

ANA MARIA FRATTINI FILETI

# TUDO SOB(RE) CONTROLE

Fundamentos e estudos de casos



**Blucher**

Ana Maria Frattini Fileti

# TUDO SOB(RE) CONTROLE

Fundamentos e Estudos de Casos

*Tudo sob(re) controle: fundamentos e estudos de casos*

© 2023 Ana Maria Frattini Fileti

Editora Edgard Blücher Ltda.

*Publisher* Edgard Blücher

*Editores* Eduardo Blücher e Jonas Eliakim

*Coordenação editorial* Andressa Lira

*Produção editorial* Lidiane Pedroso Gonçalves

*Diagramação* Villa

*Preparação* Ana Maria Fiorini

*Revisão* Helena Miranda

*Capa* Laércio Flenic

*Imagem da capa* iStockphoto

# Blucher

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

Segundo o Novo Acordo Ortográfico, conforme 6. ed.  
do *Vocabulário Ortográfico da Língua Portuguesa*,  
Academia Brasileira de Letras, julho de 2021.

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

Fileti, Ana Mari Frattini  
Tudo sob(re) controle : fundamentos e estudos de casos /  
Ana Maria Frattini Fileti. - São Paulo : Blucher, 2023.  
212 p.

Bibliografia  
ISBN 978-65-5506-662-3

1. Engenharia química 2. Indústria química – Controle de  
processo I. Título

22-2260

CDD 660

Índice para catálogo sistemático:  
1. Engenharia química

# CONTEÚDO

<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
1.1 A quarta revolução industrial	15
1.2 Instrumentação em plantas químicas	17
<b>CAPÍTULO 2 – ESTUDO DE CASO 1: AQUECIMENTO DE ÁGUA EM CHUVEIRO ELÉTRICO</b>	<b>29</b>
2.1 Conceitos básicos de controle de processos	29
2.2 Apresentação do estudo de caso 1: aquecimento de água em chuveiro elétrico	31
2.3 A organização das informações em diagramas	32
Exercícios resolvidos	34
<b>CAPÍTULO 3 – ESTUDO DE CASO 1: OS GANHOS E A EQUAÇÃO DE CONTROLE PROPORCIONAL</b>	<b>39</b>
3.1 As não linearidades	43
3.2 Introdução à sintonia do controlador	46
3.3 Conclusões	46
Exercícios resolvidos	47

<b>CAPÍTULO 4 – ESTUDO DE CASO 2: NÍVEL DE LÍQUIDO EM VASOS</b>	<b>51</b>
4.1 Apresentação	52
4.2 Variáveis-desvio e dinâmica de processos	53
4.3 Função de transferência e identificação de processos	54
4.4 Estabilidade	56
4.5 Conclusões	57
Exercícios resolvidos	58
<b>CAPÍTULO 5 – ESTUDO DE CASO 2: A ORDEM DAS EQUAÇÕES E SEUS PARÂMETROS</b>	<b>65</b>
5.1 Sintonia e controladores P, PI e PID	69
5.2 A dinâmica do processo em malha fechada	70
5.3 Conclusões	72
<b>CAPÍTULO 6 – ESTUDO DE CASO 2: A SISTEMATIZAÇÃO DO PROJETO DO CONTROLADOR</b>	<b>73</b>
6.1 Uso do diagrama de blocos e das funções de transferência no projeto	73
6.2 A análise de estabilidade	76
6.3 Conclusões	79
Exercícios resolvidos	79
<b>CAPÍTULO 7 – ESTUDO DE CASO 3: REATOR TANQUE AGITADO CONTÍNUO (CSTR)</b>	<b>89</b>
7.1 Graus de liberdade	90
7.2 Obtenção das funções de transferência via modelagem fenomenológica	91
7.3 Conclusões	96
Exercícios resolvidos	97
<b>CAPÍTULO 8 – ESTUDO DE CASO 3: MALHA DE CONTROLE ALTERNATIVA NO CSTR</b>	<b>109</b>
8.1 Reatores em série ou paralelo: ordem superior	112
8.2 Introdução à resposta inversa	116
8.3 Sintonia a partir do ganho crítico	116

8.4 Conclusões	119
Exercícios resolvidos	119

## **CAPÍTULO 9 – ESTUDO DE CASO 3: CRITÉRIOS DE DESEMPENHO DO CONTROLADOR** **131**

9.1 Conclusões	139
Exercícios resolvidos	140

## **CAPÍTULO 10 – ESTUDO DE CASO 4: CALDEIRA COM ENTRADA DE ÁGUA SUB-RESFRIADA** **155**

10.1 Procedimentos especiais para processos com resposta inversa, elevado tempo morto ou instável em malha aberta	159
10.2 Conclusões	164
Exercícios resolvidos	165

## **CAPÍTULO 11 – SÍNTESE DO PROCEDIMENTO GERAL DE PROJETO DE CONTROLE POR REALIMENTAÇÃO** **177**

11.1 Conclusões	180
11.2 Projeto de controlador	181
Solução do projeto	184

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS** **205**

## **ANEXOS** **207**

Anexo 1: tabela de transformada de Laplace	207
Anexo 2: resposta de um sistema em malha fechada	211

# CAPÍTULO 1

## Introdução

Com o objetivo de contextualizar o conteúdo de “Controle de Processos” no cenário de desenvolvimento tecnológico industrial, abordaremos alguns temas relacionados às três revoluções industriais ocorridas no século XX e também à quarta, ocorrida no século XXI. Para deixar claro que sem instrumentação e sem automação local – motivos da terceira revolução industrial – o controle de processos seria inviável, mostraremos alguns exemplos de monitoramento e/ou controle em plantas-piloto do Laboratório de Controle e Automação de Processos da Faculdade de Engenharia Química (FEQ) da Unicamp.

### 1.1 A QUARTA REVOLUÇÃO INDUSTRIAL

Os principais tópicos a serem aqui abordados são: as quatro diferentes revoluções industriais; os princípios ligados ao conceito de Indústria 4.0; o panorama da era da indústria inteligente no Brasil; assim como mostrar aplicações desses conceitos na indústria; e resumir os benefícios, os desafios e as tendências da área.

