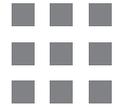


Introdução à Automação para Cursos de Engenharia e Gestão

Marcelo Pessôa e Mauro Spinola





Introdução à Automação para Cursos de Engenharia e Gestão

Marcelo Pessôa e Mauro Spinola

© 2014, Elsevier Editora Ltda.

Todos os direitos reservados e protegidos pela Lei nº 9.610, de 19/02/1998.

Nenhuma parte deste livro, sem autorização prévia por escrito da editora, poderá ser reproduzida ou transmitida sejam quais forem os meios empregados: eletrônicos, mecânicos, fotográficos, gravação ou quaisquer outros.

Copidesque: Adriana Araújo Kramer

Revisão Gráfica: Renata Valério Croset

Editoração Eletrônica: Thomson Digital

Elsevier Editora Ltda.

Conhecimento sem Fronteiras

Rua Sete de Setembro, 111 – 16º andar

20050-006 – Centro – Rio de Janeiro – RJ – Brasil

Rua Quintana, 753 – 8º andar

04569-011 – Brooklin – São Paulo – SP – Brasil

Serviço de Atendimento ao Cliente

0800-0265340

atendimento1@elsevier.com

ISBN 978-85-352-4889-0

ISBN (versão eletrônica) 978-85-352-4849-4

Nota: Muito zelo e técnica foram empregados na edição desta obra. No entanto, podem ocorrer erros de digitação, impressão ou dúvida conceitual. Em qualquer das hipóteses, solicitamos a comunicação ao nosso Serviço de Atendimento ao Cliente, para que possamos esclarecer ou encaminhar a questão.

Nem a editora nem o autor assumem qualquer responsabilidade por eventuais danos ou perdas a pessoas ou bens, originados do uso desta publicação.

**CIP-BRASIL. CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO
SINDICATO NACIONAL DOS EDITORES DE LIVROS, RJ**

P567i

Pessoa, Marcelo Schneck de Paula

Introdução à automação : para cursos de engenharia e gestão / Marcelo Schneck de Paula Pessoa, Mauro de Mesquita Spinola. - 1. ed. - Rio de Janeiro : Elsevier, 2014.
il. ; 24 cm.

Inclui índice

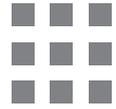
ISBN 978-85-352-4889-0

1. Engenharia de produção. 2. Administração da produção. 3. Controle de processos. 4. Controle de qualidade. 5. Administração da qualidade. 6. Estatística. I. Spinola, Mauro de Mesquita. II. Título.

14-09101

CDD: 658.5

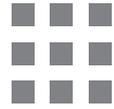
CDU: 658.5



Agradecimentos

Os autores agradecem, com especial ênfase, aos colegas professores, coordenadores das atividades de graduação, chefes e alunos do Departamento de Engenharia de Produção da Escola Politécnica da USP. Os colegas, coordenadores e chefes sempre apoiaram as iniciativas dos autores voltadas para o aperfeiçoamento do conteúdo e dos métodos didáticos aplicados na disciplina de Automação e Controle. Os alunos contribuíram continuamente para o amadurecimento desse material, com comentários, críticas e sugestões. A todas essas pessoas que se envolveram com a disciplina durante mais de duas décadas, prestam o mais sincero agradecimento.

Agradecem também a todos que incentivaram os estudos e atividades que resultaram nesta publicação, entre eles os colegas de outros departamentos da Escola Politécnica (que viram no tratamento gerencial um diferencial em relação à tradicional abordagem técnica) e ainda os sempre presentes parentes e amigos (que viram no entusiasmo dos autores o espírito de um trabalho que poderia contribuir com professores de todo o Brasil).



Prefácio

O início do século XXI foi marcado pela massificação do uso das ferramentas computacionais nos diversos setores da vida em sociedade: indivíduos e corporações mudaram suas formas de relacionamento, agilizando as comunicações, inovando processos e aprimorando a qualidade de vida. Descoberta de novas reservas de petróleo, desenvolvimento de combustíveis alternativos e energias renováveis trazem novas esperanças de progresso e de melhor distribuição de riquezas.

Obras de infraestrutura e tecnologias inovadoras movimentam economias, com Estado e iniciativa privada entendendo que a riqueza não se encontra somente na natureza, mas também na capacidade de transformar matéria prima em produtos industriais de manufatura e de serviços.

É um panorama novo e de mudanças socioeconômicas mais rápidas. Em cada tarefa de produção ou atendimento, um agente novo, cada vez mais efetivo, aparece. É a automação transformando imensas fábricas de automóveis em conjuntos compactos de ilhas de montagem robotizadas.

Nos hospitais, equipamentos sofisticados automatizam procedimentos clínicos e cirúrgicos. Na construção civil, módulos pré-fabricados e processos de avançados de montagem diminuem os tempos de obras e apuram a qualidade do processo construtivo.

Nas indústrias química e farmacêutica, concentrações de soluções são monitoradas e controladas por instrumentos de alta precisão. O trânsito das grandes metrópoles parece não ter solução sem que a automatização e otimização dos tempos de abertura e fechamento de sinais se façam presentes.

Mas máquinas e processos automatizados não são gerados espontaneamente. Nasceram da necessidade, aliada à criatividade, dos seres humanos em concebê-las, projetá-las, construí-las e operá-las: engenheiros ou equipes técnicas, com conhecimento bem fundamentado e capacidade de melhorar a vida dos que estão à sua volta.

Conhecimento é o principal legado que as gerações de seres humanos têm deixado para as gerações seguintes. Assim é este livro: conhecimento de automação de dois engenheiros com larga experiência de indústria e de sala de aula, transmitidos com clareza para os novos profissionais.

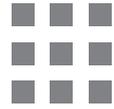
Marcelo Pessôa e Mauro Spinola são originários das áreas industriais de engenharia elétrica e computação, com vivência ampla em toda a cadeia de modificações sofridas pelos processos produtivos nas últimas três décadas. Ao longo dos anos, conceberam e projetaram produtos que, para saírem das

pranchetas, tiveram implementações compatíveis com as escalas industriais de produção.

Essa experiência, aliada à forte formação acadêmica de ambos, se reflete nesta obra, bem escrita, de conteúdo de alto nível e de agradável leitura.

Ganham os engenheiros de língua portuguesa de todas modalidades, além dos estudantes em formação, com este trabalho precioso que muito contribui para o desenvolvimento da engenharia brasileira.

José Roberto Castilho Piqueira
Vice-Diretor da Poli-USP



Sobre os autores

Marcelo Schneck de Paula Pessoa é formado em Engenharia Elétrica, Mestre, Doutor e Livre-docente em Engenharia pela Poli-USP. É professor do Departamento de Engenharia de Produção da Escola Politécnica da USP. Ministra a disciplina Automação e Controle para o curso de Engenharia de Produção desde 1988. Trabalhou em sistemas de automação na Cosipa, Siderbrás e FDTE – Fundação para o Desenvolvimento Tecnológico da Engenharia em sistemas de automação industrial e sinalização ferroviária. Preside o Conselho Curador da Fundação Carlos Alberto Vanzolini e coordena o Curso de Especialização em Gestão de Projetos de TI da Poli-USP/Vanzolini. Ministra cursos de extensão e assessora empresas em tecnologia da informação e qualidade de software.

Mauro de Mesquita Spinola é formado em Engenharia de Eletrônica pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), Mestre em Computação Aplicada pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Doutor e Livre-docente em Engenharia pela Poli-USP. É professor do Departamento de Engenharia de Produção da Escola Politécnica da USP. Ministra a disciplina Automação e Controle para o curso de Engenharia de Produção desde 1994. Trabalhou em sistemas de automação na Itauplan, Philco e FDTE – Fundação para o Desenvolvimento Tecnológico da Engenharia. Coordena o MBA Gestão de Operações Produtos e Serviços da Poli-USP/Fundação Vanzolini. Ministra cursos de extensão e assessora empresas em tecnologia da informação e qualidade de software.

Conceitos fundamentais

SUMÁRIO

1.1	Miniglossário	2
1.2	Conceitos e terminologia.....	2
1.3	Necessidade de sistemas de controle automático	3
1.4	Histórico da automação.....	4
1.5	Sistema produtivo	5
1.5.1	Características dos sistemas produtivos	6
1.5.2.	Diferentes abordagens referentes ao processo.....	7
1.5.3.	Tecnologia de processo.....	8
1.6	Controle do sistema produtivo.....	9
1.6.1	Controle de processo	9
1.6.2	Modelamento matemático do processo	9
1.6.3	Medição das grandezas do processo.....	11
1.6.4	Decisão sobre o que fazer com as medidas obtidas.....	11
1.6.5	Atuação no processo.....	11
1.7	Elementos essenciais de um sistema de automação	12
1.8	Na prática.....	13
1.9	Leituras recomendadas	15
1.10	Exercícios e atividades	15
1.11	Soluções de alguns exercícios	16

“É muito bom que o mundo seja totalmente automatizado, pois, dessa forma, o homem será obrigado a se dedicar à tarefa mais nobre que existe: pensar”.

Fernando Schneck de Paula Pessoa - 1984

Este capítulo apresenta os conceitos fundamentais de automação, incluindo terminologia, histórico da automação e características dos processos de produção automatizados.

AO TÉRMINO DESTES CAPÍTULOS VOCÊ VAI CONHECER:

- os principais termos de automação;
- a história da automação;

- as vantagens e limitações de sistemas de automação;
- as características de um sistema produtivo;
- os profissionais envolvidos com sistemas produtivos e de automação.

1.1 Miniglossário

Automação. Realização de tarefas sem a intervenção humana.

Controlador. Elemento de um sistema de controle automático responsável pelo comando das variáveis.

Controle. Ação ou resultado de exercer força restritiva sobre algo (p. ex., um projeto ou um processo), de limitar, de determinar, ou de impedir sua ocorrência.

Controle automático. Controle para manter a grandeza controlada dentro de valores previstos.

Controle de processo. Controle de um processo produtivo.

Distúrbio. Qualquer sinal que tende a afetar adversamente o valor de uma grandeza. O mesmo que perturbação.

Engenheiro de automação. Especialista nos sistemas de automação de um sistema produtivo.

Engenheiro de processo. Especialista no processo específico do sistema produtivo em análise. Pode ser um engenheiro mecânico, elétrico, químico, metalurgista, etc.

Engenheiro de produção. Especialista nos métodos de produção para um sistema produtivo.

Mecanização. Substituição do trabalho humano ou animal por equipamentos.

Observabilidade. Capacidade de realizar a leitura direta (observar) de uma grandeza em um sistema de automação.

Planta (industrial). Nome dado a uma unidade industrial.

Processo. Operação a ser controlada.

Produto. Resultado de um processo produtivo. A finalidade de um sistema produtivo é produzir um produto.

Perturbação. O mesmo que distúrbio.

Set point. Valor ajustado para uma grandeza que um sistema automático deverá manter sob controle. O mesmo que valor desejado.

Valor desejado. O mesmo que *setpoint*.

1.2 Conceitos e terminologia

Automação¹ vem do latim *automatus* que significa mover-se por si. A automação é a realização de tarefas sem a intervenção humana com equipamentos e dispositivos que funcionam sozinhos e possuem a capacidade de realizar

¹Todos os termos em negrito estão definidos no miniglossário do capítulo.

correções na ocorrência de desvio das condições definidas de operação. Vale dizer que essas correções podem ser feitas sem a necessidade de computadores, através de dispositivos concebidos para realizá-las dentro de suas características construtivas. Por exemplo, o antigo carburador de um automóvel realizava correções na mistura ar/combustível conforme as condições de operação.

O **controle automático** propicia meios para o desempenho otimizado de equipamentos, melhora da qualidade, redução de custos, aumento de produtividade e substituição de mão de obra. Há situações nas quais não é possível realizar atividades sem o uso de sistema de controle automático devido à necessidade de atuação em tempos tão pequenos que um ser humano não seria capaz de reagir no tempo correto. Um ABS (*Anti-lock Braking System*) – freio automático de veículo, por exemplo, funciona dessa forma, retirando do motorista o controle do veículo e atuando de maneira a frear e liberar as rodas para que o veículo não perca a aderência.

O **controle automático** funciona de forma a manter a grandeza controlada dentro de valores predeterminados apesar da existência de perturbações que possam desviar os valores dessa grandeza. Por exemplo, um sistema de controle automático de temperatura altera o fluxo de calor quando há queda na temperatura para recolocar essa grandeza controlada (temperatura) no valor desejado (*set point*). Assim, **perturbação** ou **distúrbio** é qualquer sinal que tende a afetar adversamente o comportamento da saída do sistema. Uma perturbação pode ser externa ou interna.

Os sistemas de automação atuam no controle de grandezas físicas de uma maneira geral, para controlar um **processo** qualquer. O termo **processo** é utilizado para identificar qualquer operação a ser controlada pelo sistema de automação.

Em uma indústria, normalmente existem diversos **processos**, que constituem as várias etapas produtivas de uma **planta industrial**, o local físico onde estão todos os sistemas e equipamentos. Dessa forma, o termo **planta** indica o local físico onde é feita a transformação de matéria-prima em produto.

1.3 Necessidade de sistemas de controle automático

Quais seriam, então, os motivos que tornam necessário o uso de sistemas automatizados?

Há várias razões para isso. Em primeiro lugar, há situações nas quais o processo é tão rápido que não é possível realizar o seu controle manualmente. O desligamento de um sistema elétrico no caso da queda de um raio ou de um curto-circuito é mais apropriado que seja automático (através de circuitos de proteção) do que manual. O já citado sistema de freio ABS melhora o sistema manual tornando-o mais seguro.

Um sistema de automação pode ser utilizado em situações de risco em que a presença humana é inadequada ou impossível.

Além disso, um sistema automático de controle aumenta a qualidade, pois reduz a variabilidade do processo. A realização de atividades manuais pode

provocar variações de pessoa para pessoa ou da mesma pessoa em função de cansaço ou mesmo distração. A redução da variabilidade da produção aumenta a precisão dos itens produzidos.

Um sistema de automação aumenta a produtividade, pois permite o aumento da velocidade de produção.

Ele também permite aumentar a eficiência operacional das instalações, pois permite a medição de sua operação, por exemplo o número de horas de funcionamento de equipamentos e a identificação de defeitos antes que estes provoquem paradas, possibilitando a manutenção preventiva e não corretiva. Isso também reduz o custo de operação.

Um sistema de automação pode, ainda, permitir a redução da mão de obra. Vale observar que também exige mão de obra mais cara e especializada para cuidar dos sistemas de automação e não mais para executar a produção propriamente dita. O custo dos sistemas de automação é alto, mas o custo da mão de obra tem aumentado fazendo com que essa relação entre automatizar ou não caminhe, a longo prazo, para a decisão de automatizar de uma maneira geral os sistemas produtivos.

Para finalizar, também é bom lembrar que é difícil manter um sistema de produção automatizado, pois há a necessidade de manter os equipamentos em bom estado. Além disso, as tolerâncias são menores com relação a variações do processo, e uma parada do sistema provoca perdas grandes devido à parada propriamente dita e à perda de materiais. A recolocação em funcionamento exige pessoas altamente especializadas com conhecimento profundo não somente dos equipamentos, mas da instalação específica.

1.4 Histórico da automação

Antes da revolução industrial, a produção de bens era feita pelos artesãos com diversas especialidades como marceneiros, carpinteiros e ferreiros. Essa produção era feita de forma artesanal, ou seja, com ferramentas manuais e em baixa escala produtiva.

A revolução industrial trouxe a produção em massa e uma nova forma de organização da produção, alterando inclusive a natureza do trabalho. Máquinas de produção foram sendo construídas, e os produtos eram fabricados em maior quantidade com menos mão de obra, graças principalmente à máquina a vapor que permitiu a incorporação da força mecânica de trabalho, anteriormente proveniente de animais ou do próprio ser humano. Isso ocorreu na segunda metade do século XVIII com a invenção de James Watt – a máquina a vapor – que incorporou um dos primeiros dispositivos de automação: um regulador centrífugo de velocidade (esse regulador tinha por função manter a rotação constante da máquina a vapor) [OLI1999; BIS2009]. Vale observar que a revolução industrial transformou os antigos artesãos em empregados das indústrias: eles detinham o conhecimento para realizar

a produção propriamente dita, e os proprietários dos meios de produção eram os capitalistas, que possuíam o capital e os equipamentos de produção.

Na virada do século XX, Frederick Winslow Taylor [TAY1990] mudou mais ainda a forma de trabalhar, criando o “*princípio da administração científica*”. O conhecimento necessário para realizar a produção propriamente dita era de domínio dos trabalhadores, antigos artesãos que migraram para as indústrias e sabiam como produzir. Taylor quebrou esse paradigma trazendo para a organização da produção o conhecimento necessário para se produzirem os bens: as tarefas complexas eram quebradas em tarefas menores e mais simples, definidas em cada posto de trabalho de tal forma que, sem a necessidade de conhecimento ou especialização, era possível produzir bens complexos. Estava criada a engenharia de produção como é conhecida hoje, notabilizada pela fabricação automotiva de Ford, o modelo T preto, nos anos 1920. Vale assistir ao vídeo de Whitney e Fletcher [WHI2009], que discute a linha de produção de Ford e mostra que é mais barato adquirir um carro do que manter uma carroça com cavalo, uma das razões do sucesso desse empreendimento.

Com relação à automação, a primeira fase foi a **mecanização**, ou seja, a realização de tarefas que o ser humano não tinha condições de realizar sem o auxílio de dispositivos que aumentassem sua capacidade de trabalho. A mecanização é a substituição do trabalho humano ou animal por equipamentos.

Segundo Bennett [BEN2002] e Oliveira [OLI1999], o conceito de sistemas de realimentação foi estudado e modelado matematicamente por James Clerk Maxwell (conhecido na área de eletromagnetismo) em 1868 no controle de velocidade de rotação de dispositivos mecânicos. Um grande desenvolvimento de sistemas de controle automático para a estabilização de navios e aviões ocorreu no início do século XX [BIS2009].

Portanto, os primeiros sistemas de automação eram mecânicos, em função das tecnologias disponíveis na época. Antiga também é a tecnologia pneumática, que permitiu o desenvolvimento de sistemas de automação pneumáticos (com ar comprimido) e hidráulicos (com óleo), os quais foram utilizados durante muito tempo. A eletrônica, desenvolvida no século XX, foi utilizada primeiramente com tecnologia analógica até a década de 1980 ou 1990 e depois foi substituída pela tecnologia digital com o uso de controladores digitais.

1.5 Sistema produtivo

Entende-se por **Sistema Produtivo** qualquer organização que possui itens de entrada e realiza atividades para produzir um produto ou o realizar um serviço. Como exemplos pode-se citar a indústria automobilística (que produz automóveis e caminhões), a agroindústria (que produz soja, milho, algodão, carne), a indústria de serviços como as empresas de limpeza, saúde, consultoria, fornecimento de energia elétrica, telecomunicações e o setor de turismo, que fornece serviços como viagens e hotelaria.

1.5.1 Características dos sistemas produtivos

O termo aqui usado para denominar uma empresa ou instituição de qualquer natureza é Organização. A Organização tanto pode ser uma indústria, uma empresa, ambas com finalidades lucrativas, como também uma Organização Não Governamental (ONG), sem fins lucrativos, mas com finalidade clara, ou até um setor do governo que, embora também não tenha finalidade lucrativa, é um sistema produtivo prestador de serviços à população (segurança, saúde, educação).

O diagrama em blocos na [Figura 1.1](#) ilustra um **Sistema Produtivo**. Ele recebe como entrada uma série de itens para realizar suas funções e entregar produtos ou serviços com a finalidade de atendimento às necessidades do mercado.

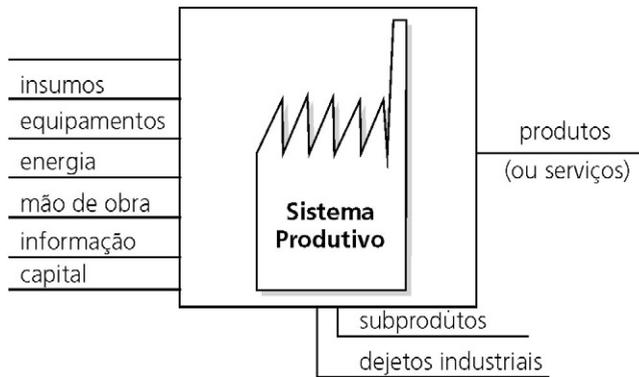


FIGURA 1.1 Sistema produtivo.

Os itens que a organização recebe são matéria-prima, insumos, equipamentos, energia, mão de obra, informação e capital.

A **matéria-prima** é qualquer material utilizado que é incorporado ao produto final. Por exemplo, aço é matéria-prima para produzir um automóvel.

Os **insumos** são outros itens utilizados na atividade produtiva que não fazem parte do produto acabado ou do serviço prestado. Exemplos seriam itens como água, energia elétrica, óleo lubrificante. A lavanderia fornece a roupa lavada dentro de um saco plástico e no cabide, dois insumos.

Os **equipamentos** são as máquinas utilizadas para se fabricar o produto ou realizar um serviço. Por exemplo, uma prensa transforma chapa de aço em peças automotivas, e uma máquina de lavar industrial realiza o serviço de lavar roupa.

A **energia**, na verdade, é um insumo, mas tão importante que é representada separadamente no sistema produtivo. Saliente-se que pode ser qualquer tipo de energia: elétrica, carvão, óleo combustível ou outras energias alternativas que hoje estão sendo pesquisadas. A energia pode mover as máquinas para atuarem no sistema produtivo, como o caso da prensa, ou então estar

intimamente ligada ao processo em si, como nos processos químicos: minério de ferro mais carvão são misturados no alto forno na produção do aço, e o carvão tem a função energética nesse processo.

Mão de obra é toda a equipe que forma os recursos humanos. São os responsáveis pela realização de todas as tarefas dentro da organização.

Vale lembrar que **dado** é o registro de qualquer evento que ocorre em uma organização e tem importância suficiente para ser registrado [COL1998]. **Informação** é a organização dos dados que possuem significado em um contexto. Dessa forma, o valor de medida da temperatura de um processo pode ser um dado e, quando entra em um sistema que vai fazer o controle da temperatura, é uma **informação**. Em um contexto mais amplo, as **informações** para um sistema produtivo são os dados contextualizados referentes à operação, como quantidade de itens produzidos, valores medidos e um conjunto de regras e procedimentos que definem como as tarefas devem ser realizadas, para a finalidade de orientação das atividades de controle e gerenciamento. A **informação** pode ser vista sob dois aspectos: organização da produção e controle da produção. Na *organização da produção* trata da forma que o sistema produtivo está organizado e dos procedimentos que definem as tarefas a serem desenvolvidas. No *controle da produção* trata das informações sobre o andamento da produção em si como quantidades, defeitos e resultado de medidas.

O **capital** é o conjunto de recursos financeiros aportado na organização para que ela possa realizar suas atividades.

Toda produção, além dos produtos em si, também gera **dejetos industriais**. Tais dejetos são normalmente fonte de poluição, principalmente quando o volume produzido é alto. Particularmente nos dias de hoje, os dejetos são uma fonte de preocupação e são objeto de pesquisa para sua eliminação ou, pelo menos, sua minimização.

A forma mais adequada de tratar os dejetos é transformá-los em **subprodutos**. Assim, por exemplo, na produção de aço, há uma série de subprodutos, como fenol e toluol, provenientes do tratamento do carvão, gás de aciaria, gás de alto-forno e outros subprodutos para a indústria de fertilizantes e cimento. Isso minimiza a poluição da indústria e possibilita renda adicional.

1.5.2 Diferentes abordagens referentes ao processo

O sistema produtivo é um complexo que exige a contribuição de diversos profissionais, com diferentes especializações. Este tópico apresenta as principais abordagens feitas por três especialistas: os engenheiros de processo, de automação e de produção.

Um **engenheiro de processo** possui conhecimento técnico profundo do processo em questão, sabe como as matérias-primas podem ser transformadas em produtos acabados, quais variáveis influem na qualidade do produto e é quem determina os equipamentos produtivos a serem adquiridos. Exem-

plos seriam o engenheiro químico para uma indústria química, o engenheiro metalurgista para uma siderúrgica e o engenheiro mecânico para uma indústria de autopeças.

Esse mesmo sistema visto por um **engenheiro de automação** é abordado de uma maneira diferente, pois sua preocupação é permitir que o processo industrial possa ser observado e controlado. Para que isso ocorra, o engenheiro de processo define os pontos e as variáveis a serem medidas, tanto quanto os cálculos a serem realizados com essas grandezas para que sejam contemplados pelo sistema de automação. Da mesma forma, o engenheiro de produção estabelece as variáveis de seu interesse para a implementação do PPCP ou do sistema da qualidade. O engenheiro de automação vai, de posse dessas necessidades, definir e implementar o sistema de automação, em termos de arquitetura de sistema, equipamentos e software.

Finalmente, o **engenheiro de produção** aborda esse sistema sob a ótica de organizá-lo para obter maior produtividade, maior qualidade e realizar as entregas no prazo correto. Dentro dessa abordagem, um dos itens mais importantes é o Planejamento, Programação e Controle da Produção (PPCP), um sistema que lida com o insumo informação e visa organizar o processo para que ele funcione corretamente e atinja os objetivos especificados. Outra atividade do engenheiro de produção é denominada *organização do trabalho*, na qual são considerados aspectos como a capacidade de trabalho das pessoas, o tempo que leva para realizar uma tarefa, a fadiga, a higiene e a segurança do trabalho.

Portanto, no planejamento de um sistema produtivo esses três especialistas trabalham em equipe para, cada um com sua abordagem especializada, definirem a melhor forma de organizá-lo.

1.5.3 Tecnologia de processo

Pode-se dizer que as empresas, de um modo geral, utilizam o modelo matemático compatível com as exigências de mercado e com os equipamentos produtivos que possuem. Ao longo do tempo existe uma tendência de aperfeiçoamento e, portanto, um maior refinamento nos processos, acarretando a necessidade de pesquisa e desenvolvimento em processos.

Vale chamar a atenção para um fato muito importante que ocorre com as empresas de uma maneira geral. O conhecimento do processo – conhecimento profundo – custa muito caro, pois exige investimento constante em pesquisa e desenvolvimento. Assim, as empresas que não conseguem manter esse desenvolvimento contínuo, embora possam dominar seu processo, acabam “ficando para trás”, porque a concorrência poderá desenvolver algo novo que lhe traga maior produtividade e melhor qualidade para seus produtos.

Uma forma que se usa para contornar essa situação é a aquisição de *know-how*, a compra de tecnologia, que acaba vindo embutida dentro dos equipamentos produtivos adquiridos. São os chamados pacotes *turn-key* em

que o fornecedor entrega o processo funcionando, chave na mão. É necessário, portanto, uma grande competência de quem compra conseguir conhecer o processo recém-adquirido para não ser apenas “motorista” de processo e depender eternamente desse fabricante.

1.6 Controle do sistema produtivo

O controle de um sistema produtivo tem por objetivo alinhar o plano de produção com a produção propriamente dita. Esta é uma função do PPCP – Planejamento Programação e Controle da Produção. O controle da produção é feito através do apontamento da produção, que registra quanto foi produzido, defeitos e outras informações relevantes. Isso pode ser feito manualmente através de registro em papel ou automaticamente através de sistemas de captação de dados nos equipamentos de produção ou dispositivos de aquisição de dados como leitoras de código de barras.

A preocupação do PPCP é sistêmica, ou seja, analisa o processo como um todo, mas não seus detalhes. O sistema produtivo normalmente é formado por diversas etapas de transformação. Nessas etapas, cujo escopo possui grau de abstração mais baixo com processos produtivos mais específicos, há variáveis que precisam ser controladas, normalmente pelos sistemas de automação. É o denominado controle de processo.

1.6.1 Controle de processo

Deseja-se controlar o processo para se chegar ao produto pretendido. Serão abordadas as técnicas de controle automático de processo. Exemplos seriam: pesar matéria-prima, misturar insumos na sequência correta, movimentar materiais em processamento, obedecer a uma certa curva de temperatura no tempo.

Para ser possível controlar o processo é necessário:

1. Conhecer o processo.
2. Medir as grandezas do processo.
3. Atuar no processo para que ele se comporte da forma adequada.

1.6.2 Modelamento matemático do processo

Essa é uma tarefa do engenheiro de processo. Corresponde ao conhecimento das leis da física e da química que regem o processo em questão. Assim, por exemplo, em uma reação química, sabe-se se ela é exotérmica ou endotérmica e, portanto, se é necessário realizar alguma intervenção de resfriamento ou aquecimento. No tratamento térmico de metais, sabe-se que podem ser mudadas suas características físicas de conformação (dobra, corte) através de um determinado ciclo de temperatura.

O grau de sofisticação dos modelos matemáticos do processo depende do refinamento com que eles são controlados. Pode-se utilizar modelos simples que estabelecem relações lineares entre as grandezas, correspondendo a simplificações que se fazem para permitir uma operacionalização fácil. Pode-se, também, desenvolver modelos sofisticados com as técnicas mais modernas de simulação e solução por elementos finitos. Assim, em uma reação química, pode-se utilizar apenas as equações de balanço estequiométrico para determinar as quantidades de materiais a serem misturados, ou então construir modelos de dinâmica das reações, com técnicas de elementos finitos, que possuem uma abordagem assim como a que se segue.

Considera-se um elemento de volume dV em que são aplicadas as equações da reação química, e são colocadas também as equações de aquecimento e de movimentação do material dentro do banho. É feita a integral de volume desse elemento até se chegar à condição de contorno do banho todo e do ambiente onde ele está imerso. Nesse modelo, então, chega-se ao refinamento de se determinar, teoricamente, a velocidade de movimentação dos materiais, a temperatura em cada ponto e o estágio da reação em andamento.

Um exemplo ilustrativo desse fato está na [Figura 1.2](#) que representa o processo de aquecimento de uma placa a ser laminada. O objetivo do processo é aquecer o material até uma temperatura adequada e homogênea, de forma que os pontos A, B e C tenham a mesma temperatura quando chegarem no laminador (menor que um $\Delta\theta$ especificado). Evidentemente não é possível medir a temperatura nos referidos pontos e, portanto, torna-se necessário,

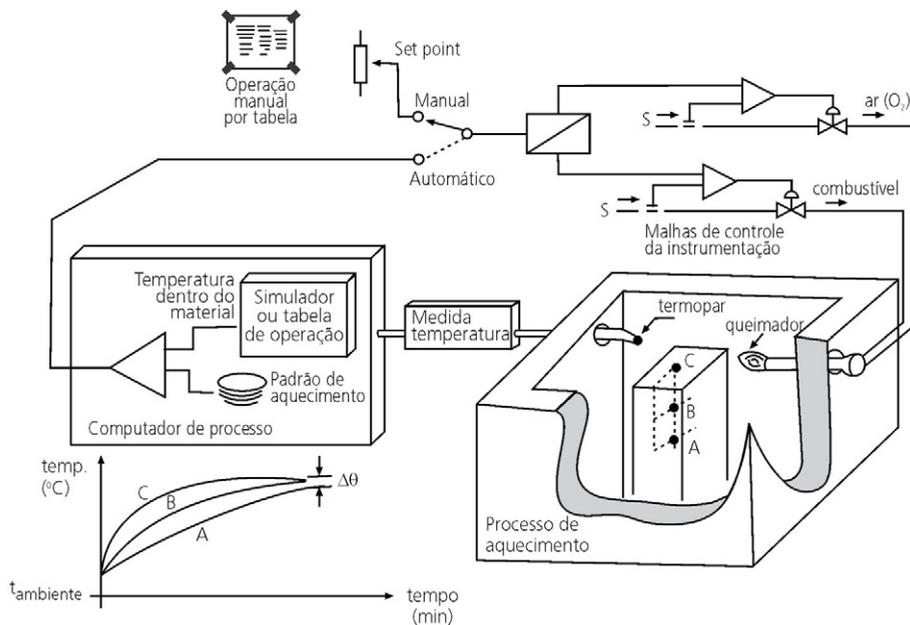


FIGURA 1.2 Processo de aquecimento.

através de algum modelo matemático, determiná-las através da temperatura indicada pelo termopar. Um modelo simplificado vai dar um erro maior que um modelo sofisticado, mais preciso.

O engenheiro de processo determina também quais os pontos em que devem ser colocados os termopares e os queimadores, em número elevado em processos complexos.

Observar também que neste exemplo existem dois engenheiros de processo, um fornecedor do forno – especialista em aquecimento, provavelmente um engenheiro mecânico – e outro, usuário do forno, especialista no processo de laminação, engenheiro metalurgista. As definições referentes às necessidades de medida e controle das grandezas estão divididas entre eles.

1.6.3 Medição das grandezas do processo

Esta é uma tarefa do engenheiro de automação. Uma vez definidas as grandezas do processo, é necessário verificar sua observabilidade, ou seja, se a grandeza pode ser medida diretamente.

Veja novamente o exemplo da [Figura 1.2](#) em que não é possível medir diretamente as grandezas do processo, no exemplo, os pontos A, B e C. Sabendo-se a temperatura do forno pode-se calcular qual deverá ser a temperatura no interior do lingote, em cada instante, através do modelo matemático.

1.6.4 Decisão sobre o que fazer com as medidas obtidas

Uma vez obtidas as informações sobre o processo, é avaliado se os valores estão adequados verificando se estão dentro da faixa esperada. Um modelo matemático estabelece a relação entre as variáveis de entrada e os valores a serem enviados para a saída. Alguns processos utilizam a simulação em tempo real, na qual o computador simula, durante o andamento do processo, o que deverá acontecer nos próximos momentos para determinar as ações a serem tomadas. Nesse caso, entretanto, pode haver problemas de desempenho e, por essa razão, muitas vezes se opera com equações simplificadas do processo ou mesmo com tabelas derivadas desses modelos.

1.6.5 Atuação no processo

A atuação no processo pode ser realizada através de operadores, na chamada operação manual, ou automaticamente, na operação automática, através do sistema de controle.

Em uma operação manual do processo, o operador deve ter uma tabela para poder alterar o valor desejado (*set point*) do maçarico, de modo a mandar mais ou menos energia para o material em aquecimento. Observa-se que, embora seja uma operação manual, o operador atua indiretamente nas grandezas do processo. Ele muda o valor desejado (*set point*), que pode ser uma temperatura, a qual, por sua vez, atua na quantidade de combustível – na verdade uma

malha PID – que, por sua vez, arrasta a quantidade de ar (outra malha PID), fornecendo a mistura estequiométrica adequada para não faltar oxigênio para combustão. O sistema é uma coleção de malhas de controle, vinculadas umas às outras, que permite o controle correto do processo. Processos completos possuem dezenas ou até centenas de malhas de controle.

Em uma operação automática, a atuação no processo é realizada sem a interferência humana.

1.7 Elementos essenciais de um sistema de automação

Conforme ilustrado na [Figura 1.3](#), todo sistema de automação é formado por um sistema controlado e por um elemento de controle.



FIGURA 1.3 Sistema de controle.

O sistema controlado é o sistema alvo da automação e precisa permitir algum tipo de entrada para que seu comportamento possa ser alterado pelo elemento de controle.

O elemento de controle, por sua vez, possui uma saída para influir no sistema controlado e também precisa ter alguma forma de identificar quando deve ser realizada essa interferência. Por exemplo, se houver a necessidade de controlar alguma grandeza como pressão ou temperatura, deve haver um valor de referência e, quando o sistema controlado desvia desse valor, é necessária uma atuação. Outra forma de realizar essa interferência é por tempo: depois de decorrido um determinado intervalo de tempo, uma atuação é realizada para ligar, desligar ou alterar alguma grandeza do sistema controlado.

Há três operações básicas em qualquer sistema de automação e controle: **medição, decisão e ação** [SMI2008]. Elas são realizadas, respectivamente, pelos elementos sensores, transmissores, controladores e atuadores, que são essenciais para esses sistemas. A [Figura 1.4](#) apresenta essas operações, considerando o uso de controlador automático.

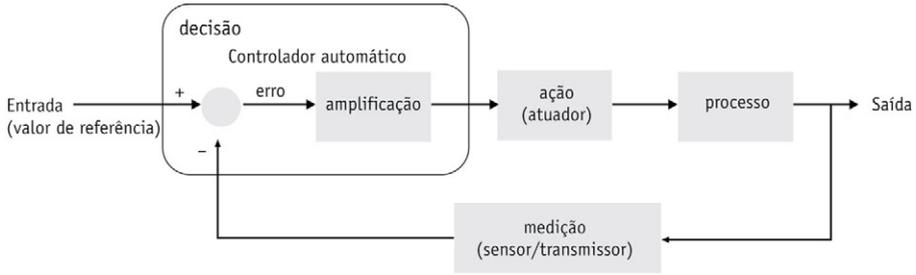


FIGURA 1.4 Diagrama de blocos de um sistema de controle (baseado em [OGA1993]).

A **medição** das variáveis de processo é realizada através de **sensores e transmissores**. Os sensores são dispositivos que transformam variáveis físicas – posição, velocidade, temperatura, nível etc. – em variáveis convenientes, como elétricas. Podem ser de contato mecânico com o processo ou de proximidade. Os transmissores, por sua vez, detectam as variações na variável medida e transmitem-na à distância. Os valores medidos são entregues aos controladores.

A **decisão** é realizada pelo **controlador**. Visa manter o sistema de controle no estado desejado. Os controladores definem a ação a ser realizada pelos elementos de controle finais. Podem operar no modo manual (em que os operadores alteram a saída manualmente) ou automático (o controlador decide e informa o elemento de controle final). No controle automático, o sinal de erro detectado é geralmente amplificado para alimentar os atuadores.

A **ação** é realizada pelos **elementos de controle finais**, ou **atuadores** – válvulas de controle, transportadores, motores etc. – como resultado da decisão do controlador.

1.8 Na prática

Estudar automação sem conhecer quais são as principais empresas que fornecem equipamentos e sistemas é um aprendizado incompleto. Nesta seção são apresentadas algumas empresas do mercado de automação. Esta lista é apenas a relação de algumas empresas tradicionais que atuam no mercado brasileiro há muitos anos.

- **Siemens** – é uma das maiores empresas alemãs, fundada por Werner von Siemens, em 1847, que atua em diversas áreas como energia, hidrogeradores, transformadores, semicondutores, equipamentos médicos e automação:
<http://www.industry.siemens.com.br/automation/br/pt/automacao-e-controle/pages/automacao-e-controle.aspx>
- **ABB – Asea Brown Boveri** – empresa resultado da fusão, em 1988, de duas tradicionais empresas: da Sueca ASEA, de 1883, com a Suíça Brown

Bovery, de 1891, tornando-se um dos maiores conglomerados mundiais. Atua em diversas áreas, como robótica, energia e automação:

<http://www.abb.com/product/us/9AAC115756.aspx>

- **Honeywell** – empresa americana que nasceu com a invenção de Albert Butz de um termostato para fornos a carvão. Em 1906, Mark C. Honeywell fundou a Honeywell Heating Specialty Co. que evoluiu para a empresa atual. Atua em diversas áreas como produtos de consumo, serviços de engenharia, automação industrial, energia, aeroespacial: <http://honeywell.com/Solutions-Technologies/Pages/energy.aspx>
- **Rockwell Automation** – empresa de origem americana fundada, em 1919, por Lynde Bradley e Stanton Allen que fundaram a AllenBradley que, em 1985, foi adquirida pela Rockwell International, uma empresa da área mecânica e espacial. Atua em diversas áreas como indústria aeroespacial, defesa, eletrônica comercial, automotiva e automação industrial: <http://ab.rockwellautomation.com/pt/Programmable-Controllers>
- **Yokogawa** – empresa de origem japonesa fundada por Tamisuke Yokogawa, em 1915, em Tokyo. Tem seus negócios baseados em medições, controle e informação: <http://www.yokogawa.com.br/index.php>
- **Festo** – empresa de origem alemã, de 1925, que inicialmente fabricava ferramentas de corte e evoluiu para a indústria de automação, produzindo transdutores elétricos e pneumáticos e sistemas de automação. http://www.festo.com/cms/pt-br_br/index.htm
Como curiosidade, observe o voo de um pássaro mecânico no endereço: <http://www.youtube.com/watch?v=4l0xavWi7kU> obtido em 03/03/2013.
- **Fanuc** – **F**actory **A**utomatic **N**umerical **C**ontrol – empresa japonesa criada em 1956 com subsidiária da Fujitsu. Em 1972 tornou-se uma empresa independente especializada na fabricação de robôs industriais: <http://www.fanucrobotics.com/Products/Robots/IndustryApplications.aspx>
- **WEG** – empresa brasileira sediada em Jaraguá do Sul, Santa Catarina, fundada por **W**erner **R**icardo **V**oigt, **E**ggon **J**oão da **S**ilva e **G**eraldo **W**erninghaus em 1961. Tornou-se uma das maiores indústrias de motores elétricos, evoluindo também para sistemas de automação: <http://www.weg.net/br/Produtos-e-Servicos/Drives/CLPs-e-Controle-de-Processos>
- **Altus** – empresa brasileira fundada em 1982 na grande Porto Alegre, fabrica controladores programáveis, inversores, painéis elétricos e produtos associados para automação: http://www.altus.com.br/site_ptbr/
- **ECIL** – **E**mpresa **C**omercial **I**mportadora **L**tda. – empresa brasileira fundada em 1929, fazia a importação de equipamentos ferroviários

e produtos para tratamento de água, evoluiu para a fabricação de termopares e atualmente sistemas de automação:

<http://www.ecil.com.br/>

- **Smar** – empresa brasileira fundada em 1974, desenvolvendo sistemas de automação para a indústria de açúcar e álcool, tornou-se um dos maiores fabricantes de sistemas de automação industrial:
<http://www.smar.com>
- **Coel** – empresa brasileira criada em 1954, produz sistemas de controle de temperatura, temporizadores e diversos equipamentos para automação:
<http://coel.com.br/>

Observe que as grandes empresas multinacionais são quase todas centenárias, e as empresas brasileiras iniciaram suas atividades na época da industrialização do Brasil, a partir da década de 1960.

1.9 Leituras recomendadas

1. Assista ao filme sobre produção eletrônica da empresa alemã SMA no endereço <http://www.youtube.com/watch?v=2qk5vxWY46A>. Identifique quais são os sistemas de automação existentes e quais as funcionalidades desses sistemas.
2. Observe o filme de Whitney e Fletcher [WHI2009] e identifique quais as diferenças existentes entre a produção automotiva daquele tempo e a atual.

1.10 Exercícios e atividades

1. Um forno a gás doméstico tem controle automático de temperatura? Compare com um miniforno elétrico. Qual a diferença entre os dois do ponto de vista de automação?
2. Identifique em casa pelo menos cinco dispositivos automáticos.
3. Faça um diagrama representativo do processo produtivo do pão de uma padaria, um diagrama em blocos equivalente ao da [Figura 1.1](#).
4. Escolha dois sistemas produtivos com características bem diferentes, que você seja capaz de descrever, e faça um diagrama em blocos equivalente ao da [Figura 1.1](#).
5. Elenque três tipos diferentes de sistemas produtivos e identifique quais seriam os especialistas envolvidos para projetar tais sistemas.
6. O modelamento matemático de processo utiliza, na verdade, os conhecimentos adquiridos em disciplinas do curso de engenharia. Identifique, para cada um dos tipos de processo relacionados a seguir, quais são as disciplinas que estudam esse assunto:
 - a. Processo de tratamento térmico;
 - b. Processo de produção de sabão;
 - c. Processo de comunicação por satélite.

1.11 Soluções de alguns exercícios

Solução do Exercício 3. O pão é produzido através da (1) mistura dos ingredientes (trigo, sal, fermento e água) até que a massa fique na consistência adequada. Após isso, a (2) massa fica em repouso para crescer durante um determinado período e fica pronta para (3) ser dividida e enrolar o pão. Segue para o (4) forno e faz-se o pão. Portanto são quatro etapas em sua produção, que podem ser representadas conforme a [Figura 1.5](#).

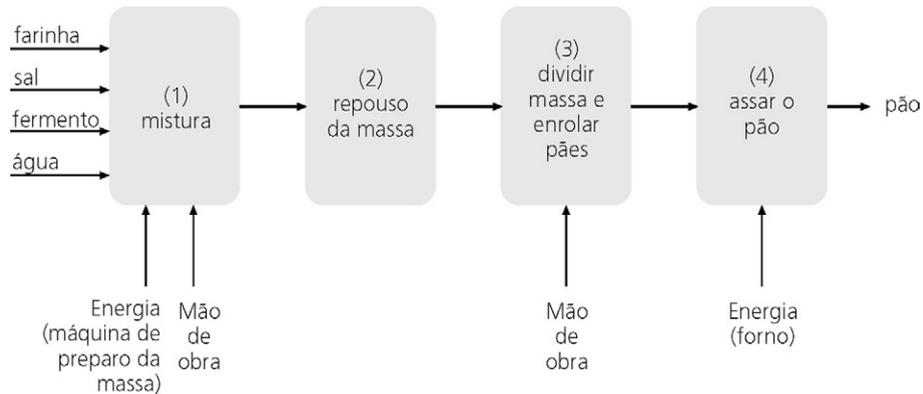


FIGURA 1.5 Processo de produção de pão.

Referências bibliográficas

- [BEN2002] BENNETT, Stuart. Otto Mayr: contributions to the history of feedback control. **IEEE Control Systems Magazine**. Vol. 22, n. 2, Apr 2002. Disponível em: <http://ieeexplore.com/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=993312&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.com%2Fstamp%2Fstamp.jsp%3Ftp%3D%26arnumber%3D993312>. (Acessado em: 12/02/2012.)
- [BIS2009] BISSELL, Christopher. **A history of automatic control**. In: Nof, Shimon Y. ed. **Springer Handbook of Automation**. Heidelberg, Springer. 2009. (Springer handbook series - LXXVI).
- [COL1998] COLÂNGELO FILHO, Lúcio. **Gestão da Qualidade de Dados**. 1998. Tese (Doutorado em Engenharia (de Produção) - Universidade de São Paulo
- [OGA1993] OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de Controle Moderno** Trad. ALBUQUERQUE, I J. Rio de Janeiro: Prentice Hall do Brasil, 1993.
- [OLI1999] OLIVEIRA, Adalberto Luiz de Lima. **Fundamentos de Controle de Processo**. SENAI-Programa de Certificação de Pessoal de Manutenção. Vitória: apostila. 1999.
- [SMI2008] SMITH, Carlos A.; CORRÍPIO, Armando. **Princípios e prática do controle automático de processo**. 3. ed. Trad. Maria Lucia Godinho de Oliveira. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- [TAY1990] TAYLOR, Frederick Winslow. **Princípios de Administração Científica**. 8ª Ed. São Paulo: Ed. Atlas. 1990.
- [WHI2009] WHITNEY, R.; FLETCHER. **Henry Ford, Model T, and the Assembly Line**. 2009. Disponível em http://www.youtube.com/watch?v=-CdZvLv8lQ&feature=plcp&context=C3a00295UOEgTsToPDskKÿtr28M1nw13q1yXVdN_YB. (Acessado em: 12/02/2012.)

Sistema produtivo

SUMÁRIO

2.1	Miniglossário	18
2.2	Tipos de produção.....	19
2.3	Fluxo contínuo.....	21
2.3.1	Exemplos de fluxo contínuo	22
2.3.1.1	<i>Produção de energia elétrica</i>	<i>23</i>
2.3.1.2	<i>Produção de cimento</i>	<i>23</i>
2.3.1.3	<i>Produção de derivados de petróleo</i>	<i>24</i>
2.3.2	Características gerais do fluxo contínuo	25
2.3.3	Características da mão de obra do fluxo contínuo	26
2.3.4	Características dos equipamentos do fluxo contínuo	26
2.3.5	Características da automação do fluxo contínuo	26
2.4	Produção discreta em massa.....	26
2.4.1	Exemplos da produção discreta em massa	27
2.4.1.1	<i>Fábrica do Ford modelo T preto</i>	<i>27</i>
2.4.1.2	<i>Fábrica do Audi A1 em Bruxelas.....</i>	<i>28</i>
2.4.1.3	<i>Produção agroindustrial em mineiros, Goiás.....</i>	<i>29</i>
2.4.1.4	<i>Produção de telefones celulares Sony Ericsson.....</i>	<i>29</i>
2.4.2	Características da mão de obra da produção discreta em massa.....	30
2.4.3	Características dos equipamentos da produção discreta em massa	30
2.4.4	Características da automação da produção discreta em massa	31
2.5	Produção discreta intermitente.....	31
2.5.1	Exemplos de produção discreta intermitente	33
2.5.1.1	<i>Autopeças</i>	<i>33</i>
2.5.1.2	<i>Indústria moveleira.....</i>	<i>34</i>
2.5.1.3	<i>Produção de paredes de madeira (wall production)</i>	<i>34</i>
2.5.2	Características da mão de obra da produção discreta intermitente	35
2.5.3	Características dos equipamentos da produção discreta intermitente	35
2.5.4	Características da automação da produção discreta intermitente.....	35

2.6	Grandes projetos	36
2.6.1	Exemplos dos grandes projetos.....	36
2.6.1.1	<i>Edifícios de aço no Japão e na China</i>	37
2.6.1.2	<i>Construção de estradas</i>	38
2.6.1.3	<i>Construção de petróleo</i>	40
2.6.2	Características da mão de obra dos grandes projetos	41
2.6.3	Características dos equipamentos dos grandes projetos	41
2.6.4	Características da automação dos grandes projetos.....	41
2.7	Migração entre volume e customização	41
2.8	O caso especial de serviços	42
2.9	Na prática	44
2.10	Considerações finais	45
2.11	Leituras recomendadas	45
2.12	Exercícios e atividades	46
2.13	Soluções de alguns exercícios	47
2.13.1	Solução.....	47
2.13.2	Solução.....	48

O Capítulo 1 apresentou o conceito de Sistema Produtivo, que pode produzir bens ou serviços. Neste capítulo são estudados os diferentes tipos de produção.

AO TÉRMINO DESTES CAPÍTULOS VOCÊ VAI CONHECER:

- como os sistemas de produção são classificados;
- as características de cada tipo de produção;
- as principais características dos sistemas produtivos;
- os equipamentos produtivos de cada tipo de produção;
- as características típicas da mão de obra utilizada em cada tipo de produção;
- automação;
- as principais características da produção em serviços.

2.1 Miniglossário

Grande projeto. Tipo de produção caracterizada por possuir longa duração e um grande número de atividades diversificadas.

Produção discreta intermitente. Tipo de produção caracterizada por produzir uma quantidade limitada de produtos em lotes. A organização da produção deve ser flexível para permitir variação nos produtos produzidos.

Produção discreta em massa. Tipo de produção caracterizada por produzir grande volume de um só produto ou produtos com pouca variação.

Produção contínua (fluxo contínuo). Tipo de produção caracterizada por grandezas contínuas no tempo como, por exemplo, pressão, vazão e temperatura. Normalmente a produção é medida em quantidades fornecidas no tempo (por hora, por minuto).

2.2 Tipos de produção

Conforme já descrito no Capítulo 1, um Sistema Produtivo tem por finalidade a produção de um produto ou a realização de um serviço. Neste item são estudados os diferentes tipos de produção de itens manufaturados.

A produção de bens é realizada por organizações que podem desenvolver a atividade com diferentes volumes produtivos, em quantidades pequenas ou grandes, bem como diferentes variedades de produtos padronizados sem nenhuma diferenciação ou produtos totalmente personalizados, não havendo dois iguais.

Um exemplo desses diferentes tipos de produção é a do terno do alfaiate, exclusivo e único, produzido artesanalmente em pequena quantidade, contrastando com a do terno industrializado, produzido em grande escala. Observe que no primeiro caso o produto tem custo e preço mais altos que o segundo (o custo se refere a quanto é gasto pela organização para produzir o produto, e o preço é o valor a ela pago pela venda do produto).

Conforme representado na [Figura 2.1](#), os principais parâmetros que definem os tipos de produção são a variedade de produtos e o volume de produção. Nessa classificação são cinco os tipos de produção: processo contínuo, produção em massa, produção intermitente repetitiva, produção intermitente sob encomenda e grandes projetos [[SIL1992](#)].

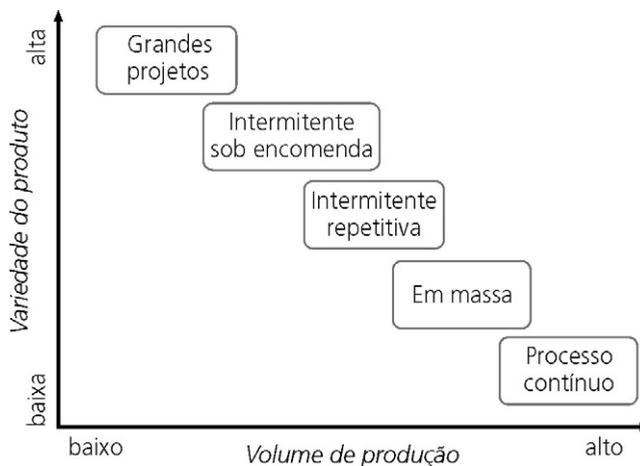


FIGURA 2.1 Tipos de processos de produção (adaptado de [[SIL1992](#)]).

Na **Figura 2.2** está representada essa classificação, identificando dois grandes grupos: **fluxo contínuo** e **produção discreta**.

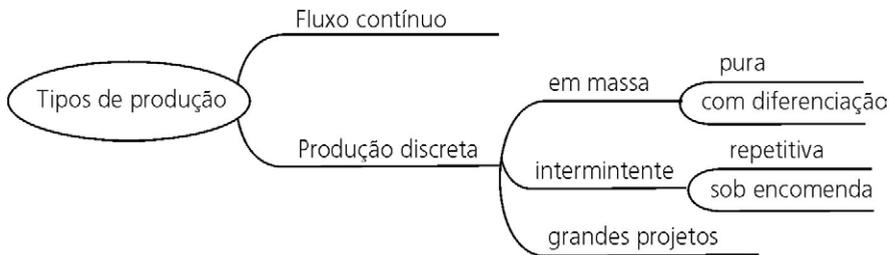


FIGURA 2.2 Tipos de produção (adaptado de [PES2006]).

O **Quadro 2.1** apresenta a classificação dos tipos de produção.

Quadro 2.1 Tipos básicos de produção (adaptado de [PES2006])

Tipo de produção:		Exemplo
Fluxo contínuo		Refino de petróleo, petroquímica, alimentos, setores da siderurgia
Produção Discreta	Em massa	Pura Com diferenciação
	Intermitente	Repetitiva Sob encomenda
	Grandes projetos	Construção civil, Construção naval, Montagens industriais, Projetos de P&D

A **produção contínua**, ou **fluxo contínuo**, é a que as grandezas medidas e controladas são variáveis contínuas no tempo como, por exemplo, pressão, vazão e temperatura. A produção é medida através da quantidade produzida no tempo como, por exemplo, a produção de água para uma cidade (normalmente medida em metros cúbicos por segundo) e a quantidade de energia elétrica produzida por uma hidroelétrica (medida em MW hora – Mega Watts hora). Utiliza variáveis analógicas.

A **produção discreta** trata de itens que podem ser enumerados, como automóveis, televisores e casas. As medidas são baseadas em variáveis discretas. Pode ser classificada em produção discreta em massa, produção discreta intermitente e grandes projetos.

A **produção discreta em massa** trata da fabricação de produtos em grandes volumes. Exemplo clássico é a fábrica do Ford modelo T preto: um único produto produzido em grande escala. Essa é a chamada **produção discreta em massa pura**. A **produção discreta em massa com diferenciação** trata da fabricação de produtos com pequenas variações como, por exemplo, a fabricação de eletrodomésticos, que são produtos fabricados em grande volume, havendo diversos modelos com pequenas variações.

A **produção intermitente** é a que ocorre durante certo período, produzindo um determinado produto ou um conjunto de produtos. Normalmente o volume de produção é menor e há uma maior diversidade de produtos. A área produtiva se prepara para realizar a produção de um produto ou um conjunto de produtos e realiza essa produção. Depois, ela se reorganiza para outro tipo de produto e inicia um novo ciclo produtivo. Pode ser **produção intermitente repetitiva**, como é o caso da indústria de móveis, que fabrica, por exemplo, cadeiras e depois mesas, ou pode ser **intermitente sob encomenda**, como é o caso de bens de capital. Um exemplo típico de produção intermitente sob encomenda seria a produção de hidrogeradores para uma usina elétrica, que possui um projeto reproduzido algumas vezes para aquela obra específica. Depois, outro projeto produzirá outros hidrogeradores para a outra usina. Observe que esse último exemplo trata da produção de um pequeno lote de produtos únicos.

Finalmente, na produção discreta há os **grandes projetos** que tratam dos produtos, normalmente únicos, que são projetados e fabricados. Uma característica importante dos grandes projetos é a sua longa duração e a especificidade dos produtos produzidos. Exemplos desse tipo de projeto são a construção de um *shopping* ou a de uma barragem na área da engenharia civil, ou ainda a construção de um navio na área da engenharia naval.

Os tipos de produção são descritos nos próximos tópicos de acordo com a seguinte estrutura:

- **Processo:** neste item são apresentadas as características gerais do processo produtivo do tipo de produção em foco.
- **Equipamentos:** neste item são descritas as principais características dos equipamentos produtivos de cada tipo de produção. Os equipamentos produtivos embutem, dentro de si, as tecnologias utilizadas. Portanto, no projeto de uma planta, de um processo produtivo, algumas decisões devem ser tomadas antes da escolha desses equipamentos.
- **Mão de obra:** este item apresenta as características da mão de obra típica do tipo de produção focado. A mão de obra vista neste item trata apenas das pessoas envolvidas diretamente com a produção do produto ou a realização do serviço.
- **Automação:** neste item, são descritas as principais características da automação para cada um dos tipos de produção.

2.3 Fluxo contínuo

No processo contínuo, as grandezas medidas e controladas são variáveis contínuas no tempo como, por exemplo, pressão, vazão e temperatura. A produção é medida em quantidades por unidade de tempo como, por exemplo, litros por minuto, megawatts (1Watt = 1joule/s) e toneladas por dia.

As operações são de ciclo longo, ou seja, uma vez colocado o processo em funcionamento, não mais se desliga o sistema, e a produção ocorre 24 horas por dia, 7 dias por semana sem interrupção, conforme apresentado no [Quadro 2.2](#).

Quadro 2.2 Características do fluxo contínuo (adaptado de [PES2006])

Tipo de produção:	Fluxo contínuo
Característica	
Processo	Operações contínuas de longo ciclo. Baixa intervenção humana.
Equipamentos	Cada instalação tem sua característica específica.
Mão de Obra	Operadores de alta qualificação e especialização naquela instalação específica.
Automação	Instrumentação analógica ou digital. Normalmente realiza o controle de grandezas contínuas como pressão, vazão, temperatura, corrente, tensão.

Normalmente a matéria-prima circula por dentro dos equipamentos produtivos e vai se transformando até chegar ao produto acabado. Muitas vezes o tempo decorrido para um elemento de matéria-prima chegar à saída do processo demora algumas horas. Por exemplo, um “pellet” de minério de ferro em um alto-forno demora cerca de 8 horas para se transformar em ferro gusa.

Uma produção desse tipo normalmente possui um processo delicado para partir, ou seja, sair de uma situação de produção parada para a situação de produção em regime pode demorar horas ou mesmo dias. Similarmente, as paradas de produção, quando necessárias para troca de algum equipamento ou peça que quebrou ou desgastou, requerem também operações delicadas.

Cada planta possui características específicas e únicas. Duas plantas idênticas com os mesmos equipamentos podem ter pontos de operação diferentes, e uma equipe que sabe operar uma planta pode ter dificuldade para assumir a outra em função dessas especificidades.

O processo ocorre com alto grau de automação praticamente sem intervenção humana. Os operadores ficam apenas acompanhando o funcionamento dos equipamentos fazendo a supervisão do comportamento das variáveis do processo. É necessária intervenção humana apenas em situações de paradas, manobras para alterar o regime de trabalho ou em situações de emergência.

A mão de obra deve ser altamente qualificada, pois, na ocorrência de emergência, é importante o operador saber exatamente como e onde agir.

2.3.1 Exemplos de fluxo contínuo

Como exemplos de Fluxo Contínuo podem ser citados: produção de energia elétrica, produção de cimento e produção de derivados de petróleo.

2.3.1.1 Produção de energia elétrica

A produção de energia elétrica a partir de fonte hidráulica é feita com o uso de barragens que provocam a queda d'água e fazem girar os hidrogeradores. O hidrogerador é um equipamento que se baseia no princípio do motor/gerador: aplicando energia na sua entrada (estator), o rotor gira, operando como motor, e girando-se o rotor, energia é gerada no estator. O hidrogerador gera energia elétrica a partir da passagem de um fluxo de água que gira o rotor. Um sistema complexo de automação controla o seu funcionamento para manter a frequência e a tensão gerada. A tensão e a corrente fornecidas dependem das características do hidrogerador.

A Figura 2.3 ilustra o esquema de um hidrogerador que está em uma animação da GE no endereço: <http://www.youtube.com/watch?v=IBMGNqW-ROKI> [GEP2012].



FIGURA 2.3 Usina hidroelétrica [GEP2012].

2.3.1.2 Produção de cimento

A produção de cimento é outro processo contínuo típico. As matérias-primas são retiradas de minas de calcário e argila. Esse material passa por um processo de britagem, moagem, queima e moagem para ensacamento.

Esse material chega na usina e entra em um moinho de bolas para quebrar a matéria-prima em pedaços pequenos.

O segundo passo do processo é a moagem da mistura crua, que deve ser homogeneizada para entrar no forno e fazer a queima. Esse material todo é queimado em um forno a uma temperatura de 1.450 °C para formar o *Clinker*.

Vale observar que cerca de 46% do custo do cimento é energia gasta no processo de transformação. O Clinquer, depois de moído junto com gesso e calcário, produz finalmente o cimento. Esse material é ensacado e despachado para o mercado.

Na [Figura 2.4](#) pode ser vista uma fábrica de cimento. Uma cena do filme produzido pelo SNIC – Sindicato Nacional das Indústrias de Cimento – ilustra o processo de fabricação de cimento e pode ser visto no endereço: http://www.youtube.com/watch?v=XadBPx_48-E [SNC2006].



FIGURA 2.4 Fábrica de cimento [SNC2006].

2.3.1.3 Produção de derivados de petróleo

A produção de derivados de petróleo é outro processo contínuo típico.

O refino do petróleo é um processo denominado destilação fracionada que ocorre em equipamentos similares ao ilustrado na [Figura 2.4](#).

A matéria-prima (petróleo bruto) é aquecida de forma a provocar a sua evaporação. A torre de destilação é construída de tal forma que, à medida que os materiais evaporam, se afastam da fonte de calor e esfriam, estabelecendo, assim, um perfil de temperatura dinâmico nas diversas cotas de altura.

Elementos mais leves sobem mais e mais pesados sobem menos. Coletores apropriados são colocados nas cotas correspondentes às temperaturas de liquefação dos diversos subprodutos como, por exemplo, os itens relacionados no [Quadro 2.3](#).



FIGURA 2.5 Torre de destilação de petróleo [TOD2008].

Quadro 2.3 Temperatura e número de moléculas dos derivados de petróleo [TOD2008]

Subproduto	Faixa de temperatura	Moléculas de carbono
Gás Natural	Temperatura Ambiente	1 a 4
Gasolina	40 a 75 °C	5 a 10
Querosene	175 a 235 °C	11 a 12
Óleo Diesel	235 a 305 °C	13 a 17
Óleo Lubrificante, Parafina	305 °C	>17
Resíduos	>510 °C	>35

Um vídeo sobre destilação de petróleo pode ser assistido no endereço: <http://www.youtube.com/watch?v=WJjYK4xTEKo> [TOD2008].

2.3.2 Características gerais do fluxo contínuo

O *fluxo contínuo*, pelo fato de ser uma produção em grande quantidade, possui ciclo de trabalho normalmente longo. Em outras palavras, a produção ocorre sem paradas, operando dia e noite, fins de semana, fazendo com que haja a necessidade de turnos de trabalho e esquemas de atendimento no caso de emergência. É denominada produção 24×7. A produção possui baixa intervenção humana, e os equipamentos devem suportar operação por longos períodos sem parar. As paradas normalmente são programadas para a manutenção preventiva.

2.3.3 Características da mão de obra do fluxo contínuo

No **fluxo contínuo**, em função das características do produto que está sendo produzido, as operações normalmente são realizadas com baixa ou nenhuma intervenção humana. Conforme exemplificado anteriormente, é o caso da produção de água, energia elétrica, petróleo, enfim, produtos de alto volume em que há a necessidade de uma grande uniformidade dos produtos gerados. A mão de obra, portanto, é altamente qualificada, pois é necessário conhecer com profundidade o funcionamento dos equipamentos produtivos e sua atividade basicamente é mantê-los em operação realizando intervenções em paradas programadas para manutenção ou em casos de emergência. O perfil de atividades dos operadores de plantas de fluxo contínuo é normalmente formado por simples observação sobre o comportamento do processo, sem pressão de tempo pela realização de alguma atividade. Por outro lado, em momentos de falha, quando os equipamentos saem de sua situação normal de operação, é imprescindível que os operadores sejam altamente qualificados para saberem exatamente como agir no momento certo de modo a não provocar catástrofes.

2.3.4 Características dos equipamentos do fluxo contínuo

No **fluxo contínuo** os equipamentos produtivos são construídos especificamente para aquela finalidade e cada instalação possui características específicas. Em outras palavras, duas instalações iguais, com os mesmos equipamentos, podem possuir comportamento diferente.

2.3.5 Características da automação do fluxo contínuo

No **fluxo contínuo**, o sistema de automação é quem opera a produção. São controladas variáveis como pressão, vazão e temperatura. A instrumentação mede e controla essas variáveis. É comum existirem salas de controle, onde os operadores ficam supervisionando o funcionamento dos equipamentos. Conforme já explicado, esse tipo de produção funciona sozinho, sem intervenção humana.

2.4 Produção discreta em massa

O **Quadro 2.4** apresenta as principais características da **produção discreta**. A **produção discreta** normalmente opera com turnos normais de trabalho, com paradas em finais de semana, por exemplo. Existem operações com turnos, sem paradas, quando há a necessidade de produção em alto volume, pressões de tempo, processos com ciclos muito longos para entrarem em regime, ou equipamentos muito caros, cujo custo de hora parada é muito alto.

Quadro 2.4 Características da produção em massa (adaptado de [PES2006])

Tipo de produção:	Produção em massa	
	Pura	Com Diferenciação
Processo	Grande volume de um só modelo de produto	Grande volume alguns modelos
Equipamentos	Equipamentos dedicados	Equipamentos dedicados possibilidade de pequena variação
Mão de obra	Em geral atividades repetitivas e rotineiras Mão de obra com pouca qualificação. Existem alguns setores com lógica diferente (montagem <i>versus</i> ferramentaria)	
Automação	Automação dedicada sem flexibilidade	Automação dedicada flexível nos pontos de variabilidade dos produtos

Esta produção, pelo fato de possuir um alto volume de apenas um produto (em massa pura) ou produtos similares com pouca variação (em massa com diferenciação), necessita de equipamentos com alto grau de produtividade e, muitas vezes, com alto grau de automação, mas não precisam de flexibilidade.

2.4.1 Exemplos da produção discreta em massa

Como exemplos de processos com produção discreta em massa podem ser citadas a produção clássica de Ford e a fabricação de celulares.

2.4.1.1 Fábrica do Ford modelo T preto

A produção discreta em massa ficou conhecida na época em que a Ford se notabilizou na fabricação do Ford modelo T preto, pois esse veículo era fabricado em dez vezes menos tempo que qualquer outro concorrente, conforme descrito no vídeo de comemoração de 100 anos do início de sua fabricação [CAR2012]. Importante observar nesse vídeo (Figura 2.6) o grande número de pessoas que trabalhava na linha de produção e a facilidade do veículo para circular em estradas de terra. Desse tipo de produção é que surgiu a expressão Taylorismo em referência a Frederick Winslow Taylor, conforme já explicado no Capítulo 1. Vale observar que a ideia da linha de produção, com os veículos sendo movimentados por cima, foi do próprio Henry Ford, inspirado na observação de matadouros. Nessa época a produção toda era manual com o auxílio de dispositivos que facilitavam o trabalho humano de forma a maximizar a produtividade.

O endereço do vídeo é [CAR2012]:

http://www.modelt.org/index.php?option=com_content&view=article&id=52&Itemid=72



FIGURA 2.6 Produção em Massa da Ford [CAR2012].

2.4.1.2 Fábrica do Audi A1 em Bruxelas

A produção automobilística atual também é discreta em massa, porém com diferenciação, pois, em uma linha, são fabricados diversos modelos. Vale observar, para efeito comparativo, a Figura 2.7 [AUD2010], que mostra a produção do Audi modelo A1 em Bruxelas, totalmente automatizada.



FIGURA 2.7 Produção do Audi A1 em Bruxelas [AUD2010].

O endereço do vídeo [AUD2010] é:

http://www.youtube.com/watch?v=gLv25kB_KX0&feature=player_detailpage

2.4.1.3 Produção agroindustrial em Mineiros, Goiás

Um terceiro exemplo de produção discreta em massa é da agroindústria ilustrada no vídeo da Globo [EAG2012]. Nesse caso a produção é de perus para exportação na cidade de Mineiros em Goiás. Trata-se de um grande volume de um só produto.



FIGURA 2.8 Produção de perus em Mineiros [EAG2012].

O endereço do vídeo [EAG2012] é:

<http://g1.globo.com/economia/agronegocios/noticia/2012/07/em-go-criacao-de-perus-movimenta-economia-de-municipio-de-mineiros.html>

2.4.1.4 Produção de telefones celulares Sony Ericsson

A indústria de celulares pode ser enquadrada na produção em massa com diferenciação. Os volumes diários para esse tipo de produção são da ordem de milhares de peças/dia. O fluxo de produção de celulares segue a montagem dos componentes na placa eletrônica seguido pela montagem mecânica. Vale ressaltar que, embora esse exemplo seja de tecnologia atual e haja um grande índice de automação na confecção das placas de circuito impresso e nos testes de funcionamento do celular, a etapa de montagem na mecânica ainda é intensiva em mão de obra.



FIGURA 2.9 Produção de celulares Sony-Ericsson [SON2010].

O endereço do vídeo [SON2010] é:

<http://www.youtube.com/watch?v=p-fLzrTVQjg>

2.4.2 Características da mão de obra da produção discreta em massa

Na **produção discreta**, a participação humana normalmente é maior quando comparada com o fluxo contínuo. Nesse tipo de produção, a mão de obra, de uma maneira geral, é menos qualificada e, à medida que se reduz o volume de produção, caminhando na direção de grandes projetos, a mão de obra fica mais qualificada em função de uma maior variedade dos produtos e uma menor quantidade de itens produzidos.

Na **produção discreta em massa**, normalmente as atividades são repetitivas e rotineiras. A mão de obra em geral possui pouca qualificação. Esse tipo de produção utiliza intensamente os conceitos da administração científica, desenvolvida por Frederic Winslow Taylor [FLE1983]. Há, entretanto, para esse tipo de produção, uma tendência à automação e, portanto, a mão de obra interfere menos na atividade produtiva e passa a supervisionar os equipamentos produtivos, de forma similar ao fluxo contínuo. Portanto, trata-se, nesse caso, de mão de obra mais qualificada.

2.4.3 Características dos equipamentos da produção discreta em massa

Como o volume de produção determina o tipo de equipamento utilizado e o processo produtivo, no projeto de uma planta algumas decisões devem ser

tomadas antes dessa escolha. Por exemplo, a produção de um equipamento eletrônico em baixa escala pode ser realizada de forma intensa em mão de obra, sem muitos equipamentos automáticos: bancadas de montagem, soldagem manual, montagem e testes manuais. Esse mesmo produto fabricado em escala bem maior pode exigir máquinas de inserção automáticas, testadores automáticos. Os materiais utilizados também dependem do volume de produção: em baixa escala, o produto pode ser montado em caixa metálica em uma estamperia (que corta, fura e dobra peças de alumínio ou aço) ou mesmo caixa de fibra de vidro. Para alto volume pode-se investir em um molde de injeção e fazer a caixa plástica, pois o molde é um item de alto custo.

Essas escolhas são muito importantes para um bom projeto do processo de produção. Mais detalhes sobre tecnologia são descritos em [SLA2008].

Na **produção discreta em massa**, como o volume de produção é alto, normalmente os equipamentos produtivos são dedicados, ou seja, foram construídos especificamente para produzir aquele produto e, portanto, possuem alta produtividade (quantidade de peças produzidas na unidade de tempo), mas não permitem variações no produto fabricado. Na produção em massa com diferenciação, como o volume é alto e há produtos diferentes, há flexibilidade apenas nos pontos de diferenciação entre os produtos. Um exemplo de equipamento dedicado de produção é o caso da Intel, que monta uma fábrica específica para a produção de um tipo de processador.

2.4.4 Características da automação da produção discreta em massa

Na **produção discreta em massa**, o sistema de automação normalmente é dedicado e apresenta pouca ou nenhuma flexibilidade, pois a preocupação para este caso é a produtividade, ou seja, o alto volume de itens produzidos na unidade de tempo. Nesse tipo de produção são introduzidos equipamentos de inspeção e medição para a realização de controle da qualidade no próprio processo e garantir a qualidade dos itens produzidos.

2.5 Produção discreta intermitente

A **produção discreta intermitente** caracteriza-se por possuir um maior volume de produtos e um menor volume de produção e, por essa razão, os equipamentos produtivos necessitam de maior flexibilidade para se adaptar mais facilmente aos diferentes produtos fabricados. A fabricação normalmente é feita em lotes, ou seja, organizando-se para atender a um tipo de produto de cada vez.

Nesse tipo de produção os equipamentos produtivos podem ser dedicados ou universais, em função de características específicas do produto.

Podem ser utilizadas máquinas universais como, por exemplo, centros de usinagem, mas é importante lembrar que, quanto mais flexível é o equipamento, a produtividade pode ficar reduzida, quando comparada a com equipamentos dedicados. Tipicamente para esse tipo de produção na área produtiva é usado o arranjo físico funcional como, por exemplo, a seção de torno, fresa, entre outras.

Quadro 2.5 Características da produção em massa (adaptado de [PESS2006])

Tipo de produção:		Produção discreta intermitente
Característica	Repetitiva	Sob encomenda
Processo	Menor volume de produção e maior quantidade de produtos Fabricação em lotes com diferenciação	
Equipamentos	Existe o compromisso entre a utilização de equipamentos dedicados ou universais	Equipamentos universais flexíveis
Mão de Obra	Mão de obra semiquificada	Mão de obra qualificada se houver muita variação na produção
Automação	Utilização de comando numérico Sistemas flexíveis de manufatura	

A produção em lotes é feita seguindo a estratégia definida pela programação de produção PPCP (planejamento, programação e controle da produção). Essa atividade é complexa devido à grande variedade e quantidade de peças produzidas, fazendo com que o número de combinações possíveis seja alto. Dependendo da estratégia adotada, por exemplo, a máxima ocupação de equipamentos produtivos de custo alto ou o menor tempo de passagem dos produtos, a solução pode ser muito diferente.

Conforme já citado anteriormente, a **produção intermitente** ocorre durante certo período, produzindo um determinado produto ou um conjunto de produtos. Lotes menores que no caso da produção em massa exigem uma maior flexibilidade de produção e, portanto, recursos produtivos que também permitam maior flexibilidade.

Na **produção intermitente repetitiva** a fábrica se prepara para produzir certo número de produtos e se reorganiza para outros formando ciclos de produção, como é o caso da indústria de móveis que fabrica, por exemplo, cadeiras e depois mesas. Com relação aos equipamentos, há um compromisso em adquirir equipamentos universais ou dedicados.

Na **produção intermitente sob encomenda**, a fábrica produz lotes únicos de determinados produtos, por exemplo, a indústria de bens de capital. Um exemplo típico de produção intermitente sob encomenda seria a produção de hidrogenadores para uma usina elétrica que possui um projeto reproduzido algumas vezes para

aquela obra específica. Depois, outro projeto produzirá outros hidrogeradores para a outra usina. Observe que esse último exemplo trata da produção de um pequeno lote de produtos únicos. Com relação aos insumos produtivos, normalmente são utilizados equipamentos com bastante flexibilidade.

Pelo fato de o volume de produção ser menor, exigir uma maior diversidade de produtos e, portanto, maior flexibilidade, há a necessidade de mão de obra com maior qualificação, mais especializada.

Nesse caso também, em função da produção de maior quantidade de produtos diferentes, o sistema de automação é normalmente flexível.

2.5.1 Exemplos de produção discreta intermitente

Na **produção intermitente** a fábrica possui um arranjo físico mais flexível que nos casos de produção em massa para permitir a flexibilidade de mudanças nos produtos fabricados. Por essa razão, é comum encontrar arranjos físicos **funcionais**, como seção de torno, fresa, injetoras, entre outros.

Como exemplos de produção discreta intermitente podem ser citadas a indústria de autopeças e móveis, para a produção intermitente repetitiva, ou bens de capital, como produção intermitente sob encomenda.

2.5.1.1 Autopeças

O caso de autopeças (Figura 2.10) está ilustrado no vídeo da empresa americana TCI o qual apresenta a produção da unidade de controle da transmissão (automático) que pode ser vista no endereço desse fabricante [TCI2010].

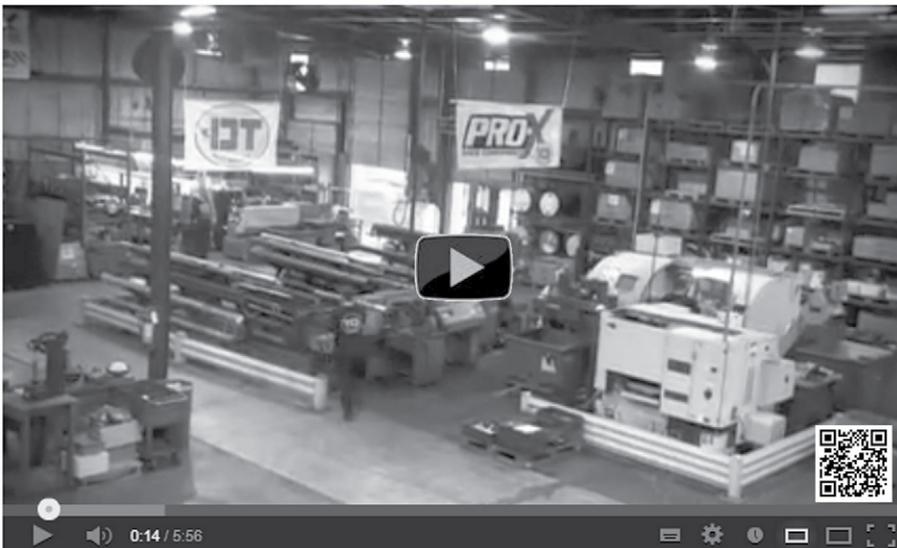


FIGURA 2.10 Indústria de autopeças [TCI2010].

O endereço do vídeo [TCI2010] é:

<http://www.youtube.com/watch?v=29-9LRtkGTM>

2.5.1.2 Indústria moveleira

A indústria moveleira é tipicamente classificada como produção discreta intermitente em função do grande número de diferentes modelos fabricados.



FIGURA 2.11 Indústria moveleira.

O arranjo físico é funcional e há certo grau de automação, embora as atividades ainda sejam intensivas em mão de obra. Observe em “How is the furniture made?”

<http://www.youtube.com/watch?v=h6yjZCTytSQ> [CFF2010]

2.5.1.3 Produção de paredes de madeira (wall production)

A produção de paredes de madeira é outro exemplo de produção discreta intermitente. Observe suas principais características:

- produção intensiva em mão de obra;
 - em virtude das grandes dimensões, os recursos de produção vão ao produto;
 - baixa automação, mas com mecanização para reduzir esforço humano:
- <http://www.youtube.com/watch?v=Auh99PWckjY> [RND2008].

Se as paredes são padronizadas ou possuem uma pequena variação de modelos, esta produção poderia ser classificada como produção em massa com diferenciação?

Seriam necessários mais elementos para responder a essa questão, mas uma característica importante da produção em massa é o alto volume e o produto circular na linha, e isso não ocorre aqui. Vale lembrar que essa classificação é conceitual e que nas fábricas reais pode ocorrer essa dificuldade de enquadramento.



FIGURA 2.12 Produção de paredes de madeira [RND2008].

2.5.2 Características da mão de obra da produção discreta intermitente

Na **produção intermitente repetitiva**, como em geral o volume produzido é menor, há a necessidade de maior flexibilidade na produção e, portanto, uma maior dependência de mão de obra mais especializada.

2.5.3 Características dos equipamentos da produção discreta intermitente

Na **produção intermitente** os equipamentos produtivos podem ser dedicados ou universais, em função de características específicas do produto. Podem ser utilizadas máquinas universais como, por exemplo, centros de usinagem, mas é importante lembrar que, quanto mais flexível é o equipamento, a produtividade pode ficar reduzida, quando comparado com equipamentos dedicados. Tipicamente para esse tipo de produção na área produtiva é usado o arranjo físico funcional como, por exemplo, a seção de torno, fresa, entre outros.

2.5.4 Características da automação da produção discreta intermitente

No caso da **produção intermitente**, em função da maior quantidade de produtos diferentes e produzidos, o sistema de automação é normalmente flexível.

Um exemplo claro para entender o binômio **flexibilidade** versus **produtividade** é o caso do robô de solda utilizado na indústria automobilística. Um robô de solda possui os movimentos necessários para fixar através de

solda elétrica por ponto, por exemplo, a lateral e a capota do veículo. Para a realização da solda basta um software que faça o posicionamento da ponta nas coordenadas corretas da carroceria e o robô realiza a solda com as características técnicas especificadas pela engenharia. Esse robô, altamente flexível, pode soldar qualquer veículo que passar na linha, bastando para isso trocar o software de controle. O problema é que o robô é capaz de realizar apenas uma solda de cada vez. Em uma produção de alto volume, o robô talvez não tenha a capacidade de realizar as soldas no tempo necessário. Para os veículos de maior volume (normalmente os populares) é utilizada uma máquina dedicada que realiza muitas soldas simultaneamente, aumentando a produtividade, pois basta a carroceria se posicionar na máquina dedicada que são feitas, por exemplo, 80 soldas simultaneamente. No entanto, essa máquina dedicada não é capaz de suportar variação dos veículos produzidos. Assim, um equipamento dedicado possui maior **produtividade** e menor **flexibilidade** e um equipamento universal possui maior flexibilidade, mas menor produtividade.

2.6 Grandes projetos

Os **grandes projetos** são o tipo de produção discreta que possui longa duração e um grande número de atividades diversificadas. Normalmente os recursos produtivos vão ao produto que está sendo fabricado, diferentemente dos casos anteriores em que normalmente o produto sendo manufaturado é que circula dentro do ambiente produtivo.

Quadro 2.6 Características da produção em massa (adaptado de [PES2006])

Tipo de produção:	Produção em Massa
Característica	Grandes projetos
Processo	Atividades de longa duração com grande número de atividades
Equipamentos	Equipamentos flexíveis Os recursos de produção vão ao produto
Mão de Obra	Há atividades com mão de obra qualificada como soldador e armador Há atividades com mão de obra pouco qualificada como servente
Automação	Importante o uso de programação da produção PPCP para coordenar o grande número de atividades Utilização de sistemas integrados entre a Engenharia e a Produção CAD/CAM/CAE

2.6.1 Exemplos dos grandes projetos

Como exemplos de grandes projetos podem ser citados os empreendimentos da construção civil e da indústria naval. O conceito de ciclo de vida ajuda a compreender as etapas dos grandes projetos. Conforme a norma NBR ISO

15288, ciclo de vida é a “evolução de um sistema, produto, serviço, projeto ou outra entidade desenvolvida por humanos, desde a concepção até a desativação”.

A evolução do sistema trata das diversas fases pelas quais este passa. A primeira fase é a identificação das necessidades da existência do sistema e a análise de sua viabilidade. A segunda fase é de levantamento de requisitos, cujo objetivo é definir a especificação do sistema, conforme ilustrado na [Figura 2.13](#). A terceira fase é o projeto do sistema. A quarta fase, a construção, a quinta, utilização (operação) concomitante com a manutenção, e a sexta e última, desativação.



FIGURA 2.13 Ciclo de vida típico de Grandes Projetos.

Na indústria da construção civil, enquadram-se na categoria de grandes projetos empreendimentos únicos como estádios de futebol, *shopping centers* e residências produzidas individualmente. O arquiteto idealiza o empreendimento definindo, a partir dos requisitos levantados, o estilo e a organização do espaço. Os engenheiros fazem os projetos detalhados de fundação, estrutura, hidráulica, elétrica, ar condicionado, iluminação e automação, se for o caso. A fase de construção tem uma sequência apropriada de atividades de forma a maximizar a produtividade e reduzir o tempo total da obra. Nas fases de operação e manutenção as edificações precisam ser mantidas em boas condições de uso. A desativação é a demolição da edificação para dar lugar a outra utilização.

Foram selecionados cinco exemplos de projetos: construção de edifícios no Japão e na China, construção de estradas no Ceará, construção da Rodovia dos Imigrantes em São Paulo e construção naval.

2.6.1.1 Edifícios de aço no Japão e na China

O vídeo a seguir mostra a construção do Ark Hotel com estrutura de aço no Japão, que levantou 15 andares em dois dias. Observe que essa velocidade é conseguida porque o prédio não é construído no local, mas sim montado, pois as estruturas chegam de caminhão já prontas e os operários, com a ajuda de equipamentos, montam as peças nos respectivos lugares, como pode ser observado em [\[ARK2010\]](#):

http://www.youtube.com/watch?v=Ps0DSihggio&feature=player_detail-page.



FIGURA 2.14 Ark hotel no Japão [ARK2010].

Um vídeo similar mostra uma construção na China de um edifício de alta tecnologia:

http://www.youtube.com/watch?v=rwvmru5JmXk&feature=player_detailpage. [BSB2012]



FIGURA 2.15 Construção civil na China [BSB2012].

2.6.1.2 Construção de estradas

O vídeo referenciado a seguir mostra o processo construtivo de uma estrada, detalhando todas as fases desde o desmatamento até a colocação do asfalto.

Pode-se observar que o processo também é típico de grandes projetos, e possui as características descritas no [Quadro 2.6](#):

http://www.youtube.com/watch?v=NdDKIvijkh8&feature=player_detail-page. Trata-se da construção de estrada no Ceará entre 1997 e 2000 [LOI2007].



FIGURA 2.16 Processo de construção de estrada [LOI2007].

Outro exemplo interessante é a construção de túneis e viadutos na Rodovia dos Imigrantes, que liga a cidade de São Paulo à baixada Santista, realizada pela Engenharia Figueiredo Ferraz. Assista ao vídeo no endereço:



FIGURA 2.17 Construção da Rodovia dos Imigrantes [EFF2012].

<http://www.youtube.com/watch?v=FmMC4QGYFo4> [EFF2012].

Note como existe uma importante integração entre o projeto e as técnicas construtivas e como são escolhidas soluções próprias para situações específicas. Na fase 2, de requisitos do empreendimento (Figura 2.17), houve uma grande preocupação com o meio ambiente, pois a estrada passa em cima de um parque estadual. Observe que isso direcionou uma série de decisões tomadas pelos engenheiros. Embora o foco do vídeo não seja automação, pode-se identificar o papel importante dos sistemas de automação para realizar movimentos precisos e dos equipamentos de medição para garantir as medições e o direcionamento na escavação dos túneis.

2.6.1.3 Construção de petroleiro

A indústria naval é outro exemplo típico de grandes projetos. O navio, com capacidade para 53 bilhões de litros, leva 16 meses para ser construído. Observe no vídeo a seguir que o navio petroleiro também é montado no estaleiro como se fosse um kit, como observado nos vídeos do Japão e da China. Tal fato exige uma grande integração entre o projeto e a produção das peças da estrutura do navio. Em termos de sistemas de automação, pode-se dizer que há a necessidade de integração entre as ferramentas de CAD (*Computer-Aided Design*), que realiza os desenhos, CAE (*Computer-Aided Engineering*), que realiza as tarefas de cálculos de engenharia (resistência dos materiais, fluxo de fluidos e termodinâmica, entre outros), e o CAM (*Computer Aided Manufacturing*), que gera os programa de movimentação das máquinas ferramenta e equipamentos de corte de chapa. Observe o robô que posiciona as peças com precisão nos respectivos lugares e o equipamento de medição da espessura da camada de tinta no casco (Figura 2.18):

<http://www.youtube.com/watch?v=r8p5iSHmSBY> [OIL2009].



FIGURA 2.18 Produção Naval [OIL2009].

2.6.2 Características da mão de obra dos grandes projetos

Nos **grandes projetos** há mão de obra pouco qualificada para as atividades mais simples, como por exemplo um auxiliar de pedreiro, e também há a necessidade de mão de obra qualificada com maior conhecimento técnico para o desenvolvimento das atividades e para organizar o trabalho, como é o caso do soldador.

2.6.3 Características dos equipamentos dos grandes projetos

Na produção do tipo **grandes projetos**, os equipamentos são flexíveis e normalmente vão ao produto em fabricação, e não é o produto que circula entre os recursos de produção. Em outras palavras, em uma produção organizada em linha, como é o caso da indústria automobilística, são os veículos em fabricação que circulam ao longo dos recursos produtivos; na construção civil e naval, são os recursos produtivos que vão ao produto que está sendo fabricado.

2.6.4 Características da automação dos grandes projetos

Nos **grandes projetos**, os sistemas de automação também são flexíveis para permitir a variabilidade das atividades realizadas.

2.7 Migração entre volume e customização

Observando os diferentes tipos de produção discutidos aqui, vale avaliar as tendências observadas na produção discreta em massa e nos grandes projetos.

Na **produção discreta em massa** pode-se notar que a tendência da indústria é produzir produtos em grande quantidade – e, portanto, com custos unitários reduzidos, mas procurando obter uma customização, que é característica dos grandes projetos. É o caso da indústria automobilística, quando procura oferecer ao cliente final a oportunidade de configurar o seu veículo para ser fabricado e entregue “sob encomenda”. Na indústria de computação há empresas que permitem aos seus clientes a configuração específica do computador e este é produzido em massa com diferenciação como é o caso da Dell.

Nos **grandes projetos** há uma tendência a padronização e produção em maiores volumes. O caso de casas populares é tipicamente uma movimentação no sentido da produção em massa, mas como são todas iguais, esse exemplo não é mais de grandes projetos. Por outro lado, o pré-moldado é um caso de construções de galpões customizados produzidos com técnicas de produção discreta intermitente.

Isso significa que os sistemas mais modernos de produção tendem a migrar de um para outro procurando obter as vantagens de cada um. Os sistemas de automação e controle da produção têm um papel importante dentro desse quadro.

2.8 O caso especial de serviços

O setor de serviços tem ganho cada vez mais importância no mercado. Como os serviços também são sistemas de produção, devem ser observadas algumas peculiaridades para atividades dessa natureza. Uma classificação dos diferentes tipos de serviços foi desenvolvida por [SIL1992] e aplicada por [COK2000], que identificaram uma classificação dos serviços com base em três aspectos: **contato com o cliente**, **valor agregado** e **volume**. O Quadro 2.7 representa as duas primeiras variáveis com exemplos para tornar mais fácil a compreensão do modelo. Tais exemplos ilustram a importância dos equipamentos na realização dos serviços.

