspectos práticos	300
7.4	Estratégias de controle em malha fechada clássicas	303

7.5	Comentários finais	303
7.6	Leitura complementar	304

III Controle de processos 317

8 Controle *on-off* 319

8.1	Ideia básica	319
8.2	Implementação	323
8.2.1	Processos com ganho positivo	324
8.2.2	Processos com ganho negativo	324
8.2.3	Implementação prática com relés	325
8.2.4	Controle <i>on-off</i> com relés	327
8.3	Resposta da regulação <i>on-off</i>	330
8.3.1	Caso contínuo	330
8.3.2	Caso discreto	339
8.4	Análise do caso com perturbações	340
8.5	Comentários finais	347

9 Controle proporcional (P) 363

9.1	Ideia básica	363
9.2	Implementação do controle proporcional	364
9.2.1	Implementação eletrônica analógica e digital	370
9.3	Alguns exemplos intuitivos	372
9.4	A solução em malha fechada: caso estável	377
9.4.1	Caso contínuo	377
9.4.2	Caso discreto	380
9.5	Processos instáveis e integradores	390
9.5.1	Processos contínuos instáveis	390
9.5.2	Processos contínuos integradores	392
9.5.3	Processos discretos	393

9.6	O sinal de BIAS	397
9.6.1	Controle de tanque pulmão	404
9.6.2	BIAS automático	410
9.7	Comentários finais	412
10	Controle proporcional-integral (PI)	431
10.1	Ideia básica	431
10.2	A ação integral: um exemplo motivador	432
10.3	Controle integral	439
10.3.1	Controle integral e regime permanente	440
10.3.2	Ajuste do controle integral e regime transitório	444
10.3.3	Controle proporcional-integral: soma ponderada de ações	448
10.3.4	Ação I: um BIAS automático?	452
10.4	Implementação do controle PI	456
10.4.1	Implementação analógica	456
10.4.2	Implementação digital	459
10.5	Ajuste do controlador proporcional-integral	466
10.5.1	Ajustes básicos para processos sem atraso	468
10.5.2	Método de ajuste de Ziegler-Nichols	471
10.5.3	Método de ajuste de Skogestad	472
10.6	Comentários finais	475
11	Controle PI: aspectos práticos	489
11.1	Caso de estudo: piloto automático de um carro para controle de velocidade	489
11.2	Caso de estudo: controle de um fermentador de etanol	494
11.3	Controle PI com ponderação da referência	499
11.4	Modos de operação: manual e automático	506
11.5	Controle PI com saturação da ação de controle	509
11.5.1	O efeito do acúmulo da ação integral	510

11.5.2	Anti-windup digital	517
11.5.3	Anti-windup analógico	523
11.6	Comentários finais	527
12	Controle proporcional-integral-derivativo (PID)	543
12.1	A ação derivativa: predizendo o futuro	544
12.2	Controladores PID e suas configurações	548
12.3	Sintonia de controladores PID	559
12.3.1	Método de sintonia de Ziegler-Nichols em malha aberta	559
12.3.2	Método de ajuste de Ziegler-Nichols em malha fechada	562
12.3.3	Método de ajuste de PID-IMC	565
12.4	Implementação de controladores PID	568
12.4.1	Implementação analógica de controladores PID	568
12.4.2	Implementação digital de controladores PID	571
12.5	Medição ruidosa	573
12.5.1	O efeito do ruído de medição	574
12.5.2	Filtro de medição	581
12.5.3	Implementação do filtro de medição	587
12.5.4	O uso de filtros de ruído no controle PID	591
12.6	Controle antecipativo	593
12.7	Comentários finais	603
13	Controle avançado: noções básicas de otimização e robustez	619
13.1	Planejamento do processo de produção	619
13.2	Otimização	621
13.3	Incerteza de modelagem	628
13.3.1	Controle proporcional robusto	633
13.3.2	Robustez da ação integral	637
13.4	Controle linear a parâmetros variantes (LPV)	640
13.5	Comentários finais	646
13.6	Leitura complementar	646

A	Problemas e soluções	651
A.1	Problema 1	651
A.1.1	Resolução	653
A.2	Problema 2	656
A.2.1	Resolução	657
A.3	Problema 3	661
A.3.1	Resolução	662
A.4	Problema 4	666
A.4.1	Resolução	668
A.5	Problema 5	672
A.5.1	Resolução	674
B	Bancada experimental: controle de velocidade de um motor DC	679
B.1	Kit experimental	679
B.2	Modulação PWM	681
B.3	Circuito eletrônico	684
B.4	Tutorial de comunicação com Arduino	686
C	Simuladores de processos	689
	Lista de figuras	693

Capítulo 1

Introdução

Este livro tem como objetivo principal apresentar aos estudantes de engenharia (e de áreas afins) alguns problemas de controle do cotidiano e outros normalmente encontrados na indústria de processos, como também muitas das soluções implementadas para resolvê-los na prática.

O livro também trata de aspectos técnicos dos processos industriais de produção, como questões relacionadas aos sistemas de medição, de atuação e de controle. Para tal, diversos casos reais são usados para motivar e embasar as ferramentas de controle e seus respectivos desenvolvimentos matemáticos. Alguns exemplos práticos vistos ao longo deste livro provêm da indústria sucroalcooleira, de sistemas de energia solar, do setor de veículos autônomos e da indústria de petróleo e gás, temas de suma importância social.

No decorrer do texto, os conceitos básicos de controle de processos serão detalhados, abordando as principais metodologias de controle realimentado da prática industrial, mas também alguns casos de aplicação de técnicas de controle avançado.

É importante ressaltarmos que todo o desenvolvimento teórico apresentado neste livro segue uma abordagem intuitiva, recorrendo apenas a conceitos e ferramentas básicas da física e do cálculo. O livro é orientado a estudantes de engenharia que possuem conhecimentos básicos de matemá-

tica (como funções, derivadas, integrais, equações diferenciais ordinárias e séries) e de física (mecânica, termodinâmica, hidráulica e leis de conservação). Não são necessários conhecimentos de transformadas de Laplace ou Fourier. O material disponível neste livro também pode ser utilizado em cursos técnicos em engenharia de controle e automação e áreas correlatas.

Este livro também apresenta um tutorial para a elaboração de uma bancada experimental para estudo de sistemas de controle. Essa bancada é constituída de um par motor-gerador de corrente contínua, cuja velocidade é regulada por meio de um sinal de tensão acionado por um microcontrolador Arduino. Pela bancada, diversos conceitos teóricos e métodos de controle podem ser testados.

Os tópicos, seções e subtópicos de cada capítulo são divididos em temas básicos e avançados. Os temas avançados têm grau de profundidade matemática maior, com maior rigor e formalismos nas demonstrações. Em termos de notação, os títulos dos tópicos avançados são marcados em cinza. Os leitores e as leitoras que não desejarem se aprofundar nesses tópicos podem continuar a leitura do texto “pulando” os tópicos avançados, sem perda de continuidade.

Este livro é organizado de maneira progressiva, abordando primeiro temas iniciais até chegar em temas mais avançados:

- Os Capítulos 2 e 3 introduzem os primeiros conceitos sobre processos físicos, sinais e sistemas. As definições de atuação, medição, variável de controle e de processo, tal como os conceitos de interpolação e amostragem, são apresentadas e discutidas por meio de exemplos práticos.
- Os Capítulos 4, 5 e 6 apresentam as ferramentas matemáticas para análise de sistemas físicos e como estes podem ser representados por equações diferenciais ou equações às diferenças. Nestes capítulos, os conceitos de linearidade, linearização e propriedades gerais de sistemas

também são discutidos e debatidos por meio de ilustrações e análises intuitivas e empíricas.

- O Capítulo 7 apresenta um panorama geral sobre como os sistemas se comportam quando colocados sob a ação de controladores com realimentação dinâmica da saída.
- Na sequência, os Capítulos 8, 9, 10, 11 e 12 apresentam, respectivamente, as abordagens de controle do tipo *on-off* (liga-desliga), proporcional (P), proporcional-integral (PI) e proporcional-integral-derivativo (PID). No Capítulo 12, ideias preliminares sobre controladores antecipativos (*feed-forward*) são debatidas.
- Por fim, no Capítulo 12.7, algumas noções básicas sobre otimização são debatidas, além da ilustração de detalhes preliminares sobre controladores robustos, incluindo abordagens lineares a parâmetros variantes.