A primeira revolução industrial ocorreu nos séculos XVIII e XIX, e foi baseada na introdução de equipamentos mecânicos impulsionados pela máquina a vapor. Ou seja, a energia necessária para a movimentação das engrenagens seria suprida por vapor.

De meados do século XIX até meados do século XX, surgiu a segunda revolução industrial. Nesse período, a novidade era o conceito da divisão de tarefas e também o uso da energia elétrica. Graças a essas mudanças em processos de manufatura, foi possível alcançar a produção em massa ou em larga escala.

A partir da metade do século XX, ocorreu a terceira revolução industrial, com o surgimento e a utilização da eletrônica e, posteriormente, da informática, visando à automação da produção. Apesar de os conceitos serem antigos, muitas empresas no Brasil ainda estão se adaptando a essa terceira fase da revolução industrial.

Ainda é usual, em pleno século XXI, nos depararmos com operações de equipamentos sendo realizadas por operadores humanos, de forma manual. Notamos também que existem ainda muitos registros de operação feitos em papel.

Na quarta revolução industrial, que surgiu na segunda década deste milênio, começaram a ser integrados os sistemas de informação, na área de TI (tecnologia da informação), e os sistemas de automação, na área de TA (tecnologia de automação). Os sistemas passam a ser chamados de ciber-físicos. Estes são sistemas compostos de elementos computacionais colaborativos, visando ao controle de equipamentos ou máquinas físicas. Apesar de os conceitos da “Indústria 4.0” terem surgido para os processos de manufatura, alguns deles podem ser aplicados à indústria de processos químicos. Os vários setores da indústria que se propuseram a adotar os novos conceitos passaram a ficar inteiramente conectados, e então surgiram as fábricas inteligentes.

Seis itens básicos compõem a chamada “Indústria 4.0”: 1. a internet das coisas industriais (IIoT); 2. a abundância de dados (*big data*); 3. o compartilhamento em nuvem (*cloud*); 4. a realidade virtual (*digital twins*); 5. os robôs colaborativos; 6. a impressão tridimensional. A ideia central seria viabilizar a produção em larga escala de produtos individualizados, ou customizados, com elevada precisão e com rastreabilidade. Estamos falando da produção de peças individuais, ou de linhas de montagem. A elevada conectividade, a partir da internet das coisas; a análise sistematizada para a tomada de decisões; e a realidade virtual para simulações prévias permitem que isso ocorra.

A base tecnológica da indústria 4.0 se concentra na junção da tecnologia da informação com a tecnologia de automação. Os vários sensores e atuadores da planta, chamados de instrumentos, conversam com controladores lógicos programáveis locais (CLP). Usando redes, sem fio ou com fio, endereçamento IPv6 e protocolos universais de comunicação (OPC UA), os CLP enviam as informações para o sistema digital de controle, que as envia para a nuvem, alimentando o *big data*. Este contém dados externos e dados internos das indústrias em abundância. Os dados externos podem conter informações de clima, governo, clientes, mercado, cotações, ações, fornecedores etc. Os dados internos são compostos por informações da planta, dos registros da produção, dos indicadores de qualidade, de eficiência, de gastos de energia, de manutenção etc. Usando sistemas analíticos, com o uso de inteligência artificial ou não, são viabilizadas tomadas de decisões mais assertivas, assim como a virtualização dos processos (simulação computacional com realidade aumentada). A rastreabilidade pode ser feita de diversas formas, por exemplo, usando código QR ou etiqueta de rádio frequência (RFID) individual, acoplada a cada peça.

Percebemos a onipresença da TI: tudo está conectado, e os sistemas são colaborativos. Uma máquina pode mandar em outra (M2M) ou ligar/desligar um dispositivo, sem interferência de operador humano. A arquitetura dos sistemas é orientada a serviços com operação em nuvem, possibilitando a produção de peças sob demanda direta do cliente. A tomada de decisões se baseia em conhecimento prévio e a segurança pode ser rastreada.

Tudo é feito em tempo real: as simulações com *digital twin* e as tomadas de decisão. Todos os dados coletados incrementam o banco de dados já existente. Fica muito mais fácil prever falhas e otimizar a cadeia de produção. Usando análise do *big data*, o sistema sabe de antemão os impactos que uma escolha terá no processo produtivo, sem



precisar de interpretação humana. Podemos economizar energia e tempo, pois somente os recursos necessários a determinada tarefa são ativados.

A inteligência para os sistemas da quarta revolução industrial foi impulsionada pelos recursos digitais disponíveis, de forma bastante acessível, nas décadas iniciais do século XXI. A matemática e a teoria da inteligência artificial (IA) surgiram ainda no século XX, mas os recursos computacionais analógicos da época não ofereciam a capacidade e a agilidade necessárias para atuação em tempo real. Os equipamentos digitais com alto poder de processamento e a grande flexibilidade desses equipamentos permitiram a explosão da utilização da IA. Surgiram a computação cognitiva e o aprendizado de máquinas, que são tecnologias capazes de processar informações e de aprender com elas, de forma muito semelhante ao cérebro humano, visando à tomada de decisões automática.

Uma frase muito significativa, que representa o movimento da Indústria 4.0, é: se existe algo mais importante que o conhecimento, é saber como usar esse conhecimento. A grande maioria das metodologias da inteligência artificial é baseada em conhecimento prévio. O movimento é o de levar essas tecnologias para o ambiente de produção industrial para que, com autonomia, ele se torne: mais seguro, mais produtivo, menos dispendioso, produzindo com maior qualidade e respeito ao meio ambiente, ou seja, mais sustentável.

Os principais desafios da quarta revolução industrial são os ligados à cibersegurança, à adequação de legislação, à padronização de linguagem de comunicação computacional e, principalmente, à formação de profissionais qualificados.

Em cursos de engenharia química, entretanto, o conteúdo da disciplina tradicional de controle de processos pertence à terceira fase das revoluções. Sem a aplicação adequada dos conceitos da terceira revolução, não é possível ocorrer a quarta. Os processos da indústria química devem estar instrumentados localmente, na linha produtiva, para viabilizar a aplicação dos conceitos da quarta revolução industrial.