Quadro 2.7 Classificação de serviços (adaptado de [COK2000])

		Contato do cliente			
		Pessoas	Híbrido	Equipamentos	
Valor agregado	Na presença do cliente	Assistência técnica domiciliar	Consultório médico	Cinema	
		Jardinagem	Hospitais	Lava rápido	
		Vigilância	Companhia aérea	Transporte urbano	
	Híbrido	Consultores	Restaurantes	Desenvolvimento de software	
		Advogados	Hotéis	Instalação de rede de computador	
		Arquitetos	Bancos	Internet banking	
	Isolado do cliente	Recrutamento de executivos	Assistência técnica	Lavanderia	Venda internet
			Sapataria	Escritório de contabilidade	CAE

Com relação ao **contato do cliente**, os serviços podem ser realizados principalmente por **pessoas**, através de **equipamentos** ou um **híbrido** entre as duas situações.

O **valor agregado** refere-se à essência do serviço que está sendo realizado. Por exemplo, em uma lavanderia, a essência é a lavagem da roupa, mas outras atividades secundárias também são realizadas, como atendimento e entrega. O **valor agregado** pode ser realizado na **presença do cliente**, **isolado do cliente** ou **híbrido**, um misto das duas situações.

A terceira dimensão é o **volume**, ou seja, a quantidade de pessoas que realizam os serviços na unidade de tempo (por dia, hora, mês), representado na Figura 2.19.

Vale observar que a coluna da direita (dos equipamentos) e a coluna do meio (Quadro 2.7 e Figura 2.19) possuem importantes sistemas muitas vezes com alto grau de automação que são objeto de estudo deste livro. A abordagem aqui dada refere-se, portanto, apenas a uma análise dos tipos de serviço que

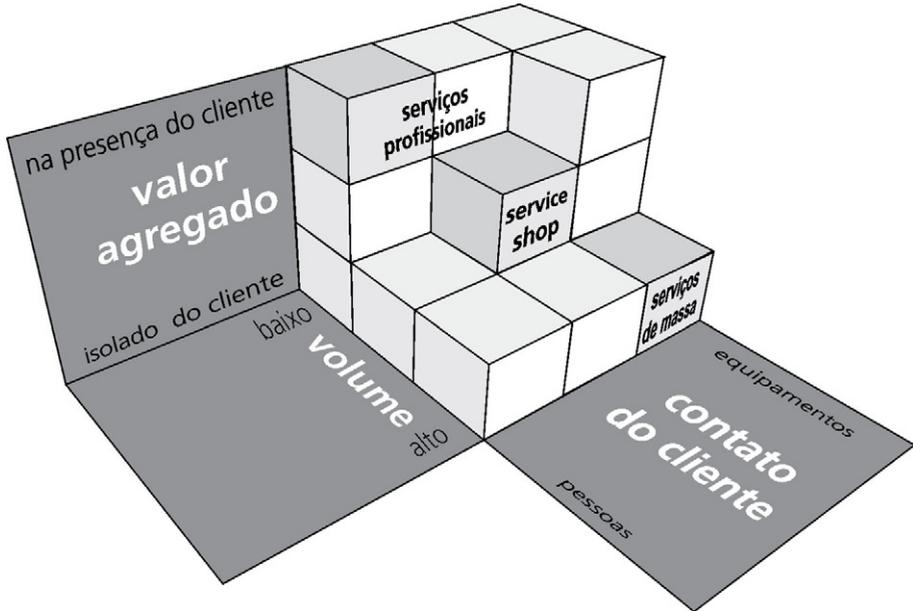


FIGURA 2.19

podem utilizar sistemas de automação. Outros aspectos não são abordados aqui, como definição dos processos da qualidade perceptíveis pelo cliente, *design* dos equipamentos e organização do trabalho para serviços.

Os casos em que a realização de serviços é feita através de **equipamentos** estão representados na coluna da direita e são aqueles que apresentam maior facilidade de automação:

- As atividades com valor agregado **isolado do cliente** são aquelas nas quais o consumidor tem menor contato com os prestadores de serviço e que permitem o maior grau de automação. Exemplos desse caso são os projetos de engenharia que utilizam sistemas sofisticados como o CAE (*Computer Aided Engineering*). Outro exemplo é das vendas pela internet, altamente automatizadas, bem como as operações financeiras de uma forma geral.
- As atividades realizadas na **presença do cliente**, como é o caso do cinema, lava rápido e transporte urbano, como metrô e trem metropolitano, possuem sistemas com alto grau de automação.
- No caso intermediário – híbrido – estão atividades como desenvolvimento de software e instalação de rede de computadores.

Os casos que utilizam serviços realizados **diretamente por pessoas** possuem menor facilidade para automação e dependem mais das atividades das pessoas:

- Exemplo de atividade com valor agregado **isolado do cliente** é o recrutamento de executivos.

- **Na presença do cliente**, estão os serviços como assistência técnica domiciliar, jardinagem e vigilância.
- No caso intermediário – híbrido – podem ser elencadas atividades de profissionais liberais, como arquitetos, advogados e consultores.

Os casos **híbridos**, cujas atividades utilizam tanto pessoas como equipamentos para sua realização, podem possuir diversos sistemas de automação:

- **Na presença do cliente** há o exemplo dos hospitais e dos médicos que possuem muitos sistemas, principalmente na área de diagnóstico. Outro exemplo desta célula é das companhias aéreas.
- Os serviços realizados **isolados do cliente** são atividades como assistência técnica (oficinas), lavanderia, sapataria e escritório de contabilidade.
- No caso intermediário – **híbrido** – podem ser identificadas as atividades dos restaurantes, hotéis e bancos.

Observar que o **volume** também tem influência no nível de automação dos serviços (Figura 2.19). Tomando um exemplo de serviços de massa, o transporte urbano que tem como características ser realizado na presença do cliente e com o uso de equipamentos (seria um cubo à direita em cima). Em pequenas cidades, o transporte é feito com baixo nível de automação através de sistemas de ônibus, pois o volume é baixo. Nos grandes centros urbanos há o metrô, com alto nível de automação e, somente com esse tipo de transporte é possível atender o alto volume de passageiros com um nível de qualidade adequado.

Outro caso interessante que merece ser mencionado é o serviço dos laboratórios de análises que realizam exames de sangue. Trata-se de um serviço realizado sem a presença do cliente (que apenas colhe a amostra) realizado automaticamente por equipamentos e em alto volume.

Um último exemplo em que a automação é importante é o serviço de autoatendimento dos bancos nos quais o serviço é realizado na presença do cliente, através de equipamentos, em alto volume. O *internet banking* é uma extensão desse exemplo anterior no qual o cliente não tem necessidade de se deslocar até o banco.

Interessante observar que a automação do *internet banking* difere dos exemplos anteriores, pois trata somente de informações e, para sua implementação, são necessárias as tecnologias de computação e de comunicações. Nos outros casos há também o uso de outras tecnologias, como o uso de reagentes nos exames laboratoriais, dispositivos mecânicos e transdutores nas medições de grandezas em processos industriais.

2.9 Na prática

Qual a utilidade prática de se conhecer a classificação de diferentes tipos de produção de manufatura e serviços?

Evidentemente essas classificações são conceituais, e poucas são as operações que seguem exatamente esses tipos, mas para se definir uma nova é importante conhecer essa estrutura (o termo *operação* é aqui usado para expressar uma *manufatura* ou um *serviço*). Dois são os motivos principais para conhecê-las e adaptá-las.

Primeiro porque para cada um dos tipos de produção ou serviço há características que precisam ser obedecidas, como por exemplo, a qualificação da mão de obra e a seleção dos equipamentos produtivos e de automação.

Segundo, essa classificação obriga a organização, quando estiver definindo uma operação, a estabelecer no longo prazo o que vai ocorrer: se a operação vai aumentar de volume e a gama de produtos ou serviços vai ser limitada ou se a operação vai se especializar e fazer atendimentos exclusivos, levando para um tipo “sob encomenda”. Vale lembrar que nenhuma organização é capaz de oferecer produtos ou serviços excelentes para qualquer tipo de demanda. É necessário fazer escolhas.

Assim, ao definir que uma operação seja de manufatura ou de serviço, as referências apresentadas neste capítulo são importantes para ajudar a direcionar seu detalhamento.

2.10 Considerações finais

Neste capítulo foram estudados os diversos tipos de produção, quais suas características e como a automação deve ser adequada para cada um desses tipos. Também foi analisado o caso de serviços para os quais a automação também é importante e tem peculiaridades a serem consideradas.

Assim, para a escolha ou o projeto de um sistema de automação, deve-se levar em consideração qual é o tipo de produção que está sendo automatizado a fim de que as especificações desse sistema estejam plenamente de acordo com as necessidades do sistema de operação.

2.11 Leituras recomendadas

É muito importante a realização do trabalho profissional compreendendo o contexto dentro do qual as atividades se inserem, pois isso facilita a tomada de decisão e as escolhas a serem feitas para estarem alinhadas com as necessidades da organização.

Por essa razão, a leitura complementar recomendada é o livro do Prof. Slack [SLA2008], que trata da Administração da Produção, no qual são discutidos os aspectos referentes à organização da produção.

Um vídeo do Prof. Slack em que ele discute Operações e Estratégia também pode ser visto no endereço:

<http://www.youtube.com/watch?v=ZRcDVm6G50Y> [SLA2011].



2.12 Exercícios e atividades

Procure material bibliográfico ou na internet (cuidado para selecionar material de qualidade) para resolver estas questões.

1. Caso de manufatura: Considere o caso de fabricação de papel (por exemplo, papel para imprimir jornal) e identifique:
 - a. O tipo de produção ([Quadro 2.1](#))
 - b. As principais características deste processo
 - c. As principais características da mão de obra
 - d. As principais características dos sistemas de automação
2. Caso de serviço: Considere o caso de um hospital e identifique:
 - a. O tipo de produção ([Quadro 2.7](#))
 - b. As principais características deste processo
 - c. As principais características da mão de obra
 - d. As principais características dos sistemas de automação
3. Para cada um dos tipos de produção descritos no [Quadro 2.1](#), encontre pelo menos dois exemplos adicionais, e realize as seguintes atividades:
 - a. Descreva as características da mão de obra
 - b. Descreva as características dos principais equipamentos
 - c. Identifique o nível de automação.
4. Considere os tipos de serviços do [Quadro 2.7](#). Escolha um exemplo de serviço com alto contato com pessoas, mas que necessite de equipamentos sofisticados para sua realização. Faça uma descrição da mão de obra, dos equipamentos e das características de automação.

2.13 Soluções de alguns exercícios

Seguem alguns exercícios resolvidos.

1. Caso de manufatura: Considere o caso de produção de água para uma cidade e identifique:
 - a. O tipo de produção (**Quadro 2.1**);
 - b. As principais características deste processo;
 - c. As principais características da mão de obra;
 - d. As principais características dos sistemas de automação.

2.13.1 Solução

Para responder a estas questões foi localizado um vídeo institucional da Sabesp, empresa que cuida da água em São Paulo no endereço [\[SAB2008\]](#):

https://www.youtube.com/watch?v=P2ShcHsEGts&playnext=1&list=PLEAF3E874947E4F1D&feature=results_main



- a. A produção de água é do tipo Fluxo Contínuo, pois opera 24×7, e a produção é medida em m^3 por segundo, portanto, uma grandeza na unidade de tempo. No caso estudado, a produção é de 33.000 litros de água por segundo que é tratada.
- b. O processo de produção de água possui as seguintes etapas:
 - Captação da água através de represamento
 - Transporte da água até a estação de tratamento (ETA)

- Tratamento:
 - Coagulante (sulfato de alumínio ou férrico)
 - Retenção de materiais sólidos (folhas, galhos etc)
 - Aplicação de cloro (bactericida)
 - Tanque de floculação (agregação de partículas)
 - Tanque de decantação – lodo recolhido
 - Filtragem com carvão e areia
 - Retrolavagem dos filtros (a intervalos de tempo)
 - Aplicação de mais cloro
 - Aplicação de flúor (prevenção de cáries)
 - Aplicação de cal (elevar o pH da água – reduz corrosão)
 - Distribuição da água
 - c. Observe que todo o processo é automatizado sem interferência humana. Os operadores supervisionam a operação e cuidam do controle da qualidade da água realizando análises em laboratório nas diversas etapas do processo e no seu final para garantir a qualidade do produto distribuído. Para esse último caso a mão de obra é qualificada para a realização das análises (técnicos e auxiliares técnicos), mas também existem pessoas menos qualificadas para as atividades mais simples.
 - d. Com relação aos sistemas de automação, embora o vídeo não explique, há quadros de comando de motores para bombas, misturadores, agitadores, dispositivos que retiram lodo e outros. O sistema pode ter também salas de controle que permitem a visualização de todo o processo em um único local. Nos laboratórios podem existir também equipamentos automáticos de análise ou essa atividade pode ser realizada por meios manuais.
2. Considere os tipos de serviços do [Quadro 2.7](#). Escolha um exemplo de serviço com alto contato com equipamentos. Faça uma descrição da mão de obra, dos equipamentos e das características de automação.

2.13.2 Solução

A operação de serviço escolhida foi o transporte urbano por metrô.

O metrô é um serviço praticamente todo automatizado, pois a composição dos carros é controlada automaticamente pelo centro de controle denominado CCO. Este seria o controle do fluxo dos veículos que estabelece o intervalo entre trens para o passageiro que está na estação. Esse intervalo varia conforme horário e demanda, tudo controlado por computador. Outro sistema também com nível alto de automação é o sistema de cobrança que recebe diversos tipos de bilhetes e realiza automaticamente a liberação ou não da entrada do passageiro.

O passageiro tem contato principalmente com equipamentos e pouco contato com pessoas. As pessoas visíveis pelos clientes são praticamente

seguranças e vigias. O contato que o passageiro tem é com o vendedor de bilhete, embora possa realizar compra automática também.

A mão de obra das pessoas que trabalham no CCO é altamente qualificada em virtude da complexidade da operação e do risco de acidentes.

O sistema de automação do metrô deve apresentar alta disponibilidade, ou seja, não deve falhar durante a operação. A parada de uma composição provoca muitos transtornos e, como a operação funciona como um carrossel, acarreta em um efeito dominó, parando as demais composições até a remoção do trem em falha da linha.

Referências bibliográficas

- [COL1998] COLÂNGELO FILHO, Lúcio. **Gestão da Qualidade de Dados**. 1998. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Universidade de São Paulo.
- [COK2000] COOKE, Cássio Sodré. **Gestão de serviços proposição de um método para obtenção de vantagem competitiva através da fidelização do consumidor**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade de São Paulo. Orientador: Marcelo Schneck de Paula Pessoa.
- [FLE1983] FLEURY, Afonso Carlos Corrêa; VARGAS, Nilton. **Organização do Trabalho: uma abordagem interdisciplinar**. Atlas: São Paulo, 1983.
- [PES2006] PESSOA, Marcelo Schneck de Paula; SPINOLA, Mauro de Mesquita. **Tipos de Produção** São Paulo: EPUSP 2006. Material didático da disciplina de graduação Automação e Controle (PRO 2512) da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Produção.
- [SIL1992] SILVESTRO, Rhian; Fitzgerald, Lin; Johnston, Robert; Voss, Christopher. **Towards a Classification of Service Processes**. *International Journal of Service Industry Management*, Vol. 3 Iss:3 pp. 62–75, 1992.
- [SLA2008] SLACK, N.; CHAMBERS, S.; Johnston, R. **Administração da Produção**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2008.
- [WEG2012] WEG Equipamentos Elétricos. Hidrogeradores Linha SH10. Jaraguá do Sul – SC. 2012.

Vídeos

- [ARK2010] **Ark Hotel Building** http://www.youtube.com/watch?v=Ps0DSihggio&feature=player_detailpage
- [AUD2010] **AudiBR Produção do Audi A1** em Buxelas, 2010. Obtido no endereço http://www.youtube.com/watch?v=gLv25kB_KX0&feature=player_detailpage (Acessado em: 05/07/2012.)
- [BSB2012] BSB – **Broad Sustainable Building**. Obtido no endereço http://www.youtube.com/watch?v=rwvmru5JmXk&feature=player_detailpage (Acessado em: 15/07/2012.)
- [CAR2012] Car data **Vídeo. Ford Historic Model T** – 100 years later. Obtido em http://www.modelt.org/index.php?option=com_content&view=article&id=52&Itemid=72 (Acessado em: 12/02/2012.)
- [CFF2010] How is the furniture made? **Century Furniture Factory Tour**. Obtido no endereço <http://www.youtube.com/watch?v=h6yjZCTytSQ> (Acessado em: 02/05/2012.)
- [EFF2012] *Engenharia Figueiredo Ferraz - Rodovia dos Imigrantes*. Obtido no endereço <http://www.youtube.com/watch?v=FmMC4QGYFo4> (Acessado em: 23/02/2013.)

- [EAG2012] G1 – Economia Agronegócios. Em Goiás **criação de perus** movimentam economia de **município de Mineiros**. **Obtido no endereço** <http://g1.globo.com/economia/agronegocios/noticia/2012/07/em-go-criacao-de-perus-movimentam-economia-de-municipio-de-mineiros.html> em 29/07/2012
- [GEP2012] GE Power Systems. **Hydro Turbine X-Blade Technology** obtida em: <http://www.youtube.com/watch?v=IBMGNqWROKI> na data 06/02/2012.
- [LOI2007] *Loiola, Paulo R.R. Construção das Rodovias Estruturante CE-085 e Limoeiro do Norte/Flores no Ceará. Programa de Mestrado em Engenharia de Transporte – UFC, Ceará. 2007. Obtido no endereço* http://www.youtube.com/watch?v=NdDKIvijkh8&feature=player_detailpage obtido em 12/05/2012.
- [OIL2009] **Oil Tanquer Ships** - How its Made. 2009. Obtido em 12/7/2012 no endereço <http://www.youtube.com/watch?v=r8p5iSHmSBY>.
- [RND2008] *Randek BauTech Semiautomatic Wall Production Line. 2008. Obtido em 02/05/2012 no endereço* <http://www.youtube.com/watch?v=Auh99PWckjY>.
- [SAB2008] Tratamento de Água – Sabesp. Obtido em 23/02/2013 no endereço: https://www.youtube.com/watch?v=P2ShcHsEGts&playnext=1&list=PLEAF3E874947E4F1D&feature=results_main.
- [SLA2011] Slack, N. **Operations and Strategy**. University of San Diego. 2011. Obtido no endereço <http://www.youtube.com/watch?v=ZRcDVm6G50Y>, em 22/02/2013.
- [SNC2006] SNIC Sindicato Nacional das Indústrias de Cimento. 2006. Processo de **Fabricação de Cimento** obtido em 06/02/2012 no endereço: http://www.youtube.com/watch?v=XadBPx_48-E em.
- [SON2010] *Sony-Ericsson. Cell Phone Manufacturing. 2010. Obtido em 03/05/2012 no endereço* <http://www.youtube.com/watch?v=p-fLzrTVQjg>.
- [TCI2010] TCI **How Its Made: A TCI Torque Converter**. 2010. Obtido em 12/06/2012 no endereço <http://www.youtube.com/watch?v=29-9LRtkGTM>.
- [TOD2008] Todd. **Refino de Petróleo**. Escola secundária de Felgueiras. 2008. Obtido em 06/02/2012 no endereço <http://www.youtube.com/watch?v=WlJyK4xTEKo>.

Dinâmica de sistemas

SUMÁRIO

3.1	Miniglossário	52
3.2	Introdução a sistemas, modelos e simulação	52
3.3	Abordagem sistêmica.....	53
3.4	Uma sistemática para construir modelos	54
3.5	Diagrama causal	55
3.6	Variáveis de um sistema	56
3.7	Malha aberta e malha fechada.....	57
3.8	Modelagem de Forrester	59
3.8.1	Diagramas de Forrester.....	59
3.8.2	Equações de Forrester.....	61
3.9	Na prática.....	62
3.9.1	Simulação em planilha eletrônica	63
3.9.2	Simulação em software específico	65
3.10	Controladores automáticos	66
3.10.1	Controlador ON-OFF (duas posições)	66
3.10.2	Controlador Proporcional (P)	67
3.10.3	Controlador Proporcional-Integrativo (PI).....	67
3.10.4	Controlador Proporcional-Derivativo (PD)	68
3.10.5	Controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID)	68
3.10.6	Sintonia de controladores PID.....	69
3.11	Considerações finais.....	69
3.12	Leituras recomendadas	70
3.13	Exercícios e atividades	70
3.13.1	Caso do forno da padaria	70
3.13.2	Caso da AIDS.....	70
3.13.3	Modelo causal da prática de tocar um instrumento musical	72
3.13.4	Modelo de crescimento de prédios industriais em uma cidade	73

O objetivo deste capítulo é apresentar a modelagem de sistemas dinâmicos, utilizada para estudar e simular diversos tipos de sistemas, de diversas naturezas.

AO TÉRMINO DESTES CAPÍTULOS VOCÊ ESTARÁ APTO A:

- identificar as características de sistemas dinâmicos;
- identificar suas variáveis e relações (construir diagramas causais);
- quantificar e analisar esses sistemas (construir diagramas de Forrester);
- realizar simulações dinâmicas de sistemas;
- conhecer os principais tipos de controladores automáticos.

3.1 Miniglossário

Sistema. Conjunto de elementos que possam ser relacionados entre si, funcionando sob uma estrutura organizada.

Modelo. Uma descrição esquemática de um sistema, teoria ou fenômeno que representa as suas propriedades conhecidas ou inferidas e pode ser usado para estudos mais aprofundados de suas características.

Simulação de sistema. Operação de um modelo do sistema.

3.2 Introdução a sistemas, modelos e simulação

“All the models are wrong, but some are useful” (“*Todos os modelos são errados, mas alguns são úteis*”).

George Edward Pelham Box, Professor emérito de estatística na Universidade de Winconsin

Entende-se por **sistema** qualquer conjunto de elementos que possam ser relacionados entre si, funcionando sob uma estrutura organizada [MIL1971]. Alguns exemplos de sistemas são: carro, linha de montagem, população, economia, corpo humano, somente para citar alguns.

Simulação de um sistema é a operação de um modelo do sistema [MAR1997]. Originalmente, a palavra simular significava imitar ou fingir. Esse significado sugere uma importante característica da simulação: simular é imitar algo. Por exemplo, crianças brincando de “casinha” estão simulando uma vida familiar, pilotos de caça voando em missão de treinamento estão simulando um combate real.

Simulação geralmente envolve algum tipo de modelo ou representação simplificada. No decorrer de uma simulação, o modelo fornece elementos importantes do que está sendo simulado. Um **modelo** é uma descrição esquemática de um sistema, teoria ou fenômeno que representa as suas propriedades conhecidas ou inferidas e pode ser usado para estudos mais aprofundados de suas características [FRE2012]: um modelo de um átomo, um modelo econômico, um modelo de um sistema de produção, um modelo de sistema de automação.

Um modelo de simulação pode ser físico, conceitual, matemático, pode também ser um modelo por computador ou então uma combinação de todos esses. Para as crianças brincando de “casinha”, o modelo é o conjunto dos brinquedos que elas utilizam juntamente com personagens imaginários. Para um piloto da força aérea em treinamento, o modelo pode ser um simulador de voo (cabine que simula todas as condições reais de um voo).

Quadro 3.1 Sistema, modelo e simulação

Sistema físico real	Modelo	Simulação
Série de fatores dependentes entre si	Simplificação da realidade Equações matemáticas, maquetes etc.	Utilização de informações Variáveis de entrada permitem simular o comportamento dinâmico do sistema

3.3 Abordagem sistêmica

Diferentes aproximações podem ser tomadas pelos construtores de modelos ao escolherem os assuntos a serem modelados e o conteúdo de seus modelos. Nesta abordagem é apresentada uma perspectiva para modelagem em simulação por computador – uma perspectiva de sistemas dinâmicos realimentados.

Um sistema pode ser definido como sendo uma coleção de elementos que interagem entre si e funcionam juntos para desempenharem uma determinada função.

Dessa forma, uma cidade pode ser vista como um sistema cujo propósito é fornecer emprego, habitação e outros benefícios sociais a seus habitantes. Uma empresa pode ser vista como um sistema que produz e comercializa determinados produtos, mantém inventários, contrata empregados e executa outras funções para sobreviver e crescer economicamente. Um avião pode ser considerado um sistema de pessoas e componentes eletroeletrônicos, mecânicos e hidráulicos coordenados de maneira a propiciar um serviço de transporte confortável, seguro e eficiente.

A visão sistêmica utilizada para estudar sistemas como esses enfatiza as conexões entre as várias partes que constituem um todo. Por sua natureza, a abordagem sistêmica possui como característica marcante: a interdisciplinaridade.

Na busca por soluções e no estudo dos problemas estão envolvidas disciplinas que a princípio parecem não ter nenhuma ligação. Por exemplo, uma empresa pode ser considerada como um sistema que integra disciplinas como economia, no estudo de mercado, sociologia, nas relações trabalhistas, e tecnologia, nos diferentes processos de manufatura. Por sua vez, a visão sistêmica de uma cidade envolve aspectos de ciência política, geografia,

economia, sociologia, entre outras. A forma com que essas diferentes perspectivas de cada área podem ser integradas constitui um dos maiores desafios da abordagem sistêmica.

3.4 Uma sistemática para construir modelos

Os mesmos aspectos que tornam a abordagem sistêmica extremamente interessante podem, às vezes, tornar o estudo nebuloso e elusivo. Por exemplo, ao analisar um problema, levando em consideração todos os possíveis fatores envolvidos, pode-se encontrar milhares de relacionamentos. Analisar todas essas alternativas é uma tarefa intelectual impossível para a mente humana, que acaba por se sobrecarregar ao tentar estudar todos os fatores de uma só vez. Algumas técnicas específicas são necessárias para simplificar e ordenar os milhares de relacionamentos possíveis envolvidos no estudo de um problema complexo.

Primeiramente, deve-se ressaltar a importância do conhecimento do problema que está sendo estudado. Não importa o quão qualificado possa ser um analista quanto à abordagem sistêmica e suas técnicas, ele não será capaz de resolver problemas envolvendo assuntos econômicos a menos que tenha conhecimentos de economia. Outro analista não é capaz de resolver problemas de habitação de uma cidade a menos que ele possua conhecimentos de construção civil, movimentos migratórios urbanos e assim por diante.

Um segundo requisito para se analisar um problema complexo é um método de estruturação e organização do conhecimento sobre o problema:

- Quais fatores seriam importantes e deveriam ser incluídos na análise?
- Quais fatores poderiam ser omitidos?
- Como um conhecimento específico poderia ser transmitido para outras pessoas envolvidas na análise?

Essas são questões básicas sobre como conceituar e representar um sistema, utilizando ou não técnicas formais de análise por computador.

Outro requisito importante refere-se aos recursos ferramentais, por exemplo, computador para cálculos repetitivos e com necessidade de precisão, software específico para determinada aplicação etc.

Dentro de um processo de modelagem e simulação existem algumas etapas típicas, representadas na [Figura 3.1](#). São elas:

- **Definição do Problema:** A primeira etapa do processo de construção do modelo consiste em reconhecer e definir o problema a ser estudado em termos de **sistema**: quais as fronteiras do sistema, quais suas entradas e saídas. Precisam ser verificadas as propriedades mais importantes através da identificação dos valores que variam no decorrer do tempo e os fatores causadores da variabilidade através da descrição de uma relação causa-efeito. Essa relação causa-efeito pode ser uma situação de malha aberta ou malha fechada, com realimentação, temas que serão estudados neste capítulo.

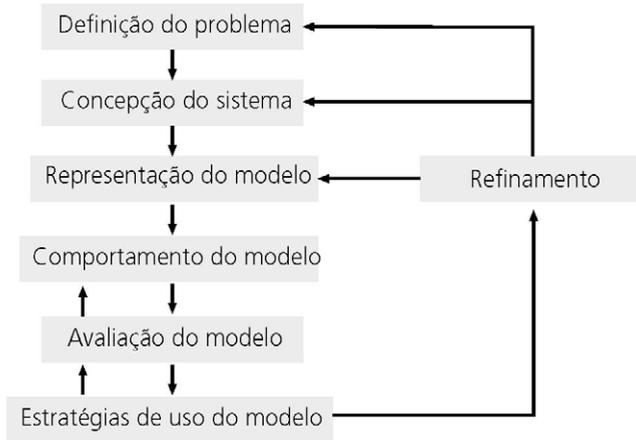


FIGURA 3.1 Etapas do processo de modelagem e simulação.

- **Concepção do Sistema:** A segunda etapa do processo consiste em passar para o papel os fatores de influência que se acredita estarem agindo sobre o sistema. Essas relações podem ser representadas através de diagramas causais, gráficos de variáveis no tempo, entre outras.
- **Representação do Modelo:** Nesta etapa os modelos são representados através de uma descrição lógica como pseudolinguagem de computador ou então na forma de equações de Forrester (que serão vistas mais à frente).
- **Comportamento do Modelo:** Nesta etapa do processo, a simulação por computador é utilizada para determinar como as variáveis do sistema se comportam no decorrer do tempo.
- **Avaliação do Modelo:** Nesta etapa numerosos testes são efetuados sobre o modelo para avaliar sua qualidade e validade. Esses testes envolvem a verificação da consistência lógica, confrontação dos dados de saída com os dados reais. Podem ser utilizados também testes estatísticos dos parâmetros utilizados.
- **Estratégias de Uso do Modelo:** Nesta etapa o modelo é usado para testar diferentes utilizações de um modelo sobre um sistema em estudo. Vale salientar que todas essas etapas descritas são dinâmicas, ou seja, são realizadas melhorias contínuas no modelo através do refinamento de cada uma das etapas. Mudanças em etapas posteriores que obrigam retomar as etapas iniciais do processo são frequentes.

3.5 Diagrama causal

Analisar um problema levando em consideração a relação causa-efeito é a chave para organizar ideias dentro do estudo de sistemas dinâmicos. Normalmente, em um processo de análise as causas-chave são isoladas, e a relação

causal é representada por diagramas. Após isso, começa-se a construir o modelo e a simulação por computador. Entretanto, a noção de causa-efeito pode ser extremamente sutil, e a utilização desses conceitos requer muita atenção.

Um exemplo dessa relação causa-efeito que pode ser citado é a Lei de Newton: uma força aplicada sobre um objeto inicialmente em repouso fará com que ele comece a se mover na direção dessa força, e uma aplicação contínua desta irá ocasionar uma aceleração contínua. Essa relação poderia ser representada pelo diagrama mostrado na [Figura 3.2](#).

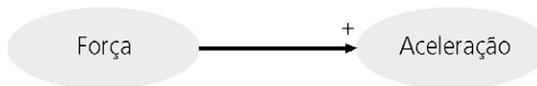


FIGURA 3.2 Diagrama causal: lei de Newton.

Esse diagrama poderia ser lido da seguinte forma: uma força (nesse caso, aplicada sobre um objeto) CAUSA uma aceleração (nesse objeto). O sinal positivo na ponta da seta indica uma relação positiva, ou seja, um aumento da força determina um correspondente aumento na aceleração.

3.6 Variáveis de um sistema

Em um modelo, é importante saber identificar o que é relevante para o problema, ou seja, o que realmente influi, e descartar as variáveis de influência secundária. Na construção de um modelo deve-se sempre iniciar com as variáveis que influem primariamente no sistema, utilizando variáveis de importância secundária em estágios mais refinados do sistema.

Considere-se o exemplo de crescimento populacional. À primeira vista, pode-se concluir que um diagrama causal que represente a população de uma cidade com relação a nascimentos seja da forma desenhada na [Figura 3.3](#).

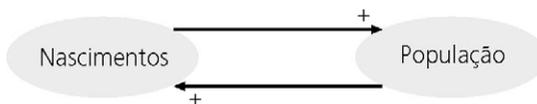


FIGURA 3.3 Diagrama causal: relação entre nascimentos e população.

Observe que esse sistema constitui um crescimento explosivo, pois mais população leva a mais nascimentos e mais nascimentos aumentam a população.

Considerando agora também as mortes, o diagrama causal fica representado conforme a [Figura 3.4](#).

Observe que agora o aumento da população aumenta as mortes, e o aumento das mortes diminui a população, representando uma relação negativa entre população e mortes.



FIGURA 3.4 Diagrama causal: inclusão das mortes no diagrama.

Cabe aqui uma observação importante: o sinal (+) significa relação direta entre as variáveis, ou seja, quando a primeira aumenta, a segunda aumenta e quando a primeira diminui, a segunda diminui também. O sinal (-) significa relação inversa entre as variáveis: quando a primeira aumenta, a segunda diminui e vice-versa.

Olhando o sistema inteiro, a [Figura 3.4](#) mostra que, se a taxa de natalidade for maior que a taxa de mortalidade, a população aumenta e vice-versa. Isso indica como é importante considerar as principais variáveis que influem no comportamento de um sistema, pois apenas o elo de nascimentos não é suficiente para representar o sistema, bem como o elo de mortes isolado também. A fidelidade do modelo depende da consideração correta de todas as variáveis que afetam o sistema com o mesmo grau de intensidade.

Um refinamento posterior consideraria outras variáveis secundárias, como migração de pessoas para uma região, aspectos de saúde e aumento da expectativa de vida, entre outras. Dependendo do objetivo do estudo, poderão ser construídos modelos diferentes ao inserir as variáveis pertinentes que influem no processo. Por exemplo, se o estudo é econômico, pode-se considerar migrações e incentivos que existem em uma região que atraiam pessoas e aumentem a população. Por outro lado, se o estudo é na área da saúde, devem ser inseridas no modelo variáveis que representem iniciativas de saúde pública como vacinação e programas de saúde da família, por exemplo.

3.7 Malha aberta e malha fechada

A [Figura 3.5](#) representa um exemplo da relação causal existente no forno de um fogão doméstico. Esta figura ilustra que quanto mais gás, maior a temperatura, ou seja, há uma relação direta entre essas duas variáveis. Conforme já explicado, a relação direta é representada pelo sinal positivo (+) na ponta da seta e significa **mais gás, mais temperatura**. Esse tipo de sistema é também denominado **sistema de malha aberta**.

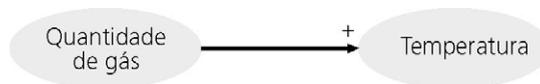


FIGURA 3.5 Diagrama causal: fogão doméstico.

Situação diferente do fogão doméstico é o caso do forno elétrico da padaria que possui sistema de controle de temperatura. Nesse caso o operador

estabelece a temperatura desejada. Essa temperatura desejada, o valor ajustado pelo operador, é denominado *setpoint*. O diagrama causal desse fenômeno está representado [Figura 3.6](#).

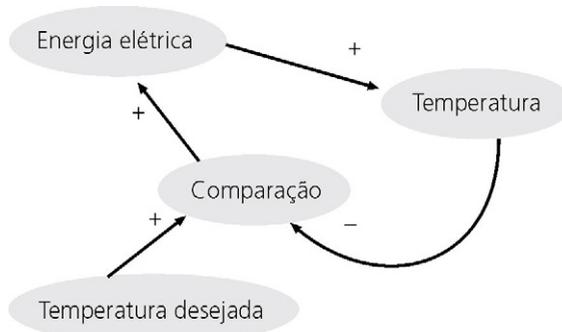


FIGURA 3.6 Diagrama causal: relações causa-efeito no forno de uma padaria.

Nesse sistema as variáveis que influem o processo são a energia elétrica e a temperatura do forno para assar o pão. A energia elétrica fornecida ao forno aquece a resistência e libera calor dentro do ambiente fechado do forno. Esse calor aquece a temperatura do ambiente fechado.

Observe que, nesse momento, a preocupação é apenas identificar as variáveis que afetam o processo estudado. Não há necessidade de saber quais são essas relações, que equações regem esse fenômeno. Essa é uma característica da visão sistêmica: os fenômenos são analisados de fora para dentro, do geral para o particular.

Exatamente como no caso anterior (mais gás mais temperatura), tem-se mais energia elétrica, mais temperatura. A diferença aqui reside no fato de existir uma temperatura desejada (*setpoint*) que vai influir na quantidade de energia fornecida ao forno. Trata-se de um sistema de malha fechada que vai garantir que a temperatura do forno é igual (ou procura ser igual) à temperatura desejada (ao *setpoint*). O diagrama causal representa muito bem esse fenômeno: a temperatura do forno é comparada com a temperatura desejada (*setpoint*) gerando um sinal de erro que é a diferença entre o que temos e o que desejamos. Por exemplo, se o forno é ajustado para 230 °C e a temperatura ambiente é 25 °C, o erro medido é 205 °C e, como é um valor alto, deverá ser liberada uma grande quantidade de energia para aquecer o forno rapidamente. Se, ao contrário, o forno tiver com a temperatura de 210 °C, o erro será de 20 °C, levando o sistema a liberar pouca energia para atingir a temperatura desejada.

Uma vez atingido o equilíbrio, o erro será zero e a energia também, pois a temperatura desejada é igual à temperatura real. Em uma situação real, entretanto, o forno provavelmente tem perdas, e a temperatura deverá cair, fazendo com que o sistema reaja para repor a energia perdida mantendo sempre a temperatura desejada.

Esse tipo de sistema é denominado **sistema de malha fechada**, pois a informação da temperatura influi na quantidade de energia liberada formando um elo fechado, diferentemente do caso do fogão doméstico, que não compensa quando há perda de calor, pois não há relação inversa entre a temperatura e a quantidade de gás. Em outras palavras, quando se abre a porta do forno, por exemplo, perde-se calor, e a temperatura é reduzida, mas a quantidade de gás não é aumentada para compensar. Por isso o nome de **sistema de malha aberta**.

3.8 Modelagem de Forrester

Os diagramas causais permitem que se tenha uma rápida visualização das relações envolvidas em um sistema qualquer. Entretanto, esses diagramas sozinhos não fornecem informações suficientes para a simulação dinâmica de um sistema, pois não basta apenas saber como as coisas se relacionam. É necessário conhecer os valores assumidos, no decorrer do tempo, pelas variáveis envolvidas no processo, e é também preciso saber qual a taxa de variação dessas variáveis.

Antes de apresentar a modelagem Forrester, é preciso definir alguns termos utilizados nesse processo.

Observe que nos exemplos anteriores sempre foram trabalhados dois tipos de variáveis: **níveis** e **fluxos**. Explicando melhor:

- **Níveis** são variáveis que possuem um determinado valor acumulado, como população (pessoas) e temperatura (°C), vistos nos exemplos anteriores.
- **Fluxos** são variáveis medidas por unidade de tempo como taxa de natalidade ou mortalidade ou fluxo de calor. A medida aqui é sempre uma unidade por período.

3.8.1 Diagramas de Forrester

A [Figura 3.7](#) mostra alguns símbolos utilizados nos Diagramas de Forrester.

Considerando o exemplo do forno de padaria com controle de temperatura, cujo diagrama causal está na [Figura 3.6](#), o diagrama de Forrester desse sistema está representado na [Figura 3.8](#).

A variável de fluxo no caso é o fluxo de energia para aquecer o forno. A variável de nível nesse caso é a temperatura. Essa temperatura do forno é lida para ser comparada com o *setpoint*, a temperatura desejada. O sinal de erro, representado pela diferença entre a temperatura desejada e a temperatura medida, atua na quantidade de energia elétrica liberada para o forno.

Aqui há uma diferença entre o que havia sido representado no diagrama causal e no diagrama de Forrester, que é o uso do CT coeficiente de transferência utilizado para determinar qual a quantidade de energia elétrica necessária para uma unidade de erro. Essa equação é importante para compatibilizar as equações que serão construídas e ajustar também as unidades.

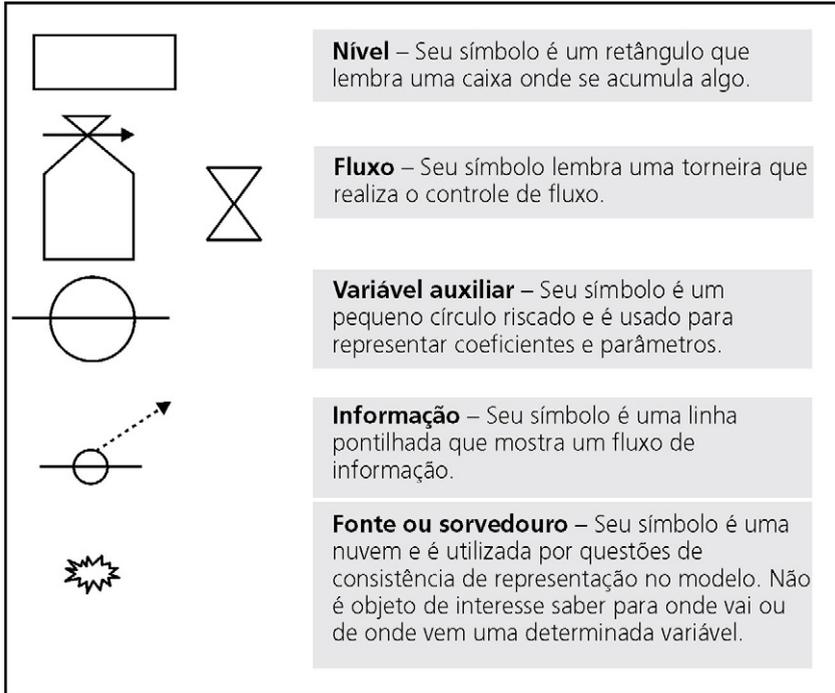


FIGURA 3.7 Simbologia dos diagramas de Forrester.

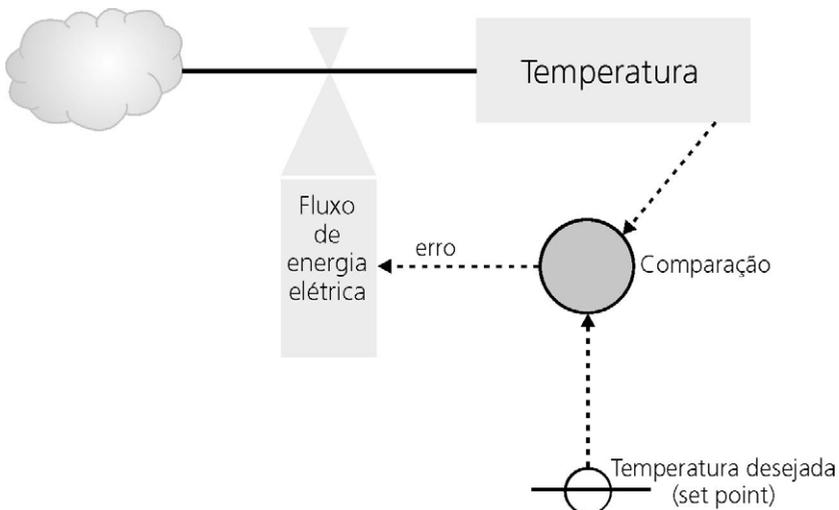


FIGURA 3.8 Forno de uma padaria: diagrama de Forrester.

Observe que a linha cheia representa o fluxo de material, e a linha pontilhada representa o fluxo de informação. Nesse diagrama não são colocados sinais como nos diagramas causais.

Dessa forma, o diagrama de Forrester representa o mesmo fenômeno dos diagramas causais com a diferença de que, nesse caso, é feita distinção entre as variáveis de nível e de fluxo. O próximo passo é quantificar essas grandezas para possibilitar a simulação propriamente dita.

3.8.2 Equações de Forrester

Os níveis e as taxas representados nos diagramas de Forrester necessitam ser escritos em equações matemáticas de modo a tornar possível o cálculo dos valores assumidos no decorrer do tempo. Conforme representado na [Figura 3.9](#), devem-se considerar três instantes no tempo: o passado (J), o presente (K) e o futuro (L).

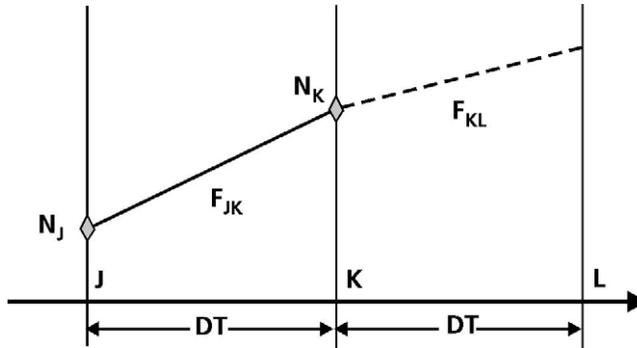


FIGURA 3.9 Forrester: modelagem discreta no tempo.

O **nível** nos diagramas de Forrester pode ser representado pelas seguintes variáveis:

- NÍVEL.K nível no **instante** PRESENTE K
- NÍVEL.J nível no **instante** PASSADO J
- DT intervalo de tempo entre os instantes J e K

O **fluxo** nos diagramas de Forrester pode ser representado pelas seguintes variáveis:

- Fluxo.JK taxa de variação no **intervalo** J e K
- Fluxo.KL taxa de variação no **intervalo** K e L

A ordem de escrita das equações é:

- Equações de nível
- Equações auxiliares
- Equações de fluxo

No exemplo do forno da padaria, as equações ficariam:

- Equação de nível

$$\text{TEMP.K} = \text{TEMP.J} + \text{FLUX.JK} * \text{DT}$$

A temperatura no instante K é igual à temperatura anterior do instante J mais o fluxo que entrou no intervalo JK (observar que pode ser positivo ou negativo) multiplicado pelo intervalo de tempo.

- Equação de fluxo

$$\text{FLUX.KL} = \text{ERRO.K} * \text{CT}$$

O fluxo de energia para o intervalo de tempo KL é proporcional ao erro medido no instante K vezes o coeficiente de transferência CT.

- Equações auxiliares

$$\text{ERRO.K} = \text{SP} - \text{TEMP.K}$$

O erro no instante K é igual à diferença entre o valor desejado (SP-*setpoint*) e a temperatura no instante K.

VOCE SABIA?

A Dinâmica de Sistemas foi desenvolvida pelo Prof. Jay Forrester, no MIT, na década de 1960. Forrester é engenheiro de automação que aplicou esses conceitos em outras áreas do conhecimento como sistemas sociais, crescimento urbano e economia. Nos seus estudos, fazendo simulações de crescimento urbano, concluiu que as políticas praticadas pelos prefeitos na época (1971) estavam erradas e criou problemas com os políticos, mas acabou convencendo-os de que estava certo com o modelo que desenvolveu. Esse modelo pode ser encontrado no livro *Urban Dynamics* publicado originalmente em 1972, e o diagrama causal desse modelo pode ser encontrado em <http://www.exponentialimprovement.com/cms/uploads/UrbanDynMfg03.PDF>. Mais tarde, o Prof Forrester, através de uma simulação da dinâmica global (1972), mostrou cenários ruins para a economia como um todo em um trabalho denominado “The limits to Growth”. Esse trabalho teve grande repercussão em 1972 na reunião internacional do Clube de Roma, tendo sido proibido na Rússia, e os autores foram investigados por uma comissão nomeada pelo presidente dos Estados Unidos! Jornais ridicularizaram o trabalho, mas, infelizmente, diversos cenários previstos no modelo se concretizaram. Esse livro teve atualizações feitas a cada década e é um modelo utilizado até hoje.

3.9 Na prática

Com as equações do modelo da padaria em mãos, é possível fazer a simulação do comportamento do sistema. Para isso será usada uma planilha eletrônica e um software específico.

3.9.1 Simulação em planilha eletrônica

A ideia é discretizar, utilizando o incremento de tempo DT , o cálculo das variáveis identificadas nas equações de Forrester. As equações de Forrester são contínuas no tempo, mas, por uma questão de facilidade de simulação, serão discretizadas para permitir facilmente a construção de gráficos de comportamento do sistema em estudo. Essas técnicas são estudadas normalmente em cálculo numérico nos cursos de engenharia.

A [Tabela 3.1](#) e a [Figura 3.10](#) apresentam essa simulação. O intervalo de tempo pode ser 1 minuto. O *set point*, a temperatura desejada, é $230\text{ }^{\circ}\text{C}$, e a temperatura ambiente inicial é $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. A constante CT transforma o erro medido em graus centí-

Tabela 3.1 Simulação de forno de uma padaria: parâmetros

Constante	Célula	Valor	
DT	B3	1	
CT	B4	0,2	
SP	B5	230	
Variável	Célula	Valor inicial	Fórmula
TEMP ₀	B8	25,0	
ERRO	C8		= \$B\$5-B8 ¹
FLUX	D8		= C8*\$B\$4
TEMP	B9		= B8 + D8*\$B\$3

¹Em planilhas eletrônicas, o \$ na frente da identificação da linha (1, 2, ...) ou coluna (A, B, ...) em uma fórmula significa que essa linha ou coluna é fixa, devendo permanecer inalterada quando a fórmula for copiada e reproduzida em outra célula. Isso vale, por exemplo, para as constantes utilizadas.

Simulação de controle de temperatura do forno de uma padaria			
	TEMP	ERRO	FLUXO
DT	1,0		
CT	0,2		
SP	230,0		
T			
0	25,0	205,0	41,0
1	66,0	164,0	32,8
2	98,8	131,2	26,2
3	125,0	105,0	21,0
4	146,0	84,0	16,8
5	162,8	67,2	13,4
6	176,3	53,7	10,7
7	187,0	43,0	8,6
8	195,6	34,4	6,9
9	202,5	27,5	5,5
10	208,0	22,0	4,4
11	212,4	17,6	3,5
12	215,9	14,1	2,8
13	218,7	11,3	2,3
14	221,0	9,0	1,8
15	222,8	7,2	1,4

FIGURA 3.10 Simulação de forno de uma padaria: planilha.

grados para um valor tal que libere uma quantidade de energia medida, por exemplo, em Watt.minuto, que aquece o ambiente do forno e aumenta a temperatura. Evidentemente, a determinação da constante CT – que pode não ser constante, mas sim uma equação – é complexa e foge ao escopo deste tema. Quem estudou transferência de calor e mecânica dos fluidos conhece o modelamento e deve lembrar que são equações diferenciais que representam esse fenômeno.

Analisar dados numéricos no formato de tabela é uma tarefa por vezes árdua. Melhor é identificar uma maneira de visualizá-los em forma de gráficos. Por essa razão, foi levantado o gráfico da temperatura em função do tempo na [Figura 3.11](#). Observe que o tipo de gráfico selecionado é o **gráfico de dispersão**, porque nesse caso os pontos são desenhados aos pares (x,y) . No eixo horizontal está o tempo em minutos, e no eixo vertical a temperatura em graus centígrados (pode ser observado que a temperatura sai dos 25 °C no minuto zero e chega ao valor final de 230 °C após cerca de 20 minutos, um valor próximo a uma situação real).

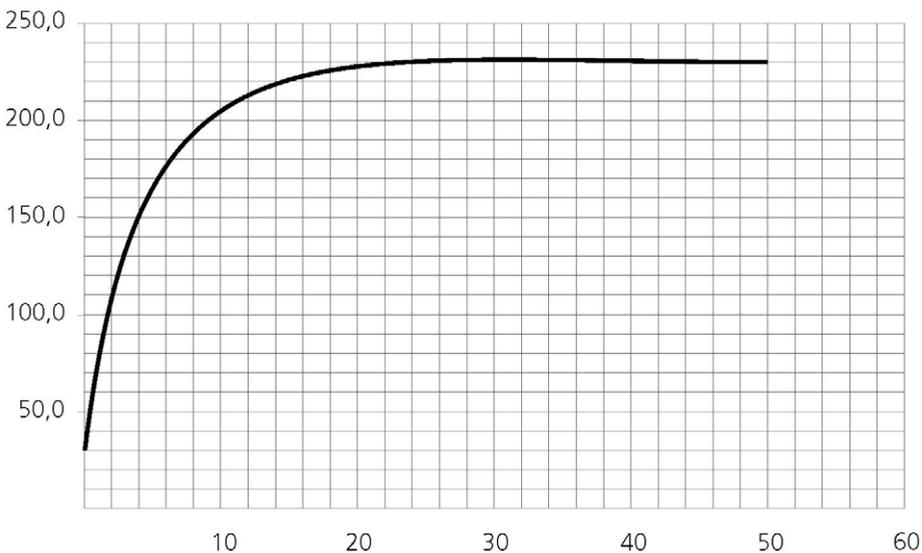


FIGURA 3.11 Simulação de forno de uma padaria: evolução da temperatura com o tempo.

Um forno real com potência maior deve aquecer em um tempo menor, e o coeficiente de transferência CT deve ser menor que o valor da simulação 0,2. Se for adquirido um forno igual ao anterior com menor potência, o valor de CT deve ser maior, e o valor final é atingido em mais de 20 minutos. Experimente e observe.

Agora observe a [Figura 3.12](#). O gráfico crescente é o mesmo anterior (temperatura), e o descendente é o sinal de erro. No início, quando o forno está frio o erro é grande, e a energia injetada no forno deve ser alta para aquecê-lo. No final, o erro é pequeno, e a energia fornecida é pequena.

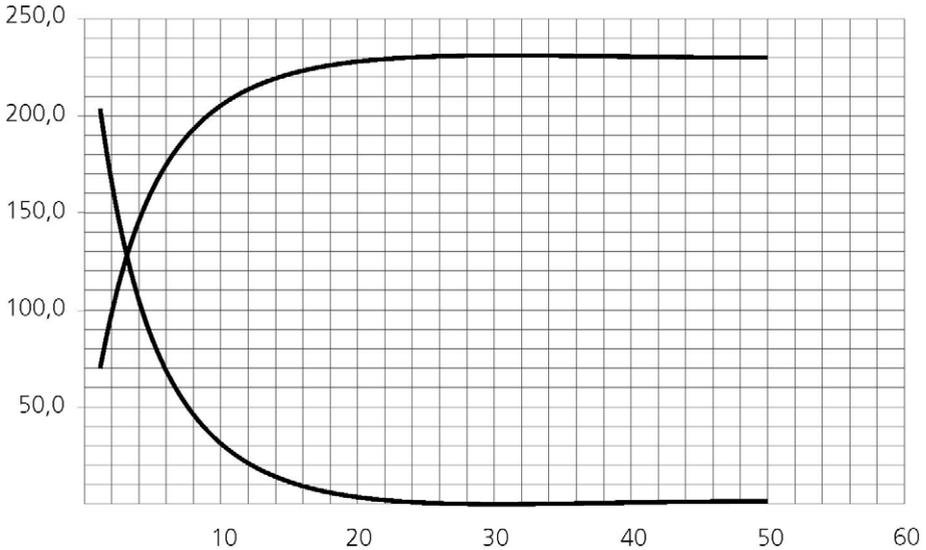


FIGURA 3.12 Simulação de forno de uma padaria: temperatura e erro.

3.9.2 Simulação em software específico

Existem diversos softwares desenvolvidos para fazer simulação dinâmica. Aqui será apresentado um desses aplicativos a título de ilustração: o Vensim, que possui uma versão gratuita para fins educacionais e pode ser obtido no site <http://www.vensim.com>. Esse software vem sendo desenvolvido como simulador para análise de sistemas dinâmicos complexos desde 1985. Possui uma interface gráfica que permite desenhar diretamente o Diagrama de Forrester e fornecer os parâmetros e as equações para fazer a simulação, conforme mostra a Figura 3.13.

O simulador, com os parâmetros definidos, desenha diretamente os gráficos e obtém resultado similar ao apresentado na Figura 3.14, que é muito similar ao representado na Figura 3.12, obtido com a simulação em planilha eletrônica.

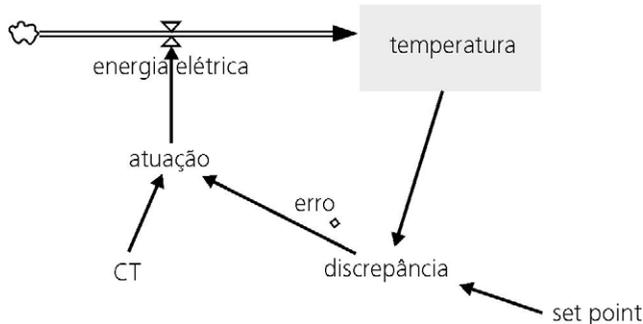


FIGURA 3.13 Simulação de forno de uma padaria: diagrama de Forrester no Vensim.

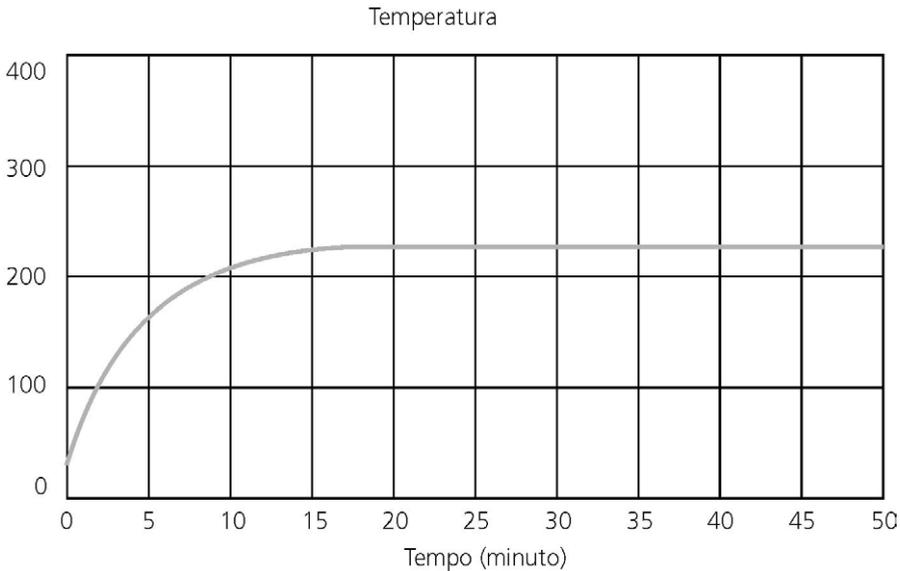


FIGURA 3.14 Simulação de forno de uma padaria: resultado da simulação no Vensim.

3.10 Controladores automáticos

Como já visto no Capítulo 1, o controlador é o “cérebro” da malha de controle, pois realiza a operação de decisão no sistema de controle [SMI2008]. Há vários tipos de controladores industriais, também chamados de controladores industriais de realimentação. O Quadro 3.2 apresenta uma classificação baseada nas ações de controle.

Quadro 3.2 Tipos de controladores industriais

Controladores industriais

Controlador ON-OFF (duas posições)
 Controlador Proporcional (P)
 Controlador Proporcional-Integral (PI)
 Controlador Proporcional-Derivativo (PD)
 Controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID)

Considerando o modelo de sistema de controle apresentado na Figura 3.15, é descrito a seguir cada um desses controladores.

3.10.1 Controlador ON-OFF (duas posições)

O controlador **ON-OFF** é tal que a saída tem duas posições fixas, ativadas conforme o valor de entrada (erro) seja negativo ou positivo, como mostram

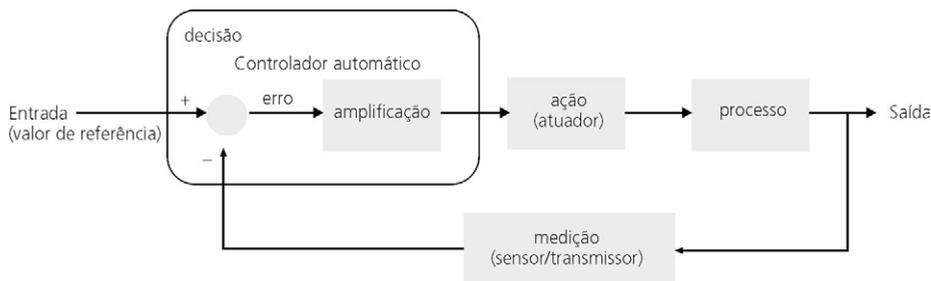


FIGURA 3.15 Diagrama de blocos de um sistema de controle (baseado em [OGA1993]).

a Equação 3.1 e a Figura 3.16. Um exemplo típico desse tipo de controle é a boia de uma caixa d'água caseira.

$$u(t) = U_1, \quad e(t) > 0$$

$$= U_2, \quad e(t) < 0$$

EQUAÇÃO 3.1 Controlador ON-OFF

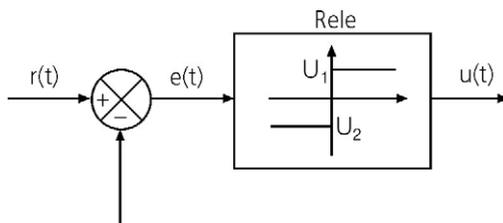


FIGURA 3.16 Controlador ON-OFF: diagrama de blocos.

3.10.2 Controlador Proporcional (P)

O controlador **Proporcional (P)** é tal que a saída é proporcional ao valor de entrada (erro), como mostra a Equação 3.2. A constante K_p é chamada de ganho proporcional. Deve ser ajustada para obtenção do controle satisfatório.

$$u(t) = K_p e(t)$$

EQUAÇÃO 3.2 Controlador Proporcional (P)

3.10.3 Controlador Proporcional-Integrativo (PI)

O controlador **Proporcional-Integrativo (PI)** é tal que a saída possui uma parcela proporcional à entrada e outra proporcional à integral da entrada no

tempo, como mostra a [Equação 3.3](#). As constantes K_p e K_i são, respectivamente, o ganho proporcional e a constante integrativa. A constante T_i é chamada de tempo integrativo. Costuma-se ajustar o ganho K_p e a constante de tempo T_i para obtenção do controle desejado.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt \right]$$

$$K_i = \frac{K_p}{T_i}$$

EQUAÇÃO 3.3 Controlador Proporcional-Integral (PI)

3.10.4 Controlador Proporcional-Derivativo (PD)

O controlador **Proporcional-Derivativo (PD)** é tal que a saída possui uma parcela proporcional à entrada e outra proporcional à variação da entrada no tempo, como mostra a [Equação 3.4](#). As constantes K_p e K_d são, respectivamente, o ganho proporcional e a constante derivativa. A constante T_d é chamada de tempo derivativo. Costuma-se ajustar o ganho K_p e a constante de tempo T_d para obtenção do controle desejado.

$$u(t) = K_p e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} = K_p \left[e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \right]$$

$$K_d = K_p T_d$$

EQUAÇÃO 3.4 Controlador Proporcional-Derivativo (PD)

3.10.5 Controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID)

O controlador **Proporcional-Integrativo-Derivativo (PID)** é tal que a saída possui uma parcela proporcional à entrada e outra proporcional à variação da entrada no tempo, como mostra a [Equação 3.5](#). As constantes K_p , K_i e K_d são, respectivamente, o ganho proporcional, a constante integrativa e a constante derivativa. As constantes T_i e T_d são chamadas de tempo integrativo e tempo derivativo. Costuma-se ajustar o ganho K_p e as constantes de tempo T_i e T_d para obtenção do controle desejado.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right]$$

EQUAÇÃO 3.5 Controlador Proporcional-Integrativo-Derivativo (PID)

3.10.6 Sintonia de controladores PID

Os parâmetros de controladores PID (constantes K_p , T_i e T_d) necessitam ser ajustados para que o controle atinja o seu objetivo. Há vários métodos para realizar essa tarefa. É apresentado a seguir um dos métodos propostos por Ziegler e Nichols. Ele se baseia na identificação de um ganho proporcional crítico (K_{cr}) que, com controle estritamente proporcional (integrativo e derivativo anulados), leva a uma oscilação sustentada.

Os passos para a determinação do ganho crítico K_{cr} e do correspondente período crítico de oscilação T_{cr} são os seguintes:

- Passo 1 – Anular as ações integral e derivativa, zerando K_i e K_d (ou, alternativamente, fixando $T_i = \infty$ e $T_d = 0$).¹
- Passo 2 – Com o controlador em malha fechada, aumentar o ganho proporcional (com passos discretos e cada vez menores) até que a saída oscile com amplitude constante.
- Passo 3 – Registrar o ganho crítico obtido K_{cr} e o correspondente período crítico de oscilação T_{cr} .
- Passo 4 – Definir os parâmetros de controle de acordo com o tipo de controlador desejado (P, PI ou PID) utilizando as fórmulas apresentadas no [Quadro 3.3](#).

Quadro 3.3 Sintonia de controladores PID: cálculo dos parâmetros de controle segundo o método de Ziegler-Nichols baseado no ganho crítico K_{cr} e no período crítico T_{cr}

Tipo de controle	K_p	T_i	T_d
P	$K_{cr} / 2$	∞	0
PI	$K_{cr} / 2,2$	$T_{cr} / 1,2$	0
PID	$K_{cr} / 1,7$	$T_{cr} / 2$	$T_{cr} / 8$

Este e outros métodos têm-se mostrado muito úteis na prática, mas muitas vezes não são aplicáveis (não se obtém, por exemplo, no método apresentado, uma oscilação crítica sustentada). Nesses casos, é necessário utilizar métodos mais elaborados de análise do sistema, que não são objeto deste texto.

3.11 Considerações finais

Neste capítulo foi visto que sistemas complexos podem ser representados através da identificação da relação causa-efeito entre as variáveis que interferem no fenômeno estudado. Sistemas complexos possuem um grande número de variáveis que influenciam essas relações, mas devem, para efeito de modelamento e compreensão, ser selecionadas apenas as principais variáveis.

¹Na prática, busca-se o valor máximo de T_i .

Após isso deve ser desenhado o diagrama causal que represente de forma clara o que foi compreendido do sistema estudado até o momento.

Feito isso, passa-se para o Diagrama de Forrester. O primeiro passo é identificar os níveis e fluxos e, a seguir, as variáveis principais, o objeto principal de estudo, e as variáveis auxiliares, que fluem no modelo como informação.

Com o diagrama em mãos, passa-se para a fase de quantificação, identificando as constantes, variáveis e seus valores.

Feito isso é possível escrever as Equações de Forrester.

Em seguida, passa-se para a simulação, que pode ser feita tanto em planilha eletrônica como em softwares dedicados a essa finalidade. Normalmente sistemas mais complexos vão exigir o uso de software dedicado.

As simulações devem ser feitas primeiramente para calibrar e validar o modelo, ou seja, garantir que os valores quantitativos sejam próximos aos reais. Para tanto é importante ter acesso a dados de comportamento do sistema em situações em que se pode fazer com que o modelo represente, com a fidelidade necessária, o fenômeno estudado.

Somente nesse ponto é que o modelo está pronto para ser usado para simular novas situações e prever o comportamento do sistema em situações ainda desconhecidas.

3.12 Leituras recomendadas

Estudos e aplicações recentes da modelagem de sistemas dinâmicos podem ser acompanhados através de publicações e relatos de casos da Sociedade de Dinâmica de Sistemas, fundada por Jay Forrester: <http://www.systemdynamics.org/publications/>.

Um estudo detalhado e muito bem humorado sobre a dinâmica de sistemas aplicada a diversos campos pode ser encontrado no livro *Os consertos que estragam*, do professor João Arantes Amaral. [AMA2011]

3.13 Exercícios e atividades

3.13.1 Caso do forno da padaria

No modelo desenvolvido para o forno da padaria foi considerado apenas o aquecimento. O que acontece se a temperatura for superior ao *setpoint*?

Para responder, desenvolva o raciocínio pensando primeiramente no fenômeno físico e, em seguida, desenvolva o modelo matemático que o representa.

3.13.2 Caso da AIDS

Imagine que o Ministro da Saúde queira definir políticas públicas para controle da AIDS. O primeiro passo tomado foi chamar especialistas em saúde pública e na doença específica e solicitar um estudo para entender os mecanismos e

as variáveis que influem nesse sistema. Foi então entregue um relatório que dizia o seguinte:

A AIDS é uma doença que pode ser adquirida através de contatos infectantes como transmissão sexual ou partilhamento de agulhas entre drogados. A amamentação de mães que possuem a doença é outra forma de transmissão. Transfusão de sangue ou algum acidente hospitalar também pode transmitir a doença.

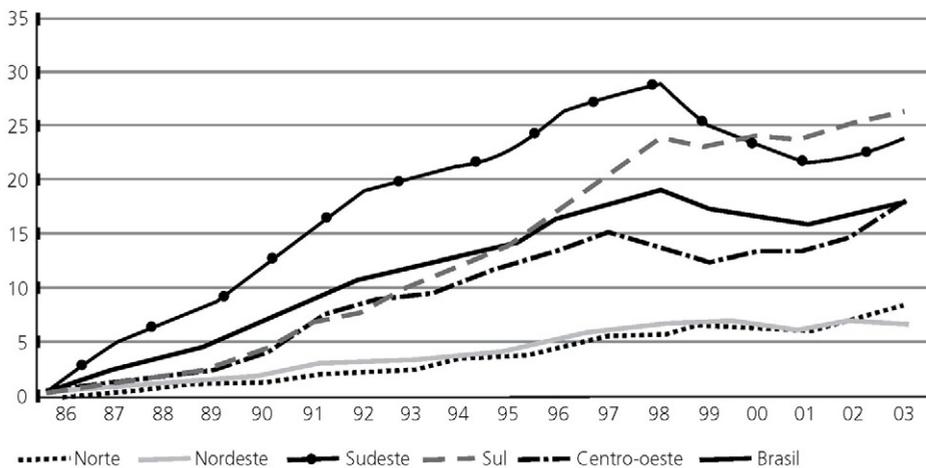
As pessoas que já contraíram a AIDS não têm cura, mas podem manter uma vida quase saudável desde que tomem rotineiramente um coquetel de remédios que controla a doença. Esses remédios podem ser doados pelo governo, pois são de custo muito alto.

Para aqueles que não contraíram a doença podem ser feitas campanhas educacionais para gerar preocupação e fazer com que as pessoas previnam-se contra a doença.

Por outro lado, o governo pode incentivar pesquisas para o desenvolvimento de novos remédios que eliminem a doença.

Outro fato importante é que, conforme publicação do Ministério da Saúde (2005) mostrada nas Figuras 3.17 e 3.18, a partir de meados da década de 1990, com a descoberta do coquetel de remédios para controlar a AIDS, a curva de pessoas mortas pela doença e a curva de pessoas infectadas se afastaram. Sem o coquetel essas curvas caminhavam mais próximas.

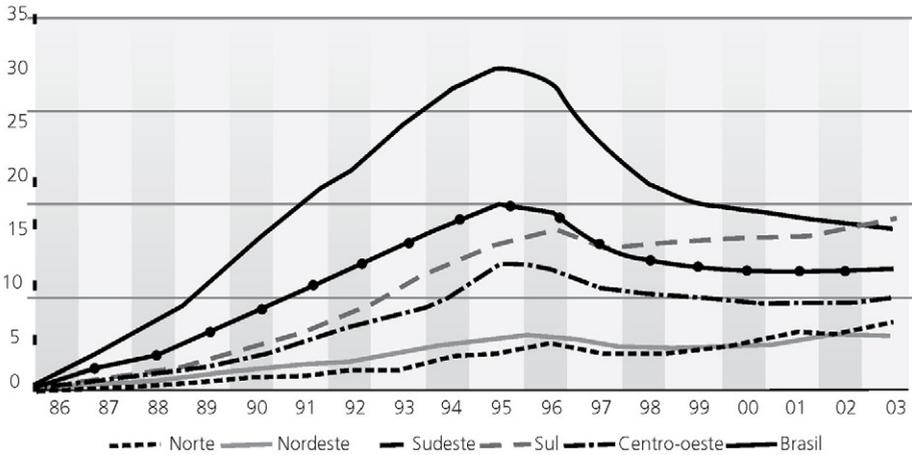
Taxa de incidência (por 100 mil) de AIDS segundo região de residência por ano de diagnóstico – Brasil, 1986-2003*



* Casos notificados no SINAN e registrados no SISCEL até 30/06/04
 Fonte: MS/SVS/PN DST e Aids

FIGURA 3.17 Taxa de incidência de AIDS.

Taxa de mortalidade (por 100 mil) por AIDS segundo região de residência por ano de óbito – Brasil, 1986-2003



Fonte: MS/SVS/PN DST e Aids

FIGURA 3.18 Taxa de mortalidade da AIDS.

Com o coquetel, o número de infectados continua crescendo, mas o número de mortes passou a crescer com uma taxa menor.

Identifique quais podem ser as ações do governo para controlar a doença. Faça o Diagrama causal deste caso.

(Caso adaptado de Amaral, 2011.)

3.13.3 Modelo causal da prática de tocar um instrumento musical

É sabido que o virtuosismo de um músico está ligado à prática com o instrumento. Assim, por exemplo, um pianista, quanto mais pratica, maior é sua habilidade para tocar. Conforme representado na [Figura 3.19](#), esta é uma relação causal positiva.

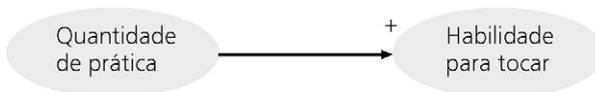


FIGURA 3.19 Relação causal do piano.

Aumentando a habilidade para tocar aumenta o gosto pelo piano em virtude dos resultados positivos obtidos pela quantidade de prática, conforme representado na [Figura 3.20](#).

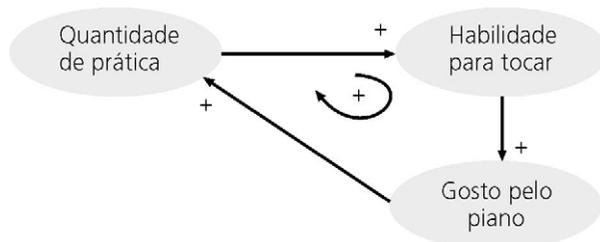


FIGURA 3.20 Relação causal do piano com um efeito.

O gosto pelo piano incentiva o aumento da quantidade de prática, fechando o ciclo. Observando o diagrama causal pode-se observar que foi formada uma malha **positiva**, pois nesse modelo tem-se um crescimento infinito.

Vale observar que qualquer sistema físico vai apresentar limitações, pois a quantidade de prática não pode crescer indefinidamente e, no mundo real, sempre há um fator limitador, como – nesse caso – o limite da quantidade de horas praticadas por dia. Essas são limitações que devem ser consideradas nos modelos para maior fidelidade e se tal limitação pertence ao foco do estudo em questão.

Faça o diagrama de Forrester deste caso.

3.13.4 Modelo de crescimento de prédios industriais em uma cidade

Pode-se modelar o número de prédios de uma cidade através da simulação dinâmica de sistemas. Uma cidade possui uma determinada área urbana onde podem ser construídos os prédios. Cada prédio é construído com uma determinada área (em m²), possui uma vida útil de algumas dezenas de anos ou mais e depois é demolido. Conforme o código de obra da prefeitura, para cada terreno construído deve haver um mínimo de área não ocupada (recuos, por exemplo) e também um máximo de área construída. Verifique se o diagrama causal desenhado na [Figura 3.21](#) representa de forma clara a descrição feita.

Como os diagramas causais já foram abordados anteriormente, já é possível entender facilmente as relações envolvidas neste processo. No entanto, deve-se observar algumas relações:

- A área média por construção aumentando implica em uma maior fração de terra ocupada (sinal positivo) ao passo que uma maior área de terra disponível para a construção de indústrias resulta em uma menor fração de terra ocupada (sinal negativo).
- Uma maior fração de terra ocupada, por sua vez, implica em uma menor fração de construção (-). Continuando a percorrer a malha fechada pode-se ver que uma maior fração de construção resulta em maior construção (+), que, por sua vez, implica em mais prédios industriais

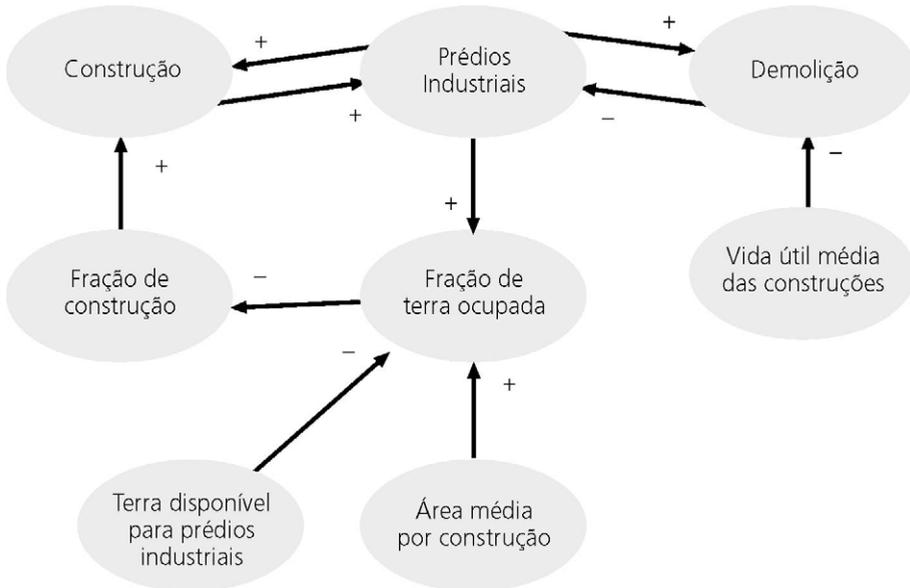


FIGURA 3.21 Diagrama causal do crescimento prédios industriais em uma cidade.

(outro sinal positivo). Esse maior número de indústrias, entretanto, implicará em uma maior fração de terras ocupadas, o que terá efeitos em todo o resto do sistema.

- Ainda nesse diagrama causal, pode-se observar em outro “ramo” do sistema a relação entre vida útil média dos prédios e a taxa de demolição, que, por sua vez, terá efeitos sobre a variável prédios industriais.

Observa-se que apenas com o diagrama causal já é possível observar todas as relações possíveis neste sistema.

Faça o diagrama de Forrester deste caso.

Referências bibliográficas

- [AMA2011] AMARAL, João Roberto Arantes. **Os consertos que estragam: uma introdução ao pensamento sistêmico**. 3ª Ed. Editora Arantes: São Paulo, 2011.
- [FRE2012] THE FREE DICTIONARY. **Model**. Disponível em <http://www.thefreedictionary.com/model>. (Acessado em: 01/12/2012.)
- [KIR1999] KIRKWOOD, C. W. **System Dynamics Methods: A Quick Introduction** <http://www.public.asu.edu/~kirkwood/sysdyn/SDIntro/SDIntro.htm> 03/03/1999. Arizona State University, 1999.
- [MAR1997] MARIA, Anu. An introduction to modeling and simulation. Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference. **Proceedings**, p. 7-13. Disponível em: http://delivery.acm.org/10.1145/270000/268440/p7-maria.pdf?ip=143.107.252.161&acc=ACTIVE%20SERVICE&CFID=275150369&CFTOKEN=18752322&__acm__=1360439356_1437c1f843fc76cc19744cb11c2614a3.

- [MIL1971] MILLER, James G. Living systems. **Currents in modern biology**. 4(1971):55–256. North Holland Publishing Company.
- [MIN2005] Ministério da Saúde do Brasil. **Resposta: Experiência do Programa Brasileiro de AIDS**. 2005. Disponível em http://bvsmms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/resposta_2005.pdf. (Acessado em: agosto de 2011.)
- [OGA1993] OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de Controle Moderno** Trad. Albuquerque, IJ. Rio de Janeiro, Prentice Hall do Brasil, 1993.
- [PAR1990] PARSEI, H.R.; WARD, T.L.; KARWOWSKI, Waldemar. **Justification Methods for Computer Integrated Manufacturing Systems**: planning, design justification and costing. Elsevier: Amsterdam, New York, 1990.
- [PES1999] PESSÔA, M.; SPINOLA, M.; KIYUZATO, L. **Sistemas Modelos e Simulação. Automação e Controle sistemas dinâmicos**: material didático da disciplina de graduação PRO2512. EPUSP: São Paulo, 1999.
- [ROB1983] ROBERTS, Nancy. **Introduction to computer simulation: a system dynamics approach**. Reading, Mass: Addison-Wesley Publishing Company, 1983.
- [SMI2008] SMITH, Carlos A.; CORRIPIO, Armando. **Princípios e prática do controle automático de processo**. 3. ed. Trad. Maria Lucia Godinho de Oliveira. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

Modelagem de sistemas dinâmicos com Transformadas de Laplace

SUMÁRIO

4.1	Miniglossário	78
4.2	A Transformada de Laplace	78
4.2.1	Transformada de Laplace de funções comuns.....	79
4.2.1.1	<i>Função exponencial</i>	<i>79</i>
4.2.1.2	<i>Função degrau.....</i>	<i>80</i>
4.2.1.3	<i>Função rampa.....</i>	<i>81</i>
4.2.1.4	<i>Funções senoidal e cossenoidal</i>	<i>81</i>
4.2.2	Propriedades da Transformada de Laplace	82
4.2.2.1	<i>Linearidade ou homogeneidade.....</i>	<i>82</i>
4.2.2.2	<i>Aditividade</i>	<i>82</i>
4.2.2.3	<i>Translação no tempo.....</i>	<i>82</i>
4.2.2.4	<i>Derivação real</i>	<i>83</i>
4.2.2.5	<i>Integração real.....</i>	<i>84</i>
4.2.2.6	<i>Teorema do valor inicial.....</i>	<i>84</i>
4.2.2.7	<i>Teorema do valor final.....</i>	<i>84</i>
4.2.2.8	<i>Derivação complexa</i>	<i>85</i>
4.2.2.9	<i>Multiplicação pela função exponencial.....</i>	<i>85</i>
4.2.2.10	<i>Mudança de escala no tempo</i>	<i>85</i>
4.2.3	Transformada inversa de Laplace	85
4.3	Modelagem matemática de sistemas dinâmicos	87
4.3.1	Função de transferência de um circuito elétrico RLC.....	90
4.3.2	Função de transferência de um sistema massa-mola-amortecedor	93
4.3.3	Equivalência das funções de transferência.....	95
4.3.4	Resposta do circuito elétrico RLC	95
4.3.5	Resposta do sistema mecânico	102
4.4	Transformadas de Laplace de controladores automáticos	102
4.5	Resposta a degrau com realimentação proporcional	103
4.6	Regras de sintonia para controladores PID	105

4.7	Na prática.....	106
4.8	Leituras recomendadas	106
4.9	Exercícios e atividades	107
4.10	Soluções de alguns exercícios	108

Este capítulo aborda o tratamento matemático dos sistemas dinâmicos com uso de Transformadas de Laplace. Pressupõe que o leitor tenha conhecimento básico de equações diferenciais ordinárias e cálculo diferencial e integral.

AO TÉRMINO DESTES CAPÍTULOS VOCÊ ESTARÁ APTO PARA:

- compreender a Transformada de Laplace e sua aplicação para solução de equações diferenciais;
- modelar e analisar sistemas dinâmicos lineares, com uso da Transformada de Laplace;
- conhecer a aplicação de Transformadas de Laplace na modelagem de controladores automáticos lineares;
- compreender a essência dos sistemas realimentados de controle;
- conforme visto no capítulo anterior, os sistemas dinâmicos são representados por modelos. Os modelos matemáticos são os mais utilizados, pois permitem realizar análises e simulações diversas.

4.1 Miniglossário

Transformada de Laplace. Função matemática que permite levar a resolução de equações diferenciais à resolução de equações polinomiais, muito mais simples de resolver. Realiza a transformação de funções no domínio do tempo para funções no domínio das frequências.

Polo. Valor da raiz do polinômio do denominador da função de transferência no plano s vide item 4.2.3

Zero. Valor da raiz do polinômio do numerador da função de transferência no plano s vide item 4.2.3

4.2 A Transformada de Laplace

A Transformada de Laplace tem seu nome em homenagem ao matemático francês Pierre Simon Laplace. É utilizada para converter equações diferenciais – que representam o comportamento dinâmico de um sistema no domínio do tempo – em equações algébricas, que representam o mesmo comportamento no domínio de frequências. As equações algébricas permitem isolar o comportamento característico do sistema (a sua função de transferência) do que é característico das funções de entrada do mesmo.

Dados, por definição:

$f(t)$	uma função no tempo, sendo que $f(t) = 0$ para $t < 0$
s	uma variável complexa
$F(s)$	a Transformada de Laplace de $f(t)$

A Transformada de Laplace é dada por:

$$\mathcal{L}[f(t)] = F(s) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt$$

Já a transformada inversa de Laplace é determinada por:

$$\mathcal{L}^{-1}[F(s)] = f(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{c-j\infty}^{c+j\infty} F(s)e^{st} ds, t > 0$$

A Transformada de Laplace mapeia uma função $f(t)$ do domínio do tempo (variável independente t) para uma função $F(s)$ no domínio das frequências, ou plano s , conforme ilustrado na [Figura 4.1](#).

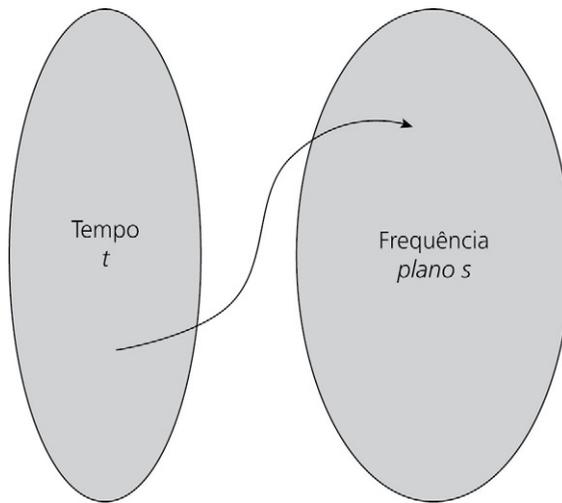


FIGURA 4.1 Mapeamento do Domínio do Tempo para o Domínio das Frequências.

4.2.1 Transformada de Laplace de funções comuns

[Quadro 4.1](#) apresenta as transformadas de Laplace de algumas funções comuns.

4.2.1.1 Função exponencial

A função exponencial está assim definida:

$$f(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ Ae^{-\alpha t}, & t \geq 0 \end{cases}$$

Quadro 4.1 Transformadas de Laplace de algumas funções comuns

	Função $f(t)$	Transformada de Laplace $F(s) = \mathcal{L}\{f(t)\}$
1	$\delta(t)$ Impulso unitário (Delta de Dirac)	1
2	$1(t)$ ou $u(t)$ Degrau unitário	$\frac{1}{s}$
3	t Rampa unitária	$\frac{1}{s^2}$
4	t^n (n inteiro positivo)	$\frac{n!}{s^{n+1}}$
5	e^{-at} Exponencial	$\frac{1}{s+a}$
6	te^{-at}	$\frac{1}{(s+a)^2}$
7	$t^n e^{-at}$	$\frac{n!}{(s+a)^{n+1}}$
8	$\text{sen } \omega t$	$\frac{\omega}{s^2 + \omega^2}$
9	$\text{cos } \omega t$	$\frac{s}{s^2 + \omega^2}$
10	$e^{-at} \text{sen } \omega t$	$\frac{s}{(s+a)^2 + \omega^2}$
11	$e^{-at} \text{cos } \omega t$	$\frac{s+a}{(s+a)^2 + \omega^2}$
12	$t \text{sen } \omega t$	$\frac{s+a}{(s+a)^2 + \omega^2}$
13	$t \text{cos } \omega t$	$\frac{s^2 - \omega^2}{(s^2 + \omega^2)^2}$

A sua Transformada de Laplace pode ser obtida assim:

$$\mathcal{L}\{f(t)\} = \mathcal{L}\{Ae^{-\alpha t}\} = \int_0^{\infty} Ae^{-\alpha t} e^{-st} dt = \int_0^{\infty} Ae^{-(s+\alpha)t} dt = \frac{A}{s+\alpha}$$

4.2.1.2 Função degrau

A função degrau é assim definida:

$$f(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ A, & t \geq 0 \end{cases}$$

A sua Transformada de Laplace pode ser obtida assim:

$$\mathcal{L}[f(t)] = \mathcal{L}[A] = \int_0^{\infty} Ae^{-st} dt = \frac{A}{s}$$

Um caso particular relevante é o degrau unitário, assim definido:

$$1(t) = u(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t \geq 0 \end{cases}$$

Sua Transformada de Laplace é:

$$\mathcal{L}[1(t)] = \frac{1}{s}$$

4.2.1.3 Função rampa

A função rampa é assim definida:

$$f(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ At, & t \geq 0 \end{cases}$$

A sua Transformada de Laplace pode ser obtida assim:

$$\mathcal{L}[f(t)] = \mathcal{L}[At] = \int_0^{\infty} Ate^{-st} dt = At \frac{e^{-st}}{-s} \Big|_0^{\infty} - \int_0^{\infty} \frac{Ae^{-st}}{-s} dt = \frac{A}{s} \int_0^{\infty} e^{-st} dt = \frac{A}{s^2}$$

4.2.1.4 Funções senoidal e cossenoidal

A função senoidal é assim definida:

$$f(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ A \sin \omega t, & t \geq 0 \end{cases}$$

A sua Transformada de Laplace pode ser obtida assim:

$$\begin{aligned} \mathcal{L}[f(t)] &= \mathcal{L}[A \sin \omega t] = \mathcal{L}\left[\frac{A}{2j}(e^{j\omega t} - e^{-j\omega t})\right] \\ &= \frac{A}{2j} \int_0^{\infty} (e^{j\omega t} - e^{-j\omega t}) e^{-st} dt = \frac{A}{2j} \frac{1}{s - j\omega} - \frac{A}{2j} \frac{1}{s + j\omega} \\ \mathcal{L}[A \sin \omega t] &= \frac{A\omega}{s^2 + \omega^2} \end{aligned}$$

Analogamente, a transformada da função cosseno se obtém da seguinte forma:

$$f(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ A \cos \omega t, & t \geq 0 \end{cases}$$

Resulta:

$$\mathcal{L}[f(t)] = \mathcal{L}[A \cos \omega t] = \frac{As}{s^2 + \omega^2}$$

4.2.2 Propriedades da Transformada de Laplace

A Transformada de Laplace possui várias propriedades, que podem ser utilizadas para facilitar sua manipulação.

4.2.2.1 Linearidade ou homogeneidade

Seja uma constante independente de s e de t e seja $f(t)$ transformável. Então:

$$\mathcal{L}[\alpha f(t)] = \alpha \mathcal{L}[f(t)] = \alpha F(s)$$

a transformada de Laplace de uma constante vezes uma função é igual à constante vezes a transformada de Laplace da função.

4.2.2.2 Aditividade

Se $f_1(t)$ e $f_2(t)$ são ambas transformáveis, aplica-se o princípio da superposição.

$$\mathcal{L}[f_1(t) \pm f_2(t)] = \mathcal{L}[f_1(t)] \pm \mathcal{L}[f_2(t)] = F_1(s) \pm F_2(s)$$

a transformada de Laplace da soma de duas funções $f_1(t) \pm f_2(t)$ é igual à soma das transformadas de Laplace dessas funções $F_1(s) \pm F_2(s)$.

4.2.2.3 Translação no tempo

Seja a transformada transladada de Laplace $f(t-\alpha)1(t-\alpha)$ onde $\alpha > 0$:

Seja $f(t) = 0$ para $t < 0$ e $f(t-\alpha) = 0$ para $t < \alpha$, representadas nas duas figuras anteriores.

$$\int_0^{\infty} f(t-\alpha)1(t-\alpha)e^{-st} dt = \int_{-\alpha}^{\infty} f(\tau)1(\tau)e^{-s(\tau+\alpha)} d\tau$$

Como $f(\alpha)1(\alpha) = 0$ para $\alpha < 0$, podemos trocar o limite inferior de integração de $-\alpha$ para 0.

$$\begin{aligned} \int_{-\alpha}^{\infty} f(\tau)1(\tau)e^{-s(\tau+\alpha)} d\tau &= \int_0^{\infty} f(\tau)1(\tau)e^{-s(\tau+\alpha)} d\tau \\ &= \int_0^{\infty} f(\tau)e^{-s\tau} e^{-s\alpha} d\tau = e^{-s\alpha} \int_0^{\infty} f(\tau)e^{-s\tau} d\tau = e^{-s\alpha} F(s) \end{aligned}$$

Essa expressão mostra que a translação de $f(t)$ de unidades de tempo é equivalente – no domínio s – a multiplicar $F(s)$ por e^{-s} .

Um exemplo: É possível utilizar essa propriedade para obter a Transformada de Laplace das funções Pulso Retangular e Impulso.