Para fins de revisão dos conteúdos apresentados, no final de cada um desses capítulos, incluímos listas de exercícios e de problemas, além de alguns problemas resolvidos. Nestas listas, propomos exercícios com foco direto nos temas do capítulo correspondente. Já nos problemas, buscamos apresentar casos de estudo que integram o conteúdo de vários capítulos. Ressaltamos também que, a partir do Capítulo 5, incluímos atividades experimentais que são propostas para serem desenvolvidas na bancada experimental proposta. Também, no final da maioria dos capítulos, apresentamos uma seção de leituras recomendadas para discussões mais aprofundadas dos temas discutidos.

O livro conta com três apêndices. O Apêndice A é composto exclusivamente por problemas resolvidos, que englobam todos os conteúdos apresentados. O Apêndice B apresenta o tutorial para montagem do kit experimental proposto como ferramenta de testes e validação. Por fim, o Apêndice C apresenta duas ferramentas para a simulação de processos e sistemas de controle.

Capítulo 2

Processos

O assunto principal deste livro é o controle de processos, área de estudo muito importante no contexto das mais diversas aplicações de engenharia. Para podermos avançar neste estudo dos problemas associados ao controle de processos, é necessário, primeiramente, apresentarmos os conceitos básicos de sistemas e respondermos a perguntas como:

- O que é e como se define um processo na engenharia de controle?
- Em quais passos consiste o projeto de um sistema de controle de um processo?

Visando responder a essas perguntas, neste capítulo discutimos o funcionamento de processos e introduzimos algumas definições e conceitos importantes para sua compreensão, por exemplo, o que são variáveis de controle, variáveis controladas e perturbações.

2.1 Introdução

Definição 1 *Processo*

*No contexto da engenharia, um **processo** é definido como sistema que trans-*

forma ou modifica as propriedades físicas, químicas ou biológicas de um material ou elemento, podendo até convertê-lo em um novo produto.

Esse conceito é um dos fundamentos básicos para a sequência deste livro, que discute projetos de sistemas de controle para os pequenos processos do cotidiano. O aquecimento de água para o banho é um processo de nosso cotidiano, ao passo que alguns exemplos de processos industriais de grande porte são a transformação de bauxita em alumínio e a produção de etanol a partir da cana-de-açúcar.

Várias pequenas tarefas do cotidiano são exemplos de processos simples. Apresentaremos alguns destes na sequência.

Exemplo 1 *A Figura 2.1 ilustra um exemplo corriqueiro de um processo: o ato de esquentar água em um fogão. Neste processo do cotidiano, ao manipularmos ou regularmos a quantidade de calor entregue pela chama do fogão, conseguimos modificar uma propriedade física (neste caso, a temperatura) da matéria-prima (que, para este exemplo, é a água). Podemos notar, empiricamente, portanto, que há uma relação de causa e efeito: a temperatura da água aumentará conforme o fogão fornecer calor. Em outros termos, geralmente, a variação da propriedade física do material será uma função da intensidade da atuação sobre o processo que produz esse material. Neste processo, usamos a energia produzida pela combustão do gás (que é uma reação química) para alterar a temperatura da água.*

Exemplo 2 *Um outro exemplo de um processo simples é a variação da velocidade das pás de um ventilador quando acionamos o botão que modifica a potência elétrica do aparelho (ilustrado na Figura 2.2). Neste processo, a energia elétrica é transformada em energia mecânica. Uma potência elétrica de acionamento maior faz com que as pás do ventilador se movam mais rapidamente.*

Apesar dos exemplos anteriores serem de áreas e contextos muito diferentes, do ponto de vista conceitual, eles têm várias características em comum.

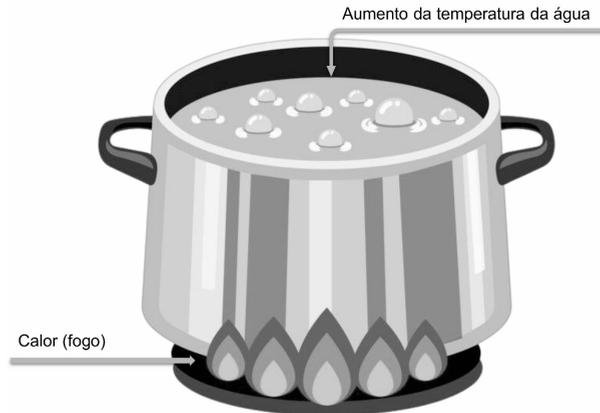


Figura 2.1 – Sistema de aquecimento de água.

A primeira é que existe uma relação de causa e efeito entre uma manipulação realizada sobre o processo (que, mais tarde, definiremos como variável manipulada do processo) e a propriedade do material que é produzido ou a característica do processo modificado (que definiremos, nas próximas seções, como variável controlada). No caso do fogão, manipulamos a válvula de gás visando aumentar a temperatura da água. Já no caso do ventilador, nosso objetivo é manipular a posição do botão que ajusta a potência elétrica para variar a velocidade do ventilador. A segunda característica em comum é que em todo processo as variações das grandezas que queremos modificar (temperatura e velocidade nos exemplos anteriores) se dão na prática de forma gradual ao longo do tempo, com uma certa dinâmica, que estudaremos mais à frente neste livro. Finalmente, uma terceira característica é que precisamos de elementos no processo que permitam nossa interação com ele: algum dispositivo que nos permita atuar no processo e algum outro equipamento que nos permita perceber as mudanças que acontecem por causa de nossa atuação. Ainda neste capítulo discutiremos estes conceitos com mais detalhes, mas, antes, apresentaremos uma forma gráfica simples para

representar o processo.

Como visto nos exemplos anteriores, a descrição de um processo pode ser realizada de forma textual. Entretanto, na prática de engenharia, é bem comum utilizarmos representações gráficas dos processos, de forma que seja possível uma compreensão de maneira rápida e direta das relações entre as manipulações que realizamos no processo e dos efeitos por elas produzidas.

Por exemplo, para o processo do ventilador, poderíamos fazer uma representação gráfica muito simples, como a apresentada na Figura 2.2. Nessa representação, podemos observar diretamente a relação de causa e efeito entre as diferentes grandezas envolvidas nesse processo (no caso, a posição do botão e a velocidade das hélices do ventilador) e, também, que existe uma certa transformação que “traduz” a posição do botão em uma certa velocidade.

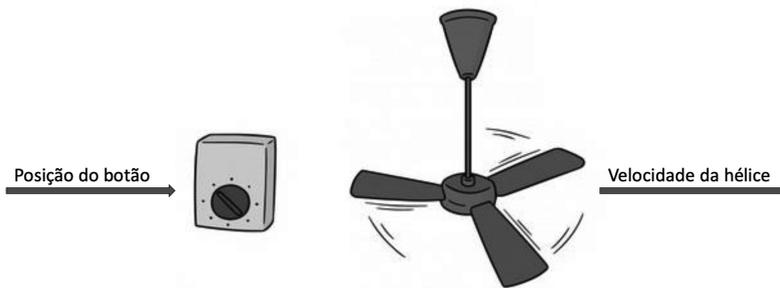


Figura 2.2 – Ventilador com controle de velocidade.

No contexto de engenharia de controle, a principal representação para as transformações e relações de causa e efeito entre variáveis é denominada “diagrama de blocos”. Devido à importância desta ferramenta de representação e análise de processos, e que nos será útil para explicar vários dos conceitos deste capítulo, ela é discutida com mais detalhes na próxima seção.

2.1.1 Diagrama de blocos

Um diagrama de blocos é um fluxograma esquemático usado para caracterizar e detalhar o funcionamento de processos e é uma ferramenta muito útil para a representação visual de processos reais. Com ele é possível, de maneira muito simples e visual, demonstrar as etapas e os procedimentos intermediários necessários para, por exemplo, transformar uma dada matéria-prima em produto final, mesmo em processos mais complexos dos que apresentamos na seção anterior.