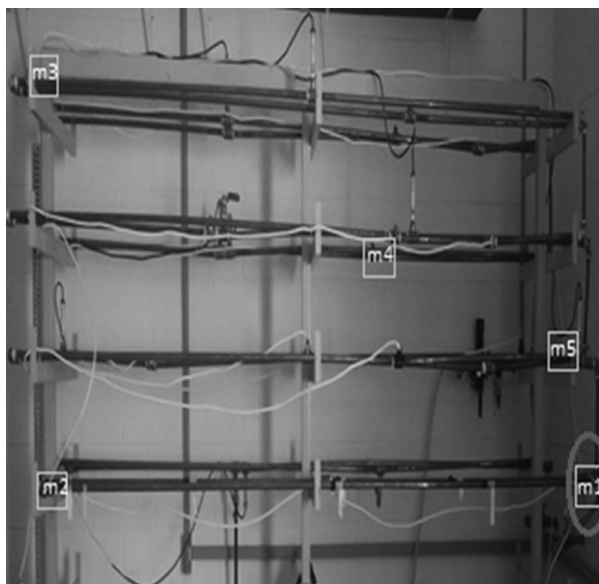
## 1.2 INSTRUMENTAÇÃO EM PLANTAS QUÍMICAS

Nos processos industriais contínuos, típicos de plantas químicas de maior porte, os escoamentos constituem uma parte importante da operação industrial. Os dutos devem ser constantemente monitorados e ações devem ser tomadas para a garantia do escoamento desejado e da segurança operacional da fábrica.

Como exemplo típico no setor de fornecimento de utilidades aos processos, temos as linhas de escoamento gasoso, como as de ar comprimido ou de gás natural. Nessas linhas, de forma corriqueira, encontramos vazamentos nas conexões e em possíveis trincas de desgaste do material do duto, causando gastos de energia desnecessários para compressão, além de severos prejuízos materiais e humanos em casos de explosão ou rompimento total do duto.

Não é incomum observar operador humano circulando próximo aos dutos de ar comprimido para “escutar” o som emitido por vazamentos. Dentre várias possibilidades de monitoramento de gasodutos, encontramos, portanto, a observação de sinais sonoros emitidos pelo próprio escape do gás na tubulação. Na Figura 1.1, observamos uma simulação laboratorial de dutos de cobre para distribuição de gás a baixa pressão, instrumentada com cinco microfones internos (Figura 1.2), que atuam como sensores.

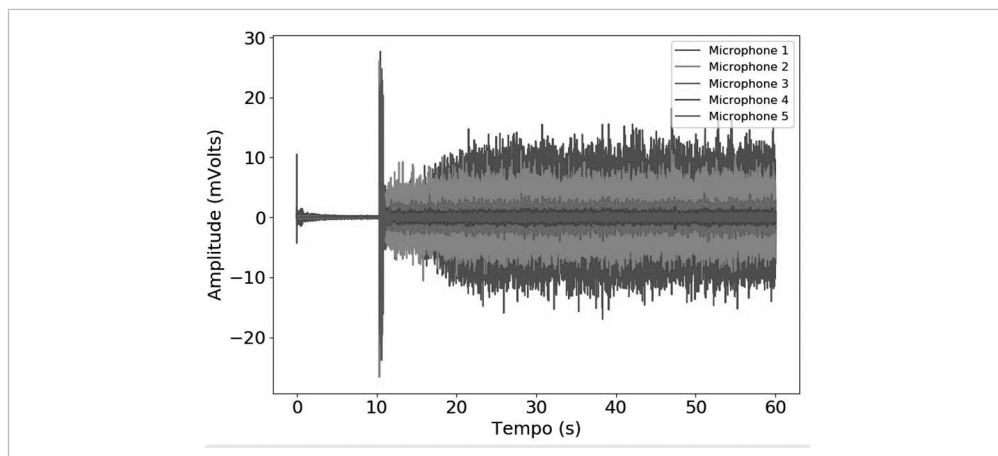
Na Figura 1.3, encontramos a variação da amplitude do sinal acústico de cada microfone com o tempo de gravação. Notamos claramente a diferença do padrão acústico até o tempo de 10 segundos, quando não havia vazamento, e o sinal após 10 segundos, já com vazamento induzido no duto. As amplitudes são diferentes, pois dependem da distância entre o microfone e o vazamento, porém todos os microfones apontam para situação de escape de gás, já que a amplitude do ruído aumenta. Usando técnicas de processamento de sinais, é possível inclusive apontar a localização e a dimensão desse vazamento.



**Figura 1.1** Fotografia de dutos de distribuição de gás a baixa pressão, instrumentada com cinco microfones mi.



**Figura 1.2** Microfone sendo acoplado internamente ao duto.



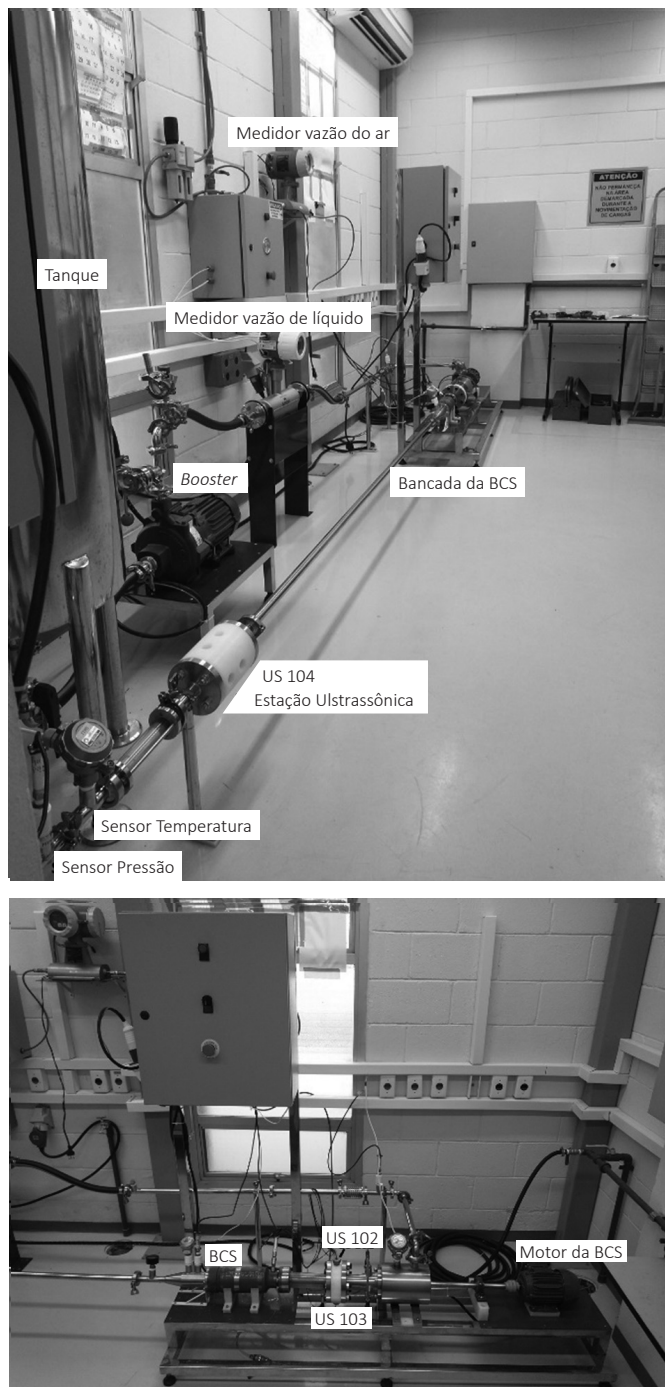
**Figura 1.3** Sinais sonoros capturados pelos microfones, com vazamento de gás induzido após 10 segundos de gravação.