O Pulso Retangular está assim definido:

$$f(t) = \begin{cases} \frac{A}{t_0} & \text{Para } 0 < t < t_0 \\ 0 & \text{Para } t < 0 \text{ e } t_0 < t \end{cases}$$

onde A e t_0 são constantes. A função pulso pode ser considerada uma função degrau de altura A/t_0 começando em $t = t_0$. Matematicamente:

$$f(t) = \frac{A}{t_0}u(t) - \frac{A}{t_0}u(t - t_0)$$

A Transformada de Laplace de $f(t)$ pode ser obtida assim:

$$\mathcal{L}[f(t)] = \mathcal{L}\left[\frac{A}{t_0}u(t)\right] - \mathcal{L}\left[\frac{A}{t_0}u(t - t_0)\right] = \frac{A}{st_0} - \frac{A}{st_0}e^{-st_0} = \frac{A}{st_0}(1 - e^{-st_0})$$

Já a função Impulso é um caso particular da função Pulso:

$$f(t) = \begin{cases} \lim_{t_0 \rightarrow 0} \frac{A}{t_0} & \text{Para } 0 < t < t_0 \\ 0 & \text{Para } t < t_0, t_0 < t \end{cases}$$

Como a amplitude da função impulso é A/t_0 e a duração é t_0 a área sob o impulso é igual a A . Como a duração t_0 tende a 0, a altura tende ao infinito. O tamanho de um impulso é medido pela sua área.

$$\mathcal{L}[f(t)] = \lim_{t_0 \rightarrow 0} \frac{A}{t_0 s} (1 - e^{-st_0}) = \lim_{t_0 \rightarrow 0} \frac{\frac{d}{dt_0} A(1 - e^{-st_0})}{\frac{d}{dt_0} t_0 s} = \frac{As}{s} = A$$

Assim, a Transformada de Laplace da função Impulso é área A sob o impulso. A função impulso cuja área $A = 1$ denomina-se Impulso Unitário ou função Delta de Dirac, representada por $\delta(t)$.

$$\delta(t) = \begin{cases} 0, & t \neq 0 \\ \infty, & t = 0 \end{cases}$$

4.2.2.4 Derivação real

Se a Transformada de Laplace de $f(t)$ é $F(s)$ e se a primeira derivada de $f(t)$ com relação ao tempo $df(t)/dt$ é transformável, então:

$$\mathcal{L}\left[\frac{d}{dt} f(t)\right] = \mathcal{L}[Df(t)] = sF(s) - f(0)$$

onde o operador D representa a derivação d/dt .

A Transformada de Laplace da derivada de uma função é igual à Transformada de Laplace da função multiplicada por s menos o valor da função no instante zero. Para memorizar, lembrar que $Df(t)$ vira $sF(s)$.

Similarmente, pode ser demonstrado que:

$$\mathcal{L}\left[\frac{d^n}{dt^n} f(t)\right] = \mathcal{L}[D^n f(t)] = s^n F(s) - s^{n-1} f(t) - \dots - s \frac{d^{n-2}}{dt} f(0) - \frac{d^{n-1}}{dt} f(0)$$

4.2.2.5 *Integração real*

Se a Transformada de Laplace de $f(t)$ é $F(s)$, sua integral é transformável:

$$\mathcal{L}\left[\int f(t)dt\right] = \mathcal{L}[D^{-1}f(t)] = \frac{1}{s} F(s) + \frac{1}{s} D^{-1}[f(0)]$$

onde o operador D^{-1} representa a integral no tempo. O termo $D^{-1}[f(0)]$ é igual ao valor da integral na origem.

A Transformada de Laplace da integral de uma função é igual à Transformada de Laplace da função multiplicada por $1/s$ menos o valor da integral da função no instante zero multiplicado por dividido por $1/s$. Para memorizar, lembrar que $D^{-1}f(t)$ vira $F(s)/s$.

Analogamente,

$$\mathcal{L}\left[\iint f(s)\right] = \mathcal{L}[D^{-2}f(t)] = \frac{1}{s^2} F(s) + \frac{1}{s^2} D^{-1}f(0) + \frac{1}{s} D^{-2}f(0)$$

e

$$\mathcal{L}[D^{-n}f(t)] = \frac{1}{s^n} F(s) + \frac{1}{s^n} D^{-1}f(0) + \dots + \frac{1}{s} D^{-n}f(0)$$

Onde o operador $D^{-n}f(t)$ é a n -ésima integral da função.

4.2.2.6 *Teorema do valor inicial*

Esse teorema permite achar o valor de $f(t)$ em $t = 0$. Se a função $f(t)$ e sua primeira derivada são transformáveis, se a Transformada de Laplace de $f(t)$ é $F(s)$, e se $\lim_{s \rightarrow \infty} sF(s)$ existir, então ¹:

$$f(0^+) = \lim_{s \rightarrow \infty} sF(s)$$

Esse teorema estabelece que o comportamento de $f(t)$ nas vizinhanças de $t = 0$ está relacionado com o comportamento de $sF(s)$ nas vizinhanças de $|s| = \infty$. Não há limitações quanto aos polos de $sF(s)$.

4.2.2.7 *Teorema do valor final*

Se $f(t)$ e $df(t)/dt$ admitem Transformada de Laplace, se a Transformada de Laplace de $f(t)$ é $F(s)$ e se $\lim_{t \rightarrow \infty} f(t)$ existe, então:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sF(s)$$

Esse teorema estabelece que o comportamento de $f(t)$ nas vizinhanças de $t = \infty$ está relacionado com o comportamento de $sF(s)$ nas proximidades de $s = 0$. Assim é possível obter o valor de $f(t)$ com t no infinito diretamente através de $F(s)$. Se $F(s)$ possui polos (valores de s para os quais $F(s)$ tende a infinito)

¹O valor da função no instante zero é o valor no instante 0^+ pelo fato da derivada de Laplace ser válida para valores de $t \geq 0$.

sobre o eixo imaginário ou no semiplano s da direita, não existe valor final de $f(t)$, e o teorema não pode ser aplicado.

4.2.2.8 Derivação complexa

Sendo $F(s)$ a Transformada de Laplace de $f(t)$, a multiplicação de $f(t)$ por t no domínio real implica a derivação de $F(s)$ com relação a s no domínio de s .

$$\mathcal{L}[tf(t)] = -\frac{d}{ds}\mathcal{L}[f(t)] = -\frac{d}{ds}F(s)$$

4.2.2.9 Multiplicação pela função exponencial

Se $f(t)$ é transformável por Laplace, com sua transformada sendo $F(s)$, então:

$$\mathcal{L}[e^{-\alpha t} f(t)] = \int_0^{\infty} e^{-\alpha t} f(t)e^{-st} dt = \int_0^{\infty} e^{-(s+\alpha)t} f(t) dt = F(s + \alpha)$$

Assim, a multiplicação de $f(t)$ por e^{-t} tem o efeito de substituir s por $s + \alpha$ no domínio s .

4.2.2.10 Mudança de escala no tempo

Considere a mudança de escala no tempo de t para t/α . Então:

$$\mathcal{L}\left[f\left(\frac{t}{\alpha}\right)\right] = \alpha F(\alpha s)$$

4.2.3 Transformada inversa de Laplace

A transformada inversa (antitransformada) de Laplace é determinada por:

$$\mathcal{L}^{-1}[F(s)] = f(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{c-j\infty}^{c+j\infty} F(s)e^{st} ds, t > 0$$

O melhor método para a obtenção da transformada inversa de Laplace é a utilização da tabela de transformadas de Laplace. Quando a transformada não estiver numa das formas apresentadas na tabela disponível, usa-se, quando possível, a técnica de expansão em frações parciais, que permite escrever $F(s)$ em funções mais simples cujas transformadas sejam conhecidas.

Se

$$F(s) = F_1(s) + F_2(s) + \dots + F_n(s)$$

então pode-se aplicar:

$$\begin{aligned} f(t) &= \mathcal{L}^{-1}[F(s)] = \mathcal{L}^{-1}[F_1(s)] + \mathcal{L}^{-1}[F_2(s)] + \dots + \mathcal{L}^{-1}[F_n(s)] \\ f(t) &= f_1(t) + f_2(t) + \dots + f_n(t) \end{aligned}$$

$F(s)$ é frequentemente representada por:

$$F(s) = \frac{B(s)}{A(s)}$$

onde $A(s)$ e $B(s)$ são polinômios em s .

Escrevendo $F(s)$ na forma fatorada, temos:

$$F(s) = \frac{B(s)}{A(s)} = \frac{k(s+z_1)(s+z_2)\cdots(s+z_m)}{(s+p_1)(s+p_2)\cdots(s+p_n)}, \text{ com } m < n.$$

Polos são as raízes do polinômio do denominador ($-p_1, -p_2, \dots, -p_n$).

Zeros são as raízes do polinômio do numerador ($-z_1, -z_2, \dots, -z_m$).

A expansão em frações parciais corresponde a escrever $F(s)$ na forma (com a condição de que $F(s)$ possua apenas polos distintos):

$$F(s) = \frac{B(s)}{A(s)} = \frac{a_1}{s+p_1} + \frac{a_2}{s+p_2} + \cdots + \frac{a_n}{s+p_n}$$

Os numeradores a_k podem ser obtidos assim:

$$\left[\frac{B(s)}{A(s)}(s+p_k) \right]_{s=-p_k} = a_k$$

Temos que:

$$\mathcal{L}^{-1} \left[\frac{a_k}{s+p_k} \right] = a_k e^{-p_k t}$$

Como

$$\mathcal{L}[F(s)] = \mathcal{L}^{-1}[F_1(s)] + \mathcal{L}^{-1}[F_2(s)] + \cdots + \mathcal{L}^{-1}[F_n(s)] = f_1(t) + f_2(t) + \cdots + f_n(t)$$

Então

$$f(t) = a_1 e^{p_1 t} + a_2 e^{p_2 t} + \cdots + a_n e^{p_n t}, \text{ para } t \geq 0$$

Exemplo 4.1 Determinar a transformada inversa de Laplace de

$$F(s) = \frac{s+3}{(s+1)(s+2)}$$

Expandindo em frações parciais:

$$F(s) = \frac{s+3}{(s+1)(s+2)} = \frac{a_1}{s+1} + \frac{a_2}{s+2}$$

$$a_1 = \left[\frac{s+3}{(s+1)(s+2)}(s+1) \right]_{s=-1} = 2$$

$$a_2 = \left[\frac{s+3}{(s+1)(s+2)}(s+2) \right]_{s=-2} = -1$$

Assim, $F(s)$ fica:

$$F(s) = \frac{s+3}{(s+1)(s+2)} = \frac{2}{s+1} - \frac{1}{s+2}$$

Como

$$\mathcal{L}^{-1} \left[\frac{a_k}{s+p_k} \right] = a_k e^{-p_k t}$$

Então

$$f(t) = \mathcal{L}^{-1} [F(s)] = \mathcal{L}^{-1} \left[\frac{2}{s+1} \right] + \mathcal{L}^{-1} \left[\frac{-1}{s+2} \right]$$

$$f(t) = 2e^{-t} - e^{-2t} \quad t \geq 0$$

A **Figura 4.2** apresenta o gráfico dessa função no tempo.

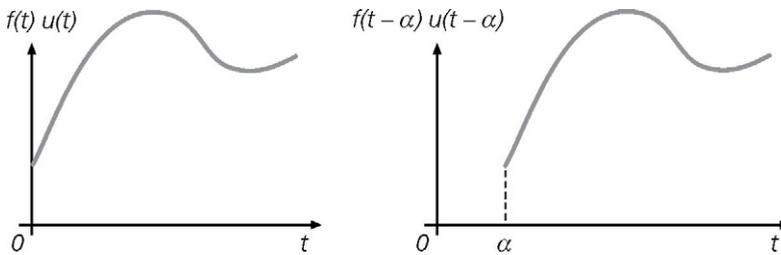


FIGURA 4.2 Representação de $f(t)$ e $f(t-\alpha)$.

4.3 Modelagem matemática de sistemas dinâmicos

Como podem ser modelados matematicamente os sistemas dinâmicos? Sistemas físicos são modelados para poderem ser compreendidos em termos de comportamento e, conforme as necessidades, ter seu comportamento corrigido pelos sistemas de controle.

Há, essencialmente, dois tipos de modelagem que podem ser feitas dos sistemas através de equações diferenciais: os sistemas lineares e os sistemas não lineares.

Os **sistemas lineares** são aqueles cuja principal característica é a aplicação do princípio da superposição [OGA2003]. Esse princípio estabelece que a resposta produzida pela aplicação simultânea de duas funções diversas é a soma das respostas individuais. Esses sistemas podem ser representados por equações diferenciais lineares. Equações diferenciais lineares são aquelas cujos coeficientes são constantes (caso em que são chamadas de invariantes no tempo) ou somente da variável independente (chamadas de variantes no tempo). Um exemplo de equação diferencial invariante no tempo está na [Equação 4.1](#), cujos

coeficientes \mathbf{a}_i e \mathbf{b}_j são todos constantes. As variáveis independentes são \mathbf{y} e \mathbf{x} . A variável \mathbf{y} possui até a n -ésima derivada no membro esquerdo da equação e \mathbf{x} possui até a m -ésima derivada no membro direito da equação.

$$a_n D^n y + a_{n-1} D^{n-1} y + \dots + a_2 D^2 y + a_1 D^1 y + a_0 y = b_m D^m x + b_{m-1} D^{m-1} x + \dots + b_2 D^2 x + b_1 D^1 x + b_0 x$$

$$n > m$$

$a_i, b_i \longrightarrow$ constantes

EQUAÇÃO 4.1 Equação diferencial linear

Os sistemas que podem ser representados por esse tipo de equação estão ilustrados nas Figuras 4.3, 4.4 e 4.5, nos quais as variáveis independentes são o deslocamento e o tempo e todos os demais parâmetros são constantes, como a constante da mola e a massa.

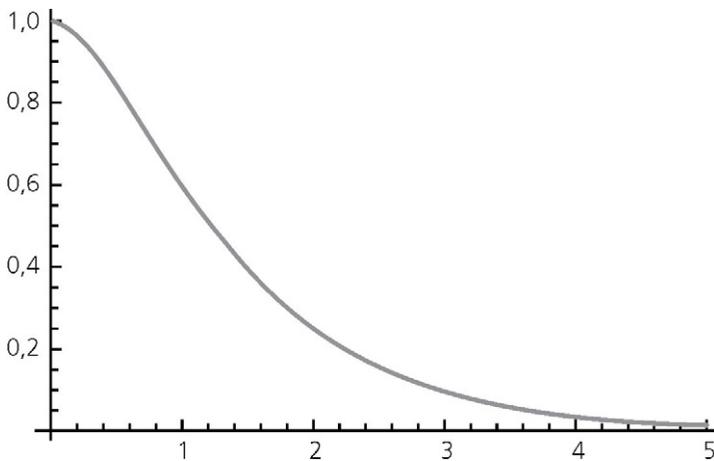


FIGURA 4.3 Gráfico no tempo da antitransformada de $F(s)$ (Exemplo 4.1).



FIGURA 4.4 Sistema massa-mola [IFU2012].

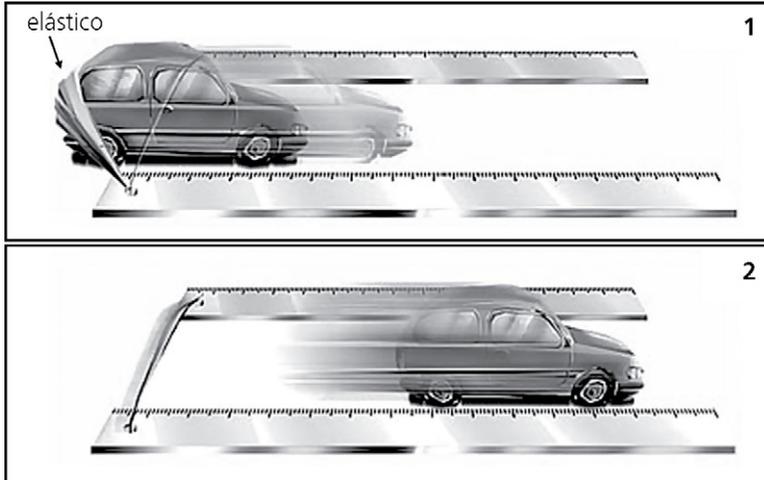


FIGURA 4.5 Sistema de impulsão do modelo de carro [IFU2012].

Um exemplo típico de sistema de controle variante no tempo é o de um veículo espacial, representado na Figura 4.6 cuja massa é variante no tempo. Observe que em um automóvel, a variação da massa do combustível – que também ocorre – é desprezível em relação à sua massa total, mas, no caso do veículo espacial, a quantidade de combustível é muito grande e comparável com a massa do próprio veículo e não pode ser desprezada na modelagem.



FIGURA 4.6 Veículo espacial - massa variante no tempo [KAF2012].

Retomando a [Equação 4.1](#), pode-se aplicar a Transformada de Laplace à equação diferencial, que vai se tornar uma equação polinomial, conforme representado na [Equação 4.2](#).

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

EQUAÇÃO 4.2 Equação polinomial

Essa equação pode ser colocada na forma $Y(s)/X(s)$, que é a relação de dois polinômios, conforme representado na [Equação 4.3](#). Lembre-se de que $n > m$, ou seja, o polinômio do denominador é maior que o polinômio do numerador. Essa forma é denominada **função de transferência** $G(s) = Y(s)/X(s)$.

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

EQUAÇÃO 4.3 Equação polinomial, representada na forma $Y(s)/X(s)$, e função de transferência $G(s)$

Observando-se a [Figura 4.7](#) pode-se entender que a função de transferência $G(s)$ oferece a relação entre a entrada e saída de um sistema. A aplicação de uma entrada $X(s)$ em um sistema oferece uma saída $Y(s)$. Um corolário dessa observação é que, em sistemas lineares, os parâmetros que definem o modelo de um sistema não dependem da entrada nele aplicada, pois as suas características estão representadas pelos polinômios da função de transferência, ou seja, dos parâmetros \mathbf{a}_i e \mathbf{b}_j . A aplicação de uma excitação $X(s)$ vai provocar no sistema uma saída $Y(s)$ que é determinada pelo produto de $X(s)$ por $G(s)$, conforme representado na [Equação 4.3](#).



FIGURA 4.7 Função de transferência.

4.3.1 Função de transferência de um circuito elétrico RLC

Seja o circuito elétrico RLC representado na [Figura 4.8](#). As equações que regem o comportamento desse circuito estão representadas na [Equação 4.4](#).

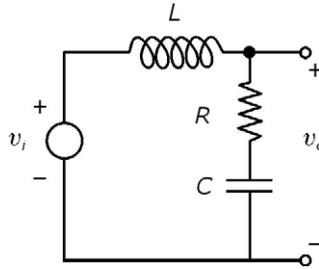


FIGURA 4.8 Circuito elétrico RLC.

$$v(t) = Ri(t)$$

$$i(t) = C \frac{dv(t)}{dt}$$

$$v(t) = L \frac{di(t)}{dt}$$

EQUAÇÃO 4.4 Circuito elétrico RLC

A **função de transferência** desse circuito vai fornecer a relação entre a saída $V_o(s)$ e a entrada $V_i(s)$. Em outras palavras, será necessário determinar $G(s) = V_o(s)/V_i(s)$. Observe que a função de transferência é definida no domínio das frequências e não no domínio do tempo!

Há três formas de se determinar a função de transferência aqui ilustrada: determinar a equação diferencial e realizar a transformada, fazer a divisão das equações ou fazer a abordagem de impedância diretamente no plano s .

a) Determinação da equação diferencial

A [Equação 4.5](#) mostra que a tensão no indutor é dada pela diferença de tensão entre a entrada e a saída, onde se aplica da definição do indutor:

$$v_i(t) - v_o(t) = L \frac{di(t)}{dt}$$

EQUAÇÃO 4.5 Circuito elétrico RLC: tensão no indutor

$$v_o(t) = Ri(t) + \frac{1}{C} \int i(t) dt$$

EQUAÇÃO 4.6 Circuito elétrico RLC: tensão de saída

A [Equação 4.6](#) mostra que a tensão de saída é a soma das tensões do resistor e do capacitor. A corrente $i(t)$ é a mesma da [Equação 4.5](#).

As [Equação 4.7](#) e [Equação 4.8](#) representam as transformadas de Laplace das [Equação 4.5](#) e [Equação 4.6](#), respectivamente.

$$V_i(s) - V_o(s) = sLI(s)$$

EQUAÇÃO 4.7 Circuito elétrico RLC: Transformada de Laplace da tensão de entrada

$$V_o(s) = RI(s) + \frac{1}{sC}I(s)$$

ou

$$I(s) = \frac{V_o(s)}{R + \frac{1}{sC}}$$

EQUAÇÃO 4.8 Circuito elétrico RLC: Transformada de Laplace da corrente da malha

Substituindo o valor de $I(s)$ da [Equação 4.8](#) na [Equação 4.7](#), fica identificada a função de transferência do circuito:

$$V_i(s) - V_o(s) = sL \frac{V_o(s)}{R + \frac{1}{sC}}$$

EQUAÇÃO 4.9 Circuito elétrico RLC: substituição das equações

A função de transferência é obtida da relação entre $V_o(s)/V_i(s)$, conforme a [Equação 4.10](#).

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{sRC + 1}{s^2LC + sRC + 1}$$

EQUAÇÃO 4.10 Circuito elétrico RLC: função de transferência

b) Abordagem das impedâncias

Nesta abordagem, o que se faz é tratar as impedâncias como se faz com redes de resistores (lei de Ohm), como mostrado na [Equação 4.11](#).

$$Z_R = R = \frac{V_R(s)}{I(s)}$$

$$Z_C = \frac{1}{sC} = \frac{V_C(s)}{I(s)}$$

$$Z_L = sL = \frac{V_L(s)}{I(s)}$$

EQUAÇÃO 4.11 Circuito elétrico RLC: impedâncias de resistor, capacitor e indutor

Um divisor de impedâncias, conforme ilustrado na [Figura 4.9](#), possui a tensão de saída calculada através da [Equação 4.12](#).

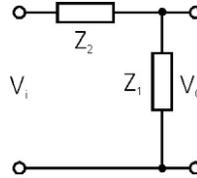


FIGURA 4.9 Circuito elétrico RLC: divisor de tensão com impedâncias.

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{Z_1(s)}{Z_1(s) + Z_2(s)}$$

$$Z_1(s) = R + \frac{1}{sC}$$

$$Z_2(s) = sL$$

EQUAÇÃO 4.12 Circuito elétrico RLC: divisor de tensão com impedâncias equivalentes

Aplicando esse conceito no circuito da [Figura 4.8](#), as impedâncias ficam equivalentes àsquelas representadas na [Equação 4.12](#).

Dessa forma, a função de transferência fica com a expressão representada na [Equação 4.13](#).

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{Z_1(s)}{Z_1(s) + Z_2(s)} = \frac{R + \frac{1}{sC}}{R + \frac{1}{sC} + sL} = \frac{sRC + 1}{s^2LC + sRC + 1}$$

EQUAÇÃO 4.13 Circuito elétrico RLC: função de transferência obtida com a abordagem de impedâncias

Observe que o resultado é idêntico nas expressões representadas na [Equação 4.10](#) e na [Equação 4.13](#).

4.3.2 Função de transferência de um sistema massa-mola-amortecedor

Seja o sistema mecânico representado na [Figura 4.10](#). Pode-se entender que a massa **m** está solidária a uma caçamba de caminhão que se movimenta seguindo a equação de posição **u(t)**. A massa **m** prende-se à caçamba através de uma mola cuja constante é **k** e um amortecedor de coeficiente **b**.

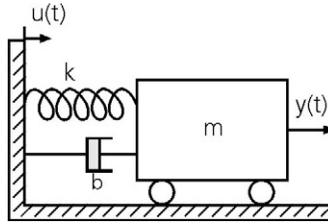


FIGURA 4.10 Sistema mecânico massa-mola-amortecedor.

Esse sistema pode ser modelado aplicando-se as equações da física referentes à força na massa, na mola e no amortecedor, conforme a [Equação 4.14](#).

Equação da massa	$\sum F = ma$
Equação da mola	$F_1 = -k(y - u)$
Equação do amortecedor	$F_2 = -b \frac{d(y - u)}{dt}$

EQUAÇÃO 4.14 Sistema mecânico massa-mola-amortecedor

Observe que as forças aplicadas à massa são referentes ao deslocamento **y-u**. Aplicada a equação da massa, fica a equação diferencial representada na [Equação 4.15](#). Observe que as forças aplicadas à massa são referentes ao deslocamento **y-u**.

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = -b \left(\frac{dy}{dt} - \frac{du}{dt} \right) - k(y - u)$$

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + b \frac{dy}{dt} + ky = b \frac{du}{dt} + ku$$

EQUAÇÃO 4.15 Sistema mecânico massa-mola-amortecedor: equações diferenciais

Essa expressão ([Equação 4.15](#)) representa a equação diferencial do sistema no domínio do tempo. Para o domínio das frequências, pode-se fazer a Transformada de Laplace, e obter a [Equação 4.16](#).

$$ms^2 Y(s) + bsY(s) + kY(s) = bsU(s) + kU(s)$$

$$(ms^2 + bs + k)Y(s) = (bs + k)U(s)$$

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{bs + k}{ms^2 + bs + k} = \frac{\frac{b}{k}s + 1}{\frac{m}{k}s^2 + \frac{b}{k}s + 1}$$

EQUAÇÃO 4.16 Sistema mecânico massa-mola-amortecedor: função de transferência

A função de transferência $G(s)$ (Equação 4.16) representa no numerador um polinômio de primeiro grau e no denominador um polinômio de segundo grau. Similarmente ao obtido no exemplo do circuito elétrico, a aplicação de uma excitação $U(s)$ vai provocar no sistema uma saída $Y(s)$ que é determinada pelo produto de $U(s)$ por $G(s)$, em que $G(s)$ depende exclusivamente das características do sistema (m, b, k).

4.3.3 Equivalência das funções de transferência

Compare a função de transferência do circuito elétrico da Equação 4.10 e da Equação 4.13 com a função de transferência do sistema mecânico da Equação 4.16. Elas são idênticas! Portanto, as soluções de ambos os sistemas são iguais. Na comparação direta das equações pode-se obter a equivalência entre os sistemas se forem obedecidas as igualdades representadas no Quadro 4.2.

Quadro 4.2 Equivalência entre os sistemas elétrico e mecânico

Parâmetro elétrico	Parâmetro mecânico
C	1/k
R	B
L	M

Interessante observar que se pode dimensionar o sistema mecânico através do circuito elétrico, pois é muito mais fácil ajustar um circuito com a substituição de componentes do que realizar testes no sistema mecânico variando os parâmetros da mola, da massa ou do amortecedor. Na década de 1950, a Citroën realizou o projeto da suspensão de um carro dessa forma, pois naquela época não havia a disponibilidade de computadores para realizar simulações e esta foi uma solução criativa relativamente simples.

4.3.4 Resposta do circuito elétrico RLC

Com posse da função de transferência, fica fácil determinar o comportamento dos sistemas em estudo. No circuito elétrico (Figura 4.8), cuja função de transferência está representada na Equação 4.10 (e igualmente nas Equação 4.13 e Equação 4.16 – Sistema mecânico massa-mola-amortecedor: função de transferência), pode-se calcular o comportamento do circuito para diversas entradas, como por exemplo: impulso, degrau e senoide.

a) Resposta a impulso unitário

Conforme visto anteriormente, a Transformada de Laplace do impulso unitário é igual a 1 . Portanto, a resposta a impulso unitário fica conforme a Equação 4.17.

Observe que a função de transferência $G(s)$ contém um polinômio de segundo grau no denominador. As raízes desse polinômio (do

$$G(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{sRC + 1}{s^2LC + sRC + 1}$$

$$V_i(s) = 1$$

$$V_o(s) = G(s)V_i(s) = \frac{sRC}{s^2LC + sRC + 1}$$

EQUAÇÃO 4.17 Circuito elétrico RLC: resposta ao impulso

denominador) são os **polos** da função de transferência. Com a aplicação de um impulso unitário na entrada, a equação mostra seu comportamento natural, com dois polos que correspondem à frequência de ressonância do circuito LC.

Para obter a resposta no tempo rapidamente, pode-se utilizar uma rotina matemática existente na internet denominada Wolfram Alpha, disponível no site <http://www.wolframalpha.com>.

Como esse software não trabalha com literais, mas sim com valores numéricos, será feito o exemplo com os valores apresentados no **Quadro 4.3**.

Quadro 4.3 Circuito elétrico RLC: valores adotados para obtenção da resposta

R = 2Ω C = 10 μF L = 1mH

$$G(s) = \frac{sRC + 1}{s^2LC + sRC + 1} = \frac{20 \cdot 10^{-6}s + 1}{10^{-8}s^2 + 20 \cdot 10^{-6}s + 1}$$

Nesse site deve-se digitar *inverse laplace transform* e a função em s. A notação utilizada segue a **Figura 4.11**. Nessas equações, por uma questão de melhor aproximação numérica, será utilizada a função de transferência G(s) da **Equação 4.13**. Para os valores do exemplo, LC = 10⁻⁸ e RC = 20 · 10⁻⁶, que definem a função de transferência do **Quadro 4.3**. O software Wolfram Alpha interpreta da forma apresentada na **Figura 4.12**.

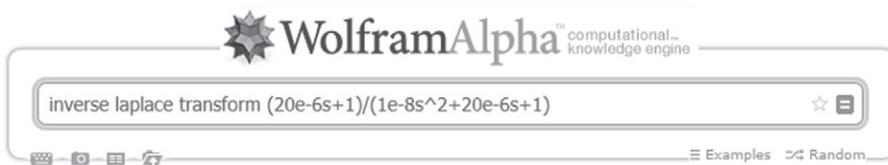


FIGURA 4.11 Circuito elétrico RLC: programação para obtenção da resposta ao impulso.

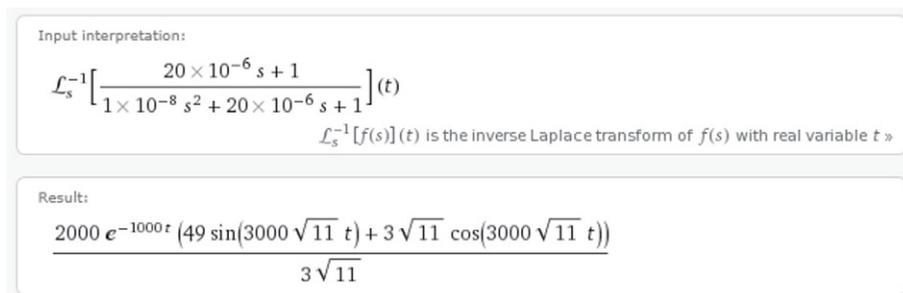


FIGURA 4.12 Circuito elétrico RLC: resposta a impulso (obtida por Wolfram Alpha).

O único cuidado a ser tomado é o fato de esse software considerar a faixa de tempos negativos que não são válidos pela definição da Transformada de Laplace. Os gráficos gerados estão representados na [Figura 4.13](#). Esse gráfico pode ser interpretado da seguinte forma: no instante zero é aplicado um pulso unitário de duração praticamente nula (como se fosse uma martelada de energia com valor unitário). Essa energia recebida provoca uma reação do sistema que vai oscilar nas frequências próprias dadas pelos componentes oscilatórios LC. Como esses componentes foram modelados como ideais, sem perda, o movimento oscilatório continua com dissipação de energia apenas pelo resistor.

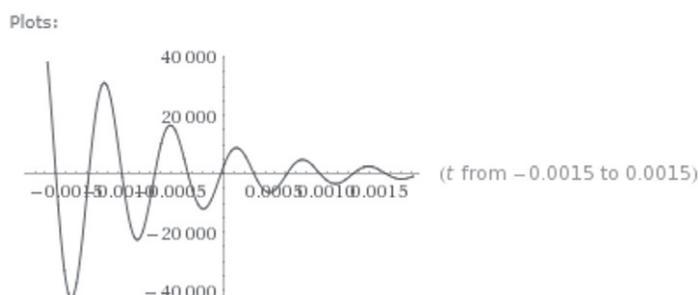


FIGURA 4.13 Circuito elétrico RLC: resposta a impulso.

Essa energia dissipada faz com que o sistema reduza a amplitude de oscilação, fato que explica a envoltória exponencial amortecida. Essa oscilação decai até a exaustão da energia. Para maior fidelidade na resposta pode-se acrescentar ao comando a diretiva “from $0 < t < 5e-3$ and $-10000 < y < 10000$ ” para fazer o gráfico apenas nesse intervalo. O resultado está apresentado na [Figura 4.14](#).

Mathematica form

Input interpretation:

$$\mathcal{L}_s^{-1} \left[\frac{1}{s(1 \times 10^{-8} s^2 + 20 \times 10^{-6} s + 1)} \right] (t)$$

$\mathcal{L}_s^{-1}[f(s)](t)$ is the inverse Laplace transform of $f(s)$ with real variable t »

Result:

$$1 - \frac{1}{33} e^{-1000t} (\sqrt{11} \sin(3000 \sqrt{11} t) + 33 \cos(3000 \sqrt{11} t))$$

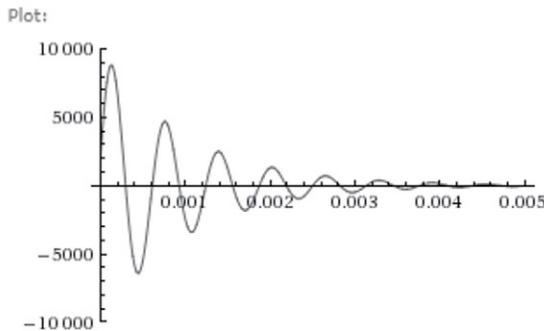


FIGURA 4.14 Idem anterior com intervalo de tempo e amplitude corrigidos.

b) Resposta a degrau

Para esse caso, a Transformada de Laplace do degrau unitário é $1/s$. Portanto, para determinar a resposta a degrau, basta multiplicar a função de transferência por esse valor, conforme apresentado na [Equação 4.18](#).

$$G(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{sRC + 1}{s^2 LC + sRC + 1}$$

$$V_i(s) = \frac{1}{s}$$

$$V_o(s) = G(s)V_i(s) = \frac{sRC + 1}{s(s^2 LC + sRC + 1)}$$

EQUAÇÃO 4.18 Circuito elétrico RLC: resposta ao impulso.

Repetindo o que foi feito no caso anterior, e adotando os mesmos valores no Wolfram Alpha, a equação fica a representada na [Figura 4.15](#). Para os valores do exemplo são usados os mesmos valores $LC = 10^{-8}$ e $RC = 20 \cdot 10^{-6}$.

WolframAlpha™ computational... knowledge engine

inverse laplace transform (20e-6s+1)/(s(1e-8s^2+20e-6s+1)) from 0<t<5e-3 and 0<y<=

☰ Examples ↗ Random

FIGURA 4.15 Circuito elétrico RLC: programação para obtenção da resposta ao degrau.

O software Wolfram Alpha interpreta da forma apresentada na [Figura 4.16](#). Observe que a equação no tempo possui uma envoltória exponencial e, além da senoide que havia na equação da resposta a impulso, surge uma cossenoide.

Trata-se da mesma expressão anterior multiplicada por $1/s$.

plot	$\frac{1}{33} e^{-1000t} (33 e^{1000t} - 33 \cos(3000 \sqrt{11} t) + \sqrt{11} \sin(3000 \sqrt{11} t))$	$t = 0 \text{ to } \frac{1}{200}$
		$y = 0 \text{ to } 2$

FIGURA 4.16 Circuito elétrico RLC: resposta a degrau (obtida por Wolfram Alpha).

Os gráficos gerados estão representados na [Figura 4.17](#). Esse gráfico pode ser interpretado da seguinte forma: no instante zero é aplicado um degrau unitário. Com tempo infinito a saída tende ao valor unitário. Observando o circuito, pode-se concluir que a tensão da saída tenderá a igualar a tensão da entrada, e a corrente tenderá a zero. O que se pode observar também é o fenômeno transitório da evolução do estado inicial nulo para o estado final de tensão unitária. Nesse intervalo ocorre

Input interpretation: Mathematica form

$$\mathcal{L}_s^{-1} \left[\frac{3000}{(3000^2 + s^2)(1 \times 10^{-8} s^2 + 20 \times 10^{-6} s + 1)} \right] (t)$$

$\mathcal{L}_s^{-1}[f(s)](t)$ is the inverse Laplace transform of $f(s)$ with real variable t »

Result:

$$3000 \left(\frac{91 \sin(3000 t) - 6 \cos(3000 t)}{249510} + \frac{e^{-1000t} (66 \cos(3000 \sqrt{11} t) - 89 \sqrt{11} \sin(3000 \sqrt{11} t))}{2744610} \right)$$

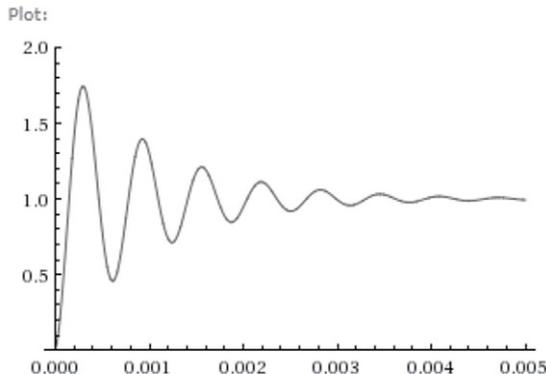


FIGURA 4.17 Circuito elétrico RLC: resposta a degrau.

fenômeno semelhante ao caso anterior, em que ocorre oscilação na frequência própria (período de $600 \mu\text{s}$ que corresponde a um ω) devido aos polos da função de transferência. Novamente trata-se de uma oscilação amortecida até se chegar ao regime permanente já descrito.

c) Aplicação de excitação senoidal

Lembrando que a Transformada de Laplace de uma oscilação forçada $v_i(t) = \text{sen}(\omega t)$ – amplitude unitária – aplicada na entrada é $\omega/(s^2 + \omega^2)$, as equações são como apresentadas na [Equação 4.19](#).

$$V_i(s) = \frac{\omega}{s^2 + \omega^2}$$

$$G(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{1}{LCs^2 + RCs + 1}$$

$$V_o(s) = \frac{\omega}{(\omega^2 + s^2)(LCs^2 + RCs + 1)}$$

EQUAÇÃO 4.19 Circuito elétrico RLC: resposta à entrada senoidal.

Adotando os mesmos valores de componentes que os utilizados anteriormente, a [Figura 4.18](#) apresenta equação para entrada senoidal. Nesse caso foi necessário escolher um valor de ω , ou seja, a frequência angular da senoide da entrada. Essa frequência angular é dada em radianos por segundo. O valor escolhido foi $\omega=3000 \text{ rd/s}$.

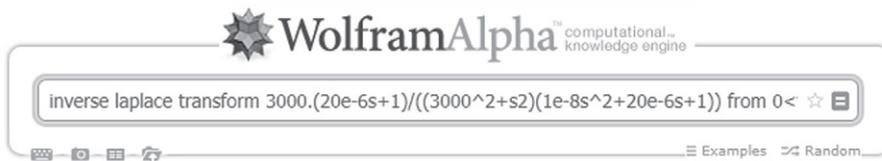


FIGURA 4.18 Circuito elétrico RLC: programação para obtenção da resposta à entrada senoidal com $\omega=3000/\text{s}$.

A interpretação da equação feita pelo Wolfram Alpha está na [Figura 4.19](#). Observe que a equação no tempo possui a senoide original multiplicada por uma cossenoide e uma exponencial com outras frequências. A exponencial representa o transitório que, com tempo longo, desaparece. A cossenoide representa a deformação que a função de transferência provoca na forma de onda da saída.

Input interpretation:

plot	$-0.000021861 e^{-1000t} (297 e^{1000t} \cos(3000t) - 297 \cos(3000\sqrt{11}t) - 50248 e^{1000t} \sin(3000t) + 4559\sqrt{11} \sin(3000\sqrt{11}t))$	$t = 0 \text{ to } \frac{1}{200}$
		$y = -2 \text{ to } 2$

FIGURA 4.19 Circuito elétrico RLC: resposta à entrada senoidal com $\omega=3000/s$ (obtida por Wolfram Alpha).

Os gráficos referentes à resposta no tempo estão na [Figura 4.20](#). Observe que a senoide está distorcida. É possível observar, pelo gráfico inferior, que permanece a função senoide.

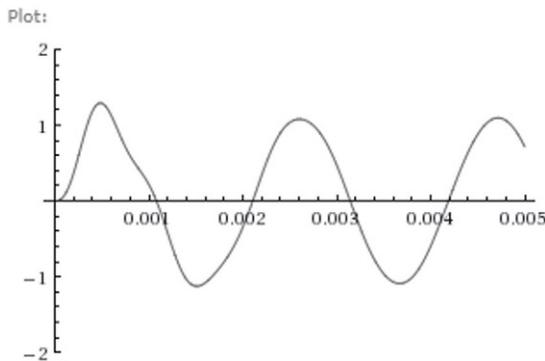


FIGURA 4.20 Circuito elétrico RLC: resposta à entrada senoidal com $\omega=3000/s$.

Pode-se observar que a frequência própria do circuito interfere na resposta da saída provocando deformação na forma de onda, mas como a frequência é imposta na entrada, ela permanece na saída. Variando-se a frequência de excitação na entrada pode-se observar os diferentes comportamentos.

A frequência angular $\omega=45.000 \text{ rd/s}$ provoca uma forma de onda representada na [Figura 4.21](#). Observar que a forma de onda está bem distorcida em relação ao caso anterior.

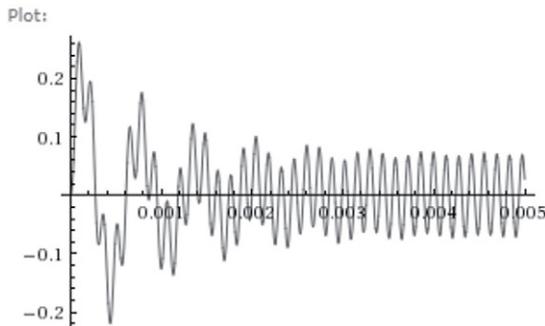


FIGURA 4.21 Circuito elétrico RLC: resposta à entrada senoidal com $\omega=45000/s$.

Quando a frequência imposta é muito mais alta que a frequência de ressonância, no caso 200.000 rd/s, pode-se observar (Figura 4.22) que a frequência própria do circuito fica modulada pela frequência imposta. Depois do transi-tório ela desaparece por causa da exponencial amortecida.

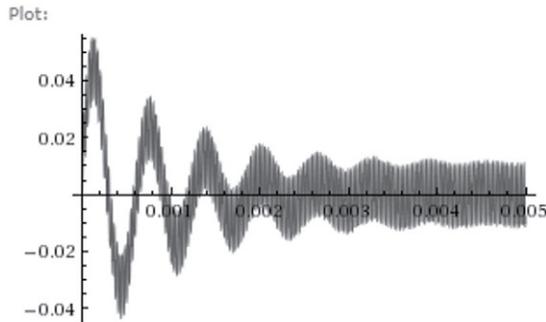


FIGURA 4.22 Circuito elétrico RLC: resposta à entrada senoidal com $\omega=200000/s$.

Um bom exercício é colocar essas equações no Wolfram Alpha, variar a frequência angular e interpretar os resultados.

4.3.5 Resposta do sistema mecânico

Da mesma forma que foi feito no circuito elétrico, de posse da função de transferência, fica fácil determinar o comportamento dos sistemas em estudo. No sistema mecânico cuja função de transferência está representada na Equação 4.16, pode-se igualmente calcular o comportamento do sistema para diversas entradas, e os resultados são idênticos aos apresentados para o circuito elétrico uma vez que a função de transferência é a mesma. Assim, para os parâmetros de equivalência entre os dois sistemas descritos na Equação 4.17, temos:

$$\begin{aligned}k &= \frac{1}{C} = 1.000.000 \\b &= R = 2 \\m &= L = 0,01\end{aligned}$$

Para esses valores, os resultados são idênticos aos apresentados para o circuito eletrônico.

4.4 Transformadas de Laplace de controladores automáticos

No capítulo anterior foram apresentados os tipos de controladores automáticos. São descritas aqui as suas transformadas de Laplace (veja o Quadro 4.4).

Quadro 4.4 Transformadas de Laplace de controladores automáticos

Tipo de controle	Transformada de Laplace
P	$U(s) = K_p E(s)$
PI	$U(s) = (K_p + \frac{K_i}{s})E(s) = K_p(1 + \frac{1}{T_i s})E(s)$
PD	$U(s) = (K_p + K_d s)E(s) = K_p(1 + T_d s)E(s)$
PID	$U(s) = (K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s)E(s) = K_p(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s)E(s)$
Parâmetros	K_p, K_i, K_d : ganhos proporcional, integrativo e derivativo T_i, T_d : constantes de tempo integrativo e derivativo

4.5 Resposta a degrau com realimentação proporcional

Para ilustrar o comportamento do sistema com realimentação, será retomado o comportamento do sistema na resposta a degrau, representado na [Figura 4.16](#). Nessa situação, o sistema apresenta um sobressinal de 80% (1,8) e oscila durante 3,5 ms até atingir o valor final.

Considerando $PID(s)$ uma realimentação $P(s) = K_p$ (proporcional), a nova função de transferência, com o sistema realimentado está na [Equação 4.20](#).

$$G(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{G(s)P(s)}{1 + G(s)P(s)}$$

EQUAÇÃO 4.20 Função de transferência com realimentação PID

[Figura 4.23](#) Utilizando os mesmos valores anteriores e na realimentação PID o valor $K_p = 1$, a função de transferência fica ([Equação 4.21](#)):

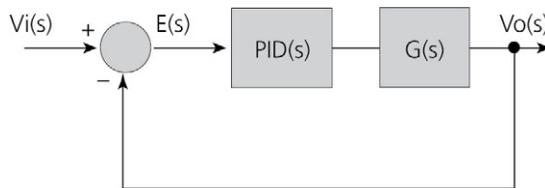


FIGURA. 4.23 Sistema com realimentação.

$$G(s) = \frac{V_o(s)}{Vi(s)} = \frac{K_p (sRC + 1)}{LCs^2 + sRC + 1 + K_p (sRC + 1)}$$

$$G(s) = \frac{K_p (sRC + 1)}{LCs^2 + sRC(K_p + 1) + 1 + K_p}$$

$$G(s) = \frac{20 \cdot 10^{-6} s + 1}{10^{-8} s^2 + 40 \cdot 10^{-6} s + 2}$$

EQUAÇÃO 4.21 Função de transferência com realimentação unitária

No Wolfram Alpha, a resposta a degrau fica (Figura 4.24):

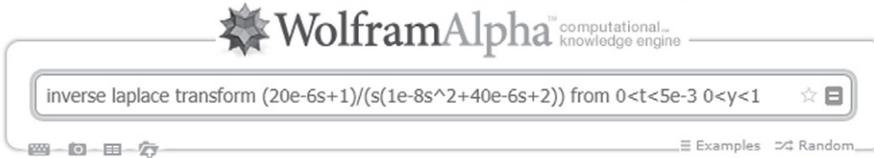


FIGURA 4.24 Valores para resposta a degrau com realimentação unitária.

Como o sistema proporcional possui erro de regime permanente, esse erro ficou muito alto e o valor final ficou com 0,5 e não 1 como no caso sem realimentação (Figura 4.25). Para corrigir isso, pode-se mudar o valor de $K_p = 20$ (veja equação na Figura 4.26), fato que leva o sistema a um erro de regime

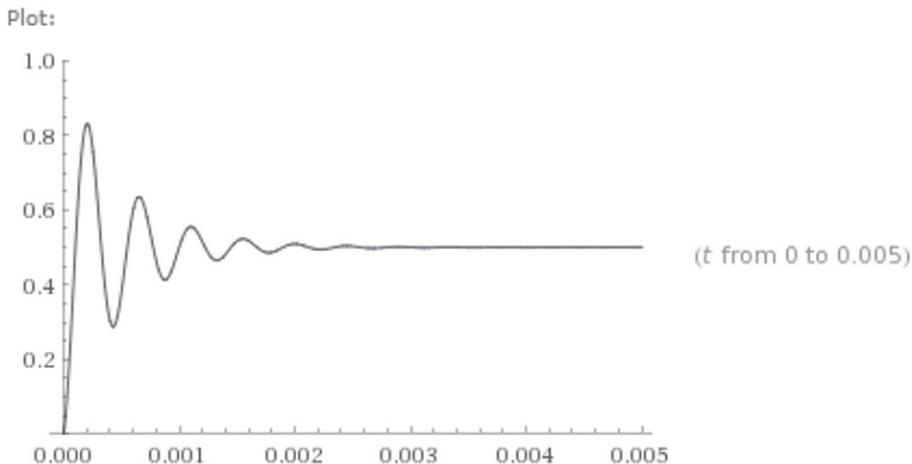
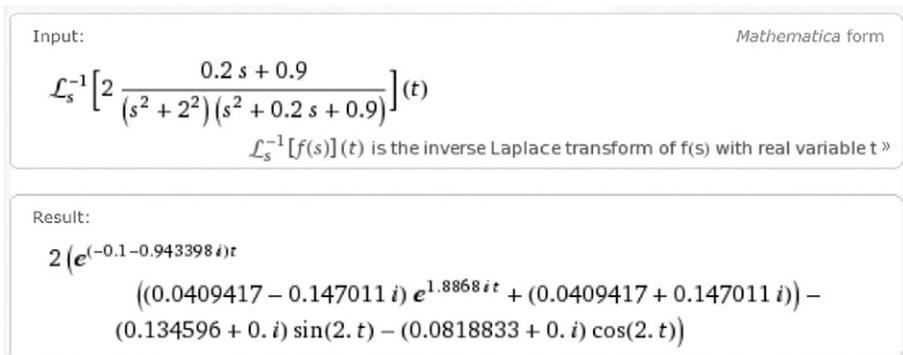
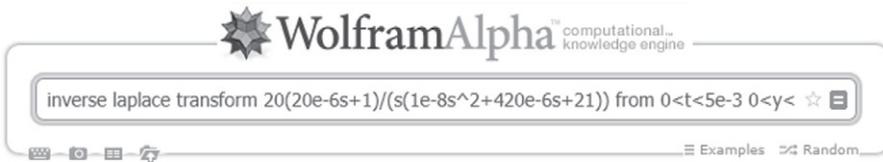
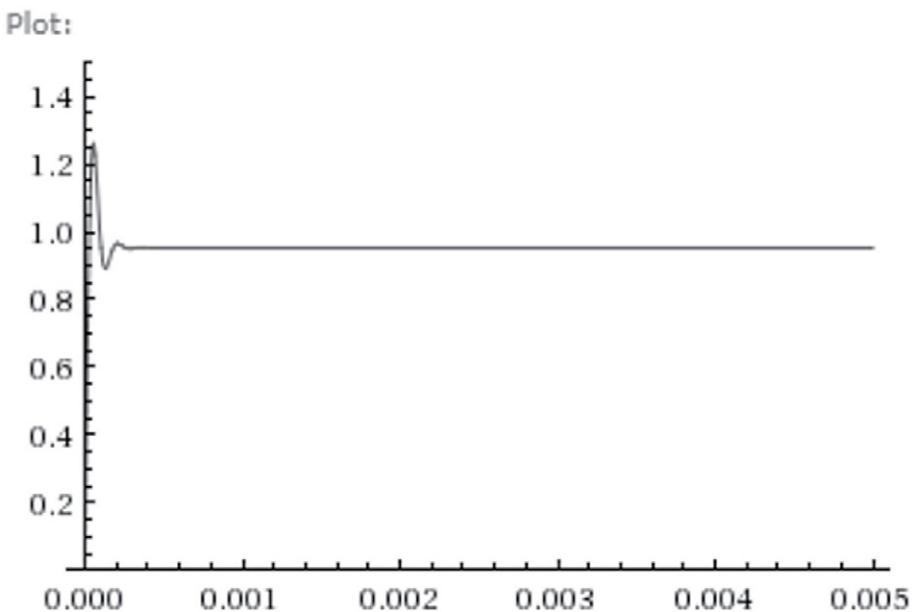


FIGURA 4.25 Resposta de malha fechada.

FIGURA 4.26 Equação para $K_p = 20$.

permanente bem menor, na faixa de 0,1, sobressinal de 30% e regime permanente atingido em 0,25 ms. Isso demonstra como a realimentação melhora o desempenho do sistema (Figura 4.27).

FIGURA 4.27 Resposta de malha fechada com $K_p = 20$.

Vale observar que, nos sistemas de controle, não há alteração da função de transferência do sistema, pois este dificilmente pode ser alterado. O truque consiste em alterar o comportamento do sistema através da realimentação e acréscimo de outra função de transferência, no exemplo PID(s).

4.6 Regras de sintonia para controladores PID

Em plantas industriais há uma dificuldade para se realizar o ajuste de malhas de realimentação através de modelos matemáticos, pois a função de transferência do processo nem sempre é conhecida e isso dificulta a possibilidade de uso de métodos analíticos para sintonia do sistema. Vários autores desenvolveram regras práticas para sintonia dos sistemas, entre eles

um método conhecido como regra de Ziegler-Nichols, aqui reproduzida [CAS1980] [OGA2003]:

- Considere a função de transferência do PID (Quadro 4.24);
- Ajuste T_d e $1/T_i$ em zero;
- Aumente lentamente o ganho K_p até que se instale no sistema uma oscilação periódica;
- Seja k_u esse valor de ganho e P_u o período de oscilação;
- Escolha os parâmetros de compensador conforme o [Quadro 4.5](#).

Quadro 4.5 Parâmetros de ajuste do controlador PID

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0,50 k_u$	-	-
PI	$0,45 k_u$	-	$1,2/P_u$
PID	$0,60 k_u$	$P_u/8$	$2/P_u$

4.7 Na prática

A Transformada de Laplace tem aplicações nas várias áreas da engenharia e também em outras áreas de atuação.

A aplicação prática em automação de sistemas se dá em todas as situações que permitem fazer a modelagem através de equações diferenciais ordinárias. Os passos tipicamente seguidos são:

- Descrever o sistema não controlado através de equações diferenciais.
- Aplicar a Transformada de Laplace, levando a equações no domínio s .
- Resolver as equações no domínio s .
- Realizar a antitransformada e obter as soluções no domínio t .
- Realizar simulações do sistema, compreendendo a influência dos parâmetros no seu desempenho e predizendo as saídas geradas pelas entradas programadas; comparar com os resultados reais conhecidos; ajustar o modelo.
- Desenhar sistemas de controle com foco no desempenho desejado para o sistema e realizar novas simulações.
- Ajustar os sistemas de controle e implementá-los na prática (tipicamente através de dispositivos computacionais).

4.8 Leituras recomendadas

Este texto tem foco nas aplicações da Transformada de Laplace, mas não apresenta o seu desenvolvimento matemático detalhado, nem as várias aplicações matemáticas. Estudos teóricos mais aprofundados podem ser obtidos em textos que tratam do tema. Uma sugestão é o livro de Joel Schiff, *The Laplace transform: theory and applications*. [SCH1999]

Para aprofundamento em projetos de sistemas de controle com uso de transformadas de Laplace, recomenda-se o livro *Engenharia de controle moderno*, de Katusuhiko Ogata [OGA2003].

4.9 Exercícios e atividades

1. Obtenha a Transformada de Laplace das seguintes funções:

- a) $f(t) = 5$
- b) $f(t) = 5t$
- c) $f(t) = 5e^{-4t}$
- d) $f(t) = 5 \text{ sen}(3t)$

2. Obtenha a antitransformada de Laplace das funções seguintes:

$$R_1(s) = \frac{1}{s^2 + 5s + 6}$$

$$R_2(s) = \frac{1}{s^2 + 5s + 6} \frac{1}{s}$$

3. Considere um sistema com o seguinte diagrama de blocos (Figura 4.28), com $K = 10$ e $T = 2\text{ms}$:

- a) Obtenha a função de transferência do sistema, $C(s)/R(s)$.
- b) Obtenha a resposta ao degrau unitário, no domínio de frequência.

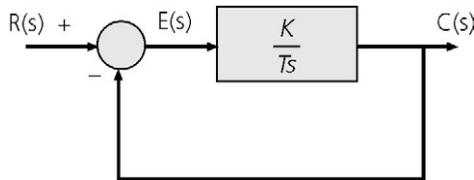


FIGURA 4.28 Exercício 3.

- c) Obtenha a resposta ao degrau unitário, no domínio do tempo, para $t > 0$.
 - d) Desenhe um gráfico esquemático (sem escala), mostrando o desempenho do sistema no tempo estimulado pelo impulso unitário.
 - e) Discuta o que ocorre com a resposta no tempo se for aumentado o valor de K (mantendo $T = 2\text{ms}$).
 - f) Discuta o que ocorre com a resposta se a constante T aumentar (mantendo $K = 10$).
4. Considere o sistema com realimentação apresentado na Figura 4.23, que apresenta um sobressinal que precisa ser eliminado. Utilizando as regras de sintonia de um sistema PID (4.6), eliminar esse sobressinal.

4.10 Soluções de alguns exercícios

1. a) $5/s$ b) $5/s^2$ c) $5/(s+5)$ d) $25/(s^2+25)$

2. Funções no tempo

$$r_1(t) = e^{-2t} - e^{-3t}$$

$$r_2(t) = \frac{1}{3}e^{-3t} - \frac{1}{2}e^{-2t} + \frac{1}{6}$$

Referências bibliográficas

[IFU2012] INSTITUTO DE FÍSICA DA USP. **Ensino de Física On-line**. Disponível em: <http://efisica.if.usp.br/mecanica/basico/elasticidade/experimento/>. (Acessado em: 09/08/2012.)

[OGA2003] OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de controle moderno**. Trad. Paulo Alves Maia. Rev. Téc. Fabrizio Leonardi *et al.* 4. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2003.

KAFÉ PRESS. **História dos ônibus espaciais**. Disponível em: <http://www-exel.blogspot.com.br/2011/12/historia-dos-onibus-espaciais.html>. (Acessado em: 09/08/2012.)

[SCH1999] SCHIFFE, Joel L. **The Laplace transform: theory and applications**. Springer Verlag: Nova York, 1999.

Processos contínuos

SUMÁRIO

5.1	Miniglossário	110
5.2	Características do processo contínuo.....	111
5.3	Trocador de calor – Um exemplo.....	111
5.4	Classificação de instrumentos	113
5.5	Simbologia e nomenclatura para processos de automação.....	113
5.5.1	Codificação da nomenclatura.....	114
5.5.2	Simbologia para as conexões	118
5.5.3	Simbologia para os instrumentos.....	119
5.5.4	Funções e seus símbolos.....	120
5.5.5	Simbologia de outros elementos	120
5.5.6	Alguns arranjos típicos de Instrumentos	121
5.6	Sistema de instrumentação	125
5.6.1	Arquitetura da instrumentação	127
5.6.2	Tecnologias da instrumentação.....	128
5.6.3	Tecnologia pneumática.....	129
5.6.4	Tecnologia eletrônica analógica	129
5.6.5	Tecnologia eletrônica digital.....	132
5.6.5.1	<i>Funcionamento do sistema digital.....</i>	<i>133</i>
5.6.5.2	<i>Conversor análogo-digital (AD)</i>	<i>133</i>
5.6.5.3	<i>Conversor digital-analógico (DA).....</i>	<i>135</i>
5.6.5.4	<i>Outras características da tecnologia digital.....</i>	<i>135</i>
5.7	Sistemas supervisórios.....	136
5.8	Sala de controle.....	138
5.9	Leituras recomendadas	138
5.10	Exercícios e atividades	138
5.11	Soluções de alguns exercícios	140

O objeto de estudo deste capítulo é a Automação dos Processos Contínuos. Diferentemente da maioria dos livros que realizam o estudo dos sistemas de automação a partir da grandeza medida e dos fenômenos físicos (*bottom-up*), aqui foi adotada a visão sistêmica, em que o ponto de partida é o processo

como um todo e, gradativamente, vai-se mergulhando nos detalhes conforme a necessidade (*top-down*).

Conforme visto no Capítulo 2, o Fluxo Contínuo é um dos tipos de produção, também denominado Processo Contínuo. No Capítulo 3 é estudada a Dinâmica de Sistemas, que mostra a correlação entre as diversas variáveis em um sistema complexo. No Capítulo 4 são apresentados os conceitos de controle automático. Esses dois capítulos (3 e 4) formam a base conceitual para compreender os Processos Contínuos, que implementam um grande conjunto de malhas de controle para permitir o funcionamento de uma planta industrial.

AO TÉRMINO DESTES CAPÍTULOS VOCÊ VAI CONHECER:

- como os processos contínuos são controlados;
- a notação ISA para sistemas de automação;
- visão geral dos sistemas de instrumentação;
- tecnologias dos sistemas de instrumentação;
- o que são os sistemas supervisórios;
- o que são as salas de controle.

5.1 Miniglossário

Controlador. Instrumento que implementa a função de controle, estudada no Capítulo 4. Realiza a comparação da variável controlada com o ponto de ajuste (*set point*) e calcula a atuação a ser feita através dos algoritmos de controle tipo PID ou mais complexos [BEG2006].

Conversor. Instrumento que recebe um sinal de entrada pneumático ou eletrônico procedente de outro instrumento e faz a conversão para uma saída padrão [BEG2006].

Elemento final de controle. Dispositivo que recebe o sinal de correção do controlador e atua diretamente sobre a variável manipulada. Um exemplo é a válvula de controle [BEG2006].

Elemento primário. Elemento que está em contato direto com a variável controlada e que utiliza ou absorve energia do próprio meio para fornecer ao sistema de medição uma resposta em função da variável que está sendo controlada [BEG2006].

Instrumento cego. Instrumento que não possui indicação visível do valor da variável medida. Instrumentos de alarme como pressostatos e termostatos são instrumentos cegos. Os transmissores de vazão, pressão, nível e temperatura sem indicação local também são cegos [BEG2006].

Instrumento indicador. Instrumento que dispõe de indicador e escala graduada onde se pode ler o valor da variável controlada [BEG2006].

Instrumento registrador. Instrumento que registra os valores das variáveis controladas em papel ou outra mídia [BEG2006].

Transmissor. Instrumento que detecta variações na variável controlada através do elemento primário e transmite essa informação a distância. O elemento primário pode ou não fazer parte integrante do transmissor [BEG2006].

Variável controlada. Variável de processo que deve assumir um valor conhecido, normalmente determinado pelo ponto de ajuste.

Variável manipulada. Variável de processo cujo valor é alterado pelo sistema de controle.

5.2 Características do processo contínuo

Conforme já explicado no Capítulo 2, no processo contínuo as grandezas medidas e controladas são variáveis contínuas no tempo como, por exemplo, pressão, vazão e temperatura. A produção é medida em quantidades por unidade de tempo como, por exemplo, litros por minuto, megawatts (1Watt = 1joule/s) e toneladas por dia.

As operações são de ciclo longo, ou seja, uma vez colocado o processo em funcionamento, não mais se desliga o sistema, e a produção ocorre 24 horas por dia, 7 dias por semana sem interrupção. Os equipamentos possuem configurações específicas e, mesmo plantas iguais em locais diferentes possuem características únicas. Os operadores são profissionais de alta qualificação e demoram alguns anos para dominarem adequadamente o funcionamento da planta.

Alguns exemplos de plantas com essas características são as de geração e distribuição de energia elétrica, usina nuclear, captação, tratamento e distribuição de água, alto-forno (produção de ferro-gusa) e produção de petróleo e derivados. Observe que todas as grandezas controladas são funções contínuas no tempo.

5.3 Trocador de calor – Um exemplo

A título de exemplo, o trocador de calor pode ser utilizado como um bom caso de processo contínuo para ilustrar algumas características desse processo [BEG2006].

A Figura 5.1 ilustra um trocador de calor que tem por função aquecer um fluido que entra no reservatório por baixo e sai na parte superior. O vapor circula através de uma serpentina e transfere o calor para o fluido em aquecimento.

Nesse caso o **processo** é a troca de calor, que significa a adição de energia térmica ao fluido em aquecimento. A temperatura de saída do fluido é influenciada por diversos fatores, como temperatura ambiente, temperatura de entrada do fluido e da vazão do vapor.

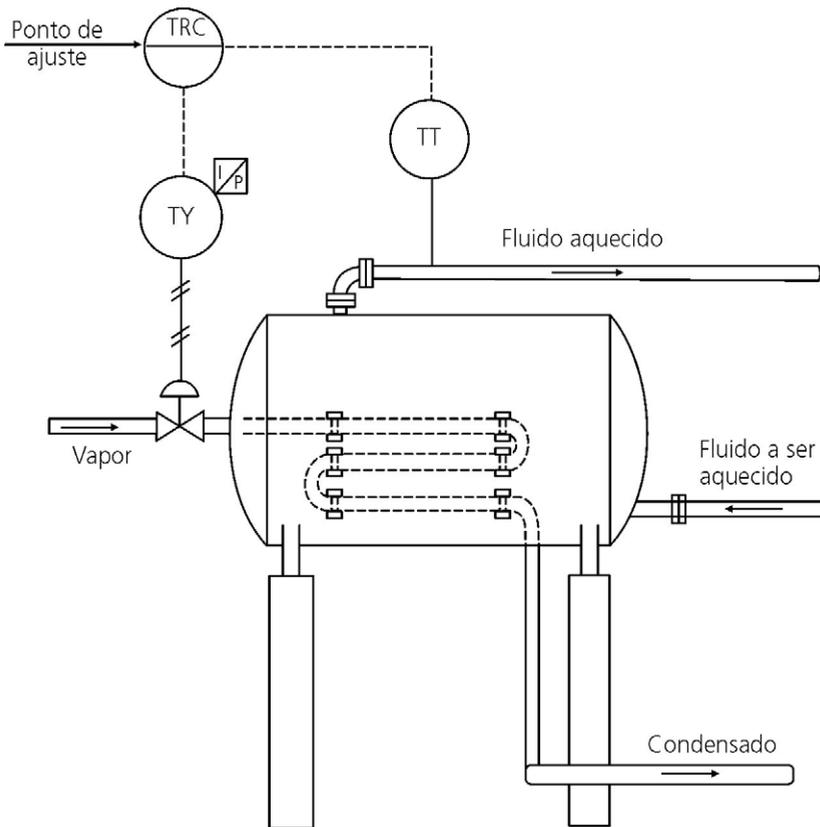


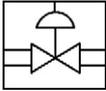
FIGURA 5.1 Automação de um Trocador de Calor (adaptado de [BEG2006]).

Todo sistema de automação possui uma **variável controlada** e uma ou mais **variáveis manipuladas**. Nesse exemplo a **variável controlada** é a temperatura de saída do fluido aquecido, e a **variável manipulada** é a vazão do vapor. Em outras palavras, pode-se controlar a temperatura do fluido através da vazão do vapor: mais vazão, mais temperatura e vice-versa.

Vale observar que o ponto de ajuste (*set point*) estabelece o valor que a **variável controlada** deve atingir. O sistema de controle tem por finalidade atuar para que a **variável controlada** atinja o valor do ponto de ajuste.

A simbologia utilizada na Figura 5.1 é a padronizada pela Norma S5.1 da ISA, a ser detalhada neste capítulo mais à frente. Observe que:

- A medição da temperatura é feita pelo elemento **TT** - transmissor de temperatura.
- A comparação do valor medido pelo **TT** com o ponto de ajuste e o comando de saída é realizado pelo elemento **TRC** - controlador de temperatura.
- O elemento **TY** é o relé que atua na válvula de controle com base no valor recebido pelo elemento controlador **TRC**.

O símbolo  identifica a válvula de controle propriamente dita.

Observe que todos os conceitos de controle estudados nos Capítulos 3 e 4 podem ser utilizados aqui, como por exemplo, o controle PID implementado no elemento TRC.

As demais características da simbologia são vistas a seguir.

5.4 Classificação de instrumentos

Nas instalações industriais, os sistemas de instrumentação formam arranjos bem complexos para supervisão e controle de um processo. Os instrumentos podem ser classificados segundo sua função [BEG2006], já definidas no Mini-glossário (Seção 5.1):

- Instrumentos cegos
- Instrumentos indicadores
- Instrumentos registradores
- Elementos primários
- Transmissores
- Conversores
- Controladores
- Elementos finais de controle

É importante lembrar que tais elementos, em um sistema de instrumentação, podem ser fisicamente equipamentos distintos ou ser incorporados em um módulo único. Nas tecnologias mais modernas, tais elementos podem ser virtuais, pois essas funções ainda existem, mas são implementadas em software.

5.5 Simbologia e nomenclatura para processos de automação

As normas de instrumentação estabelecem uma simbologia para os diversos tipos de dispositivos, visando codificar e identificar os elementos utilizados em diagramas e malhas de controle de projetos de instrumentação.

O propósito dos símbolos gráficos e das codificações estabelecidas pelas normas é permitir o estabelecimento de uma maneira uniforme para a representação de sistemas de instrumentação e facilitar a comunicação entre usuários, projetistas e fornecedores.

A simbologia mais utilizada mundialmente nessa área é a estabelecida na Norma S 5.1 da ISA – *The Instrumentation, Systems and Automation Society* [BEG2006; ISA1992; KUP2008]. Essa Norma pode ser aplicada para diagramas de sistemas de controle, ensino, descrições funcionais, documentação de

processos, diagramas de construção e especificações para ordens de compra (*purchase orders*). Infelizmente, a Norma brasileira NBR-8190 sobre simbologia de instrumentação, similar à S 5.1, foi cancelada por falta de atualização.

A Norma é adequada para uso sempre que qualquer referência a um instrumento ou a uma função de um sistema de controle for necessária. Destina-se a fornecer informações suficientes para permitir que qualquer pessoa, ao analisar os diagramas, possa entender como funciona e foi concebido o sistema de automação. Todas as informações do processo são registradas em um fluxograma que indica os principais equipamentos que compõem esse processo e todas suas interligações e particularidades. O fluxograma é uma representação esquemática, sem escala, e representa o funcionamento sequencial de um processo de manufatura [ROD2009].

5.5.1 Codificação da nomenclatura

A padronização ISA considera que cada instrumento ou função programada será identificado por um conjunto de letras e um conjunto de algarismos, apresentados no Quadro 5.1 [BEG2006]. A codificação ilustrada na Figura 5.2 indica que a variável medida é pressão (P), o elemento é um transmissor (T) que pertence à área 1 na malha de controle 02.

Quadro 5.1 Letras de identificação de instrumentos. Adaptado de [SIL2008; ISA1992]

	PRIMEIRA LETRA		LETRAS SUBSEQUENTES		
	Variável medida ou inicial (3)	Modificadora	Função de informação ou passiva	Função final	Modificadora
A	Analizador (4)	–	Alarme	–	–
B	Chama de queimador	–	Indefinida	Indefinida (1)	Indefinida (1)
C	Condutividade elétrica	–	–	Controlador (12)	–
D	Densidade ou massa específica	Diferencial (3)	–	–	–
E	Tensão elétrica	–	Elemento primário	–	–
F	Vazão	Razão (fração) (3)	–	–	–
G	Medida dimensional	–	Visor (8)	–	–
H	Comando manual	–	–	–	Alto (6, 14, 15)
I	Corrente elétrica	–	Indicador (9)	–	–
J	Potência	Varredura ou Seletor (6)	–	–	–
K	Tempo, Tempo Programado	Taxa de Mudança de tempo (4,16)	–	Estação de Controle (17)	–
L	Nível	–	Lâmpada Piloto (10)	–	Baixo (6, 14, 15)

Quadro 5.1 Letras de identificação de instrumentos. Adaptado de [SIL2008; ISA1992] (cont.)

PRIMEIRA LETRA		LETRAS SUBSEQUENTES			
Variável medida ou inicial (3)	Modificadora	Função de informação ou passiva	Função final	Modificadora	
M	Umidade	–	–	–	Médio ou intermediário
N (1)	Indefinida	–	Indefinida (1)	Indefinida (1)	(6, 14)
O	Indefinida (1)	–	Orifício de restrição	–	Indefinida (1)
P	Pressão ou vácuo	–	Ponto de teste	–	–
Q	Quantidade ou evento	Integrador ou totalizados (3)	–	–	–
R	Radioatividade	–	Registrador ou impressor	–	–
S	Velocidade ou frequência	Segurança (7)	–	Chave (12)	–
T	Temperatura	–	–	Transmissor	–
U	Multivariável (5)	–	* Multifunção (11)	* Multifunção (11)	* Multifunção (11)
V	Viscosidade	–	–	Válvula (12)	–
W	Peso ou força	–	Poço	–	–
X (2)	Não classificada	Diferencial (3)	Não classificada	Não classificada	Não classificada
Y	Indefinida (1)	–	–	Relé ou computação (11,13)	–
Z	Posição	Razão (fração) (3)	–	Elemento final de controle não classificado	–

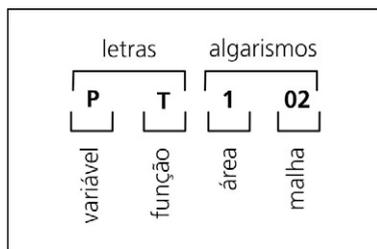


FIGURA 5.2 Padrão de Identificação.

Retornando à [Figura 5.1](#) pode-se identificar a origem dos códigos:

- **TT:** T = temperatura; T = transmissor;
- **TY:** T = temperatura; Y = relé;
- **TRC:** T = temperatura; R = registrador; C = controlador.

Observação: Os números entre parênteses se referem às notas relativas que são dadas a seguir (adaptado de [SIL2008; ISA1992]).

Notas:

1. As letras indicadas como *indefinidas* são utilizadas para indicação de variáveis não listadas e podem ser utilizadas em um projeto particular. O significado precisará ser definido apenas uma vez na legenda do fluxograma.
2. A letra indicada como *não classificada*, **X**, é utilizada para indicar variáveis que serão usadas apenas uma vez ou possuem uso limitado.
3. As *letras modificadoras* (segunda coluna), quando usadas em conjunto com a *primeira letra*, são tratadas como se fossem uma entidade *primeira letra* única. Assim, as letras **D** (D = diferencial), **F** (F = razão) ou **Q** (Q = totalização ou integração) em conjunto com a *primeira letra*, funcionam como se fosse apenas uma letra. Por exemplo, **TDI** é lido como **T** = temperatura, **D** = diferencial e **I** = indicador, ou seja, indicador diferencial de temperatura, enquanto **TI** é um indicador de temperatura.
4. A *primeira letra* **A** para análise deve cobrir todas as análises não listadas no [Quadro 5.1](#) e não cobertas pelas letras *indefinidas*. Cada tipo de análise deve ser identificada fora do círculo no fluxograma. Não é recomendado deixar de utilizar a letra **A** mesmo quando substituem símbolos tradicionais como pH, CO e O₂.
5. No caso de multivariáveis é opcional o uso de **U** no lugar de uma combinação de *primeira letra*.
6. É recomendado o uso dos termos modificadores *alto*, *baixo*, *médio*, mas não é obrigatório.
7. O termo **segurança** (*safety* em inglês) se aplica apenas a elementos primários de proteção de urgência e emergência e elementos de proteção de controle final. Assim, uma válvula auto-operada que impede a operação de um sistema com uma pressão acima de um valor estabelecido através do alívio da pressão é definida como retropressão tipo **PVC**: **P** = pressão, **V** = válvula e **C** = controlador mesmo que não opere continuamente. No entanto, essa válvula deverá ser designada **PSV** quando se destina a proteger em condições de emergência, ou seja, condições que colocam em risco pessoal, equipamentos ou ambos.
8. A função passiva **G visor** aplica-se a instrumentos ou dispositivos que oferecem uma visão direta não calibrada do processo, como janelas de vidro ou monitores de TV.
9. O termo *indicador* é normalmente aplicável ao leitor de uma variável medida (analógica ou digital) do processo. Um ajuste manual não deve ser designado como *indicador*.
10. Uma *lâmpada-piloto*, que é a parte de uma malha de instrumentos, deve ser designada por uma *primeira letra* seguida pela *letra*

subsequente L. Por exemplo, uma lâmpada piloto que indica o estouro de tempo deve ser designada como **KQL**: **K** = tempo programado, **Q** = totalizado, **L** = lâmpada piloto. Entretanto, se é desejado identificar uma *lâmpada-piloto* que não é parte de uma malha de instrumentos, a *lâmpada-piloto* pode ser designada da mesma maneira ou alternadamente por uma simples letra **L**. Por exemplo: a lâmpada que indica a operação de um motor elétrico pode ser designada com **EL**: **E** = tensão elétrica e **L** = lâmpada-piloto, assumindo que a tensão é uma variável medida, ou **YL**: **Y** = não definida e **L** = lâmpada-piloto assumindo que o status de operação está sendo monitorado.

11. O uso da *letra subsequente U* para *multifunção* no lugar de uma combinação de outras letras funcionais é opcional.
12. Um dispositivo que conecta, desconecta ou transfere um ou mais circuitos pode ser, dependendo das aplicações, uma “chave”, um “relé”, um “controlador de duas posições”, ou uma “válvula de controle”. Se o dispositivo manipula o fluxo de um fluido do processo e não é uma válvula de bloqueio comum atuada manualmente, deve ser designada como uma *válvula de controle*. É incorreto o uso das *letras subsequentes CV* para qualquer aplicação diferente de uma válvula de controle autoatuada (**C** = controlador; **V** = válvula). Para todas as outras aplicações o equipamento é designado como:
 - uma *chave*, quando atuada manualmente;
 - uma *chave* ou um *controlador de duas posições*, se é automático e se é atuado pela variável medida. O termo *chave* é geralmente atribuído ao dispositivo que é usado para acionar um circuito de alarme, lâmpada piloto, seleção, intertravamento ou segurança;
 - um *controlador*, geralmente atribuído ao equipamento que é usado para operação de controle normal;
 - um *relé*, se é automático e não atuado pela variável medida, isto é, ele é atuado por uma *chave* ou por um *controlador de duas posições*.
13. É esperado que as funções associadas à utilização de letra subsequente **Y** sejam definidas fora do círculo de identificação. Essa definição não precisa ser feita quando a função é evidente, como uma válvula solenoide em uma linha de fluido.
14. O uso dos termos modificadores *alto*, *baixo*, *médio* ou *intermediário* deve corresponder a valores das variáveis medidas e não dos sinais, a menos que de outra maneira seja especificado. Por exemplo: um alarme de nível alto derivado de um transmissor de nível de ação reversa é um **LAH**: **L** = nível, **A** = alarme e **H** = alto, embora o alarme seja atuado quando o sinal alcança um determinado valor baixo. Os termos podem ser usados em combinações apropriadas.
15. Os termos *alto* e *baixo*, quando aplicados para designar a posição de válvulas, são definidos como: *alto* – denota que a válvula está em ou

aproxima-se da posição totalmente aberta; *baixo* – denota que a válvula está em ou aproxima-se da posição totalmente fechada.

16. A letra modificadora **K**, em combinação com uma primeira-letra como **L**, **T** ou **W**, significa uma mudança de taxa no tempo da variável medida ou da variável inicial. A variável **WKIC**, por exemplo, deve representar um controlador indicador de taxa de perda de peso.
17. A letra subsequente **K** é uma opção do usuário para designar estações de controle, enquanto a letra subsequente **C** é usada para descrever controladores automáticos ou manuais.

O [Quadro 5.2](#) apresenta alguns exemplos dos indicadores mais comuns [ROD2009].

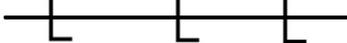
Quadro 5.2 Exemplos de indicadores mais comuns [ROD2009]

Indicadores	
TI	indicador de temperatura
LI	indicador de nível
SI	indicador de velocidade
MI	indicador de umidade
AI	indicador de condutividade, ou pH, ou O ₂ , etc.
VI	indicador de viscosidade
TIC	indicador controlador de temperatura
LIC	indicador controlador de nível
FIC	indicador controlador de vazão
JIC	indicador controlador de potência
SIC	indicador controlador de velocidade
BIC	indicador controlador de queima ou combustão
LAH	alarme de nível alto: nesse caso a letra A define a função de informação
TAH	alarme de temperatura alta
SAL	alarme de velocidade baixa
WAL	alarme de peso baixo
HV	válvula de controle manual: a letra V indica a função final, e a letra H indica a variável inicial. Note que nesse caso a válvula não é proporcional
LV	válvula de nível: geralmente esta notação determina que se trata de uma válvula de controle proporcional
LCV	válvula de controle de nível auto-operada: nesse exemplo a letra C pode estar indicando que a válvula é auto-operada

5.5.2 Simbologia para as conexões

As linhas de conexão entre os elementos do sistema possuem diferentes traçados com diferentes significados, conforme o [Quadro 5.3](#) [ROD2009].

Quadro 5.3 Traçado das conexões entre os elementos (adaptado de [ROD2009])

	Descrição	Representação
1	Conexão do processo, ligação mecânica ou suprimento ao instrumento	
2	Sinal pneumático ou sinal indefinido para diagramas de processo	
3	Sinal elétrico	
4	Tubo capilar (sistema cheio)	
5	Sinal hidráulico	
6	Sinal eletromagnético ou sônico (sem fios)	
7	Sinal de software	

Novamente, reportando-se à [Figura 5.1](#), pode-se identificar que a linha cheia é a conexão direta com o processo para medir a temperatura, entre TT e TRC, e entre TRC e TY as conexões são feitas através de sinal elétrico, e a conexão do controlador da válvula TY com a válvula é pneumática.

5.5.3 Simbologia para os instrumentos

O formato dos instrumentos também possui significado específico conforme ilustrado no [Quadro 5.4](#) [ROD2009]. Apenas observando o símbolo do instrumento, pode-se saber sua localização, se está na sala de controle, no campo e se o operador tem acesso ou não.

Quadro 5.4 Símbolos dos instrumentos (adaptado de [ROD2009])

	Instrumentos	Painel principal acessível ao operador	Montado no campo	Painel auxiliar acessível ao operador	Painel auxiliar fora do alcance do operador
1	Instrumentos discretos				
2	Instrumentos compartilhados				
3	Computador de processo				
4	Controlador lógico programável				

Reportando-se à [Figura 5.1](#), pode-se observar que o controlador TRC está na sala de controle, e os elementos TY e TT estão no campo.

5.5.4 Funções e seus Símbolos

As funções desempenhadas pelos elementos utilizam os símbolos representados no [Quadro 5.5](#). São funções que atuam dinamicamente no tempo com as variáveis do processo como cálculo de média, soma, controle proporcional, derivativo, entre outros.

Quadro 5.5 Funções e símbolos adaptado de [\[ROD2009\]](#)

Símbolo	Sunção	Símbolo	Função
Σ ou +	Soma	X	Multiplicação
Σ/X	Média	\div	Divisão
Δ ou -	Subtração		Extração de raiz quadrada
K ou P	Proporcional	$\sqrt[n]{\quad}$	Extração de raiz
\int ou I	Integral	X^n	Exponenciação
d/dt ou D	Derivativo	F(x)	Função não linear
>	Seletor de sinal alto		Limite superior
<	Seletor de sinal baixo		Limite inferior
\pm	Polarização		Limitador de sinal
f(t)	Função tempo	n/n	Conversão de sinal

Na [Figura 5.1](#) pode-se observar que para o relé TY há o conversor de sinal de corrente (I) para pressão (P).

5.5.5 Simbologia de outros elementos

A relação completa de símbolos é muito grande e aqui serão ilustrados apenas alguns símbolos, conforme apresentado no [Quadro 5.6 \[ROD2009\]](#).

Quadro 5.6 Simbologia de outros elementos adaptado de [ROD2009]

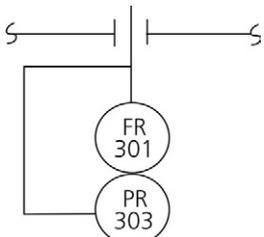
Número	Descrição	Símbolo
1	Placa de orifício	
2	Medidor venturo	
3	Tubo pitot	
4	Válvula com atuador pneumático de diafragma	
5	Válvula com atuador elétrico	
6	Válvula com atuador hidráulico ou pneumático tipo pistão	
7	Válvula manual	
8	Válvula auto operada de diafragma	

Para um estudo mais aprofundado, é sugerido o uso direto da Norma ISA 5.1 [ISA1992].

5.5.6 Alguns arranjos típicos de Instrumentos

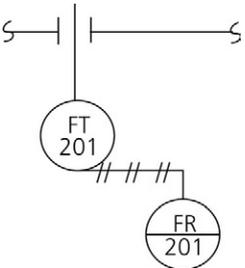
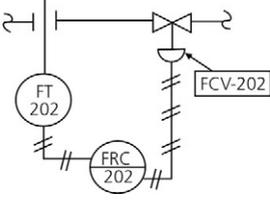
A seguir são apresentados exemplos de alguns arranjos típicos para as principais variáveis utilizadas nos processos contínuos: vazão, pressão, temperatura e nível [ROD2009].

Quadro 5.7 Símbolos de vazão

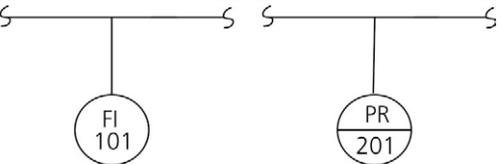
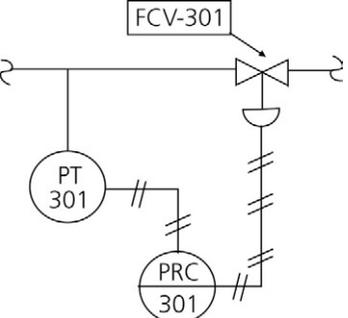
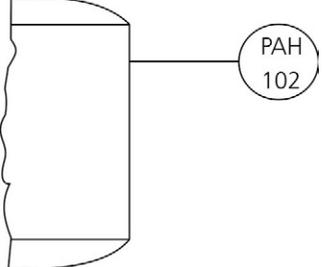
1		Medidor de linha (rotâmetro).
2		Placa de orifício para medir vazão. Registrador de campo para medir a vazão (FR) e registrador de pressão (PR).

(Continua)

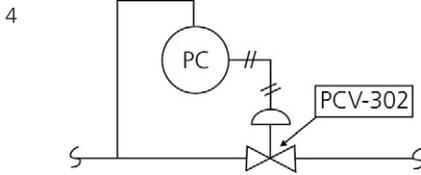
Quadro 5.7 Símbolos de vazão (cont.)

3		<p>Placa de orifício para medir a vazão. Transmissor no campo (FT) com transmissão pneumática. Registrador montado no painel (FR).</p>
4		<p>Placa de orifício para medir a vazão. Transmissor no campo (FT) conectado a um controlador e registrador (FRC) através de comando pneumático. O controlador (FRC) comanda, através de sinal pneumático, uma válvula com atuador pneumático de diafragma (FCV).</p>

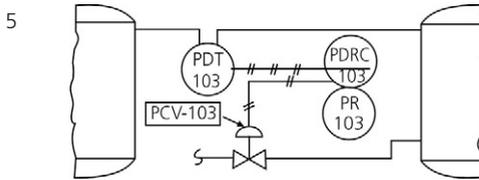
Quadro 5.8 Símbolos de pressão

1		<p><i>Esquerda:</i> Indicador de pressão em montagem de campo (manômetro). <i>Direita:</i> Registrador de pressão no painel.</p>
2		<p>Transmissor de pressão (PT) por meio pneumático para um registrador-controlador de pressão (PRC). Este, por sua vez, comanda uma válvula de controle (PCV) com transmissão pneumática.</p>
3		<p>Alarme de pressão alta montada em campo.</p>

Quadro 5.8 Símbolos de pressão (cont.)

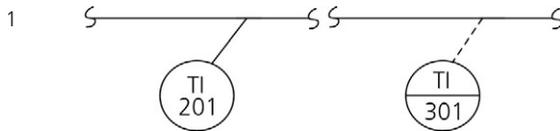


Controlador de pressão (PC) tipo cego comandando válvula de controle (PCV) com transmissão pneumática.

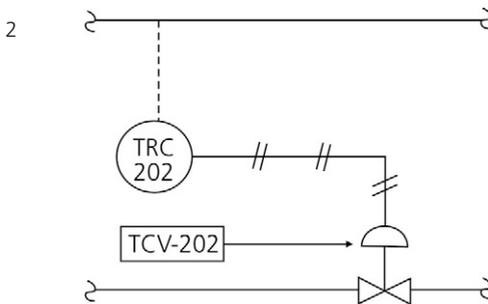


Medição diferencial de pressão (PDT).
Instrumento combinado de registro e controle de nível (PDRC) comandando válvula de controle (PCV) com transmissão pneumática.
Instrumento de painel com registrador de pressão (PR).

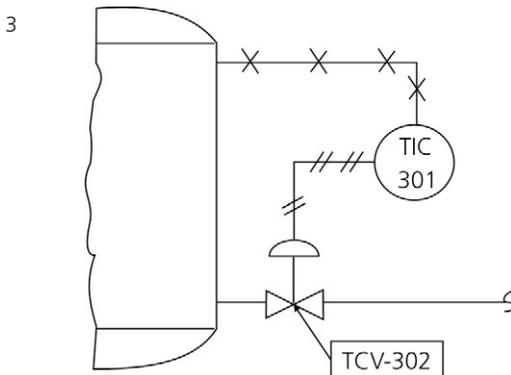
Quadro 5.9 Símbolos de temperatura



Esquerda: indicador de temperatura de campo.
Direita: indicador de temperatura de painel com transmissão elétrica.



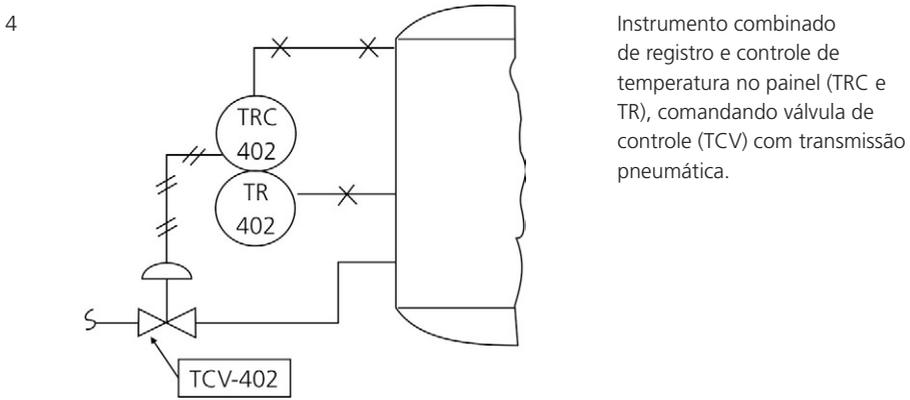
Registrador controlador de temperatura no painel (TRC) no painel (com transmissão elétrica) comandando válvula de controle com transmissão pneumática (TCV).