Exemplo 3 *Na Figura 2.3, apresentamos um diagrama de blocos que representa as etapas fundamentais de um processo de produção de açúcar e bioetanol a partir da cana-de-açúcar. O processamento começa com a moagem da cana-de-açúcar, em um processo similar ao usado nos quiosques de caldo de cana. Os subprodutos deste processo são a garapa, um caldo açucarado, e o bagaço de cana, que consiste nas fibras da cana-de-açúcar que foram moídas. Com estes dois subprodutos, o processamento continua dentro da fábrica (na usina de cana, como normalmente esta fábrica é denominada). A garapa passa, então, por um processo de clarificação, para deixar o produto com a cor branca mediante tratamento químico, e concentração, para retirada da água por evaporação. O produto resultante (que pode ser comparado ao melado de cana) segue por dois caminhos possíveis: ou ele é cristalizado e centrifugado para produzir açúcar, ou ele é fermentado e destilado para produzir etanol. Já o bagaço da cana, juntamente com o palhiço (resíduo orgânico como folhas e ponteiros da cana, trazidos da lavoura), é queimado em caldeiras, para produzir vapor. Por sua vez, este vapor é usado, em uma pequena parte, para a própria usina (por exemplo, para aquecer os evaporadores) e, em grandes volumes, para a produção de energia elétrica em turbinas a vapor, que é vendida para a concessionária (distribuidora de energia local). Além disso, um outro subproduto da fábrica, a vinhaça, que é o resíduo não alcoólico da destilação*

da garapa concentrada, é usado em digestores para produzir biogás. Este biocombustível pode ser usado para produzir calor e eletricidade em máquinas específicas para isso, denominadas CHP (do inglês, *combined heat and power*). O destino da energia elétrica proveniente do CHP é, também, a venda e o consumo local. Já o calor proveniente destas máquinas pode ter várias utilidades práticas. Uma delas é ser usado em resfriadores industriais, dispositivos capazes de gerar água fria a partir de água quente. Essa água fria é usada para esfriamento de alguns fluidos dentro do processo de produção de açúcar e etanol.

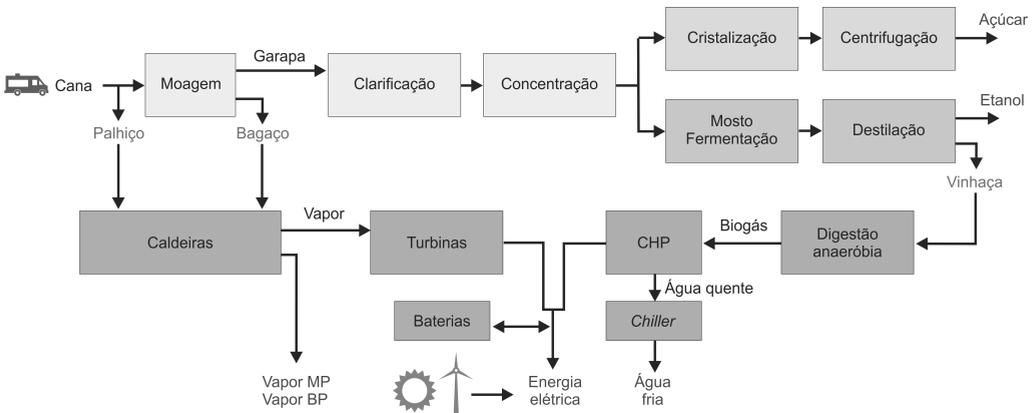


Figura 2.3 – Produção de açúcar, etanol e energia na indústria sucroalcooleira.

Como pudemos notar, este é um processo complexo, cuja matéria-prima, a cana-de-açúcar, é usada por completo: tanto no que poderia ser considerado o produto principal, o caldo, como nos resíduos do processo de transformação (palhiço, bagaço e vinhaça), que são utilizados para gerar energia elétrica, água fria e vapor, que servem para manter o processo de clarificação, moagem e concentração funcionando. Cada uma dessas etapas de transformação da cana-de-açúcar (blocos do diagrama) são processos que modificam as propriedades físicas e químicas dos produtos. O conjunto de todos os processos conectados recebe normalmente o nome de planta, termo que, às vezes, utilizamos como sinônimo do processo.

Ressaltamos que o nível de detalhe que é incluído nesses diagramas de blocos pode variar conforme o setor ou a aplicação da engenharia (computação, produção etc.).

Exemplo 4 Um outro exemplo de uma aplicação industrial de geração de energia renovável é representado com um diagrama de blocos na Figura 2.4. Nessa figura, podemos observar como o processo transforma a biomassa e irradiação solar para gerar potência elétrica para demandas internas da indústria como também para a rede externa. A biomassa recebida é armazenada e depois conduzida a uma caldeira para produzir vapor, que é convertido em energia elétrica em um par turbina-gerador que opera a uma frequência de 60 Hz. Por outro lado, a irradiação solar é convertida em energia elétrica pelos painéis fotovoltaicos e pode ser enviada à rede depois de passar por uma etapa de conversão para a frequência da rede. A energia produzida nesses processos pode ser diretamente injetada na rede ou acumulada em baterias para ser usada em outros horários, diferentes do horário da produção, sempre com a correspondente transformação entre corrente alternada para contínua (ou vice-versa).

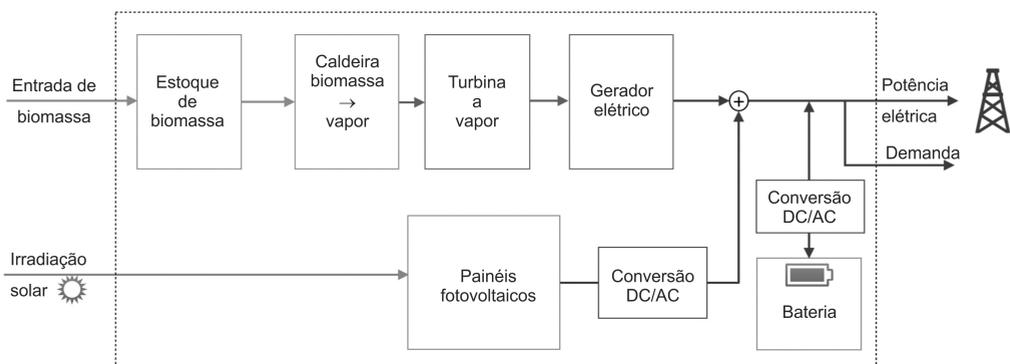


Figura 2.4 – Microrrede: processo de geração de energia renovável.

Exemplo 5 A Figura 2.5 apresenta mais um exemplo, neste caso de um diagrama de blocos um pouco mais geral em nível de detalhes, para o qual

apenas representamos as trocas de energia entre o processo de conversão e armazenamento. Notamos, neste caso, que não estão especificados os tipo de subprocessos que são representados com este diagrama.

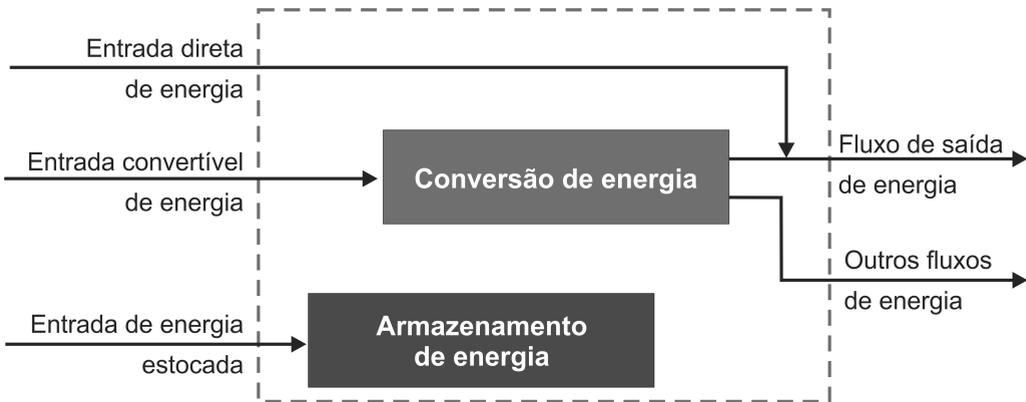


Figura 2.5 – Processo de geração e armazenamento de energia.