Para os propósitos do livro, é importante ressaltar que, apesar do monitoramento acústico constante que ocorre no exemplo da Figura 1.1, nenhuma ação é tomada automaticamente para estancar ou diminuir a vazão de gás. Portanto, dizemos que o processo é monitorado, mas não controlado. É provável que um alarme seja acionado e que um operador humano se encarregue da atuação necessária no processo.

Ainda no setor das utilidades, podemos nos deparar com linhas de escoamento de vapor saturado, que geralmente alimentam trocadores de calor na linha de produção, e cujo vapor pode ser parcialmente liquefeito, gerando um escoamento líquido-gás na mesma tubulação. É usual encontrarmos escoamento bifásico também em dutos de exploração e de refino de petróleo, em indústrias alimentícias e em usinas de produção de energia.

A Figura 1.4 mostra um circuito fechado de bombeamento de líquido, com injeção controlada de ar, para desenvolver escoamentos bifásicos com diferentes frações de vazios.

Esse termo se refere à fração de ar presente no escoamento. Duas bombas são utilizadas: uma *booster* e uma centrífuga submersível (BCS). O fluxograma de instrumentação do circuito da Figura 1.4 é representado na Figura 1.5. Há sensores de pressão, temperatura e vazão instalados nas linhas. Porém, atuando como sensores de fração de vazios e de conformação espacial das bolhas, temos estações de medição ultrassônica, denominadas US 102, US 103 e US 104 nos dutos horizontais, e US 201 na tubulação vertical.



**Figura 1.4** Imagens de circuito fechado de bombeamento de líquido, com injeção controlada de ar, formando escoamento bifásico com diferentes frações de vazio (ar) e diferentes configurações geométricas. Na última imagem, detalhe da bancada da bomba centrífuga submersível (BCS).