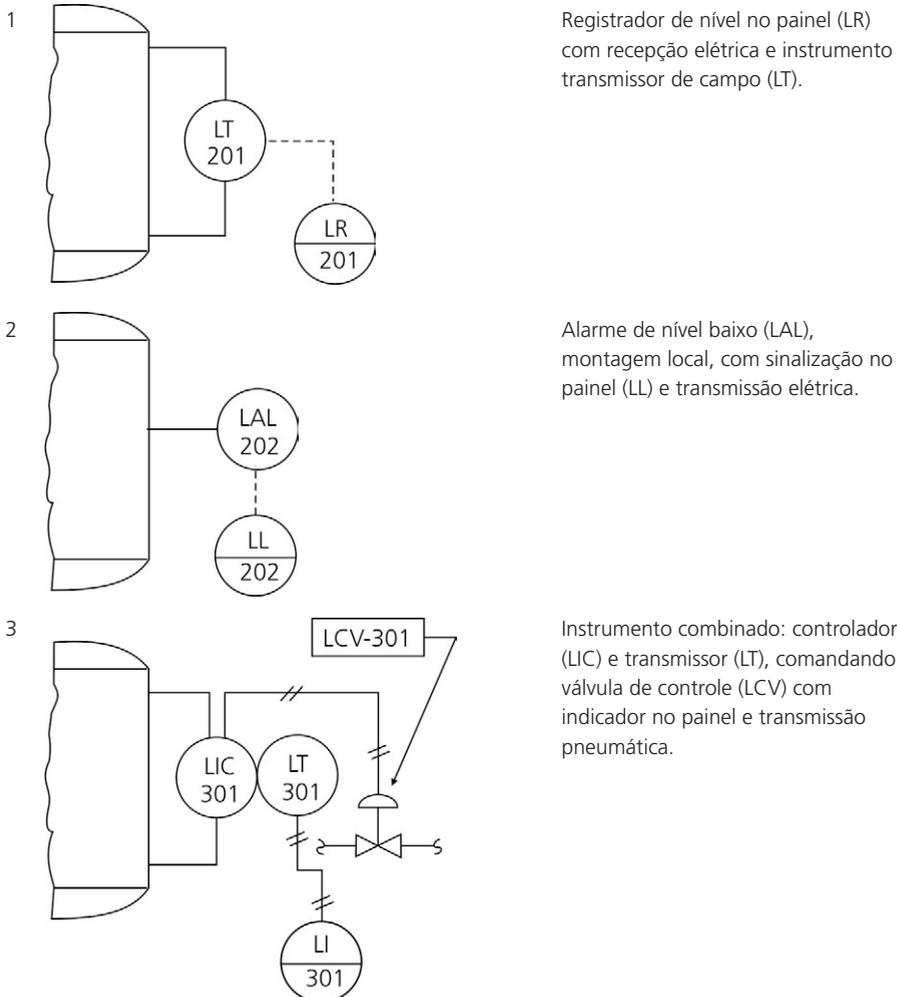
Controlador-indicador de temperatura (TIC) tipo expansão comandando válvula de controle (TCV) com transmissão pneumática.

(Continua)

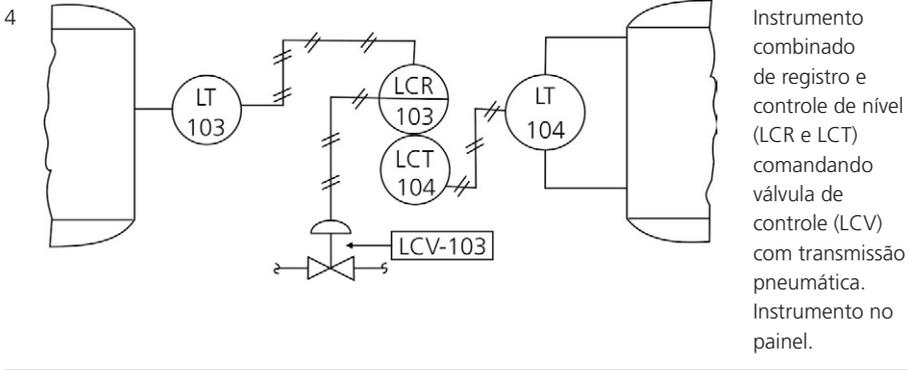
Quadro 5.9 Símbolos de temperatura (cont.)



Quadro 5.10 Símbolos de nível



Quadro 5.10 Símbolos de nível (cont.)



5.6 Sistema de instrumentação

Os sistemas de instrumentação compõem todos os equipamentos necessários para realizar a tarefa de automação do processo sob controle. Processos industriais possuem um alto número de variáveis que precisam ser medidas e controladas e, por essa razão, são sistemas complexos conforme ilustrado na [Figura 5.3](#).

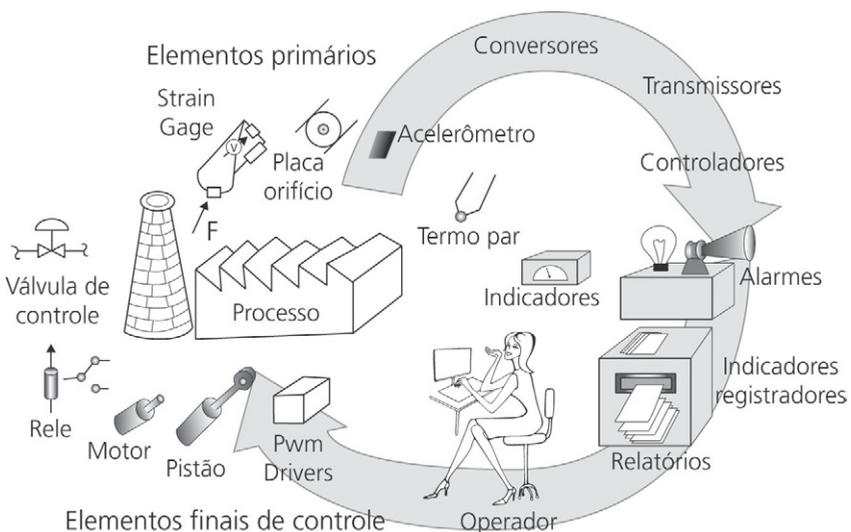


FIGURA 5.3 Sistema de instrumentação.

A [Figura 5.4](#) mostra os elementos do sistema de instrumentação.

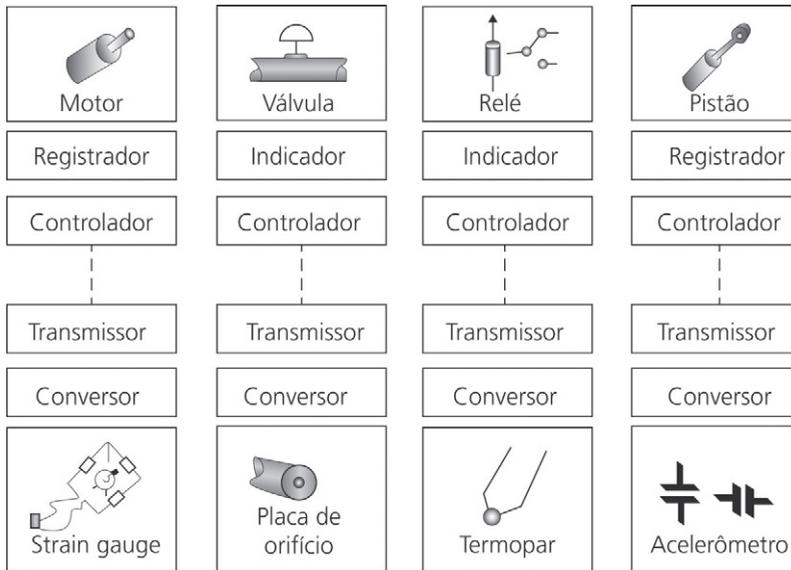


FIGURA 5.4 Elementos de um Sistema de Instrumentação.

Os itens representados como “Strain Gage”, “Placa de Orifício”, “Acelerômetro” e “Termopar” são os **elementos primários**, e realizam as medidas das grandezas do processo, também denominados transdutores. Esses elementos serão estudados no próximo capítulo.

Junto aos transdutores há os **conversores** ([Seção 5.4](#)) que transformam os sinais em valores padronizados. Assim, independente da grandeza a ser medida, os sinais são transmitidos sempre na mesma faixa de valores como um “loop de corrente” de 4 a 20 mA. Por exemplo, a transmissão de uma medida de pressão de 100 a 500 bar transmite o valor 100 bar com uma corrente de 4 mA e o valor 500 bar com uma corrente de 20 mA. Sistemas de automação com tecnologia pneumática possuem um valor padronizado de pressão de 0,2 a 1 kgf/cm². Uma vez convertidos os sinais para os valores padronizados, há a necessidade de fazer a transmissão da medida para a sala de controle: são os **transmissores** ([Seção 5.4](#)), que englobam a cabeção de campo a ser instalada ao longo do processo. Essa cabeção normalmente é cara, pois podem passar por locais inóspitos e precisam de proteção mecânica, ou estão sujeitos a interferências de sinais e precisam de blindagem, enfim, há a necessidade de estudar com cuidado o tipo de cabo e seu encaminhamento para ficar protegido contra acidentes e, principalmente, é preciso ter muito bem documentada sua instalação para facilitar a manutenção posterior.

Todas essas informações convergem para a Sala de Controle, onde é realizado o processamento dos sinais recebidos do campo. Normalmente na sala

de controle estão localizados os instrumentos **indicadores** e **registradores** (Seção 5.4), os quais apresentam os valores das variáveis do processo aos profissionais que fazem a supervisão do processo, alarmes sonoros e visuais, de modo a indicarem anomalias de funcionamento.

Os **controladores** (Seção 5.4) que realizam as funções das malhas de controle podem estar na Sala de Controle ou em alguns casos localizadas em campo.

Finalmente há os **elementos finais de controle** (Seção 5.4) que enviam para os dispositivos de campo informações que interferem no processo, por exemplo, relés para ligar ou desligar dispositivos, válvulas de controle, inversores para acionamento de motores e pistões para acionamento mecânico.

5.6.1 Arquitetura da instrumentação

A definição da arquitetura de um sistema de instrumentação deve levar em consideração diversos aspectos de forma a garantir um sistema de automação eficaz que permita um bom controle sobre processo, otimização, melhoria da eficiência, redução de custo, melhoria da qualidade do produto e conformidade com a legislação [SAM2007].

Isso significa prever e prevenir mau funcionamento dos equipamentos, reduzir custos de manutenção, prevenir deterioração dos equipamentos e aumentar a segurança dos ativos. O sistema deverá atender a mudanças sazonais ou volatilidades do mercado de forma a permitir flexibilidade do sistema para suportar alterações e definir o que produzir, quando e com qual volume [SAM2007].

Os sistemas de instrumentação devem ser projetados de tal forma a atender os requisitos de confiabilidade, segurança, tempo real, apresentar facilidade de manutenção e permitir escalabilidade [SAM2007].

Confiabilidade – é inevitável a ocorrência de falhas nos componentes de um sistema de automação, como sensores, transmissores, *displays*, painéis, entre outros. Isso significa que há a necessidade de intervenções de manutenção para substituir esses componentes em falha, e essas falhas não deverão interferir na operação do processo sob controle. Em grande parte, isso é devido às características de confiabilidade que foram definidas na arquitetura do sistema de automação.

Segurança – no caso de ocorrência de falhas, o sistema deve sempre evoluir para um estado seguro, ou seja, sem realizar nenhum tipo de degeneração do processo nem provocar nenhum acidente que possa prejudicar os operadores ou as pessoas e ao ambiente de uma forma geral. Isso significa também cuidados a serem tomados na arquitetura do sistema de automação. Vale lembrar que, em processos industriais, desligar equipamentos não é o estado mais seguro e isso exige um conhecimento profundo do comportamento do processo para garantir, no caso de falhas, qual deve ser a sequência correta para o sistema evoluir para um estado seguro [SAM2007].

Propriedades de tempo real - uma característica muito importante dos sistemas de automação é a necessidade de tempo real para o controle de um processo industrial. O sistema de automação é necessário para controlar e supervisionar o processo com precisão e de forma adequada. Há duas características importantes referentes aos sistemas de tempo real: latência e *jitter*.

A latência refere-se aos atrasos ponta a ponta associados à comunicação, computação e atuação do sistema. Há uma variedade muito grande de processos, e cada um deles possui tempos intrínsecos que vão exigir mais ou menos latência dos sistemas de automação. Um processo térmico, por exemplo, normalmente é lento, e os tempos envolvidos podem ser da ordem de minutos a horas e, portanto, o tempo de latência de um sistema de automação é desprezível perante esse tipo de processo. Por outro lado, um processo de supervisão e controle de uma subestação que envolve ações nos casos de anomalias de funcionamento do sistema elétrico exige tempos de latência bem menores, normalmente relacionados com um ou dois ciclos de rede (na rede de 60 Hz significa cerca de 20 a 30 ms) [SAM2007].

O *jitter* corresponde a variações aleatórias do tempo de latência, fato que leva o sistema de automação a possuir variações nas respostas do sistema. Isso pode ser perigoso quando os tempos de latência são críticos [SAM2007].

Facilidade de manutenção e migração – os processos contínuos operam durante décadas, o que leva à necessidade de manutenção ou migração dos componentes dos sistemas de instrumentação e automação.

Portanto, um requisito para os sistemas de automação e instrumentação é a necessidade de manutenção do sistema em operação: adição ou troca de sensores e atuadores, atualização de software de otimização, ajustes de malhas de controle (*tunning*), alterações de esquemas de alarmes. Crescimento e atualização do sistema em tempo real normalmente são feitos em partes redundantes do sistema fazendo a migração efetiva após todos os testes nos componentes redundantes [SAM2007].

Escalabilidade – os sistemas de instrumentação possuem uma grande variedade de soluções possíveis de arquitetura, e o fator escalabilidade é muito importante ser considerado. Por essa razão, é fundamental que o sistema seja projetado considerando no projeto inicial a capacidade máxima para assegurar que as características de desempenho sejam mantidas até o final [SAM2007].

5.6.2 Tecnologias da instrumentação

As funções dos sistemas de instrumentação podem ser implementadas utilizando diversas tecnologias. A instrumentação pneumática é a mais antiga, e existe desde o final do século XIX. A segunda geração foi a instrumentação eletrônica analógica, e a terceira, a instrumentação eletrônica digital.

5.6.3 Tecnologia pneumática

A tecnologia pneumática utiliza um gás comprimido, cuja pressão é alterada conforme o valor da grandeza medida. Nesse caso a variação da pressão do gás é manipulada linearmente em uma faixa específica, padronizada internacionalmente, para representar a variação de uma grandeza desde seu limite inferior até seu limite superior. Esse valor é padronizado na faixa de pressão de ar de 0,2 a 1 kgf/cm² (equivalente a 3 ~ 15 PSI no sistema inglês) como elemento de comunicação entre seus elementos [MOR2007].

Esse tipo de instrumentação pode ser utilizado com segurança em áreas onde existe risco de explosão. As desvantagens são:

- necessidade de tubulação de gás comprimido (ar ou outro) para sua operação;
- risco de vazamento desse gás;
- necessidade de condicionamento de ar seco e sem partículas;
- tempo de latência alto permitindo uso até cerca de 100m [MOR2007].

Uma variante do sistema pneumático é o hidráulico, que utiliza óleos hidráulicos como meio de transmissão de sinal. É utilizado especialmente em aplicações em que é necessário torque elevado ou quando o processo envolve pressões elevadas. As vantagens dessa tecnologia são:

- possibilidade de gerar grandes forças para acionamento;
- tempo de latência bem menor possibilitando resposta rápida.

As desvantagens são:

- necessidade de tubulação de óleo;
- inspeção periódica em virtude de risco de vazamentos;
- necessidade de equipamentos auxiliares como reservatórios, bombas e filtros [MOR2005].

Atualmente a instrumentação pneumática é utilizada em ambientes que apresentam risco de explosão e também nos elementos finais de controle por permitir a transformação em movimentos mecânicos de acionamento. A hidráulica é utilizada principalmente para acionamento.

5.6.4 Tecnologia eletrônica analógica

A instrumentação eletrônica analógica utiliza sinais elétricos de corrente ou tensão para fazer a transmissão do valor da grandeza medida. Nesse caso a variação da corrente ou tensão é manipulada em uma faixa específica, padronizada internacionalmente, para representar a variação de uma grandeza desde seu limite inferior até seu limite superior. Conforme já explicado anteriormente, o padrão mais comum é o “loop de corrente” na faixa 4 a 20 mA, mas também é usado o padrão 0 a 20 mA. Uma grandeza como vazão, com uma faixa de

valores de 0 a 25 litros por segundo, padroniza a saída 0 l/s em 4 mA e 25 l/s em 20 mA. O “loop de corrente” é um circuito analógico no qual circula permanentemente uma corrente nesta faixa de 4 a 20 mA. Uma vantagem desse padrão em relação ao padrão (mais antigo) de 0 a 20 mA é a segurança, pois uma interrupção da corrente no primeiro (0 mA) significa valor fora da faixa e pode ser identificado como falha, e no segundo caso o valor 0 mA é válido e é mais difícil de ser identificada a falha.

A instrumentação eletrônica analógica possui as seguintes vantagens [BOJ2005]:

- permite a transmissão para longas distâncias praticamente sem perdas;
- a alimentação dos circuitos pode ser feita através dos próprios fios que conduzem o sinal de transmissão;
- permite fácil conexão a computadores (sinal de corrente);
- é de fácil instalação;
- permite de forma fácil a realização de operações matemáticas;
- permite que o mesmo sinal (4 a 20 mA) seja lido por mais de um instrumento, ligando em série os instrumentos (limitado pela resistência interna).

As desvantagens dessa tecnologia são [BOJ2005]:

- exige no mínimo um par de fios para cada instrumento;
- áreas de risco exigem instrumentos e cuidados especiais;
- devem ser tomados cuidados especiais no encaminhamento de cabos;
- os cabos de sinais devem ser protegidos contra ruídos elétricos;
- para cada função deve existir um circuito específico (hardware).

A instrumentação analógica possui como característica principal circuitos eletrônicos analógicos para tratar os sinais, por exemplo, amplificadores, linearizadores, transmissores e controladores. Nesse caso, para cada função existe um circuito eletrônico que realiza cada uma dessas funções:

- **amplificadores** – realizam a tarefa de amplificar os sinais para faixas de valores adequadas para tratamento. Por exemplo, um termopar mede sinais na faixa de 2 a 10 mV, e esses sinais precisam ser amplificados para uma faixa da ordem de 3 a 5 Volts. Um circuito com essa função é relativamente complexo, pois há ruído e variações com temperatura que atrapalham o bom funcionamento.
- **linearizadores** – são circuitos que transformam as respostas não lineares (diversos tipos de curvas de resposta como parabólica e exponencial) em respostas lineares para poderem ser trabalhadas nos sistema de automação ou apresentadas nos indicadores. A título de exemplo de necessidade de linearização, a Figura 5.5 mostra a curva característica de termopares de diversos tipos estabelecendo a correspondência entre a tensão lida nos terminais e a temperatura medida [NOR1969]. Alguns

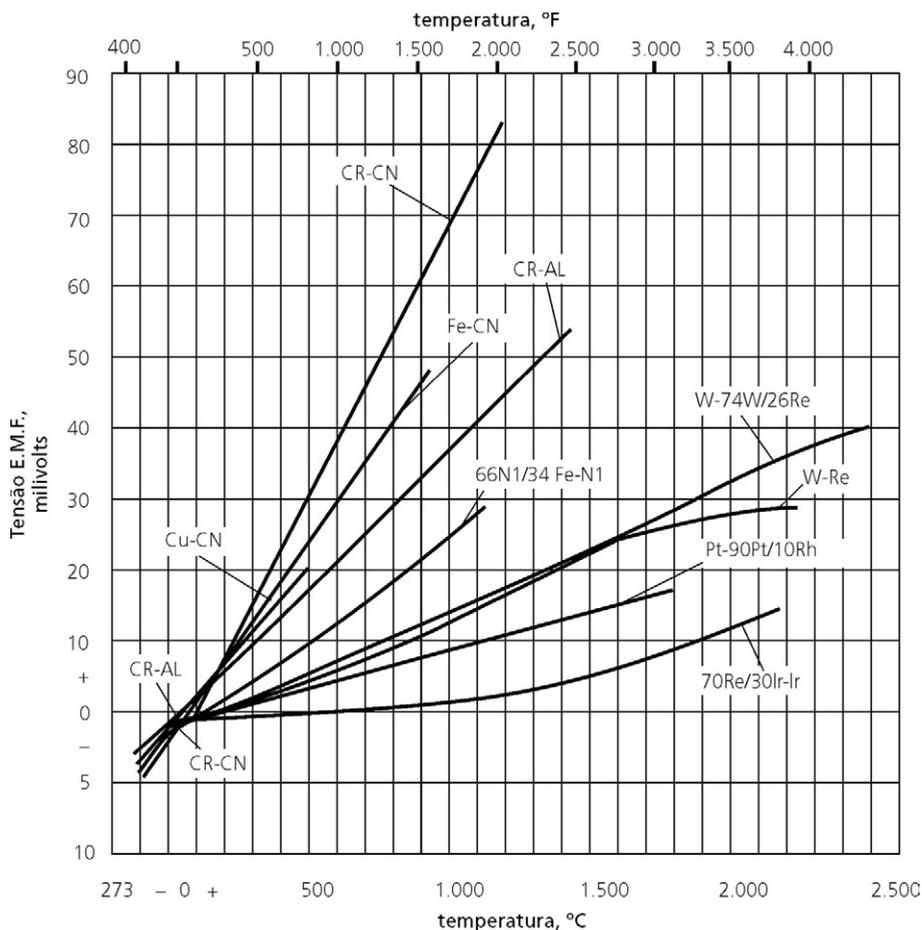


FIGURA 5.5 Curvas não lineares de termopares – adaptado de [NOR1969].

termopares apresentam curvas não lineares, como o 70Re/30Ir-Ir.

Torna-se necessário que o amplificador tenha uma curva característica ao contrário do termopar para que o resultado dessa amplificação tenha uma correspondência linear entre o valor lido e a saída para facilitar a leitura e o tratamento dos dados. Observe também que cada tipo de termopar vai precisar de um linearizador diferente.

- **transmissores** – são circuitos que recebem os sinais dos elementos primários em diversas formas e convertem a faixa de funcionamento nos sinais padronizados de corrente (4 a 20 mA).
- **controladores** – são os circuitos que realizam as funções das malhas de controle: recebem o sinal de campo, comparam com o ponto de ajuste (*set point*) e, conforme a configuração de circuito, realizam a saída PID, como ilustrado na Figura 5.6 [OGA2003]. Nesse circuito, o sinal de erro (saída da comparação) é injetado na entrada $E_i(s)$. A função de

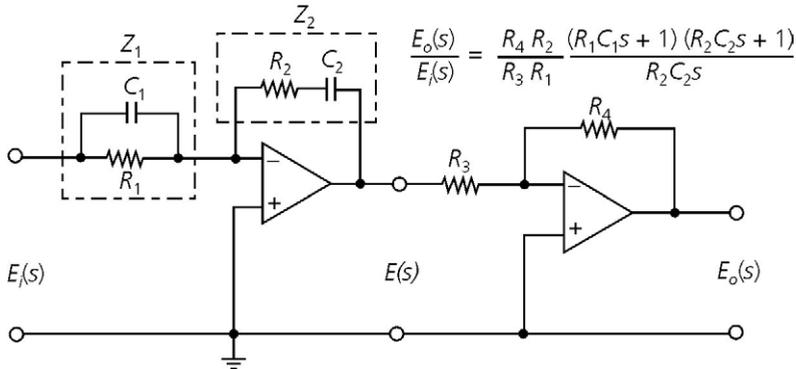


FIGURA 5.6 Controlador PID com amplificadores operacionais - adaptado de [OGA2003].

amplificação realiza o controle proporcional (R_4/R_3), a função integral é realizada com um capacitor na malha de ganho do amplificador (R_2-C_2), e a função derivada é realizada na entrada do sinal do amplificador (R_1-C_1). O controlador PID foi visto nos Capítulos 3 (Seção 3.10) e 4 (Seção 4.4).

Atualmente a instrumentação analógica é utilizada em pequenos sistemas de automação, mas ainda existe um grande parque instalado usando essa tecnologia.

5.6.5 Tecnologia eletrônica digital

A instrumentação eletrônica digital utiliza sinais digitais para fazer o tratamento das grandezas do processo. A instrumentação eletrônica digital substituiu com vantagens a geração analógica. A maior parte dos sistemas novos é digital.

A instrumentação eletrônica digital possui as seguintes vantagens [MOR2005]:

- Não necessita ligação ponto a ponto por instrumento.
- Pode utilizar um par trançado ou fibra óptica para transmissão dos dados.
- Alta imunidade a ruídos externos.
- Permite configuração, diagnósticos de falha e ajuste em qualquer ponto da malha.
- Menor custo final.

As desvantagens dessa tecnologia são [MOR2005]:

- Existência de vários protocolos no mercado, o que dificulta a comunicação entre equipamentos de marcas diferentes.
- Caso ocorra rompimento no cabo de comunicação pode-se perder a informação e/ou controle de várias malhas.

5.6.5.1 Funcionamento do sistema digital

Um sistema de instrumentação digital recebe um sinal analógico, converte em digital – valor numérico – através de um circuito denominado *conversor análogo-digital* e registra esse valor em uma posição de memória. A partir desse ponto, a variável lida é um elemento numérico tratado por um microcontrolador que manipula os dados por software, como nos seguintes exemplos:

- A tarefa de linearização é feita através de equações do tipo $y = f(x)$ ou de tabelas de dupla entrada guardadas em arquivos adequados. A troca de um termopar implica na troca de uma função ou de uma tabela.
- A função derivativa de um controlador é realizada numericamente através de algoritmos de computação.

Uma característica importante desse tipo de software é o fato de precisar trabalhar em tempo real, ou seja, à medida que os valores chegam, precisam ser convertidos em digitais, calculados e enviados para a saída em um intervalo de tempo compatível com os tempos do processo controlado. Essa demora é o tempo de latência, descrito no item que trata da arquitetura da instrumentação.

Na saída do sistema digital, se o comando for digital, aciona diretamente o elemento controlado e, se for analógico, converte os valores numéricos da variável em sinais analógicos através de um circuito denominado *conversor digital-analógico*. A transmissão do sinal pode ser feita em um *loop* de corrente de 4 a 30 mA de forma compatível com o sistema analógico.

5.6.5.2 Conversor análogo-digital (AD)

A conversão análogo-digital é feita da forma representada na [Figura 5.7](#). Nesse exemplo a conversão é feita com 3 bits, o que significa 8 níveis de quantização ou 8 valores numéricos possíveis. A cada intervalo de tempo é feita uma leitura, e esse valor lido é convertido em um valor numérico. No exemplo estão ilustradas cinco leituras:

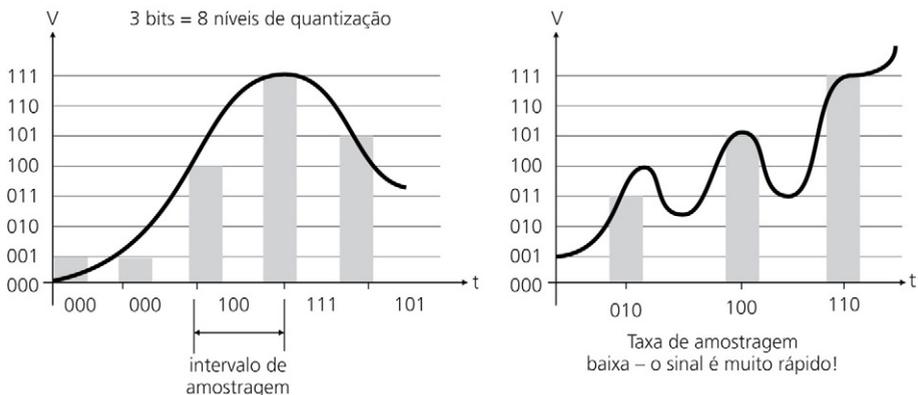


FIGURA 5.7 Conversor análogo digital.

- Leitura 1 – Valor 000
- Leitura 2 – Valor 000
- Leitura 3 – Valor 100
- Leitura 4 – Valor 111
- Leitura 5 – Valor 101

Trata-se de um circuito que lê o valor analógico e enquadra em que faixa de valores digitais ele se encontra. Para uma amplitude máxima de sinal de 5V, correspondente ao valor digital 111, a variação de cada degrau é de $5/2^3 = 5/8 = 0,625V$, ou seja, o valor 001 é 0,625V, o valor 0010 é 1,25V e assim por diante. O conversor do exemplo acima é muito pobre, pois faz a conversão com apenas 3 bits. Um conversor com 8 bits apresenta $2^8 = 256$ combinações possíveis: 00000000, 00000001, 00000010, 00000011... Para esse caso de 8 bits, a sensibilidade do conversor é $5/2^8 = 5/256 = 0,019V$ ou 19mV, um valor bem melhor que o anterior. Os conversores usados em automação são de 10 bits, 12 bits ou mais para aplicações especiais.

Observe que é feita uma leitura a cada intervalo fixo de tempo, denominado *intervalo de amostragem*. Entre uma leitura e outra, as variações da entrada são ignoradas, como pode ser observado na [Figura 5.7](#) da direita. Isso significa que há um valor máximo de variações que o conversor análogo digital suporta. Para uma determinada taxa de amostragem, deve existir uma taxa de variação máxima da variável de entrada para que ela ainda possa ser detectada. Há, na teoria, o denominado *teorema da amostragem* que estabelece o seguinte: a maior frequência possível de ser lida (e reproduzida) em um sistema é a metade da taxa de amostragem. Por exemplo, para a reprodução de sons até 15 kHz (15.000 Hz) é necessário que a taxa de amostragem seja de, no mínimo, 30 kHz [[CAR1968](#)].

A taxa de amostragem está ligada ao tempo de latência do microcontrolador. Os microcontroladores mais simples como, por exemplo, um microcontrolador PIC 16F1503 (que custa menos de US\$1,00) converte em 12 μs um dado de 10 bits [[PIC2011](#)]. Isso significa que a máxima frequência teórica do sinal de entrada é 41,6kHz e, por razões de ordem prática, pode-se trabalhar com sinais da ordem de 35kHz, ou com variações máximas de 28 μs .

Com relação à amplitude, os 10 bits significam que, para um sinal analógico máximo de 5V, o conversor é capaz de discriminar sinais de até $5/2^{10} = 5/1024 = 4,88mV$.

Evidentemente existem conversores mais sofisticados que permitem a conversão de sinais de frequência bem mais alta, mas são circuitos mais sofisticados.

Os seguintes valores ilustram que boa parte dos processos industriais possui tempos bem superiores ao exemplo anterior: processos térmicos são muito lentos, nos processos mecânicos um motor que gira a 10.000 rpm significa uma volta a cada 6ms, também lento em relação aos 28 μs . Isso tudo ilustra como é fácil construir uma instrumentação digital com a disponibilidade de componentes de baixo custo e de fácil uso. Essa é a razão do sucesso da instrumentação digital.

5.6.5.3 Conversor digital-analógico (DA)

A conversão digital-analógica é o processo inverso, ou seja, transformar um valor numérico em uma tensão ou corrente, e uma das técnicas pode ser ilustrada na [Figura 5.8 \[LAG2012\]](#). As entradas D_2 , D_1 e D_0 são os bits com o valor digital, que pode ser 0 ou o valor V_{ref} da tensão de alimentação (por exemplo 5V). Assim, se a entrada for 000, a saída será 0.

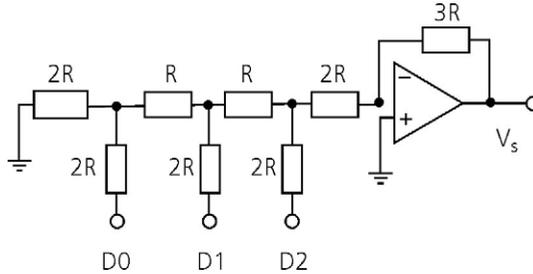


FIGURA 5.8 Conversor digital analógico adaptado de [LAG2012].

A rede de resistores possui valores de tal forma que o incremento de tensão de cada uma das entradas corresponde a $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$ ou $\frac{1}{8}$ dos valores da tensão de entrada de forma a reconstruir o valor analógico. A equação da [Figura 5.9](#) mostra o valor da saída em função dos valores das entradas D_2 , D_1 e D_0 . Nessa equação D_2 , D_1 e D_0 valem 0 ou 1 e V_{ref} é a tensão de referência (por exemplo 5V).

$$V_o = -V_{ref} \left(\frac{D_2}{2^1} + \frac{D_1}{2^2} + \frac{D_0}{2^3} \right)$$

FIGURA 5.9 Cálculo da tensão de saída do conversor DA adaptado de [LAG2012].

5.6.5.4 Outras características da tecnologia digital

A descrição anterior apresentou as funções tradicionais da instrumentação. No entanto, com a instrumentação digital abriram-se outras possibilidades de novas arquiteturas para esses sistemas.

Os *loops* de corrente que transmitem a informação das grandezas, funções puramente analógicas, podem ser substituídos por transmissores digitais, ou seja, através de uma comunicação digital, como uma rede local. Esse assunto será explorado com mais detalhes no Capítulo 9, que trata de redes e integração de sistemas.

A redução de custo dos sistemas digitais também possibilitou a criação de dispositivos que tratam do sinal junto ao transdutor, ou seja, o instrumento pode ser montado no campo, e as informações fluem para a sala de controle através de comunicação digital, tornando a instrumentação uma rede distribuída.

5.7 Sistemas supervisórios

Até os anos 1940, a maioria das plantas industriais era operada manualmente com controladores elementares. Eram necessários muitos operadores que ficavam circulando em campo realizando leituras nos instrumentos localizados junto ao processo, fazendo anotações e intervenções quando necessário. Os processos contínuos são formados de várias etapas interligadas, e era difícil ter uma visão do seu comportamento como um todo. Por essa razão, existiam muitos tanques entre etapas do processo para isolar uma da outra e reduzir a interferência entre elas, embora isso tenha custo alto [ALV2005].

Nas décadas de 1940 e 1950, a tecnologia de equipamentos evoluiu e permitiu o uso de dispositivos de controle automático que, com o aumento do custo da mão de obra, levou a uma maior automatização das plantas industriais, embora com algoritmos ainda primitivos. Nessa época também houve a possibilidade de transmissão de sinais dos processos em distâncias mais longas, dando origem às salas de controle de processo, que passaram a concentrar os controladores. Nas décadas de 1950 e 1960, com a disseminação da tecnologia eletrônica analógica, houve a simplificação das instalações e o aumento das distâncias para transmissão de sinais [ALV2005].

A partir da década de 1960, houve uma evolução da teoria de controle automático, que permitiu o uso menos empírico dos sistemas de controle automático [ALV2005].

Os Sistemas Supervisórios têm a finalidade de levar informações para quem está operando o processo industrial. O seu principal objetivo é ter uma visão do processo como um todo a fim de permitir ao operador compreender o que está ocorrendo e tomar ações adequadas para o bom funcionamento do sistema. Com os Sistemas Supervisórios foi possível reduzir o número de operadores em campo e integrar melhor as etapas dos processos, reduzindo custos de operação e estoques intermediários. Por outro lado, aumenta a dificuldade de operação pelo fato de estar tudo integrado e existe o risco de propagação de problemas quando há instabilidade em qualquer etapa do processo. Isso reforça a responsabilidade dos operadores que, quando tudo está em plena normalidade, não há muito o que fazer, pois todas as variáveis controladas estão dentro dos valores previstos, e basta intervir quando houver mudança de alguma característica do produto a ser fabricado.

A decisão sobre quais ações devem ser tomadas com relação ao processo ficam por conta do operador. A [Figura 5.10](#) ilustra esse fato: a instrumentação realiza a aquisição de dados, faz o controle das principais malhas de automação e traz os dados para o computador de processo. Este recebe as informações e as reorganiza para o operador através de painéis sinóticos e monitores. Os painéis sinóticos são grandes quadros com os diagramas esquemáticos do processo ou, nas instalações mais modernas, são usados os *video walls*, que são diversos monitores montados em conjunto oferecendo uma tela de grandes

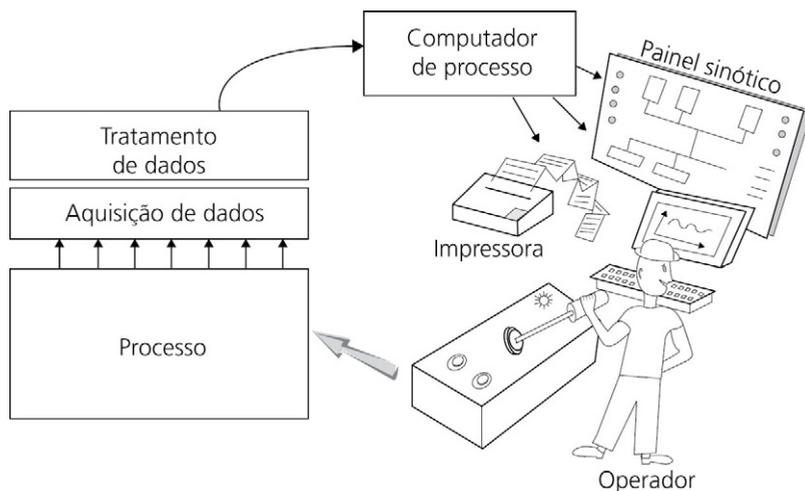


FIGURA 5.10 Sistema supervisório.

dimensões. Também são disponibilizados, além dos periféricos tradicionais, como teclados e mouses, *trackballs*, manetes e outros dispositivos que lhe dão a possibilidade de ligar e desligar os equipamentos que atuam diretamente no processo.

Dados referentes ao processo são colecionados e podem ser consultados a qualquer momento para comparar com alguma situação que mereça uma análise mais aprofundada.

Para o funcionamento dos Sistemas de Supervisão, há aplicativos proprietários dos fornecedores de sistemas de instrumentação que oferecem essa camada de aplicação acima das funções da instrumentação, ou há aplicativos genéricos que servem para qualquer processo, como é o caso do SCADA [SIL2005].

O sistema SCADA – *Supervisory Control and Data Acquisition* permite a configuração da planta específica, realiza a aquisição de dados, armazena em bancos de dados as informações provenientes do processo e oferece informações ao operador através de diversos dispositivos. Os primeiros sistemas SCADA somente traziam para a sala do operador as principais variáveis do processo através de lâmpadas e indicadores realizando operações simples. Os sistemas SCADA atuais exploram melhor a tecnologia fazendo a monitoração de forma mais automatizada, efetuando coleta de dados em ambientes complexos, distribuídos geograficamente e há uma preocupação na apresentação dos dados aos operadores através de uma interface amigável [SIL2005].

Nos casos de emergência, quando há anomalias no processo, a atuação do operador é fundamental, e o Sistema de Supervisão deve dar apoio a essas situações. Normalmente, os sistemas possuem, para esses casos, alarmes e dispositivos de segurança para que se evite a propagação dos problemas. Quando

ocorre uma anomalia, é disparado um alarme, mas é comum essa anomalia também parar outras funções do sistema, que também vão acionar outros alarmes, provocando um efeito dominó e confundindo o operador, que pode não identificar rapidamente a causa raiz do defeito. Sistemas mais sofisticados realizam a filtragem dos alarmes procurando apresentar a origem do problema. No entanto, deve-se sempre lembrar que, por melhor que sejam os sistemas, há possibilidade de erro de interpretação do software. Essa é uma importante razão para a necessidade de operadores com grande experiência no processo.

5.8 Sala de controle

A Sala de Controle é o local físico onde se localiza o Sistema de Supervisão. Há diversos cuidados que precisam ser tomados na concepção dessas salas, pois os operadores permanecem nesse local horas a fio, e há risco de cansaço, risco de erros de interpretação de dados e inadequação dos equipamentos.

Essas salas devem ser ergonômicas para oferecer conforto físico aos operadores e permitir que seja mantido o estado de atenção adequado de modo que não haja falhas. Além disso, é necessário que seja definida uma interface homem-máquina adequada, além dos estudos de ergonomia cognitiva, que trata da avaliação da facilidade com que o operador vai operar o sistema e qual o grau de cansaço que o sistema pode provocar. Uma análise do trabalho e das responsabilidades deve ser feita para determinar com precisão as atividades de forma a evitar ao máximo o erro humano.

5.9 Leituras recomendadas

Dois livros são recomendados para quem quer se aprofundar em instrumentação: o de Tony Kuphaldt [KUP2008] e o de Egidio Bega [BEG2006]. O primeiro é um pouco mais conceitual, e o segundo tem forte visão aplicada de profissionais da área de petróleo.

5.10 Exercícios e atividades

1. Observe o fluxograma do processo da [Figura 5.11 \[ROD2009\]](#). Identifique:
 - a. Quais são os elementos do conjunto 104 e como ela funciona?
 - b. Quais são os elementos do conjunto 202 e como ela funciona?
 - c. Como é acionado o misturador 204?
 - d. Como é acionado o motor 204?
 - e. O que é o conjunto 101?
2. Na Seção referente ao conversor digital, considerando que $V_{ref} = 5V$, quais são os valores lidos de tensão?

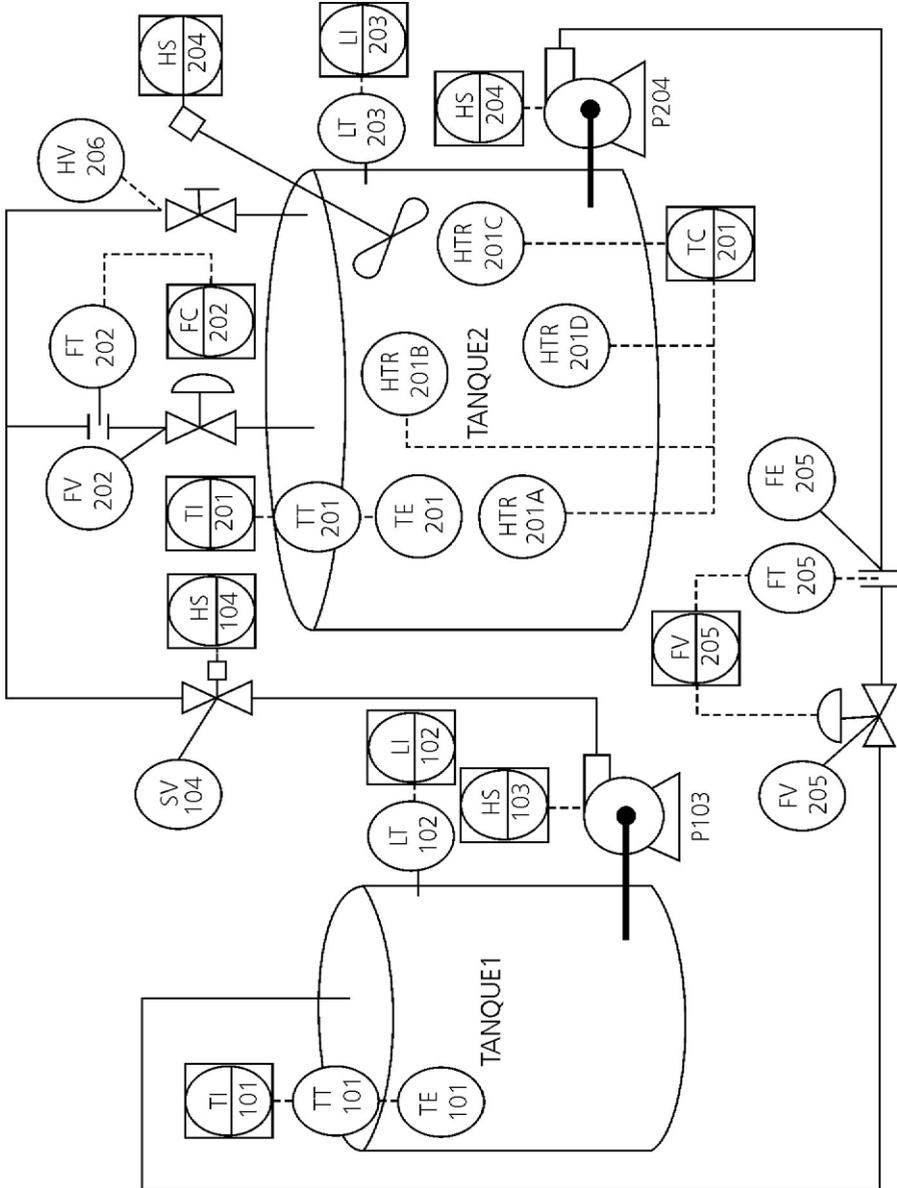


FIGURA 5.11 Processo exemplo adaptado de [ROD2009].

5.11 Soluções de alguns exercícios

A pergunta 1b referente ao conjunto 202 trata de uma malha de controle de vazão, com os seguintes elementos:

- Placa de orifício (símbolo)
- Medidor de fluxo 202 (FT 202)
- Controlador de fluxo 202 (FC 202)
- Válvula de fluxo 202 (FV 202)

Referências bibliográficas

- [ALV2005] ALVES, José Luiz Loureiro. **Instrumentação, Controle e Automação de Processos**. Rio de Janeiro: Ed LTC, 2005.
- [BEG2006] BEGA, Egidio Alberto, org. **Instrumentação industrial**. Vários autores. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência/IBP, 2006.
- [BOJ2005] BOJORGE, Niniska. **Instrumentação Fieldbus: Introdução e Conceitos**. UFF – Departamento de Engenharia Química e de Petróleo. Notas de aula. Obtido em: http://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=instrumenta%C3%A7%C3%A3o%20fieldbus%3A%20outros%20processos%20de%20separa%C3%A7%C3%A3o%20%C3%A7%20introdu%C3%A7%C3%A3o%20e%20conceitos&source=web&cd=1&cad=rja&sqi=2&ved=0CDkQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.professores.uff.br%2Fcontroledeprocessos-eq%2Fimages%2Fstories%2FAula12_Instrumen_Fieldbus.pdf&ei=aTdqUZryBrGA0AHq0oDYAQ&usg=AFQjCNHJ5qUR5-23KbH6J9koKmmTPNhWqA&bvm=bv.45175338,d.eWU (Acessado em 13/04/2013.)
- [CAR1968] CARLSON, A. Bruce. **Communication Systems Na Introduction to Signals and Noise in Electrical Communication**. Nova York: Ed Mc Graw Hill, 1968.
- [ISA1992] ISA **Instrumentation Symbols and Identification**. The Instrumentation, Systems and Automation Society, 1992. Obtida no endereço www.isa.org
- [KUP2008] KUPHALDT, Tony R. **Lessons in Industrial Instrumentation**. Open Book Project licensed under the Creative Commons Attribution 3.0 United States License. Obtido no endereço <http://openbookproject.net/books/socratic/sinst/> (Acessado em 31/03/2013.)
- [LAG2012] LAGES, Walter Fetter. **Conversores A/D e D/A**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul Escola de Engenharia. Departamento de Engenharia Elétrica. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. ELE00002 Sistemas de Automação. Notas de Aula. Obtido no endereço <http://www.ece.ufrgs.br/~fetter/ele00002/ad-da.pdf> (Acessado em 21/04/2013.)
- [MOR2007] MOREIRA JUNIOR, Nelson. **Instrumentação Básica para Controle de Processos**. Curso CEFET Campos. Notas de aula. 2007. Obtido no endereço http://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=nelson%20moreiea%20junior%20cefet%20instrumenta%C3%A7%C3%A3o%20petrobras&source=web&cd=2&cad=rja&ved=0CDgQFjAB&url=http%3A%2F%2Flibertas.pbh.gov.br%2F∼daniilo.cesar%2Foutros%2Fconcurso_ufrmg%2FCurso%2520Instrumenta%25C3%25A7%25C3%25A3o%2520Petrobras.pdf&ei=uRBqUaHKLsnX0gHlvoHQCQ&usg=AFQjCNFfMsZ9CvsHAYiszCIWr3yw0Jf53Q&bvm=bv.45175338,d.eWU (Acessado em 13/04/2013.)
- [NOR1969] NORTON, Harry N.. **Handbook of Transducers form Electronic Measuring Systems**. New Jersey: Prentice Hall, 1969.

- [OGA2003] OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de controle moderno**. Trad. Paulo Alves Maia. Rev. Téc. Fabrizio Leonardi et al. 4. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2003.
- [PIC2011] PIC - MICROCHIP Technology Inc. **Data Sheet PIC16(L)F1503** Microcontroller 14-Pin Flash, 8-Bit Microcontrollers. 2011 obtido em <http://www.microchip.com/wwwproducts/Devices.aspx?dDocName=en553475> (Acessado em 20/04/2013.)
- [ROD2009] RODRIGUES, Welbert. **Instrumentação Industrial – Simbologia e Terminologia da Norma ISA 5.1**. Notas de aula. Obtido no endereço <http://xa.yimg.com/kq/groups/22144157/751056803/name/Norma> (Acessado em 30/03/2013.)
- [SAM2007] Samad, T.; McLaughlin, P.; Lu, J.. **System architecture for process automation: Review and trends**. *Journal of Process Control*. 17.2007
- [SIL2005] SILVA, Ana Paula Gonçalves; SALVADOR, Marcelo. **O que são sistemas supervi-sórios?** RT001.04. Relatório Técnico. Elipse Software Ltda. 2005. Obtido no endereço http://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&ved=0CEwQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.wectrus.com.br%2Fartigos%2Fsist_superv.pdf&ei=xchWUcroFJS60AGr2YCgBQ&usg=AFQjCNFPkN8QbI1G22zCHhNPws-z4vVZA&sig2=gG3ghOgalZIsYqIRx1ycWA&bvm=bv.44442042,d.dmQ (Acessado em 13/04/2013.)
- [SIL2008] Silva, Edilson A. **Apostila da Disciplina Sensores e Atuadores**. CEFET-MT. Apostila. Obtido no endereço <http://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=ed%3ADlson%20alfredo%20da%20silva%20sensores%20e%20atuadores&source=web&cd=1&cad=rja&sqi=2&ved=0CDMQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.ebah.com.br%2Fcontent%2FABAAABMQYAB%2Fapostila-automacao-sensores-atuadores-cefet&ei=6zBiUfi7CeS80gGV1YDQBA&usg=AFQjCNHk523uyN1zviTGtuD3aSHhGod8oA&bvm=bv.44770516,d.eWU> (Acessado em 17/11/2012.) [http://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=isa%20standard%20s%205.1&source=web&cd=1&cad=rja&ved=0CC8QFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.purduecal.edu%2Fcpmi%2FNFSF%2520Courses%2FECET-462%2FHANDOUTS%2FISA-5.1-1984\(R1992\).pdf&ei=_vJhUbf0LuPn0gG7-4GgCw&usg=AFQjCNGe8UAMeloxBeGF4MGZf9MV7HoWZw&bvm=bv.44770516,d.eWU](http://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=isa%20standard%20s%205.1&source=web&cd=1&cad=rja&ved=0CC8QFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.purduecal.edu%2Fcpmi%2FNFSF%2520Courses%2FECET-462%2FHANDOUTS%2FISA-5.1-1984(R1992).pdf&ei=_vJhUbf0LuPn0gG7-4GgCw&usg=AFQjCNGe8UAMeloxBeGF4MGZf9MV7HoWZw&bvm=bv.44770516,d.eWU) (Acessado em 07/04/2013.)

Metrologia e transdutores

SUMÁRIO

6.1	Miniglossário	145
6.2	Metrologia	145
6.2.1	Qualidade e medição	145
6.2.2	Metrologia e VIM	146
6.2.3	Grandezas e unidades	148
6.2.4	Medição	149
6.2.5	Dispositivos de medição	155
6.2.6	Propriedades dos dispositivos de medição	156
6.2.7	Padrões	159
6.2.8	Sistema Nacional de Metrologia	161
6.2.9	Certificação	163
6.2.10	Certificação de processo e de produto	163
6.2.11	Certificação de terceira parte	164
6.2.12	Barreiras técnicas	164
6.3	Transdutores	165
6.3.1	Medida de grandezas elétricas	166
6.3.1.1	<i>Tensão</i>	167
6.3.1.2	<i>Corrente</i>	169
6.3.1.3	<i>Frequência</i>	171
6.3.1.4	<i>Potência (elétrica)</i>	172
6.3.1.5	<i>Fator de potência</i>	174
6.3.1.6	<i>Medida de energia</i>	174
6.3.2	Medida de temperatura	175
6.3.2.1	<i>Termopares</i>	176
6.3.2.2	<i>Termorresistência - RTD</i>	178
6.3.2.3	<i>Termistores NTC e PTC</i>	179
6.3.2.4	<i>Semicondutores</i>	180
6.3.2.5	<i>Pirômetros óticos e infravermelhos</i>	181
6.3.2.6	<i>Termógrafo</i>	182
6.3.2.7	<i>Bolômetro</i>	183
6.3.3	Medida de grandezas cinéticas	183
6.3.3.1	<i>Força</i>	183

6.3.3.2	Deslocamento e posição	186
6.3.3.3	Velocidade.....	189
6.3.3.4	Aceleração.....	191
6.3.4	Medição de fluidos.....	192
6.3.4.1	Medição de pressão.....	192
6.3.4.2	Medição de vazão.....	195
6.3.4.3	Medição de nível.....	201
6.3.5	Analísadores	211
6.3.5.1	Analísadores de gases.....	211
6.3.5.2	Analísadores de líquidos.....	214
6.3.5.3	Analísadores tratamento de água.....	215
6.3.5.4	Cromatógrafo.....	216
6.3.5.5	Espectrômetro de massa.....	216
6.3.6	Atuadores	217
6.3.7	Outros tipos de aplicações.....	217
6.4	Considerações finais.....	218
6.5	Leituras recomendadas	218
6.6	Exercícios e atividades	218

“Quando você pode medir o que está falando e expressá-lo em números, você sabe alguma coisa sobre isso, mas quando não pode medi-lo, quando não pode expressá-lo em números, o seu conhecimento é pequeno e insatisfatório. Pode ser o início do conhecimento, mas dificilmente seu espírito terá progredido até o estágio da Ciência, qualquer que seja o assunto abordado.”

Lord Kelvin – 1889

A medição das grandezas nos processos produtivos dá os insumos para que os Sistemas de Automação possam tomar decisões e realizar as atuações adequadas. A realização de uma medição de qualidade é fundamental para o bom resultado dos processos. Este capítulo está organizado em duas partes: metrologia e transdutores.

A metrologia aborda as características das medições e os respectivos termos técnicos, em que é apresentado o Sistema Nacional de Metrologia e as Certificações de Produto.

Os transdutores são os dispositivos que realizam as medições por meio de diversos fenômenos físicos e químicos que permitem a realização das medidas dessas grandezas.

AO TÉRMINO DESTA CAPÍTULO VOCÊ VAI CONHECER:

- o Sistema Nacional de Metrologia;
- as Certificações de Produto;
- os termos técnicos referentes à metrologia;
- os transdutores para medirem diversas grandezas dos processos.

6.1 Miniglossário

Indicador. Valor fornecido por um instrumento de medição ou por um sistema de medição.

Medição. Processo de obtenção experimental de um ou mais valores que podem ser, razoavelmente, atribuídos a uma grandeza.

Metrologia. Vem de metron (medida) e de logos (ciência), ou seja, é a ciência da medida.

Sensor. Elemento de um sistema de medição que é diretamente afetado por um fenômeno, corpo ou substância que contém a grandeza a ser medida.

Transdutor. Dispositivo, utilizado em medição, que fornece uma grandeza de saída, que possui uma relação especificada com uma grandeza de entrada. Dispositivo que estabelece uma saída utilizável como resposta a um mensurando específico.

6.2 Metrologia

À primeira vista, quando se fala em medidas de grandezas diversas, dada a quantidade de medidores existentes, com preços muitas vezes bastante acessíveis, parece fácil realizar essa tarefa. No entanto, quem garante que a multa que um radar aplicou no carro está correta? O radar estava calibrado e mediu corretamente a velocidade? O odômetro do carro, que indica a velocidade, está indicando corretamente? O medidor de pressão comprado na farmácia indicou um valor correto? A medida é confiável?

Há uma tendência de as pessoas acreditarem naquilo que o painel do instrumento mostra pelo simples fato de apresentar uma indicação. Como foi feita a medida? Qual o princípio utilizado? Com que precisão foi medido? Será que o instrumento não variou a medição indicada ao longo do tempo? Será que o instrumento de medida não precisa ir para um laboratório para verificar se está medindo corretamente?

Enfim, este é o tema que será abordado neste capítulo.

6.2.1 Qualidade e medição

A qualidade de um produto depende de diversos fatores. O primeiro deles é a qualidade do projeto propriamente dito, para o qual existem normas e técnicas da engenharia que vão garantir as características do produto. Normalmente, quando é realizado o projeto do produto, primeiramente é feito seu dimensionamento, seguido pela montagem de protótipos que são ensaiados em laboratório para verificar se as características são atendidas adequadamente em diversas condições de operação. Esta é a qualidade do projeto.

Quando se vai fabricar esse produto, é necessário garantir que cada item fabricado tenha as mesmas características do projeto desenvolvido

pela engenharia. Para tanto, é desenvolvido o processo de produção, que determina as etapas de montagem do produto, e os pontos de controle, em que deverão ser realizadas medições para verificar se o produto está dentro dos padrões definidos. É a qualidade do processo.

Enfim, pode-se observar que, tanto para o projeto do produto como para sua fabricação, a medição é uma tarefa fundamental. As medições determinam se o produto está dentro do esperado ou não. As questões discutidas neste capítulo são: como saber se foi feita corretamente a medição? Como saber se o valor indicado pelo instrumento de medida é confiável? Como garantir que uma medida feita hoje em um local vai dar o mesmo resultado de outra medida feita outro dia, em outro local com outro equipamento?

É a metrologia que aborda esses temas.

6.2.2 Metrologia e VIM

A palavra Metrologia vem de *metron* (medida) e de *logos* (ciência), ou seja, é a ciência da medida.

O VIM – Vocabulário Internacional de Metrologia define os termos utilizados em metrologia [VIM2008], e é uma tradução do vocabulário internacional de mesmo nome [JCG2008]. Com base nesse vocabulário foi desenvolvido este capítulo para introduzir as definições e os conceitos de metrologia.

Ao se realizar a medida de uma grandeza há uma série de fatores que dificultam a obtenção do seu valor verdadeiro. O desvio do valor verdadeiro é provocado por erros aleatórios e sistemáticos. Tais erros são provocados seja pelo equipamento de medida, pelo método de medida ou pela pessoa que está realizando a operação. Por essa razão, há que se tomar muito cuidado na execução das medidas e realizá-la de forma clara e objetiva seguindo, sempre que possível, algum método padronizado com equipamentos que sabidamente estão adequados para essa finalidade.

Pode-se pensar, a priori, que essas afirmações são exagero. Nas medições triviais, os cuidados poderão ser menores devido à facilidade de medição e menor necessidade de precisão nas medidas, mas as definições aqui colocadas são válidas para qualquer tipo de medição, incluindo aquelas mais complexas como, por exemplo, as realizadas por um tomógrafo ou por equipamentos automáticos que realizam exames de sangue.

Por essa razão, o resultado de uma medição é, em geral, uma estimativa do valor verdadeiro. A apresentação do resultado é completa somente quando acompanhada por uma quantidade que declara sua incerteza.

As definições de termos aqui colocadas foram classificadas em cinco categorias para maior facilidade de compreensão:

- Grandezas e unidades;
- Medição;
- Dispositivos de medição;

- Propriedades dos dispositivos de medição;
- Padrões.

Foram selecionados do VIM apenas os termos de interesse para adequação aos objetivos deste livro. Quem quiser se aprofundar neste assunto poderá recorrer ao original referenciado na bibliografia [VIM2008].

As definições a seguir foram colocadas no formato de tabelas para tornar mais claras as definições, usando uma tabela padrão com a seguinte estrutura:

Termo	Observação ou exemplo
Definição	Exemplo ou observação
Definição do termo	<ul style="list-style-type: none"> • Exemplo do item ou Observação referente ao termo definido

O [Quadro 6.1](#) apresenta a relação completa dos termos do VIM selecionados visando apresentar uma visão do conjunto e facilitar a compreensão.

Cada coluna deste quadro corresponde a um item do capítulo com os termos definidos.

Quadro 6.1 Mapa dos termos selecionados do VIM

6.2.3	6.2.4	6.2.5	6.2.6	6.2.7
Grandezas e unidades	Medição	Dispositivos de medição	Propriedades dos dispositivos de medição	Padrões
Grandeza	Medição	Instrumento de medição	Indicador	Padrão
Unidade de Medida	Mensurando	Sistema de Medição	Amplitude de Medição	Padrão Primário
Sistema de Unidades	Princípio de Medição	Instrumento de Medição	Valor Nominal	Padrão Secundário
Valor de uma Grandeza	Método de Medição	Transdutor de Medição	Sensibilidade	Padrão de Trabalho
	Procedimento de Medição	Sensor	Seletividade	Calibrador
	Resultado de Medição	Detector	Resolução	
	Valor Medido		Estabilidade	
	Valor Verdadeiro		Classe de Exatidão	
	Exatidão da Medição		Curva de Calibração	
	Precisão da Medição			
	Erro de Medição			
	Repetitividade de Medição			
	Reprodutibilidade de Medição			
	Incerteza de Medição			
	Calibração			
	Correção			

Nas definições a seguir, os termos destacados em **negrito** no texto são os que possuem uma definição.

6.2.3 Grandezas e unidades

Grandezas e Unidades trata dos termos básicos para a definição de grandezas físicas químicas ou biológicas. São ao todo quatro termos:

- Grandeza
- Unidade de Medida
- Sistema de Unidades
- Valor de uma Grandeza

Grandeza	Observar que a compreensão dessas grandezas, exceto as mais simples, depende de conhecimento específico das grandezas que estão sendo medidas e muitas vezes do método utilizado para realizar a medição.
-----------------	---

Definição	Exemplo
Propriedade de um fenômeno, de um corpo ou de uma substância, que pode ser expressa quantitativamente sob a forma de um número e de uma referência.	<p>Comprimento: raio do círculo A, r_A;</p> <p>Comprimento de onda (λ): comprimento de onda da radiação D do sódio λ_D;</p> <p>Energia: calor Q - calor de vaporização da amostra <i>i</i> de água, Q_i;</p> <p>Concentração em número de entidades B, CB: concentração em número de eritrócitos na amostra <i>i</i> de sangue, C(Erys; Bi);</p> <p>Dureza Rockwell C (carga de 150 kg): dureza Rockwell C da amostra <i>i</i> de aço, HRCi(150 kg);</p>

Unidade de Medida

Definição	Observações
Grandeza escalar real, definida e adotada por convenção, com a qual outras grandezas do mesmo tipo podem ser comparadas para expressar, na forma de um número, a razão entre duas grandezas.	<p>As unidades de medida são designadas por nomes e símbolos atribuídos por convenção.</p> <p>As unidades de medida das grandezas de mesma dimensão podem ser designadas pelos mesmos nome e símbolo, ainda que as grandezas não sejam do mesmo tipo. Por exemplo, joule por kelvin e J/K são, respectivamente, o nome e o símbolo das unidades de medida de capacidade calorífica e de entropia, que geralmente não são consideradas como grandezas de mesmo tipo. Contudo, em alguns casos, nomes especiais de unidades de medida são utilizados exclusivamente para grandezas de um tipo específico. Por exemplo, a unidade de medida "segundo elevado a menos um" (1/s) é chamada Hertz (Hz) quando utilizada para frequências, e becquerel (Bq) quando utilizada para atividades de radionuclídeos.</p> <p>As unidades de medida de grandezas adimensionais são números. Em alguns casos, são dados nomes especiais a essas unidades de medida, por exemplo, radiano, esterradiano e decibel, ou são expressos por quocientes, como milimol por mol, que é igual a 10⁻³, e micrograma por quilograma, que é igual a 10⁻⁹.</p> <p>Para uma dada grandeza, o termo "unidade" é frequentemente combinado com o nome da grandeza, como "unidade de massa".</p>

Sistema de Unidades

Definição	Exemplo
Conjunto de unidades de base e de unidades derivadas, juntamente com os seus múltiplos e submúltiplos, definidos de acordo com regras dadas, para um dado sistema de grandezas.	SI - Sistema Internacional de unidades é considerado um sistema coerente de unidades

Valor de uma Grandeza De acordo com o tipo de referência, o valor de uma grandeza é: um produto de um número e uma unidade de medida (ver Ex 1, 2, 3, 4, 5, 8 e 9); a unidade um é geralmente omitida para as grandezas adimensionais (ver Ex 6 e 8); um número e uma referência a um procedimento de medição (ver Ex 7); um número e um material de referência (ver Ex 10).
 O número pode ser complexo (ver Ex 5).
 O valor de uma grandeza pode ser representado por mais de uma forma (ver Ex 1, 2 e 8).

- No caso de grandezas vetoriais ou tensoriais, cada componente tem um valor (ver Ex 11).

Definição	Exemplo
Conjunto, formado por um número e por uma referência, que constitui a expressão quantitativa de uma grandeza.	Ex1: Comprimento de uma determinada haste: 5,34 m ou 534 cm Ex2: Massa de um determinado corpo: 0,152 kg ou 152 g Ex3: Curvatura de um determinado arco: 112 m ⁻¹ Ex4: Temperatura Celsius de uma determinada amostra: -5 °C Ex5: Impedância elétrica de um determinado elemento de circuito a uma dada frequência, onde j é a unidade imaginária: (7 + 3j) Ex6: Índice de refração de uma determinada amostra de vidro: 1,32 Ex7: Dureza Rockwell C de uma determinada amostra (carga de 150 kg): 43,5HRC(150 kg) Ex8: Fração mássica de cádmio numa determinada amostra de cobre: 3 ?g/kg ou 3x10 ⁻⁹ Ex9: Molalidade de Pb ²⁺ numa determinada amostra de água: 1,76 ?mol/kg Ex10: Concentração arbitraria em quantidade de matéria de lutropina numa determinada amostra de plasma (padrão internacional 80/552 da OMS): 5,0 Unidade Internacional/l Ex11: Força atuante sobre uma determinada partícula, em coordenadas cartesianas (Fx; Fy; Fz) = (-31,5; 43,2; 17,0) N.

6.2.4 Medição

Estes termos referem-se ao ato de medir e aos métodos definidos para o desenvolvimento desta atividade. São ao todo 16 termos:

- Medição
- Mensurando
- Princípio de Medição
- Método de Medição

- Procedimento de Medição
- Resultado de Medição
- Valor Medido
- Valor Verdadeiro
- Exatidão da Medição
- Precisão da Medição
- Erro de Medição
- Repetitividade de Medição
- Reprodutibilidade de Medição
- Incerteza de Medição
- Calibração
- Correção

Medição	<ul style="list-style-type: none"> • A medição pressupõe uma descrição da grandeza que seja compatível com o uso pretendido de um resultado de medição, de um procedimento de medição e de um sistema de medição calibrado que opera de acordo com um procedimento de medição especificado, incluindo as condições de medição. • O processo de medição pode ser automatizado.
----------------	---

Definição	Exemplo
Processo de obtenção experimental de um ou mais valores que podem ser, razoavelmente, atribuídos a uma grandeza .	

Mensurando A especificação de um mensurando requer o conhecimento do tipo de grandeza, a descrição do fenômeno, do corpo ou da substância da qual a grandeza é uma propriedade, incluindo qualquer componente relevante e as entidades químicas envolvidas. A medição, incluindo o sistema de medição e as condições sob as quais ela é realizada, pode modificar o fenômeno, o corpo ou a substância, de modo que a grandeza que está sendo medida pode diferir do mensurando como ele foi definido. Neste caso, é necessária uma correção adequada.

Definição	Exemplo
É a grandeza que se pretende medir.	O comprimento de uma haste de aço em equilíbrio com a temperatura ambiente de 23 °C será diferente do comprimento à temperatura especificada de 20 °C. Neste caso, é necessária uma correção. A diferença de potencial entre os terminais de uma pilha pode diminuir quando na realização da medição é utilizado um voltímetro com uma resistência interna baixa (um voltímetro deve ter resistência interna muito alta). A diferença de potencial em circuito aberto pode ser calculada a partir das resistências internas da pilha e do voltímetro.

Princípio de Medição O fenômeno pode ser de natureza física, química ou biológica.

Definição	Exemplo
Fenômeno que serve como base para uma medição.	Efeito termoeletrico aplicado à medição de temperatura. Absorção de energia aplicada à medição da concentração em quantidade de matéria. Redução da concentração de glicose no sangue de um coelho em jejum aplicada à medição da concentração de insulina em uma preparação.

Método de Medição

Definição

Exemplo

Descrição genérica da organização lógica de operações adotadas na realização de uma medição.

Procedimento de Medição Um procedimento de medição é geralmente documentado em detalhes suficientes para permitir que um operador realize uma medição.
Um procedimento de medição pode incluir uma declaração referente à incerteza-alvo.

Definição

Exemplo

Descrição detalhada de uma **medição** de acordo com um ou mais **princípios de medição** e com um dado **método de medição**, baseada em um **modelo de medição** e incluindo todo cálculo destinado à obtenção de um **resultado de medição**.

Resultado de Medição

Definição

Observações

Conjunto de valores atribuídos a um mensurando, completado por todas as outras informações pertinentes disponíveis.

Um resultado de medição geralmente contém “informação pertinente” sobre o conjunto de valores, alguns dos quais podem ser mais representativos do mensurando do que outros. Isso pode ser expresso na forma de uma função de densidade de probabilidade.
Um resultado de medição é geralmente expresso por um único valor medido e uma incerteza de medição. Caso a incerteza de medição seja considerada desprezível para alguma finalidade, o resultado de medição pode ser expresso como um único valor medido. Em muitas áreas, esta é a maneira mais comum de expressar um resultado de medição.

Valor Medido

Definição

Observações

Valor de uma grandeza que representa um resultado de medição.

Para uma medição envolvendo indicações repetidas, cada indicação pode ser utilizada para fornecer um valor medido correspondente. Esse conjunto de valores medidos individuais pode ser utilizado para calcular um valor medido resultante, como uma média ou uma mediana, geralmente com uma menor incerteza de medição associada.
Quando a amplitude de valores verdadeiros tidos como representativos do mensurando é pequena em relação à incerteza de medição, um valor medido pode ser considerado uma estimativa de um valor verdadeiro essencialmente único, sendo frequentemente uma média ou uma mediana de valores medidos individuais, obtidos através de medições repetidas.
Nos casos em que a amplitude dos valores verdadeiros, tidos como representativos do mensurando, não é pequena em relação à incerteza de medição, um valor medido é frequentemente uma estimativa de uma média ou de uma mediana do conjunto de valores verdadeiros.

Valor Verdadeiro

Na Abordagem de Erro para descrever as medições, o valor verdadeiro é considerado único e, na prática, desconhecido. A Abordagem de Incerteza consiste no reconhecimento de que, devido à quantidade intrinsecamente incompleta de detalhes na definição de uma grandeza, não existe um valor verdadeiro único, mas um conjunto de valores verdadeiros consistentes com a definição. Entretanto, esse conjunto de valores é, em princípio e na prática, desconhecido. Outras abordagens evitam completamente o conceito de valor verdadeiro e avaliam a validade dos resultados de medição com auxílio do conceito de compatibilidade metrológica. No caso particular de uma constante fundamental, considera-se que a grandeza tenha um valor verdadeiro único. Quando a incerteza definicional, associada ao mensurando, é considerada desprezível em comparação com os outros componentes da incerteza de medição, pode-se considerar que o mensurando possui um valor verdadeiro "essencialmente único". Esta é a abordagem adotada pelo GUM e documentos associados, em que a palavra "verdadeiro" é considerada redundante.

Definição	Exemplo
Valor de uma grandeza compatível com a definição da grandeza.	

Exatidão da Medição

A "exatidão de medição" não é uma grandeza e não lhe é atribuído um valor numérico. Uma medição é dita mais exata quando é caracterizada por um erro de medição menor. O termo "exatidão de medição" não deve ser utilizado no lugar de veracidade, assim como o termo precisão de medição não deve ser utilizado para expressar "exatidão de medição", o qual, entretanto, está relacionado com ambos os conceitos. A "exatidão de medição" é algumas vezes entendida como o grau de concordância entre valores medidos que são atribuídos ao mensurando.

Definição	Exemplo
Grau de concordância entre um valor medido e um valor verdadeiro de um mensurando . Observe a comparação com precisão na Figura 6.1 – Precisão e Exatidão.	

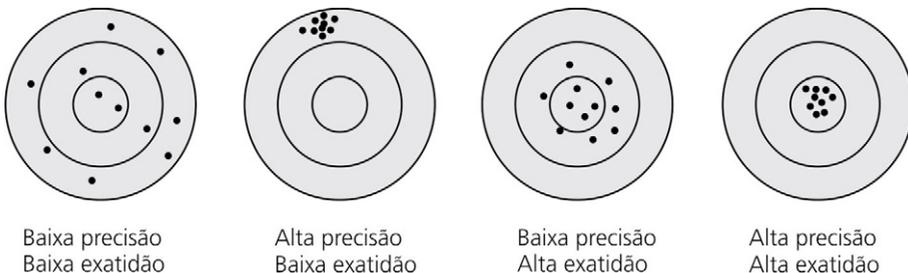


FIGURA 6.1 Precisão e exatidão - adaptado de [SOA2006].

Precisão da Medição A precisão de medição é geralmente expressa na forma numérica por meio de medidas de dispersão como o desvio padrão, a variância ou o coeficiente de variação, sob condições de medição especificadas. As “condições especificadas” podem ser, por exemplo, condições de repetitividade, condições de precisão intermediária ou condições de reprodutibilidade (ver ISO 5725-3: 1994). A precisão de medição é utilizada para definir a repetitividade de medição, a precisão intermediária de medição e a reprodutibilidade de medição. O termo “precisão de medição” é algumas vezes utilizado, erroneamente, para designar a exatidão de medição.

Definição	Exemplo
Grau de concordância entre indicações ou valores medidos , obtidos por medições repetidas, no mesmo objeto ou em objetos similares, sob condições especificadas. Observe a comparação com precisão na Figura 6.1 .	

Erro de Medição O conceito de “erro de medição” pode ser utilizado: quando existe um único valor de referência, o que ocorre se uma calibração for realizada por meio de um padrão com um valor medido cuja incerteza de medição é desprezível, ou se um valor convencional for fornecido. Nesses casos, o erro de medição é conhecido; caso se suponha que um mensurando é representado por um único valor verdadeiro ou um conjunto de valores verdadeiros de amplitude desprezível. Neste caso, o erro de medição é desconhecido. Não se deve confundir erro de medição com erro de produção ou erro humano.

Definição	Exemplo
Diferença entre o valor medido de uma grandeza e um valor de referência.	

Repetitividade de Medição Uma condição de medição é uma condição de repetitividade apenas com respeito a um conjunto especificado de condições de repetitividade.

Definição	Exemplo
Precisão de medição sob um conjunto de condições de repetitividade. A Condição de repetitividade é um conjunto de condições, que compreendem o mesmo procedimento de medição, os mesmos operadores, o mesmo sistema de medição, as mesmas condições de operação e o mesmo local, assim como medições repetidas no mesmo objeto ou em objetos similares durante um curto período de tempo.	

Reprodutibilidade de Medição Os termos estatísticos pertinentes são apresentados na ISO 5725-1:1994 e na ISO 5725-2:1994. A condição de reprodutibilidade é um conjunto de condições, que compreendem diferentes locais, diferentes operadores, diferentes sistemas de medição e medições repetidas no mesmo objeto ou em objetos similares. Os diferentes sistemas de medição podem utilizar procedimentos de medição diferentes. Na medida do possível, é conveniente que sejam especificadas as condições que mudaram e aquelas que não.

Definição	Exemplo
Precisão de medição sob um conjunto de condições de reprodutibilidade.	

Incerteza de Medição	<p>A incerteza de medição compreende componentes provenientes de efeitos sistemáticos, tais como componentes associadas a correções e valores designados a padrões, assim como a incerteza definicional. Algumas vezes não são corrigidos os efeitos sistemáticos estimados; em vez disso são incorporadas componentes de incerteza associadas.</p> <p>O parâmetro pode ser, por exemplo, um desvio padrão denominado incerteza de medição padrão (ou um de seus múltiplos) ou a metade de um intervalo tendo uma probabilidade de abrangência determinada.</p> <p>A incerteza de medição geralmente engloba muitos componentes. Alguns desses componentes podem ser estimados com base na distribuição estatística dos resultados das séries de medições e podem ser caracterizados por desvios padrão experimentais. Os outros componentes, que também podem ser caracterizados por desvios padrão, são avaliados por meio de distribuição de probabilidades assumidas, baseadas na experiência ou em outras informações. Mais detalhes podem ser encontrados no próprio VIM (INMETRO, 2008).</p> <p>Geralmente, para um dado conjunto de informações, subentende-se que a incerteza de medição está associada a um determinado valor atribuído ao mensurando. Uma modificação desse valor resulta numa modificação da incerteza associada.</p> <p>Entende-se que o resultado da medição é a melhor estimativa do valor do mensurando, e que todos os componentes da incerteza, incluindo aqueles resultantes dos efeitos sistemáticos, como os componentes associados a correções e padrões de referência, contribuem para a dispersão.</p>
----------------------	--

Definição	Exemplo
Parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando , com base nas informações utilizadas.	

Calibração	<p>Uma calibração pode ser expressa por meio de uma declaração, uma função de calibração, um diagrama de calibração, uma curva de calibração ou uma tabela de calibração. Em alguns casos, pode consistir em correção aditiva ou multiplicativa da indicação com uma incerteza de medição associada.</p> <p>Convém não confundir a calibração com o ajuste de um sistema de medição, frequentemente denominado de maneira imprópria de "autocalibração", nem com a verificação da calibração.</p> <p>Frequentemente, apenas a primeira etapa na definição anterior é entendida como sendo calibração.</p>
------------	---

Definição	Exemplo
Operação que estabelece, em uma primeira etapa e sob condições especificadas, uma relação entre os valores e as incertezas de medição fornecidos por padrões e as indicações correspondentes com as incertezas associadas; em uma segunda etapa, utiliza essa informação para estabelecer uma relação visando a obtenção de um resultado de medição a partir de uma indicação.	

Correção Ver o ISO/IEC Guide 98-3: 2008, 3.2.3, para uma explicação do conceito de “efeito sistemático”.
A compensação pode assumir diferentes formas, como uma adição de um valor ou uma multiplicação por um fator, ou pode ser deduzida a partir de uma tabela.

Definição	Exemplo
Compensação de um efeito sistemático estimado	

6.2.5 Dispositivos de medição

Esta seção define que dispositivos realizam a tarefa de medição.

São ao todo seis termos:

- Instrumento de Medição
- Sistema de Medição
- Instrumento de Medição Indicador
- Transdutor de Medição
- Sensor
- Detector

Instrumento de Medição Um instrumento de medição que pode ser utilizado individualmente é um sistema de medição.
Um instrumento de medição pode ser um instrumento de medição indicador ou uma medida materializada.

Definição	Exemplo
Dispositivo utilizado para realizar medições, individualmente ou associado a um ou mais dispositivos suplementares.	

Sistema de Medição Um sistema de medição pode consistir em apenas um instrumento de medição.

Definição	Exemplo
Conjunto de um ou mais instrumentos de medição e frequentemente outros dispositivos, compreendendo, se necessário, reagentes e insumos, montado e adaptado para fornecer informações destinadas à obtenção dos valores medidos, dentro de intervalos especificados para grandezas de tipos especificados.	

Instrumento de Medição Indicador Um instrumento de medição indicador pode fornecer um registro de sua indicação.
Um sinal de saída pode ser apresentado na forma visual ou acústica. Ele também pode ser transmitido a um ou mais dispositivos.

Definição	Exemplo
Instrumento de medição que fornece um sinal de saída, o qual contém informações sobre o valor da grandeza medida.	Voltímetro Micrômetro Termômetro Balança eletrônica

Transdutor de Medição

Definição	Exemplo
Dispositivo, utilizado em medição, que fornece uma grandeza de saída, que possui uma relação especificada com uma grandeza de entrada.	Termopar Transformador de corrente Extensômetro
Dispositivo que estabelece uma saída utilizável como resposta a um mensurando específico[NOR1969].	Eletrodo de pH Tubo de Bourdon Tira bimetálica

Sensor	Em algumas áreas, o termo "detector" é utilizado para este conceito.
Definição	Exemplo
Elemento de um sistema de medição que é diretamente afetado por um fenômeno, corpo ou substância que contém a grandeza a ser medida.	Bobina sensível de um termômetro de resistência de platina Rotor de um medidor de vazão de turbina Tubo de Bourdon de um manômetro Boia de um instrumento de medição de nível Fotocélula de um espectrômetro Cristal líquido termotrópico que muda de cor em função da temperatura.

Detector

Em algumas áreas, o termo "detector" é utilizado para o conceito de sensor.
Em química, o termo "indicador" é frequentemente utilizado para este conceito.

Definição	Exemplo
Dispositivo ou substância que indica a presença de um fenômeno, corpo ou substância quando um valor limite de uma grandeza associada for excedido.	Detector de fuga de halogênio Papel de tornassol.

6.2.6 Propriedades dos dispositivos de medição

Esta seção descreve as principais propriedades dos dispositivos de medição. Ao todo são nove propriedades:

- Indicador
- Amplitude de Medição
- Valor Nominal
- Sensibilidade
- Seletividade
- Resolução
- Estabilidade
- Classe de Exatidão
- Curva de Calibração

Indicador Uma indicação pode ser representada na forma visual ou acústica ou pode ser transferida a um outro dispositivo. A indicação é frequentemente dada pela posição de um ponteiro sobre um mostrador para saídas analógicas, por um número apresentado em um mostrador ou impresso para saídas digitais, por um padrão de códigos para saídas codificadas ou por um valor designado a medidas materializadas. Uma indicação e o valor correspondente da grandeza medida não são necessariamente valores de grandezas do mesmo tipo.

Definição	Exemplo
Valor fornecido por um instrumento de medição ou por um sistema de medição.	

Amplitude de Medição

Definição	Exemplo
Valor absoluto da diferença entre os valores extremos de um intervalo nominal de indicações.	Para um intervalo nominal de indicações de -10 V a +10 V a amplitude de medição é 20 V.

Valor Nominal

Definição	Exemplo
Valor arredondado ou aproximado de uma grandeza característica de um instrumento de medição ou de um sistema de medição, o qual serve de guia para sua utilização apropriada.	Valor 100 marcado em um resistor-padrão. Valor 1000 ml marcado em um frasco volumétrico que possui um traço único. Valor 0,1 mol/l da concentração em quantidade de matéria de uma solução de ácido clorídrico, HCl. Valor -20 °C de temperatura Celsius máxima para armazenamento.

Sensibilidade

- A sensibilidade pode depender do valor da grandeza medida.
- A variação do valor da grandeza medida deve ser grande quando comparada à resolução.

Definição	Exemplo
Quociente entre a variação de uma indicação de um sistema de medição e a variação correspondente do valor da grandeza medida.	

Seletividade Em física, existe somente um mensurando; as outras grandezas do mesmo tipo do mensurando são grandezas de entrada para o sistema de medição. Em química, as grandezas medidas envolvem frequentemente componentes diferentes do sistema submetido à medição e essas grandezas não são necessariamente do mesmo tipo. Em química, a seletividade de um sistema de medição é obtida normalmente para grandezas associadas a componentes selecionadas em concentrações dentro de intervalos estabelecidos. O conceito de seletividade em física é próximo daquele da especificidade, como às vezes é utilizado em química. Faixa de indicação que se pode obter em uma posição específica dos controles de um instrumento de medição.

Definição	Exemplo
Propriedade de um sistema de medição , utilizado com um procedimento de medição especificado, segundo a qual o sistema fornece valores medidos para um ou vários mensurandos , tal que os valores de cada mensurando sejam independentes uns dos outros ou de outras grandezas associadas ao fenômeno, corpo ou substância em estudo.	<p>Aptidão de um sistema de medição composto por um espectrômetro de massa para medir a razão entre correntes iônicas geradas por dois compostos especificados, sem interferência de outras fontes especificadas de corrente elétrica.</p> <p>Aptidão de um sistema de medição para medir a potência de um componente de um sinal em uma determinada frequência sem sofrer interferências de componentes do sinal ou de outros sinais, em outras frequências.</p> <p>Aptidão de um receptor para discriminar entre um sinal desejado e sinais não desejados, tendo geralmente frequências ligeiramente diferentes da frequência do sinal desejado.</p> <p>Aptidão de um sistema de medição de radiação ionizante para responder a uma radiação particular a ser medida na presença de radiação concomitante.</p> <p>Aptidão de um sistema de medição para medir a concentração em quantidade de matéria de creatinina no plasma sanguíneo por um procedimento de Jaffé sem ser influenciado pelas concentrações de glicose, urato, cetona e proteína.</p> <p>Aptidão de um espectrômetro de massa para medir a abundância em quantidade de matéria do isótopo ^{28}Si e do isótopo ^{30}Si no silício proveniente de um depósito geológico sem influência mútua ou do isótopo ^{29}Si.</p>

Resolução • A resolução pode depender, por exemplo, de ruído (interno ou externo) ou de atrito. Pode depender também do valor da grandeza medida.

Definição	Exemplo
Menor variação da grandeza medida que causa uma variação perceptível na indicação correspondente.	

Estabilidade • A estabilidade pode ser expressa quantitativamente de diversas maneiras.

Definição	Exemplo
Propriedade de um instrumento de medição segundo a qual este mantém as suas propriedades metrológicas constantes ao longo do tempo.	<p>Definir estabilidade pela duração de um intervalo de tempo ao longo do qual uma propriedade metrológica varia numa quantidade definida.</p> <p>Definir estabilidade pela variação de uma propriedade ao longo de um intervalo de tempo definido.</p>

Classe de Exatidão Uma classe de exatidão é usualmente caracterizada por um número ou por um símbolo adotado por convenção.
O conceito de classe de exatidão se aplica a medidas materializadas.

Definição	Exemplo
Classe de instrumentos de medição ou de sistemas de medição que atendem a requisitos metrológicos estabelecidos para manter os erros de medição ou as incertezas de medição instrumentais dentro de limites especificados, sob condições de funcionamento especificadas.	

Curva de Calibração Uma curva de calibração expressa uma relação biunívoca que não fornece um resultado de medição, pois ela não contém informação a respeito da incerteza de medição.

Definição	Exemplo
Expressão da relação entre uma indicação e o valor medido correspondente.	

6.2.7 Padrões

Esta seção descreve as principais propriedades dos padrões a serem utilizados como referência na realização de calibração dos dispositivos de medição. São ao todo cinco termos:

- Padrão
- Padrão Primário
- Padrão Secundário
- Padrão de Trabalho
- Calibrador

Padrão A “realização da definição de uma dada grandeza” pode ser fornecida por um sistema de medição, uma medida materializada ou um material de referência. Um padrão serve frequentemente de referência na obtenção de valores medidos e incertezas de medição associadas para outras grandezas do mesmo tipo, estabelecendo, assim, uma rastreabilidade metrológica através da calibração de outros padrões, instrumentos de medição ou sistemas de medição.

O termo “realização” é empregado aqui no sentido mais geral. Designa três procedimentos de “realização”. O primeiro, a realização *stricto sensu*, é a realização física da unidade a partir da sua definição. O segundo, chamada “reprodução”, consiste não em realizar a unidade a partir da sua definição, mas em construir um padrão altamente reprodutível baseado em um fenômeno físico, por exemplo, o emprego de lasers estabilizados em frequência para construir um padrão do metro, o emprego do efeito Josephson para o Volt ou o efeito Hall quântico para o Ohm. O terceiro procedimento consiste em adotar uma medida materializada como padrão. É o caso do padrão de 1 kg.

A incerteza padrão associada a um padrão é sempre um componente da incerteza padrão combinada (ver o Guia ISO/IEC 98-3:2008, 2.3.4) em um resultado de medição obtido ao se utilizar o padrão. Esse componente é frequentemente pequeno em comparação a outros componentes da incerteza padrão combinada.

O valor da grandeza e a incerteza de medição devem ser determinados no momento em que o padrão é utilizado.

Várias grandezas do mesmo tipo ou de tipos diferentes podem ser realizadas com o auxílio de um único dispositivo, chamado também de padrão.

O termo “padrão” é às vezes utilizado para designar outras ferramentas metrológicas como um “*software measurement standard*” (ver a ISO 5436-2).

Definição	Exemplo
Realização da definição de uma dada grandeza, com um valor determinado e uma incerteza de medição associada, utilizada como referência.	<p>Padrão de massa de 1 kg com uma incerteza padrão associada de 3 μg.</p> <p>Resistor-padrão de 100 Ω com uma incerteza padrão associada de 1 $\mu$$\Omega$.</p> <p>Padrão de frequência de césio com uma incerteza padrão relativa associada de 2×10^{-15}.</p> <p>Eletrodo de referência de hidrogênio com um valor designado de 7,072 e uma incerteza padrão associada de 0,006.</p> <p>Conjunto de soluções de referência de cortisol no soro humano, para o qual cada solução tem um valor certificado com uma incerteza de medição.</p> <p>Material de referência que fornece valores com incertezas de medição associadas para a concentração em massa de dez proteínas diferentes.</p>

Padrão Primário	Observação
Definição	Exemplo
Padrão estabelecido com auxílio de um procedimento de medição primário ou criado como um artefato, escolhido por convenção.	<p>Padrão primário de concentração em quantidade de matéria preparado pela dissolução de uma quantidade de matéria conhecida de uma substância química em um volume conhecido de solução.</p> <p>Padrão primário de pressão baseado em medições separadas de força e área.</p> <p>Padrão primário para as medições das razões molares de isótopos preparado por meio da mistura de quantidades de matérias conhecidas de isótopos especificados.</p> <p>Padrão primário de temperatura termodinâmica constituído por uma célula de ponto triplo da água.</p> <p>O protótipo internacional do quilograma como um artefato escolhido por convenção.</p>

Padrão Secundário A calibração pode ser obtida diretamente entre o padrão primário e o padrão secundário, ou envolver um sistema de medição intermediário calibrado pelo padrão primário, que atribui um resultado de medição ao padrão secundário.

Um padrão cujo valor é atribuído por um procedimento de medição primário de razão é um padrão secundário.

Definição	Exemplo
Padrão estabelecido por meio de uma calibração com referência a um padrão primário de uma grandeza do mesmo tipo.	
Padrão de Trabalho	<p>Um padrão de trabalho é geralmente calibrado em relação a um padrão de referência.</p> <p>Um padrão de trabalho utilizado em verificação é também algumas vezes denominado de “padrão de verificação” ou “padrão de controle”.</p>

Definição	Exemplo
Padrão que é utilizado rotineiramente para calibrar ou controlar instrumentos de medição ou sistemas de medição .	Em uma empresa são utilizados, na produção, multímetros para realizar medição de tensão nos produtos fabricados. Esses multímetros são calibrados uma vez por bimestre utilizando outro multímetro (Padrão de Trabalho). Esse multímetro, por sua vez, é calibrado uma vez a cada 2 anos, em um laboratório especializado, utilizando um Padrão de Referência.

Calibrador	
Definição	Exemplo
Padrão utilizado em calibrações.	Para calibrar uma balança é necessário um conjunto de massas padrão de modo a cobrir toda a faixa da balança. Aplicando-se diretamente a massa (com valor conhecido de 5 kg, por exemplo) sobre a balança, pode-se verificar se esta está calibrada. Se, com a massa padrão, houver uma diferença na indicação, esta deverá ser calibrada.

6.2.8 Sistema Nacional de Metrologia

Para que seja garantida a qualidade das medições há um complexo sistema de padrões interligados coordenado, no Brasil, pelo Inmetro [INM2012], conforme ilustrado na Figura 6.2.



FIGURA 6.2 Hierarquia do sistema metrológico [INM2012].

O sistema metrológico interliga diversos laboratórios que garantem a rastreabilidade das medições. No âmbito internacional encontra-se o BIPM – *Bureau International de Poids e Mesures*, que congrega laboratórios de

diversos países. Imediatamente abaixo estão os laboratórios nacionais que, no caso é o laboratório do Inmetro, localizado em Xerém, no Rio de Janeiro [INM2012]. Esse laboratório mantém os padrões de medida de diversas grandezas, nas seguintes áreas: Acústica, Ultrassom e Vibração; Elétrica; Mecânica; Térmica; Óptica; Química; Materiais; Dinâmica de Fluidos; Telecomunicações.

Cada um desses laboratórios é responsável por manter padrões de medidas dessas grandezas.

Somente para exemplificar, o Latce – Laboratório de Tensão de Corrente mantém os padrões para medição dessas duas grandezas, conforme ilustrado na Figura 6.3.