É importante ressaltarmos, aqui, que esses diagramas são muito importantes para o entendimento qualitativo dos processos e, como veremos mais adiante (este tema será discutido com detalhes no Capítulo 3), para a aplicação da teoria de sistemas de controle. Entretanto, para realizarmos estudos quantitativos e detalhados sobre os processos, cada um dos blocos desses diagramas deve ser associado a uma equação matemática (ou a um conjunto de equações) que descreva a relação entre as diferentes variáveis envolvidas no processo.

O termo “variável” é usado para descrever uma determinada grandeza relacionada ao processo que pode variar ao longo do tempo. Essa variação é causada por modificações realizadas no processo ou pela evolução natural de suas características físico-químicas. Por exemplo, no caso do processo do ventilador, a velocidade das pás poderia ser considerada a variável do processo que é modificada, ao longo do tempo, devido ao efeito causado pela manipulação do botão de comando, que, neste caso, seria uma variável manipulada.

2.2 Controle de processos?

A palavra “controlar” é bastante usada na vida cotidiana para as mais diversas situações: falamos em controlar os gastos, em controlar o peso, em controlar o colesterol etc. Controlar, então, significa tomar algumas ações visando causar um determinado efeito em uma propriedade ou situação de nossas vidas. Por exemplo, para “controlarmos” nosso peso, devemos tomar como ação a ingestão de uma determinada quantidade de alimento que esteja de acordo com nossa rotina de vida e com o peso que desejamos ter. Assim, se consideramos o nosso organismo como um processo que transforma os alimentos que ingerimos em energia e aumento de peso, devemos manipular a quantidade de alimento que ingerimos para podermos ter como “resultado” o peso desejado.

Com base no exemplo anterior, podemos agora introduzir, intuitivamente, algumas ideias importantes associadas ao controle de processos. Para controlar nosso peso, precisamos medi-lo. Para tal, podemos usar uma balança. Conhecendo nosso peso, prosseguimos comparando-o com o peso que gostaríamos ter, ou seja, com um valor de “referência” que definimos previamente, segundo algum critério. Dependendo da diferença entre o peso medido e o desejado, tomaremos uma decisão, que será uma “ação de controle”. Usaremos, para a decisão desta ação, seguindo alguma lógica baseada na “matemática de uma dieta”. Finalmente, esta ação de controle será executada quando preparamos a comida que será ingerida. Neste passo final, manipulamos uma variável (alimentos ingeridos) para afetar o processo e tentar “levar nosso peso ao valor desejado”.

A Figura 2.6 mostra um diagrama desse sistema de controle. Na sequência, detalharemos cada uma das operações desse diagrama com rigor matemático, mas, neste momento, podemos destacar que observamos três etapas fundamentais para o processo: a medida, o controle e a atuação.

De forma geral, controlar um processo significa definir determinadas

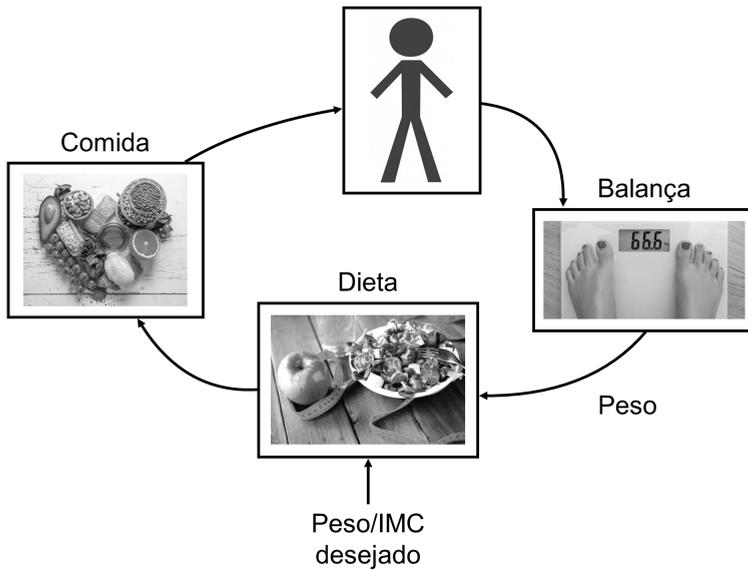


Figura 2.6 – Esquema para controle de peso/IMC.

ações a serem executadas por meio das variáveis manipuláveis, de tal forma que possamos conseguir com que os produtos ou variáveis do processo cumpram determinadas condições ou apresentem determinadas propriedades. E para auferir que os objetivos estão sendo cumpridos é que usamos as medidas das variáveis de interesse.

Para o exemplo do processo de aquecimento de água em uma panela, controlar o processo significa determinar de que forma manipulamos a entrada de gás no fogão (pela posição do botão) para conseguirmos uma determinada temperatura da água, geralmente em um determinado tempo. Ressaltamos que aquecer a água a uma dada temperatura pode não ser uma solução satisfatória para o usuário se demoramos muito tempo para chegar a essa temperatura desejada. O conceito de controlar um dado processo, embora simples, está diretamente associado aos objetivos que devem ser alcançados.

Engenheiras e engenheiros de controle devem ser capazes de entender e projetar sistemas de controle para os mais variados tipos de processos, sejam estes industriais ou cotidianos; devem saber projetar sistemas de controle

de tal forma que certos requisitos possam ser atendidos.

Esses requisitos, denominados “requisitos de controle”, podem ser divididos em cinco categorias principais, tal como é apresentado a seguir:

1. **Requisitos de custo-benefício:** sistemas de controle podem ser projetados para garantir que o processo mantenha algum nível especificado de custo-benefício. Na prática, a grande maioria dos processos deve ser controlada de tal forma que seu retorno econômico seja maior que seu custo. Em um sistema de geração de energia fotovoltaica, um exemplo de um requisito de custo-benefício é que o custo de instalação dos painéis deve ser dirimido pela economia na conta elétrica em um prazo máximo de alguns anos.
2. **Requisitos de segurança:** a segurança de processos industriais é sempre uma prioridade, principalmente para diminuir o risco de acidentes. Dessa forma, muitos sistemas de controle são projetados para que situações de falha, panes e paradas forçadas sejam evitadas. Em uma pequena caldeira, como no exemplo da Figura 2.4, devem ser garantidos níveis seguros de temperatura e pressão, de tal forma que explosões nunca ocorram.
3. **Regulação ambiental:** questões ambientais são frequentemente levadas em conta para o funcionamento adequado de processos. Os sistemas de controle devem garantir, por exemplo, que o descarte de um certo material na natureza ou a reintrodução desse material em alguma etapa intermediária do processo sejam feitos de acordo com a legislação vigente. Na indústria do curtume, por exemplo, utiliza-se a pele do gado para a produção de roupas e materiais de couro. Esse tipo de processo costuma gerar uma grande quantidade de resíduo orgânico, que deve ser descartado de forma adequada.
4. **Restrições operacionais:** restrições da operação adequada do próprio

processo devem ser levados em conta no projeto de sistemas de controle. Essas restrições são mecânicas e físicas (inerentes ao processo em si) ou normativas. Quanto às primeiras, estas dizem respeito aos limites reais da operação, ou seja, quando se pode aumentar ou diminuir uma determinada variável de sistema: não se pode ultrapassar as cargas máximas preestabelecidas de uma máquina ou planejar ter mais quantidade de matéria-prima do que o disponível. Quanto às segundas, deve-se observar o conjunto de normas (internas ou externas) que regem o tipo de atividade que se realiza no processo. Portanto, os processos devem ser controlados sempre de tal forma que essas normas sejam respeitadas. Em uma indústria cerâmica, por exemplo, deve-se definir qual é a temperatura máxima dentro do forno de queima, de tal forma que as peças não percam resistência mecânica por temperatura excessiva.

5. **Requisitos de desempenho:** por fim, um sistema de controle sempre deve ser projetado de tal forma que o processo controlado obtenha um comportamento de acordo com um desempenho pré-especificado. Por exemplo, um sistema de controle de um carro autônomo deve garantir que o carro trafegue de acordo com a rota planejada pelo usuário, e que os tempos de chegada nos diferentes pontos sejam cumpridos. De forma geral, os requisitos de desempenho são referentes, entre outros, à otimização da operação processo, à supressão de efeitos não desejáveis causados por perturbações externas, à manutenção da estabilidade do processo e ao cumprimento de requisitos temporais (tempo de chegada a uma dada condição, por exemplo).