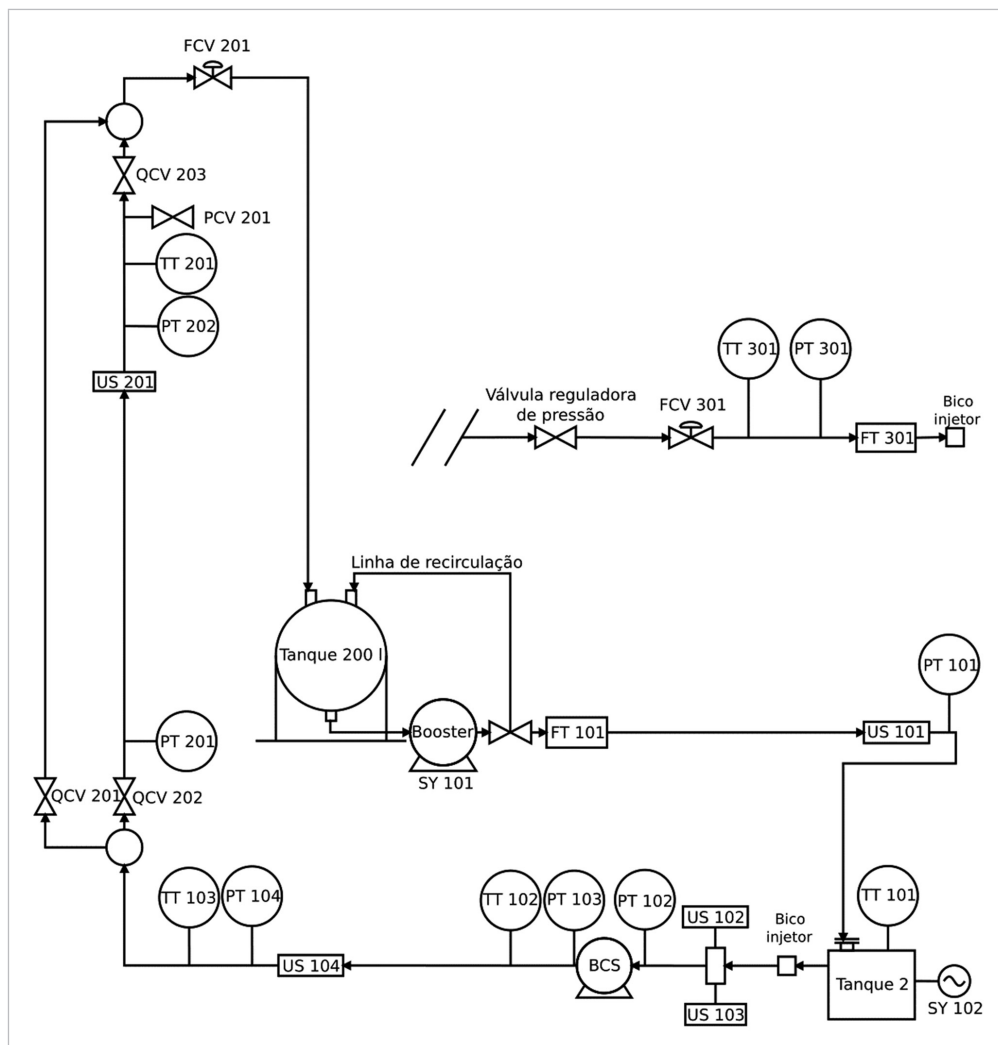


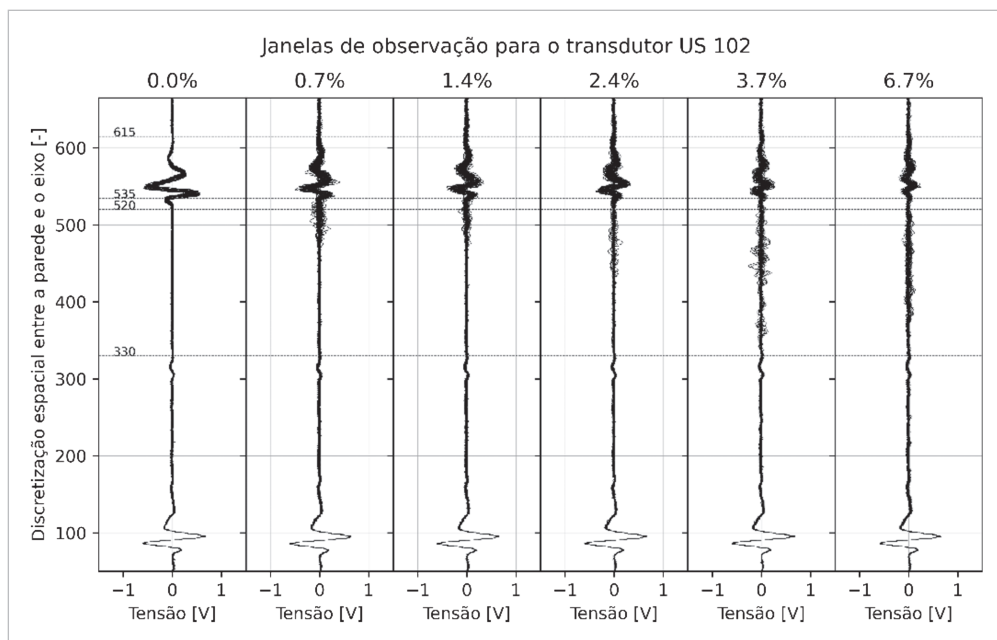
Figura 1.5 Diagrama P&ID do circuito de escoamento bifásico.

Sabemos de antemão que há uma degradação do desempenho da bomba centrífuga em função da presença de gás livre no escoamento e, portanto, é necessário medir a fração de vazios no escoamento bifásico. Ademais, sabemos que existem problemas de segurança operacional relacionados com a conformação das bolhas no escoamento. Por exemplo, a ocorrência de grandes bolhas alongadas de gás, em vez de pequenas bolhas dispersas, a montante da bomba, pode acarretar obstrução local e indesejáveis ondas de choque ao longo da tubulação. Para amenizar a situação desses picos de pressão na linha e possível refluxo de líquido, é necessário que o sistema de controle automático manipule a abertura da válvula *choke* (FCV201), que fica instalada na parte mais alta do circuito. Os problemas causados deverão diminuir com a acomodação dos fluidos e nova estabilização da pressão. Entretanto, se ainda assim persistir o problema, será necessário estancar o escoamento, de forma semelhante ao exemplo do escoamento

monofásico de gás (Figura 1.1). Nesses casos, após soar o alarme, uma ação humana poderá ser exigida – desligar o equipamento via painel de operação ou teclado –, ou esta ação poderá ser programada no sistema de intertravamento da planta, que desligará o motor da bomba automaticamente.

Nesse circuito, temos o monitoramento de diversas variáveis, mas somente uma ação de controle é tomada automaticamente na válvula FCV201, apenas considerando a medição ultrassônica da estação US 102, presente na entrada da BCS. A estação US 103 seria usada somente em caso de falha da US 102, o que chamamos de redundância. Essa é uma das estratégias de controle automático de única-entrada-única-saída (em inglês, *single input, single output* – SISO) possíveis para esse sistema.

A Figura 1.6 mostra o sinal de ultrassom emitido (pulso), que atravessa o escoamento e é refletido pelo eixo da bomba ao transdutor (eco), para diferentes percentagens de ar na água (frações de vazios). Podemos notar a diminuição da amplitude do sinal de eco captado pelo transdutor à medida em que a fração de vazios aumenta de 0 a 6,7%.



**Figura 1.6** Janelas de observação ultrassônica para diferentes frações de vazios na estação US 102.

É importante ressaltar que, em qualquer produção industrial, o sistema de intertravamento está relacionado com o conceito de garantia de segurança operacional da planta e deve atuar de forma independente do sistema de controle automático. Este último está ligado principalmente às questões de qualidade e demanda do produto, economia de energia e respeito à legislação ambiental.

Nas situações em que o escoamento é opaco, o sensor ultrassônico se constitui em uma das melhores alternativas para esse monitoramento. Em contrapartida, sendo os fluidos translúcidos e havendo janelas de visualização na tubulação, como a montante

da BCS na Figura 1.4, seria possível empregar câmeras de filmagem rápida junto com algoritmos de visão computacional, substituindo as estações ultrassônicas empregadas.

Além de monitorar e controlar as tubulações industriais que interligam os diferentes equipamentos de uma planta química, é igualmente importante o monitoramento e o controle das próprias operações unitárias de processamento.