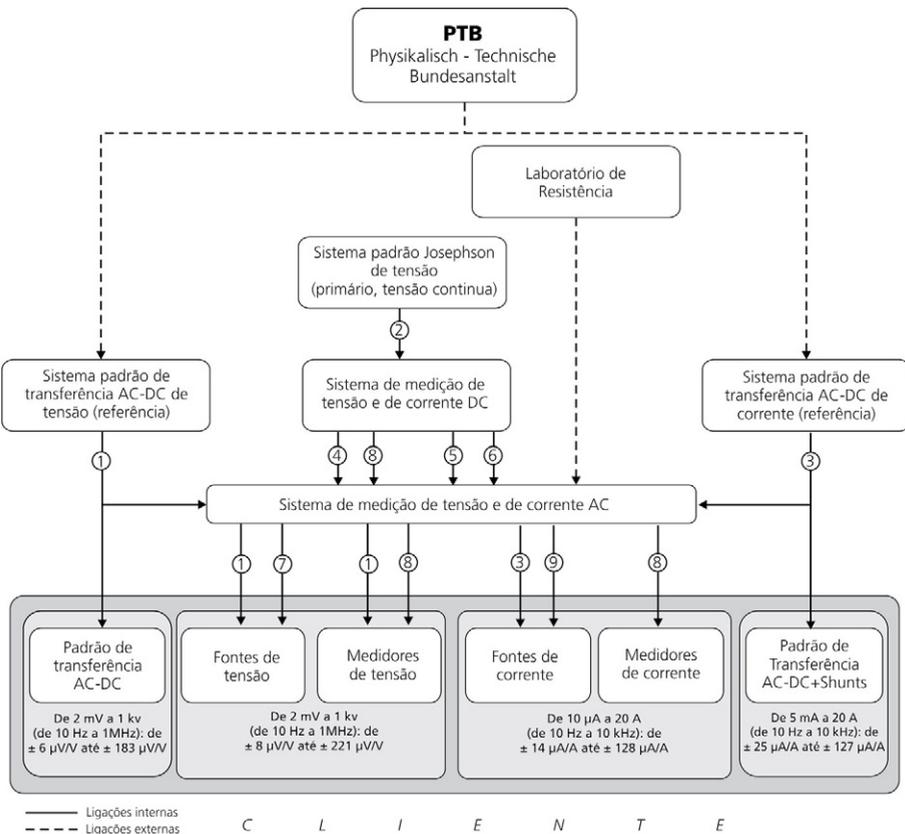


FIGURA 6.3 Lacte laboratório Inmetro tensão e corrente [INM2012].

Esses padrões são utilizados para fazer a **calibração** dos equipamentos de calibração e ensaio (terceiro nível da Figura 6.2). Os laboratórios realizam apenas serviços de calibração dos equipamentos de medição até se chegar ao último nível, no qual os equipamentos são utilizados para medições nos produtos.

À medida que se sobe na pirâmide do sistema metrológico, os equipamentos possuem maior **exatidão** e **precisão**.

6.2.9 Certificação

A certificação é uma atividade, normalmente realizada por entidade independente, para emitir um documento atestando a conformidade do equipamento ou dos processos da empresa a uma determinada Norma.

A atividade de certificação é regulamentada pelo SBC – Sistema Brasileiro de Certificação [INM2012B], controlado pelo Inmetro. No entanto, nem todas as certificações são realizadas sob a supervisão do Inmetro como é o caso de equipamentos médicos que são controlados pela Anvisa.

6.2.10 Certificação de processo e de produto

Há basicamente dois tipos de certificação: de processo e de produto.

A **certificação de processo** é a realização de procedimentos por meio dos quais se reconhece formalmente que os processos da organização avaliada estão em conformidade com determinadas normas e padrões. Por exemplo, a Norma ISO 9001:2008 estabelece os requisitos para uma empresa implantar um Sistema de Gestão da Qualidade. Uma organização que possui o certificado ISO 9001 significa que seu Sistema da Qualidade foi avaliado por uma Certificadora e concluiu, através de um método de medição de processo denominado *auditoria*, que este atende aos requisitos estabelecidos nessa Norma.

A **certificação de produto** é a realização de procedimentos por meio dos quais se reconhece formalmente que o produto avaliado está em conformidade com determinadas normas e padrões.

Quanto à obrigatoriedade há dois tipos de certificação: voluntária e compulsória. A primeira é realizada pela empresa que sentir a necessidade de realizar ensaios e verificar o enquadramento de seus produtos ou processos a determinadas Normas; no caso da segunda, a empresa está proibida de comercializar produtos que não foram certificados. Nesse segundo caso, um exemplar do produto é submetido aos ensaios especificados e, uma vez passando, a empresa recebe um certificado de conformidade com um prazo de validade. Durante essa vigência, a entidade que certificou pode recolher amostras dos produtos fabricados para verificação da conformidade (isso é feito para garantir que o que está sendo fabricado possui as mesmas características do produto que foi ensaiado, para evitar fraudes).

As certificações compulsórias normalmente têm por objetivo garantir a segurança do usuário final. Por exemplo, há normas para equipamentos médicos que verificam se o paciente ou o atendente correm o risco de levar choque ou se o equipamento que dá suporte à vida para de funcionar na presença de distúrbios na rede de alimentação.

6.2.11 Certificação de terceira parte

Com relação a quem faz a certificação há três possibilidades:

- Certificação de primeira parte: é a autodeclaração de certificação, na qual uma empresa se autodeclara que atende determinada Norma (produto ou processo).
- Certificação de segunda parte: o comprador realiza ensaios ou auditorias e verifica e certifica o fornecedor. Normalmente isso é feito em casos muito específicos em que somente o comprador possui equipamentos especiais para realizar ensaios e emitir a conformidade.
- Certificação de terceira parte: uma entidade independente do comprador e do fornecedor realiza a certificação do produto ou do processo.

Quando há a necessidade de certificação compulsória de produtos, normalmente a certificação é de terceira parte, pois é necessária uma entidade *acreditada* (que obteve autorização para emitir os certificados) para realizar os ensaios e emitir um laudo de conformidade. Além disso, muitas medições necessitam de equipamentos especiais que as empresas normalmente não possuem.

6.2.12 Barreiras técnicas

Outra questão importante que deve ser citada com relação aos mecanismos de certificação refere-se à segurança dos produtos de consumo. São ensaios que verificam se os produtos não oferecem perigo ao usuário. Para se exportar um produto para os Estados Unidos, é mandatório que sejam obedecidas determinadas Normas e, após ensaiado e aprovado com sucesso, obtém o selo UL.¹ Para a União Europeia são outras Normas e o selo é CE.² Isso garante uma qualidade mínima para os produtos e também garante que sejam expurgados produtos de baixa qualidade e inseguros.

Um exemplo recente de exigência da Comunidade Europeia é a diretiva Rohs [EPD2003] que obrigou, a partir de 01/07/2006, que nenhum equipamento eletrônico contenha em sua composição metais pesados, por causa da poluição provocada pelo lixo eletrônico. Isso significa a proibição de uso do chumbo usado na solda. A solda estanho/chumbo é usada há cerca de 100 anos, e sua proibição levou ao desenvolvimento de solda com outras composições. No entanto, essa tecnologia ainda não está aperfeiçoada, e a solda pode apresentar problemas ao longo do tempo. Para equipamentos de missão crítica (controle de avião ou equipamentos médicos, por exemplo) ainda é permitida a solda estanho/chumbo. Outros países não fazem esse tipo de exigência, entre eles os Estados Unidos.

¹UL = Underwriters Laboratories (<http://www.ul.com/global/por/pages/>)

²CE = Commission Européenne (<http://ec.europa.eu/enterprise/policies/single-market-goods/cemarking/>)

Vale lembrar que a exportação de produtos industrializados, em razão de diversos acordos do comércio internacional, tem obrigado os países a reduzirem as barreiras de importação. Isso levou alguns países a criarem outra forma de barreira: a barreira técnica. As barreiras técnicas são uma forma dissimulada de impedir a importação de determinados produtos a partir da exigência no atendimento a determinadas Normas. Os países que detêm tecnologias mais avançadas criam exigências de atendimento de forma que somente seus produtos consigam cumprir.

Alguns exemplos de certificações existentes no mercado:

- UL – Under writer Laboratories (USA)
- CE – Comunidade Europeia
- ISO 9001 sistema de gestão da qualidade
- ISO 14001 sistema de gestão ambiental
- TS 16949 – indústria automobilística
- Boi rastreado
- Madeira certificada

Sem fazer juízo de valor desse fato, pois tais exigências são feitas normalmente em nome de maior segurança do usuário, preservação do meio ambiente e outras justificativas, é importante ter consciência que tais fatos ocorrem. Evidentemente, tais selos têm por objetivo preservar a segurança do cidadão que vai utilizar esses equipamentos. Não há nada contra a existência dessas Normas que, aliás, são muito importantes. A crítica refere-se ao fato de tais normas não serem universais, pois, se são importantes para um país, deveriam ser igualmente importantes para todos os países.

O Inmetro dá apoio para as empresas interessadas em realizar exportações e encontram esse tipo de barreira (<http://www.inmetro.gov.br/barreirastecnicas/>).

Para concluir, no projeto, comercialização ou fabricação de produtos, é importante conhecer as certificações exigidas e como se pode realizá-las de maneira a enquadrar os equipamentos para poderem ser exportados.

6.3 Transdutores

Os transdutores (definidos na [Seção 6.2.5](#)) são os elementos que realizam a transformação da grandeza que se deseja medir para outra forma de energia. Há diversas formas de se fazer isso, mas aqui somente serão discutidos os transdutores que transformam em grandezas elétricas. Por exemplo, para medir pressão há o tubo de Bourdon, que transforma a pressão em um movimento mecânico que deflete um ponteiro e indica o valor medido. Tal transdutor, entretanto, não atende às necessidades de um sistema de automação, que necessita de uma grandeza elétrica para poder funcionar.

Conforme definiu Norton [[NOR1969](#)], um transdutor pode ser descrito com base nas seguintes considerações:

- O que se pretende medir com o transdutor? (**mensurando**)
- Em que parte do transdutor é originada a saída (**elemento de transdução**) e qual é a natureza de sua operação (**princípio de medição**)?
- Qual dispositivo no transdutor responde diretamente ao mensurando (**sensor**)?
- Quais são as características especiais notáveis ou disposições são incorporadas dentro do transdutor?
- Quais são os limites superior e inferior dos valores do **mensurando** para os quais o transdutor foi concebido? (**amplitude de medição**).

Há muitas maneiras diferentes de se cumprir as medidas das grandezas de um processo. Normalmente há diversas tecnologias que podem ser aplicadas para realizar a medição dessas grandezas, e cada uma delas apresenta seus prós e contras. Uma responsabilidade do técnico de instrumentação é conhecer esses prós e contras, de modo escolher a melhor tecnologia para a aplicação. Tal conhecimento é obtido compreendendo-se os princípios de funcionamento de cada tecnologia [KUP2008].

Neste capítulo os transdutores foram divididos por família de grandezas medidas e foram agrupados nas seguintes categorias:

- Grandezas Elétricas
- Medida de Temperatura
- Grandezas Cinéticas
- Medidas de Líquidos e Gases
- Medida de Composição de Gases
- Medida de Umidade, pH e Viscosidade
- Atuadores

O **Quadro 6.2** apresenta a relação completa dos transdutores selecionados que permitem a medição de diversas grandezas visando apresentar uma visão do conjunto e facilitar a compreensão.

Quadro 6.2 Relação dos transdutores e medidores selecionados

6.3.1	6.3.2	6.3.3	6.3.4	6.3.5	6.3.6
<i>Medida de Grandezas Elétricas</i>	<i>Medida de Temperatura</i>	<i>Medida de Grandezas Cinéticas</i>	<i>Medidas de Fluidos</i>	<i>Analísadores</i>	<i>Atuadores</i>
Tensão	Termopares	Força	Pressão	-analísadores de gás	
Corrente	Termômetros de Resistência	Deslocamento	Vazão	-analísadores de líquidos -analísadores de água -cromatógrafos -espectrômetro	
Frequência	Semicondutores	Posição	Nível		
Potência	Infravermelho e Pirômetro	Velocidade			
Fase	Termógrafo	Aceleração			
Energia	Bolômetros	Vibração			

6.3.1 Medida de grandezas elétricas

As grandezas elétricas são: tensão, corrente e frequência. Nesta lista também foram acrescentadas outras medidas indiretas, totalizando seis itens para esse grupo:

- Tensão
- Corrente
- Frequência
- Potência
- Fase
- Energia

As grandezas elétricas podem ser contínuas ou alternadas. As tensões (V_{cc}) e correntes (A_{cc}) contínuas são valores que não variam no tempo com frequência nula. Normalmente são utilizados para alimentar circuitos ou realizar polarização de dispositivos.

Uma frequência muito importante é 60 Hz, utilizada para geração e distribuição de energia elétrica e, portanto, com necessidade de diversas medições. Em alguns países, a frequência da rede é 50Hz, como Alemanha, Paraguai e Argentina.

As demais frequências são utilizadas em eletrônica para diversas finalidades, como modulação de dados e comunicação.

Os medidores de tensão (voltímetros) e de corrente (amperímetros) normalmente medem essas grandezas contínuas ou alternadas considerando formas de onda senoidais. Para medidas de outras formas de onda, como onda quadrada, triangular ou mais complexas, é necessário o uso de equipamentos mais sofisticados.

6.3.1.1 Tensão

DEFINIÇÃO

Tensão é a quantidade de energia potencial específica disponível entre dois pontos em um circuito elétrico [KUP2008].

UNIDADE

A unidade de medida da tensão é **Volt**, em homenagem a Alessandro Volta.

Também é denominada **voltagem** quando se refere à tensão entre dois pontos.

Símbolo: V, V_{CC} ou V_{CA} .

OUTRAS DEFINIÇÕES

Para a indicação de tensão contínua é comum utilizar o símbolo V_{cc} indicando corrente contínua. Em inglês V_{DC} (*direct current*).

Para a indicação de tensão alternada utiliza-se V_{CA} .

MEDIÇÃO DA GRANDEZA

A medição da tensão é feita com o **voltímetro**. Observando a [Figura 6.4](#), a principal característica do voltímetro é possuir alta impedância. Para medir a tensão é necessário que o voltímetro tenha uma impedância muito maior que R_2 a fim de que a interferência no circuito seja desprezível.

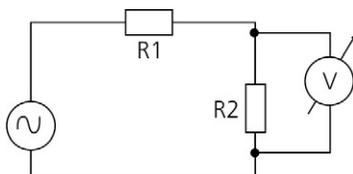


FIGURA 6.4 Voltímetro.

A medição da tensão é feita através de dois principais elementos sensores: o galvanômetro e o resistor.

ELEMENTOS SENSORES

O voltímetro tradicional utiliza como transdutor o galvanômetro, que possui um ponteiro acoplado a uma bobina móvel que deflete ao ser aplicada uma tensão de excitação da bobina. Trata-se de um **indicador** cujo valor medido é dado pela posição de um ponteiro sobre um mostrador. No entanto, esse tipo de voltímetro não permite o envio do valor medido para um sistema de automação.

Os voltímetros eletrônicos identificam a tensão através de circuitos de alta impedância (equivalente a resistores de valor muito alto) e convertem o valor medido em digital, por meio de conversores análogo-digitais (descritos no capítulo anterior).

DESCRIÇÃO DE PROPRIEDADES

Nos voltímetros digitais a medida é realizada através de um conversor A/D, que transforma o valor medido em um número que depende do número de bits de conversão. Há voltímetros com diferentes **resoluções**, por exemplo 3 ½ dígitos, que permitem a contagem de valores que variam de 0 a 1999. Um multímetro com melhor **resolução** seria um com 4 ½ dígitos, que realiza contagem na faixa de 0 a 19999.

Exemplo: Um voltímetro de 3 ½ dígitos na escala de 20V mede valores de 0V a 19,99V como 15,23V, com duas casas depois da vírgula. Um voltímetro de 4 ½ dígitos nessa mesma escala de 20V o valor 15,236V, com três casas depois da vírgula.

Os voltímetros possuem, na entrada, divisores de tensão organizados em diversas escalas que reduzem a tensão para valores compatíveis com o conversor A/D e aumentam a impedância de entrada de modo a não interferir no circuito

medido. Voltímetros mais sofisticados mudam de escala automaticamente [BAL2010-1].

SELEÇÃO DOS MEDIDORES

Os voltímetros geralmente são equipamentos de baixo custo. Para medição de tensões da ordem de 100 mV a cerca de 1 kV contínuo ou senoidal, é fácil realizar medições.

Uma questão importante que deve ser lembrada é o fato de os voltímetros e amperímetros estarem **calibrados** para formas de onda senoidais. Formas de onda que não sejam senoides puras apresentarão uma **indicação** errada do **valor medido**. Para contornar essa questão existem voltímetros especiais denominados voltímetros de valor verdadeiro (*true RMS – root mean square*) que foram construídos de maneira a fazer uma indicação correta independente da forma de onda. Vide bolômetro na Seção 0.

A medição de formas de onda com frequências mais altas também torna os multímetros inadequados. Para medição de formas de onda mais complexas e com frequências mais altas é recomendável o uso de osciloscópio, um equipamento mais adequado para essa finalidade. A descrição do osciloscópio foge ao escopo deste livro, mas pode ser vista em Balbinot [BAL2010-1].

6.3.1.2 Corrente

DEFINIÇÃO

Corrente é o nome dado ao movimento de cargas elétricas de um ponto de alto potencial para um ponto de baixo potencial [KUP2008].

UNIDADE

A unidade de medida da corrente é **Ampere**, em homenagem a André Marie Ampère.

Símbolo: A.

OUTRAS DEFINIÇÕES

Da mesma forma que a tensão, a corrente pode ser contínua ou alternada. A corrente contínua não varia de valor ao longo do tempo. A corrente alternada varia no tempo normalmente de forma cíclica. Uma corrente alternada muito importante é a senoidal. A rede elétrica fornece corrente senoidal. Não é comum usar o símbolo A_{CC} ou A_{CA} .

EQUAÇÕES

O valor de 1A equivale à passagem de uma carga de 1 Coulomb por segundo: $1A = 1C/s$.

A relação entre corrente e tensão é dada pelas equações da eletricidade. Uma das mais importantes é a lei de Ohm que estabelece:

$V = R \times I$, onde:

V – tensão em Volts

R – resistência em Ω (Ohms)

I – corrente em Amperes

MEDIÇÃO DA GRANDEZA

A medida da corrente é feita com o amperímetro. Observando a [Figura 6.5](#), a principal característica do amperímetro é possuir baixa impedância. Para medir a corrente é necessário que o amperímetro tenha uma impedância muito menor que R1 e R2 de modo a não interferir no circuito.

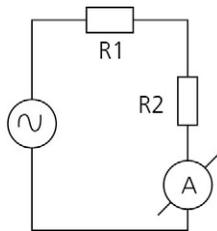


FIGURA 6.5 Amperímetro.

ELEMENTOS SENSORES

O amperímetro tradicional utiliza como sensor um resistor de baixo valor denominado *shunt* e mede a tensão sobre esse componente com um galvanômetro de forma similar ao voltímetro.

Podem ser utilizados diversos sensores para medir corrente:

Sensor resistivo – mede-se a tensão em cima do resistor;

Transformador de corrente – funcionam apenas com corrente alternada. Possui isolamento, mas é difícil o funcionamento em uma larga faixa de frequência. Muito utilizado nos sistemas de energia elétrica para medição de correntes altas;

Sensor de efeito hall – a circulação de corrente provoca uma tensão transversal ao seu fluxo. Esse efeito é usado para fazer a medição de corrente. A vantagem desse sensor é permitir a medição de correntes com uma larga faixa de frequências (de CC a dezenas de MHz) [BAL2010-1].

SELEÇÃO DOS MEDIDORES

Os amperímetros geralmente são equipamentos de baixo custo e são adquiridos em multímetros que incorporam em um só equipamento voltímetro, amperímetro e ohmímetro. Para medição de correntes da ordem de 1 mA a cerca de 10 A contínuo ou senoidal, é fácil realizar medições.

Correntes altas, acima de 20A, são medidas através de transformadores de corrente. Esses transformadores medem, por exemplo, até 1.000 A e reduzem na saída para valores padronizados como 5A, por exemplo.

Vale o mesmo comentário referente à forma de onda senoidal. Amperímetros de valor verdadeiro (*true RMS*) também permitem a medida correta independente da forma de onda. Vide bolômetro na Seção 0.

6.3.1.3 Frequência

DEFINIÇÃO

Frequência é a variação da tensão ou corrente no tempo. Essa definição é válida para formas de onda cíclicas, ou seja, que se repetem no tempo.

UNIDADE

A unidade de medida da frequência é Hertz, em homenagem a Heinrich Rudolf Herz.

O valor de 1 Hz corresponde a uma frequência de um ciclo por segundo.

Símbolo: **Hz**.

É comum a medida de frequências mais altas utilizando-se kHz (10^3 Hz), MHz (10^6 Hz) ou mesmo GHz (10^9 Hz).

OUTRAS DEFINIÇÕES

Para uma forma de onda senoidal $V(t) = V_p \text{ sen } (\omega t)$ onde:

$$\omega = 2\pi f$$

$V(t)$ – valor da tensão instantânea

V_p – valor da tensão de pico (valor máximo)

ω – velocidade angular em rd/s

f – frequência em Hz

t – tempo em segundos

MEDIÇÃO DA GRANDEZA

A medida da frequência é feita com o **frequencímetro**. Mede-se a frequência de sinais repetitivos, ou seja, formas de onda que se repetem no tempo, senoidais ou não.

Na verdade, o frequencímetro mede intervalo de tempo (período) e depois é calculada a frequência $f = 1/T$.

ELEMENTOS SENSORES

O tempo normalmente é medido a partir de uma referência oferecida por osciladores a cristal que apresentam grande estabilidade tanto com relação ao tempo quanto à variação da temperatura.

SELEÇÃO DOS MEDIDORES

Há alguns modelos de multímetros que incorporam frequencímetros. Para a medição de frequências de alguns Hz até alguns MHz esses instrumentos são suficientes. A medição de frequências muito baixas é mais difícil por causa

de derivas (variações com a temperatura e com o tempo), e a medição de frequências muito altas também requer cuidados especiais por se tratarem de sinais de tensão baixa e sensíveis às características dos medidores.

6.3.1.4 Potência (elétrica)

DEFINIÇÃO

Potência é quantidade de energia transferida por uma fonte na unidade de tempo (física).

UNIDADE

A unidade de medida de potência é **Watt** em homenagem a James Watt.

Símbolo: **W**

EQUAÇÕES

A potência é, por definição, $P = \int [V(t).I(t).\delta t]$.

Na equação que determina o valor da potência $P = V.I.\cos\phi$, o fator $\cos\phi$ é denominado fator de potência. O fator de potência é um valor que varia de zero a um. O valor unitário significa que não tem defasagem entre corrente e tensão. As concessionárias de energia exigem que os consumidores controlem esse fator e que estes sejam próximos do valor unitário para evitar erros de medida e problemas na qualidade da energia.

OUTRAS DEFINIÇÕES

A potência de 1W corresponde a 1 joule por segundo (J / s).

Outra unidade de potência também utilizada é o cavalo-vapor (HP – *horse power*)

1 HP = 745,7 W.

O efeito da defasagem entre corrente e tensão ($\cos\phi < 1$) é a retenção de energia nas indutâncias e capacitâncias da rede que atrapalham a entrega ao consumidor final.

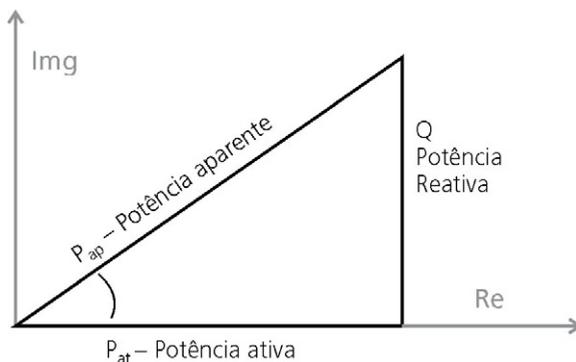


FIGURA 6.6 Potências aparente, ativa e reativa.

Assim, por definição, há a potência real, aparente e reativa. A relação entre elas é:

$$P_{AP} = P_{AT} + j Q \text{ onde:}$$

P_{AP} – potência aparente em VA (Volt Ampere)

P_{AT} – potência ativa em W

Q – potência reativa em VAR

$$P_{AT} = P_{AP} \cos\varphi \text{ W}$$

$$Q = P_{AP} \sin\varphi \text{ VAR}$$

[BAL2010-1]

MEDIÇÃO DA GRANDEZA

Para corrente contínua, a potência é calculada através do produto $P = VI$ e, portanto, basta medir essas duas grandezas e calcular a potência.

Para corrente alternada (senoidal), a medida não é tão simples assim, pois pode ocorrer defasagem entre corrente e tensão, e a equação toma a seguinte forma: $P = VI \cdot \cos\varphi$, onde φ é o ângulo de defasagem entre corrente e tensão, considerando forma de onda senoidal tanto da tensão como da corrente. Essa defasagem ocorre em virtude de os circuitos possuírem indutâncias e capacitâncias que armazenam e devolvem energia, atrapalhando seu fluxo. Portanto, na medida da potência é necessário medir a tensão, a corrente e a defasagem entre eles.

ELEMENTOS SENSORES

Os elementos sensores para medida de potência são, na realidade, os elementos sensores de tensão e corrente. Há wattímetros construídos especialmente para oferecerem diretamente o valor da potência que são, na verdade, uma combinação construtiva de um amperímetro e um voltímetro conjugados.

Outro tipo de transdutor é o **wattímetro térmico**, que transforma a energia elétrica em térmica proporcional à potência fornecida (vide bolômetro na Seção 6.3.2.7).

Outra tecnologia que é usada é o **wattímetro de efeito Hall**: a tensão é dependente da corrente e do campo magnético ortogonal.

Os wattímetros baseados em **multiplicadores analógicos** realizam a multiplicação do sinal de tensão com o sinal de corrente para obter a potência.

Finalmente, o wattímetro digital recebe a tensão e a corrente e, com conversores A/D, as transforma em valores numéricos e calcula a potência fazendo a integração numérica no tempo.³ [BAL2010-1].

SELEÇÃO DOS MEDIDORES

A seleção de wattímetros está ligada à aplicação em si. Para medição de potência de energia elétrica, os equipamentos mais comuns são medidores de energia (des-

³Observe que, conforme explicado no Capítulo 5, com o teorema da amostragem é possível fazer a conversão análogo-digital de sinais e obter os valores numéricos desses sinais. No exemplo lá ilustrado, com um microcontrolador de baixo custo pode-se ler sinais de até 30kHz, mostrando que é possível medir frequências da rede elétrica e seus harmônicos. Com isso, a medida da potência calculada pelo método de integração numérica é simples de ser feita.

critos mais adiante) e não medidores de potência. Para aplicações em que é necessário medir potência instantânea é importante uma avaliação mais profunda por causa da qualidade da medida: quais as frequências envolvidas, quais os níveis de tensão e corrente. Há osciloscópios especiais que permitem fazer essa medição, através da leitura simultânea de corrente e tensão e, com isso, calcular a potência.

6.3.1.5 Fator de potência

DEFINIÇÃO

O fator de potência é a medida da defasagem entre corrente e tensão.

UNIDADE

Adimensional. É um valor que varia de zero a um.

Valor unitário significa corrente e tensão em fase.

OUTRAS DEFINIÇÕES

As concessionárias de energia exigem que os consumidores controlem esse fator e que estes sejam próximos do valor unitário para evitar erros de medida e problemas na qualidade da energia, conforme explicado no item potência (0).

EQUAÇÕES

Na equação que determina o valor da potência $P = V.I.\cos\varphi$ o fator $\cos\varphi$ é denominado fator de potência.

MEDIÇÃO DA GRANDEZA

A medição do fator de potência é feito com o cosfímetro (medidor de coseno φ).

ELEMENTOS SENSORES

Há medidores tradicionais que utilizam arranjos complexos de galvanômetros para indicar o fator de potência, mas também não são adequados para automação.

O método mais popular de medição do fator de potência é fazer a detecção da passagem por zero da corrente e da tensão e medir diretamente a diferença de tempo e, portanto, a defasagem.

Os multímetros vetoriais também permitem a medição de fase. São voltímetros digitais que leem a senoide de entrada (frequência da rede), fazem a conversão A/D e, através de modelamento matemático, calculam o fator de potência [BAL2010-1].

SELEÇÃO DOS MEDIDORES

Há medidores de fator de potência portáteis, às vezes incorporados em multímetros sofisticados ou em equipamentos portáteis medidores de qualidade de energia.

Há também medidores de fator de potência de painel para serem montados em quadros de controle de energia.

6.3.1.6 Medida de energia

DEFINIÇÃO

Energia é a quantidade de trabalho que um sistema é capaz de realizar [BAL2010-1].

UNIDADE

A energia é medida em Joules.

Símbolo: J.

OUTRAS DEFINIÇÕES

A energia elétrica normalmente é medida em kWh – quilowatt/hora que corresponde ao gasto de 1 kW durante uma hora.

O valor corresponde a 1 kWh = 3,6 MJ (Mega Joules).

EQUAÇÕES

A energia pode ser definida como a integral da potência em um determinado intervalo de tempo: $E = \int [P(t) \cdot \delta t]$.

MEDIÇÃO DA GRANDEZA

Os medidores tradicionais são também construídos com base em um Wattímetro acoplado a um mecanismo totalizador que indica numericamente a quantidade de energia que passou pelo instrumento. São os relógios de energia na entrada da maioria das residências. Esses instrumentos não têm utilidade para automação.

Os medidores de energia estáticos (eletrônicos) realizam a conversão A/D como similares aos medidores de potência só que realizando a tarefa de integrar os valores ao longo do tempo. Há circuitos integrados dedicados que realizam especificamente essa função, por exemplo, o ADE7758 da Analog Devices e outros [\[BAL2010-1\]](#).

ELEMENTOS SENSORES

Os elementos sensores são os mesmos anteriores para medir tensão e corrente.

SELEÇÃO DOS MEDIDORES

Os medidores de energia tradicionais são os residenciais que totalizam a energia gasta em um consumidor. Há uma geração mais moderna totalmente digital que vai substituir os atuais e enviar diretamente o consumo de energia para a concessionária através de uma rede de comunicação denominada Smart-Grid.

Há ainda uma classe especial de instrumentos denominados analisadores de energia que calculam não somente a energia e a potência, mas também o fator de potência, a distorção harmônica, enfim, diversas medidas da rede elétrica que determinam a qualidade da energia.

6.3.2 Medida de temperatura

Vale ressaltar que a medida de temperatura é tão importante, e existem tantas diferentes técnicas, que foi criado um item específico para essa grandeza. Dependendo do valor da temperatura, da amplitude de medição e da precisão, diferentes técnicas são utilizadas. Foram selecionadas sete diferentes técnicas:

- Termopares
- Termômetros de resistência

- Termistores NTC e PTC
- Semicondutores
- Infravermelho e pirômetro
- Termógrafo
- Bolômetros

DEFINIÇÃO

Temperatura é a medida da energia cinética média das moléculas de uma substância [KUP2008].

UNIDADE A unidade de medida da temperatura é Graus Kelvin.

Símbolo: °K

OUTRAS DEFINIÇÕES

Outras unidades também são utilizadas para medição de temperatura: graus Centígrados e graus Fahrenheit.

O valor 273,15 °K = 0°C

O valor 273,15 °K = 32°F

6.3.2.1 Termopares

MEDIÇÃO DA GRANDEZA

Os termopares são **transdutores de medição** de temperatura construídos a partir do efeito termoelétrico, ou efeito Seebeck: ao se criar a junção de dois metais diferentes é gerada uma tensão cujo valor varia com a temperatura. Sem entrar em mais detalhes, os termopares são construídos a partir de diferentes pares metálicos normalizados para diferentes aplicações [NOR1969; KUP2008].

ELEMENTOS SENSORES

Há diversos tipos de termopares padronizados no mercado, por exemplo, da ANSI listados no **Quadro 6.3** [TMP2013].

Quadro 6.3 Termopares comerciais (padrão ANSI) [TMP2013]

	tipo	Símb.	Material	Temperatura	Tensão gerada	Aplicações
1	T	CuCo	Cobre Constantan	-60 a 370°C	-5,333 a 19,027 mV	1
2	J	FeCo	Ferro Constantan	0 a 800°C	0 a 42,922 mV	2, 3, 4
3	E	NiCr	Níquel Cromo	0 a 810°C	0 a 66,473 mV	3
4	K	NiCr-Ni	Chromel – Ni90% Cr10% Constantan-Cu58% Ni48%	0 a 1.260°C	0 a 50,990 mV	4, 5, 6
5	S	PtPtRh	Platina 90% Rhodio 10% Platina 100%	0 a 1.480°C	0 a 15,336 mV	4, 5, 6, 7
6	R	PtPtRh	Platina 87% Rhodio 13% Platina 100%	0 a 1.480°C	0 a 15,336 mV	4, 5, 6, 7
7	B	PtRhPt	Platina 70% Rhodio 30% Platina 94% Rhodio 6%	500 a 1.700°C	3,708 a 12,485 mV	6

As aplicações são para diversas indústrias:

- 1 –criogenia (baixas temperaturas), indústria de refrigeração, pesquisas agrônômicas e ambientais
- 2 –centrais de energia
- 3 –química e petroquímica
- 4 –metalurgia
- 5 –fundição, cimento e cal, cerâmica
- 6 –vidro, siderurgia
- 7 –sensores descartáveis utilizados para medição de metais líquidos

DESCRIÇÃO DE PROPRIEDADES

Os termopares, como **transdutores de medição**, geram tensões que precisam ser tratadas por um circuito eletrônico. As faixas de tensão geradas são muito baixas e precisam ser amplificadas e linearizadas, pois a relação temperatura/tensão não é uma linha reta.

Tal tratamento pode ser analógico, com amplificadores operacionais, ou digitais, com o uso de conversores A/D e microcontroladores. A saída desses instrumentos oferece a indicação da temperatura propriamente dita em Graus Centígrados ($^{\circ}\text{C}$) ou Kelvin ($^{\circ}\text{K}$).

SELEÇÃO DOS MEDIDORES

A [Figura 6.7](#) ilustra o termopar sem proteção e a [Figura 6.8](#) ilustra o termopar pronto para uso com proteção metálica [\[ECL2013\]](#).

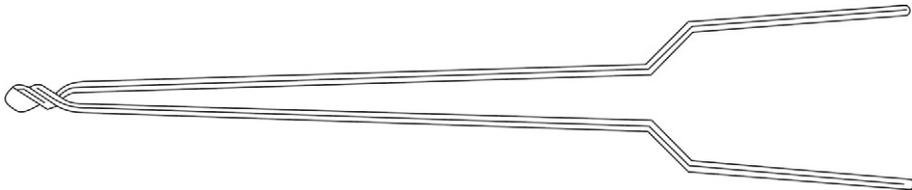


FIGURA 6.7 Termopar [\[ECL2013\]](#).

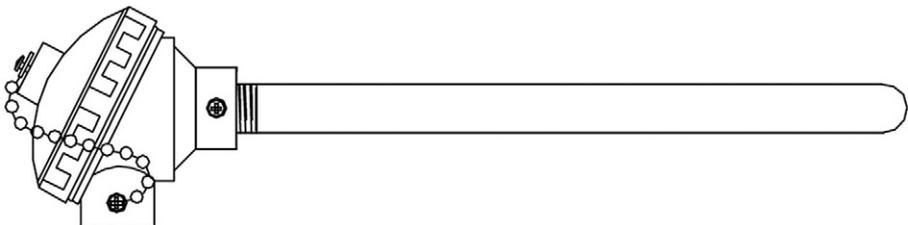


FIGURA 6.8 Termopar com proteção metálica [\[ECL2013\]](#).

A seleção dos termopares em função de cada aplicação específica está apresentada no [Quadro 6.3](#).

6.3.2.2 Termorresistência - RTD

MEDIÇÃO DA GRANDEZA A termorresistência, ou RTD – *Resistance Temperature Detector*, são dispositivos que medem a temperatura a partir de resistências que possuem a propriedade de variar o seu valor com a temperatura. Normalmente são formadas por metais puros (como platina ou cobre) que aumentam a resistência com o aumento da temperatura.

EQUAÇÕES

A medida pode ser feita com:

$R_T = R_{ref} [1 + \alpha (T - T_{ref})]$, onde:

R_T = Valor da resistência na temperatura dada T (Ω)

R_{ref} = Valor da resistência na temperatura de referência T_{ref} (Ω)

α = Coeficiente de temperatura da resistência medido em $\Omega / \Omega ^\circ C$

Os valores de α para alguns metais são:

Níquel = 0,00672 $\Omega / \Omega ^\circ C$

Platina = 0,00392 $\Omega / \Omega ^\circ C$

Cobre = 0,0038 $\Omega / \Omega ^\circ C$

A fórmula apresentada não possui muita precisão e pode ser aperfeiçoada com equações com polinômios de grau superior [KUP2008].

ELEMENTOS SENSORES

Os elementos sensores, conforme já explanado, são resistores que variam de valor. Portanto, a medição trata apenas de estabelecer a relação do valor da resistência com a temperatura, de acordo com a equação apresentada.

DESCRIÇÃO DE PROPRIEDADES

Os RTD permitem medir temperaturas até cerca de 800 $^\circ C$. O [Quadro 6.4](#) apresenta um tipo popular de termorresistência denominado PT-100 para diversas faixas de temperatura.

Quadro 6.4 Termo resistência PT 100 [TMP2013]

	material	temperatura	resistência
1	PT-100	-200 a 70 $^\circ C$	18,49 a 130,51 Ω
2	PT-100	80 a 340 $^\circ C$	130,89 a 229,32 Ω
3	PT-100	350 a 620 $^\circ C$	229,67 a 322,86 Ω
4	PT-100	630 a 850 $^\circ C$	323,18 a 390,26 Ω

Seleção dos medidores

As termorresistências, como **transdutores de medição**, apresentam valores de resistência que podem ser transformadas em temperatura. Como no caso anterior, esse tratamento pode ser analógico ou digital. A saída desses ins-

trumentos oferece a indicação da temperatura propriamente dita em Graus Centígrados ($^{\circ}\text{C}$) ou Kelvin ($^{\circ}\text{K}$).

A Figura 6.9 apresenta uma ilustração de um conjunto de termorresistências de um fabricante [ASH2013].



FIGURA 6.9 Termorresistências [ASH2013].

6.3.2.3 Termistores NTC e PTC

MEDIÇÃO DA GRANDEZA

Os termistores são dispositivos formados por óxidos metálicos, são não lineares e apresentam valores de resistência maiores que os RTD. Outra característica importante dos termistores é a possibilidade de uso de coeficientes de temperatura positivos ou negativos [BEG2006].

ELEMENTOS SENSORES

Os termistores PTCs possuem coeficiente térmico positivo, ou seja, ao aumentar a temperatura, aumenta a resistência.

De forma inversa, os NTCs reduzem o valor da resistência com o aumento da temperatura.

Os termistores trabalham com temperaturas até cerca de 300°C [KUP2008], [BEG2006].

DESCRIÇÃO DE PROPRIEDADES

Além da aplicação como **transdutores de medição**, há outras aplicações dos termistores em circuitos eletrônicos para cumprirem a tarefa de compensação de temperatura realizando uma topologia de circuito de tal forma que um

elemento que apresenta variação positiva com a temperatura seja associado a um termistor NTC de forma a um compensar o efeito do outro na faixa de temperatura de trabalho do equipamento. Outra aplicação interessante é em circuitos de potência, em que se utiliza um NTC como resistor que tem alta resistência na temperatura ambiente para limitar a corrente de partida em um circuito que, após ser ligado, circula uma corrente pelo próprio NTC, provocando seu aquecimento e reduzindo a resistência.

A [Figura 6.10](#) ilustra um PTC e NTC.



FIGURA 6.10 PTC e NTC.

SELEÇÃO DOS MEDIDORES

A seleção de termistores depende da aplicação específica e da faixa de temperatura, mas esse dispositivo permite temperaturas até cerca de 250 °C.

6.3.2.4 Semicondutores

MEDIÇÃO DA GRANDEZA

Os sensores de temperatura com base em semicondutores são muito oportunos, pois podem ser construídos no mesmo circuito integrado que realiza o tratamento do sinal, permitindo uma grande compactação do dispositivo. Esses sensores baseiam-se no princípio da junção semicondutora PN de um transistor que, quando polarizada, apresenta uma tensão que varia com a temperatura.

EQUAÇÕES

A tensão em uma junção semicondutora oferece a tensão de junção base-emissor de um transistor:

$$V_{BE} = (KT/q) * \ln (i_C/i_S), \text{ onde}$$

- K – constante de Boltzmann
- q – carga elétrica
- T – temperatura absoluta do dispositivo
- i_C – corrente de coletor do transistor
- i_S – corrente de base do transistor
- I_n – corrente do dispositivo

[BAL2011]

ELEMENTOS SENSORES E DESCRIÇÃO DAS PROPRIEDADES

Nos medidores de temperatura com base em semicondutores, o sensor é a própria junção que estabelece uma tensão que varia com a temperatura. O circuito montado em torno desse sensor permite fazer a leitura desse valor.

SELEÇÃO DOS MEDIDORES

A vantagem dos medidores semicondutores é o baixo custo. A desvantagem desse tipo de sensor é a baixa faixa de temperatura que pode trabalhar, até cerca de 100 °C. Os termômetros digitais adquiridos em farmácia, em sua maior parte, são semicondutores.

Os medidores de temperatura semicondutores são oferecidos no mercado como circuitos integrados.

6.3.2.5 Pirômetros óticos e infravermelhos

MEDIÇÃO DA GRANDEZA

Os pirômetros são instrumentos dedicados à medição de temperatura sem contato direto com o corpo medido. São utilizados em temperaturas altas, fora do alcance dos termopares ou quando for mais conveniente a medição remota, como a temperatura de um metal líquido.

Esses instrumentos podem ser fixos ou portáteis.

EQUAÇÕES

Os pirômetros baseiam-se na Lei de Stefan-Boltzmann, a qual estabelece uma relação entre a temperatura de um corpo e a energia térmica irradiada.

$$W = \epsilon \cdot K \cdot T^4, \text{ onde:}$$

- W = energia irradiada (ou emitida) por unidade de área
- ϵ = emissividade do corpo
- K = constante de Stephan-Boltzmann
- T temperatura em K
- A emissividade é definida como a relação entre a energia irradiada do corpo e a energia irradiada por um corpo negro, na mesma frequência de irradiação: W/W_n , portanto, $0 \leq \epsilon \leq 1$

O corpo negro é aquele que absorve toda energia e possui $\epsilon = 0$, e o corpo refletor ideal possui $\epsilon = 1$.

O asfalto se aproxima do corpo negro, e o alumínio se aproxima do refletor ideal.

Os pirômetros podem apresentar erros de leitura devido à refletância de corpos próximos ao objeto mensurando. Dependendo do objeto a ser medido, pode haver na superfície oxidação que mascara a sua temperatura interna.

ELEMENTOS SENSORES E DESCRIÇÃO DE PROPRIEDADES

Os pirômetros óticos realizam a medição na faixa de luz visível.

Os pirômetros infravermelho realizam medidas na faixa de frequência do infravermelho e permitem a medição de temperaturas baixas até próximas de 0 °C [BAL2011].

SELEÇÃO DOS MEDIDORES

Os **pirômetros óticos** são utilizados para medir a temperatura irradiada pelo corpo sob medição. Dessa forma, permitem a medição de temperaturas próximas do ambiente e podem identificar partes quentes de um equipamento, por exemplo. Permite também a leitura de imagens que apontam regiões quentes. A desvantagem desse tipo de medidor é baixa precisão, pois a medição pode ficar mascarada por outros efeitos como a reflexão do calor em outros objetos.

Os **pirômetros infravermelhos** têm uma importante aplicação na indústria para medição de altas temperaturas, como temperatura de aço líquido e de chama. Há também pirômetros infravermelho para aplicações médicas que permitem a medição da temperatura do corpo humano.

6.3.2.6 Termógrafo

MEDIÇÃO DA GRANDEZA

Os termógrafos são equipamentos que medem a temperatura de objetos através de técnicas de captação, tratamento e interpretação de imagens no espectro infravermelho.

ELEMENTOS SENSORES E DESCRIÇÃO DE PROPRIEDADES

As imagens são captadas através de câmeras infravermelho e geram diversos tons de cinza ou coloridos em que cada tom corresponde a uma diferente temperatura.

Esses instrumentos são utilizados para detecção de temperaturas anormais em equipamentos em operação, verificação de perdas de energia através do aquecimento de partes dos equipamentos e verificação de distribuições anormais de temperatura [BAL2010-1].

SELEÇÃO DOS MEDIDORES

Os termógrafos podem ser utilizados em várias aplicações, em engenharia para verificar a temperatura de equipamentos em operação de modo a identificar pontos quentes ou em medicina, para avaliar as temperaturas do corpo humano. A seleção do equipamento específico depende da aplicação e do foco desenvolvido pelo fornecedor.

6.3.2.7 Bolômetro

MEDIÇÃO DA GRANDEZA

O bolômetro consiste em um material capaz de absorver a radiação de ondas eletromagnéticas e, com isso, elevar a temperatura. A elevação de temperatura pode ser usada para medir tanto temperatura como energia. Os elementos são sensores tipo RTD ou termistores.

ELEMENTOS SENSORES E DESCRIÇÃO DE PROPRIEDADES

Na medição de temperatura é usado como termômetro infravermelho, pois tem a capacidade de absorver ondas eletromagnéticas de largo espectro.

Uma outra aplicação do bolômetro é para a medição de valores RMS (eficazes) de formas de onda complexas: transformando a forma de onda em calor pode-se calcular a energia equivalente e determinar o valor RMS.

O princípio de funcionamento desses sensores é baseado na relação fundamental da energia absorvida por um sinal eletro magnético e a potência dissipada [BAL2010-1].

SELEÇÃO DOS MEDIDORES

Bolômetro é um equipamento específico, mas uma aplicação comum seria em alguns multímetros RMS que utilizam esse princípio. Uma outra aplicação para o bolômetro seria medir a potência emitida por um transmissor de radiofrequência.

6.3.3 Medida de grandezas cinéticas

As grandezas cinéticas formam o conjunto de medidas de corpos em movimento, e foram selecionadas seis diferentes grandezas:

- Força
- Deslocamento e Posição
- Velocidade
- Aceleração
- Vibração

6.3.3.1 Força

DEFINIÇÃO

Força é uma grandeza capaz de vencer a inércia de um corpo modificando sua velocidade (magnitude ou direção).

UNIDADE

A unidade de medida da força é Newton, em homenagem a Isaac Newton.

Símbolo: N.

OUTRAS DEFINIÇÕES

A força é um vetor e, portanto, tem módulo, direção e sentido.

MEDIÇÃO DA GRANDEZA

A medição de força está relacionada com diversas outras grandezas a serem medidas como pressão (força sobre área), torque (força por distância) e massa (medida através da força da gravidade). Há uma série de aplicações que necessitam da medida de força como força de tração e ruptura de materiais, controle da qualidade na produção, pesagem, controle de pressão e ensaios estruturais.

ELEMENTOS SENSORES E DESCRIÇÃO DE PROPRIEDADES

Os **transdutores de medição** de força utilizam vários princípios de funcionamento: piezoelétrico, capacitivo e resistivo.

Os **transdutores de medição piezoelétricos** transformam a força aplicada em um cristal em uma tensão [BAL2010-1]. A [Figura 6.11](#) ilustra um sensor piezoelétrico com capacidade de medição de até 10 kN [KST2013; BAL2010-1].



FIGURA 6.11 Sensor de força piezoelétrico [KST2013].

Os **transdutores de medição capacitivos** funcionam a partir da variação de uma capacitância quando há a aplicação de uma força em seu corpo. Na [Figura 6.12](#) pode-se observar a construção desse capacitor que possui uma placa do lado esquerdo e outra do lado direito e uma série de trilhas que não se tocam, estabelecendo uma distância entre as placas. Essa peça é colada no corpo onde se quer fazer a medição. Ao aplicar a força, a deformação provoca uma variação do valor da capacitância e, com isso, pode-se identificar o valor dessa força aplicada. A foto da direita mostra o sensor montado em uma proteção metálica para montagem final [LDS2013; BAL2010-1].

Os **transdutores de medição resistivos** têm a propriedade de alterar o valor da resistência e são denominados Strain Gage. O transdutor é colado na peça onde será aplicada a força a ser medida e a deformação provoca a variação do

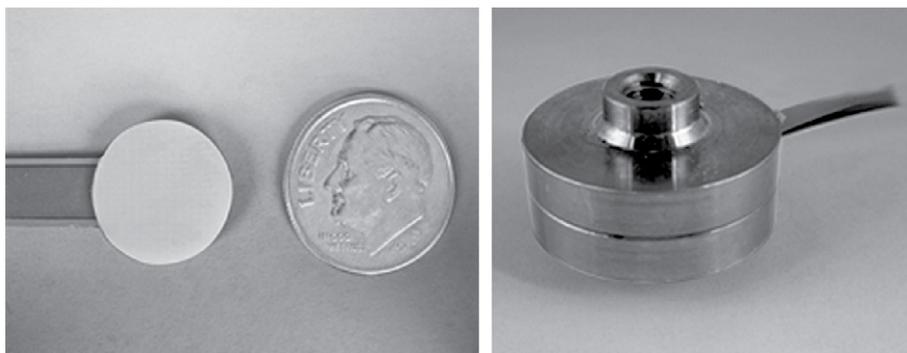


FIGURA 6.12 Sensor de força capacitivo [LDS2013].

valor da resistência $\Delta R/R$. A Figura 6.13 mostra um Strain Gage resistivo em que se pode notar o longo caminho para criar a resistência. Como a variação da resistência é muito pequena, é feita uma montagem no formato de ponte de Wheatstone para permitir maior sensibilidade [KOT2013; BAL2010-1].

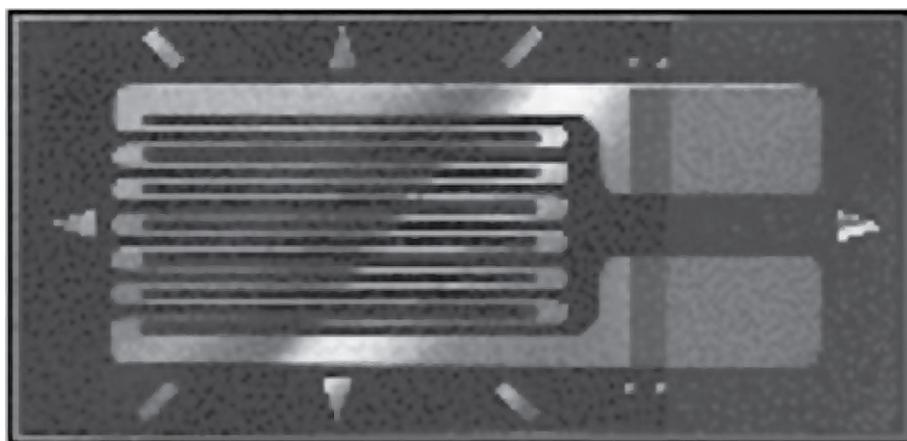


FIGURA 6.13 Strain Gage resistivo [KOT2013].

SELEÇÃO DOS MEDIDORES

A montagem final do Strain Gage para equipar um medidor de peso, por exemplo, é feita de forma a melhor aproveitar a direção das forças, e há diversas montagens padronizadas como as ilustradas na Figura 6.14. A montagem da esquerda é composta por duas vigas biengastadas e, conforme o modelo, pode medir massa de 100 g a 300 kg. O modelo do centro é uma célula tipo S, que permite medir de 10 kg a 18 t, e o modelo da direita é uma célula miniatura, que possui capacidade de 1kg a 100kg [LDS2013; BAL2010-1].



FIGURA 6.14 Células de carga [LDS2013].

6.3.3.2 Deslocamento e posição

DEFINIÇÃO

Deslocamento é a mudança de posição de uma peça de um ponto a outro.

UNIDADE

A unidade de medida de deslocamento é m.

OUTRAS DEFINIÇÕES

Outras unidades podem ser utilizadas dependendo das faixas de valores, por exemplo, mm (10^{-3} m) ou μm (10^{-6} m).

Unidades imperiais também podem ser usadas, como polegada. 1 inch = 25,4 mm.

MEDIÇÃO DA GRANDEZA

Em uma aplicação industrial, determinar a posição e o deslocamento de uma determinada peça em processo é muito importante. Alguns exemplos são uma mesa de coordenadas de uma máquina ferramenta e a identificação da chegada de um recipiente em determinada posição na esteira transportadora para envasamento.

Há diversos **transdutores de medição** para medir posição e deslocamento, e aqui serão descritos os seguintes: sensores resistivos, sensores capacitivos, sensores indutivos, sensores de efeito Hall, sensores de ultrassom e sensores fotoelétricos.

ELEMENTOS SENSORES E DESCRIÇÃO DE PROPRIEDADES

Os **sensores resistivos** têm a propriedade de variar o valor da resistência de acordo com a posição de um cursor. Assim, em uma mesa na qual se desloca uma peça, ela pode ser arrastada por um cursor que permite a identificação da posição através do valor da resistência, conforme ilustrado na [Figura 6.15](#), em que se pode também observar um exemplar de potenciômetro do fabricante Bourns com um deslocamento de até 8,8 mm e variação de resistência de até 50 k Ω [BUR2013; BAL2011-2].

Diversas outras formas podem ser utilizadas para implementar um sensor resistivo, como utilizar elementos mecânicos para multiplicar as posições e reduzir o movimento mecânico no resistor linear. A dificuldade desse tipo de



FIGURA 6.15 Sensor resistivo linear [BUR2013].

sensor é o desgaste do resistor ao longo do tempo, que vai exigir manutenção cuidadosa do dispositivo.

Os **sensores capacitivos** possuem a vantagem de possuir menor desgaste e utilizam a propriedade de variar uma capacitância de acordo com a posição. Esses sensores podem identificar a variação da distância entre as placas de um capacitor bem como a variação do material dielétrico. A Figura 6.16 ilustra um medidor de deslocamento capacitivo com 6 canais e mede 500 μm , ou seja, até 0,5 milímetro de deslocamento. Esses sensores não são adequados para ambientes sujos onde pode cair sujeira no *gap* entre as placas do capacitor [LIO2013; BAL2011-2; NOR1969].

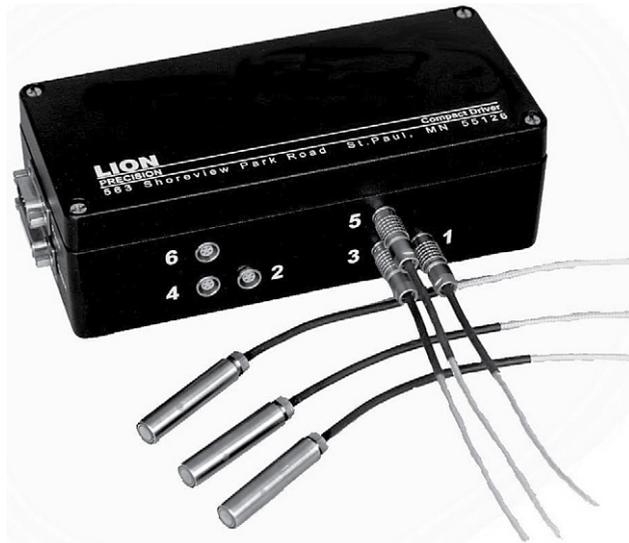


FIGURA 6.16 Sensor capacitivo [LIO2013].

Os **sensores indutivos** utilizam a propriedade de variação da indutância de acordo com a posição do objeto medido. Normalmente, a propriedade utilizada é a variação da relutância, ou seja, alteração do valor da indutância através da variação do caminho magnético, conforme ilustrado na Figura 6.17.

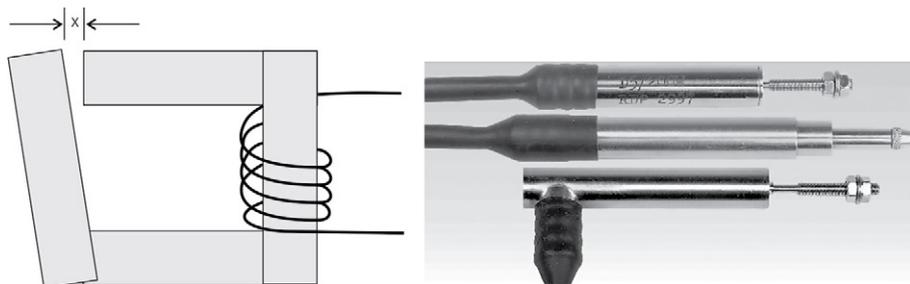


FIGURA 6.17 Sensor indutivo [RDP2013].

A distância X varia o valor da indutância e pode-se com isso realizar medidas de distância.

Na Figura 6.17 está o sensor LVDT – *Linear Variable Differential Transformer*, que é utilizado para medição de pequenos deslocamentos, da ordem de 25 mm. Esses sensores podem operar em ambientes agressivos, mas são sensíveis a materiais magnéticos [RDP2013; BAL2011-2].

Os **sensores de efeito Hall** são sensíveis a um campo magnético gerando uma tensão elétrica e, portanto, podem funcionar como sensores de posição ao se colocar um ímã que se aproxima do sensor. Um exemplo de utilização seria na detecção da posição do pistão de um motor automotivo [BAL2011-2].

Os **sensores de ultrassom** funcionam através da excitação de um transdutor acústico que emite um sinal sonoro de ultrassom. A medida do tempo decorrido entre o feixe incidente e refletido oferece a distância ou a posição do objeto. A vantagem desses sensores é a possibilidade de uso em ambientes sujos e úmidos, com vapores e outros materiais contaminantes [BAL201-2].

Os **sensores fotoelétricos** funcionam através de um feixe de luz (visível ou infravermelho) emitido por um emissor e detectado por um receptor. Com isso é possível detectar a presença de objetos através da interrupção do feixe ou realizar contagens para medir quantidades ou velocidade através da interrupção feita em furos de objetos em movimento, conforme ilustrado na Figura 6.18 [BAU2013; BAL2012-2].

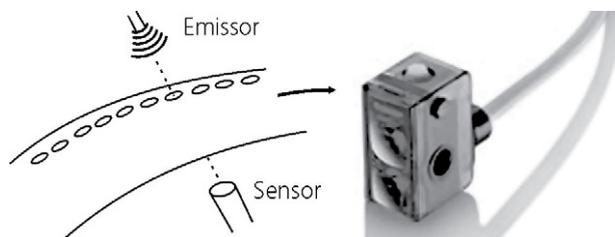


FIGURA 6.18 Sensor fotoelétrico [BAU2013].

SELEÇÃO DOS MEDIDORES

A seleção dos elementos de deslocamento depende da excursão máxima a ser medida, da aplicação em si e do ambiente onde será instalado o equipamento.

6.3.3.3 Velocidade

DEFINIÇÃO

Velocidade é a variação da posição de um objeto no tempo.

UNIDADE

A velocidade no sistema MKS é medida em m/s.

OUTRAS DEFINIÇÕES

Dependendo da aplicação, a velocidade pode ser medida em unidades mais convenientes, como km/h.

Também pode ser utilizado o sistema imperial, por exemplo, milhas/hora.

EQUAÇÕES

A medição da velocidade obedece a equação fundamental: $V = \delta X / \delta t$, onde:

V – velocidade em m/s

X - posição

$\delta X / \delta t$ – variação da posição no tempo

MEDIÇÃO DA GRANDEZA

A medição das **grandezas** deslocamento, velocidade e aceleração pode ser feita por meio do cálculo da derivada ou da integral de um deles e, uma vez obtido um valor, os demais podem ser calculados. Esse cálculo pode ser feito através de processos analógicos como o uso de topologias de circuito com capacitores (que têm a propriedade de apresentarem o valor da corrente como derivada da tensão, por exemplo) ou através do cálculo com microcontroladores.

As velocidades a serem medidas podem ser lineares ou rotacionais.

ELEMENTOS SENSORES E DESCRIÇÃO DE PROPRIEDADES

Os transdutores de velocidade rotacionais são importantes sistemas de medição de velocidade destacando-se, entre eles, os tacômetros, transdutores de velocidade por relutância variável e por efeito Hall [BAL201-2].

O **tacômetro digital** identifica a posição através de marcas igualmente espaçadas em um disco, como ilustrado na [Figura 6.19](#). O disco gira e interrompe a passagem do feixe de luz do emissor (um diodo *led* ou um feixe laser) para o receptor (um fototransistor). Ao passar o furo, o receptor recebe um feixe de luz que pode ser contado. No exemplo, para cada quatro pulsos de luz, uma volta é completada. Com isso pode-se contar o número de rotações na unidade de tempo e determinar a velocidade angular (rd/s – radianos por segundo, ou rpm – rotações por minuto).

Esse mesmo transdutor pode, por exemplo, realizar medida de deslocamentos lineares através do contado do disco funcionando como uma roda que caminha em linha reta e conta o número de voltas e, portanto, a distância percorrida.

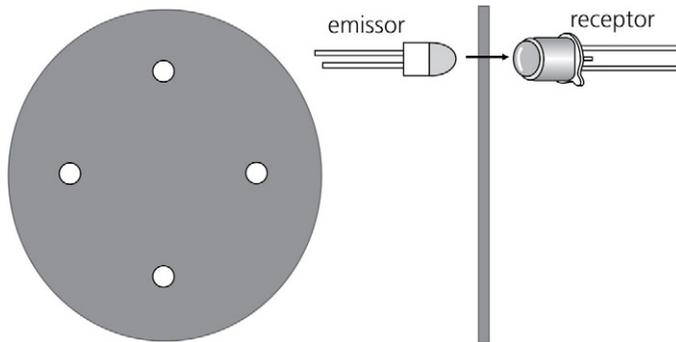


FIGURA 6.19 Tacômetro digital óptico.

O **tacômetro com sensor indutivo** utiliza como transdutor uma bobina que se aproxima de um material com propriedades magnéticas. Um disco similar ao tacômetro óptico pode possuir magnetos ou formato que varia o valor da indutância que pode ser detectada por um circuito. Esse tipo de tacômetro é utilizado em freios ABS [BAL2011-2].

O **tacômetro de efeito Hall** possui funcionamento similar aos anteriores e utiliza como elemento sensor um dispositivo de efeito Hall, já explicado anteriormente [BAL2011-2].

O **tacômetro analógico** utiliza como elemento sensor um gerador. Sabe-se que, quando um motor é alimentado com uma tensão, um campo magnético é gerado e realiza o movimento de rotação. Simetricamente, ao se girar o rotor de um motor desse tipo, uma tensão nos terminais é gerada, proporcional à rotação. Esse fenômeno pode ocorrer tanto com corrente contínua como com corrente alternada [BAL2011-2].

Os radares de trânsito (Figura 6.20) utilizam outra técnica de medição de velocidade. Bobinas localizadas no chão detectam a passagem de veículos em função de sua massa magnética que provoca a variação da indutância. Ao passar pela primeira bobina um contador de tempo é disparado. Ao passar pela segunda bobina o tempo é calculado e, portanto, a velocidade, considerando que a distância entre as duas bobinas é conhecida: $\text{velocidade} = \text{distância} / \text{tempo}$. Entre a segunda e a terceira bobina é feita uma segunda medição para confirmar o valor obtido [TCM2013].

Outras técnicas podem ser utilizadas para medição da velocidade de veículos, como o radar, que mede a diferença de tempo entre a emissão de um pulso e o seu retorno após bater e refletir no objeto medido.

SELEÇÃO DOS MEDIDORES

A seleção dos medidores de velocidade depende da aplicação em si e da precisão com que se deseja realizar a medida. Para cada aplicação é importante identificar as faixas e os valores e se os equipamentos são adequados para a aplicação específica.

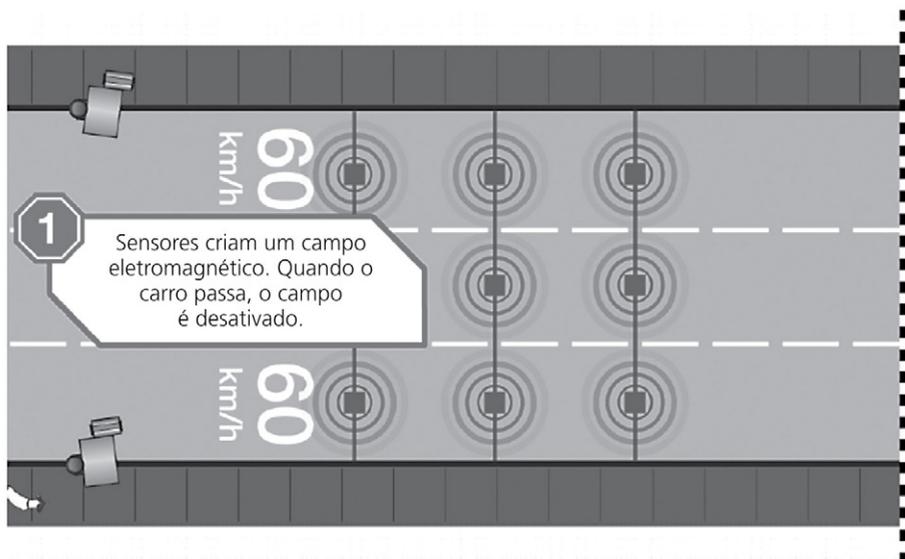


FIGURA 6.20 Medição de velocidade nos radares [TCM2013].

6.3.3.4 Aceleração

DEFINIÇÃO

Aceleração é a variação da velocidade no tempo de um objeto.

UNIDADE

A aceleração no sistema MKS é medida em m/s^2 .

OUTRAS DEFINIÇÕES

Dependendo da aplicação, a aceleração pode ser medida em **g**, ou seja, normalizada em relação à aceleração da gravidade.

Assim, se em um objeto for aplicada a aceleração de 2g, terá sido aplicada uma aceleração de $2 \times 9,8 m/s^2$.

Unidades imperiais também podem ser aplicadas.

EQUAÇÕES

A medição da aceleração obedece a equação fundamental: $a = \delta V / \delta t$, onde

a – aceleração em m/s^2

V – velocidade

$\delta V / \delta t$ – derivada da velocidade no tempo.

MEDIÇÃO DA GRANDEZA

Os sensores de aceleração são denominados acelerômetros e fornecem uma saída proporcional a aceleração, vibração ou choque.

ELEMENTOS SENSORES E DESCRIÇÃO DE PROPRIEDADES

Há diversas tecnologias utilizadas para esse caso: sensores piezoelétricos, piezoresistivos e capacitivos ou MEMS (microeletromechanical system) que utilizam nanotecnologia.

SELEÇÃO DOS MEDIDORES

Entre as aplicações industriais mais importantes pode-se citar a monitoração de vibração de motores, eixos, rolamentos e sistemas veiculares. Uma aplicação conhecida do acelerômetro MEMS é nos tablets que identificam sua posição e viram a imagem conforme sua posição [BAL2011-2].

6.3.4 Medição de fluidos

A medição de fluidos é muito importante nas indústrias químicas e petroquímicas e foi organizada nas seguintes grandezas:

- Medição de pressão
- Medição de vazão
- Medição de nível

6.3.4.1 Medição de pressão

DEFINIÇÃO

Pressão é a força agindo em uma superfície.

UNIDADE

A pressão é medida como força por unidade de área. No sistema MKS a unidade de medida é 1 Pascal, que corresponde a uma força de 1 N aplicada em uma superfície de 1m^2 .

OUTRAS DEFINIÇÕES

Há diversas unidades de pressão utilizadas conforme apresentado no [Quadro 6.5 \[P&S2013\]](#).

Quadro 6.5 Unidades de pressão [P&S2013]

valor	símbolo	unidade
1	P	Pascal
$10,197 \times 10^{-6}$	kgf/cm ²	
$9,8692 \times 10^{-6}$	at	Atmosfera física
0,01	mbar	Milibar
0,0075	Torr	mm de Mercúrio
0,0001	mca	Metro de coluna de água
0,0001	PSI	Libra por polegada quadrada

A [Figura 6.21](#) - Definições de pressão (adapt. de [BAL2011-2]) ilustra as diferentes definições de pressão. A pressão no vácuo absoluto é zero, identificado à esquerda. Na superfície da Terra há pressão atmosférica, e o objeto sob medição possui uma determinada **pressão absoluta**. A medida da diferença de pressão entre o objeto sob medição e a pressão atmosférica é denominada

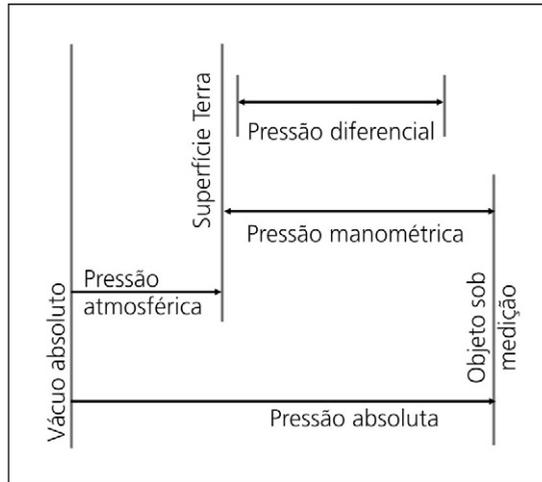


FIGURA 6.21 Definições de pressão (adapt. de [BAL2011-2]).

pressão manométrica (*gauge pressure*), e a diferença de pressão entre dois pontos quaisquer é denominada **pressão diferencial** [BAL201-2].

Vale salientar que as pressões de vácuo são as pressões abaixo da pressão atmosférica e são medidas com valor relativo negativo.

MEDIÇÃO DA GRANDEZA

Os sensores de pressão são transdutores que geram uma saída elétrica a partir de um elemento mecânico sensível. Esses sensores são elementos relativamente elásticos de paredes finas, como placas, cascas ou tubos que oferecem uma superfície para uma força agir. Quando essa pressão não está balanceada por uma pressão igual agindo na superfície oposta, o elemento deflete. Tal deflexão é frequentemente traduzida para um deslocamento secundário, usado para produzir uma alteração elétrica em um elemento transdutor.

ELEMENTOS SENSORES

Os elementos sensores mais comumente utilizados e a natureza da deflexão estão ilustrados na Figura 6.22 [NOR1969].

Embora os sensores apresentados façam a medição de pressão diferencial, pode-se projetar transdutores que possam realizar medições de pressão absoluta, diferencial ou manométricas dependendo do elemento de referência de pressão utilizado, conforme ilustrado na Figura 6.23.

DESCRIÇÃO DE PROPRIEDADES

Com relação aos elementos transdutores há diversas tecnologias utilizadas atualmente: capacitivos, piezoelétricos e piezorresistivos.

Os elementos transdutores capacitivos podem ser usados em uma faixa larga de valores de pressão, de 10^{-3} Pa até da ordem de 10^7 Pa. Construtivamente o

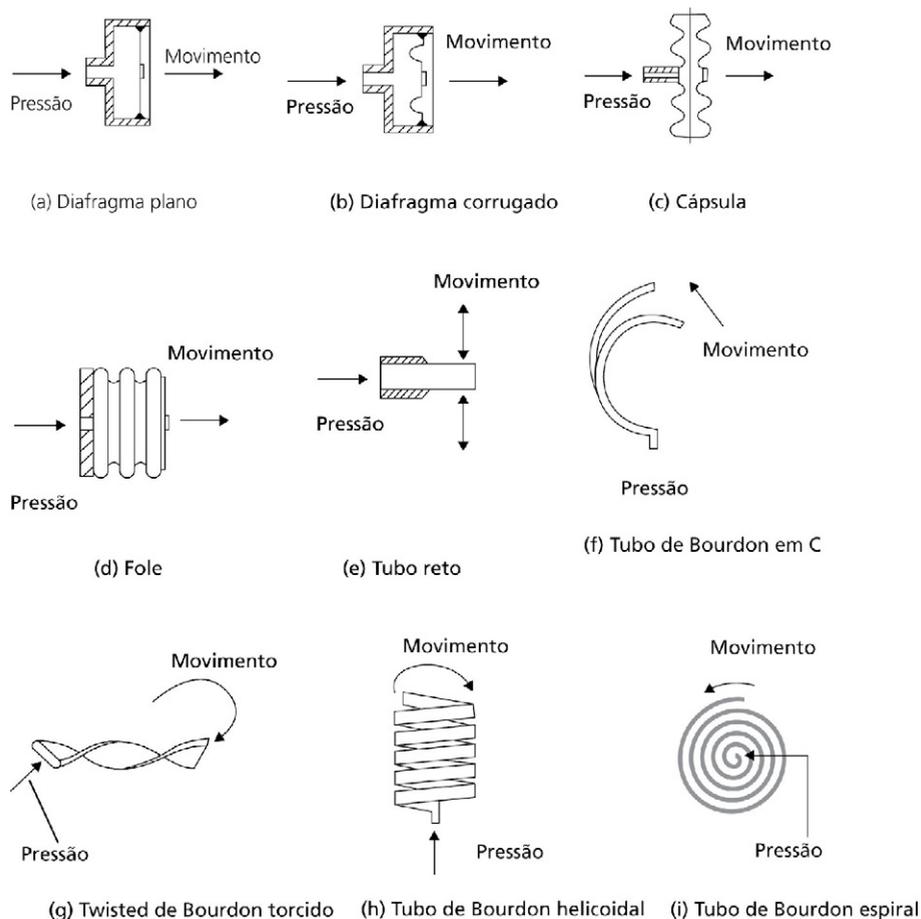


FIGURA 6.22 Elementos sensores de pressão mais comuns [NOR1969].

elemento mecânico provoca a alteração da distância entre as placas variando o valor da capacitância [BAL201-2].

Os elementos transdutores piezoelétricos são construídos de forma a produzir uma diferença de potencial quando há uma deformação mecânica. Esse tipo de transdutor é utilizado para medir pressões dinâmicas e tem a vantagem de viabilizar a medição de pulsos de pressão de valor alto [BAL201-2].

Os elementos transdutores piezorresistivos são usados integrados com a própria eletrônica de tratamento, formando um sistema único. Isso permite miniaturizar e facilitar a medição de pressão, por exemplo, o MPX 4115, circuito integrado da Motorola que mede pressões até 115 kPa e gera uma sinal analógico na saída de forma linear, na faixa de 0 a 5Vcc, com compensação de temperatura [BAL201-2].

Há também a necessidade de realizar a medição de vácuo. Para esse tipo de medida há técnicas específicas, particularmente quando os valores de vácuo são muito baixos [BAL201-2].

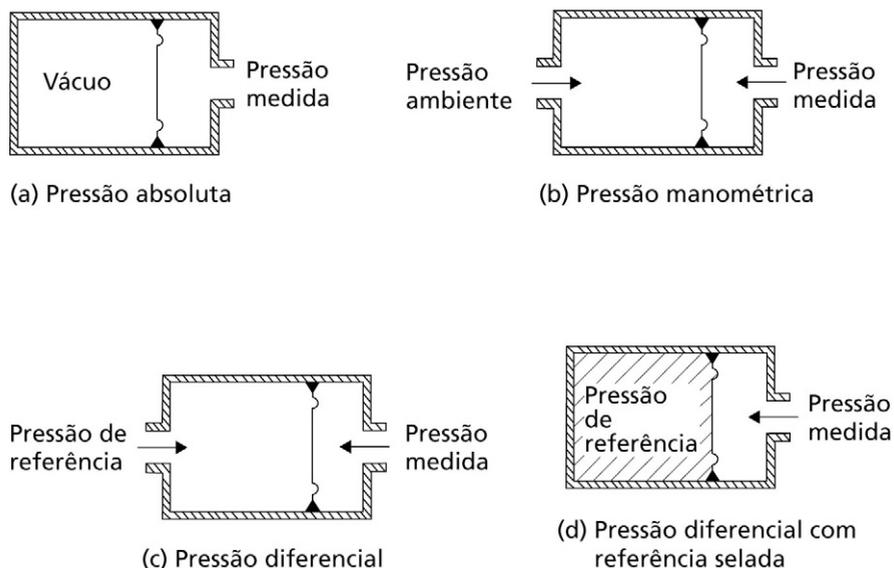


FIGURA 6.23 Configurações de referências de pressão [NOR 1969].

SELEÇÃO DOS MEDIDORES

Os diferentes elementos sensores são adequados para diferentes aplicações, conforme descrito no [Quadro 6.6 \[BEG2006\]](#).

Quadro 6.6 Elementos sensores e aplicações [BEG2006]

Elemento sensor	Aplicação	Valor mínimo	Valor máximo
Diafragma	pressão	0 a 5 mm H ₂ O	0 a 400 psi
	vácuo	-5 a 0 mm H ₂ O	-76 a 0 cm Hg
	vácuo e pressão	5 mm H ₂ O	
Fole	pressão	0 a 130 mm H ₂ O	0 a 800 psi
	vácuo	-130 a 0 mm H ₂ O	-76 a 0 cm Hg
	vácuo e pressão	130 mm H ₂ O	
Bourdon	pressão	0 a 12 psi	0 a 100.000 psi
	vácuo	-76 a 0 cm Hg	
	vácuo e pressão	12 psi	

6.3.4.2 Medição de vazão

DEFINIÇÃO

Vazão é a movimentação de um fluido, líquido ou gás, normalmente um fluxo com o fluido confinado. A vazão é medida da quantidade de matéria, volume ou massa, que escoou na unidade de tempo [NOR1979; BAL201-2].

UNIDADE

No sistema MKS a unidade de vazão é:

- m^3/s para a vazão de volume;
- kg/s para a vazão de massa.

OUTRAS DEFINIÇÕES

O **Quadro 6.7** A ilustra as diferentes unidades de vazão.

Quadro 6.7 unidades de vazão

valor	símbolo	unidade
1	m^3/s	Metros cúbicos por segundo
1.000	l/s	Litros por segundo
61.023,7441	in^3/s	Polegadas cúbicas por segundo
219,9692	g/s	Galões por segundo
1	kg/s	Quilos por segundo
2,2046	lb/s	<i>Pounds per second</i> – libras por segundo

Algumas definições pertinentes à vazão:

O **fluxo laminar** é o movimento das partículas de fluido ao longo de linhas paralelas à direção local do fluxo que pode ser representada como camadas de fluido deslizando de forma constante umas sobre as outras. O fluxo laminar também tem sido referido como fluxo viscoso [NOR1979].

Fluxo turbulento é o movimento de partículas de fluido cuja velocidade, em um ponto de observação, varia com o tempo de uma maneira aleatória [NOR1979].

Viscosidade é a resistência que o fluido apresenta contra a tendência de se movimentar [NOR1979].

Densidade é a relação entre a massa e o volume de um fluido [NOR1979].

Gravidade específica é a relação entre a densidade de uma substância em uma dada temperatura e a densidade da substância considerada como padrão [NOR1979].

Número de Reynolds é um número adimensional utilizado para exprimir a fluidez de um fluido em movimento. Número de Reynolds abaixo de 2.000 indica fluxo laminar. Valores elevados do número de Reynolds, geralmente acima de 4.000, indicam fluxo turbulento. Valores entre 2.000 e 4.000 podem representar um fluxo laminar ou turbulento, dependendo da configuração do sistema [NOR1979].

EQUAÇÕES

O Número de Reynolds é expresso pela equação $N_R = V.d.\rho / \mu$, onde:

- V – velocidade média do fluxo
- d – diâmetro interno da tubulação

- ρ – densidade do fluido
- μ - viscosidade do fluido

[NOR1979].

A equação de Bernoulli é expressa pela equação (fluxo horizontal) $p_s = p_0 + \frac{1}{2} \rho V_0^2$, onde:

- p_s – pressão de estagnação
- p_0 – pressão estática
- ρ – densidade do fluido
- V_0 – velocidade do fluxo

[NOR1979].

ELEMENTOS SENSORES

Os elementos **sensores** de vazão que respondem diretamente ao fluxo de um fluido podem ser classificados em três categorias:

- (a) Pressão diferencial
- (b) Elemento mecânico sensível
- (c) Propriedade do fluido

a) Pressão diferencial

Estes elementos sensores possuem na tubulação algum tipo de restrição que produz uma pressão diferencial proporcional à vazão, conforme ilustrado na [Figura 6.24](#). Nessa figura podem ser identificados a placa de orifício, tubo de Venturi, tubo de Pitot, seção centrífuga cotovelo, seção centrífuga anel e bocal. A medição do elemento de transdução é um sensor de pressão que mede a pressão diferencial antes e depois da perturbação do fluxo [NOR1979].

b) Elementos mecânicos sensíveis

Os elementos mecânicos sensíveis são elementos diretos ou rotacionais. Os elementos mecânicos diretos, ilustrados na [Figura 6.25](#), podem ser flutuantes (a), com mola (b), ambos com área variável, pá articulada (c) ou cantilever vane (d).

Os elementos mecânicos rotacionais possuem um dispositivo que gira em função do fluxo do fluido, conforme ilustrado na [Figura 6.26](#) em que se pode observar que o fluxo do fluido provoca a rotação que, uma vez medida, apresenta uma relação direta com a vazão do fluido.

Para escoamento laminar prevalecem as forças da viscosidade e, para o escoamento turbulento, prevalecem as forças inerciais.

Quando o escoamento é turbulento, a vazão é proporcional à raiz quadrada da pressão diferencial. Quando o escoamento é laminar, existe uma relação linear entre a vazão e a pressão diferencial.

A passagem do escoamento laminar para turbulento ocorre de forma abrupta [[ALV2005](#)].

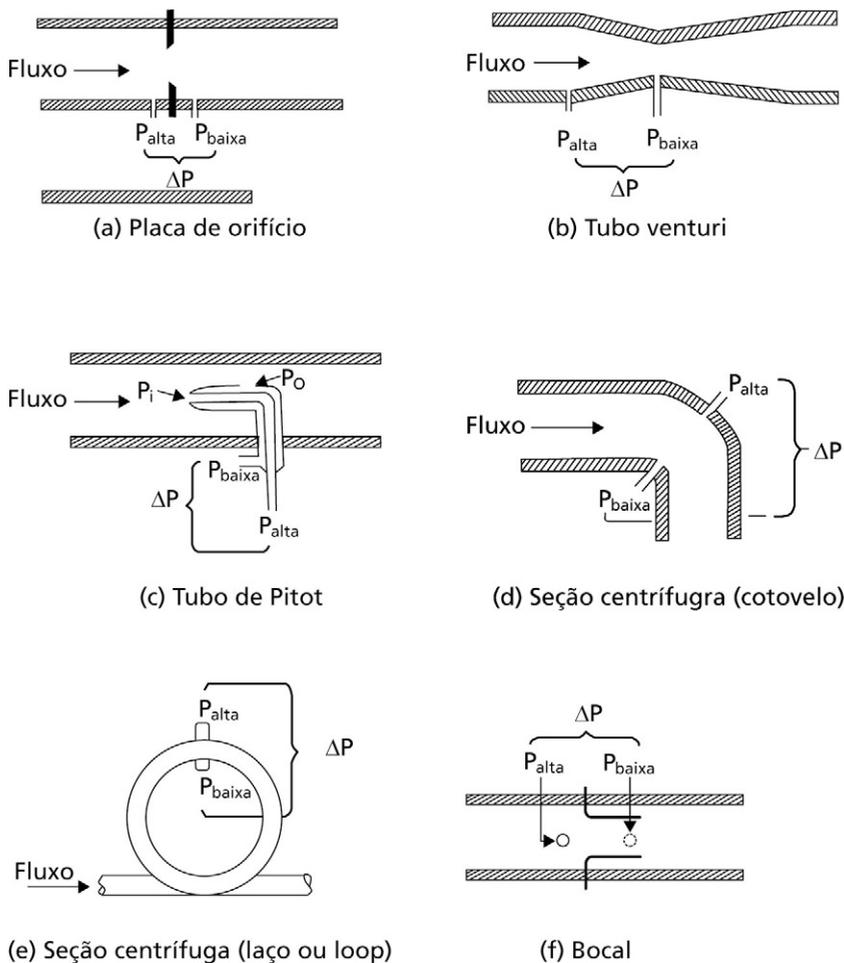


FIGURA 6.24 Elementos sensores de pressão diferencial [NOR 1969].

c) Propriedade do Fluido

O fluido em movimento possui determinadas propriedades que, em conjunto com elementos de transdução adequados, permitem a medição da vazão. Alguns exemplos são ilustrados a seguir [NOR1979].

Um fio aquecido de um anemômetro de fio quente transfere mais calor à medida que a velocidade do fluxo do fluido aumenta. A resultante do resfriamento do fio faz com que a sua resistência diminua.

Um fluido que contém uma pequena quantidade de radioatividade provoca um aumento na corrente de ionização em um transdutor de radiação nuclear quando aumenta a velocidade do fluido.

Um fluido mediante condutivo fluindo através de um campo magnético transversal apresenta um aumento da força eletromotriz induzida quando aumenta a velocidade do fluido.

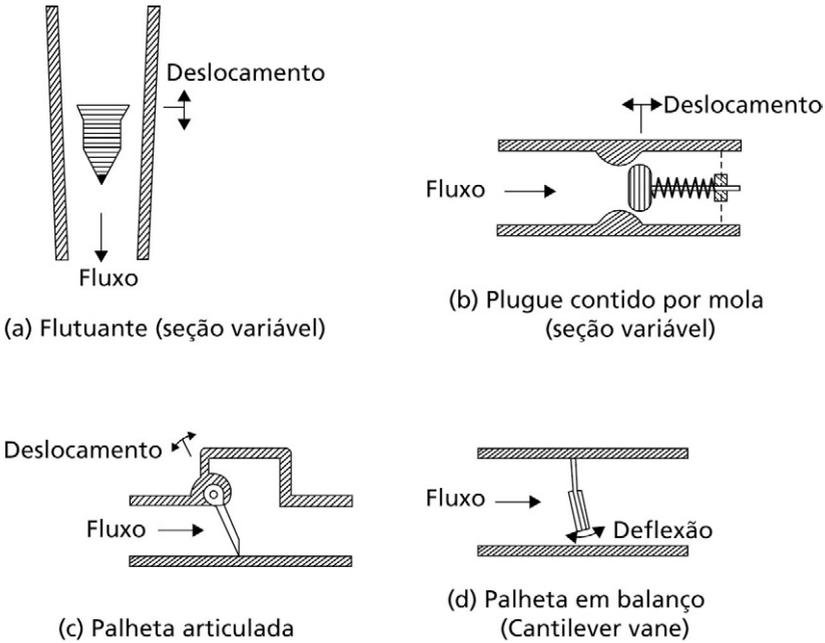


FIGURA 6.25 Elementos mecânicos sensores de fluxo [NOR 1969].

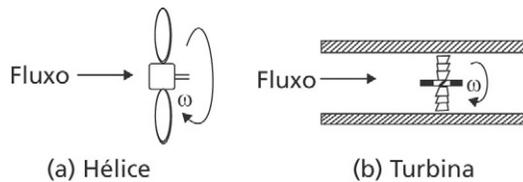


FIGURA 6.26 Elementos sensores de fluxo rotacionais [NOR 1969].

MEDIÇÃO DA GRANDEZA

O Quadro 6.8 apresenta os principais métodos utilizados para medição de vazão [BAL2011-2].

SELEÇÃO DOS MEDIDORES

A seleção de medidores é feita a partir do claro entendimento dos requisitos da aplicação específica [ALV2005].

- **Características do fluido e do escoamento** – identificar fluido, pressão de trabalho, temperatura, queda de pressão admissível, densidade, condutibilidade, viscosidade, número de Reynolds, pressão de vapor e toxicidade. Além disso, podem ser necessárias outras informações mais específicas como presença de bolhas, sólidos em suspensão, nível de abrasão.

Quadro 6.8 Principais métodos para medição de vazão [BAL2011-2]

	Tipo de medidor	Grandeza de entrada	Grandeza medida
1	Tubo de Pitot	Velocidade pontual ou local do fluido ou fluxo volumétrico	Pressão diferencial
2	Anemômetro (fio quente)	Velocidade pontual ou Local do fluxo	Temperatura
3	Eletromagnético	Velocidade média do fluido	Tensão elétrica
4	Ultrassom	Velocidade média do fluido	Tempo ou frequência (Doppler)
5	Placa de orifício	Vazão de volume	Pressão diferencial
6	Tubo de Venturi	Vazão de volume	Pressão diferencial
7	Bocal	Vazão de volume	Pressão diferencial
8	Turbina	Vazão de volume	Ciclos ou Revoluções
9	Deslocamento positivo	Vazão de volume	Ciclos ou Revoluções
10	Draga ou força de arrasto	Vazão de volume	Força
11	Seção variável (rotâmetro)	Vazão de volume	Deslocamento
12	Vórtice	Vazão de volume	Frequência
13	Efeito Coriolis	Vazão de massa	Força
14	Transporte térmico	Vazão de massa	Temperatura

- **Dados de operação** – pressões e temperaturas máximas e mínimas, quando o fluido se reverte, quando a tubulação não enche e outras precauções.
- **Tubulação do medidor** – direção da tubulação, diâmetro, arterial, acesso, curvas antes e depois do medidor, valores nominais de pressão dos flanges e componentes da tubulação.

O [Quadro 6.9](#) apresenta uma orientação para a seleção de medidores de vazão para líquidos com base nos principais produtos de mercado [BAL2011-2].

Quadro 6.9 Seleção dos medidores de vazão [BAL2011-2]

	Medidor	aplicação	Perda de pressão	Precisão (%)	Custo
1	Placa de orifício	Líquidos limpos	média	± 2 a ± 4 fe ⁵	baixo
2	Tubo de Venturi	Líquidos limpos, sujos e viscosos	baixa	± 2 fe	médio
3	Bocal	Líquidos limpos e sujos	média	± 1 a ± 2 fe	médio
4	Tubo de Pitot	Líquidos limpos	baixa	± 3 a ± 5 fe	baixo
5	Seção variável	Líquidos limpos, sujos e viscosos	média	± 1 a ± 10 fe	baixo
6	Deslocamento positivo	Líquidos limpos e viscosos	alta	$\pm 0,5$	médio
7	Turbina	Líquidos limpos e viscosos	alta	$\pm 0,25$	alto
8	Vórtice	Líquidos limpos e sujos	média	± 1	médio
9	Eletromagnéticos	Líquidos condutivos limpos e sujos	nenhuma	$\pm 0,5$	alto
10	Ultrassônico (Doppler)	Líquidos sujos e viscosos	nenhuma	± 5 fe	alto
11	Ultrassônico (tempo)	Líquidos limpos e viscosos	nenhuma	± 1 a ± 5 fe	alto
12	Efeito Coriolis (massa)	Líquidos limpos, sujos e viscosos	baixa	$\pm 0,4$	alto
13	Massa térmica	Líquidos limpos, sujos e viscosos	baixa	± 1 fe	alto

⁵Precisão referente ao fundo de escala.

6.3.4.3 Medição de nível

DEFINIÇÃO

Nível é a altura de preenchimento de um líquido ou algum material sólido em um reservatório, silo ou outro recipiente [BAL2011-2].

UNIDADE

O nível é medido em metros (m).

OUTRAS DEFINIÇÕES

Conhecida a geometria do reservatório o nível pode ser convertido em volume ou massa do material.

MEDIÇÃO DA GRANDEZA

A medição do nível é definida como a determinação da posição de uma interface entre dois meios. Usualmente um dos meios é líquido, mas podem ser sólidos ou a combinação de sólido e líquido. A interface pode ser entre um líquido e um gás ou vapor, dois líquidos ou entre um sólido e um gás [BEG2006].

Há essencialmente dois tipos de medição de nível: **contínua**, que oferece continuamente o valor do nível do material, ou **discreta**, realizada pontualmente através de um detector que identifica se o material está ou não naquele nível. Em um processo pode ocorrer o uso dos dois tipos, como um medidor contínuo de nível para o processo e outro discreto para ser usado como alarme para identificação de máximo e mínimo do reservatório.

A medição de nível é necessária em diversos processos para identificar a necessidade de recarga de material, identificar a falta ou excesso de material e controlar o processo de produção.

Uma das dificuldades na medição de nível é a variação da densidade de diversos materiais com a temperatura, fato que provoca a variação do volume (nível), mas não da massa.