2.3 Entendendo o controle de processos

Considerando as cinco categorias de requisitos de controle expostas na antecedência, os processos devem ser controlados de tal forma que estas

possam ser, de fato, garantidas. Para tal, os processos controlados devem ser monitorados e intervenções devem ser feitas de forma autônoma e “inteligente”. Vamos, então, formalizar alguns desses conceitos por meio do diagrama de blocos apresentado na Figura 2.7.

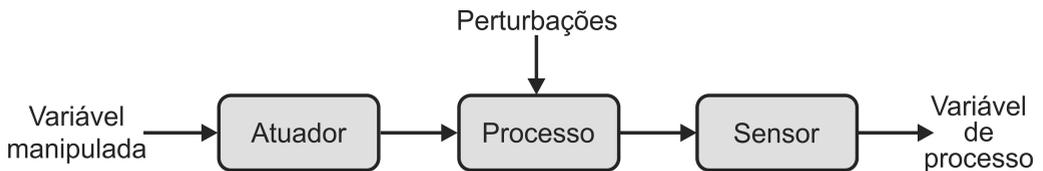


Figura 2.7 – Diagrama de blocos: atuador, processo, sensor.

Nessa figura, estão indicadas várias variáveis e alguns elementos que estão presentes em todos os processos. A “variável de processo”, também denominada “variável controlada”, representa alguma propriedade do produto do processo que desejamos manter sob controle, por exemplo, uma temperatura de um fluido, uma velocidade de um ventilador, uma quantidade de açúcar produzida por hora etc. Para observarmos ou sabermos o estado dessa variável, precisamos, na maioria dos casos, de um sensor ou medidor (por exemplo, um termômetro para medir um sinal de temperatura). A “variável de controle”, também denominada “variável manipulada”, representa a variável que deve ser manipulada pelo operador ou pelo sistema de controle automático. Para tal, precisamos de um elemento atuador, que “conecta” a manipulação ao processo. Por exemplo, quando giramos o botão de acionamento de um fogão, existe uma válvula ligada a esse botão (atuador) que permite a passagem do gás pela tubulação até a chama. Como discutimos, a manipulação da variável de controle tem como objetivo garantir que a variável de processo respeite os requisitos de controle, e isso deve ser realizado e garantido a despeito de possíveis perturbações. Essas perturbações são as variáveis que afetam o resultado do processo, mas que não podemos manipular.

Formalizaremos estes conceitos e citaremos alguns exemplos adicionais:

- **Variável de controle** ou **variável manipulada** é a variável do sistema que o operador ou controlador manipula para causar um efeito sobre a variável de processo.
- **Variável de processo** ou **variável controlada** é a variável física do processo que representa uma característica de interesse do processo e que será afetada pela manipulação da variável de controle.
- **Perturbações** são as variáveis que modificam de forma direta ou indireta o comportamento do processo alterando a variável de processo. Não há como manipularmos uma perturbação. De forma geral, as perturbações de um processo são variáveis exógenas (secundárias) ao sistema de controle, tal como atrito, resistências em geral, variações de temperatura externa, vibrações, variáveis não identificáveis, carga ou torque externo, falhas e ruídos (tanto no sinal de controle quanto na variável de processo).

Ainda, as definições dos blocos referentes à atuação e à medição do processo devem ser apresentadas:

- **Atuador:** é o componente capaz de transformar a variável de controle (que geralmente é de baixa potência) em uma grandeza capaz de modificar o processo (com maior potência). Por exemplo, uma válvula industrial que controla a vazão de água em uma tubulação que alimenta um tanque é, de fato, um atuador, visto que ela recebe um sinal elétrico que é transformado em um movimento mecânico para estrangular a passagem de fluido e, conseqüentemente, reduzir a vazão de água que entra no tanque, desta forma fazendo o nível de água no tanque variar. Uma válvula mecânica manual também é um atuador que permite ao operador usar a posição da alavanca da válvula para modificar a vazão na tubulação.

- **Sensor:** é o componente capaz de traduzir uma grandeza física em outra que possa ser interpretada pelo sistema de controle (geralmente uma tensão ou corrente elétrica), ou em uma visualização gráfica que possa ser compreendida pelo operador. Um termopar, por exemplo, é um sensor de temperatura que transforma a variação de temperatura do líquido no qual ele está imerso em um valor de tensão elétrica. A temperatura também pode ser medida com um termômetro de mercúrio, que apresenta para o usuário uma variação visual do nível de uma coluna de mercúrio dependendo da temperatura que está sendo medida.

Um detalhe importante deve ser comentado em relação às diferentes nomenclaturas usadas na academia e na indústria para as variáveis e elementos de controle. Na indústria, utilizam-se tanto os termos variável de controle quanto variável manipulada para a atuação; já na academia, é mais usual usarmos a denominação “variável de entrada” (ou somente “entrada”). A variável de interesse, ou que se deseja controlar, é denominada, no contexto industrial, variável de processo; na academia, é mais usual utilizarmos o termo “saída do processo”(ou somente “saída”).

Esta denominação de entradas e saídas de um processo é muito associada ao uso do diagrama de blocos como representação matemática do processo, mas devemos ter cuidado quando usamos esta terminologia, pois a saída do processo, do ponto de vista do controle, não é necessariamente a saída do produto do processo. Por exemplo, em um sistema de controle de temperatura de água, a saída física do sistema é a água quente, mas a variável de processo, em termos de controle, é a temperatura da água.

Na sequência, apresentaremos alguns exemplos de processos para que possamos identificar os elementos e as variáveis envolvidas.

2.3.1 Exemplos de processos e suas variáveis

Exemplo 6 *Na Figura 2.8, apresentamos um chuveiro elétrico residencial. Este aparelho é usado para aquecer a água do banho mediante a transformação de energia elétrica em energia térmica. O chuveiro possui no seu interior um pequeno tanque que recebe a água fria e no qual está alojada uma resistência elétrica. A água, passando por este pequeno tanque, é aquecida pelo calor gerado pelo resistor e sai do chuveiro com uma temperatura maior que a da entrada. Esta temperatura depende de quanta potência é dissipada no resistor elétrico e por quanto tempo a água permanece dentro do pequeno tanque. O chuveiro é capaz de elevar a temperatura da água em um dado incremento e, portanto, o valor final desta temperatura, na saída, será igual à soma desta variação com a temperatura da água que entra no pequeno tanque.*

Neste processo, podemos diretamente definir a temperatura da água que sai do chuveiro como a variável de processo, pois esta é a variável de interesse que é controlada pela pessoa que toma banho. A temperatura de entrada da água é, sem dúvidas, uma perturbação para este processo, uma vez que não temos controle sobre ela e suas variações afetam a variável de processo. Podemos considerar duas variáveis diferentes como a variável manipulada. Caso o chuveiro não possua uma potência elétrica variável, a única variável de controle é a vazão da água, regulada por meio de um registro (torneira). Ressaltamos que essa variável tem um efeito inverso sobre a temperatura, pois, ao aumentarmos a vazão de água, diminuiremos a temperatura de saída da água, pois a água passará mais rápido pelo pequeno tanque, se mantivermos todas as outras variáveis do processo constantes. No caso de chuveiros com potência elétrica variável, temos a possibilidade de usar duas variáveis controladas, visto que a própria potência também pode ser considerada uma variável manipulada. Na prática, as pessoas que tomam banhos nestes chuveiros utilizam, normalmente, ambas as variáveis controladas para regular o processo, pois, desta forma, é possível regularmos

a temperatura da água e também a vazão, dentro de certos limites, para um banho agradável.