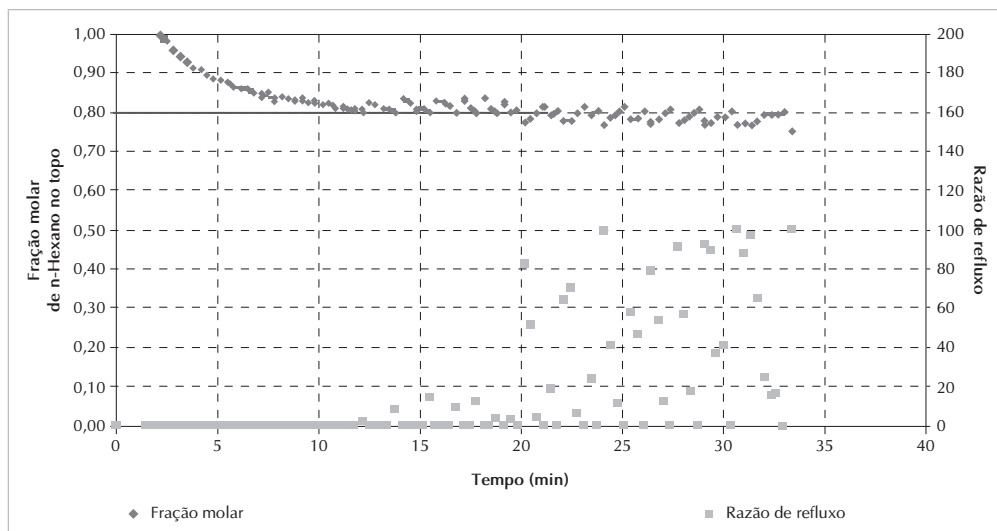
Um dos equipamentos bem conhecidos para separação de líquidos miscíveis é a coluna de destilação. Independentemente do tipo de coluna utilizado, de recheio ou de pratos, contínua ou semicontínua, o objetivo principal é purificar um ou mais componentes da mistura líquida alimentada à coluna a partir da diferença de volatilidade entre os componentes presentes. Demais objetivos podem ser levados em consideração, como a economia de energia envolvida na purificação.

Na Figura 1.7 podemos observar uma coluna de pratos, semicontínua, com bomba para recirculação ou retirada de líquido condensado. Existem duas posições possíveis para a atuação da bomba: todo o líquido condensado sendo retirado como produto de topo, ou todo o líquido retornando para o corpo da coluna. Conforme o princípio de operação da destilação, o refluxo é usado para elevar a presença do respectivo componente nos pratos superiores, garantindo pureza maior no produto de topo. Neste caso, temos a razão de refluxo sendo fornecida pelo tempo no qual a bomba desvia para refluxo ou para produto, dentro do ciclo de atuação de, por exemplo, alguns minutos. Essa é a variável que manipulamos automaticamente para que a pureza desejada seja alcançada e mantida na operação.



Figura 1.7 Coluna de destilação semicontínua, com refeedor isolado termicamente no fundo. Em destaque o sistema de refluxo que altera as condições de operação.

A Figura 1.8 apresenta a fração molar de topo do componente mais volátil (n-Hexano) de uma mistura líquida de hidrocarbonetos ao longo da destilação realizada nesta coluna. Em vermelho encontramos o valor correspondente à pureza desejada do n-Hexano no topo. No início da destilação, percebemos que a pureza é maior do que a desejada. Em consequência disso, a razão de refluxo é mantida em zero. Conforme esse líquido condensado é retirado como produto, o n-Hexano vai se tornando mais escasso na mistura de hidrocarbonetos que é destilada, pois nesse caso a alimentação não é contínua. Assim, para conseguir manter a pureza de 80%, é necessário ir aumentando a razão de líquido condensado que retorna à coluna (pontos em azul-claro).



**Figura 1.8** Registro da destilação de mistura líquida de hidrocarbonetos sob controle automático da fração molar do n-Hexano (valor desejado de 0,80), por meio da manipulação da razão de refluxo.

Na Figura 1.8, percebemos a tendência desse refluxo ajustado de se aproximar de 100%, que seria a única forma de garantir a pureza desejada ao passar do tempo. É nesse momento que se finaliza a operação, pois o n-Hexano presente já estaria escasso e não conseguiria mais atingir o valor desejado de fração molar de 0,80. Ressaltamos aqui que, se não houvesse o controle automático, a pureza de topo ficaria rapidamente menor que o mínimo desejado, caracterizando o produto como “fora de especificação”. O produto, que poderia ser devidamente recuperado numa operação com controle automático, seria desperdiçado ou reprocessado quando sob operação apenas monitorada.

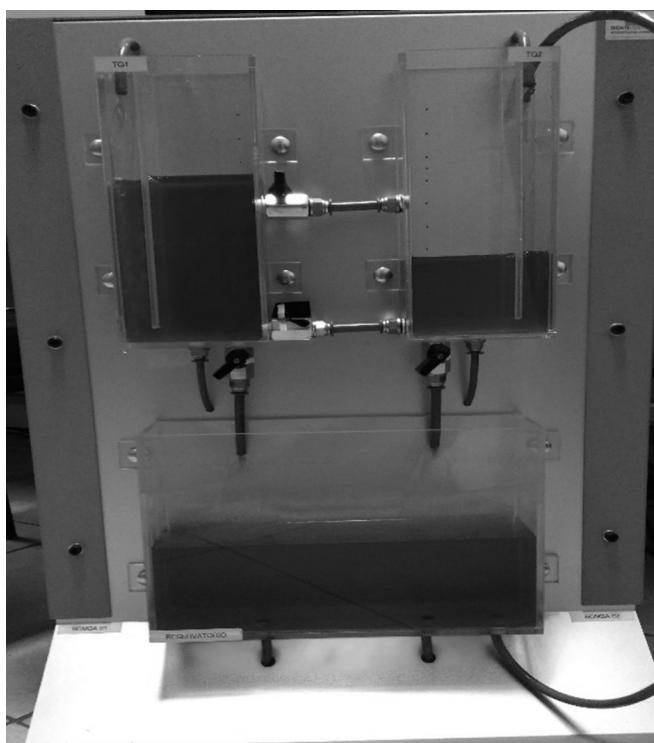
Assim como os escoamentos constituem uma parte importante da operação contínua, os tanques de estocagem, ou mesmo os reatores que operam com fase líquida, ocorrem com muita frequência em plantas químicas. Apenas o monitoramento por meio de sensores de nível do líquido não garante a operação adequada. Esses recipientes devem ter seu nível controlado para não ocorrer derramamento ou esgotamento total do líquido em seu interior. Para alcançar segurança operacional e qualidade do produto, é necessário manipular as vazões de entrada e/ou saída dos vasos, observando o nível do



líquido no interior. A complexidade aumenta quando um tanque se conecta com outro, ou quando um tanque possui várias correntes de entrada ou de saída.