ELEMENTOS SENSORES E DESCRIÇÃO DE PROPRIEDADES

Os elementos **sensores** de nível utilizam diversas tecnologias, a saber:

- (a) visores
- (b) flutuadores
- (c) pressão hidrostática
- (d) deslocamento
- (e) eco
- (f) laser
- (g) peso
- (h) capacitivo
- (i) radiativo

(a) Visores

O tipo mais simples de medidor de nível é o vidro de nível ilustrado na [Figura 6.27](#). Trata-se de um instrumento indicador que desvia

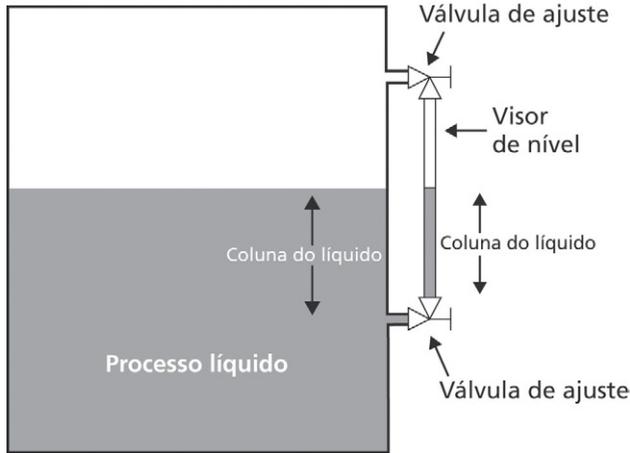


FIGURA 6.27 Visor de nível [KUP2008].

o líquido do reservatório para um mostrador de vidro que pode possuir uma escala para leitura direta do nível. Possui válvulas para permitir sua manutenção ou troca sem a necessidade de esvaziar o reservatório [KUP2008; BAL2011-2].

(b) Flutuadores

Os flutuadores permitem outra forma de se medir o nível de um reservatório através de um cabo que possa ser estendido até ser encontrada a superfície do líquido, conforme a Figura 6.28. O cabo esticado da superfície até a parte superior permite a leitura da altura livre e, conhecendo-se a altura total do reservatório, calcula-se o nível desejado. Essa medição pode ser automatizada através do uso de um

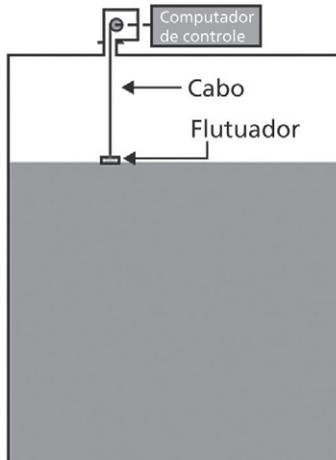


FIGURA 6.28 Sensor de nível flutuador [KUP2008].

carretel que enrola ou desenrola o cabo até chegar à superfície do líquido. A contagem do número de voltas para recolher ou soltar o cabo permite a determinação da altura [KUP2008].

A desvantagem desse tipo de medidor é a exposição do cabo e do flutuador ao material que está sendo medido. Se o material for corrosivo, provocar incrustações, for pegajoso ou contiver sujeira, pode atrapalhar a movimentação e o bom funcionamento do sistema [KUP2008].

(c) Pressão hidrostática

Uma coluna vertical de fluido exerce pressão devido ao seu peso. A relação entre a altura da coluna e a pressão do fluido na sua base é constante para um fluido particular (densidade) independente do formato do reservatório, conforme a Figura 6.29. Portanto, é possível medir a altura do líquido em um reservatório fazendo a medição da pressão na sua base [KUP2008; NOR1969].

Assim, temos:

$$P = \rho \cdot g \cdot h \text{ e } P = \gamma \cdot h, \text{ onde:}$$

P – pressão hidrostática medida em kg/m^2

ρ - densidade de massa do fluido em kg/m^3

γ – densidade de peso do fluido em N/m^3

g – aceleração da gravidade – $9,8 \text{ m/s}^2$

h – altura vertical do líquido acima do ponto de medição em m

Um fator crítico importante no uso desta técnica é a densidade do líquido. Quando o líquido em um reservatório é medido com sensor de pressão e há um aumento da temperatura do material, a densidade

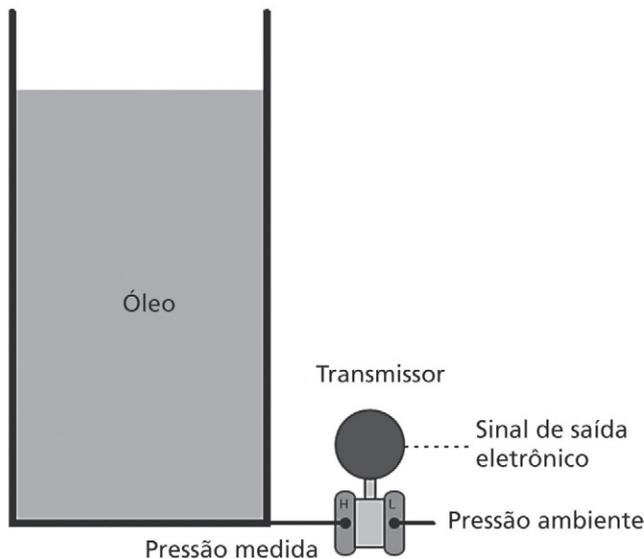


FIGURA 6.29 Sensor de pressão hidrostático [KUP2008].

reduz e a altura aumenta, mas a massa é a mesma e, portanto, a medição não varia [KUP2008]. Observe que o resultado é diferente em relação ao uso da medição do nível se for usada outra técnica, como, por exemplo, o flutuador.

Uma variação dessa técnica é o sistema de borbulhamento, conforme ilustrado na Figura 6.30. Nesse medidor, um gás de purga é inserido através de um tubo mergulhador que solta a bolha quando a pressão do gás iguala a pressão do líquido. Dessa forma é possível medir a pressão no reservatório [KUP2008].

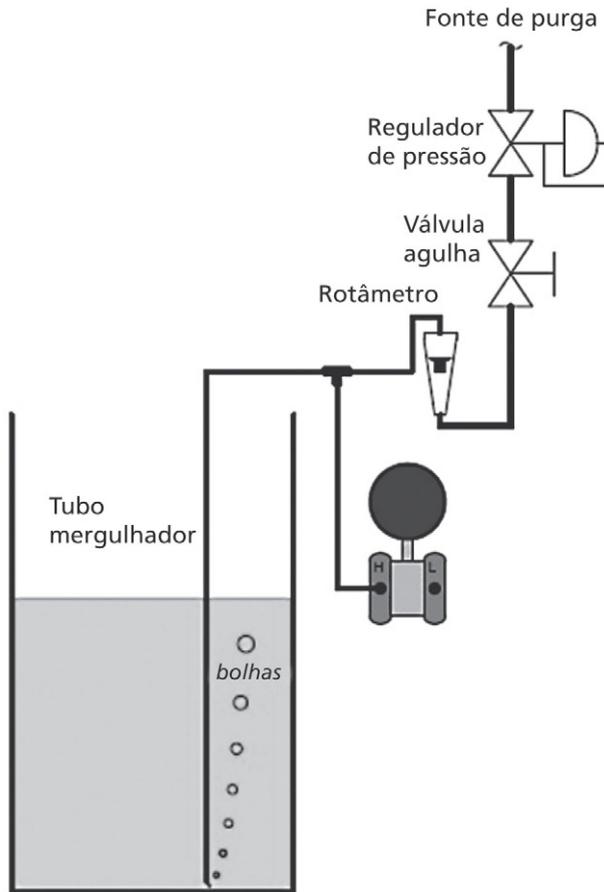


FIGURA 6.30 Sensor de nível borbulhador [KUP2008].

Outra dificuldade na medição de pressão hidrostática é quando o reservatório possui acima do líquido algum tipo de pressão. Para contornar esse problema é necessário realizar alguns arranjos que descontem o efeito da pressão como utilizar um medidor de pressão

diferencial que meça a diferença entre a pressão da parte gasosa e no líquido inferior [KUP2008].

(d) Deslocamento

A medição de nível baseada em deslocamento utiliza o princípio de Arquimedes, conforme ilustra a Figura 6.31. Nesse dispositivo mede-se continuamente o peso de uma haste imersa no líquido. À medida que o nível do líquido sobe, o peso medido é menor devido ao empuxo aplicado na haste, que é interpretado pelo medidor como um nível que está subindo.

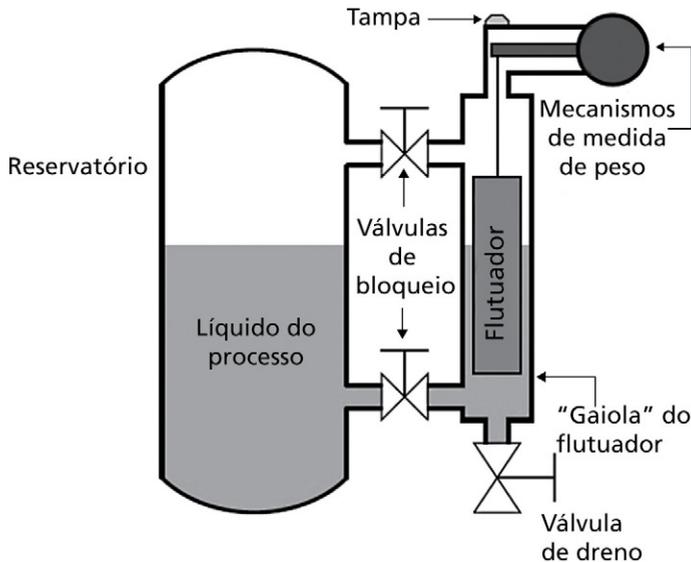


FIGURA 6.31 Sensor de nível por deslocamento [KUP2008].

Novamente vale observar que o dispositivo é montado com duas válvulas de bloqueio que permitem sua retirada total sem interferir no funcionamento do reservatório [KUP2008].

O medidor de deslocamento pode também ser utilizado para a medição da interface líquido/líquido em um reservatório. A única condição é a total imersão no líquido para medição correta.

(e) Eco

Uma forma diferente para medir o nível da superfície de um líquido é através do tempo decorrido entre a emissão de uma onda e o tempo que leva para refletir na superfície e retornar a um receptor. Os instrumentos de nível baseados em eco possuem a vantagem de serem imunes à variação da densidade do líquido. Nesse sentido são similares aos sensores flutuadores [KUP2008].

Uma característica importante para esses instrumentos é a precisão na contagem do tempo. Os problemas que podem ocorrer com os instrumentos baseados em eco são a existência de espuma na superfície do líquido, estruturas irregulares no espaço do volume de vapor do reservatório e vazamentos de líquido no espaço do vapor, embora esses últimos possam ser resolvidos com a colocação de tubos guias. Há dois tipos de instrumentos com base em eco: ultrassônicos e radares. Os instrumentos **ultrassônicos**, conforme ilustrado na [Figura 6.32](#), emitem um sinal sonoro a partir do volume vazio e medem o tempo de retorno do sinal (a – esvaziamento). Também podem ser instalados na parte inferior do reservatório e medir o tempo de retorno da parte cheia quando o volume vazio for muito acidentado (b – enchimento). A velocidade do som no meio varia com a temperatura e, por essa razão, os instrumentos mais precisos fazem uma correção desse fator medindo a temperatura [[KUP2008](#); [BAL2011-2](#)].

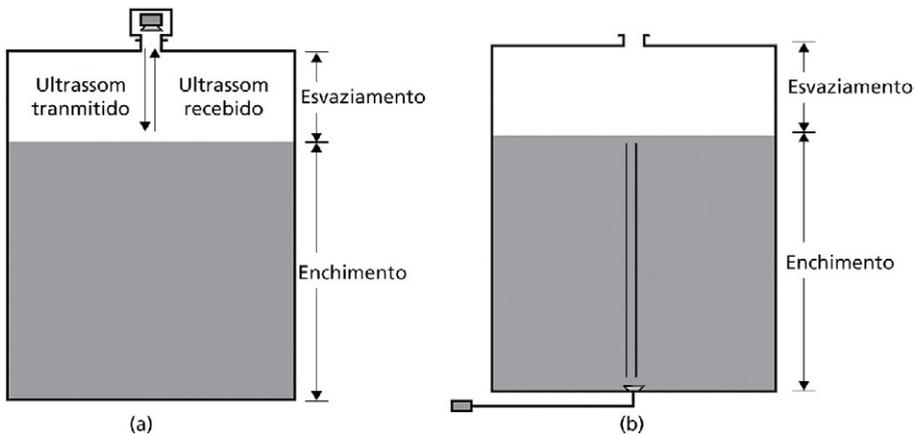


FIGURA 6.32 Medidor de nível ultrassônico [[KUP2008](#)].

Os instrumentos de nível **ultrassônicos** possuem também a vantagem de permitirem a medição de altura de materiais sólidos como pós e grãos em silos. As dificuldades para esses materiais são materiais com baixa densidade (reflexão fraca) e a solução da questão da superfície não plana e horizontal que os líquidos possuem (material sólido apresenta ângulo de repouso). Por essa razão, a medição mais precisa do nível em silos utiliza outras técnicas como a medição do peso do silo.

Os instrumentos de nível com **radar**⁴ possuem um funcionamento similar aos instrumentos por ultrassom: emitem um sinal e medem a

⁴Radar é o acrônimo **RA**dio **D**etectio**N** **A**nd **R**ang**i**ng – detecção e telemetria por rádio é uma forma muito utilizada a partir da segunda guerra para identificação de aviões e navios. Hoje é utilizada em automação em muitas outras aplicações [[KUP2008](#)].

distância a partir do tempo de retorno do sinal. A diferença fundamental entre essas duas tecnologias consiste no tipo de onda: enquanto o ultrassom é uma onda sonora (de pressão no ar) na faixa de dezenas de kHz, o radar emite uma onda eletromagnética com frequência muito superior, da ordem de alguns GHz. Alguns radares emitem os sinais de forma aberta dentro do reservatório e outros utilizam guias de onda, que são tubulações de precisão que guiam o fluxo da onda eletromagnética. Os radares podem funcionar com emissão de pulsos ou por frequência modulada de sinal. Esses instrumentos também podem medir silos com sólidos e valem as mesmas observações anteriores [KUP2008; BAL2011-2].

(f) Laser

Embora **laser** seja muito comum para medir distâncias, sua aplicação em instrumentos de nível com laser ainda é pouco utilizada em função de algumas dificuldades como líquidos com baixo fator de reflexão para permitir a medição do retorno do feixe de luz.

(g) Peso

Os instrumentos de nível por peso medem diretamente a massa de material do reservatório através de células de carga (Seção 0) instaladas nos pilares de sustentação do reservatório, conforme ilustrado na [Figura 6.33](#). Permitem medir tanto líquidos como sólidos. Uma desvantagem desse tipo de instrumento é a necessidade de preparar os reservatórios para realizarem a medição: todos os apoios devem ter células de carga, e as conexões de entrada e saída devem ser flexíveis para não atrapalhar a medição do peso [KUP2008].

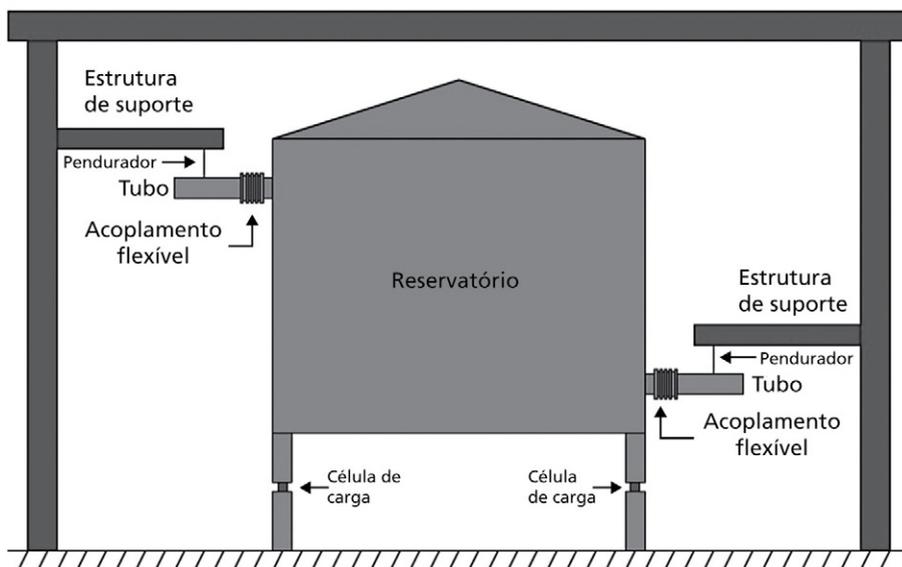


FIGURA 6.33 Medidor de nível por peso [KUP2008].

(h) Capacitivo

Instrumentos capacitivos para medição de nível medem a capacitância de uma haste inserida verticalmente em um reservatório, conforme a [Figura 6.34](#). À medida que o nível do líquido aumenta, a capacitância entre a haste e as paredes do reservatório aumenta também, provocando um sinal com saída maior no instrumento [[KUP2008](#); [NOR1969](#)].

O princípio básico que permite o funcionamento desse dispositivo é a equação básica da capacitância:

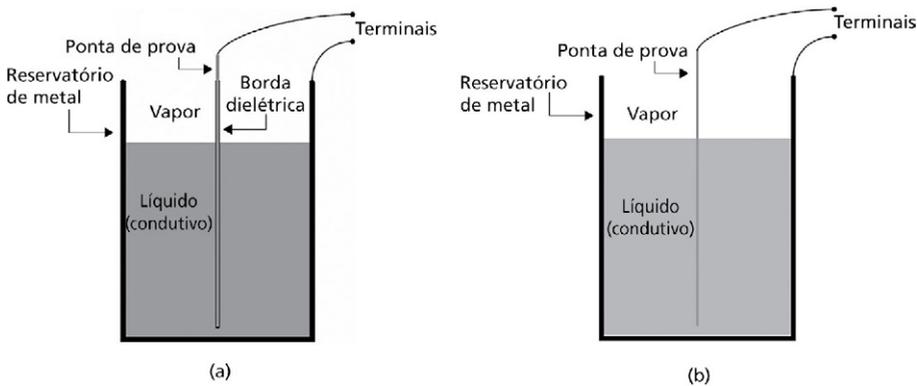


FIGURA 6.34 Medidor de nível capacitivo [[KUP2008](#)].

$$C = \epsilon \cdot A / d, \text{ onde:}$$

C – capacitância

ϵ – permissividade do material do dielétrico (isolante) entre as placas

A – área das placas do capacitor

d – distância entre as placas do capacitor

Observando a equação básica da capacitância, uma vez que a seção A é constante, o seu valor depende da distância d entre as placas e da variação do dielétrico ϵ . O funcionamento desse instrumento depende da condutividade do material que o reservatório contém [[KUP2008](#)]. Para materiais condutivos (não isolantes), o líquido não pode funcionar como o material isolante da capacitância. Por isso a haste deve ser revestida com um material isolante para permitir a formação de uma capacitância entre a própria haste e o líquido ([Figura 6.34 - a](#)). Nesse tipo de capacitância a distância d varia [[KUP2008](#)].

Para materiais isolantes o material do reservatório pode ser usado como dielétrico, e o que varia o valor da capacitância é o meio dielétrico ϵ uma vez que, ao aumentar o nível do reservatório, o dielétrico do material é bem maior que aquela sem o material, conforme a [Figura 6.34 \(b\)](#) [[KUP2008](#)].

(i) Radiativo

Instrumentos radiativos para medição de nível emitem raios gama (γ) que têm a capacidade de penetrar nos materiais. Colocando de um lado um emissor de raios γ e do outro um medidor do outro lado, pode-se medir o nível do líquido, uma vez que os materiais atenuam a passagem desse raio. A precisão da medição do instrumento depende de diversas variáveis, como estabilidade da densidade do fluido, material de cobertura do reservatório, taxa de decaimento da fonte de raios gama e deriva do detector. Além disso, há questões regulatórias para esse tipo de instrumento, uma vez que são radiativos. Esses medidores são utilizados quando não há a possibilidade de uso de outros mecanismos de medição de nível, como materiais altamente corrosivos ou tóxicos [KUP2008] Figura 6.35.



FIGURA 6.35 Válvula de controle.

SELEÇÃO DOS MEDIDORES

Para selecionar corretamente os instrumentos de medição de nível é necessário levar em consideração diversos fatores [KUP1969]:

- Faixa de funcionamento com valores mínimo e máximo a serem medidos.
- Necessidade de uso de sensores contínuos ou discretos.
- Tipo de material a ser medido, como bebida, laticínio, produtos destilados, suco de fruta, água doce, água salina, petróleo e derivados, alcatrão, fármacos, produtos químicos, combustível, gases liquefeitos, metais liquefeitos.
- Requisitos de higienização e restrições com relação a materiais que contaminam os produtos medidos.

- O inverso: a agressividade do material a ser medido pode deteriorar os materiais dos dispositivos de medição.
- Faixa de temperatura de operação.
- Presença de sujeira ou materiais que se depositam nos sensores, atrapalhando o processo de medição.

Os medidores capacitivos são sensíveis às mudanças da constante dielétrica do material. Medidores de ultrassom apresentam sensibilidade a presença de outros líquidos, espuma e partículas em suspensão (pó). Nos radares o sinal pode ser refletido em outras superfícies, atrapalhando a qualidade da medida [BAL2011-2].

Os medidores de nível com flutuadores e deslocamento são adequados para líquidos limpos e não viscosos e podem ser adaptados para materiais pastosos. Não são indicados para materiais granulados. A vantagem é a facilidade de instalação, e a desvantagem é a sensibilidade à variação da massa específica do material. Para temperaturas criogênicas esse tipo de medidor é confiável [BAL2011-2].

Os medidores de nível com pressão diferencial são indicados para líquidos limpos. Não são adequados para grãos e materiais pastosos. A vantagem desses medidores é a facilidade de instalação em reservatórios preexistentes. A desvantagem é a sensibilidade com relação à variação da mudança da massa específica dos líquidos [BAL2011-2].

Os medidores de nível com borbulhadores são relativamente fáceis de instalar e de baixo custo. Têm como desvantagem a necessidade de manutenção constante, e a extremidade da tubulação pode acumular resíduos, introduzindo erro na medição [BAL2011-2].

Os medidores de nível ultrassônicos são recomendados para líquidos e materiais pastosos. A principal vantagem é a realização da medida sem contato com o material. Como desvantagens pode-se citar a influência de partículas suspensas (pó), vapores e turbulências na superfície [BAL2011-2].

Os medidores de nível por radar se aplicam para materiais líquidos e pastosos. A vantagem é a medição sem contato e a precisão da medida. Não servem para medição de nível de interface de substâncias. A principal desvantagem é o alto custo.

Os medidores radiativos podem ser usados para líquidos, pastosos, grãos, mas não servem para interfaces. São aplicados quando os outros métodos não atenderem. O medidor não precisa invadir o reservatório para instalar o medidor, tornando adequado para situações de extrema temperatura e pressão. Desvantagem de alto custo.

Os medidores de nível capacitivos são adequados para líquidos. Uma das vantagens é a aplicação em condições extremas de temperatura e pressão. A desvantagem é a sensibilidade à variação dielétrica do material e também requer instalação invasiva [BAL2011-2].

6.3.5 Analisadores

Analisador é o termo utilizado para designar os instrumentos destinados à medição de variáveis importantes de um processo, excluídas as fundamentais como temperatura, vazão, pressão e nível [BEG2006].

Estão inclusos nesta categoria além dos instrumentos que analisam a composição de materiais como cromatógrafos, medidores de grandezas como pH, viscosidade e condutividade [BEG2006].

Com a evolução da tecnologia, medidas realizadas em laboratório de diversas grandezas de processo, normalmente por amostragem, estão sendo substituídas por analisadores que permitem um controle mais apurado do processo produtivo. Esses analisadores podem operar continuamente ou realizando a medição de amostras a intervalos predeterminados.

Analisadores são utilizados diretamente no processo ou em atividades de suporte como controle de poluição e supervisão das utilidades. Assim, analisadores de água, de efluentes, de gases são cada vez mais utilizados para garantir e demonstrar que a indústria não está poluindo o ambiente.

Os analisadores requerem instalações especiais para que seja possível a captação da amostra do processo através de sondas que podem ser fixas ou retráteis, dependendo do tipo de material a ser recolhido e das características do processo. A amostra é retirada, transportada e condicionada para entrar no analisador [BEG2006].

Há uma quantidade muito grande de analisadores, e aqui foram selecionados apenas alguns principais, a saber:

- analisadores de gases
- analisadores de líquidos
- analisadores de tratamento de água
- cromatógrafo
- espectrômetro de massa

6.3.5.1 Analisadores de gases

Os analisadores de gás foram organizados em três tecnologias:

- (a) analisadores de oxigênio
- (b) analisadores de gases por absorção de radiação
- (c) analisadores de gases por condutividade térmica

(a) Analisadores de oxigênio – O₂

A maior aplicação dos analisadores de oxigênio é no controle da combustão. Uma combustão operando com excesso de combustível (falta de ar) resulta em uma combustão incompleta, conseqüente desperdício de combustível e aumento de poluentes, além do risco de explosão. Por outro lado, o excesso de ar garante uma combustão completa, mas diminui o rendimento, pois força

aquecimento de massa de ar que não vai queimar. O ideal é a operação com um ligeiro excesso de oxigênio para garantir a queima completa de forma segura da ordem de 1% a 3%.

Outras aplicações incluem a medida da pureza do oxigênio para aplicações industriais e hospitalares.

CÉLULA COM ÓXIDO DE ZIRCÔNIO

A célula de óxido de zircônio funciona como um eletrólito em temperaturas acima de 500°C. Dessa forma, é possível construir uma célula eletroquímica cujo potencial é proporcional ao logaritmo das concentrações de oxigênio a que está submetida. Uma concentração é do processo, e a outra normalmente é o ar como referência com 20% de O₂ [BEG2006].

A vida útil da célula é da ordem de 1 a 3 anos, dependendo da presença ou não de materiais corrosivos.

ANALISADORES DE OXIGÊNIO PARAMAGNÉTICOS

Além de alguns óxidos de nitrogênio, somente o oxigênio apresenta características paramagnéticas. Isso significa que as linhas de campo magnético se concentram com a presença de oxigênio. O equipamento gera um campo magnético que atrai as moléculas de oxigênio e expulsa os demais materiais. Os analisadores possuem esferas com nitrogênio que são expulsas pelo oxigênio e esse deslocamento é proporcional ao teor de oxigênio [BEG2006].

CÉLULAS ELETROQUÍMICAS DE MEMBRANA

Nestas células, o oxigênio atravessa uma membrana semipermeável e reage com o eletrólito existente no interior da célula, gerando uma diferença de potencial entre os dois eletrodos proporcional ao teor de O₂. Outra aplicação importante dessas células é medir a quantidade de oxigênio dissolvido na água, no tratamento de efluentes [BEG2006].

(b) Analisadores de gases por absorção de radiação

A energia eletromagnética interage com a matéria em todas as regiões do espectro variando a forma de interação em função da região de frequências. Por exemplo, a radiação gama interage no nível nuclear das moléculas enquanto as ondas de rádio, com comprimento de onda bem maior, interagem com o *spin* dos elétrons. Por apresentarem características específicas para cada material, essas interações são usadas para fins analíticos [BEG2006].

ANALISADORES INFRAVERMELHOS

Esses analisadores operam pela absorção de energia na região do infravermelho (I.V.) do espectro. Gases com moléculas formadas por dois ou mais átomos de natureza diferente, como CO, SO₂ e HCl, possuem frequência de ressonância própria na faixa I.V. Ao se emitir uma radiação I.V. passando por esses gases, quando a frequência coincidir com a molécula do gás, este absorve a radiação, permitindo identificar sua presença.

Os analisadores de processo mais usuais filtram as frequências de radiação para focar apenas naquelas frequências dos gases que se desejam medir [BEG2006].

O **Quadro 6.10** - Alguns gases medidos pelo analisador infravermelho [BEG2006] apresenta algumas substâncias que podem ser medidas com analisador infravermelho [BEG2006].

Quadro 6.10 Alguns gases medidos pelo analisador infravermelho [BEG2006]

	Fórmula	Substância	Menor faixa
1	CO	Monóxido de carbono	50 ppm
2	CO ₂	Dióxido de carbono	10 ppm
3	CH ₄	Metano	300 ppm
4	C ₂ H ₆	Etano	500 ppm
5	C ₃ H ₆	Propileno	-
6	C ₂ H ₅ OH	Metanol	-
7	NH ₃	Amônia	300 ppm
8	H ₂ O	Vapor d'água	2.000 ppm
9	SO ₂	Dióxido de enxofre	200 ppm
10	NO	Óxido nítrico	500 ppm

ANALISADORES ULTRAVIOLETA

Estes analisadores operam de forma similar aos infravermelhos e são úteis pela absorção de energia de gases e vapores que possuem absorção muito fraca na região I.V. No **Quadro 6.11** estão algumas substâncias que podem ser medidas com esse analisador U.V.

Quadro 6.11 Alguns gases medidos pelo analisador ultravioleta [BEG2006]

	Fórmula	Substância	Menor faixa
1	Cl ₂	Cloro	100 ppm
2	ClO ₂	Dióxido de cloro	100 ppm
3	SO ₂	Dióxido de enxofre	50 ppm
4	C ₂ H ₅ OH	Etanol	10% vol
5	CH ₃ OH	Metanol	1% vol
6	H ₂ S	Dióxido de enxofre	1% vol
7	O ₃	Ozônio	20 ppm
8	NO ₂	Dióxido de Nitrogênio	50 ppm
9	Hg	Mercúrio	50 ppb
10	C ₆ H ₆	Benzeno	5 g/m ³

(c) Analisadores de gases por condutividade térmica

As diferenças entre a condutividade térmica dos diferentes gases e vapores podem ser usadas para análise. A medição consiste na variação da resistência

de um filamento aquecido, circundado pela mistura a ser analisada. Quanto maior a condutividade térmica da mesma, maior será a dissipação de calor e a queda na temperatura do filamento resulta na redução da resistência elétrica. A montagem é feita com quatro filamentos montados em ponte, em que dois são colocados na amostra e dois em um gás de referência [BEG2006] Quadro 6.12.

Quadro 6.12 Condutividade térmica de algumas substâncias [BEG2006]

	Substância	Condutividade térmica
1	ar	1,000
2	Vapor d'água	0,692
3	Amônia	0,941
4	Cloro	0,340
5	Dióxido de carbono	0,636
6	Dióxido de enxofre	0,367
7	Dióxido de nitrogênio	2,600
8	Gás sulfídrico	0,570
9	Hidrogênio	6,943
10	Monóxido de carbono	0,964
11	Metano	1,312

6.3.5.2 Analisadores de líquidos

Os analisadores de líquidos permitem a medição de algumas características específicas dos líquidos. Aqui serão analisados:

- Analisador de pH
- Analisadores por condutividade elétrica

ANALISADORES DE pH

O pH permite a quantificação da “força” de um ácido ou base, ou seja, o grau de dissociação iônica. Ao se dissolverem na água, os ácidos dão origem aos íons de hidrônio H^3O^+ ou, de forma mais simples, o hidrogênio H^+ . As bases alcalis geram na água íons hidroxila OH^- . Como a dissociação da água pura gera íons hidrônio e hidroxila em concentrações sempre iguais, pode-se afirmar que [BEG2006] Quadro 6.13:

Quadro 6.13 Condutividade de algumas soluções [BEG2006]

	Substância	Condutividade
1	Água de altíssima pureza	0,05 $\mu S/cm$
2	Água destilada	1 $\mu S/cm$
3	Água da rede pública	100 $\mu S/cm$
4	NaOH a 0,05%	1.000 $\mu S/cm$
5	H2SO4 a 1%	50.000 $\mu S/cm$
6	HCl a 20%	850.000 $\mu S/cm$
10	Benzeno	5 g/m3

- em uma solução neutra $[H^+] = [OH^-]$
- em uma solução ácida $[H^+] > [OH^-]$
- em uma solução alcalina $[OH^-] > [H^+]$

A definição do pH é dada por:

$pH = -\log_{10} [H^+]$ em solução aquosa.

Como a concentração de hidrogênio na água pura a 25 °C é 10^{-7} o pH é 7.

A medição do pH é feita por meio de um eletrodo de membrana de vidro cujo potencial proporcional à concentração de íons de hidrogênio é medido em relação a um eletrodo de referência. O circuito também possui compensação de temperatura, uma vez que há sensibilidade com relação a essa grandeza [BEG2006].

ANALISADORES DE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

A condutividade elétrica é definida como a condutância medida entre as faces de um cubo de 1cm de lado. Para soluções aquosas esse valor depende da concentração de íons e de sua mobilidade e funcionam como portadores de carga elétrica. A unidade empregada para condutividade é Siemens por centímetro (S/cm) A proporcionalidade entre a concentração iônica e a condutividade torna o fenômeno útil na medição de concentrações ou de contaminação da água por produtos iônicos [BEG2006].

Na área de processos essa medição é aplicada na água de lavagem de materiais para verificar e controlar a contaminação. A medição da condutividade baseia-se na intensidade de corrente que circula entre dois eletrodos imersos na solução. O uso de corrente alternada minimiza os efeitos de polarização eletrólise. Os eletrodos são colocados em uma célula de condutividade que mede a corrente para uma dada tensão. Esse circuito possui compensação térmica devido à sensibilidade em relação à temperatura.

6.3.5.3 Analisadores tratamento de água

Além da medição do oxigênio dissolvido na água, há ainda outros analisadores importantes para o tratamento de água e efluentes:

- Turbidímetro
- Cloro residual
- Silicômetro

TURBIDÍMETRO

A turbidez reflete a quantidade de partículas sólidas na água, medida em ppm. Esse fenômeno é subjetivo, pois dependendo do tamanho, cor e refletividade das partículas em suspensão, pode dar a sensação de turbidez diferente para a mesma quantidade de partículas. A medição é baseada em princípios óticos, ou seja, a transparência para a passagem de luz visível [BEG2006].

A medição da turbidez é feita para aplicações como tratamento de água potável e na indústria de bebidas [BEG2006].

CLORO RESIDUAL

Praticamente todo tratamento de água potável emprega a cloração. A reação do cloro com a água resulta na formação de ácido hipocloroso e de íons hipoclorosos. É importante a manutenção de um pequeno residual de cloro na água, e teores altos são prejudiciais. Os analisadores de *cloro residual livre* medem o cloro presente na forma de ácido hipocloroso e de íons hipoclorosos. Os analisadores de *cloro residual combinado* medem o cloro presente na forma de cloroaminas. Os analisadores de *cloro residual total* medem o cloro livre somado ao combinado, mas é um equipamento mais caro e depende de reagentes [BEG2006].

SILICÔMETRO

A monitoração do teor de sílica na água de alimentação de caldeiras é importante para evitar problemas de depósitos nas superfícies internas desses equipamentos. Tradicionalmente esse controle é feito em laboratório através de técnicas clássicas como o uso de reagentes e determinação de resultados por métodos colorimétricos. Para a medição na linha surge um problema na construção de um analisador, pois uma água com teor de sílica não apresenta nenhuma propriedade que permita o uso de um analisador convencional (características ópticas, magnéticas, elétricas, térmicas etc). Para esse tipo de situação existem os autoanalisadores, que efetuam a análise contínua da amostra de forma automática utilizando o mesmo método do laboratório. O equipamento possui reservatórios internos que suprem os reagentes necessários.

Assim, o silicômetro é um autoanalisador que realiza uma reação com molibdato de amônia e resulta em complexo de cor amarelada. Em seguida, o ácido oxálico suprime a interferência provocada pelos fosfatos, possivelmente presentes, e uma reação final resulta em uma coloração azul proporcional ao teor de sílica presente. Essa cor é medida por um fotômetro [BEG2006].

6.3.5.4 Cromatógrafo

Os cromatógrafos de processo são analisadores que permitem a determinação qualitativa e quantitativa de vários componentes de uma amostra, bastando que o instrumento esteja configurado para os componentes e as faixas de concentração a serem analisados [BEG2006].

Trata-se de um equipamento sofisticado que permite a análise em linha da composição dos materiais do processo.

6.3.5.5 Espectrômetro de massa

O espectrômetro de massa é um analisador que permite a determinação qualitativa e quantitativa de vários componentes de uma amostra, similarmente ao cromatógrafo. No entanto, o espectrômetro de massa possui um ciclo de trabalho menor, da ordem de segundos e não minutos, como no caso anterior [BEG2006].

6.3.6 Atuadores

Os atuadores são os elementos finais de controle de um sistema de automação. Para os processos contínuos um elemento importante é a válvula de controle. Uma válvula de controle divide-se basicamente em atuador, corpo e internos, castelo e engaxetamento [BEG2006].

O **atuador** recebe o sinal de controle, converte em movimento para sua abertura ou fechamento. A atuação para realizar o fechamento pode ser manual, elétrica ou hidráulica.

O **corpo e internos** são as peças responsáveis pela obstrução da passagem do fluido.

O **castelo e engaxetamento** é a parte que conecta o atuador ao corpo da válvula.

As válvulas de controle podem ser construídas com diversos tipos de obstrução: válvula globo, válvula esfera, válvula borboleta e outros tipos especiais [BEG2006].

Uma variante dessa válvula é a válvula solenoide, utilizada na forma tudo ou nada, ou seja, ou permite a passagem do fluido ou bloqueia completamente essa passagem.

6.3.7 Outros tipos de aplicações

Procurou-se apresentar neste capítulo uma visão abrangente dos diferentes tipos de transdutores e analisadores utilizados em automação. O assunto é muito vasto, e é difícil realizar uma varredura completa do assunto. Para finalizar vale comentar duas aplicações específicas que podem contribuir para essa visão ampla.

A primeira delas trata da aplicação de instrumentação na engenharia civil em estruturas visando analisar a segurança de construções [SIL2006]. Este é um exemplo em que a instrumentação permite que sejam feitas monitorações em estruturas de barragens e acompanhar seu comportamento, prevenindo a ocorrência de catástrofes. A instrumentação pode identificar sinais de alterações que podem comprometer a estrutura. A instrumentação em si utiliza os transdutores já descritos neste capítulo, como *strain gages*, elementos piezoelétricos e outros elementos adaptados para esse tipo de aplicação. Alguns transdutores, como medidores de tensões dentro da estrutura, precisam ser instalados durante a obra, exigindo que o sistema de instrumentação seja projetado juntamente com a própria barragem.

A última refere-se à automação de laboratórios. Procedimentos tradicionais realizados em laboratório como o uso de reagentes para fazer a análise de substâncias são totalmente automatizados quando assim for viável economicamente. Dessa forma, laboratórios especializados em exames de sangue, por exemplo, face ao alto volume, realizam tais exames de forma totalmente

automática sem nenhuma intervenção humana. Ficam para operações manuais apenas aqueles exames realizados em volumes menores.

6.4 Considerações finais

Este capítulo mostrou as principais características das medições que precisam ser realizadas nos processos e produtos para realizar controle da qualidade ou sistemas de automação. Há todo um sistema de metrologia no país para garantir a rastreabilidade das medidas de forma que uma empresa, ao adquirir equipamentos de medição, pode mantê-lo calibrado utilizando esse sistema e garantindo a qualidade dos seus produtos e serviços. Por outro lado, características técnicas especiais nos equipamentos podem ser criadas como barreiras técnicas para impedir a exportação ou importação de produtos, e o Inmetro **orienta** as empresas tanto para qualificar seus produtos internamente como exportar para outros países.

6.5 Leituras recomendadas

Para maior aprofundamento sobre transdutores, são recomendadas três leituras: Kuphaldt, Balbinot e o vocabulário de metrologia.

O livro de Kuphaldt [KUP2008], *Lessons in Industrial Instrumentation*, é uma publicação gratuita e está disponível na web. Tem um bom grau de profundidade do assunto transdutores e aborda desde o fenômeno físico, as leis que o regem, como são construídos os dispositivos e também como selecionar melhor para as aplicações.

O livro de Balbinot [BAL20010-1] e [BAL2011-2], *Instrumentação e Fundamentos de Medidas*, na verdade é uma obra de dois volumes e trata também do assunto explorando com detalhes cada aspecto das diversas medições feitas em processos de automação.

Finalmente, com relação à parte de metrologia, recomenda-se conhecer com mais profundidade o *Vocabulário Internacional de Metrologia* [VIM2008], também disponível na web.

6.6 Exercícios e atividades

1. Um dos termopares mais comuns encontrados no mercado é o termopar tipo K. Identifique o que é e como poderá ser usado. Identifique um ou mais fabricantes do termopar e do instrumento.
2. O Pt100 é um dos sensores de temperatura (RTD) mais utilizados no mercado. Procure suas características e indique algumas aplicações.
3. Procure fotos de termógrafos que medem a distribuição de temperatura em equipamentos em operação.

Referências bibliográficas

- [ALV2005] ALVES, José Luiz Loureiro. *Instrumentação, controle e automação de processos*. Rio de Janeiro: LTC, 2005.
- [ASH2013] Ashcroft Willy catálogo de termoresistências. Obtido no endereço <http://www.ashcroft.com.br/termoresistencia-modelo-str/> (Acessado em: 15/06/2013.)
- [BAL2010-1] BALBINOT, Alexandre. BRUSAMARELLO, Valner João. *Instrumentação e Fundamentos de Medidas*. Volume 1. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.
- [BAL2011-2] BALBINOT, Alexandre. BRUSAMARELLO, Valner João. *Instrumentação e Fundamentos de Medidas*. Volume 2. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.
- [BAL2013] Baumer Passion for Sensors. Catálogo. Disponível em <http://www.baumer.com/int-en/products/presence-detection/photoelectric-sensors/>. (Acessado em: 15/06/2013.)
- [BEG2006] BEGA; Egidio, Alberto. org. *Instrumentação industrial*. Vários autores. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência/IBP, 2006.
- [BUR2013] Linear Motion Potentiometers Bourns. Obtido em: http://www.bourns.com/ProductLine.aspx?name=linear_motion_potentiometers (Acessado em: 15/06/2013.)
- [ECL2013] Ecil – Catálogo de Termopares. Obtido no endereço www.ecil.com.br (Acessado em: 15/06/2013.)
- [EPD2003] European Parliament. Directive 2002/95/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment. Brussels. Jan 2003. Obtido no endereço http://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&ved=0CCMQFjAA&url=http%3A%2F%2Feur-lex.europa.eu%2FLEXUriServ%2FLEXUriServ.do%3Furi%3DOJ%3AL%3A2003%3A037%3A0019%3A0023%3Aen%3APDF&ei=H2tDUP-5Oujz0gHL1oD4Cw&usq=AFQjCNEgDW_yOlaMITQeQ7cY8Y5_qdz3hA&sig2=tH0hNTQOxY147IWC2E9Hig (Acessado em: 02/09/2012.)
- [INM2012] INMETRO. Estrutura Hierárquica de Rastreabilidade. Obtido no endereço <http://www.inmetro.gov.br/metCientifica/estrutura.asp> (Acessado em: 02/09/2012.)
- [INM2012B] INMETRO. SBC – Sistema Brasileiro de Certificação. Avaliação da Conformidade. Obtido no endereço <http://www.inmetro.gov.br/qualidade/comites/sbc.asp> (Acessado em: 02/09/2012.)
- [JCG2008] JCGM. International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM). Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM), Bureau International de Poids e Mesures – BIPM 3rd edition. 2008.
- [KST2013] Kistler – Measure, Analyse, Innovate. Obtido no endereço <http://www.kistler.com/br/en/product/force/9337A40> (Acessado em: 15/06/2013.)
- [KOT2013] Coe Sensors Gage. Disponível em: <http://www.koturuya.com/basinscensorleri/strain-gage-sensorleri.html>. (Acessado em: 15/06/2013.)
- [KUP2008] KUPHALDT, Tony R. *Lessons in Industrial Instrumentation*. Open Book Project licensed under the Creative Commons Attribution 3.0 United States License. Obtido no endereço <http://openbookproject.net/books/socratic/sinst/> (Acessado em: 31/03/2013.)
- [LDS2013] Loadstar Sensors. Load Sensing Made Easy. Disponível em: <http://www.loadstarsensors.com/force-measurement-capacitive-sensors.html>. (Acessado em: 15/06/2013.)
- [LIO2013] Lion Precision Capacitive Sensors. Catálogo. Disponível em: <http://www.lionprecision.com/capacitive-sensors/cap-products.html>. (Acessado em: 15/06/2013.)
- [MOT1997] MOTOROLA. Integrated Silicon Pressure Sensor MPX 115. Motorola Technical Data. Disponível em: www.datasheetcatalog.com. (Acessado em: 01/10/2012.)

- [NOR1969] NORTON; Harry, N. *Handbook of Transducers form Electronic Measuring Systems*. Prentice Hall. USA. 1969.
- [P&S2013] Tabela de Conversão de Unidades. Revista P&S. Ed. Banas. Disponível em: www.ps.com.br/common/pdf/Download/conversao_unidade_pressao.pdf. (Acessado em: 18/06/2013.)
- [RDP2013] D5W Submersible LVDT Displacement Transducer. Catálogo obtido em <http://www.rdpe.com/us/d5w.htm> (Acessado em: 15/06/2013.)
- [SIL2006] SILVEIRA, João Francisco Alves. *Instrumentação e Segurança de Barragens de Terra e Enrocamento*. São Paulo. Ed. Oficina de Textos, (2006).
- [SOA2006] SOARES, Luci Valente. *Curso Básico de Instrumentação para Analistas de Alimentos e Fármacos*. Barueri, SP. Ed Manole, (2006).
- [SOU2010] SOUZA, Zulcy de; BORTONI, Edson de Costa. *Instrumentação para Sistemas Energéticos e Industriais*. Itajubá, MG. Ed. Do Autor, (2006).
- [TCM2013] Como funcionam os radares de trânsito. Tecmundo. Obtido no endereço <http://www.tecmundo.com.br/infografico/10350-como-funcionam-os-radares-de-transito-infografico-.htm> (Acessado em: 18/06/2013.)
- [TMP2013] Temperatura e termopares. Disponível em: <http://www.termopares.com.br>. (Acessado em: 15/06/2013.)
- [VIM2008] INMETRO. *Vocabulário Internacional de Metrologia: – Conceitos Fundamentais e Gerais e Termos Associados (VIM)*. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial – INMETRO. 3. ed. Rio de Janeiro. 2008.

Processos discretos

SUMÁRIO

7.1	Miniglossário	222
7.2	Os processos discretos	222
7.2.1	Motivação	222
7.3	Principais características de um processo discreto	223
7.4	Exemplos de processos discretos	224
7.4.1	Controle discreto de grandezas discretas	224
7.4.1.1	<i>Sistema com entradas e saídas discretas</i>	<i>224</i>
7.4.2	Processo batelada	224
7.4.2.1	<i>Sistema digital com alguns valores analógicos</i>	<i>224</i>
7.4.3	Controle discreto de grandezas contínuas	225
7.4.3.1	<i>Sistema com entradas contínuas e saídas discretas</i>	<i>225</i>
7.4.4	Intertravamento	226
7.4.4.1	<i>Sistema de proteção</i>	<i>226</i>
7.5	Classificação das operações na manufatura	227
7.6	Máquina de estados	227
7.7	A Norma IEC 61131-3	229
7.8	Transdutores para processos discretos	231
7.8.1	Sensores	231
7.8.1.1	<i>Sensores</i>	<i>232</i>
7.8.1.2	<i>Identificadores</i>	<i>235</i>
7.8.2	Atuadores	238
7.8.2.1	<i>Atuadores elétricos</i>	<i>238</i>
7.8.2.2	<i>Atuadores hidráulicos</i>	<i>243</i>
7.8.2.3	<i>Atuadores pneumáticos</i>	<i>244</i>
7.9	Equipamentos para automação discreta	245
7.9.1	Painéis de controle e controladores programáveis	245
7.9.2	Equipamentos dedicados	247
7.9.3	CNC controle numérico por computador	247
7.9.4	Robôs para a manufatura	249

7.9.5	Veículos automatizados.....	251
7.9.6	Inspeção automatizada.....	253
7.10	Leituras recomendadas	254
7.11	Exercícios e atividades	254

Este capítulo apresenta conceitos, métodos e aplicações da automação de processos discretos.

AO TÉRMINO DESTES CAPÍTULOS VOCÊ VAI CONHECER:

- o que são processos discretos;
- quais as principais características dos processos discretos;
- conhecer as típicas formas de automação dos processos discretos.

7.1 Miniglossário

Controlador programável. Equipamento utilizado para realizar o controle de processos discretos, admitindo também algumas variáveis contínuas.

Intertravamento. Conjunto de dispositivos que têm por finalidade garantir a segurança operacional de forma independente do sistema de automação.

Máquina de estados. Conjunto de situações bem definidas que um processo discreto pode assumir.

Variável discreta. Variável que assumem valores discretos ao longo do tempo.

7.2 Os processos discretos

Conforme já descrito no Capítulo 1, um Sistema Produtivo tem por finalidade a produção de um produto ou a realização de um serviço. No Capítulo 2 foi apresentada uma classificação dos diferentes tipos de processo, em que pode ser observado que, enquanto o fluxo contínuo é apresentado como um tipo de processo, os processos discretos se desdobram em cinco diferentes tipos! As diferenças já foram detalhadas e, neste capítulo, serão apresentadas as tecnologias e os equipamentos que dão suporte a todos esses processos.

7.2.1 Motivação

Recordando a classificação dos diferentes tipos de produção discreta, qual foi o critério utilizado para fazer essa classificação?

Reveja os filmes e observe. Procure outros vídeos na internet.

Basicamente é o volume de produção que os diferencia. Isso tem uma implicação direta nos equipamentos utilizados para a execução dos trabalhos,

bem como a necessidade de utilização de automação. Outra característica dos processos discretos é o fato de ser intensivo em mão de obra, oposto ao que ocorre nos processos contínuos. Esses processos são originários da produção com baixo grau de automação, como é o caso clássico do Ford modelo T que possui maquinário somente para reduzir o esforço humano. No outro extremo, observe a produção do AUDI A1, praticamente sem intervenção humana.

Esse largo espectro de possibilidades torna os processos discretos com muitas possibilidades de arranjos e permite também que processos manuais evoluam gradativamente para uma maior automação das operações. Na indústria metalúrgica, por exemplo, as máquinas-ferramenta funcionavam manualmente operadas pelos torneiros mecânicos. Com a automação dos movimentos das máquinas-ferramenta através dos sistemas CNC – Controle Numérico por Computador, os torneiros viraram programadores dessas máquinas, e os operadores passaram a fazer o carregamento e descarregamento das máquinas, além da movimentação dos materiais entre as etapas de produção. Ao longo do tempo, essas tarefas também foram automatizadas com equipamentos de transferência (*transfer machines*) e com veículos guiados automaticamente (AGVs – *Automatic Guided Vehicles*).

7.3 Principais características de um processo discreto

Os processos discretos se caracterizam por possuírem variáveis que assumem valores discretos ao longo do tempo. São informações de estado do sistema que assumem valores discretos e não contínuos. Do ponto de vista teórico, o tratamento é dado a tais variáveis como se fossem variáveis booleanas, aquelas utilizadas em circuitos lógicos de computadores.

São exemplos de tais variáveis:

- motor ligado ou desligado;
- alarme ativado ou desativado;
- tem energia ou acabou a energia;
- tanque cheio ou vazio;
- válvula aberta ou fechada;
- fim de curso acionado ou não.

Observe-se que a informação de tanque cheio ou vazio, válvula aberta ou fechada foi assumida como sendo discreta. Na verdade, essas variáveis também poderiam ser contínuas: tanque 30% cheio ou vazio, válvula aberta 75%.

A questão que se coloca é se realmente, no caso de um processo específico, é necessário considerar essas variáveis como contínuas ou como discretas. Evidentemente os dispositivos de medida e de acionamento de variáveis discretas são mais simples em termos construtivos (e mais baratos), além de exigirem uma lógica mais simples de funcionamento.

7.4 Exemplos de processos discretos

Aqui seguem alguns exemplos para ilustrar melhor os processos discretos. Foram escolhidos três casos: pintura, controle de temperatura e batelada.

7.4.1 Controle discreto de grandezas discretas

7.4.1.1 Sistema com entradas e saídas discretas

Entradas e saídas discretas significa que todos os sinais trabalhados pelo sistema são digitais. Um bom exemplo disso é o sequenciamento de operações de uma planta. Considere o caso de uma pintura automatizada: esse tipo de pintura é feito com uma pistola fixa que pulveriza a tinta na peça que passa na frente do jato de tinta (Figura 7.1). As diversas peças a serem pintadas são penduradas em uma corrente que circula na frente da pistola. A pistola fica desligada até se aproximar uma peça. A identificação da aproximação é feita através de uma alavanca que fecha um contato ao ser esbarrada pela peça. Essa informação aciona a pistola para começar a pintar. Depois de ser pintada, a peça se afasta da pistola e passa na frente de um feixe de luz que informa a pistola que a peça já saiu, comandando o seu desligamento. A aproximação da próxima peça aciona novamente a pistola. As peças, depois de receberem a tinta, seguem para uma estufa de secagem.

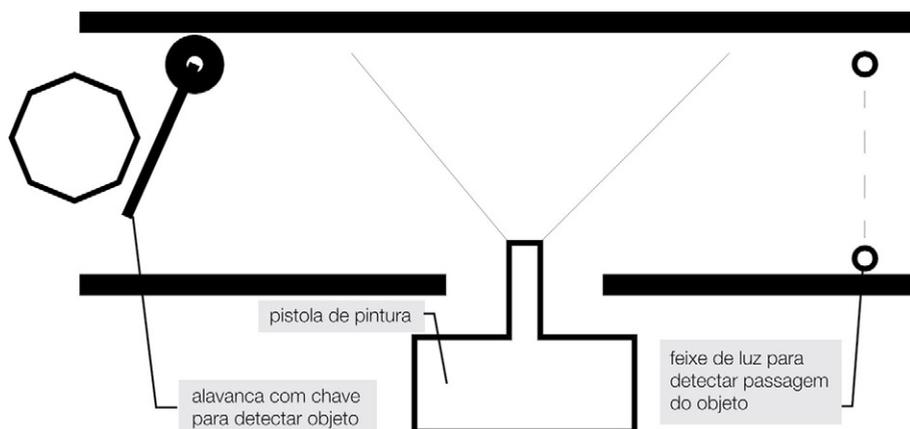


FIGURA 7.1 Exemplo de um processo automático de pintura.

7.4.2 Processo batelada

7.4.2.1 Sistema digital com alguns valores analógicos

Os elementos aqui citados podem ser controlados através de circuitos construídos a relés, constituindo o chamado quadro de comando a relés. Mais modernamente, entretanto, é utilizado o CLP – controlador lógico programável, que pode receber as informações do processo e, através de uma programação

adequada, realizar as funções de controle mencionadas. Mais adiante, na Seção 7.8.3, será detalhado o funcionamento desses equipamentos.

Um exemplo interessante é o controle sequencial de uma planta química que efetua o processamento por batelada em um reator químico, conforme mostrado na Figura 7.2. A “receita” do produto é colocar água no reator, adicionar os produtos A, B e C em quantidades adequadas e agitar, conforme escrito a seguir:

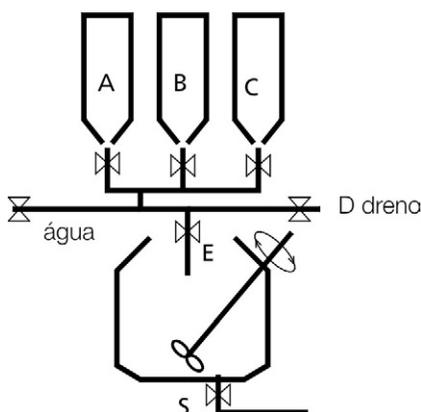


FIGURA 7.2 Sequenciação de um processo químico de batelada.

- No início do processo a válvula **S** (de saída) deve estar fechada.
- Abrir as válvulas **água** e **E** para colocar água no reator até a quantidade necessária, medida na balança que está embaixo do reator (variável analógica de valor do peso).
- Após isso, fechar **água** e aguardar até a canalização se esvaziar, mantendo **E** aberto.
- Abrir a válvula **A** para pesar o material A até o valor desejado.
- Fechar **E** e **A**. Abrir o dreno **D** e abrir a **água** para limpar a tubulação.
- Fechar a **água** e o dreno **D**.
- Repetir a operação para os materiais B e C.
- Agitar a mistura pelo tempo especificado.
- Descarregar a mistura abrindo a saída **S**.

Esse exemplo mostra que as variáveis são todas digitais, mas o peso é uma variável analógica que dispara ações no processo.

7.4.3 Controle discreto de grandezas contínuas

7.4.3.1 Sistema com entradas contínuas e saídas discretas

Entrada contínua e saída discreta significa que as variáveis de entrada são analógicas e a saída de comando é digital. Um bom exemplo dessa situação é a geladeira: a variável controlada é a temperatura (variável analógica), mas o acionamento dos dispositivos que influem na temperatura – no caso o ligamento

do compressor – é feito de forma discreta: o compressor é ligado quando a temperatura está muito alta e desligado quando a temperatura atingiu um valor mínimo preestabelecido. O sistema fica oscilando entre dois valores, um que liga e outro que desliga o compressor, formando, com isso, uma histerese (Figura 7.3).

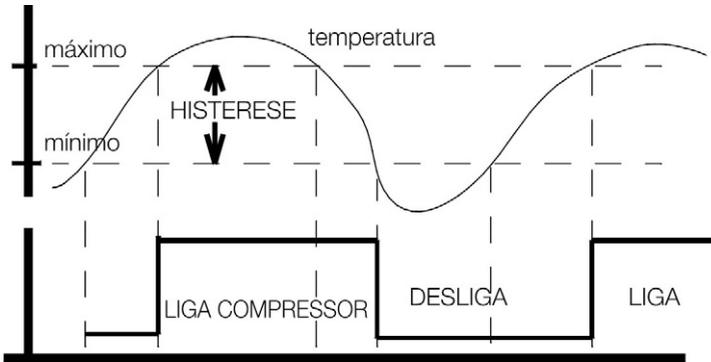


FIGURA 7.3 Controle de temperatura da geladeira.

Outro exemplo para esse caso é o controle de temperatura de um forno realizado através de um termostato. Normalmente, nesses casos, o termostato é uma junta bimetálica com coeficientes de dilatação diferentes de tal forma que um contato é aberto ou fechado da mesma forma que a geladeira, só que em temperaturas mais altas. O termostato liga ou desliga uma resistência elétrica que aquece o interior do forno. Observe que nesses casos não há como esfriar o forno, pois isso é feito somente com as perdas do sistema.

Esse controle é mais grosseiro que o controle realizado com um sistema de malha fechada analógico descrito nos capítulos anteriores. Portanto, nesses casos é necessário conhecer bem os requisitos do processo em termos de tolerância de variação de temperatura para saber se tal procedimento é adequado ou não. Pode-se tomar diversas medidas para se refinar o controle sobre o processo: colocar diversas resistências para serem ligadas ou desligadas sequencialmente; fazer um acionamento contínuo na tensão aplicada nas resistências (e, portanto, variar continuamente a potência transmitida); colocar exaustores para retirar o calor e controlar a curva de descida de temperatura; controlar a velocidade desse exaustor... enfim, existe uma série de medidas que podem ser tomadas para se obter aquilo que o processo exige. Cada uma com o seu grau de refinamento e seu respectivo custo.

7.4.4 Intertravamento

7.4.4.1 Sistema de proteção

Outro exemplo clássico para esse tipo de controle é o intertravamento.

Intertravamento é um conjunto de dispositivos que tem por finalidade garantir uma certa segurança operacional em equipamentos. Normalmente

o intertravamento é projetado de forma independente do equipamento de automação para que, na falha deste, possa ser garantida a segurança operacional sem provocar acidentes.

Uma prensa de chapa que estampa, por exemplo, a capota de um veículo, é alimentada manualmente. Nesse caso o operador precisa apertar dois botões para acionar a prensa e, portanto, deve utilizar as duas mãos e não ter perigo de acidente. Um exemplo doméstico de intertravamento é o desligamento do micro-ondas quando a porta é aberta.

7.5 Classificação das operações na manufatura

Para melhor compreender essa classificação, tome-se o exemplo da indústria metal mecânica. Nessa indústria as matérias-primas, que podem ser chapas e perfis de aço a serem trabalhados e peças prontas de outros fornecedores, podem ser **estocadas e movimentadas** manual ou automaticamente. As **máquinas-ferramenta**, como torno e fresa, podem ser automáticas ou manuais. O **transporte de materiais** entre as máquinas também pode ser manual ou automático. As peças trabalhadas, no final da produção, podem ser **montadas** manual ou automaticamente e, finalmente, o **controle da qualidade** das peças em processo pode ser feito também de forma automática ou manual [GRO2008]. Dessa forma, o critério de classificação para os processos discretos de manufatura foi pelo tipo de operação, conforme detalhado a seguir:

- Armazenagem e manipulação de materiais
- Máquinas-ferramenta
- Linhas de transferência para transporte de materiais
- Montagem do produto
- Controle da qualidade

Os equipamentos de automação para essas operações serão detalhados neste capítulo mais adiante.

7.6 Máquina de estados

Os processos discretos podem ser representados de diversas formas para facilitar o trabalho de projeto do software e do hardware do sistema. Uma forma de representação simples e clara para compreender o funcionamento de um processo discreto é a máquina de estados, aqui descrita.

A máquina de estados está baseada no conceito de sequenciamento de operações: em um determinado instante, um processo está em um estado conhecido. Quando ocorre um evento esse estado é alterado e o sistema evolui para uma outra configuração. Dessa forma, para cada estado, o sistema possui uma situação muito clara das variáveis do processo. A representação da máquina de estado é feita com círculos em que cada um representa um estado,

uma situação estável, conforme a [Figura 7.4](#). Setas representam a evolução dos estados, e em cada estado deve-se escrever o Status.

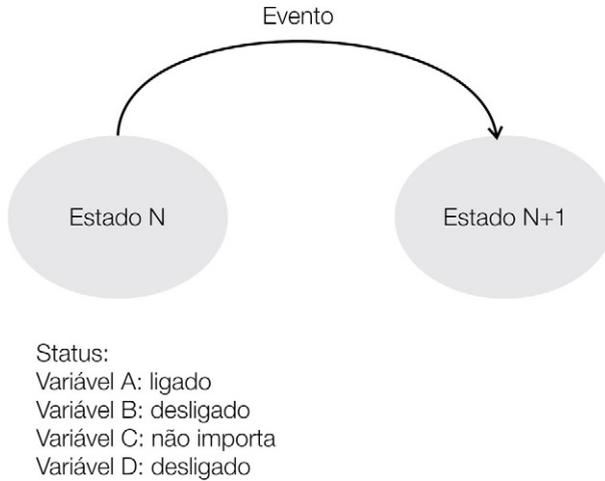


FIGURA 7.4 Simbologia da máquina de estados.

Para melhor exemplificar essa técnica, será ilustrado o caso da caixa d'água de um edifício que normalmente possui um reservatório de água no subsolo para receber água da rua por gravidade. É necessário bombear água desse reservatório para a caixa d'água no topo do edifício para fazer a distribuição às unidades.

Suponha que o edifício possui um sistema de bombeamento controlado automaticamente. Um sensor informa ao sistema de controle o nível em cada instante.

- Se o nível é inferior a $N1$ a vazão de bombeamento comandada é $V1$.
- Entre os níveis $N1$ e $N2$ ($N2 > N1$), a vazão é $V2$ ($V2 < V1$).
- Se o nível é superior a $N2$, o bombeamento é desligado.

O diagrama de estados está representado na [Figura 7.5](#). À esquerda está uma representação do processo que sempre é bom fazer. O passo seguinte é identificar quais são os sensores e os atuadores. Depois, deve-se descrever o processo em forma de texto com uma frase para cada estado.

As entradas são:

- $N1$ – nível baixo da caixa superior
- $N2$ – nível alto da caixa superior

As saídas são:

- Bomba desligada ou ligada com $V1$ ou $V2$.

A sequência de eventos é:

1. Caixa vazia. $N1 = 0$ e $N2 = 0$ Saída: bomba na velocidade $V1$.
2. Caixa enchendo e alcançou o nível $N1 = 1$ e $N2 = 0$ Saída Bomba em $V2$.

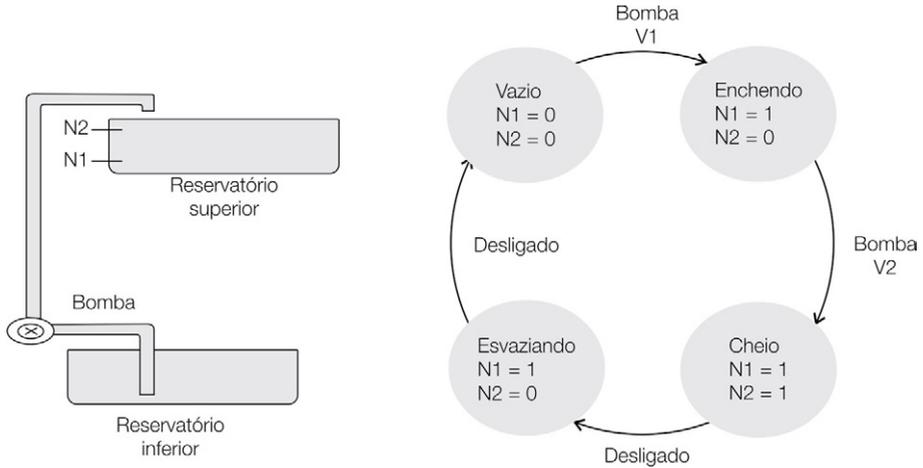


FIGURA 7.5 Diagrama de estados da caixa d'água.

3. Caixa enchendo e alcançou o nível N1 = 1 e N2 = 1 Saída Bomba desligada.
4. Caixa esvaziando N1 = 1 e N2 = 0 Saída Bomba desligada.

Observe que não foi colocado no sistema o estado da caixa inferior. Se não tiver água vai dar problema. Vale ressaltar que um evento pode ser o tempo. Assim, o evento que o sistema aguarda para realizar alguma atividade pode ser um relógio interno controlador que dispara quando chegar o momento.

7.7 A Norma IEC 61131-3

O grande número de fornecedores de equipamentos de automação e a falta de padronização de hardware e software dificultam as atividades das indústrias que se utilizam desses sistemas devido à necessidade de conhecimento de diferentes linguagens de programação e da necessidade de grande diversidade de peças de reposição. Visando padronizar o hardware, facilitar a comunicação entre equipamentos, e a sua programação, foi desenvolvida a série de normas IEC 61131.

O equipamento mais flexível e popular principalmente para processos discretos é PLC – Controlador Lógico Programável (maiores detalhes no item 7.8.1). Essa Norma padroniza esses equipamentos e possui oito partes [ALV2008] [IEC2013] [KAR2001]:

- 61131-1 – Informações gerais (*General Overview, Definitions*)
- 61131-2 – Requisitos de hardware (*Hardware*)
- 61131-3 – Linguagens de programação (*Programming Languages*)
- 61131-4 – Guia de orientação ao usuário (*User Guidelines*)
- 61131-5 – Comunicação (*Message Service Specifications*)
- 61131-6 – Comunicação via Fieldbus (*Fieldbus Communication*)

- 61131-7 – Programação utilizando Lógica Fuzzy (*Fuzzy Logic*)
- 61131-8 – Guia para implementação das linguagens (*Implementation Guidelines*)

A parte 3 da Norma – IEC 61131-3 trata das linguagens de programação e alguns tópicos merecem ser relatados neste livro. A primeira questão interessante é o conceito de programas, blocos funcionais e funções [ALV2008] [IEC2013] [KAR2001]:

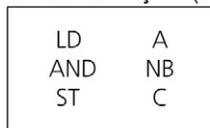
As **funções** são elementos de programação que geram resultados cada vez que são chamados, como conversão de unidades, operações aritméticas e lógicas. Os **blocos funcionais** são partes de programas hierarquizados e estruturados de forma a serem parametrizáveis e reutilizáveis. Os dados nos Blocos possuem persistência, mantendo-se inalterados entre cada execução do bloco. Como exemplos podem ser citados os temporizadores, contadores, PID e blocos específicos como controle de motores.

Os **programas** são construídos a partir dos Blocos Funcionais e Funções. Os programas podem acessar diretamente as Entradas e Saídas e comunicar com outros programas. Diferentes partes de um programa podem ser controladas por tarefas.

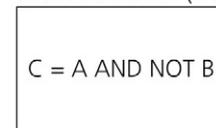
A Norma também prevê a utilização de diversas linguagens de programação e exige que sejam modulares, ou seja, um determinado bloco funcional ou função deve ser capaz de trocar informações com outros artefatos do software independente da linguagem com que foram construídos. Isso facilita o reuso de partes já construídas pelo fabricante ou outro fornecedor. Estão previstas cinco linguagens de programação, conforme representado nas :

- Texto Estruturado (ST)
- Lista de Instruções (IL)
- Ladder Diagrams (LD)
- Diagramas de Blocos Funcionais (FBD)
- Funções Gráficas de Sequenciamento (SFC)

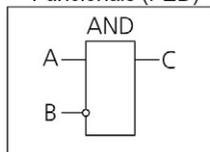
Lista de Instruções (IL)



Texto Estruturado (ST)



Diagramas de Blocos Funcionais (FBD)



Ladder Diagrams (LD)

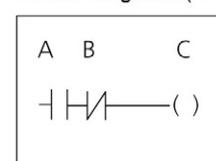


FIGURA 7.6 Linguagens de Programação da Norma 61131-3, Adapt. [ALV2008]

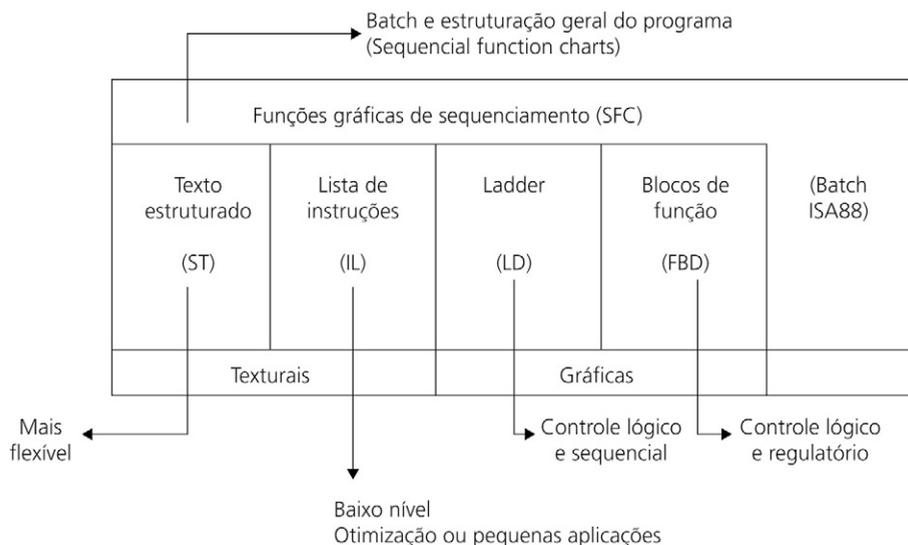


FIGURA 7.7 Linguagem SFC da Norma 61131-3 adap. [ALV2008].

Maiores detalhes sobre a programação desta Norma podem ser estudados no livro de Karl-Heinz [KAR2001].

7.8 Transdutores para processos discretos

Assim como os processos contínuos, os processos discretos possuem transdutores para permitirem a interação do sistema de automação com o processo produtivo. Igualmente, os transdutores podem ser classificados em sensores e atuadores. Neste capítulo serão apresentados somente os transdutores discretos, pois os elementos de variáveis contínuas já foram vistos no Capítulo 6.

7.8.1 Sensores

Os sensores podem ser divididos em **sensores** propriamente ditos, ou seja, que identificam a presença ou passagem de objetos, e **identificadores** que, além de notarem a presença de objetos, são capazes de identificá-los.

O **sensores** aqui estudados são:

- Sensor mecânico
- Sensor capacitivo
- Sensor indutivo
- Sensor fotoelétrico
- Sensor ultrassônico

Os **identificadores** aqui estudados são:

- Óticos
- Eletromagnéticos
- Magnéticos
- Eletrônicos
- Identificadores por imagem

7.8.1.1 Sensores

DEFINIÇÃO

Sensor de proximidade tem por objetivo detectar a presença de uma peça dentro do processo produtivo.

ELEMENTOS SENSORES E DESCRIÇÃO DE PROPRIEDADES

Os elementos sensores de presença utilizam diversas técnicas diferentes, conforme descritas a seguir.

Os **sensores mecânicos** funcionam através da pressão em uma chave que fecha um contato e identifica que uma peça pressionou a alavanca, conforme ilustrado na [Figura 7.8](#). Normalmente, tais sensores possuem uma chave reversora, ou seja, um contato que fica normalmente fechado (NF) e outro um normalmente aberto (NA). Quando o botão é pressionado, invertem-se as posições: o NA fecha e o NF abre. A vantagem desse sensor é a simplicidade, e a desvantagem é a necessidade de contato mecânico da peça para fazer o acionamento.

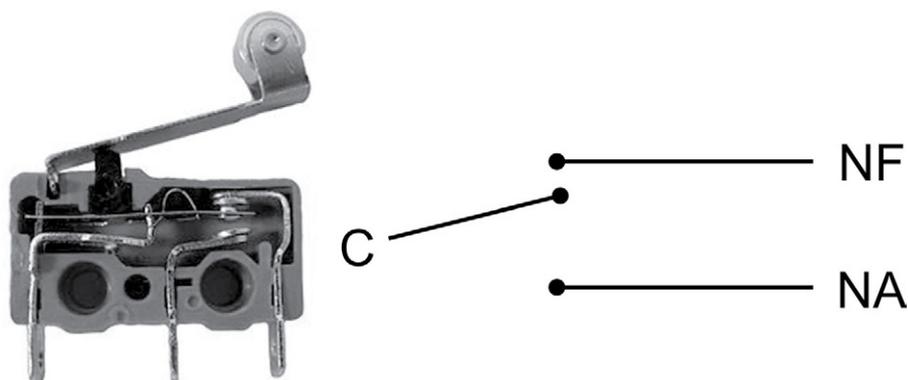


FIGURA 7.8 Sensor mecânico [WEN2010].

Os **sensores capacitivos** são capazes de detectar a presença ou aproximação de diversos materiais, como orgânicos, plásticos, pós, líquidos, madeiras, papéis e metais, conforme ilustrado na [Figura 7.9](#). O princípio de funcionamento baseia-se na geração de um campo elétrico criado por um oscilador

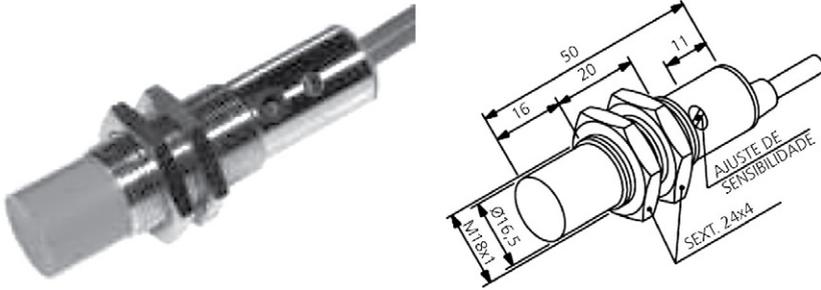


FIGURA 7.9 Sensor de proximidade capacitivo [SEN2013].

controlado por um capacitor. O capacitor é formado por duas placas metálicas montadas na face sensora criando um campo elétrico que se projeta para fora do sensor. A aproximação de um objeto altera o valor desse capacitor e fecha um contato. Esses sensores são capazes de detectar objetos a distâncias de 5 a 20 mm, dependendo do modelo, e possuem a vantagem de não precisarem de contato da peça para sua detecção [SEN2001] [SEN2013].

Os **sensores indutivos** são capazes de detectar a aproximação de peças, componentes e elementos de máquina diversos desde que sejam metálicos. Sua aparência é similar ao sensor capacitivo. O princípio de funcionamento baseia-se na geração de um campo magnético de alta frequência que se projeta para fora da peça, permitindo a detecção da aproximação de materiais metálicos. Esses sensores são capazes de detectar objetos a distâncias de 5 a 30 mm, dependendo do modelo, e possuem a vantagem de não precisarem de contato da peça para sua detecção [SEN2001].

O **sensor fotoelétrico** ou ótico está ilustrado na Figura 7.10. O princípio de funcionamento baseia-se na emissão de um feixe de luz visível ou infravermelha



FIGURA 7.10 Sensor fotoelétrico [SEN2013].

que se reflete em um obstáculo e retorna para um sensor. Quando esse feixe é interrompido é detectada a passagem do objeto. Esses sensores são capazes de detectar objetos a distâncias de 50 a 1.000 mm, dependendo do modelo [SEN2001], [SEN2013].

Há uma variação do sensor fotoelétrico, denominada **barreira de luz**, que é formada por uma série de feixes que têm a finalidade de proteger contra invasão em áreas perigosas, como inserir a mão dentro de uma máquina em operação, conforme ilustrado na Figura 7.11 [SEN2013].



FIGURA 7.11 Barreiras de luz [SEN2013].

Os **sensores ultrassônicos** são capazes de detectar a aproximação objetos com várias distâncias, conforme ilustrado na Figura 7.12. O princípio de funcionamento baseia-se na geração de ondas ultrassônicas (cerca de 42kHz) que,

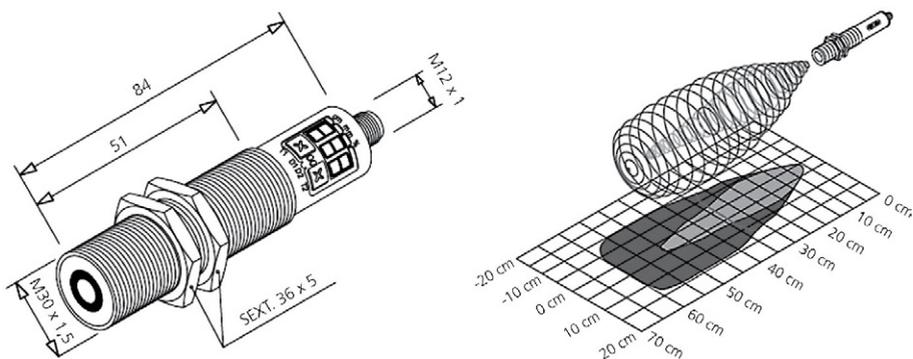


FIGURA 7.12 Sensor ultrassônico [SEN2013].

quando atingem um objeto, são refletidas e detectadas pelo sensor. Emissor e receptor podem estar em um mesmo corpo ou em corpos separados. Esses sensores são capazes de detectar objetos relativamente pequenos a distâncias de 10 a 6.000mm, dependendo do modelo [WEN2010], [SEN2013].

SELEÇÃO DOS SENSORES

A seleção do sensor depende da aplicação específica, das distâncias envolvidas e do ambiente de operação. Materiais não metálicos não podem ser detectados com sensores indutivos. Objetos grandes ou distâncias grandes são mais adequados para sensores fotoelétricos ou ultrassônicos.

7.8.1.2 Identificadores

DEFINIÇÃO

Os identificadores são elementos que fazem parte dos dispositivos denominados AIDC – *Automatic Identification and Data Capture*, identificação automática e captura de dados, que permitem a entrada de dados em sistemas computacionais sem intervenção humana. Isso é muito útil na produção para o apontamento de produção, ou seja, registrar que o produto em processo passou por aquela etapa da manufatura, uma vez que essa tarefa realizada manualmente sempre foi problemática pelas seguintes razões:

- Ocorrência de erros devido à digitação errada ou entrada manual.
- Atraso entre a ocorrência do fato e sua inserção correta no sistema.
- Custo de pessoal para registrar a entrada de dados.

Essa tecnologia também é muito popular no comércio para automatizar o inventário, reposição de estoque e para sistemas de segurança. Para o funcionamento dessa tecnologia os objetos precisam ter algum tipo de marcação, como uma etiqueta de código de barras ou eletrônica [GRO2008].

É necessário também ter clareza da finalidade da marcação dos objetos. Quando o objetivo é identificação dos produtos no controle da produção, essa identificação é simples, pois depende somente de definições internas. Quando a identificação tem por objetivo cobrir a cadeia de suprimentos até o consumidor final, a complexidade é maior, pois essas identificações dependem de acordos entre empresas ou mesmo internacionais para que exista um código único.

Por essa razão, normalmente a identificação do produto é feita utilizando-se padrões internacionais, e a identificação de lotes de fabricação ou números de série para oferecerem rastreabilidade dos produtos são específicas de cada empresa.

ELEMENTOS IDENTIFICADORES E DESCRIÇÃO DE PROPRIEDADES

Os elementos identificadores utilizam diversas técnicas diferentes, conforme descritas a seguir. Todos os sistemas, entretanto, operam com três componentes principais: padrão de codificação, etiqueta e leitor.

Os **padrões de codificação** são normalmente estabelecidos para permitir a troca de informações entre empresas, como o código de barras, um dos mais disseminados, possui os padrões EAN e UPC.

As **etiquetas** são os dispositivos colocados no objeto, seguindo o padrão de codificação. Aqui podem ser dados dois exemplos: o código de barras e as etiquetas de identificação de veículos nos pedágios.

Os **leitores** de identificação são os equipamentos desenvolvidos para realizar a leitura das etiquetas e servir como entrada de dados dos sistemas de automação.

AS TECNOLOGIAS UTILIZADAS

IDENTIFICADORES ÓTICOS

A tecnologia mais disseminada certamente é a ótica, com o **código de barras**. A **Figura 7.13** mostra que há três tipos principais de códigos de barra: lineares (a), duas dimensões com barras (b) e duas dimensões matriciais (c). Para os lineares existem dois **padrões de codificação** disseminados: EAN e UPC. O padrão EAN – *European Article Number*, hoje denominada *International Article Number*, é o padrão adotado no Brasil, e o UPC (*Universal Product Code*) é usado nos Estados Unidos e Canadá.



FIGURA 7.13 Tipos de códigos de barra mais disseminados.

A organização internacional que cuida do EAN é a GS1 [GS12013]. Trata-se de um código com 13 dígitos funcionam através da leitura de uma etiqueta instalada no objeto organizado da forma apresentada na **Figura 7.14**, na qual pode-se observar que os três primeiros dígitos são reservados para o país, os nove seguintes para as empresas e os produtos, e o último é um dígito de verificação para identificar erros de leitura [WIK2013]. Há também padrões para embalagens, normalmente utilizados pelas empresas de logística com formatos diferentes como o ITF-14 e o GS1-128 [GSB2013].

país de origem			empresa				produtos				dígito verificador	
			empresa		produtos		produtos					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13

FIGURA 7.14 Padrão do código EAN [WIK2013].

Os **leitores de código de barra** são dispositivos muito disseminados no comércio, particularmente nos supermercados para oferecer agilidade no pagamento. São leitores óticos, normalmente com feixe de luz laser acoplados ao Caixa ou portáteis para utilização manual. Os códigos bidimensionais com barra têm sido pouco utilizados em função da dificuldade com os leitores, e os códigos matriciais, como o QR (*Quick Response*, Figura 7.13 c), têm tornado-se populares face seu uso com celulares que visualizam e identificam a codificação através da câmera [GRO2008]. A G1 tem estudos para padronização desse código bidimensional denominado Data Matrix ECC200. A norma IEC 16022 estabelece esses padrões [GDM2008].

IDENTIFICADORES ELETROMAGNÉTICOS

Os **identificadores eletromagnéticos** funcionam através de uma tecnologia denominada RFID – *Radio Frequency Identification*. A etiqueta é um chip eletrônico, denominado *Tag* Eletrônico, que possui um código interno único, e não há dois chips iguais. Nesse chip há também um circuito transmissor de radiofrequência que, quando demandado, envia esse número único. Há a necessidade de o objeto a ser identificado passar próximo à estação receptora. O sistema receptor associa esse número a um objeto, permitindo assim a sua identificação. Observe que é uma concepção diferente do código de barras, pois esse número gerado é determinado pelo fabricante do chip e não tem nenhum significado. Há uma geração mais antiga dessa tecnologia na qual o *tag* é um circuito alimentado por bateria, e outra mais recente que funciona sem nenhuma alimentação. Nesse caso, quando a estação receptora indaga a identificação do *tag* (essa indagação é um sinal de radiofrequência), a própria energia do campo magnético é suficiente para alimentar o *tag* que responde, enviando seu número único.

A aplicação mais popular de RFID é na cobrança automática de pedágio e nas indústrias para fazer acompanhamento de produção dos produtos que estão acomodados nos *pallets* que possuem os *tags*, de forma que sejam retornáveis. A colocação de *tags* em produtos finais ainda é limitada em função de seu alto custo para ser descartado, mas há uma expectativa de que este seja um substituto do código de barras.

Outra tecnologia utilizada é o RTLS – *Real Time Location System*, que permite a realização de inventários e localização de materiais em galpões e áreas internas de uma empresa [AIM2013].

IDENTIFICADORES MAGNÉTICOS

Os **identificadores magnéticos** são similares aos cartões de crédito com tarja magnética. São utilizados para acompanhamento da produção e podem ser instalados em *pallets* que acomodam o produto fabricado. Possuem a vantagem de poder gravar e alterar dados, mas têm a desvantagem de necessitar estar em contato com o equipamento de leitura, fato que torna essa tecnologia pouco utilizada [GRO2006].

IDENTIFICADORES ELETRÔNICOS

Os **identificadores eletrônicos** são similares aos cartões de crédito com chip. São, na verdade, chips de memória que podem armazenar dados como o caso anterior, mas possuem também a desvantagem de necessitar contato com o equipamento de leitura [GRO2006].

IDENTIFICADORES POR IMAGEM

Os **identificadores por imagem** funcionam através da leitura de imagem. Uma câmera captura a imagem e um reconhecedor de caracteres (OCR – *Optical Character Recognition*) realiza a identificação dos caracteres e identifica o material, porém são difíceis de utilizar por causa do posicionamento do *scanner*, que exige prática do operador [GRO2006]. Novas tecnologias de tratamento de imagens têm sido desenvolvidas nos últimos anos, tornando esse tipo de identificador também importante para o reconhecimento de objetos.

SELEÇÃO DOS IDENTIFICADORES

A seleção dos identificadores depende da aplicação específica. Os identificadores de mais baixo custo são os códigos de barra, que permitem leitura a distâncias de aproximadamente 20 cm, enquanto os *tags* permitem leitura na faixa de 2 m.

7.8.2 Atuadores

O atuadores aqui estudados são:

- Atuadores Elétricos
- Atuadores Hidráulicos
- Atuadores Pneumáticos

DEFINIÇÃO

Os atuadores são dispositivos que convertem o comando de um controlador em um parâmetro físico de atuação no processo. Essa atuação no processo normalmente é mecânica, como uma mudança de posição ou de velocidade [GRO2008].

ELEMENTOS ATUADORES E DESCRIÇÃO DE PROPRIEDADES

Os atuadores normalmente são elétricos, hidráulicos ou pneumáticos.

7.8.2.1 Atuadores elétricos

Os atuadores elétricos são os mais comuns em automação e aqui são descritos:

- Relés
- Contactores
- Solenoides
- Motores: CC, CA e de passo
- Inversores

RELÉ

O relé é o mais simples dos atuadores e tem a finalidade de acionar outros equipamentos elétricos. Conforme ilustrado na [Figura 7.15\(a\)](#) é um dispositivo eletromecânico que possui uma bobina que, quando energizada fecha um contato elétrico. Esse contato possui a vantagem de ser isolado do circuito de acionamento e permite que, com um sinal de baixa corrente, seja acionado um dispositivo com corrente muito maior. A simbologia utilizada para o relé está ilustrada na [Figura 7.15\(b\)](#). Há diversas configurações possíveis de relés, com capacidade de corrente maior ou menor e também com mais de um contato. A [Figura 7.15\(c\)](#) ilustra um relé com dois contatos reversíveis, ou seja um NA e outro NF, construtivamente similar ao sensor da [Figura 7.8](#).

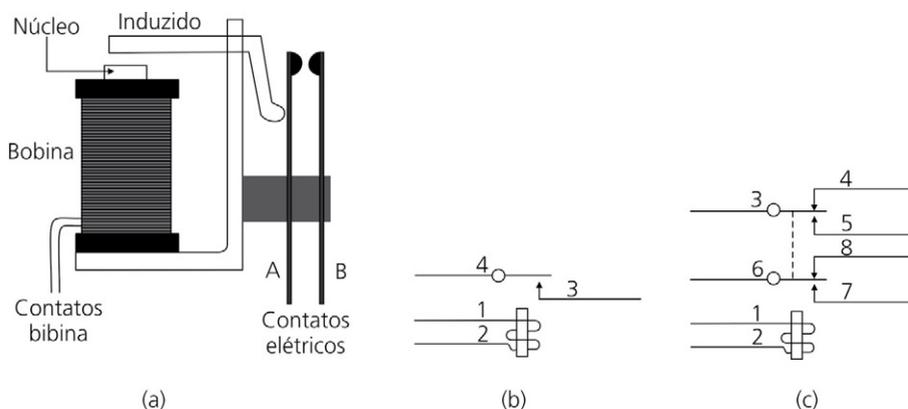


FIGURA 7.15 Relé [ELE2013].

CONTACTOR

O contactor é um dispositivo similar ao relé, mas possui características construtivas mais robustas, normalmente utilizado em instalações elétricas para acionamento de dispositivos de potência maior.

SOLENOIDE

O solenoide é um dispositivo eletromecânico que possui uma bobina e, em seu interior um braço metálico que fica submerso no campo magnético da bobina. Dessa forma, é possível, através de um comando na bobina, realizar um deslocamento mecânico, conforme ilustrado na [Figura 7.16](#) [REC2013].

Os motores possuem uma bobina externa ou um ímã que cria um campo magnético e uma parte interna imersa nesse campo construída de forma a girar. O eixo do motor gira por causa da propriedade de um campo magnético provocar uma força mecânica (regra da mão direita). Os principais tipos de motores utilizados em automação são Motor CC, Motor CA e Motor de Passo.

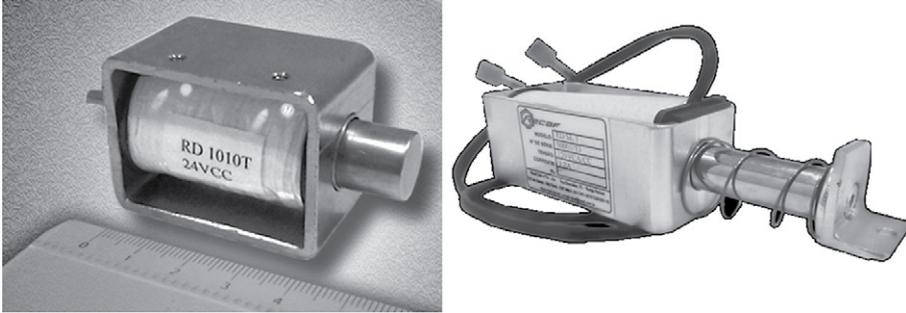


FIGURA 7.16 Solenoide [REC2013].

MOTOR CC

O motor CC está ilustrado na Figura 7.17. O diagrama mostra o campo externo criado pelo estator, representado pelas barras imantadas S-N. Dentro desse campo está o rotor, com uma bobina que é alimentada pelas escovas, que também possui um S e um N no lado oposto. A tendência do conjunto é se estabilizar na posição N da bobina com S do estator e vice-versa. Isso não ocorre, porque a bobina do rotor é alimentada por duas escovas que, no momento que chega à posição “estável”, é feita a comutação, e a atração passa a ser para ele se estabilizar do outro lado, mantendo, dessa forma, o rotor girando [SIE2006].