Vamos, agora, identificar neste processo alguns elementos adicionais. O chuveiro geralmente não tem sensor de temperatura, pois usamos o nosso próprio corpo para verificar a temperatura da água, sem considerar o valor exato, mas apenas uma sensação de temperatura agradável. Um chuveiro mais sofisticado poderia possuir um termômetro com visor digital que indicasse a temperatura da água. Em termos de atuadores, podemos identificar dois neste processo: o registro de água (que atua como uma válvula), que nos permite modificar a vazão e, conseqüentemente, a temperatura da água, e o acionamento mecânico (botão) do chuveiro, que nos permite modificar a potência elétrica da resistência.



Figura 2.8 – Chuveiro elétrico com potência variável.

Exemplo 7 A Figura 2.9 mostra uma ilustração de um sistema de suspensão automotiva, composta por um amortecedor de amortecimento variável e uma mola de rigidez constante. O objetivo deste sistema é minimizar a aceleração vertical do chassi, de tal forma a melhorar o conforto dos passageiros, a despeito da estrada sobre a qual o veículo trafega. Logo, a aceleração vertical do carro é a variável de processo para este sistema, a variável de controle é a força dissipativa imposta pelo amortecedor. O atuador, neste processo, é o amortecedor de amortecimento variável, e o sensor é o

transdutor que mede a aceleração vertical instantânea do carro, acoplado ao centro de massa do veículo. A estrada e suas características verticais (buracos, solavancos etc.) representam as perturbações deste processo.

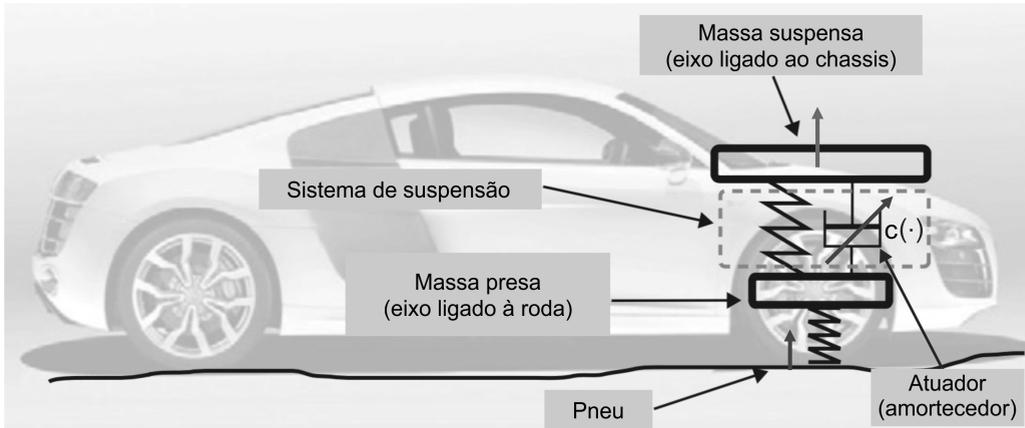


Figura 2.9 – Sistema de suspensão automotiva.

Exemplo 8 Na Figura 2.10, apresentamos uma representação gráfica de uma caldeira a gás, usada industrialmente para esquentar água. Esse sistema é composto por um queimador a gás e uma tubulação interna, pela qual circula água. Essas tubulações estão dispostas de tal forma que a chama produzida pela queima do gás esquente a água.

O objetivo desse processo é aquecer o fluxo de água que entra na tubulação a uma dada temperatura mediante a queima do gás enviado ao queimador. Portanto, a temperatura da água de saída é a variável de processo (T , na figura), e a abertura da válvula que controla a vazão de gás (" V_2 ", na figura) é a variável de controle. Assim como no caso do chuveiro residencial, a temperatura da água que entra na tubulação da caldeira e a sua respectiva vazão modificam a temperatura de saída da água e, ao considerarmos que não temos como controlá-las, estas são as perturbações do processo.

Na Figura 2.10, podemos observar os atuadores e sensores deste processo, representados, respectivamente, pelas válvulas (" V_2 " e " V_3 ") e mediadores de temperatura (símbolo "TT", do inglês temperature transducer) e

vazão (símbolo “FT”, do inglês flow trasducer). Notamos que este sistema tem sensores para a variável de processo, mas também para outras variáveis. Neste caso, a vazão de gás e de água entrando no sistema também são variáveis medidas, assim como a temperatura da água que entra no sistema. Este tipo de medida auxiliar é importante para melhorar o desempenho do sistema de controle, como veremos em próximos capítulos.

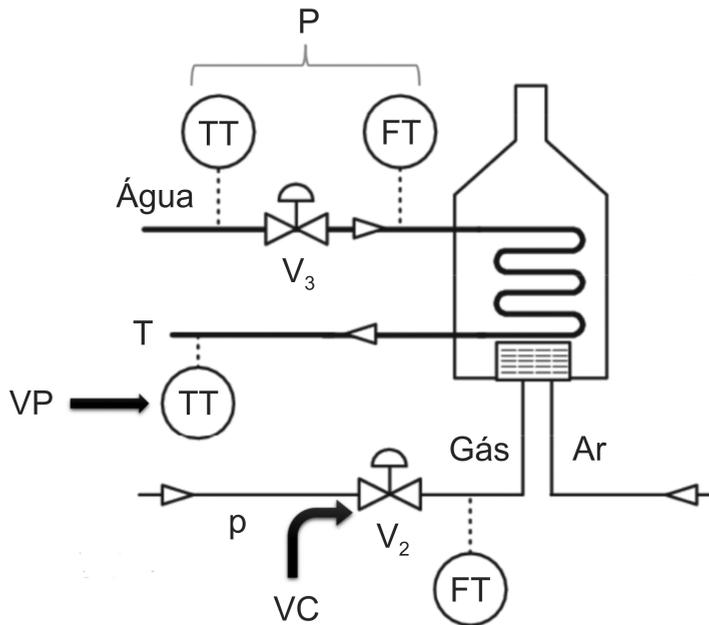


Figura 2.10 – Caldeira a gás com controle de temperatura (variável de processo) usando a vazão de gás (variável de controle).

Ainda, cabe ressaltarmos que, neste processo, duas válvulas servem como atuadores para as vazões de gás e água. Ademais, existem sensores que medem a temperatura e vazão da água produzida. Portanto, poderíamos considerar a caldeira como um sistema no qual atuamos simultaneamente em duas variáveis de controle para controlar simultaneamente duas variáveis de processo (vazão e temperatura da água na saída da caldeira). Este tipo de situação é bastante comum na prática, e recebe o nome de sistema multivariável. Discutiremos em mais detalhes este tópico na próxima seção.

2.3.2 Processos monovariáveis e multivariáveis

Dependendo da quantidade de variáveis de processo e de controle que são relevantes nos processos, estes podem ser categorizados como:

- Monovariáveis ou entrada única saída única (SISO, do inglês *single input single output*). Estes são aqueles processos que têm apenas uma variável de processo e uma variável de controle. Neste caso, todas as outras variáveis que modificam o produto final de um processo SISO são perturbações.
- Multivariáveis ou múltiplas Entradas múltiplas saídas (MIMO, do inglês *multiple inputs multiple outputs*). Estes são aqueles com mais de uma variável de processo e/ou mais de uma variável de controle. Ressaltamos que estes processos possuem, necessariamente, mais de um sensor e/ou atuador.

Além do exemplo da caldeira anteriormente mencionado, listamos aqui alguns outros exemplos de processos MIMO. O processo associado ao controle de voo de um avião também é do tipo MIMO, uma vez que precisamos controlar, no mínimo, a velocidade do avião, sua altitude e seu eixo de inclinação horizontal. Neste caso, se atua por meio da potência dos motores e dos comandos das asas e leme (*flaps*). Os sistemas de cultivo em estufas necessitam do controle adequado da umidade e da temperatura dentro da estufa para possibilitar as condições climáticas mais apropriadas para o crescimento dos alimentos/plantas. Na prática, o controle dessas estufas é realizado a partir do aquecimento ou do resfriamento do ambiente e da injeção de vapor de água no ar. Este é um processo com duas variáveis de processo (temperatura e umidade) e várias variáveis manipuladas (potência do aquecedor, abertura de janelas, injetores de água).

2.3.3 Controle em malha fechada manual e automático

A estrutura de implementação de sistemas de controle mais usada na indústria (e na pesquisa acadêmica) é a denominada de estratégia de “controle em malha fechada”, ou controle “realimentado”.