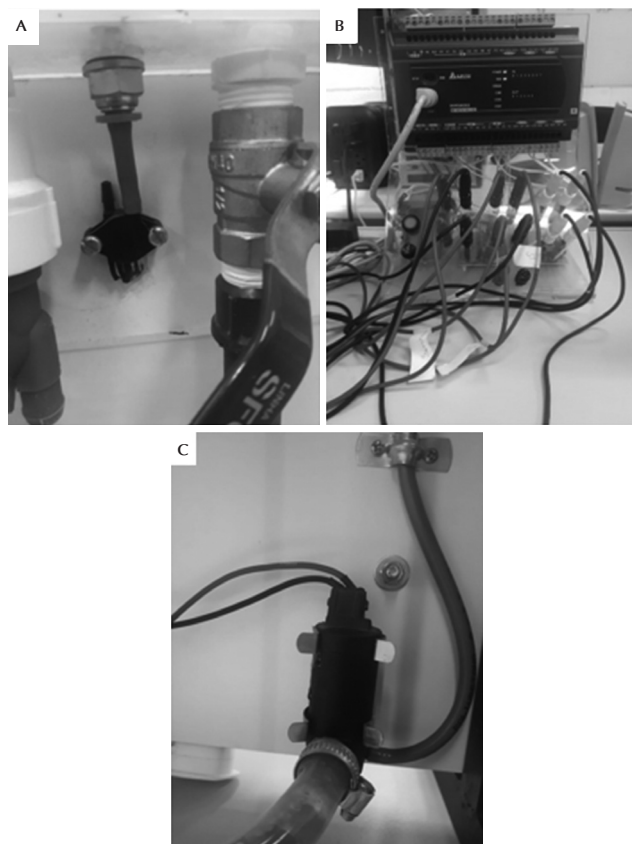
O controle de nível de tanques interativos a partir das vazões se apresenta como um sistema de múltiplas-entradas-múltiplas-saídas (em inglês, *multiple input, multiple output* – MIMO). Esse termo não tem relação com as linhas de tubulações de entradas ou saídas, mas sim com a quantidade de variáveis que podem ser controladas ou manipuladas.

A Figura 1.9 mostra a imagem de um sistema de tanques, com dois tanques superiores que se comunicam e interagem, por saídas laterais, e que possuem sensores de altura de líquido (Figura 1.10a). Cada tanque conta com uma linha superior de entrada de líquido e uma de saída ao fundo.



**Figura 1.9** Tanques interativos com controle de nível nos dois tanques superiores.

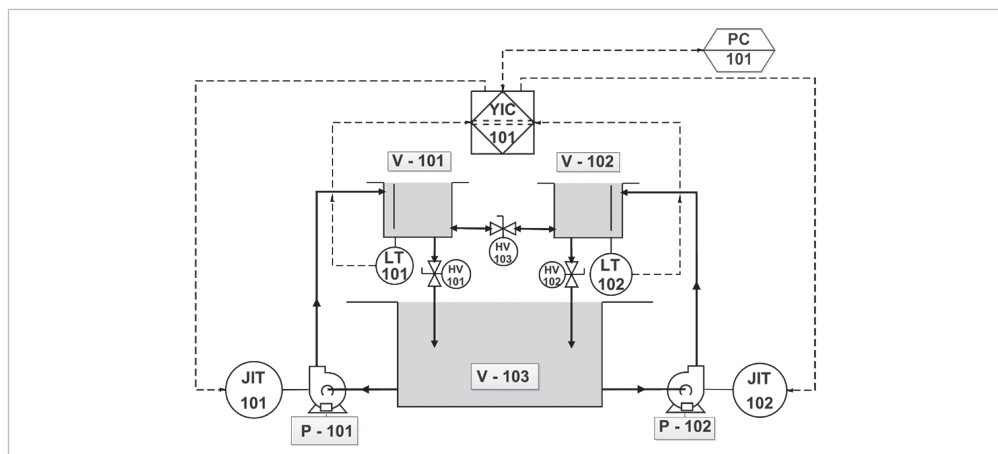
Em regime estacionário, seria possível manter o nível do tanque à esquerda diferente do nível do tanque à direita, como na Figura 1.9? Sim, é possível, por meio do sistema de controle automático, implementado no controlador lógico programável (CLP) (Figura 1.10b). Esse sistema manipula, durante a operação, as vazões de entrada, usando uma bomba de rotação variável (Figura 1.10c) para cada tanque. As quatro válvulas de ajuste manual que aparecem na foto não possuem ajuste durante a operação: duas ajustam de forma fixa as vazões de saída de cada tanque e duas ajustam a vazão entre os tanques comunicantes.



**Figura 1.10** (a) Os níveis são medidos por sensores de pressão em cada um dos tanques superiores; (b) um CLP comanda as atividades de medição e de manipulação; (c) as entradas de líquido são manipuladas durante a operação, usando uma bomba de rotação variável para cada tanque.

O diagrama de instrumentação desse sistema de tanque é representado na Figura 1.11. Como explicado anteriormente, as válvulas de ajuste manual (HV 101, HV 102, HV 103) não são alteradas durante a operação contínua. Apenas as vazões de entrada dos vasos V 101 e V 102 são manipuladas durante a operação para correção dos níveis medidos. Se o operador humano é quem entra com as informações de valores, via teclado, para as rotações das duas bombas, alterando as respectivas vazões de entrada, dizemos que o controle está em malha aberta. Se é o próprio sistema de controle automático que calcula as alterações necessárias e as implementa, dizemos que o sistema está em malha fechada ou sob controle.

Para ilustrar mais uma operação típica da engenharia química, a Figura 1.12 mostra um reator tanque agitado contínuo (CSTR), de aço inox, juntamente com todos os equipamentos e instrumentos necessários para sua operação contínua. Nesse processo, uma solução tampão de  $\text{NaHCO}_3$ , cujo pH inicial é superior a 8, é alimentada continuamente no reator tanque agitado contínuo. O meio reacional deve ser neutralizado, ou seja, o reator deve operar com controle automático de pH. Os três barriletes da foto contêm separadamente soluções de ácido, base e tampão.