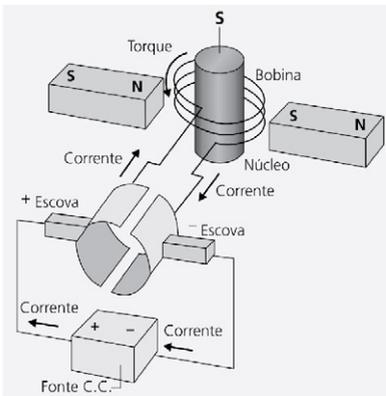


FIGURA 7.17 Motor CC [SIE2006].

Uma característica importante dos motores CC é a queda de torque com a rotação, ou seja, quando se coloca carga a ser girada, a rotação diminui, conforme ilustrado na Figura 7.18 [SIE2006].

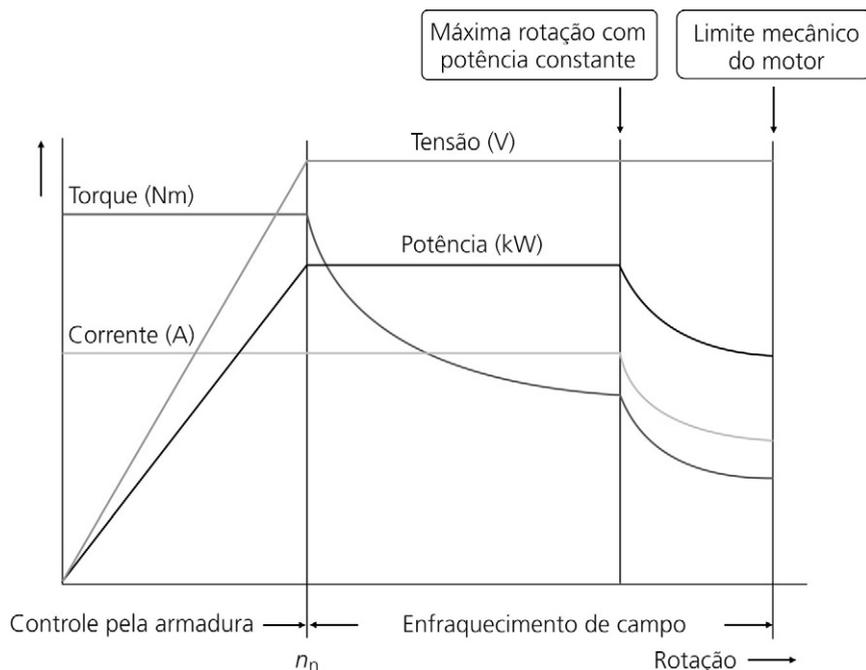


FIGURA 7.18 Curva de trabalho do motor CC [SIE2006].

Um caso particular dos motores CC é o servo-motor que, em conjunto com um circuito de controle de malha fechada, permite a realização de um sistema de posicionamento preciso.

MOTOR CA

No motor CC o campo magnético é fixo, e no motor CA esse campo magnético é alternado por causa da rede elétrica que o alimenta. Fica, assim, criado um campo magnético girante, e as bobinas do rotor imerso nele transformam o campo magnético em corrente de tal forma que o rotor gira “correndo atrás” do campo magnético do estator. A curva de torque do motor CA é diferente do motor CC, conforme ilustrado na Figura 7.19. Os motores CA podem ser de indução ou síncronos. Os motores de indução são mais simples e populares. Ambos os tipos possuem rotação proporcional à frequência da rede: com dois polos possui uma rotação de 3.600 rpm; com quatro polos possui rotação de 1.800 rpm; com seis polos, 1.200 rpm; e com oito polos, 900 rpm.

Por essa razão, os motores CA síncronos não variam a rotação quando se aumenta a carga, característica muitas vezes importante para determinados

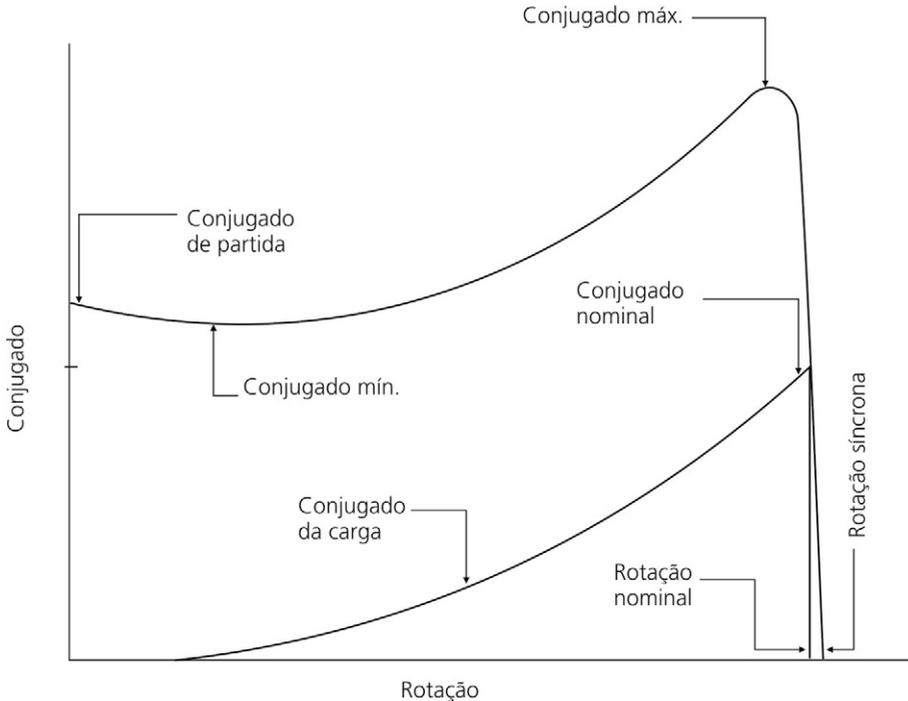


FIGURA 7.19 Curva de torque do motor CA [MER2000].

processos. Cuidado deve ser tomado no sentido de não ultrapassar a capacidade máxima do motor e provocar sua queima. Por outro lado, para aplicações em automação, há dificuldades com o uso desses motores, pois há a necessidade de variar a rotação e provocar muitas partidas e paradas [GRO2006] [MER2000].

MOTOR DE PASSO

O Motor de Passo é construído para receber pulsos elétricos. A cada pulso o motor realiza uma rotação angular, um passo. Dessa forma, para avançar um determinado ângulo são necessários diversos pulsos até se chegar à posição desejada. Tipicamente, o motor de passo possui 48, 100 ou 200 passos para completar uma volta, o que significa passos angulares de $7,5^\circ$, $3,6^\circ$ ou $1,8^\circ$ respectivamente. Dessa forma é possível realizar movimentos precisos com esse tipo de motor. O motor de passo não é adequado para aplicações que exigem velocidade de rotação alta, pois, por inércia, é possível que passos sejam perdidos e ele não pare na posição certa, perdendo precisão. As aplicações mais típicas para esses motores são em máquinas-ferramenta e robôs industriais [GRO2006] [BRT2008].

INVERSOR DE FREQUÊNCIA

O Inversor de Frequência é um dispositivo que, de alguma forma, revolucionou o comando de máquinas. Anteriormente esses comandos eram feitos com

motores CC que são muito fáceis de controlar. O inversor de frequência, na verdade, é um gerador senoidal construído com pulsos, conforme ilustrado na [Figura 7.20](#). Como o motor CA possui rotação proporcional à frequência, com o inversor fica fácil fazer essa tarefa. Além disso, na partida do motor é possível injetar correntes altas para vencer a inércia de forma bastante controlada, pois são pulsos de curta duração que permitem fazer isso. Existem inversores com diversos níveis de potência, e são equipamentos de custo relativamente baixo.

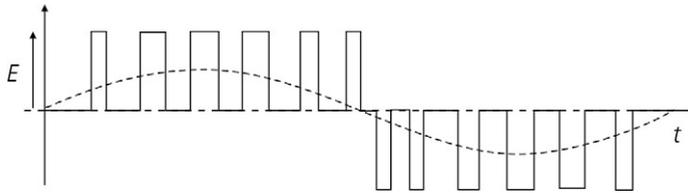


FIGURA 7.20 Inversor de frequência.



FIGURA 7.21 Inversor WEG.

7.8.2.2 Atuadores hidráulicos

Os atuadores hidráulicos convertem a energia hidráulica em mecânica realizando um movimento linear ([Figura 7.22](#)). Normalmente esse tipo de atuador é usado para levantar e transportar objetos de grande peso. Uma aplicação conhecida é o comando hidráulico de tratores que têm a capacidade de elevar algumas toneladas [[MEC2013](#)].

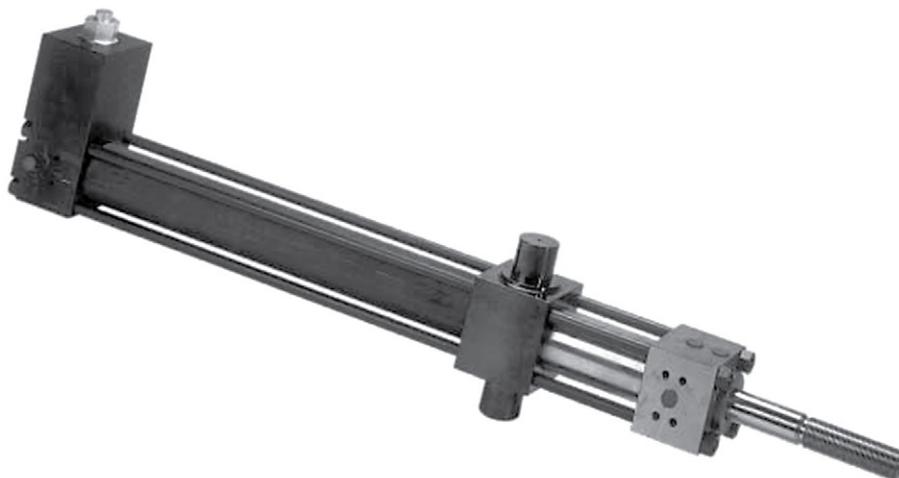


FIGURA 7.22 Atuador hidráulico [MEC2013].

7.8.2.3 Atuadores pneumáticos

Os atuadores pneumáticos lineares são dispositivos alimentados por ar comprimido capazes de gerar um movimento linear (Figura 7.23). Normalmente utiliza-se ar comprimido, embora possam ser utilizados também outros gases. A capacidade de acionamento de um atuador pneumático está relacionada com o tamanho do êmbolo e da pressão do gás comprimido. A boa característica dos atuadores pneumáticos é a concepção simples e a capacidade de se mover rapidamente.

As desvantagens dos atuadores pneumáticos, quando comparados com os hidráulicos semelhantes, são a maior dificuldade de controle, principalmente



FIGURA 7.23 Atuador pneumático [MEC2013b].

com precisão elevada e menor capacidade de carga. Essas limitações são causadas pelo fato de o ar dentro do cilindro comprimir a carga, enquanto o fluido hidráulico não exerce esse tipo de pressão sobre a carga [MEC2013b].

7.9 Equipamentos para automação discreta

Uma vez descritos os principais sensores e atuadores, nesta seção são descritos os equipamentos utilizados nos sistemas de automação discreta. São eles:

- Controladores Programáveis
- Equipamentos dedicados
- CNC
- Robôs para manufatura
- Veículos automatizados
- Inspeção automatizada

7.9.1 Painéis de controle e controladores programáveis

O controle de equipamentos de potência nos processos discretos é feito através de painéis de potência, conforme o ilustrado na [Figura 7.24](#). Esses painéis, antigamente, além dos disjuntores e contactores de potência, possuíam também circuitos lógicos construídos com relés.



FIGURA 7.24 Painéis de relés.

Quando surgiram os **Controladores Programáveis**, na década de 1980, os painéis a relés deixaram de existir. Os CLP – Controladores Lógicos Programáveis, ou Controladores Programáveis, são equipamentos eletrônicos microcontrolados que implementam toda a parte lógica de funcionamento dos processos discretos ([Figura 7.25](#)) [SIL2013] [RCK2001].



FIGURA 7.25 Controlador lógico programável.

A Figura 7.26 mostra um diagrama em blocos de um CLP. Nele podemos identificar a entrada de dados, a saída de dados e a unidade microcontroladora.

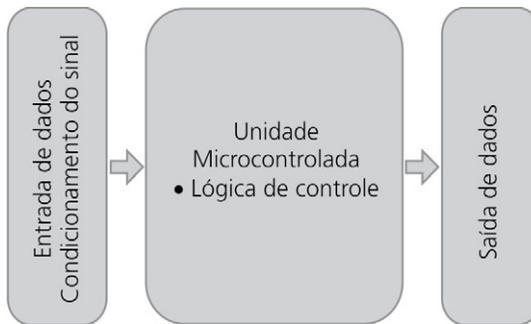


FIGURA 7.26 Diagrama de um CLP.

A **entrada de dados** recebe as informações do processo e envia para a unidade microcontroladora. Em um ambiente industrial é muito importante esse módulo, pois nele é realizado o condicionamento do sinal que, em outras palavras, elimina ruídos, atenua picos de tensão que podem aparecer, com a finalidade de reduzir a entrada de ruídos ou identificação errada dos sinais de entrada. Em termos de circuito são limitadores de sinal, como varistores, diodos, fusíveis e até isoladores óticos. O número de entradas possíveis depende do fabricante, mas pode-se dizer que CLPs pequenos possuem cerca de 5 a 20 entradas, e os modelos grandes possuem algumas centenas de entradas. Os modelos mais modernos também possuem entradas analógicas para algum tratamento que for necessário, normalmente são poucas entradas de 1 a 4.

A **saída de dados** envia as informações para o equipamento controlado. Também aqui são necessários alguns cuidados. A saída pode ser um contato seco, o nome dado a contatos de relé que são totalmente isolados do circuito e permitem o acionamento de correntes da ordem de alguns amperes. Outro tipo de saída é NPN ou PNP, que significa saída com transistores do tipo NPN

ou PNP. Nesse caso não há isolação, e a capacidade de corrente normalmente é da ordem de 200 mA. Outra possibilidade é a saída isolada com acopladores óticos e, nesse caso, a saída normalmente é um transistor NPN com capacidade da ordem de 200 mA. O número de saídas é proporcional à entrada e assim, modelos pequenos possuem na faixa de 5 a 20 saídas, e os grandes algumas centenas. Algumas saídas também podem ser analógicas, com valores padronizados como *loop* de corrente de 4mA a 20mA, ou saída de 0V a 10V analógicos. Também alguns já possuem saída PWM – *Pulse Width Modulation*, modulada em largura de pulso para comandos de potência. Essa unidade pode enviar sinais para ligar ou desligar um motor, um inversor de potência, uma resistência elétrica, enfim, toda variável controlada do processo.

A **unidade microcontroladora** é onde o programa é armazenado e realiza o comando das saídas a partir dos valores das entradas e, em alguns casos, da sequência de sinais da entrada. Essa unidade também possui limitações do tamanho do programa e pode ser programada em linguagem de relés ou outra, dependendo do fabricante (vide [Seção 7.6](#)).

7.9.2 Equipamentos dedicados

Os CLPs são utilizados normalmente em processos industriais que envolvem diversos equipamentos, pois tais processos normalmente são únicos e não vale a pena desenvolver circuitos dedicados para somente uma planta. No entanto, para o controle de equipamentos que possuem um certo volume de fabricação, é comum serem desenvolvidos circuitos dedicados que desempenham funções similares aos CLPs.

7.9.3 CNC controle numérico por computador

Um dos sistemas de automação mais importante para processos discretos é o CNC – Controle Numérico por Computador. O CNC controla as máquinas-ferramenta, ou seja, torno, fresa, furadeira, plaina, retífica, puncionadora, corte a laser, eletroerosão, dobradeira, centro de usinagem, enfim, as máquinas que realizam o trabalho de modelagem de materiais com diversas ferramentas. Essencialmente essas máquinas fixam a peça a ser trabalhada e, através da movimentação de diversas ferramentas de corte, a peça é modelada até chegar ao formato final. O CNC realiza a automação através de um programa que comanda uma unidade de controle (MCU) que atua diretamente na máquina ferramenta, conforme ilustrado na [Figura 7.27](#).

O **programa** descreve toda a movimentação necessária para a construção da peça, incluindo as informações geométricas e dimensionais, a definição da trajetória das ferramentas, velocidade e aceleração dos dispositivos, momentos para troca manual ou automática das ferramentas. Sistemas mais modernos permitem a simulação do programa realizado, indicando erros a serem corrigidos antes de efetivamente trabalhar na máquina [GRO2006].

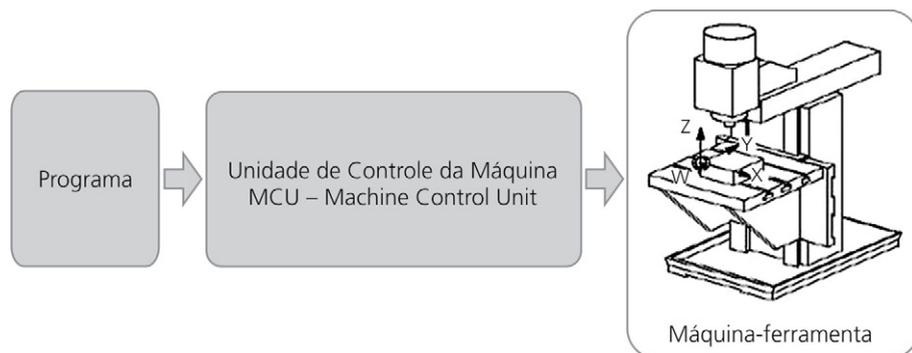


FIGURA 7.27 Componentes básicos de um sistema CNC [GRO2006].

A **unidade de controle da máquina** é um hardware que executa o programa e possui um computador e circuitos adequados para controlarem a máquina-ferramenta. Realiza a leitura do posicionamento da peça, da ferramenta e outros itens de interesse, possui malhas de controle de velocidade e de posição [GRO2006].

A **máquina-ferramenta** controlada possui os transdutores adequados para permitir o comando através da MCU. Assim, por exemplo, possui um eixo de coordenadas XYZ com transdutores de posição e deslocamento (vide Capítulo 6) para saber a posição; a antiga árvore do torno é substituída por diversos motores CA com inversores, servomotores ou motores de passo (vide Seção 7.7.2.1) para realizarem a movimentação necessária.

As principais vantagens do uso de maquinário CNC são [CAS2013] [GRO2006]:

- Repetibilidade de fabricação das peças, pois segue exatamente a mesma movimentação.
- Maior precisão dimensional e geométrica das peças produzidas.
- Maior precisão no cálculo de custos, pois reduz a variabilidade dos tempos, uma vez que a operação é toda automatizada.
- Permite a construção de peças com alta complexidade de formato, muito difíceis de serem executadas manualmente.
- Redução de tempo de preparação de máquina (*setup*).
- Permite a construção de lotes menores.
- Redução no investimento em dispositivos de furar, traçar, modelos, gabaritos, cames, máscaras, chapelonas etc.
- Redução de requisitos de inspeção.
- Maior facilidade de realização de modificações de engenharia.
- Redução do perfil do operador, com menos necessidade de habilidade manual.

As desvantagens são:

- Maior investimento inicial na aquisição das máquinas.
- Maior necessidade de manutenção das máquinas.
- Necessidade de programador CNC com alta qualificação.

A programação das máquinas CNC pode ser feita na própria máquina e, conforme já citado, requer do programador conhecimento profundo do processo de usinagem para realizar a sequência de operações correta de forma a não somente ser isento de erros, mas também de forma a aproveitar melhor os recursos da máquina.

Há um outro modo de programar realizando a integração CAD/CAM (Capítulo 11) em que os desenhos originais das peças são importados pelo sistema CAM – *Computer Automated Machinery*, que realiza a programação automática CNC. Nesse caso é importante a realização do projeto voltado para a manufatura, fazendo com que o projetista interaja com os especialistas em fabricação para reduzir as dificuldades de fabricação. A fim de facilitar esse trabalho, há hoje a possibilidade de realizar o projeto integrado via web envolvendo todos os interessados [ALV2003].

Importante lembrar que, em manufaturas de porte, essas máquinas são interligadas, permitindo a troca de informações entre elas e uma melhor integração do sistema produtivo.

7.9.4 Robôs para a manufatura

Conforme definido na Norma ISO 10218, um robô é uma “máquina manipuladora, com vários graus de liberdade, controlada automaticamente, reprogramável, multifuncional, que pode ter base fixa ou móvel para utilização em aplicações de automação industrial” [ISO2006].

Conforme descrito na [Figura 7.28](#), um robô é formado pelos seguintes elementos [LOP2002]:

- Manipulador:
 - Sensores
 - Atuadores
 - Transmissão
 - Estrutura Mecânica
- Unidade de Controle
- Unidade de Potência

O **manipulador** é um conjunto de corpos que formam uma cadeia cinemática definindo uma **estrutura mecânica**. No **manipulador** existem os **atuadores** que agem sobre a **estrutura mecânica** modificando sua configuração. A **transmissão** integra os **atuadores** à **estrutura mecânica** para realizar os movimentos necessários [LOP2002].

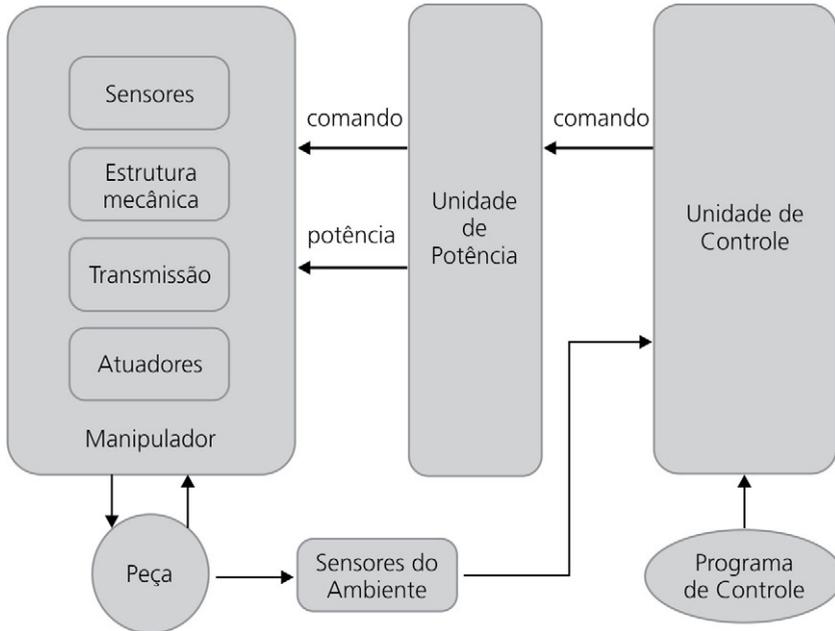


FIGURA 7.28 Estrutura de um robô industrial [LOP2002].

Os **sensores do ambiente** são dispositivos usados para recolher e fornecer informações para a **unidade de controle** sobre o estado do **manipulador** e do ambiente. Os **sensores** internos fornecem informação sobre o estado do **manipulador**, como posição, velocidade ou aceleração. Os **sensores externos** fornecem informação sobre o ambiente, como sensores de força/momento ou câmeras de vídeo para detecção de obstáculos [LOP2002].

A **unidade de controle** é um sistema computacional que controla o movimento do **manipulador**. Usa modelos do **manipulador**, do ambiente e as informações do programa de controle e dos **sensores**, realiza as operações matemáticas necessárias e envia os comandos para a **unidade de potência**, que fornece potência para os **atuadores**. Essa unidade pode fornecer potência elétrica, pneumática ou hidráulica. São executadas também outras atividades como o registo de dados e a gestão das comunicações com o operador ou com outros dispositivos que cooperam com o robô na execução da tarefa [LOP2002].

Os robôs industriais possuem uma estrutura mais simples que a apresentada anteriormente porque a interação com o ambiente é muito baixa, e a programação do robô baseia-se em uma descrição imutável, quer da tarefa quer do ambiente. O manipulador é normalmente constituído por um conjunto de corpos rígidos ligados em série por intermédio de juntas rotativas ou prismáticas, formando uma cadeia cinemática aberta. Uma das extremidades do manipulador encontra-se rigidamente ligada a uma base, enquanto a extremidade oposta suporta o órgão terminal, e pode mover-se livremente no espaço.

Tipicamente o manipulador possui 6 graus de liberdade (gdl) e é composto pelo braço e pelo punho. O braço tem, em geral, 3 gdl, e realiza o posicionamento do punho. Este, normalmente, é composto por três juntas rotativas, que utiliza para orientar o órgão terminal (3 gdl). A Figura 7.29 (a) ilustra os graus de liberdade de um robô para manufatura e um fotografia de um robô real (b).

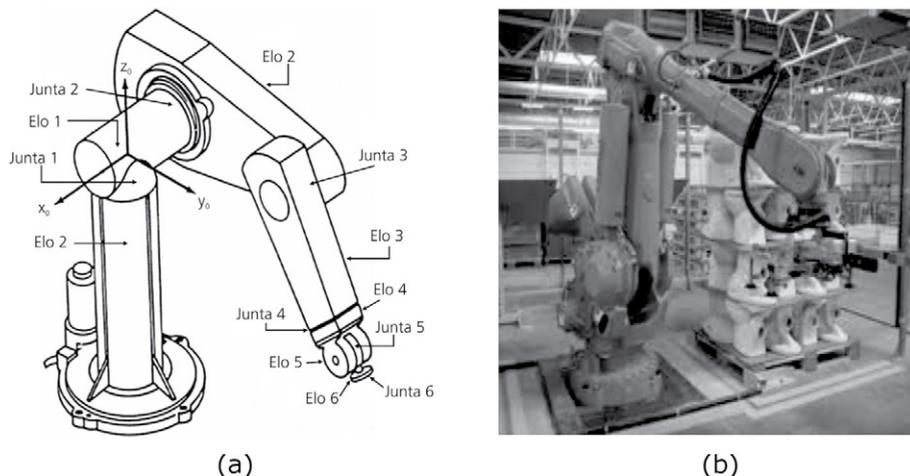


FIGURA 7.29 Graus de liberdade de um robô industrial [LOP2002].

Os sensores e atuadores são os mesmos estudados anteriormente neste capítulo, quando são elementos discretos, ou aqueles descritos no Capítulo 6, quando são elementos analógicos.

As operações realizadas mais comumente realizadas pelos robôs industriais são movimentação, processamento e controle da qualidade.

As operações de **movimentação** são atividades de transporte, carga e descarga de máquinas ferramenta e outras.

As operações de **processamento** são soldagem, fixação, pintura, montagem, limpeza, corte, empacotamento e outras.

As operações de **controle da qualidade** são inspeção, localização de contornos, detecção de falhas e outras.

7.9.5 Veículos automatizados

Os veículos automatizados complementam as máquinas-ferramenta e os robôs para realizarem as atividades de transporte de materiais entre células de trabalho e entre departamentos da fábrica.

A Figura 7.30 mostra o diagrama de um veículo automatizado, em que o **sistema mecânico** como chassi, rodas e direção é comandado por um **sistema de tração**, basicamente motores elétricos que acionam a movimentação do veículo. Esses motores são controlados por inversores de potência (os **atuadores**) ou outro tipo de eletrônica de potência que, por sua vez, são alimentados pelo

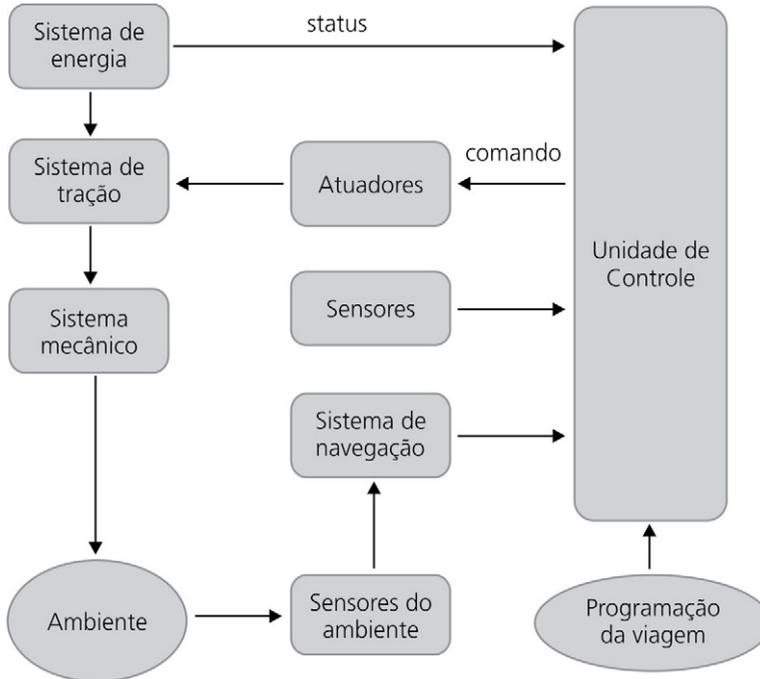


FIGURA 7.30 Diagrama de um veículo automatizado.

sistema de energia, normalmente baterias. Para garantir o bom funcionamento do veículo, **sensores de ambiente** e **sensores** internos identificam obstáculos e o caminho a ser seguido através do sistema de **navegação**. Uma **unidade de controle** recebe a programação da viagem e, com todas as informações citadas realiza o controle dos atuadores.

Existem basicamente dois tipos de equipamentos os AGV e os transelevadores.

Os **AGVs** são veículos autônomos que se deslocam sem a necessidade de um condutor para fazer o transporte de materiais no ambiente produtivo (Figura 7.31). Permite a entrega automática de equipamentos e materiais sem intervenção humana. O seu carregamento pode ser automático ou manual. O

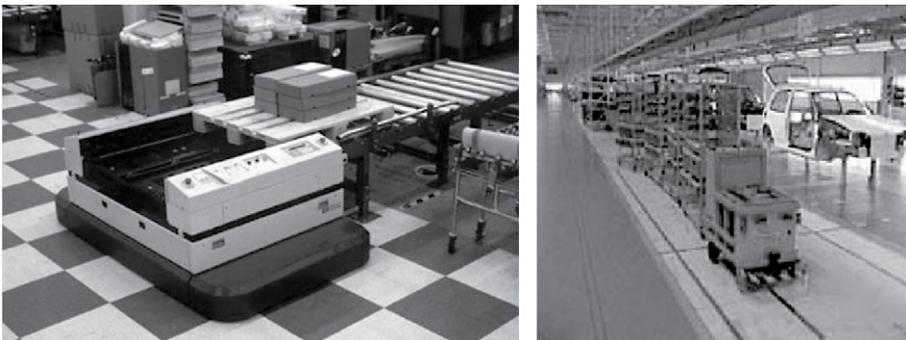


FIGURA 7.31 AGV em operação [RAM2005].

AGV pode carregar diretamente os materiais ou pode operar como “locomotiva” puxando outros veículos com a carga e sem tração. A navegação pode ser feita com sistemas de referência marcando o caminho a ser seguido com sensores óticos ou indutivos, e o veículo segue as marcas ou então sem guias com sistemas mais sofisticados de navegação com laser, ou sistema inercial. O GPS pode ser usado em situações em que a precisão da localização não precisa ser tão grande. [RAM2005].

Os transelevadores são similares ao AGV, mas são utilizados para a manipulação de materiais em armazéns. A principal diferença desse equipamento é o fato de permitir a guarda de materiais em duas dimensões movimentando-se no piso e na altura para guardar e retirar materiais em prateleiras com diversas alturas diferentes, conforme ilustrado na [Figura 7.32](#).



FIGURA 7.32 Transelevador.

7.9.6 Inspeção automatizada

A inspeção também é uma atividade que pode ser automatizada. Normalmente, o controle do processo é realizado, e as medições nas peças fazem parte do processo. Dessa forma, a inspeção automatizada passa a ser feita no próprio processo através de um mecanismo que garanta que a peça saiu dentro das especificações. Um exemplo que pode ser ilustrativo é a fabricação de resistores. Os resistores de carbono PTH, ou seja, são aqueles tradicionais que possuem terminais que passam pela placa e são soldados do outro lado. Uma unidade produtora desse componente no Brasil chegou a produzir 13 milhões de unidades por dia na década de 1980. A inspeção desse componente era feita individualmente para ajuste fino de valor, e o processo garantia que

aquele valor ajustado deixava o componente dentro das especificações. Sem inspeção automática isso seria impossível. Esse é um exemplo de inspeção online 100%. Outras formas de inspeção podem ser utilizadas também.

7.10 Leituras recomendadas

O assunto deste capítulo é muito vasto, e há diversas coisas que podem ser lidas para um maior aprofundamento quando necessário. Groove [GRO2006] tem foco na fabricação mecânica e apresenta uma visão bastante integrada de uma manufatura mecânica automatizada. Discute também as questões de programação da produção e o impacto na automação.

Outro assunto importante é o uso de código de barras, e a GS1 [GS12013] possui muito material que detalha esse assunto. Estão eles envolvidos com RFID também.

7.11 Exercícios e atividades

1. Faça o diagrama de estados do sistema de pintura descrito em 7.4.1.
2. Faça o diagrama de estados do sistema de pintura descrito em 7.4.2.
3. Faça o diagrama de estados de uma máquina de lavar roupa.
4. Faça o diagrama de estados de uma máquina de lavar louça.

Referências bibliográficas

- [ALV20003] **ÁLVARES, Alberto José.; FERREIRA, João Carlos Espíndola. Uma Metodologia para Integração CAD/CAPP/ CAM voltada para Manufatura Remota de Peças Rotacionais Via Web. 2º COBEF-Congresso Brasileiro de Fabricação.** ABCM Uberlândia, 2003.
- [ALV2008] ALVES, Anísio Chagas Bernardino. **Sistemas de Controle: Especificação e Implantação. A NORMA IEC 61131.** Universidade Federal de Vitória. Centro Tecnológico Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Curso de Pós-Graduação Lato sensu. Especialização em Instrumentação e Controle de Processos industriais. Anotações de aula. Vitória. 2008.
- [AIM2013] **What is the difference between RFID and RTLS.** FAQ AIM – Association for Automatic Identification and Mobility. Obtido no endereço: http://www.aimglobal.org/?page=rtls_faq&hhSearchTerms=RTLS (Acessado em: 10/07/2013.)
- [BRT2008] BRITES, FelipeG. SANTOS, Vinicius P. A. **Motor de Passo.** Universidade Federal Fluminense. Centro Tecnológico de Engenharia. Curso de Engenharia de Telecomunicações. Programa de Educação Tutorial. Grupo PET-Tele. Niterói. 2008. Obtido no endereço: http://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=motor%20de%20passo&source=web&cd=6&cad=rja&sqi=2&ved=0CF4QFjAF&url=http%3A%2F%2Fwww.telecom.uff.br%2Fpet%2Fpetws%2Fdownloads%2Ftutoriais%2Fstepmotor%2Fstepmotor2k81119.pdf&ei=u6HgUYquGo-s4AOuxYCQDA&usg=AFQjCNEZRkP66LoouO6-3dFU8-ye_zF5DA&bvm=bv.48705608,d.dmg (Acessado em: 10/07/2013.)
- [CAS2013] CASSANIGA, Fernando A. **O que é Controle Numérico?** CNC Tecnologia, Livraria e Editora. Obtido no endereço <http://www.cnctecnologia.com.br/oque.htm> (Acessado em: 10/07/2013.)

- [ELE3013] **Eletrônica**. Obtido em: <http://www.electronica-pt.com/index.php/content/view/179/37/> em 11/07/2013 http://www.gs1.org/barcodes/need_a_bar_code (Acessado em: 10/07/2013.)
- [GS12013] **GS1 is the official provider of barcode numbers**. Obtido no endereço: http://www.gs1.org/barcodes/need_a_bar_code (Acessado em: 10/07/2013.)
- [GSB2013] **Código de barras para produtos**. GS1 Brasil. Associação Brasileira de Automação. Obtido no endereço: <http://www.solucoesgs1brasil.com.br/interna.html?gclid=CJX5wLqvrLgCFevm7Aod4i8A6w> (Acessado em: 10/07/2013.)
- [GDM2008] **GS1 DataMatrix** Introdução e perspectiva técnica da simbologia mais avançada, compatível com os AIs - Identificadores de Aplicação. GS1. Texto em PDF. Obtido no endereço: http://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=5&cad=rja&ved=0CFwQFjAE&url=http%3A%2F%2Fwww.gs1br.org%2Fflumis%2Fportal%2Ffile%2FfileDownload.jsp%3FfileId%3D480F89A8360711C201361214377323CA&ei=UHLhUe6QC_f94APk7IHYAw&usg=AFQjCNFh2j2Vfk54RtoF5yGVOOvuasmZTA&bvm=bv.48705608,d.dmg (Acessado em: 10/07/2013.)
- [GRO2008] GROOVER, Mikell O. **Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing**. Pearson Education Inc: New Jersey, 2008.
- [IEC2013] IEC 61131-3 Ed. 3.0 **Programmable controllers - Part 3: Programming languages**. International Electrotechnical Commission, 2013.
- [ISO2006] ISO 10218 **Robots for industrial environments -- Safety requirements -- Part 1: Robot**. ISO – International Standard Organisation, 2006.
- [KAR2001] Karl-Heinz, John. Tiegelkamp, Michael. **IEC 61131-3: Programming Industrial Automation Systems: Concepts and Programming Languages, Requirements for Programming Systems, Decision-Making Aids**. Springer-Verlag: Berlin Heidelberg, 2001.
- [LOP2002] LOPES, Antonio Mendes. **Modelação Cinemática e Dinâmica de Manipuladores de Estrutura em Série**. Robótica Industrial. Mestrado em Automação, Instrumentação e Controlo. Universidade do Porto. Faculdade de Engenharia. 2001 Texto em PDF. Obtido no endereço http://www.fe.up.pt/~sim/aml/maic_files/cindin.pdf (Acessado em: 14/07/2013.)
- [MEC2013] **O que é um atuador hidráulico**. Mecânica Industrial. Obtido no endereço: <http://www.mecanicaindustrial.com.br/conteudo/348-o-que-e-um-atuador-hidraulico> (Acessado em: 08/07/2013.)
- [MAR2013] MARTIN, Carlos Alberto. FERREIRA, João Carlos Espindola. **Tecnologia de Comando Numérico**. GRIMA – Grupo de Integração da Manufatura. Universidade Federal de Santa Catarina. Notas de Aula. 2013
- [MEC2013b] **O que é um atuador pneumático linear**. Mecânica industrial. Obtido no endereço: <http://www.mecanicaindustrial.com.br/conteudo/338-o-que-e-um-atuador-pneumatico-linear> (Acessado em: 08/07/2013.)
- [MER2000] MERHEB Ney E.T. **Notas Técnicas de Motores**. NT-01. GEVISA. General Electric. 2000. Obtido no endereço: http://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=motor+CA&source=web&cd=7&cad=rja&ved=0CEoQFjAG&url=http%3A%2F%2Fwww.geindustrial.com.br%2Fdownload%2Fartigos%2Fnt01.pdf&ei=s9PfUbmDDIPj4AOGsoHwDQ&usg=AFQjCNGCsL_IMRLIIO_ZX0ctFTJ48ssA5A (Acessado em: 05/07/2013.)
- [RAM2005] Ramos, Bruno. Ramos, Rui. Calado, Sérgio. **Automated Guided Vehicle**. Automação de Processos Industriais. Instituto Superior Técnico. Laboratório LSCN. Trabalho de disciplina. 2005. Obtido no endereço: http://users.isr.ist.utl.pt/~sim/pjcro/cadeiras/api0405/pdf_files/G03_SEM.pdf (Acessado em: 14/07/2013.)
- [RCK2001] RICHTER, Claudio. **Controladores Programáveis**. Curso de Automação Industrial. Dexter Indústria e Comércio de Equipamentos Eletrônicos. Colégio Batista.

2001. Texto em PDF. Obtido o endereço: http://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=7&sqi=2&ved=0CE0QFjAG&url=http%3A%2F%2Fwww.colegiobatistavr.com.br%2Fsite_batista%2Fdownloads%2Fcurso_de_clp.pdf&ei=_UrjUf8wr6zgA8H2gSA&usg=AFQjCNE9iOcBEh_z2WrIrKcg4lrmGa7iw&bvm=bv.48705608,d.aWM&cad=rja (Acessado em: 10/07/2013.)

- [REC2013] **Recaf – indústria de bobinas, motores e solenoides.** Obtido no endereço: http://www.recaf.com.br/2013/?dt_catalog=solenoides (Acessado em: 11/07/2013.)
- [SAN2012] SANTOS, Winderson E. Introdução à robótica industrial. Notas de aula. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2012. Texto em PDF. Obtido no endereço: http://pesoal.utfpr.edu.br/winderson/arquivos/Rob01_introducao.pdf (Acessado em: 12/07/2013.)
- [SEN2001] **Catálogo Geral.** Sense Sensores e Instrumentos. 2001.
- [SEN2013] **Sensores de Proximidade.** Sense Sensores e Instrumentos. Obtido no endereço: www.sense.com.br (Acessado em: 11/07/2013.)
- [SIE2006] **Motores de Corrente Contínua.** Guia rápido para uma especificação precisa. Siemens. 2006. Obtido no endereço: ftp://ftp.unilins.edu.br/etl/T_cnico%20em%20Eletr_eletr_nica%20-%20ETL%20de%20Lins/1_%20Turma%202006/M_quinas%20El_tricas%203/M_quinas%20CC%20Siemens.pdf (Acessado em: 05/07/2013.)
- [SIL2013] SILVA FILHO, Bernardo Severo. **Curso de Controladores Lógicos Programáveis.** Laboratório de Engenharia Elétrica. UERJ – Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Texto em PDF. Obtido no endereço: http://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=9&cad=rja&sqi=2&ved=0CFwQFjAI&url=http%3A%2F%2Fwww.lee.eng.uerj.br%2Fdownloads%2Fcursos%2Fclp%2Fclp.pdf&ei=_UrjUf8wr6zgA8H2gSA&usg=AFQjCNE9VYq7xB12TJBF_gwLZxnwYJeOfg&bvm=bv.48705608,d.aWM (Acessado em: 12/07/2013.)
- [WEN2010] WENDING, Marcelo. **Sensores.** Versão 2.0 UNESP – Universidade Estadual de Paulista. Campus de Guaratinguetá. Colégio Técnico de Guaratinguetá. Notas de Aula. 2010.
- [WIK2013] **EAN-13.** Wikipedia. Obtido no endereço <http://pt.wikipedia.org/wiki/EAN-13> (Acessado em: 10/07/2013.)

Especificação, desenvolvimento e implantação de sistemas de automação

SUMÁRIO

8.1	Miniglossário	258
8.2	Projetos de automação: elementos essenciais	259
8.3	Identificação e contexto: o ponto de partida.....	259
8.4	Segurança, confiabilidade e disponibilidade: critérios prévios essenciais	260
8.5	Especificação de sistemas de automação	262
8.5.1	Desenvolvimento de requisitos de sistemas de automação	263
8.5.2	Gestão de requisitos de sistemas de automação.....	264
8.6	Design e construção de sistemas de automação	265
8.7	Implantação, operação, manutenção e descarte de sistemas de automação	266
8.8	Na prática.....	268
8.9	Leituras recomendadas	268
8.10	Exercícios e atividades	268

Este capítulo apresenta um guia para projeto de sistemas de automação, envolvendo as etapas de especificação, desenvolvimento e implantação. O objetivo é possibilitar a compreensão dessas etapas do ponto de vista de quem coordena ou participa de um projeto que envolva automação. São apresentados os critérios, os cuidados e as características típicos desses projetos, sem se ater a detalhes técnicos de cada etapa. A atividade de especificação de requisitos é a que recebe maior atenção.

NO FINAL DESTA CAPÍTULO VOCÊ ESTARÁ APTO PARA PREPARAR E REALIZAR AS SEGUINTE ATIVIDADES TÍPICAS DE UM PROJETO DE SISTEMA DE AUTOMAÇÃO:

- identificar as principais etapas do projeto;
- especificar o sistema;

- planejar o seu desenvolvimento;
- planejar e gerenciar a sua implantação e manutenção;
- conhecer os principais critérios, riscos e considerações técnicas de cada etapa.

8.1 Miniglossário

Arquitetura de sistema. Organização fundamental de um sistema que incorpora seus componentes e relacionamentos uns com os outros e o ambiente e princípios que orientam seu projeto e evolução [NBR2009].

Elemento de sistema. Membro de um conjunto de elementos que constituem um sistema. Um elemento de sistema é uma parte discreta de um sistema que pode ser implementada para atender aos requisitos especificados. Um elemento de sistema pode ser hardware, software, dados, pessoas, processos (p. ex., processos para o fornecimento de serviços a usuários), procedimentos (p. ex., instruções para o operador), instalações, materiais, e entidades envolvidas naturalmente (p. ex., água, organismos, minerais), ou qualquer outra combinação [NBR2009].

Confiabilidade de sistema. Habilidade para consistentemente desempenhar suas funções de acordo com a especificação sem a ocorrência de falhas.

Construção de sistema. Fase do desenvolvimento que implementa o sistema, deixando-o em condições para as análises finais e início de seu uso.

Design de sistema. Fase do desenvolvimento que estabelece uma solução técnica economicamente viável para atender às especificações estabelecidas. A modelagem de arquitetura, componentes, interfaces e dados é criada, documentada e verificada para atender aos requisitos de sistema. Também denominado projeto ou projeto técnico de sistema.

Disponibilidade de sistema. O grau em que um sistema (ou elemento de sistema) é operacional e acessível quando requerido para uso.

Desativação de sistema. Retirada do apoio ativo pela organização que opera ou faz a manutenção, substituição parcial ou total por um sistema novo, ou instalação de um sistema com nova versão [NBR2009].

Especificação de sistema. Fase do desenvolvimento que estabelece o enunciado dos requisitos do sistema.

Implantação de sistema. Reúne as atividades voltadas para a preparação e a disponibilização do sistema para operação.

Manutenção de sistema. Reúne as atividades voltadas para manter o sistema operacional após a sua implementação.

Operação de sistema. Reúne as atividades voltadas para operar o sistema.

Segurança. Todos os aspectos relacionados com definição, realização e manutenção de confiabilidade, integridade, disponibilidade, não repudição, autonomia, autenticidade e confiabilidade de um sistema [NBR2009].

Stakeholder. Um grupo ou indivíduo que é afetado por ou é de alguma maneira responsável pelo resultado de um projeto.

Validação de sistema. Atividade voltada para avaliar o grau em que o sistema atende a seu uso pretendido (“*you built the right thing*”).

Verificação de sistema. Atividade voltada para avaliar o grau em que os produtos de trabalho (artefatos) atendem aos requisitos especificados (“*you built it right*”).

8.2 Projetos de automação: elementos essenciais

Os principais elementos de um projeto de sistema de automação são:

- **Identificação e contexto:** identifica as características essenciais do processo produtivo a ser automatizado, os benefícios pretendidos com a automação e os requisitos gerais do sistema.
- **Segurança, confiabilidade e disponibilidade:** define as características críticas e os riscos a serem mitigados no projeto do sistema.
- **Especificação:** estabelece e documenta os requisitos do sistema, com envolvimento dos *stakeholders* do projeto.
- **Design e construção:** estabelece e documenta a solução técnica para o sistema especificado.
- **Implantação, operação, manutenção e descarte:** define os cuidados a tomar na implantação final do sistema e nas atividades subsequentes.

A NBR ISO15288 apresenta os chamados Processos do Ciclo de Vida de Sistema que tratam de todas as atividades que envolvem um sistema desde a identificação da necessidade até sua desativação. Essa Norma é útil para quem deseja organizar os processos em uma organização particularmente as atividades de projeto [NBR2009]. O modelo CMMI também possui processos para o projeto de sistemas e é outra referência importante para essa atividade [SEI2010].

Nas seções a seguir são discutidos esses elementos, sempre com foco em projeto integrado de produção e automação.

8.3 Identificação e contexto: o ponto de partida

O que deve ser automatizado? Essa questão envolve várias outras, que devem ser respondidas antes de iniciar o projeto de desenvolvimento. Temos de considerar que o projeto de automação deverá servir a um contexto de operação em mudança (de manual para automática ou de maior ou melhor automação, quando esta já estiver presente).

O **Quadro 8.1** apresenta os principais aspectos a considerar nesta etapa.

Quadro 8.1 Identificação e contexto: principais aspectos a considerar

Identificação e contexto

Características e necessidades do sistema produtivo

Lista inicial de sensores e atuadores

Interface humano-sistema

Questões operacionais

O ponto de partida no desenvolvimento de sistemas de automação é a definição das **características e necessidades do sistema produtivo**. Para melhor compreender a relação entre tipo de produção e tipo de automação a ser projetada, deve-se considerar as análises apresentadas no Capítulo 2 deste livro. Uma pergunta inicial: o que deve e pode ser automatizado? É muito importante que o local seja visitado e conhecido, qualquer que seja a fase em que esteja a sua preparação. As características elétricas do local (tensões, potência disponível) devem ser conhecidas, assim como os mecanismos operacionais do processo – envolvendo as características hidráulicas, pneumáticas, mecânicas, eletrônicas e a sequência de operação típica pretendida. É também necessário conhecer as distâncias previstas para a instalação [ELA2008].

Uma lista inicial e a localização dos **sensores** e dos **atuadores** necessários para controle do processo (sem a necessidade de detalhamento técnico deles nesta etapa) é uma atividade recomendável.

Também cabe nesta fase inicial a definição da forma de operação do processo com automação: papel dos operadores e características essenciais da **interação homem-computador** (*HCI Human Computer Interaction*).

Por fim, algumas **questões operacionais** necessitam ser respondidas nesta fase inicial, entre elas:

- o sistema deve oferecer apoio a registros (para referência, rastreabilidade, histórico, análise de tendências etc.), como os oferecidos em sistemas da categoria *SCADA* (*Supervisory Control And Data Acquisition*)?
- quais as precisões requeridas?

Realizada a atividade de identificação e contexto, o próximo passo é definir os requisitos de segurança, para depois especificar detalhadamente as demais características do sistema.

8.4 Segurança, confiabilidade e disponibilidade: critérios prévios essenciais

Os sistemas de automação podem causar impactos às pessoas, operações e aos bens de uma organização. É necessário avaliar e prevenir os riscos envolvidos desde o início de sua concepção até a sua implantação e operação final. O **Quadro 8.2** apresenta as definições de alguns conceitos relevantes.

Quadro 8.2 Segurança e outros conceitos correlatos

Termo	Definição
Segurança contra incidentes randômicos (<i>safety</i>)	A proteção contra incidentes randômicos indesejáveis (que podem acontecer como resultado de uma ou mais coincidências). [ALB2003; ALB2002]
Segurança contra incidentes intencionais (<i>security</i>)	A proteção contra incidentes intencionais (que podem ocorrer devido a um resultado de ação deliberada e planejada). [ALB2002; ALB2003] Este tipo de segurança visa à proteção contra incidentes planejados, maliciosos e criminosos advindos de uma larga gama de ameaças – em que são protegidos todos os tipos de valores para uma organização/ indivíduo – e incidentes ocorridos devido ao desejo de uma saída/ consequência desejada por um atacante. [ALB2003] O estabelecimento e a aplicação de garantias para proteger dados, software e hardware contra modificações, destruição ou divulgação. Medidas e controles que asseguram a confidencialidade, a integridade, a disponibilidade e a responsabilidade sobre os processos de informação armazenados por um sistema. [MAR2012]
Disponibilidade (<i>availability</i>)	Razão entre o tempo que um sistema ou componente está em funcionamento e o tempo total que é requerido ou esperado para funcionar. Isso pode ser expresso como uma proporção direta ou uma porcentagem (exemplo, 9/10 ou 0,9 ou 90%). [WHA2012] O grau em que um sistema (ou elemento de sistema) é operacional e acessível quando requerido para uso. [MAR2012]
Confiabilidade (<i>reliability</i>)	Refere-se à habilidade de um componente de hardware ou software para consistentemente desempenhar suas funções de acordo com a especificação. Na teoria, um produto confiável é totalmente livre de erros. Na prática, os vendedores comumente expressam a confiabilidade de produto como uma porcentagem. [WHA2012]

A **segurança contra incidentes randômicos**, sobretudo os que afetam pessoas que têm contato com os equipamentos e os próprios equipamentos (identificada em inglês pelo termo *safety*) constitui – após a compreensão do contexto – o primeiro e mais importante item a considerar no desenvolvimento de sistemas de automação [ELA2008]. São pontos a considerar para esse tipo de segurança, entre outros possivelmente relevantes na aplicação específica:

- Aplicar todos os códigos locais, estaduais e federais que regulam a instalação e a operação de sistemas de controle.
- Eliminar o risco de fogo e choque elétrico (cf. padrões do *IEC International Electromechanical Commission* em <http://www.iec.ch>).
- Estabelecer procedimentos de *Lockout/tagout (LOTO)*, para preservar operadores e pessoal de manutenção contra inesperada energização ou iniciação de máquinas e equipamentos (cf. procedimentos especificados

pela OSHA *Occupational Safety and Health Administration* <http://www.osha.gov/SLTC/controlhazardousenergy/>).

- Definir método manual e meios para paradas de emergência, permitindo a desconexão de todos os sistemas de potência para máquinas, equipamentos e processos. Registros automáticos de *status* necessários para o restabelecimento dos sistemas após a parada devem ser definidos e implementados. É recomendável que um rótulo “Parada de emergência” seja utilizado e tornado visível.
- Garantir que, para prevenir energização acidental das saídas, haja dispositivos independentes dos sistemas automáticos (tipicamente eletromecânicos, como relés) que fornecem proteção para qualquer parte do sistema que possa causar prejuízos ou danos às pessoas.
- Estabelecer e documentar procedimentos para desligamento ordenado de equipamentos em caso de falha, de maneira que retornem a seu estado seguro para parada.
- Incorporar boas práticas de aterramento.
- Estabelecer um esquema de distribuição de energia de maneira a garantir que os circuitos sejam protegidos contra fusão.
- Garantir que, se algum sinal de realimentação dos sistemas de malha fechada for perdido, o sistema para, de maneira a evitar ferimentos para as pessoas ou danos aos equipamentos.

A segurança contra incidentes intencionais (*security*) envolve todos os cuidados para garantir segurança de acesso contra invasão ou atuação não autorizada de pessoas.

O desenvolvimento deve contemplar também o atendimento a requisitos de **confiabilidade**. Esses requisitos são expressos, tipicamente, através de dois parâmetros:

- MTBF (*Mean Time Between Failure*), o tempo médio entre falhas de um sistema ou subsistema de automação.
- MTTR (*Mean Time to Recovery*), o tempo médio de reposição ou de recuperação de um sistema ou subsistema de automação. Também denominado *Mean Time to Repair*.

8.5 Especificação de sistemas de automação

A especificação de sistemas de automação compreende o levantamento, a documentação e a gestão dos seus requisitos.

Requisitos são as características do sistema, ou descrições de algo que o sistema é capaz de realizar, para atingir os seus objetivos. Descrevem o que deve ser implementado e as restrições do sistema [SOM2011; NBR2009].

O processo que engloba todas as atividades que contribuem para a produção de um documento de requisitos e sua manutenção ao longo do tempo é chamado de **Engenharia de Requisitos**. Essa disciplina envolve as seguintes atividades principais:

- Desenvolvimento de requisitos: identificação e documentação dos requisitos.
- Gestão de requisitos: planejamento e gerência de requisitos, visando manter consistência entre os requisitos e os planos e os componentes do sistema.

8.5.1 Desenvolvimento de requisitos de sistemas de automação

O **desenvolvimento de requisitos** de sistemas de automação envolve as seguintes atividades [SOM2011; ELA2008]:

- Especificação de requisitos não técnicos: aspectos contratuais (prazos, custos etc.) que têm impacto sobre as características do sistema a ser desenvolvido.
- Especificação de requisitos funcionais: declarações de funções que o sistema deve realizar. O **Quadro 8.3** apresenta os principais tópicos a considerar.

Quadro 8.3 Especificação de requisitos funcionais

Especificação de requisitos funcionais de sistemas de automação

1. Supervisão: subsistemas e funções de supervisão.
 2. Controle manual: subsistemas e comandos de controle manual.
 3. Controle automático: subsistemas, ações e regras para controle automático.
-

- Especificação de requisitos não funcionais: declarações de características gerais e restrições sobre os serviços ou as funções oferecidos pelo sistema (restrições de tempo, padrões etc.). O **Quadro 8.4** apresenta os aspectos não funcionais típicos.
- Especificação de dispositivos de controle: definição detalhada dos dispositivos de entrada, de saída e a unidade de processamento. O **Quadro 8.5** apresenta uma lista de aspectos a considerar na especificação desses dispositivos.

A especificação de requisitos costuma ser realizada com base em formulário próprio adequado a cada tipo de sistema de automação. O formulário contém a lista de verificação completa, com todos os itens a considerar. Os quadros anteriores podem servir de roteiro para elaboração desses formulários por clientes e fornecedores.

Quadro 8.4 Especificação de requisitos não funcionais

Especificação de requisitos não funcionais de sistemas de automação	
1	Expansibilidade (para sistemas sempre em atualização ou implantados em etapas): capacidade máxima e folga (20%? 10%?) de I/Os; integração com redes; capacidade de memória disponível.
2	Precisão exigida nos cálculos e resultados.
3	Desempenho : tempo de ciclo exigido dos CLPs; I/Os imediatas (tratadas em emergência, independentemente do ciclo dos CLPs); comunicação (tipos e velocidades).
4	HCI (Interação humano-computador): exigências de usabilidade e apreensibilidade.
5	Restrições ou predefinições técnicas : contadores rápidos, cálculos avançados, controles PID, troca de cartões a quente, rede especificada etc.
6	Confiabilidade : normas para equipamentos, envolvendo exigências relativas à robustez de equipamentos (alimentação, vibração, temperatura, umidade, ventilação etc).
7	Segurança : CPUs redundantes, preparação para falha segura etc.
8	Vida útil dos equipamentos.
9	Tamanho e peso : exigências para componentes e subsistemas.
10	Restrições e exigências decorrentes das características da área de implantação : condições ambientais, presença de gases, pó, líquidos etc.
11	Treinamento e apoio técnico necessários para o desenvolvimento do projeto.
12	Treinamento e assistência técnica necessários em tempo de operação.
13	Restrições de custos : equipamentos e acessórios, software (CLPs, sistemas supervisórios e controle, rede), mão de obra.

Quadro 8.5 Especificação de dispositivos de entrada e saída

Especificação de dispositivos de entrada e saída em sistemas de automação	
1	Número de I/Os e suas classificações (analógicas, digitais etc).
2	I/Os digitais (sensores, acionamentos): número para cada nível de tensão AC e DC
3	I/Os analógicas (sensores, acionamentos): analisar o <i>range</i> e a resolução.
4	Características técnicas dos dispositivos de entrada : tensão de operação (24, 120 ou 240 volts, AC ou DC), corrente requerida etc.
5	Características técnicas dos dispositivos de saída : tensão de operação (24, 120 ou 240 volts, AC ou DC), consumo de corrente, ciclo de trabalho, faixa de temperatura e de umidade operacionais, dimensões da montagem etc.

8.5.2 Gestão de requisitos de sistemas de automação

A **gestão de requisitos** de sistemas de automação compreende todas as atividades voltadas para planejar e gerenciar requisitos dos produtos e componentes de produto do projeto e identificar inconsistências entre esses requisitos e os planos e produtos de trabalho (artefatos) do projeto.

São atividades típicas da gestão de requisitos de sistemas de automação [SEI2010]:

- Obter entendimento dos requisitos com os provedores de requisitos de forma que os participantes do projeto possam se comprometer com eles.

Esse tópico é particularmente relevante para sistemas de automação, que possuem tipicamente muitos *stakeholders*, com diferenciados interesses.

- Analisar impactos dos requisitos, negociar com os participantes do projeto, obter comprometimento e registrar os compromissos.
- Gerenciar mudanças nos requisitos: documentar os requisitos e suas mudanças, manter histórico, avaliar o impacto das mudanças.
- Manter rastreabilidade bidirecional dos requisitos, ou seja, o registro da vida do requisito durante as várias etapas do projeto, do início para o fim e vice-versa, passando por componentes, funções, objetos, testes, questões, problemas ou outras entidades. A rastreabilidade estabelece uma clara associação entre os requisitos e os artefatos do ciclo de vida a eles associados, incluindo outros requisitos. Essa atividade é realizada, tipicamente, com o uso de uma matriz de rastreabilidade [GOT1994; SEI2010].
- Identificar inconsistências entre produtos de trabalho (artefatos), planos de projeto e requisitos. Quando os sistemas de automação envolvem vários fornecedores ou são complexos, há alto risco de mudanças gerarem inconsistências.

8.6 Design e construção de sistemas de automação

O *design* e a **construção** de sistemas de automação são desenvolvidos por especialistas. A atividade de *design* estabelece uma solução técnica economicamente viável para atender às especificações estabelecidas. Detalha as especificações cobrindo todos os aspectos do sistema. Já a construção reúne todas as atividades voltadas para a implementação física da solução, preparando o sistema para implantação, operação e manutenção.

As seguintes atividades são tipicamente realizadas no *design* de sistemas de automação, e devem manter interface com os demais envolvidos no processo de desenvolvimento e implantação [ELA2008]:

- Planejamento e definição da sequência de operação.
- Definição da arquitetura do sistema: definição dos subsistemas e componentes do sistema, envolvendo hardware, software e mecânica, tanto quanto suas interconexões físicas e lógicas.
- Decisão sobre desenvolvimento próprio ou aquisição de cada subsistema.
- Detalhamento dos subsistemas e componentes do sistema. Inclui:
 - Apresentação dos dispositivos, desde os de alta até os de baixa voltagem, com uso de esquema predefinido.
 - Layout dos painéis.
 - Modelagem de software (estática, funcional e dinâmica).

- Verificação (revisões técnicas, *peer review*) da arquitetura e dos elementos críticos concebidos.
- Explosão de materiais (*bill of materials*).

O *design* envolve várias decisões técnicas, em cada etapa de detalhamento. Essas decisões devem ser acordadas com os *stakeholders* e documentadas. Alternativas podem ser desenvolvidas e discutidas. Reuniões técnicas podem ser realizadas para análise dessas decisões.

Ferramentas adequadas de apoio ao *design* – em especial os sistemas CAID, CAD, CAE e CAM – devem ser adquiridas e utilizadas. O Capítulo 11 apresenta essas ferramentas e os critérios para sua seleção.

A **construção** de sistemas de automação é um empreendimento de engenharia de grande complexidade, e deve envolver tanto os desenvolvedores quanto os usuários do sistema. As seguintes atividades são típicas:

- Análise e teste das condições prévias para implantação especificadas (especialmente as especificações elétricas e de proteção).
- Construção dos subsistemas e componentes, de acordo com o plano de implantação.
- Verificação (testes) e integração desde as unidades até os componentes maiores.
- Preparação do ambiente técnico para o sistema.
- Conversão de dados a partir dos sistemas legados.
- Validação do sistema. Avaliação do grau em que o sistema atende a todos os requisitos, opera de acordo com os parâmetros estabelecidos e satisfaz a todos os *stakeholders* de negócio, técnicos e gerenciais. Assegura também que o sistema opera como descrito nos manuais de operação. [MAR2013]

8.7 Implantação, operação, manutenção e descarte de sistemas de automação

A última fase dos sistemas de automação compreende as atividades de implantação, operação, manutenção e, possivelmente, descarte do sistema.

A **implantação** de sistemas de automação envolve as seguintes atividades principais:

- Planejamento de implantação.
- Planejamento de segurança da operação (*safety* e *security*).
- Documentação de recomendações para usuários.
- Integração e instalação paulatina dos subsistemas e componentes, e integração destes com os demais sistemas de produção.
- Educação e treinamento dos usuários e demais envolvidos com o sistema.

Na indústria costuma-se denominar essa fase de partida do sistema de **comissionamento** (*commissioning*), que é uma transição entre a engenharia da empresa que coordenou o projeto e acompanha a implantação e a produção, que passará a utilizar o sistema. É uma fase onde os fornecedores colocam em funcionamento o sistema com um todo, realizam-se as atividades de validação e o treinamento das pessoas que deverão utilizá-lo e mantê-lo. Na Norma NBR ISO 15288 [NBR2009] há um processo específico denominado Transição.

A entrada em **operação** de um sistema de automação requer projeto detalhado, para que sejam mitigados riscos operacionais. A operação envolve, tipicamente, as seguintes atividades [MAR2013]:

- Planejamento e gestão contínuos da operação.
- Monitoração do desempenho do sistema.
- Continuação de apoio aos usuários e demais envolvidos com o sistema, através de educação, treinamento e documentação.

A **manutenção** de sistema está voltada para alterar ou criar funcionalidades, configurações, parâmetros, códigos-fontes, base de dados ou condição de instalação em sistemas já homologados. Envolve as seguintes atividades [MAR2013; NBR2009]:

- Definição de uma Política de Manutenção (normalmente estabelecendo planos e datas para manutenções preventivas, minimizando interveniências corretivas).
- Gestão das mudanças do sistema para apoiar os usuários finais.
- Realização de atividades voltadas para segurança, como *backups*, planos de contingência e auditorias.
- Registro de dados de falhas para acompanhamento do desempenho do sistema.
- Controle dos elementos de reposição para minimizar falta de peças.

Ao final do seu ciclo de operação (e, portanto, de seu ciclo de vida), o sistema deve ser desativado. A **desativação** do sistema requer planejamento e um conjunto de cuidados, em especial quando o sistema tem grande impacto sobre pessoas, equipamentos e o ambiente. São atividades típicas da desativação [MAR2013; NBR2009]:

- Notificação dos técnicos, operadores, usuários e gestores de processos produtivos e sistemas que têm relação com o sistema sendo desativado.
- Os elementos do sistema ou produtos residuais são destruídos, armazenados, recuperados ou reciclados.
- O ambiente volta a seu estado original ou ao estado acordado.
- Arquivamento de dados e componentes do sistema.
- Registros que permitam a retenção de conhecimento das ações de desativação e análise de impactos a longo termo são tornados disponíveis.

8.8 Na prática

Os requisitos de segurança constituem importantes preocupações no desenvolvimento prático de sistemas de automação reais.

Alguns estudiosos e empresas fornecedoras buscam estabelecer com clareza esses requisitos práticos. Veja estes exemplos:

- [http://www05.abb.com/global/scot/scot221.nsf/veritydisplay/2e2f181f04faf59ec125705a004db2bc/\\$file/b5-105.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot221.nsf/veritydisplay/2e2f181f04faf59ec125705a004db2bc/$file/b5-105.pdf)
- <http://www.osgug.com/utilisec/embedded/Shared%20Documents/Device%20Security/EpochInputs/BAS%20Security.pdf>.
- <http://www.tik.ee.ethz.ch/~naedele/atp03.pdf>.

8.9 Leituras recomendadas

A Engenharia de Software é uma base de grande importância para o desenvolvimento de sistemas de automação de alta qualidade. Os livros que tratam dessa disciplina podem ser utilizados para identificar e modelar as atividades de desenvolvimento de sistemas. No entanto, os métodos e as técnicas propostos para essa disciplina necessitam, muitas vezes, ser adaptados para as aplicações e os ambientes específicos envolvidos nos sistemas de automação em foco.

Um estudo sobre os principais avanços da Engenharia de Software para a área específica de automação pode ser encontrado no artigo de Valeriy Vyatkin, *Software engineering in industrial automation: state of art review*, publicado na **IEEE Transactions on Industrial Informatics** [VYA2013].

8.10 Exercícios e atividades

1. Defina com suas próprias palavras o objetivo das seguintes atividades referentes ao desenvolvimento de sistemas de automação:
 - a. Especificação
 - b. *Design*
 - c. Construção
 - d. Implantação
 - e. Operação
 - f. Manutenção
2. Quais as principais tarefas para o desenvolvimento de cada uma das grandes atividades da questão anterior?
3. Visite um sistema de automação industrial e identifique as características de segurança e confiabilidade exigidas. Elas foram claramente especificadas? Os engenheiros as conhecem bem? Quais são os principais *stakeholders* e como são envolvidos?
4. Faça o mesmo para um sistema de automação em serviços.

Referências bibliográficas

- [ALB2002] ALBRECHTSEN, Eirik. **A generic comparison of industrial safety and information security**. Term paper in the PhD course “Risk an Vulnerability”, NTNU. December 2002. Disponível em <http://www.iot.ntnu.no/users/albrecht/rapporter/generic%20comparison%20of%20ind%20saf%20and%20inf%20sec.pdf>. (Acessado em: 02/01/2012.)
- [ALB2003] ALBRECHTSEN, Eirik. **Security vs safety**. Technical Report. Norwegian University of Science and Technology, 2003. Disponível em <http://www.iot.ntnu.no/users/albrecht/rapporter/notat%20safety%20v%20security.pdf>. (Acessado em: 02/01/2012.)
- [ELA2008] ELAVSKY, Tom. **A condensed guide to automation control system specification, design and installation (Technical Review Control System Design)**. Automation Direct, 2008. Disponível em <http://support.automationdirect.com/docs/controlsystemdesign.pdf> (Acessado em: 04/01/2012.)
- [GOT1994] GOTEL, Cerlena O. Z.; FINKELSTEIN, Anthony C. W. An analysis of the requirements traceability problem. IEEE International Conference on Requirements Engineering. 1., 18-22/4/1994. **Proceedings**. p. 94-101.
- [MAR2012] MARYLAND STATE. **SDLC System Development Life Cycle**. Disponível em: <http://doit.maryland.gov/SDLC/Pages/SDLCHome.aspx>. (Acessado em: 01/12/2013.)
- [NBR2009] NBR ISO/IEC 15288:2009. Engenharia de sistemas e software — Processos de ciclo de vida de sistema. Norma ABNT. 2009.
- [QUE2011] QUEIROZ, Júlio Cesar Braz de. Automação VIII. Apostila do Curso de Engenharia Eletrônica e de Telecomunicação. PUC Minas, 2011. 46p. Disponível em <http://www.scribd.com/doc/56933463/5/Camadas-de-uma-arquitetura-distribuida-em-sistemas-de-automacao> (Acessado em: 01/12/2011.)
- [SEI2010] CMMI Product Team. **CMMI for Development**, Version 1.3 (CMU/SEI-2010-TR-033, ESC-TR-2010-033). Software Engineering Institute, Carnegie Mellon University: Pittsburgh, PA, August 2010. Disponível em <http://www.sei.cmu.edu/library/abstracts/reports/10tr033.cfm> (Acessado em: 01/12/2011.)
- [SOM2011] SOMMERVILLE, Ian. **Engenharia de software**. 9. ed. Pearson/Prentice-Hall: Rio de Janeiro, 2011.
- [VYA2013] VYATKIN, Valeriy. Software engineering in industrial automation: state of art review. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**. (2013). doi: 10.1109/TII.2013.2258165. Disponível em: <http://www.vyatkin.org/publ/2012tiiV.pdf>. (Acessado em: 14/07/2013.)
- [WHA2012] WHAT IS. **The leader IT encyclopedia and learning center**. (2012). Disponível em http://whatis.techtarget.com/definition/0,sid9_gci1232701,00.html (Acessado em: 02/01/2012.)

Integração de Sistemas e Redes

SUMÁRIO

9.1	Miniglossário	272
9.2	Necessidade da integração	272
9.3	Arquitetura de um sistema integrado	272
9.3.1	Uma visão hierárquica da arquitetura	273
9.3.2	Controle hierárquico	275
9.3.3	SOA: Arquitetura Orientada a Serviço	277
9.4	A revolução das telecomunicações	278
9.4.1	Redes de comunicação: a inversão de valores	278
9.4.2	Componentes e funções de um sistema de comunicação	279
9.4.3	Espectro de frequência	279
9.4.4	Tecnologias sem fio	280
9.4.5	Topologia de rede	282
9.5	Protocolo de comunicação	283
9.5.1	Um exemplo de protocolo	283
9.5.2	Modelo de sete camadas ISO / OSI	284
9.5.3	O protocolo de rede TCP/IP	286
9.6	Na prática	286
9.7	Leituras recomendadas	287
9.8	Exercícios e atividades	287

O objetivo deste capítulo é apresentar conceitos, métodos e técnicas modernos, voltados para a integração dos sistemas de automação com outros sistemas de informação e comunicação das organizações.

AO TÉRMINO DA LEITURA DESTE CAPÍTULO, VOCÊ ESTARÁ APTO PARA:

- conhecer as arquiteturas de integração de sistemas;
- compreender o papel dos sistemas de comunicação na integração.

9.1 Miniglossário

Arquitetura de sistema. Estrutura integrada para desenvolver e manter tecnologias existentes e adquirir novas tecnologias para apoiar os objetivos de um projeto. Organização fundamental de um sistema que incorpora seus componentes e relacionamentos uns com os outros e o ambiente e princípios que orientam seu projeto e evolução [NBR2009].

Arquitetura Orientada a Serviço (SOA – *Service-Oriented Architecture*). Conjunto de princípios de arquitetura para construção de sistemas autônomos e interoperáveis.

9.2 Necessidade da integração

Os sistemas de produção nas organizações possuem alto grau de automação, mas esses sistemas, por diversas razões, por vezes não são interligados. As causas são diversas, desde a aquisição independente de sistemas de fabricantes que não possuem equipamentos que se interliguem, até a própria geração dos equipamentos. A tendência, entretanto, é a total integração dos diversos sistemas dentro das organizações e fora delas com seus parceiros, clientes e fornecedores.

A integração de informações nas organizações é fundamental para os sistemas de automação, sobretudo pelas seguintes necessidades, cada vez mais presentes:

- informações sempre **atualizadas**;
- **registro** dos fatos no ato de sua ocorrência;
- **evitar reinserção** ou nova captura de dados já obtidos ou digitados anteriormente;
- **informações detalhadas** de acordo com as exigências de cada operação;
- **informações agregadas** que apoiem a melhor tomada de decisão na gestão.

A integração só é possível em organizações que a coloquem como diretriz essencial para o desenvolvimento e/ou a aquisição de sistemas. Em função disso, é necessária a definição da arquitetura e das tecnologias de comunicação que dão apoio aos sistemas integrados.

9.3 Arquitetura de um sistema integrado

A integração de sistemas se utiliza de uma arquitetura de sistema, ou seja, o conjunto de conceitos fundamentais de um sistema no seu ambiente incorporados nos seus elementos, relacionamentos e nos princípios de seu design e evolução (Cf. Capítulo 10).

9.3.1 Uma visão hierárquica da arquitetura

A pirâmide apresentada na [Figura 9.1](#) pode ser utilizada como modelo para visualizar uma possível configuração de arquitetura de um sistema integrado. Esse modelo foi apresentado pela *Purdue University* nos anos 1980 e aplicado em grandes indústrias [[WIL1983](#)].

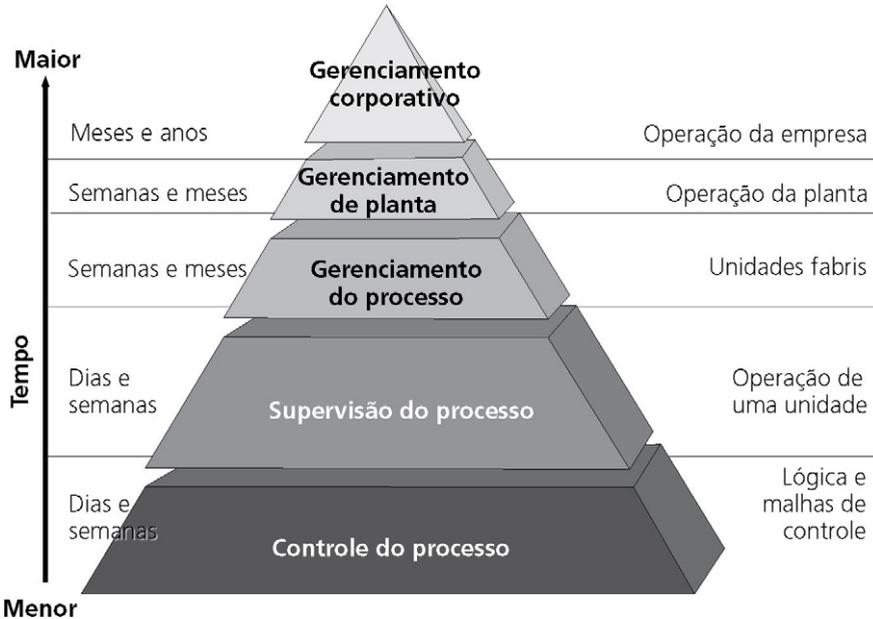


FIGURA 9.1 Pirâmide integrada de sistemas.

O modelo hierárquico de integração proposto é válido para organizações industriais, de serviços e do terceiro setor. As camadas organizadas por níveis permitem compreender os papéis das pessoas, dos processos e da tecnologia utilizadas. Essas camadas estão descritas no [Quadro 9.1](#).

Deve-se notar que esse modelo contempla apenas os processos industriais, não considerando a automação em outros setores da organização, como é o caso da área de engenharia, com os sistemas CAD/CAE (vide Capítulo 11), que se interligam com a área de produção, e os sistemas administrativos (sistemas ERP).

Pode-se observar que essa estrutura é uma imagem da estrutura hierárquica da administração da organização. Idealmente, pode-se dizer que cada pessoa deve ter à sua disposição, no sistema integrado, os dados referentes ao seu trabalho.

Quadro 9.1 Camadas da pirâmide integrada de sistemas [WIL1983]

Nível / Camada	Descrição
Nível 1	Controle de processo Neste nível estão todos os equipamentos que interagem diretamente com o processo.
Nível 2	Supervisão de processo Neste nível são estabelecidos os parâmetros de operação para o nível 1 e apresentada uma visão global de funcionamento dos equipamentos controlados através de relatórios de operação como volumes produzidos, características de desempenho e alarmes de funcionamento.
Nível 3	Gerenciamento de processo Este nível normalmente agrupa sistemas que operam em unidades afins ou complementares – quando a indústria é de grande porte – como uma laminação e seus respectivos pátios de placas e bobinas, ou indústrias que possuem diversas unidades iguais da mesma planta.
Nível 4	Gerenciamento da planta O PPCP – Planejamento Programação e Controle da Produção afeta este nível de gerenciamento da planta como um todo, pois essa ferramenta faz a interligação entre as fábricas e o mundo externo, levando em consideração os pedidos colocados, seus prazos, suprimento de matéria-prima e estoques intermediários.
Nível 5	Gerenciamento corporativo Este é o nível mais alto: atende a outras áreas da organização e efetua planejamentos a prazos mais longos.

Com relação aos dados utilizados nos diversos departamentos, deve-se salientar que deverá haver uma estrutura que atenda às necessidades de todos os níveis propostos.

Assim, no nível do processo há um volume grande de dados com vida curta que somente coexistem durante o andamento das fases da produção. À medida que sobe o nível hierárquico no sistema – e na organização – os dados são atualizados a intervalos maiores, possuem menos variedade, pois tendem a ser indicadores e não valores que exigem ações imediatas específicas.

Nos níveis mais altos esses dados são agregados para utilização adequada pelas outras áreas da organização. Observe-se que essa estrutura permite que todos tenham acesso aos mesmos dados sem o perigo de existirem, em áreas distintas, diferentes informações desatualizadas.

Pela [Figura 9.1](#) é possível também observar como é crítica a situação nos níveis hierárquicos mais baixos que manipulam uma grande variedade de dados, atualizados a frequências altas, com grande precisão, necessitando de ações rápidas de correção: é onde se encaixam perfeitamente as técnicas de sistemas de tempo real com grande eficiência.

Outro ponto também fundamental é a necessidade de dados e programas entre as máquinas para permitir esse fluxo de informações. São as redes de comunicação de dados que fazem essa conexão. No nível da fábrica, existem as redes específicas para automação. A primeira geração delas, da década de 1980, conhecida como *MAP (Manufacturing Automation Protocol – Protocolo de Automação da Manufatura)*, foi desenvolvida com a liderança da GM. O MAP foi criado para estabelecer uma estrutura para o controle de processos industriais, mas a sua complexidade acabou por prejudicar a realização de seu

objetivo. Depois foi desenvolvida a Ethernet industrial e, mais recentemente, as redes sem fio (*wireless*) [SAU2010].

9.3.2 Controle hierárquico

Como mostrado anteriormente, várias camadas de controle são estabelecidas para um completo sistema de automação. O controle hierárquico se utiliza de vários níveis de sistemas computacionais, envolvendo controle do processo, supervisão, gestão e negócio. A Figura 9.2 apresenta a estrutura física e lógica do padrão ISA95, um conjunto de normas proposto pela ISA (*Instrumentation, Systems, and Automation Society* – Sociedade para Instrumentação, Sistemas e Automação) para controle digital [BER2006]. Ele foi desenvolvido com o objetivo de reduzir a dificuldade e o custo da integração entre sistemas de negócio e de manufatura e também entre as operações de manufatura, tanto quanto aumentar a clareza e a facilidade de comparação dessas operações. Essas normas estão também publicadas como IEC/ISO 62264 Standards.

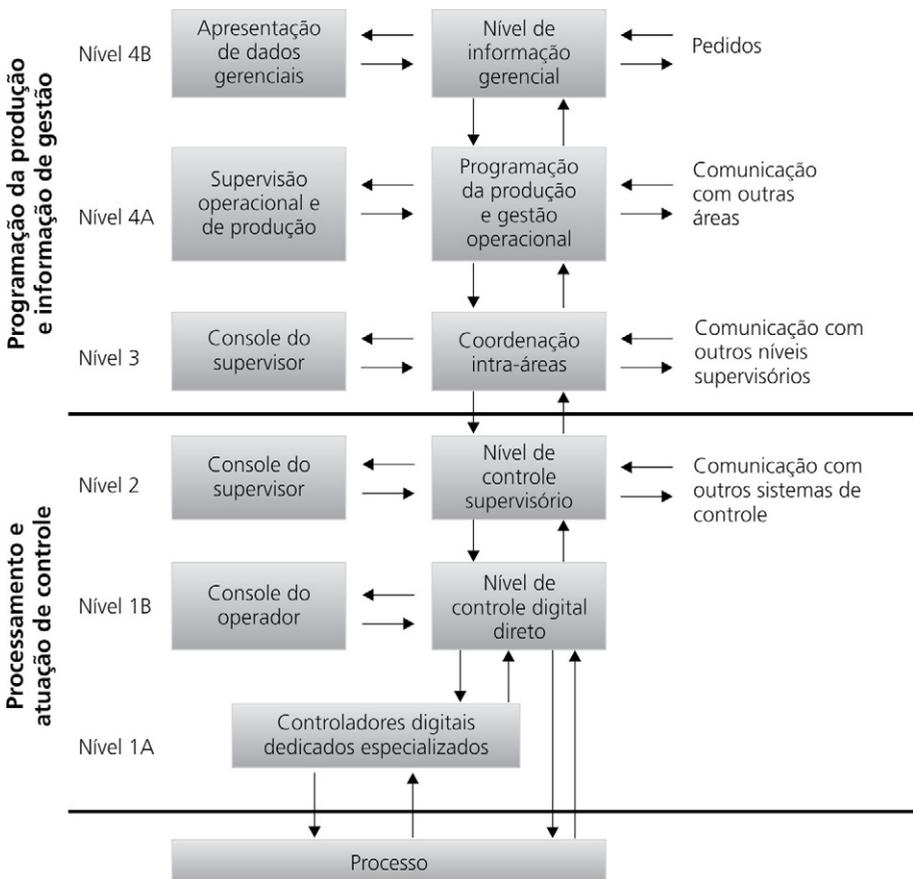


FIGURA 9.2 Controle digital hierárquico (ISA) [BER2006].

O **Quadro 9.2** descreve os níveis hierárquicos de controle da estrutura da ISA e também as principais tarefas que envolvem [BER2006]. Os níveis 0, 1 e 2 são os níveis do controle de processo. Têm o objetivo de controle de equipamento, a fim de executar os processos de produção que levam aos produtos. O nível

Quadro 9.2 Controle digital hierárquico (ISA): níveis e tarefas/deveres (Baseado em [BER2006])

Nível	Descrição	Deveres / Tarefas
0	Processo. Define os processos físicos reais.	
1	Controle básico. Define as atividades de sensoriamento e manipulação dos processos físicos. Envolve conexões diretas (sensores, elementos de controle finais, controles PID contínuos, intertravamento, alarmes e dispositivos de monitoração). Sistemas de controle complexo tipicamente envolvem dois níveis (1A e 1B).	Atuação de controle (controle direto, detecção de condições de emergência) Coordenação e relatos do sistema (coleta de informação e envio a níveis superiores, interface com o operador) Garantia de confiabilidade (diagnósticos, atualizações)
2	Controle supervísório. Define as atividades de monitoração e controle dos processos físicos. Inclui funções voltadas para aumento da produção, melhoria da proteção ambiental, conservação de energia, otimização, manutenção preventiva e segurança da planta.	Atuação de controle (resposta a condições de emergência de uma área de supervisão, otimização de operação de uma área) Coordenação da planta e relato de dados operacionais (coleta e manutenção de filas de dados, comunicação com níveis mais alto e mais baixo, interface com o supervisor) Garantia de confiabilidade (diagnósticos, atualizações)
3	Controle de área e interáreas. Define as atividades do fluxo de trabalho para produzir os produtos finais desejados. Envolve padronização de linguagem.	Programação da produção (inclui programação detalhada e otimização de custos para cada nova programação) Coordenação da planta e relato de dados operacionais (gestão da qualidade, manutenção, acompanhamento da produção, relatórios de produção de área, comunicação com níveis mais alto e mais baixo, interface com o supervisor, análise de dados, questões relacionadas com pessoal como folgas e férias) Garantia de confiabilidade (diagnósticos)
4	Programação e gestão. Define as atividades relacionadas com negócio necessárias para gerenciar a organização da manufatura. Envolve contato com a planta (4A) e com a alta administração (4B). As atividades de gestão incluem marketing, finanças, recursos humanos, programação da produção e inventário. Há pacotes de software disponíveis (p. ex., ERPs).	Programação da produção (planejamento de longo prazo, modificações que impactam todas as programações, otimização de níveis ótimos de inventário) Coordenação da planta e relato de dados operacionais (compra de matéria-prima, uso de energia, controle da qualidade, interface com outros níveis, informações da produção e da situação, manutenção de interface com a planta e a gestão da organização) Garantia de confiabilidade (diagnósticos)

3 pode ser chamado de nível de atividades *MES (Manufacturing Execution System)*. Consiste em várias atividades que devem ser executadas para preparar, monitorar e completar o processo de produção executado nos níveis inferiores. O nível mais alto (nível 4) poderia ser chamado de nível dos sistemas *ERP (Enterprise Resource Planning)*. Nesse nível, as atividades financeiras e logísticas são executadas.

9.3.3 SOA: Arquitetura Orientada a Serviço

Os sistemas de automação apresentam necessidades cada vez maiores de integração, agilidade, flexibilidade e interoperabilidade. Estudos recentes têm apontado tendência para os seguintes requisitos [JAM2005]:

- capacidade de integração dinâmica intraempresa;
- cooperação entre empresas;
- apoio de hardware e software heterogêneo e interoperável;
- agilidade através de adaptabilidade e capacidade de reconfiguração;
- escalabilidade pela adição de recursos sem interromper as operações;
- tolerância a falhas e recuperação de falhas.

Essas tendências têm também sua base na convergência tecnológica cada vez maior. Para atender a essas demandas, as arquiteturas de sistemas de automação tendem a se tornar cada vez mais abertas e orientadas a serviço.

Chama-se **Arquitetura Orientada a Serviço (SOA – Service-Oriented Architecture)** o “paradigma de arquitetura para componentes de um sistema e interações ou padrões entre eles. O componente oferece um serviço que espera em estado de prontidão. Outros componentes podem invocar o serviço em conformidade com o contrato do serviço” [NIC2005].

Podemos entender SOA como um conjunto de princípios de arquitetura para construção de sistemas **autônomos e interoperáveis**. A autonomia envolve características, tais como independência (de criação e de operação) e funcionalidade autocontida dos vários serviços. A interoperabilidade se refere à clara abstração da interface entre o serviço e seu ambiente. Considerando que essas duas propriedades são contraditórias, o desafio da SOA é conciliar esses princípios opostos [JAM2005].

Para os sistemas de manufatura, em especial, essa conciliação é implementada através das seguintes diretrizes [JAM2005]:

- capacidade de integração: os serviços podem ser prontamente integrados com outros serviços já implantados (as tecnologias legadas também são encapsuladas em serviços);
- alta abstração entre interface do serviço e implementação do serviço, permitindo que se misturem e combinem no mesmo ambiente equipamentos de automação de fornecedores e com padrões diferentes;
- agilidade, flexibilidade e adaptabilidade para mudar aumentadas;

- custos de desenvolvimento reduzidos (o reuso de serviços é facilitado e a programação de aplicações é feita em alto nível de abstração);
- escalabilidade maior, proporcionada pelo encapsulamento da complexidade do serviço;
- maior efetividade na construção de sistemas tolerantes a falhas, baseada na combinação de componentes autossuficientes em vez de componentes fortemente relacionados.

Um desafio para a implementação de arquiteturas orientadas a serviços na automação da manufatura está na superação de barreiras tecnológicas das soluções já consolidadas. Apesar de protocolos padronizados estarem sendo paulatinamente aplicados (p. ex., Modbus, Profitbus), há muitas redes de comunicação proprietárias projetadas para coletar dados do campo [CUC2009].

As tecnologias Web Services constituem o veículo preferencial de implementação para arquiteturas orientadas a serviço [PHA2010].

9.4 A revolução das telecomunicações

O sistema de comunicação é um fator-chave para a integração de sistemas.

Nesta seção é apresentada a “*virada*” das telecomunicações, quando houve a evolução da tecnologia analógica para a digital, levando a convergência entre a tecnologia de telecomunicações e de computação. A comunicação de dados para a automação é fundamental para permitir a integração dos sistemas.

O paradigma tradicional das telecomunicações foi vigente desde a época de Graham Bell até a década de 1970, quando se proliferaram as tecnologias digitais. Nessa situação, todo o sistema mundial de telecomunicações era calcado na comunicação por voz, de baixa velocidade.

Quando as redes de computadores começaram a se proliferar, nos anos 1980, a velocidade de comunicação aumentou drasticamente a ponto de serem construídas redes específicas para comunicação de computadores. Nos dias de hoje, há um sistema único denominado **RDSI – Rede Digital de Sistemas Integrados** que suporta a comunicação de voz, dados e imagem.

Os principais componentes de um Sistema de Telecomunicações são:

- Terminais
- Canais de Comunicação
- Processadores de Comunicação
- Software de Comunicação.

9.4.1 Redes de comunicação: a inversão de valores

O telégrafo, cuja invenção é atribuída a Samuel Finley Breese Morse, é considerada a primeira tecnologia de comunicação de dados (1835). Foi desenvolvido para enviar telegramas. Para usar, era necessário conhecer o código Morse

(codificação das letras e números em toques sonoros e convertidos para elétricos). A velocidade era limitada pela capacidade de digitação dos usuários.

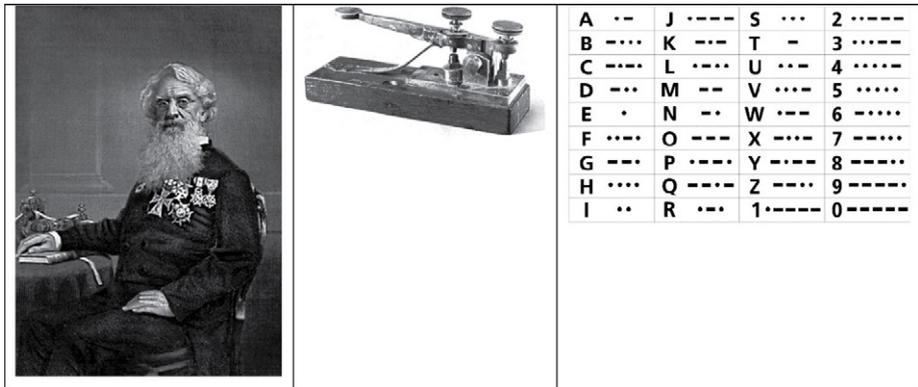


FIGURA 9.3 Samuel Morse, o telégrafo e o código Morse

A comunicação de voz teve em Alexander Graham Bell seu principal nome. Bell é considerado o inventor do telefone. Em 1877, fundou a Bell Telephone. A partir dessa data, o mundo todo instalou cabos e redes para comunicação por voz.