O termo malha fechada refere-se ao esquema de implementação ilustrado por meio do diagrama de blocos da Figura 2.11. Comparando esse diagrama com a Figura 2.7, observamos que um novo bloco, referente ao controle, é adicionado. Esse bloco recebe uma medição da variável de processo proveniente de um sensor e, por uma etapa de processamento, envia ao atuador uma variável manipulada, que interfere no processo por meio do atuador. Nesta estrutura de controle, “fechamos uma malha”, por meio do bloco de controle, entre a variável de processo e a variável manipulada (saída e entrada do processo, no que diz respeito à Figura 2.11). Geralmente, este bloco de controle recebe (ou usa internamente) um sinal de referência, usado para expressar requisitos de operação para a variável de processo.

Os sistemas de controle em malha fechada também são chamados de realimentados devido a uma alimentação da entrada do processo (variável manipulada) feita com base em informações e sua saída (variável de processo). Em inglês, o termo usado para realimentação é *feedback* e, para sistemas realimentados, é *feedback systems*.

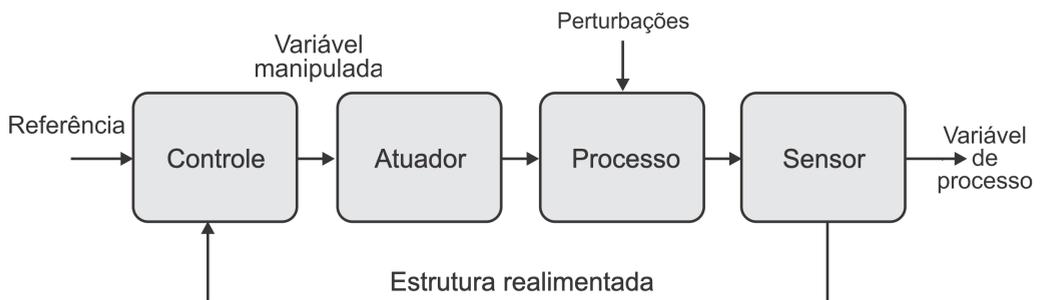


Figura 2.11 – Diagrama do sistema de controle realimentado: atuador, processo, sensor e controlador.

Podemos, agora, lembrar-nos do exemplo do sistema de controle de peso

de uma pessoa (Figura 2.6), ilustrado no início deste capítulo. Associando os blocos da estrutura de controle realimentada, da Figura 2.11, àquele problema, no qual a própria pessoa atuava no processo ao ingerir uma comida correspondente a um certo processamento (dieta), que era determinada em função da medida do peso da pessoa (por meio da balança) e de um valor de peso/IMC desejado (referência). Segundo a nomenclatura de controle de processos, dizemos que este sistema de controle é do tipo **manual**, uma vez que uma pessoa ou operador humano toma as decisões de controle a partir da observação da saída do processo (peso medido) e manipula, manualmente, o atuador do sistema (neste caso, a comida ingerida). Neste exemplo de controle do peso, o valor mostrado na balança (medição com sensor) é observado pela pessoa, que, então, decide qual comida deverá ingerir, de acordo com o peso observado, o peso/IMC desejado e a dieta (controlador). O atuador, neste caso, representa a preparação e a ingestão da comida da dieta determinada. Sistemas de controle em malha fechada sempre podem ser representados por meio de um diagrama de blocos como o da figura anterior. Entretanto, ressaltamos que, às vezes, alguns elementos físicos se confundem ou se misturam; há casos em que o atuador, o sensor e o controlador estão juntos em um único elemento/equipamento. Apresentaremos um exemplo muito simples de controle em malha fechada no qual isso acontece.

Exemplo 9 *Considere uma caixa-d'água residencial com uma boia mecânica instalada na tubulação de entrada de água na caixa. A boia é usada para controlar o nível de água na caixa, de forma a deixar entrar mais água quando há consumo para que o nível sempre seja mantido em uma determinada altura. A boia possui, no seu extremo, uma bola plástica que, neste caso funciona, como um sensor: o nível de água é traduzido em termos da posição da haste da boia. Esta haste é conectada, por sua vez, a uma válvula (que é fisicamente parte da mesma boia) que regula a passagem de água para dentro da caixa-d'água, dependendo da posição da haste. Note que a*

boia mecânica é, ao mesmo tempo que sensor, também o atuador neste processo, que manipula a entrada de água na caixa. Finalmente, a regulação mecânica e a geometria do conjunto bola-haste-válvula definem a estratégia de controle, isto é, qual deve ser a abertura da válvula para cada posição da bola plástica, que se movimenta flutuando dentro da água da caixa. Boias de diferente tamanho e forma vão executar diferentes estratégias de controle. Portanto, fica nítido que a boia mecânica mede, controla e atua no processo de regulação de nível na caixa-d'água, configurando-se como um sistema de controle automático operando malha fechada: há uma realimentação entre o nível de água medido e a abertura da válvula de entrada de água na caixa.

Este sistema de controle é considerado **automático**, uma vez que ele atua de forma independente e autônoma, sem necessidade de que um operador humano realize qualquer ação sob a válvula após a instalação e ajuste do sistema. Ressaltamos que uma operação de controle manual deste processo poderia ser implementada de forma simples, pela implementação de uma torneira na entrada de água na caixa-d'água e de um indicador de nível. Para tanto, um operador deveria ficar observando o nível de água na caixa para decidir quando (e quando não) deve abrir a torneira, para que a água consumida seja repostada. Note que a estratégia de controle continuaria sendo em malha fechada, uma vez que o operador toma as decisões da variável manipulada com base na variável de processo, mas a operação é manual.

Na indústria de processos, podemos encontrar diversos sistemas que operam tanto em modo manual quanto em modo automático, dependendo das necessidades e dos requisitos de controle. Entretanto, ressaltamos que os processos têm sido cada vez mais automatizados, pois, nesta condição, operam com maior repetibilidade, precisão e confiabilidade nas suas ações, quando comparadas às operações resultantes de uma operação manual.

A realimentação regula naturalmente muitos processos físicos e biológicos, nos quais a malha “é fechada” de forma natural. Em sistemas de controle, tanto de operação manual quanto automático, tentamos reproduzir

esta estrutura de implementação para conseguirmos melhorar o comportamento do processo.

O controle realimentado manual, no qual um operador “fecha a malha”, é usado praticamente em todas as nossas ações do dia a dia. Por exemplo, ao fecharmos uma janela porque sentimos frio, realizamos o controle de temperatura do ambiente, medindo a temperatura com nosso corpo (sensor) e tomando a decisão de fechar a janela (controle) com nossas mãos (atuador).

Esta operação de controle em malha fechada é também exemplificada com outras situações do dia a dia. Para pegarmos um objeto com nossas mãos, usamos uma estratégia realimentada, uma vez que nosso cérebro (controle) decide a posição correta para nossas mãos e braços (atuadores) com base em informações da nossa visão (sensor). Aproximamos nossas mãos do objeto de acordo com base em uma lei de controle estipulada pelo cérebro, que processa a informação da distância entre o objeto e nossas mãos.

De forma oposta ao controle em malha fechada, também existe o que denominamos controle em malha aberta. Nesse tipo de implementação, a atuação sobre o processo controlado é feita sem o uso de informação sobre sua saída. Por exemplo, no caso de estudo do controle de nível da caixa-d'água, uma implementação em malha aberta poderia ser feita por meio de uma torneira na entrada de água, cuja operação consistiria em abrir a torneira em uma dada posição, deixando o nível de água na caixa variar livremente. Se a quantidade de água entrando na caixa pela torneira for maior que o consumo, o nível aumentará. A ação de controle (definida pela abertura constante da torneira) não é influenciada pela variável de processo (nível de água). A Figura 2.12 mostra um diagrama de blocos referente a um sistema de controle operando em malha aberta, no qual o sinal de controle é definido sem uso da informação da variável de processo, apenas com base em sinais predefinidos, como uma variável de referência que define a abertura da torneira, no exemplo anterior. Note que as variáveis envolvidas neste esquema são as mesmas da implementação em malha fechada.