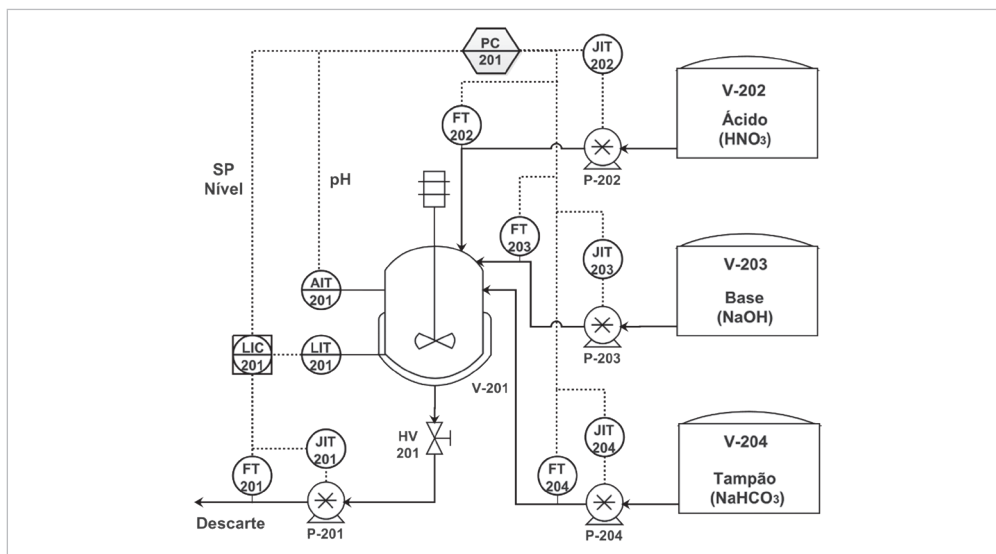
**Figura 1.11** Diagrama P&ID do sistema de tanques interativos. Em destaque as duas bombas (P 101 e P 102), que captam líquido do tanque 3 e alimentam os tanques superiores 1 e 2, com seus respectivos inversores de frequência para alterar as rotações dos motores (JIT 101 e JIT 102).



**Figura 1.12** Ao centro, reator tanque agitado contínuo (CSTR) de aço inox, com sensores de pH e nível acoplados. Os três barriletes contêm soluções de ácido, base ou tampão a ser neutralizado. Abaixo deles estão as bombas dosadoras de rotação variável. A bombona azul coleta o meio reacional de saída contínua.

Abaixo deles, podemos visualizar também as respectivas bombas de rotação variável. A bombona azul coleta o meio reacional que flui continuamente à saída do reator. Essa vazão de saída também é controlada por outra bomba de vazão variável que se ajusta em função da situação medida do nível de líquido no reator.

Vamos refletir? Nos dois sistemas ilustrados nas Figuras 1.9 a 1.13, como é que o sistema de controle automático calcula, durante a operação, a magnitude das alterações de vazões (ou rotações dos motores) para manter os níveis desejados dos tanques comunicantes, ou o pH desejado no reator?



**Figura 1.13** Diagrama P&ID do reator para ajuste de pH. Todas as bombas têm seus motores acoplados a inversores de frequência (JIT), que conseguem alterar as rotações de seus eixos e, conseqüentemente, as vazões das linhas.

Podemos observar nas Figuras 1.11 e 1.13 que os sinais coletados pelos instrumentos de medição são enviados a uma placa de aquisição de dados (YIC101), que faz as conversões necessárias e estabelece a comunicação com um computador/processador (PC-101). Este deve “realizar os cálculos” naquele instante, devolvendo sinais para a placa, que os convertem em atuação física no processo, diminuindo ou aumentando a rotação de cada bomba cujo motor esteja acoplado a um inversor de frequência. Quais são esses cálculos programados que resultam na manipulação dos equipamentos que possibilitam as alterações operacionais na planta? Pois é exatamente sobre essa teoria que iremos discorrer nos próximos capítulos por meio de estudos de casos. É importante ressaltar que a teoria abordada é válida tanto para sistemas de controle analógicos quanto para sistemas digitais com elevada frequência de amostragem.

Poderíamos descrever ainda inúmeras outras operações unitárias ou conjunto de equipamentos em processos industriais que operam com controle automático, por exemplo: reatores de fermentação, colunas de absorção, leitos fluidizados, filtros, sedimentadores, secadores, flutuadores, caldeiras, sistemas de refrigeração, de moagem etc.

Nos capítulos subsequentes, esperamos contribuir para que o estudante adquira a capacidade de reconhecer situações de necessário controle automático em processos, e que aprenda a sistematizá-las para realizar o projeto do controlador. Esperamos também que desenvolva aptidão para enfrentar uma família de situações análogas que são encontradas em diversos processos industriais reais.

**Este livro foi concebido em um dos períodos mais críticos da história contemporânea da humanidade, impactada pela pandemia do novo coronavírus. Como ensinar em uma sala virtual sem o feedback natural das pessoas? O aprendizado resulta da necessidade de reconhecer que a educação é a luz contra o sombreamento do negacionismo.** Sim, lançar mão de conceitos técnicos para falar de filtros de média móvel, ações retroalimentadas, da importância de se observar a dinâmica de processos para o controle efetivo sobre situações do cotidiano, como também da própria pandemia. Em uma época de reclusão, foi possível sentir o alento de esperança e de tranquilidade vindo de Ana Maria Frattini Fileti ao dizer: "ok, vocês também têm a mim. Está tudo sob controle". Dessa forma, não esperem um livro clássico de controle de processos, pois terão um livro humanizado em mãos, tendo como fundamento estudos de casos para provocar o entendimento simples e necessário sobre controle automático.

Sim, professora, tudo sob controle. Obrigado.

**Marco Aurélio Cremasco**

*Professor titular da Faculdade de Engenharia Química da Unicamp*



[www.blucher.com.br](http://www.blucher.com.br)

**Blucher**



Clique aqui e:

[VEJA NA LOJA](#)

## Tudo sob(re) controle

### Fundamentos e estudos de casos

---

Ana Maria Frattini Fileti

ISBN: 9786555066623

Páginas: 212

Formato: 17 x 24 cm

Ano de Publicação: 2023

---