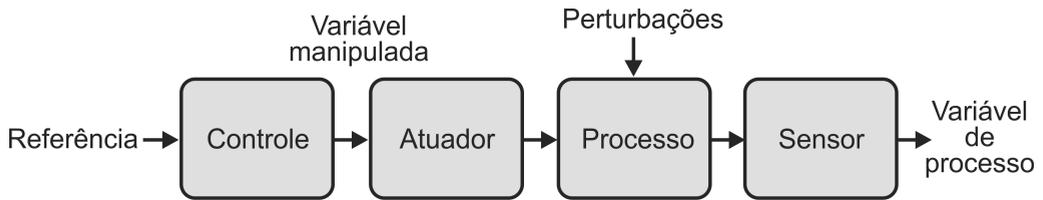


Figura 2.12 – Diagrama do sistema de controle em malha aberta: atuador, processo, sensor e controlador.

Podemos notar várias vantagens da operação em malha fechada em face das operações em malha aberta quando buscamos um objetivo específico para o funcionamento do processo. Muitas destas vantagens serão discutidas ao longo deste livro, em maiores detalhes a partir do Capítulo 7.

Por exemplo, para enchermos a caixa-d'água rapidamente até um dado nível, é válido abrimos totalmente a torneira em um momento inicial, quando o nível é muito aquém do valor desejado e, conforme o nível aproxima-se deste valor, podemos progressivamente fechar a torneira. Note que a lei de controle que define o valor da vazão de entrada de água na caixa (abertura da torneira) depende da medida do nível de água na caixa, que pode variar em qualquer momento que houver consumo de água. Ou seja, sistemas de controle em malha fechada são menos afetados por perturbações, uma vez que a lei de controle é dada conforme a medição instantânea da variável de processo, orientada na busca de um objetivo predefinido. Já por meio de uma implementação em malha aberta, não poderíamos realizar a regulação do nível de maneira tão simples, ao menos que soubéssemos, de antemão, como seriam as variações do consumo de água ao longo do tempo.

Por outro lado, o controle em malha aberta pode ser útil para complementar uma implementação em malha fechada, visando o desempenho do controle de um processo com perturbações mensuráveis ou quando conhecemos muito bem o processo e podemos prever seu comportamento futuro. Um exemplo deste tipo de operação é o controle conhecido como antecipativo ou pré-alimentado (*feed-forward*, em inglês), no qual, uma vez conhecida

a perturbação (ou como o processo se comporta frente a ela), atuamos, em malha aberta, para tentar antecipar as variações da variável de processo. Outro caso é quando manipulamos a variável manipulada do processo antecipando o que vai acontecer com a variável de processo. Apresentaremos um exemplo do dia a dia que ilustra o uso do controle antecipativo, em malha aberta, e do controle realimentado em um mesmo processo, ambos implementados de forma manual.

Exemplo 10 *Considere o caso de uma pessoa tomando banho. Seu banho é em uma ducha elétrica, na qual a temperatura é regulada pela vazão de água, determinada pela abertura de um registro. Essa pessoa conhece bem o funcionamento da ducha e, pela experiência prévia acumulada na operação dela, sabe que precisa abrir o registro até uma certa posição para obter, aproximadamente, a temperatura desejada para um banho agradável. Desta forma, sem medir a temperatura da água, a pessoa realiza uma primeira ação de controle em malha aberta, de forma antecipativa, abrindo o registro até a posição predeterminada, prevendo que esta abertura será suficiente para que a água seja aquecida até uma dada temperatura. A pessoa também sabe que com essa operação, geralmente, não vai conseguir atingir a temperatura ideal com precisão e, portanto, após alguns segundos da primeira ação, inicia uma operação de controle em malha fechada: conforme mede a temperatura da água com sua mão (usada como sensor), a pessoa decide quanto deve aumentar ou diminuir a vazão de água (abrir ou fechar o registro) para que a água atinja a temperatura desejada para um banho quente. Esta operação em malha fechada requer uma atuação mais lenta e de pequenos movimentos para um ajuste adequado da temperatura. Neste exemplo de controle manual, a combinação de uma ação rápida, em malha aberta, antecipativa e de uma mais lenta, realimentada, permite a operação adequada do processo de regulação da temperatura da água de um chuveiro elétrico para um bom banho.*

O exemplo anterior ilustra como diversas formas de controle podem ser

usadas e associadas de tal forma a obtermos determinadas condições para a operação de um processo. Para tal, entretanto, ressaltamos que conhecimento do funcionamento do processo é importante para uma boa solução do problema. No léxico da engenharia de controle, pretendemos entender e descrever matematicamente os fenômenos associados ao funcionamento dos processos (por meio de modelos), de tal forma que possamos elaborar leis de controle automático que, implementadas em dispositivos eletrônicos ou eletromecânicos, permitam a operação autônoma dos mais diversos processos ou sistemas. Nos debruçaremos, neste livro, sobre este assunto ao longo dos capítulos seguintes.

2.4 Comentários finais

Este capítulo teve como objetivo introduzir de forma intuitiva alguns conceitos relacionados com os processos e seus sistemas de medição, atuação e controle. Um dos principais aspectos desta análise é a consideração dos sistemas como processos com variáveis associadas e entender de que forma podemos interagir com eles para atingir determinados objetivos. O segundo conceito muito importante apresentado, também intuitivamente, é o de controle em malha fechada, que permite atuar em um processo com base em uma lei de controle que depende da observação da sua saída. Finalmente, vimos, usando alguns exemplos, como a implantação de um sistema de controle em um processo cria a possibilidade de modificar seu comportamento, na busca de objetivos de operação. Nos próximos capítulos, entraremos em maiores detalhes em vários aspectos aqui discutidos.

2.5 Leitura complementar

A maioria dos livros de teoria de controle realimentado ou de controle de processos apresentam nos seus capítulos iniciais ideias básicas de siste-

mas de controle e casos simples do funcionamento de processos. Em geral esses livros são orientados a estudantes com conhecimento de fundamentos matemáticos mais avançados dos que os usados neste livro. Assim, para quem estiver interessado em se aprofundar no assunto sugerimos algumas referências que utilizam esta abordagem matemática mais complexa.

- FRANKLIN, G.; POWELL, J.; WORKMAN, M. *Feedback Control of Dynamic Systems*. 5. ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2002.
- STEPHANOPOULOS, G. *Chemical process control*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall International, 1984.
- OLLERO, P.; CAMACHO, E. F. *Controle e Instrumentação de processos químicos*. [S.l.]: Editora Sínteses, 2006.

Para uma leitura dos conceitos de controle sem necessidade de maior aprofundamento matemático, sugerimos:

- ALBERTOS, P.; MAREELS, I. *Feedback and control for everyone*. [S.l.]: Springer, 2010.



NESTE LIVRO, OS ELEMENTOS BÁSICOS DA TEORIA DE CONTROLE DE PROCESSOS SÃO DISCUTIDOS COM UMA ABORDAGEM VOLTADA PARA INICIANTES. TODAS AS ANÁLISES SÃO DESENVOLVIDAS INTEGRALMENTE NO DOMÍNIO DO TEMPO, PODENDO SER COMPREENDIDAS APENAS COM CONHECIMENTOS PRÉVIOS BÁSICOS DE FÍSICA E CÁLCULO.

As principais estratégias de controle usadas na prática industrial são detalhadas neste livro: controle *on-off*, P, PI e PID. Aspectos práticos relacionados à implementação dessas técnicas também são detalhados, como a presença de perturbações, o ruído de medição e a saturação dos atuadores. Todas as etapas necessárias para o projeto de um sistema de controle básico são discutidas, desde a análise dos dados experimentais até a síntese da lei de controle e sua respectiva implementação em malha fechada. O livro também dispõe de diversos exercícios, problemas resolvidos e atividades propostas, além de roteiros para ensaios práticos que podem ser desenvolvidos em um kit experimental de baixo custo, proposto como uma plataforma de validação de técnicas de controle para iniciantes.



www.blucher.com.br

Blucher



Clique aqui e:

VEJA NA LOJA

Introdução ao Controle de Processos

Julio Elias Normey-Rico, Marcelo Menezes Morato

ISBN: 9786555061581

Páginas: 708

Formato: 17 x 24 cm

Ano de Publicação: 2021