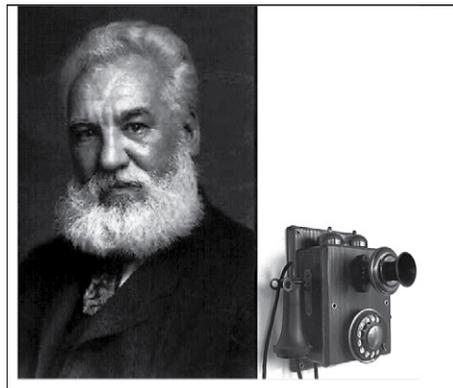


FIGURA 9.4 Alexander Graham Bell e o telefone

Quando chegaram os computadores (anos 1940/50), começaram as experiências de comunicação de dados, entretanto a infraestrutura existente era toda voltada para comunicação de voz, que apenas aos poucos está sendo substituída por estruturas digitais e sem fio.

9.4.2 Componentes e funções de um sistema de comunicação

A voz é enviada por um cabo com um banda passante de 3,3 kHz ou a uma taxa de 8 kbps. Essa velocidade é muito baixa nos dias de hoje para comunicação de dados.

Nas décadas de 1970 e 1980 foram desenvolvidas diversas tecnologias analógicas e digitais que supriram essa necessidade, mas eram muito caras, o que permitia seu uso apenas em situações nas quais o volume de dados compensava o custo. Porém o paradigma era: transmissão de dados em um sistema desenvolvido para voz.

Nos anos 2000, houve a inversão de valores: os sistemas (as centrais telefônicas e outros equipamentos) passaram a ser equipamentos de transmissão de dados. A voz passou a ser transmitida em um sistema de dados (similar ao *VOIP*, Voz Sobre IP). Considerando que uma velocidade típica de uma rede é de 10 ou 100 Mbps, e a velocidade necessária para transmissão de voz é de apenas 8 kbps, uma rede comporta milhares de conversações simultâneas. Por exemplo, uma rede de 10 Mbps comporta $10.000/8 = 1.250$ conversações simultâneas.

9.4.3 Espectro de frequência

Diversos cientistas, como Tesla, Maxwell e Marconi, estudaram as ondas eletromagnéticas e desenvolveram a comunicação sem fio. Ao longo desses mais de cem anos de comunicação sem fio, diversas tecnologias foram desenvolvidas, como o telégrafo, rádio, televisão e satélites, transformando hoje o mundo em um sistema totalmente integrado onde as informações são transmitidas praticamente em tempo real.

O desenvolvimento da tecnologia de comunicação de dados e a sua proliferação permitiram um crescimento geométrico das transmissões de dados em todo o mundo e o casamento entre computadores e comunicação.

Hoje as comunicações são realizadas através de faixas de frequência que foram designadas para diferentes finalidades. As frequências estão divididas em faixas para aplicações específicas. No Brasil, a Anatel é o órgão do governo designado para coordenar e fiscalizar essas utilizações. O **Quadro 9.3** apresenta algumas das faixas e frequências autorizadas pela Anatel, através do **PDDF** (Plano de Destinação das Fixas de Frequências) [ANA2012]. Podem ser observadas as faixas conhecidas de rádio AM, FM, TV UHF e VHF, celulares, Wireless e um exemplo de frequência para uso em comandos de automação, como a utilizada em comandos de portão eletrônico por RF (rádio frequência). Vale ressaltar que a produção e venda de equipamentos que envolvem sistemas de comunicação necessitam de homologação na ANATEL (certificado de conformidade).

A coordenação mundial sobre a utilização do espectro de frequência é realizada pelo ITU – *International Telecommunication Union* (www.itu.int).

9.4.4 Tecnologias sem fio

A comunicação sem fio é um fator-chave para a integração de sistemas. Tradicionalmente, foi utilizada em tecnologias *broadcast* (um para muitos como rádio e TV). Mais recentemente, passou a ser utilizada em redes abertas e de serviços. Ela se popularizou com o crescimento da telefonia celular. O **Quadro 9.4** mostra algumas tecnologias disponíveis.

Quadro 9.3 Algumas faixas do espectro de telecomunicações [ANA2012]

	Mínimo	Máximo	Finalidade
1	8,3 kHz	9 kHz	Auxílio à meteorologia
2	9,0 kHz	14,0 kHz	Radionavegação
3	14 kHz	19,95 kHz	Móvel marítima
4	19,95 kHz	20,05 kHz	Frequência padrão e sinais horários
5	20,05 kHz	160 kHz	Fixo e móvel marítimo
6	535 kHz	1705 kHz	Radiodifusão (ondas médias)
7	1525 kHz	1800 kHz	Radiolocalização e radionavegação aeronáutica
8	1800 kHz	1850 kHz	Radioamador
9	2495 kHz	2505 kHz	Frequências padrão e sinais horários
10	2850 kHz	3155 kHz	Móvel aeronáutica
11	7000 kHz	7100 kHz	Radioamador por satélite
12	21000 kHz	21450 kHz	Radioamador e radioamador por satélite
13	26990 kHz	29700 kHz	Rádio do cidadão
14	30 MHz	300 MHz	Faixa VHF – TV, FM e outros
15	88 MHz	108 MHz	Radiodifusão (FM)
16	300 MHz	3000 MHz	UHF – TV e outros
17	401 MHz	402 MHz	Operação espacial
18	432 MHz	438 MHz	Radioamador - automação
19	806 MHz	890 MHz	Telefonia celular
20	896 MHz	898,5 MHz	Serviço telecomunicações
21	1870 MHz	1880 MHz	Telefonia celular
22	2,401 GHz	2,473	Wireless
23	47 GHz	47,2 GHz	Radioamador por satélite
24	202 GHz	209 GHz	Pesquisa espacial
25	248 GHz	259 GHz	Radioastronomia

Quadro 9.4 Principais tecnologias sem fio

	Tecnologia	Característica	Distância	Velocidade
1	GPRS	canal dados do celular	alcance celular	40 a 170 kbps
2	Bluetooth	conexão periféricos	10 a 100 m	1 a 3 Mbps
3	WiFi	rede sem fio (LAN)	40 a 90 m	11 Mbps
4	WiMax	rede ampla sem fio	50 km	40 Mbps
5	3G	3ª geração celulares	alcance celular	5 a 10 Mbps
6	4G	4ª geração celulares		

Para redes de computação há diversas novas tecnologias emergentes, apresentadas no [Quadro 9.5](#).

9.4.5 Topologia de rede

A topologia de rede é o padrão que descreve como as redes de computadores estão interligadas, tanto do ponto de vista físico, como o lógico.

A topologia física representa como as redes estão conectadas (*layout* físico) e o meio de conexão dos dispositivos de redes (nós). Descreve por onde os cabos passam e onde as estações, os nós, roteadores e *gateways* estão localizados.

Quadro 9.5 Tecnologias sem fio emergentes

Tecnologias sem fio



GPRS (*General Packet Radio Service*)

Utiliza a infraestrutura da telefonia celular existente. Aumenta as taxas de transferência de dados nas redes GSM – *Global System for Mobile Communication*. Permite o transporte de dados por pacotes (Comutação por pacotes). A taxa de transferência de dados 40 Kbps pode chegar a 170 Kbps. O serviço é sempre ativo, o custo é acessível (permite internet móvel em alta velocidade a custo razoável) e o pagamento é feito por quantidade de bytes transferidos.



Bluetooth

Bluetooth

Desenvolvido para estabelecer a comunicação entre periféricos. A velocidade varia de 1 a 3 Mbps. O alcance é de cerca de 10 metros. Utiliza protocolo de baixo custo. Está disseminado em vários equipamentos, tais como computadores, *smartphones*, telefones celulares, mouses, teclados, fones de ouvido, impressoras e outros, utilizando ondas de rádio no lugar de cabos.



WiFi

Utiliza uma rede privada de curto alcance. Usa o conceito de ponto de acesso (apenas repete o sinal para aumentar a cobertura). O roteador é um elemento ativo, que atribui endereços IP e gerencia a sub-rede. Há um padrão de protocolo: IEEE 802.11. O alcance é de 40 a 90m em recintos fechados, ou até 300m em lugares sem nenhum obstáculo. Sua velocidade é de até 11Mbps. Tem capacidade de 10 até 100 pontos de acesso. A segurança se faz com uso de criptografia, que garante privacidade comparável a de redes LAN fixas.

WiMax

Padrão similar ao *WiFi*, com agregação de conhecimentos e recursos mais avançados. Utiliza o padrão IEEE 802.16. Permite atingir velocidades maiores que 1 Gbps. A estrutura de torres de transmissão é similar à dos celulares. O usuário pode instalar um receptor como se fosse um modem externo com uma antena.

3G

Trata-se da terceira geração de celulares com acesso a dados, totalmente digital e com banda mais larga que as gerações anteriores. Apóia os serviços de telefonia e transmissão de dados a longa distância. A taxa de transferência de dados é de 5 a 10 Mbps. O serviço é sempre ativo.

4G

Trata-se da quarta geração de celulares. Permite uma taxa de comunicação entre 100Mbps (em movimento) e 5Gbps (estacionário).

NFC – *Near Field Communication*

Sistema de comunicação de dados de campo próximo, ou seja, permite a comunicação a distâncias muito pequenas, da ordem de alguns centímetros. Essa tecnologia tem por finalidade realizar pagamentos em ônibus, no comércio – enfim, substituir o cartão de crédito – e comandar tarefas pré-programadas gravadas em chips.

A topologia lógica refere-se à maneira como os dados são transmitidos através da rede, sem considerar a interligação física dos dispositivos. Podem ser reconfiguradas dinamicamente através de roteadores e *switches*.

A [Figura 9.5](#) ilustra algumas típicas topologias de rede.

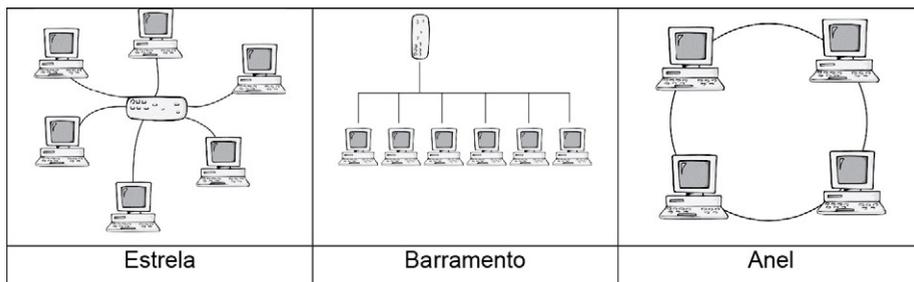


FIGURA 9.5 Algumas topologias de rede

9.5 Protocolo de comunicação

Assim como as pessoas, para se comunicarem, precisam falar a mesma língua, os computadores precisam utilizar o mesmo protocolo para estabelecerem uma comunicação. A língua possui uma estrutura formal com gramática, regras para formação das frases e significados específicos das palavras. Os protocolos de comunicação também possuem estruturas e padrões bem definidos para permitirem a comunicação entre computadores.

Outra comparação interessante seria: por que existem tantas línguas no mundo, não seria melhor que houvesse uma única língua que todos os seres terrestres utilizassem para se comunicar? A tentativa de unificar a língua com a criação do esperanto como língua universal foi frustrada, e o inglês nos dias de hoje virou uma língua padrão de fato e não por projeto, como foi o esperanto. De forma muito similar, pode-se fazer os mesmos questionamentos com relação aos protocolos de comunicação: há uma quantidade muito grande de protocolos, e não há um protocolo único que todos os computadores utilizam para se comunicar. Há também os padrões estabelecidos por entidades de normalização que tiveram pouca disseminação e os padrões de fato criados por empresas que tiveram sucesso e obtiveram um grande número de adeptos.

Outra razão para a existência de diversos protocolos de comunicação é seu desempenho em determinadas situações. Por exemplo, o protocolo TCP/IP (*Transmission Control Protocol - Protocolo de Controle de Transmissão / Internet Protocol – Protocolo Internet*), largamente utilizado na internet, teve como premissa de projeto a garantia de entrega, ou seja, a certeza de que uma vez enviada a mensagem há a certeza de que ela chegue ao destinatário. Só que o preço pago por isso é o tempo, ou seja, no caso de ruídos ou perda de dados, o receptor solicita novamente os dados até que eles cheguem de forma completa e sem erros. Tal característica, por exemplo, não permite o seu uso em aplicações em que o tempo de resposta é crítico.

9.5.1 Um exemplo de protocolo

Para uma melhor compreensão de um protocolo de comunicação, segue um exemplo simples. Para a comunicação entre duas entidades (dois equipamentos

que trocam informações) é necessário – minimamente – que sejam estabelecidos o endereço de origem, o endereço de destino, o conteúdo da mensagem e, normalmente, algum tipo de verificação, conforme ilustrado na [Figura 9.4](#), similar a uma carta que é enviada pelos correios: destinatário, emitente e, internamente, o conteúdo.

Um protocolo de comunicação é organizado para permitir a comunicação de diversos equipamentos. Por essa razão, cada equipamento possui um endereço único dentro dessa rede para poder ser identificado.

Há diversas formas de os equipamentos serem conectados (vide as topologias apresentadas) mas, no momento, pode-se imaginar que todos os equipamentos se conectam em paralelo através de dois fios de tal forma que, em um determinado momento, somente um deles está colocando seus dados na rede (origem) e todos os outros recebendo informações. Através de dois fios é possível receber um bit por vez, e por essa razão é denominado serial. Cada oito bits formam um byte, normalmente a unidade utilizada para a comunicação. O equipamento, que é destino de uma comunicação, recebe o seu conteúdo e, ao final, a verificação. Para exemplificar, a verificação poderia ser a soma de todos os bytes da mensagem. O equipamento recebe a mensagem, soma os bytes e compara com o valor na verificação: se for igual, não houve erro na transmissão; caso contrário, é solicitado um novo envio da mensagem.

Outro aspecto importante na definição de um protocolo é o tamanho da mensagem: há protocolos com tamanhos fixos, e informações com mais ou menos conteúdo são divididas em diversas mensagens. Protocolos com tamanho variável possuem um campo especificando o número de bytes do conteúdo.

O controle pode ser centralizado ou distribuído. Controle centralizado significa que somente um equipamento controla a comunicação em toda a rede. A desvantagem dessa topologia é a perda da comunicação na falha do controlador. A comunicação distribuída significa que, em um determinado instante, um elemento da rede é o controlador, repassando esse controle para outro em um instante seguinte.

9.5.2 Modelo de sete camadas ISO / OSI

A Organização Internacional para a Normalização (*ISO – International Organization for Standardization*) definiu e mantém, a partir de 1984, o **Modelo ISO/OSI** (*Open Systems Interconnection – Interconexão de Sistemas Abertos*), uma arquitetura padrão para facilitar a conectividade entre equipamentos de diferentes fabricantes. Ele padroniza os protocolos de comunicação de computadores.

O Modelo ISO/OSI possui sete camadas (é chamado também de modelo de sete camadas). O principal conceito é o de estratificar as funcionalidades de uma rede de computadores tornando-a tanto quanto possível independente de tecnologia. O [Quadro 9.6](#) apresenta essas camadas.

Quadro 9.6 Modelo ISO/OSI

Modelo ISO/OSI

Camada	Descrição
7 – Aplicação	A camada de aplicação fornece serviços de rede aos usuários finais. Correio, ftp, telnet, DNS, NIS, NFS são exemplos da camada de aplicação.
6 – Apresentação	A XDR – <i>eXternal Data Representation</i> – se situa na camada de Apresentação. Converte a representação local dos dados para os formatos canônicos e vice-versa. O formato canônico usa uma ordem padronizada de bytes e uma convenção de estrutura de empacotamento independente do servidor.
5 – Sessão	A camada de sessão do protocolo define o formato dos dados enviados nas conexões. O NFS usa o <i>Remote Procedure Call</i> (RPC) para seu protocolo de sessão. O RPC pode ser construído tanto no TCP como no UDP, protocolos da camada de Transporte. As sessões de login usam o TCP enquanto o NFS (<i>Network File System</i>) e as mensagens para todos os servidores (broadcast) utilizam o UDP.
4 – Transporte	A camada de transporte subdivide o buffer do usuário em buffers de rede dimensionados em datagramas para forçar o controle desejado de transmissão. Dois protocolos de transporte, <i>Transmission Control Protocol</i> (TCP) e <i>User Datagram Protocol</i> (UDP), situam-se na camada de transporte. A confiabilidade e a velocidade são a diferença preliminar entre esses dois protocolos. O TCP estabelece conexões entre dois servidores na rede através de “conectores” que são determinados pelo endereço IP e pelo número do <i>port</i> . O TCP acompanha a ordem de entrega dos pacotes e aqueles que precisam ser reenviados. Manter essa informação para cada conexão faz do TCP um protocolo de reconhecimento de estado (<i>stateful</i>). O UDP, por outro lado, fornece um serviço de transmissão com pouco <i>overhead</i> , mas com menos verificações de erros. O NFS é construído em cima do UDP por causa de sua velocidade e da falta de reconhecimento de estado (<i>statelessness</i>). A falta de reconhecimento de estado simplifica a recuperação de ruído elétrico.
3 – Rede	O NFS (<i>Network File System</i>) usa o IP (Protocolo Internet) como interface para a camada de rede. O IP é responsável pelo roteamento, direcionando datagramas de uma rede para outra. A camada de rede pode ter de quebrar os datagramas grandes, maiores do que o MTU, em pacotes menores, e o servidor que recebe o pacote terá de remontar o datagrama fragmentado. O protocolo da rede interna identifica cada servidor com um endereço IP de 32 bits. Os endereços IP são escritos como quatro blocos de números separados por ponto cujos valores são decimais entre 0 e 255, por exemplo, 129.79.16.40. Os primeiros 1 a 3 bytes (cabeça) do endereço IP identificam a rede, e os demais bytes identificam o servidor nessa rede. A parcela do endereço IP referente à rede é definida pelo Serviço de Registro InterNIC, a cargo da <i>National Science Foundation</i> (nos Estados Unidos e FAPESP no Brasil), e a parcela do endereço de responsabilidade do servidor IP é atribuída pelos administradores locais da rede. Para redes locais grandes, geralmente são criadas sub-redes, geralmente os primeiros dois bytes representam a parcela da rede do IP, e os terceiros e quartos bytes identificam a sub-rede e o servidor respectivamente. Mesmo que os pacotes do IP sejam dirigidos usando endereços do IP, os endereços do hardware devem ser usados para transportar realmente dados de um servidor a outro. O <i>Address Resolution Protocol</i> (ARP) é usado para mapear o endereço IP para o endereço do hardware.

(Continua)

Quadro 9.6 Modelo ISO/OSI (*cont.*)**Modelo ISO/OSI**

Camada	Descrição
2 – Enlace	<p>A camada de enlace (ou <i>link</i> de dados) define o formato dos dados na rede. Um frame dos dados da rede inclui controle de erro com <i>checksum</i>, o endereço de origem, o endereço de destino e os dados. O maior pacote que pode ser emitido com uma camada de link de dados define o <i>Maximum Transmission Unit</i> (MTU).</p> <p>A camada enlace manipula as conexões físicas e lógicas para o destino do pacote, usando uma interface de rede. Um servidor conectado a uma rede Ethernet teria uma interface do Ethernet para manipular as conexões ao mundo exterior, e uma interface de retorno para enviar pacotes a si mesma (interna à rede). O endereço da Ethernet endereça a um servidor usando um endereço único de 48-bit chamado endereço do Ethernet ou endereço do <i>Media Access Control</i> (MAC), por exemplo: 8:0:20:11:AC:85. Esse número é único e é associado a um dispositivo particular da rede Ethernet. Os servidores com interfaces múltiplas da rede devem usar o mesmo MAC <i>address</i> em cada uma. O cabeçalho do protocolo-específico da camada enlace especifica os MAC <i>addresses</i> da origem e do destino do pacote. Quando um pacote é enviado a todos os servidores (<i>broadcast</i>), um MAC <i>address</i> especial (ff:ff:ff:ff:ff:ff) é utilizado.</p>
1 – Física	<p>A camada física define o cabo ou o meio físico próprio, por exemplo, <i>thinnet</i>, <i>thicknet</i>, pares trançados sem blindagem (UTP). Todos os meios são funcionalmente equivalentes. A diferença principal está na conveniência, no custo da instalação e da manutenção, além das características técnicas de banda passante (ligado à velocidade de comunicação). Os conversores de uma mídia para outra ocorrem nesse nível.</p>

9.5.3 O protocolo de rede TCP/IP

Embora o modelo OSI seja utilizado extensamente e citado frequentemente como um padrão, o protocolo de TCP/IP (*Transmission Control Protocol* – Protocolo de Controle de Transmissão / *Internet Protocol* – Protocolo de Internet) foi usado pela a maioria dos fornecedores de estações de trabalho Unix. TCP/IP foi projetado em torno de um esquema simples de quatro camadas.

O TCP/IP omite algumas características definidas no modelo OSI e também combina as características de algumas camadas adjacentes do modelo OSI.



FIGURA 9.6 Estrutura de um protocolo de comunicação.

9.6 Na prática

Um exemplo utilização da internet em sistemas de automação de processos é o serviço *Honeywell's Loop Scout* (www.loopscout.com) [SAM2006]. Uma assinatura do serviço permite obter dados de processo automaticamente

coletados, comunicados pela Web para um servidor remoto e analisados por algoritmos hospedados nesse servidor (veja Figura 9.7). Os relatórios são liberados para o cliente pela própria Web. Serviços de suporte são também disponibilizados.

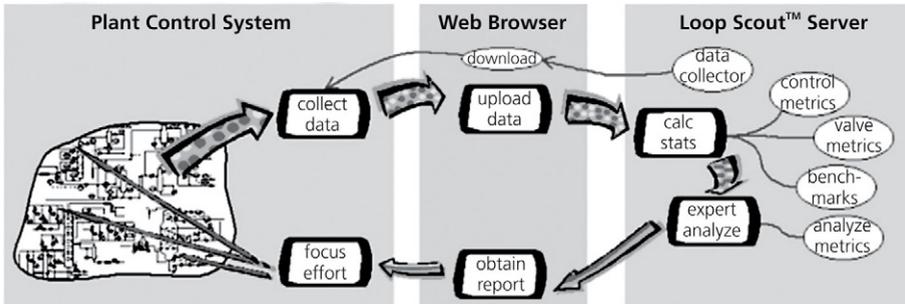


FIGURA 9.7 Fluxo de Informação do serviço Honeywell's Loop Scout [SAM2006].

9.7 Leituras recomendadas

Para maior aprofundamento nos conceitos, métodos e técnicas para concepção hierárquica de sistemas de controle, é recomendada a leitura dos estudos *PQLI Engineering Controls and Automation Strategy*, de Ray Bolton e Steven Tyler [BOL2008], e *Hierarchical Control*, de J. W. Bernard, Theodore J. Williams e Béla G. Lipták, inserido no compêndio **Process control and optimization** [BER2006].

9.8 Exercícios e atividades

- 1. Controle hierárquico.** Escolha uma empresa industrial e uma empresa de serviços que se utilizem de sistemas de automação. Para cada uma delas, identifique as políticas, regras e tecnologias de cada um dos níveis hierárquicos de controle. Analise criticamente essas descobertas e proponha meios de aperfeiçoar o seu alinhamento.
- 2. Protocolos de comunicação.** Faça uma pesquisa sobre as tendências dos protocolos de comunicação e o impacto que devem trazer à sua vida diária.

Referências bibliográficas

[ANA2012] ANATEL - Agência Nacional de Telecomunicações **Plano de Atribuição, Destinação e Distribuição de faixas de frequências no Brasil**. Anatel, 2012. Disponível em: <http://www.anatel.gov.br/Portal/verificaDocumentos/documento.asp?numeroPublicacao=276624&assuntoPublicacao=Plano%20de%20Atribui%20E7%E3o,%20Destina%20e%20Distribui%20E7%E3o%20de%20Faixas%20de%20Frequ%20EAncias%20no%20Brasil%202012.&caminhoRel=null&filtro=1&documentoPath=276624.pdf>. (Acessado em: 20/07/2013.)

- [BER2006] BERNARD, J.W.; WILLIAMS, Theodore J.; LIPTÁK, Béla G. Hierarchical control. In: LIPTÁK Béla G, ed. **Process control and optimization**. CRC Press / ISA Press, 2006:193–204. (Instrument Engineer's Handbook) Disponível em: ftp://ftp.ucauca.edu.co/Facultades/FIET/DEIC/Materias/Instrumentacion%20Industrial/Instrument%20Engineers'%20Handbook,%20Fourth%20Edition,%20Volume%20Two-%20Process%20Control%20and%20Optimization/1081ch2_11.pdf. (Acessado em: 01/12/2012.)
- [BOL2008] BOLTON, Ray; TYLER, Stephen. PQLI engineering controls and automation strategy. **Journal of Pharmaceutical Innovation**. 3(2008):88–94. 10.1007/s12247-008-9031-5. Disponível em: <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs12247-008-9031-5>. (Acessado em: 01/12/2012.)
- [CUC2009] CUCINOTTA, Tommaso; MANCINA, Antonio; ANASTASI, Gaetano F; LIPARI, Giuseppe; MANGERUCA, Leonardo; CHECCOZZO, Roberto; RUSINÀ, Fulvio. A real-time Service-Oriented Architecture for industrial automation. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**. 5(August 2009)(3). Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5173504>. (Acessado em: 01/12/2012.)
- [JAM2005] JAMMES, François; SMIT, Harm. Service-oriented paradigms in industrial automation. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**. 1(February 2005)(1). Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1411764>. (Acessado em: 01/12/2012.)
- [NBR2009] NBR ISO/IEC 15288:2009 **Engenharia de sistemas e software — Processos de ciclo de vida de sistema**. Norma ABNT, 2009.
- [NIC2005] NICKULL, Duane. **Service Oriented Architecture**. Adobe Systems Incorporated, 2005. Disponível em: http://www.adobe.com/jp/enterprise/pdfs/Services_Oriented_Architecture_from_Adobe.pdf. (Acessado em: 01/12/2012.)
- [PHA2010] PHAITHOONBUATHONG, Punnuluk; MONFARED, Radmehr; KIRKHAM, Thomas; HARRISON, Robert; WEST, Andrew. Web services-based automation for the control and monitoring of production systems. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**. 23(2010)(2):126–145. DOI: 10.1080/09511920903440313. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/09511920903440313>.
- [SAM2006] SAMAD, Tariq; McLAUGHLIN, Paul; LU, Joseph. System architecture for process automation: review and trends. *ADCHEM 2006 International Symposium on Advanced Control of Chemical Processes*; 2006 Gramado, Brazil. April 2-5, 2006. **Anais. IFAC**. Disponível em: http://www.nt.ntnu.no/users/skoge/prost/proceedings/adchem06/PDF_Files/P1_ADCHEM06_219.pdf.
- [SAU2010] SAUTER, Thilo. The three generations of field-level networks — evolution and compatibility issues. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**. 57(November 2010)(11).
- [WIL1983] WILLIAMS, Theodore J. **Hierarchical distributed control: progress and needs**. **InTech**, Mar 1983.

Gestão de sistemas de automação

SUMÁRIO

10.1	Miniglossário	290
10.2	Estratégia de automação	290
10.3	Gestão de projetos de automação	292
10.3.1	Atividades de gestão de projetos de automação.....	292
10.3.2	Planejamento e gerência de projeto	293
10.3.3	Gestão da aquisição	294
10.3.4	Gestão da qualidade	295
10.3.5	Gestão da configuração.....	296
10.3.6	Gestão da inovação tecnológica	297
10.4	Gestão de operações de sistemas automatizados	298
10.4.1	Atividades de gestão de operações de sistemas automatizados.....	299
10.4.2	Gestão de apoio à produção	299
10.4.3	Gestão da qualidade e da produtividade	300
10.4.4	Gestão da manutenção.....	300
10.4.5	Gestão da segurança.....	302
10.5	Na prática.....	302
10.6	Leituras recomendadas	303
10.7	Exercícios e atividades	303

Este capítulo apresenta os conceitos, as atividades e os critérios para a gestão de sistemas de automação.

AO TÉRMINO DA LEITURA DESTE CAPÍTULO VOCÊ ESTARÁ APTO PARA PREPARAR E REALIZAR AS SEGUINTEs ATIVIDADES TÍPICAS DA GESTÃO DE SISTEMAS DE AUTOMAÇÃO:

- definir a estratégia e a política de automação de uma organização;
- planejar e gerenciar projetos de automação;
- planejar e gerenciar operações de sistemas automatizados.

10.1 Miniglossário

Estratégia de automação. Definição de objetivos organizacionais para a automação; um plano de ação de longo prazo para a automação na organização, alinhado com a estratégia organizacional.

Gestão da inovação tecnológica da automação. Planejamento e gerência das tarefas voltadas para a inovação e a evolução das tecnologias utilizadas na automação.

Gestão da manutenção da automação. Planejamento e gerência das atividades rotineiras voltadas para garantir a disponibilidade e a qualidade das operações automatizadas.

Gestão da qualidade e da produtividade da automação. Planejamento e gerência das tarefas voltadas para a avaliação, prevenção e melhoria da qualidade e da produtividade em processos produtivos.

Gestão da segurança da automação. Planejamento e gerência das tarefas voltadas para garantir o alinhamento da segurança dos sistemas de automação com os objetivos da produção e do negócio.

Gestão de aquisição da automação. Planejamento e gerência das tarefas de decisão, planejamento, execução e monitoração de aquisições em projetos de automação.

Gestão de configuração. Planejamento e gerência das tarefas voltadas para estabelecer e manter a integridade dos produtos gerados durante todo o processo de projeto.

Operação. Esforço contínuo e repetitivo.

Política de automação. Documento que explicita as intenções e diretrizes globais da organização relativas a automação.

Projeto. Esforço temporário e único empreendido para criar um produto, serviço ou resultado exclusivo.

10.2 Estratégia de automação

Todas as atividades de gestão da automação necessitam de uma direção. Essa direção é dada pela definição da **Estratégia de Automação**. Ela estabelece objetivos organizacionais para a automação e um plano de ação de longo prazo para a automação na organização, alinhado com a estratégia organizacional:

- Análise da necessidade e da viabilidade econômica da automação
- Estabelecimento de objetivos e justificativas para a automação, podendo envolver os seguintes pontos, ou parte deles [GRO2001, SEL2008]:
 - aumento da produtividade;
 - redução do custo da produção;
 - mitigação do efeito da falta de mão de obra especializada;
 - redução ou eliminação de rotinas humanas consideradas chatas, cansativas e possivelmente irritantes;

- aumento da segurança (*safety*) dos trabalhadores;
- melhoria da qualidade do produto e da produção;
- redução do tempo de ciclo da produção;
- realização de tarefas que não podem ser manuais;
- atendimento a exigências do ambiente competitivo.

A tendência majoritária dos sistemas de automação é a redução de custo e aumento da qualidade, levando a uma automação mais abrangente (“*big brother*”) que supervisiona os equipamentos de automação, prevenindo e identificando imediatamente falhas de funcionamento. O controle de processos tende a ser online com novas tecnologias que permitem virtualmente realizar medições de qualquer grandeza em tempo real durante a execução dos processos.

A estratégia se baseia em um conjunto de princípios norteadores também estabelecidos para longo prazo, podendo ser aperfeiçoados, refinados ou mesmo alterados periodicamente. Esses princípios estão descritos na **Política de Automação**, um documento que explicita as intenções e diretrizes globais da organização relativas a automação. A Política de Automação é consistente com a política geral da organização. Fornece uma estrutura para estabelecimento dos objetivos da automação que irão nortear os novos projetos de automação e a gestão das operações de sistemas automatizados.

Para elaboração da Política de Automação, podem ser considerados os seguintes aspectos, entre outros:

- Diretrizes gerais que orientam a produção e a automação.
- Diretrizes para decisões comprar ou fazer (“*make or buy*”). Se o sistema de automação é um diferencial competitivo, deve ser considerada a alternativa de desenvolvimento próprio. Levar em conta as alternativas de aquisição de sistemas padronizados *versus* sistemas dedicados (definição da estratégia).
- Diretrizes para o tratamento da relação entre automação e mão de obra (em geral, a automação leva à substituição de mão de obra menos qualificada por profissionais capacitados para programar, operar e manter os sistemas de automação). Entre essas diretrizes, podem ser considerados:
 - a política de demissão/não demissão (nas grandes organizações costuma ser explícita a requalificação e, por vezes, a busca ativa de recolocação em outras empresas, em parceria com sindicatos);
 - a preparação e capacitação de profissionais para as mudanças no ambiente de produção e o atendimento a novas demandas;
 - o aumento ou a melhoria da produção com a mesma equipe;
 - a proteção dos profissionais contra atividades perigosas, prejudiciais ou repetitivas (os sistemas automatizados podem contribuir para redução desse tipo de atividade humana, mas pode, por outro lado,

levar a outras atividades repetitivas, conduzidas pelo computador – “*computer driven work*”).

- Diretrizes para a seleção tecnológica e a gestão da inovação tecnológica (envolve a definição de arquiteturas de sistema, padrões e normas para os projetos e operações) [ISO2011].
- Diretrizes específicas para os projetos de novos sistemas de automação e de reformas dos sistemas atuais.
- Diretrizes para a integração de sistemas (evitar que novos sistemas fiquem isolados dos demais).
- Diretrizes específicas para a operação de sistemas automatizados.

A estratégia da automação e a Política de Automação estabelecem as bases para as várias atividades de automação. Os tópicos a seguir apresentam roteiros para essas atividades, divididas em dois grupos: projetos e operações.

10.3 Gestão de projetos de automação

Projeto é um esforço temporário e único empreendido para criar um produto, serviço ou resultado exclusivo [PMI2013].

Um projeto de automação é um empreendimento voltado para o desenvolvimento ou a implantação de novos sistemas ou para a renovação de sistemas existentes. São exemplos de projetos de novos sistemas de automação:

- Desenvolvimento de sistemas (concepção, especificação, design, construção, verificação, validação).
- Integração de sistemas.
- Implantação de sistemas (instalação, disponibilização, preparação de pessoal).

Constituem exemplos de projetos de reformas de sistemas já existentes:

- Melhoria da qualidade ou da produtividade.
- Expansão, aumento da capacidade.
- Atualização tecnológica.
- Desativação de sistemas.

Este tópico apresenta um roteiro para a gestão de projetos de automação. O roteiro se baseia essencialmente em dois modelos de referência: o **Capability Maturity Model (CMMI)** [SEI2010], desenvolvido pelo Software Engineering Institute (SEI) e **A guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBok)** [PMI2013], desenvolvido pelo Project Management Institute (PMI).

10.3.1 Atividades de gestão de projetos de automação

A gestão de projetos de automação envolve as seguintes atividades principais:

- Planejamento e gerência do projeto.
- Gestão de aquisição.

- Gestão da qualidade.
- Gestão da configuração.
- Gestão da inovação tecnológica.

As práticas e os critérios a considerar nessas atividades estão descritos a seguir.

10.3.2 Planejamento e gerência de projeto

O objetivo da atividade **Planejamento e Gerência de Projeto** é estabelecer planos para os projetos de sistemas de automação e fornecer visibilidade do progresso real deles, de maneira que possam ser tomadas ações efetivas nos casos de desvios em relação aos planos.

As tarefas envolvidas nessa atividade são:

- Estabelecimento de infraestrutura para planejamento e gerência: processos, recursos humanos, responsabilidades, estrutura física, equipamentos, ferramentas e métodos.
- Estabelecimento dos objetivos da produção e do projeto de automação.
- Estudos do impacto social e conscientização das pessoas envolvidas nos diversos níveis.
- Estudos de viabilidade técnico-econômica, com estimativas de investimento e análise do Retorno sobre o Investimento (*ROI – Return on Investment*). Análise do custo-benefício do processo atual para o automatizado (tratar a automação como um investimento) [SEL2008].
- Detalhamento das atividades do projeto. Desenvolvimento de uma Estrutura Analítica de Projeto (*WBS – Work Breakdown Structure*).
- Estimativas de esforço, recursos e custos para engenharia e administração do projeto.
- Definição do cronograma.
- Responsabilidades para as várias etapas do projeto.
- Definição das atividades de comunicação.
- Identificação e avaliação de riscos. Estabelecimento de planos para mitigação.
- Desenvolvimento do **Plano de Projeto de Automação**, documento que consolida as várias decisões do planejamento. Envolvimento dos *stakeholders*.
- Gerência de projeto. Monitoração e controle das atividades. Registro das atividades. Medições gerenciais. Análise de *status* e decisão.
- Ajustes do plano. Envolvimento dos *stakeholders*.
- Avaliação das atividades de planejamento e gerência de projeto. Registro, análise e disponibilização das lições aprendidas.

Os principais resultados dessa atividade são o **Plano de Projeto de Automação**, os ajustes do plano, as medições e os registros de gerência do projeto.

10.3.3 Gestão da aquisição

O objetivo da atividade **Gestão da Aquisição** é planejar e gerenciar as tarefas de decisão, planejamento, execução e monitoração de aquisições de sistemas, subsistemas, equipamentos e serviços em projetos de automação.

As tarefas típicas estão apresentadas a seguir:

- Estabelecimento de infraestrutura para planejamento e gerência da aquisição: processos, recursos humanos, responsabilidades, estrutura física, equipamentos, energia, ferramentas e métodos.
- Identificação de necessidade de aquisição. Decisões “*make or buy*”. Avaliar as alternativas considerando aspectos gerenciais, econômicos e técnicos. Uma alternativa é a aquisição de pacote completo (“*turn key*”). Geralmente são terceirizadas as atividades consideradas “*commodities*”. Considerar na análise os resultados (técnicos e econômicos) esperados em cada alternativa e confrontar com os custos totais previstos (*TCO – Total Cost Ownership*), que consideram o valor econômico do investimento, os custos diretos e indiretos de aquisição e os gastos com manutenção.
- Planejamento das aquisições do projeto. Estimativas de custos e prazos. Detalhamento da análise de riscos.
- Especificação dos requisitos dos sistemas, subsistemas, componentes, equipamentos e serviços a serem adquiridos. (Veja o Capítulo 8)
- Estabelecimento de contratos de aquisição.
- Seleção de fornecedores, considerando aspectos como número reduzido de fornecedores, histórico demonstrado (fornecedores consolidados), relacionamento de longo prazo, capacidade técnica (demonstrada em fornecimentos anteriores), capacidade para fornecimento de peças de reposição e serviços de assistência técnica e suporte no local (cuidado especial com aquisições de produtos e serviços importados por causa de peças de reposição e facilidade de assistência técnica), capacidade para expansões e aperfeiçoamentos, solidez financeira e robustez das empresas (ou do grupo).
- Planejamento específico de cada aquisição, gerando os **Planos de Aquisição**. Estabelecimento e formalização de acordos com os fornecedores. Formalização de **Contratos de Aquisição**.
- Realização das aquisições, com base nos **Planos e Contratos de Aquisição**. Monitoração e controle dos requisitos e acordos.
- Verificações e validações integradas. Avaliação dos produtos e serviços adquiridos (verificações, testes, ensaios, análise de documentos). Inclui o acompanhamento da implantação dos componentes adquiridos, com foco na integração com o processo produtivo e com os demais componentes do sistema de automação. Registro de problemas e monitoração de sua solução.

- Avaliações das aquisições, considerando os requisitos e os acordos estabelecidos.
- Avaliação dos fornecedores, considerando qualidade do fornecimento e cumprimento dos acordos.
- Avaliação das atividades de aquisição. Registro, análise e disponibilização das lições aprendidas.

A gestão da aquisição é de grande importância para os projetos de automação, pois é muito comum a necessidade de adquirir as soluções, já que a automação não constitui, em geral, o principal negócio da organização que pretende automatizar seus processos. Daí a necessidade de a contratante estabelecer claramente as políticas e os procedimentos para essa atividade, com base nas diretrizes aqui propostas.

10.3.4 Gestão da qualidade

O objetivo da atividade **Gestão da Qualidade** é planejar e gerenciar as tarefas voltadas para estabelecer visibilidade sobre a qualidade dos processos e dos produtos de trabalho gerados no projeto.

As tarefas típicas são as seguintes:

- Estabelecimento de infraestrutura para gestão da qualidade: processos, recursos humanos, responsabilidades, estrutura física, equipamentos, ferramentas e métodos.
- Estabelecimento dos objetivos da qualidade do projeto, com visão sistêmica, baseada nos objetivos do processo produtivo e do sistema de automação.
- Planejamento das atividades de gestão da qualidade do projeto, gerando o **Plano da Qualidade**. Inclui a identificação de produtos de trabalho e processos a serem avaliados, o cronograma de avaliações e as responsabilidades. As atividades de garantia da qualidade devem ser realizadas por pessoas ou equipes independentes dos desenvolvedores e fornecedores, com domínio do processo produtivo e seus objetivos.
- Realização das atividades de gestão da qualidade. Monitoração e controle, com base no Plano da Qualidade. Registro de resultados das avaliações, incluindo não conformidades (de produtos e processos) observadas. Análise de riscos ao sistema integrado inerentes às não conformidades.
- Comunicação dos resultados de gestão da qualidade. Monitoração de não conformidades até a sua solução final.
- Avaliação das atividades de gestão da qualidade. Registro, análise e disponibilização das lições aprendidas.

A gestão da qualidade acompanha todo o projeto de automação e cria condições para que os objetivos do projeto sejam efetivamente alcançados.

Como exemplo de indicadores da qualidade pode-se obter informações como MTBF (*Mean Time Between Failures*), tempo médio entre falhas dos sistemas de automação, MTTR (*Mean Time to Repair*), tempos de parada decorrentes das falhas, classificação das falhas ocorridas por gravidade, número de não conformidades ocorridas no sistema de automação, entre outras.

10.3.5 Gestão da configuração

O objetivo da atividade **Gestão da Configuração** é planejar e gerenciar as tarefas voltadas para estabelecer e manter a integridade dos produtos gerados durante todo o processo de projeto. Inclui a identificação, a caracterização e o controle dos itens do sistema. Devido à forte interação e interdependência entre os itens de hardware e software dos sistemas de automação, sua identificação e controle são feitos de forma a manter a consistência e integração entre eles e destes com os componentes do sistema produtivo.

As tarefas típicas são as seguintes:

- Estabelecimento de infraestrutura para gestão da configuração: processos, recursos humanos, responsabilidades, estrutura física, equipamentos, ferramentas e métodos.
- Escolha do método de gerência de configuração a ser adotado (critérios para identificação e caracterização de itens, momento em que os itens são colocados sob controle, nível de formalismo requerido, critérios para armazenamento na biblioteca, ferramentas utilizadas).
- Identificação dos produtos de trabalho a serem colocados sob gerência de configuração (itens de configuração), de acordo com o método de gerência de configuração estabelecido.
- Planejamento das atividades de gestão da configuração do projeto, gerando o **Plano de Configuração**, que inclui o cronograma de configurações básicas (*baselines*) e liberações, assim como as responsabilidades.
- Manutenção de repositório de configurações, que contém os itens de configuração armazenáveis em computador (documentos, códigos de software, desenhos informatizados de projetos de hardware etc.), os registros associados a todos os itens e a matriz de rastreabilidade entre sistema, subsistemas e componentes e entre esses elementos e os requisitos.
- Controle e disponibilização dos itens de configuração. Registros. Exemplo: a substituição de uma peça por outra equivalente, mas não idêntica, deve levar em conta que impactos essa nova peça pode causar no sistema em termos de compatibilidade com os demais itens de configuração do sistema para que não haja risco de parada de produção.
- Auditorias de configuração – avaliam as configurações básicas (*baselines*), o ambiente e os processos adotados. Essa tarefa é fundamental para

a integridade do sistema em desenvolvimento e deve ser realizada por pessoas ou grupos independentes em relação a essa atividade de projeto.

- Comunicação das tarefas e resultados de gerência de configuração, garantindo clareza e conhecimento de todos os envolvidos – inclusive profissionais do processo produtivo interessados no projeto de automação – em relação à situação dos produtos e seus componentes. Essa comunicação é necessária sobretudo em eventos de mudança, sendo dirigida a desenvolvedores, clientes e outros grupos envolvidos.
- Avaliação das atividades de gestão da configuração. Registro, análise e disponibilização das lições aprendidas.

A gestão da configuração acompanha todo o projeto de automação e tem o relevante papel de garantir a integridade do sistema completo, envolvendo processo produtivo e os elementos do sistema de automação.

10.3.6 Gestão da inovação tecnológica

O objetivo da atividade **Gestão da Inovação Tecnológica** é planejar e gerenciar as tarefas voltadas para a inovação e a evolução das tecnologias utilizadas na automação.

As tarefas típicas são as seguintes:

- Estabelecimento de infraestrutura para gestão da inovação tecnológica: processos, recursos humanos, responsabilidades, estrutura física, equipamentos, ferramentas e métodos.
- Decisão inovar ou manter. As tecnologias de ponta são tipicamente mais avançadas, permitem novas funcionalidades e características e assim melhoram a qualidade e o desempenho do sistema. Por outro lado, oferecem maiores riscos. Já as tecnologias consolidadas oferecem como vantagens o menor número de defeitos e o menor custo, mas levam à obsolescência dos sistemas.
- Análise do ciclo de vida potencial do processo (que considera o ciclo de vida dos equipamentos de processo) e do sistema de automação. Um cuidado a tomar na escolha da tecnologia dos sistemas de automação é a diferença entre o ciclo de vida do sistema produtivo (20 anos ou mais) e o do sistema de automação (tipicamente 5 anos). Exemplo: um alto-forno dura 30 anos ou mais e seu sistema de automação tem uma duração bem menor. Neste caso, a cada sete anos o alto-forno é desativado para manutenção e nessas ocasiões aproveita-se para modernizar a automação.
- Descrição e gestão da arquitetura do sistema. A arquitetura de sistema é definida como o conjunto de conceitos fundamentais de um sistema no seu ambiente incorporados nos seus elementos, relacionamentos e nos princípios de seu *design* e evolução. Ela estabelece uma estrutura tecnológica de referência para todo o desenvolvimento e as condições

técnicas para a inclusão e a integração de componentes. A descrição da arquitetura pode ser feita com uso da linguagem *ADL (Architecture Description Language)* [ISO2011]. As inovações tecnológicas dos projetos devem ser prioritariamente expressas na descrição da arquitetura de sistema.

- Identificação dos padrões e normas que servem de referência tecnológica para o projeto. Esses padrões estão vinculados tanto ao processo produtivo e quanto ao sistema de automação.
- Avaliação das atividades de gestão da inovação tecnológica. Registro, análise e disponibilização das lições aprendidas.

A gestão da inovação tecnológica de projetos de automação tem impactos técnicos (sobre o desempenho do sistema de automação) e econômicos (sua decisão no tempo certo pode levar a maiores lucros e melhores resultados).

10.4 Gestão de operações de sistemas automatizados

Operação é um esforço contínuo e repetitivo. As operações produtivas automatizadas requerem um esforço de gestão para que os objetivos da produção sejam continuamente atingidos, as melhorias e os ajustes contínuos do processo de produção possam ser implementados e, assim, o cliente tenha contínua satisfação.

Esta seção apresenta um roteiro para a gestão de operações de sistemas automatizados. O roteiro se baseia essencialmente em um modelo de referência, o **ITIL** (*The Information Technology Infrastructure Library*), oferecendo uma visão de serviços às operações. Aspectos típicos e específicos de operações de automação são também incluídos. O ITIL é um modelo público que descreve as melhores práticas na gestão de serviços de TI. Fornece uma estrutura de governança de TI (“*service wrap*”) e focaliza na medição e melhoria contínua da qualidade do serviço de TI liberado, considerando as perspectivas de negócio e de cliente. [CAR2007]

São exemplos de operações de sistemas automatizados:

- as operações automatizadas propriamente ditas, que apoiam o processo produtivo e as várias atividades produtivas rotineiras;
- os serviços de apoio às operações automatizadas, como configuração, mudanças de programação, análise de decisão, suporte e manutenção.

Essas operações devem atender a um conjunto de critérios de desempenho especificados, relativos a disponibilidade, confiabilidade e segurança. Uma operação mal planejada ou realizada pode causar problemas sérios para a operação e comprometer os resultados e a imagem da empresa.

10.4.1 Atividades de gestão de operações de sistemas automatizados

A gestão das operações de sistemas automatizados envolve as seguintes atividades principais:

- Gestão de apoio à produção
- Gestão da qualidade e da produtividade
- Gestão da manutenção
- Gestão da segurança (*security, safety*)

As práticas e os critérios a considerar nessas atividades estão descritos a seguir.

10.4.2 Gestão de apoio à produção

O apoio à produção constitui-se na mais sistemática operação em ambientes automatizados. O apoio à produção deve operar como uma estrutura de serviços. A gestão desta atividade deve estar integrada com a gestão da produção e envolve as seguintes tarefas principais:

- Estabelecimento de infraestrutura para gestão do apoio à produção: processos, recursos humanos, responsabilidades, estrutura física, equipamentos, ferramentas e métodos. Para a realização dessa atividade é necessário estabelecer uma equipe técnica preparada e disponível. A localização física da equipe de automação geralmente é na própria área industrial, mas pode, alternativamente, estar fora dessa área, junto com outras equipes de TI (sistemas de informação, telecomunicações e redes). Essas duas alternativas estão esquematizadas na [Figura 10.1](#).

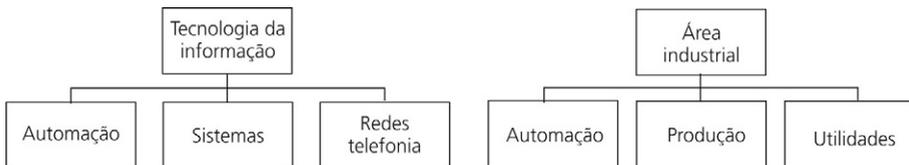


FIGURA 10.1 Localização física da equipe de automação: (a) na área de TI; (b) na área industrial.

- Gestão da demanda e da capacidade, envolvendo:
 - Planejamento da demanda e da capacidade. Previsão de demanda.
 - Análise e decisão sobre novas demandas.
 - Registro de demandas. Abertura de ordens de serviços. Monitoração e controle dos serviços demandados.
- Estabelecimento e gestão de indicadores de desempenho do serviço, como tempo de atendimento e outros.

- Treinamento e suporte para as equipes de produção, de atendimento à produção e de suporte de automação.
- Avaliação das atividades de gestão do apoio à produção. Registro, análise e disponibilização das lições aprendidas.

Na maioria dos processos industriais e de serviços, espera-se da automação que não haja novidades no dia a dia, ou seja, que rotineiramente se obtenha o desempenho previsto para as operações (“*no news good news*”). Esse é um objetivo importante a ser buscado pela gestão do apoio à produção.

10.4.3 Gestão da qualidade e da produtividade

A qualidade e a produtividade – na operação dos sistemas de produção como um todo e, em particular, dos sistemas de automação – são planejadas e gerenciadas.

A gestão da qualidade e da produtividade envolve:

- Estabelecimento de indicadores e metas de qualidade e produtividade do processo de produção automatizada.
- Avaliação da qualidade do mesmo processo (uso de indicadores de qualidade e de auditorias).
- Avaliação da produtividade do mesmo processo (uso de indicadores de eficiência e produtividade).
- Análise de causas de problemas e de não conformidades.
- Melhorias de processo, envolvendo correções e atualizações.

10.4.4 Gestão da manutenção

A manutenção é uma atividade rotineira necessária para garantir a disponibilidade e a qualidade das operações automatizadas. Tem também importância para busca de maior vida útil para os equipamentos.

Há três tipos de manutenção: corretiva, preventiva e de aperfeiçoamento.

A **manutenção corretiva** está voltada para modificações nos sistemas (hardware, software, mecânica) como resposta a falhas observadas. Em princípio, deve sempre ser seguido o lema: a produção não pode parar. Para a manutenção corretiva, a empresa deve ter uma equipe de plantão, com escala de serviço para garantir o atendimento em tempos compatíveis com a operação.

Uma atividade fundamental na gestão da manutenção é o tratamento de falhas. A equipe de manutenção deve garantir que as falhas sejam registradas, suas causas analisadas e as ações corretivas sejam tomadas. As falhas podem ocorrer em:

- equipamentos eletrônicos, causadas por temperatura alta de operação, que provoca avalanche térmica (*thermal runaway*), um fenômeno

que aumenta as correntes nos dispositivos semicondutores em um processo de realimentação positiva até queimar; excesso de ligamentos/desligamentos; mau contato, tipicamente causado por escolha de conectores e outros tipos de contato sem acabamento de boa qualidade (banhado a ouro por exemplo); acúmulo de pó, que causa a diminuição do fluxo de calor, aumentando a temperatura de operação; corrosão de placas e circuitos por agentes químicos etc.);

- equipamentos mecânicos (sobretudo devido a desgaste natural das peças móveis, exigindo troca de rolamentos ou buchas ou mesmo lubrificação);
- software (neste caso, os erros geradores são intrínsecos aos programas instalados – não são consequência de desgaste, como no hardware e mecânica – devendo ser corrigidos ou substituídos para garantir a operação normal; a correção pode ser necessária em programas de controle e gestão, que rodam em computadores e PLCs, ou em programas gravados diretamente no hardware de um equipamento eletrônico, identificados como *firmware*).

A **Análise das Falhas** busca identificar as suas causas e, dessa forma, orientar as soluções necessárias para que sejam corrigidas e, preferencialmente, não voltem a ocorrer. Uma técnica útil para essa atividade é o diagrama de Ishikawa [HEN2011]. Ambiente hostil de operação (temperatura elevada, poeira, agentes químicos etc.) e falha operacional (por falta de qualificação, problemas no sistema ou mesmo fraudes provocadas) são causas típicas de falhas, além das já citadas no parágrafo anterior.

A **Manutenção Preventiva** tem como foco a avaliação do estado do sistema e possível troca de componentes (que podem, também nesse caso, ser de hardware, software e/ou mecânica). A necessidade de redução de custo é também um fator de motivação para a manutenção preventiva. Paradas programadas da operação são comuns nas organizações para permitir revisão dos equipamentos produtivos e troca de peças com defeito ou no final de sua vida útil.

Uma atividade de prevenção é a calibração sistemática de instrumentação. Os equipamentos que realizam medições no processo precisam ser periodicamente calibrados para garantir que as medidas realizadas estão dentro dos padrões estabelecidos. É relevante conhecer o MTBF (*Mean Time Between Failure*) dos equipamentos, geralmente fornecido pelos fabricantes, o número de horas de funcionamento e o MTBF real nas condições de operação da empresa. É também fundamental seguir as recomendações dos fabricantes para evitar falhas e degeneração dos equipamentos: lubrificação, troca de óleo, troca de peças recomendadas, pintura e manutenção de acabamento das peças etc.

A **Manutenção de Aperfeiçoamento** tem como foco a melhoria dos sistemas de automação, criando novas funcionalidades de forma a melhorar o funcionamento do sistema como um todo. Podem ser melhorias que

incluem medidas de novas grandezas, que implicam na instalação de mais instrumentação e software ou mesmo melhorias de algoritmos com melhor desempenho, que implicam somente em alterações de software. Todas essas alterações devem ser documentadas corretamente de forma a manter consistência no sistema de gestão da configuração.

Do ponto de vista de planejamento das atividades de manutenção, é necessário também considerar dois pontos sensíveis:

- **Peças de reposição:** é necessário planejar os estoques de peças de acordo com a demanda de serviços. Para evitar demora na solução de problemas, as peças de reposição devem estar na empresa à disposição em função da probabilidade de ocorrência de falha. Normalmente os fornecedores sugerem uma lista de peças de reposição.
- **Localização geográfica:** algumas empresas ficam muito isoladas, o que faz com que qualquer necessidade de peças ou de especialistas exija um tempo longo de deslocamento para chegar até o local (o que potencialmente aumenta o tempo de reparo – MTTR). As empresas localizadas perto de grandes centros podem terceirizar muitas atividades e obter compromisso de peças de reposição estarem à disposição em seus fornecedores. As que estão mais distantes devem planejar e implementar soluções para minimizar esse problema.

10.4.5 Gestão da segurança

Os conceitos de segurança aplicáveis à operação de sistemas automatizados estão definidos no Capítulo 8, que trata do desenvolvimento desses sistemas.

A gestão da segurança de operações automatizadas tem por objetivo alinhar essa segurança com a da produção e do negócio. É necessário garantir disponibilidade, confidencialidade, integridade e autenticidade em todos os serviços nos padrões especificados, como discutido no Capítulo 8 [CAR2007].

A gestão da segurança nessas operações tem, como principal atividade, a gestão de riscos de segurança: sistematicamente identificar, avaliar e tratar esses riscos.

10.5 Na prática

Entre as práticas de planejamento de projetos de automação, a **Identificação de Riscos** é uma das mais complexas, pois eles dependem de características específicas dos processos, dos sistemas e das pessoas envolvidas, entre elas os usuários dos sistemas. Um estudo desenvolvido por pesquisadores dos Estados Unidos e do Canadá analisou o impacto do envolvimento de usuários na identificação e gestão de riscos em sistemas de informação, resultado válido também para sistemas de automação. Entre outros resultados, o estudo mostra que essa prática leva a maior engajamento dos usuários nas atividades voltadas para segurança dos sistemas [SPE2010].

10.6 Leituras recomendadas

Um interessante estudo foi realizado por Wesley A. Olson (Air Command and Staff College, Maxwell Air Force Base) e Nadine B. Sarter (The Ohio State University, Department of Industrial, Welding, and Systems Engineering) [OLS2000]. Analisa as preferências de pilotos e as suas experiências com três estratégias diferentes: gestão por consenso, gestão por exceção e automação total. É muito instrutivo compreender como usuários de sistemas tão sofisticados veem e reagem aos sistemas de automação. Há uma atividade proposta sobre esse estudo na seção 10.7, Exercícios e atividades.

As dificuldades para alinhar as decisões de automação com as estratégias de manufatura são estudadas por Veronica Lindström (Department of Management and Engineering, Production Economics, Linköping University, Sweden) e Mats Winroth (Department of Technology Management and Economics, Chalmers University, Sweden) [LIN2010].

A gestão da automação em pequenas empresas – com foco em recursos – é objeto de um estudo realizado por pesquisadores da Universidade Federal de Pernambuco [SAN1999].

10.7 Exercícios e atividades

1. Defina, com suas próprias palavras:
 - a. Gestão da automação
 - b. Gestão de projetos de automação
 - c. Gestão de operações de automação
2. Aponte pelo menos três questões críticas a serem resolvidas no planejamento e na gestão de um projeto de sistema de automação. Exemplifique para o caso de uma montadora de automóveis.
3. Para a operação de sistemas de automação, aponte pelo menos três pontos críticos a serem gerenciados. Exemplifique para o caso de uma empresa de serviços que atua no varejo.
4. Leia o artigo “Automation Management Strategies: Pilot Preferences and Operational Experiences” (Disponível em: <http://frontpage.okstate.edu/coe/toddhubbard/Courses/AVED%205020/Automation%20Management.pdf>) e analise criticamente as preferências dos pilotos relatadas no artigo.

Referências bibliográficas

- [CAR2007] CARTLIDGE Alison, LILLYCROP Mark, eds. **An introductory overview of ITIL® V3**. The UK Chapter of the ITSME, 2007. Disponível em: http://www.best-management-practice.com/gempdf/itsmf_an_introduutory_overview_of_itil_v3.pdf. (Acessado em: 01/12/2012.)
- [GRO2001] GROOVER, Mikell P. **Automation, production systems, and computer-integrated manufacturing**. Prentice Hall: New Jersey, 2001. Disponível em:

<http://pt.scribd.com/doc/51698181/8/Ten-strategies-for-automation>. (Acessado em: 01/12/2012.)

- [HEN2011] HENSLEY, Rhonda L.; UTLEY, Joanne S. Using reliability tools in service operations. **International Journal of Quality & Reliability Management**. 28(2011)(5):587–598. Disponível em: <http://www.emeraldinsight.com/journals.htm?articleid=1923632&show=abstract>. (Acessado em: 01/12/2012.)
- [ISO2011] **ISO/IEC/IEEE 42010 Systems and software engineering** — Architecture description. 1. ed. ISO, 2011.
- [LIN2010] LINDSTRÖM, Veronica; WINROTH, Mats. Aligning manufacturing strategy and levels of automation: a case study. **Journal of Engineering and Technology Management**. 27(Sep–Dec 2010)(3–4):148–159. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jengtecman.2010.06.002>.
- [OLS2000] OLSON, Wesley A.; SARTER, Nadine B. Automation management strategies: pilot preferences and operational experiences. **The International Journal of Aviation Psychology**, 10(4):327–341. Disponível em: <http://frontpage.okstate.edu/coe/toddhubbard/Courses/AVED%205020/Automation%20Management.pdf>. (Acessado em: 01/12/2012.)
- [PMI2013] PMBOK. Um Guia do Conjunto de Conhecimentos em Gerenciamento de Projetos (Guia PMBOK®)—Quinta Edição. 2013.
- [SAN1999] SANTOS, Raul Gustavo de Cerqueira Júdice dos; TÁVORA Jr., José Lamartine; BARBOSA, Ceres Zenaide. Uma proposta de modelo de gestão de recursos em automação e integração informática para PME's do setor produtivo do plástico. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção – ENEGEP, XIX e International Congress of Industrial Engineering – ICIE, V., Rio de Janeiro - Brasil, 1999. **Anais**, Abepro, 1999.
- [SEI2010] CMMI Product Team **CMMI for Development, Version 1.3 (CMU/SEI-2010-TR-033, ESC-TR-2010-033)**. Software Engineering Institute, Carnegie Mellon University: Pittsburgh, PA, August 2010. Disponível em <http://www.sei.cmu.edu/library/abstracts/reports/10tr033.cfm>. (Acessado em: 01/12/2011.)
- [SEL2008] SELEME, Robson; SELEME, Roberto Bohlen. **Automação da produção: abordagem gerencial**. Curitiba: IBPEX, 2008.
- [SPE2010] SPEARS, Janine L.; BARKI, Henri. User participation in Information Systems Security risk management. **MIS Quarterly**. Vol. 34, n. 3, pp. 503-522. September 2010.

Sistemas de apoio a projetos (CAD/CAE/CAM/CAID)

SUMÁRIO

11.1	Miniglossário	306
11.2	Visão geral dos sistemas de apoio a projetos de engenharia.....	306
11.3	CAD.....	308
11.3.1	Dimensionalidade	309
11.3.2	Geometria e topologia	309
11.4	CAID.....	310
11.5	CAE	311
11.5.1	Dois exemplos de aplicação.....	311
11.5.2	CAE na indústria automotiva	312
11.6	CAM.....	312
11.7	CIM	312
11.8	Engenharia simultânea	313
11.9	Na prática.....	314
11.10	Leituras recomendadas	314
11.11	Exercícios e atividades	314

Tem sido cada vez maior a utilização de sistemas computacionais nas diversas atividades da engenharia. A melhoria contínua das características de hardware está trazendo como resultado uma grande expansão da disponibilidade dos sistemas computadorizados na manufatura.

O objetivo deste capítulo é apresentar os sistemas de apoio a projetos de engenharia, com foco especial em CAD (*Computer-aided Design*), CAE (*Computer-aided Engineering*), CAM (*Computer-aided Manufacturing*) e CAID (*Computer-aided Industrial Design*).

AO TÉRMINO DA LEITURA DESTE CAPÍTULO, VOCÊ ESTARÁ APTO PARA:

- identificar e diferenciar as principais atividades de projetos de engenharia apoiadas por computador;
- conhecer as características fundamentais dos sistemas de apoio à engenharia.

11.1 Miniglossário

CAD (Computer-aided Design – Design auxiliado por computador).

Uso de ferramentas baseadas em computador que apoiam engenheiros, arquitetos e outros profissionais de design nas suas atividades. As mais típicas ferramentas estão classificadas nas seguintes categorias: MCAD (projetos mecânicos), ECAD (elétricos e eletrônicos) e AEC (de arquitetura).

CAE (Computer-aided Engineering – Engenharia Auxiliada por Computador). Uso de Tecnologia da Informação para apoiar engenheiros em tarefas como análise, simulação, diagnóstico e manutenção.

CAID (Computer-aided Industrial Design – Desenho Industrial Auxiliado por Computador). O mesmo que CAS.

CAM (Computer-aided Manufacturing – Fabricação Auxiliada por Computador). Uso de ferramentas para apoiar engenheiros na fabricação de componentes de produto.

CAS (Computer-aided Styling — Modelagem Auxiliada por Computador). Uma especialidade de CAD voltada para a concepção de produtos, antes de seu detalhamento. O mesmo que CAID.

PLM (Product Lifecycle Management – Gestão do Ciclo de Vida de Produto). Processo de gestão de todo o ciclo de vida de um produto desde a concepção, passando por design e manufatura, até o serviço e a disponibilização.

Projeto (project) – Um projeto é um esforço temporário empreendido para criar um produto, serviço ou resultado exclusivo [PMB2013].

11.2 Visão geral dos sistemas de apoio a projetos de engenharia

Segundo o PMBOK®, **projeto** é um esforço temporário empreendido para criar um produto, serviço ou resultado exclusivo [PMB2013]. Trata-se, portanto, de uma visão ampla de identificação das atividades, estimativa de tempos, coordenação da equipe, controle de custos e também do projeto do produto em si, do projeto técnico, ou seja, dos cálculos para seu dimensionamento, escolha de materiais e outras atividades técnicas. O projeto do produto em si, em inglês, é denominado *design*, mas na língua portuguesa é utilizado também o termo projeto, fato que pode criar confusão na compreensão do que se está abordando. Neste capítulo, quando houver referência ao projeto técnico é utilizado o termo projeto (*design*).

A [Figura 11.1](#) mostra as principais atividades relacionadas com o desenvolvimento e a fabricação de um produto qualquer. Para cada uma delas há uma contribuição cada vez maior de sistemas computadorizados. Durante a concepção e modelagem do produto utilizam-se os sistemas CAS (CAID).

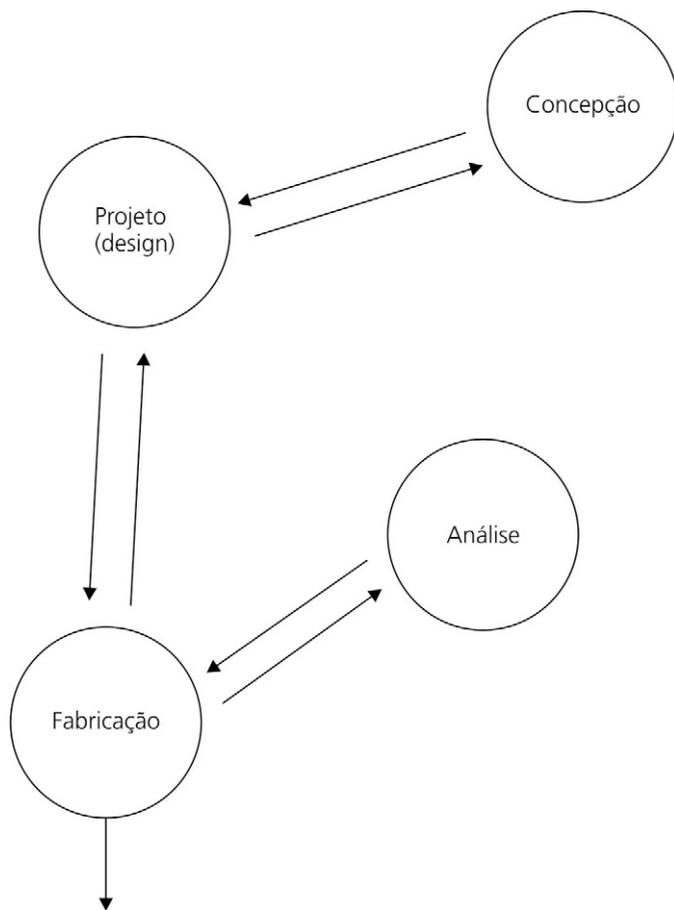


FIGURA 11.1 Atividades relacionadas com desenvolvimento e fabricação de produto.

No projeto (*design*) os sistemas *CAD* são utilizados. As atividades de análise e simulação, entre outras, são apoiadas pelos sistemas *CAE*. Finalmente, a fabricação tem apoio nos sistemas *CAM*.

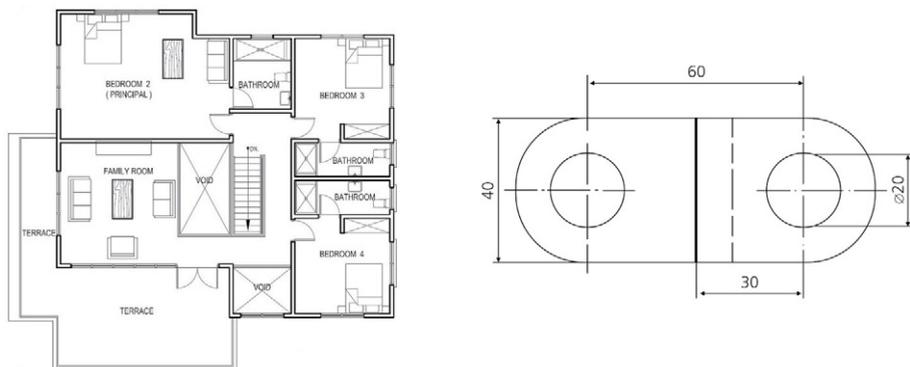


FIGURA 11.2 Representação 2D. Fonte: Autores.

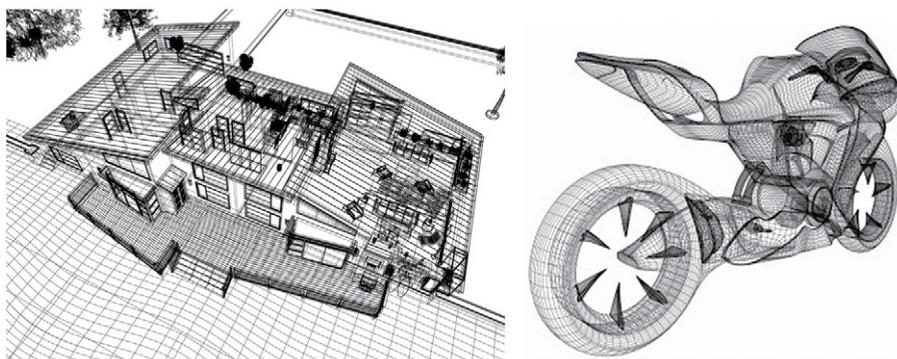


FIGURA 11.3 Representação 3D wireframe. Fonte: Autores.

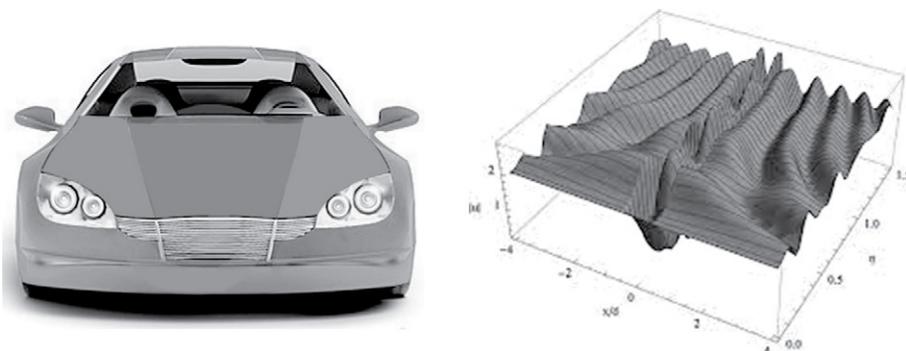


FIGURA 11.4 Representação 3D superfícies. Fonte: Autores.

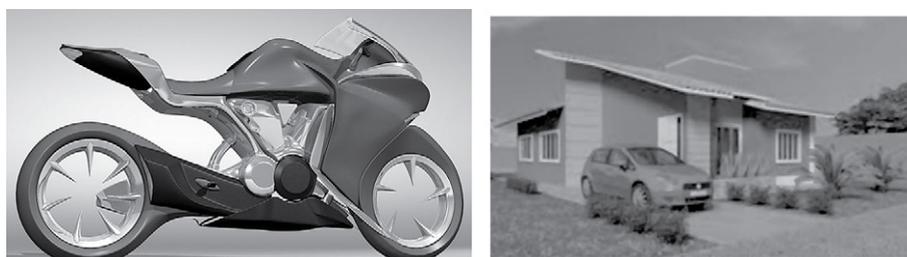


FIGURA 11.5 Representação 3D sólidos. Fonte: Autores.

11.3 CAD

Os sistemas *CAD – Computer-aided Design (Projeto Auxiliado por Computador)* auxiliam as atividades de criação, modificação, análise ou otimização de um **projeto (design)**. O software desses sistemas é baseado em interface gráfica orientada ao usuário. Podem ser desenvolvidos projetos mecânicos, elétricos, eletrônicos, de engenharia civil, aeronáutica, naval etc. [GRO1984, XUE2005].

11.3.1 Dimensionalidade

A dimensionalidade se refere ao tipo de geometria processada e armazenada em um sistema *CAD*. Com relação a essa característica, esses sistemas podem ter as seguintes representações:

- Sistemas de duas dimensões (2D)

São equivalentes ao desenho em papel. Cada ponto é representado por dois números (p. ex., a distância horizontal em relação à borda esquerda do papel, e a distância vertical da borda inferior do papel). Há representação também para segmentos, círculos, arcos e outras curvas planares.

Os primeiros sistemas *CAD* baseavam-se em representação 2D. Ainda hoje, apesar do desenvolvimento de sistemas 3D, a representação em 2D é a melhor para realizar as atividades de documentação e detalhamento final de um projeto. Há limitações, sobretudo, na visualização dos objetos.

- Sistemas de duas dimensões e meia (2½D)

Acrescentam às representações 2D, a representação de objetos tridimensionais, como uma seção de corte arbitrária. Podem ser calculadas propriedades de objetos sólidos, como volume.

- Sistemas de três dimensões (3D), *wire frame*

Utilizam segmentos de reta, círculos, arcos e outras curvas – em três dimensões – que trabalham com múltiplas visões (de qualquer direção arbitrária) e perspectiva. A representação de um paralelepípedo, por exemplo, é feita através de suas 12 bordas.

- Sistemas de três dimensões (3D), superfícies

Nestes sistemas, cada sólido é representado por seus limites, que consistem em superfícies planares, cilíndricas, cônicas, esféricas. É a representação mais utilizada no projeto de automóveis (sobretudo parte externa e painel).

- Sistemas de três dimensões (3D), sólidos

Trabalham de forma similar com a utilização de blocos para construir um sistema sólido real. Possuem um conjunto de objetos primitivos e podem mover (translação, rotação) esses objetos, além de combiná-los usando um conjunto de operações básicas (união, intersecção, diferença). Esses sistemas permitem a melhor visualização.

O [Quadro 11.1](#) apresenta os principais méritos de cada dimensionalidade.

11.3.2 Geometria e topologia

Uma tendência dos sistemas *CAD* modernos é a inclusão de características de topologia, além das de geometria. Entende-se por **geometria** a posição,

Quadro 11.1 Méritos das diversas dimensionalidades de sistemas CAD**CAD: Méritos das diversas dimensionalidades**

Dimensionalidade	Mérito
2D	Documentação Detalhamento Controle numérico 2D
2½D	Partes torneadas Partes esculpidas
3D <i>wire frame</i> 3D superfícies	Extensão simples do 2D Remoção de linhas escondidas Controle numérico multieixo Especificações de superfícies
3D sólidos	Visualização Análise de elementos finitos Análise dinâmica

orientação e o tamanho de cada elemento geométrico no projeto de um objeto. **Topologia** é a conectividade entre esses elementos geométricos.

Os **sistemas orientados apenas a geometria** (sistemas CAD clássicos) armazenam apenas a geometria final.

Os **sistemas paramétricos** trabalham com topologia, armazenando os comandos usados pelo usuário para definir a geometria. Por exemplo: quando um usuário especifica que um arco pode ser criado com um dado raio, tangente ao final de um segmento previamente definido e com um dado ângulo incluso, pode ser armazenada a sequência de operações executada para construção da geometria. Se o segmento for modificado, o sistema paramétrico pode recuperar a construção do arco (apesar de ter sido alterada a geometria, que fará com que o ângulo interno seja diferente).

Os **sistemas variacionais** são ainda mais avançados, pois armazenam a topologia tanto quanto a geometria. Por exemplo, um usuário entra com um arco, especifica que possui um dado raio, tangente ao final de um segmento previamente definido e com um dado ângulo. O sistema variacional guarda não somente a localização dos pontos e do arco, mas também as regras para o arco. Se, mais tarde, o usuário decide trocar a regra do ângulo interno por uma de tangência com outro segmento, ele deve apenas selecionar a regra do ângulo incluso e trocá-la por uma regra de tangência apropriada. O sistema recupera as outras regras sobre o arco e automaticamente recalcula a geometria.

11.4 CAID

Uma especialidade de sistemas CAD tem desenvolvido-se nos últimos anos, para apoiar as características especiais das atividades de concepção inicial de modelos, antes do projeto propriamente dito: os sistemas **CAID – Computer-Aided**

Industrial Design (Desenho Industrial Auxiliado por Computador). Alguns autores identificam esses sistemas por **CAS (Computer-aided Styling)** [WEI2011]. Os recursos gráficos são, também aqui, muito utilizados, contando ainda com a inclusão de recursos sofisticados de tratamento de cores e sombras, para estudos da aparência do futuro produto.

O que diferencia **CAID** de **CAD** é que o primeiro é bem mais conceitual e menos técnico que o segundo, pois busca auxiliar os profissionais de *design* a expressar suas ideias para discuti-las com seus pares (setores de engenharia, marketing, vendas etc.).

11.5 CAE

As atividades de análise de engenharia são auxiliadas pelos sistemas **CAE – Computer-Aided Engineering (Engenharia Auxiliada por Computador)**. Tendo-se desenvolvido um projeto em CAD (mesmo sem o detalhamento final), é possível realizar vários estudos baseados na geometria estabelecida, acrescida com informações adicionais relevantes para a análise a ser realizada (p. ex., tipo e densidade do material, capacidade térmica etc.). A análise pode envolver:

- cálculos de esforços;
- cálculos de transferência de calor;
- uso de equações diferenciais para descrever o comportamento dinâmico do sistema sendo projetado;
- simulação de mecanismo;
- prototipação rápida através impressão 3D, técnica recente que permite gerar um modelo físico real etc.

11.5.1 Dois exemplos de aplicação

Os exemplos a seguir apontam algumas aplicações de sistemas CAE:

- **Exemplo 1 - Análise de propriedades de massa:** podem ser fornecidas propriedades de objetos sólidos sendo analisados, como área de superfície, peso, volume, centro de gravidade e momento de inércia. Para uma superfície plana (ou seção transversal de um objeto sólido) pode incluir perímetro, área e propriedades de inércia.
- **Exemplo 2 - Análise de elementos finitos:** o objeto é dividido em um grande número de elementos finitos (usualmente de forma retangular ou triangular) que formam uma rede de interconexão de nós. Usando computadores de grande capacidade computacional, o objeto completo pode ser analisado em relação a esforços, transferência de calor e outras características, através do cálculo do comportamento de cada nó.

11.5.2 CAE na indústria automotiva

As análises de engenharia apoiadas por computador têm sido bastante utilizadas na indústria automotiva, na busca de redução de custos e tempo de desenvolvimento, tanto quanto de qualidade (sobretudo conforto e durabilidade) e segurança (*safety*) dos produtos. Isso é obtido através de simulações, que muitas vezes substituem os testes de protótipos físicos. Há, no entanto, muitas limitações para essas simulações, pois os sistemas CAE baseiam-se em modelos e não podem prescrever todas as variáveis relacionadas com o bom desempenho dos produtos.

11.6 CAM

CAM – Computer-Aided Manufacturing (Fabricação Auxiliada por Computador) pode ser definido como o uso de sistemas computacionais para planejar, gerenciar e controlar as operações de uma planta de fabricação através de uma interface direta ou indireta com os recursos de produção da planta. Há duas categorias de aplicações: monitoração/ controle e apoio.

As aplicações típicas são:

- **Aplicação 1 – Monitoração e controle do processo de fabricação:** aplicações diretas em que o computador é conectado diretamente ao processo.
- **Aplicação 2 – Apoio à fabricação:** aplicações indiretas em que o computador é usado para suporte às operações de produção da planta, sem que haja uma interface direta entre o computador e o processo. Exemplos:
 - preparação de programas de controle numérico (através de pós-processadores que geram código para máquinas CNC a partir da base de dados do projeto em CAD);
 - projeto de ferramentas;
 - projeto de moldes;
 - planejamento do processo automatizado por computador;
 - padrões de trabalho gerados por computador (p. ex., tempos padrões);
 - programação da produção;
 - *BOM (Bill of Materials)*;
 - *MRP (Material Requirement Planning) / MRP II (Manufacturing Resources Planning)*, *ERP (Enterprise Resource Planning)*.

11.7 CIM

A integração dos diversos processos de uma organização é uma necessidade. O conceito de **CIM – Computer-Integrated Manufacturing (Fabricação Integrada por Computador)** está voltado exatamente para a disponibilização

da informação necessária em toda a empresa. Quanto maior a integração de informações e atividades, maior a capacidade da empresa de melhorar seu espaço competitivo. As principais vantagens buscadas são:

- produtos de alta qualidade;
- projetos de novos e melhores produtos;
- prazos de entrega mais curtos;
- maior produtividade e menores custos;
- capacidade de antecipação e reação rápida a mudanças;
- administração eficaz de recursos.

Para isso é necessário:

- integrar aplicações, ou seja, trabalhar com uma base de dados comum (ou pelo menos com interfaces bem definidas) para projeto, análises de engenharia, preparação técnica, planejamento, monitoração e controle da produção;
- integrar hardware e software, evitando incompatibilidades.

A integração de sistemas é discutida no Capítulo 9.

11.8 Engenharia simultânea

Tradicionalmente os projetos de desenvolvimento de produtos são realizados utilizando um ciclo de vida em cascata, ou seja, de forma sequencial abordando as seguintes principais atividades: desenvolvimento do conceito, planejamento do produto, engenharia do produto e do processo, produção piloto e aumento da produção [OMO1999].

Nos anos 80 surgiu a necessidade de desenvolvimento de processos de projeto mais rápidos para que se possa reduzir o tempo de lançamento de novos produtos (*time to market*). Diversas pesquisas foram desenvolvidas com esse objetivo e surgiu o conceito da Engenharia Simultânea:

“Engenharia Simultânea é uma abordagem sistemática para o desenvolvimento integrado e paralelo do projeto de um produto e os processos relacionados, incluindo manufatura e suporte. Essa abordagem procura fazer com que as pessoas envolvidas no desenvolvimento considerem, desde o início, todos os elementos do ciclo de vida do produto, da concepção ao descarte, incluindo qualidade, custo, prazos e requisitos dos clientes” [ZANC1999].

A Engenharia Simultânea tem como vertente um processo de projeto mais rápido. Isso significa que a forma de trabalho foi alterada para reduzir esse tempo. As ferramentas aqui apresentadas vêm ao encontro dessa necessidade, pois um banco de dados único em cima do qual diversos projetistas trabalham no desenvolvimento de um mesmo produto permite a identificação imediata de qualquer interferência que houver entre os envolvidos e minimizar retrabalho.

11.9 Na prática

O aprendizado dos conceitos e das práticas de sistemas de apoio à engenharia pode ser feito pelo uso de sistemas CAD livres e/ou abertos. Segue uma relação de alguns desses sistemas:

- **Art of Illusion** (<http://www.artofillusion.org/downloads>). Trabalha com modelagem 3D de superfície.
- **Blender** (<http://www.blender.org/download/get-blender/>). Software aberto, com recursos avançados profissionais.
- **FreeCAD** (<http://sourceforge.net/projects/free-cad/?source=directory>). Software aberto, possui recursos avançados de modelagem e simulação.
- **OpenSCAD** (<http://www.openscad.org/>). Voltado para programadores (que escrevem programas para gerar as formas desejadas). Usa intensamente o conceito de parametrização.
- **SketchUp** (<http://www.sketchup.com/intl/pt-BR/download/>). Possui recursos avançados para design e engenharia. Há uma comunidade no Brasil (<http://www.sketchupbrasil.com/>).
- **TinkerCAD** (<http://www.tinkercad.com>). De fácil utilização, roda diretamente no site.

11.10 Leituras recomendadas

O aprimoramento dos sistemas CAD/CAE/CAM/CAID é contínuo. Novos métodos, técnicas e recursos são acrescentados à medida que as máquinas se tornam mais potentes.

Antoine Brière-Côté *et al.* [BRI2012] desenvolveram estudo comparativo entre os vários modelos 3D, permitindo compreender o avanço e as tendências desses recursos.

Um avanço importante dos sistemas CAD está voltado para sua aplicação em Engenharia de Serviço e Produto (SPE), que se utiliza do conceito de servitização. Um estudo prático sobre esse tema pode ser encontrado em artigo publicado por Tomohiko Sakao e parceiros [SAK2012].

Já os avanços das aplicações dos sistemas CAID/CAS na área automotiva podem ser conhecidos por artigo sobre o assunto publicado por Sun Wei e Hou Yingchun [WEI2011].

11.11 Exercícios e atividades

Escolha pelos menos três sistemas CAD 3D livres da lista apresentada na seção “Na prática”. Identifique e descreva sucintamente os recursos de cada um para:

- Modelagem 2D
- Modelagem 3D (visões sólidos, superfícies e *wireframe*)

- Geometria e topologia
- Concepção e design avançados
- Análises de engenharia
- Simulação
- Preparação para fabricação

Referências bibliográficas

- [BRI2012] BRIÈRE-CÔTÉ, Antoine; RIVEST, Louis; MARANZANA, Roland. Comparing 3D CAD models: uses, methods, tools and perspectives. **Computer-Aided Design & Applications**. 9(2012)(6):771–794. Disponível em <http://www.cadanda.com>. (Acessado em: 01/12/2012.)
- [GRO1984] GROOVER, Mikell P.; ZIMMERS Jr., Emory W. **CAD/CAM: computer-aided design and manufacturing**. Prentice-Hall, 1984.
- [LOW2011] LOWE, Andrew G.; HARTMAN, Nathan W.. A case study in CAD design automation. **The Journal of Technology Studies**. XXXVII(Spring 2011)(1). Disponível em <http://scholar.lib.vt.edu/ejournals/JOTS/v37/v37n1/pdf/lowe.pdf>. (Acessado em: 01/12/2012.)
- [OMO1999] OMOKAWA, Rogério. Utilização de sistemas PDM em ambientes de engenharia simultânea: o caso de uma implantação em uma montadora de veículos pesados. Departamento de Engenharia Mecânica. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. Dissertação de Mestrado. São Carlos, 1999.
- [PMI2013] PMBOK. Um Guia do Conjunto de Conhecimentos em Gerenciamento de Projetos (Guia PMBOK®). 5. ed. 2013.
- [SAK2009] SAKAO, Tomohiko; SHIMOMURAB, Yoshiki; SUNDIN, Erik; COMSTOCK, Mica. Modeling design objects in CAD system for Service/Product Engineering. **Computer-Aided Design**. Vol. 41(2009), p. 197–213.
- [WEI2011] WEI, Sun; YINGCHUN, Hou. Computer Aided Styling Design in Automobile. **Advanced Materials Research**. Vol. 228-229(2011), p. 597–600. Disponível em www.scientific.net. (Acessado em: 01/12/2012.)
- [XUE2005] Teaching CAD in Mechanical and Manufacturing Engineering Programs – An Experience at University of Calgary. **Proceedings of the Canadian Engineering Education Association**, University of Manitoba June 17- 20, 2012. Disponível em <http://library.queensu.ca/ojs/index.php/PCEEA/article/view/3970/3899>. (Acessado em: 01/12/2012.)
- [ZANC1999] Zancul, Eduardo. Rozenfeld, Henrique. **Engenharia Simultânea**. Conceitos básicos. Disponível em : http://www.numa.org.br/conhecimentos/conhecimentos_port/pag_conhec_engsimul_v2.html. (Acessado em: 30/08/2013.)

Automação em serviços

SUMÁRIO

12.1 Miniglossário	317
12.2 Serviço e sistema de serviços	318
12.3 Tecnologia e serviços.....	319
12.4 Automação de serviços: conceitos fundamentais.....	320
12.5 Automação comercial.....	320
12.5.1 Automação do comércio tradicional.....	320
12.5.2 Comércio eletrônico.....	323
12.6 Automação bancária	324
12.7 Automação de serviços logísticos	325
12.8 Sistemas de atendimento	325
12.9 Na prática.....	326
12.10 Leituras recomendadas	327
12.11 Exercícios e atividades	327

Os serviços possuem papel crescente na sociedade. O desenvolvimento tecnológico tem permitido que os serviços – que antes eram caracteristicamente fornecidos através do contato direto entre fornecedor e cliente – estendam-se e sejam oferecidos a um número cada vez maior e diferenciado de pessoas, ora de forma padronizada e massificada, ora com características customizadas.

O objetivo deste capítulo é apresentar a automação de serviços e suas mais típicas aplicações.

AO TÉRMINO DA LEITURA DESTE CAPÍTULO, VOCÊ ESTARÁ APTO PARA:

- conceituar serviço;
- compreender e utilizar os métodos e técnicas para concepção e implantação de automação de serviços;
- conhecer as características e os critérios de projeto de aplicações típicas de automação de serviços, nas áreas comercial, bancária e logística.

12.1 Miniglossário

Automação bancária. Automação de serviços bancários.

Automação comercial. Automação de serviços que envolvem processos comerciais.

Automação de serviços. Conjunto de métodos, técnicas e ferramentas automatizadas voltadas para apoiar as atividades de concepção, planejamento, execução, disseminação e controle de serviços.

Comércio eletrônico. Uso de recursos eletrônicos para a compra e venda de produtos, serviços ou informações.

Serviço. Resultado gerado por atividades na interface entre fornecedor e cliente e por atividades internas do fornecedor para atender às necessidades do cliente.

Sistema de serviço. Sistema caracterizado pela criação compartilhada de valor baseada na configuração de pessoas, tecnologias e outros sistemas de serviço, compartilhando informações e, geralmente, associado à troca econômica.

12.2 Serviço e sistema de serviços

O crescimento da participação e da importância do setor de serviços na sociedade moderna pode ser observado por algumas mudanças em grandes organizações. A IBM, por exemplo, migrou claramente de uma produtora e fornecedora de produtos manufaturados para uma organização de serviços. A IBM, como muitos fornecedores, implementa consultoria e tecnologias para apoiar os clientes a transformar seus próprios negócios. [MAG2008]

Para melhor compreender o papel da automação em serviços, é necessário antes conceituar e caracterizar serviço. Há várias definições. A norma NBR ISO 9004-2 apresenta a seguinte:

***Serviço:** resultado gerado por atividades na interface entre fornecedor e cliente e por atividades internas do fornecedor para atender às necessidades do cliente.*

Uma definição clássica foi proposta por Peter Hill [HIL1977]:

*Um **serviço** pode ser definido como uma mudança na condição de uma pessoa ou de um bem pertencente a um agente econômico, que vem à baila como resultado da atividade de outro agente econômico, por acordo prévio, ou seja, solicitação da pessoa ou agente econômico anterior.*

Stephen L. Vargo e Robert F. Lusch [VAR2004] evidenciam os benefícios para o cliente:

***Serviço** é a aplicação de competências para o benefício de outro.*

Estudos dos anos 2000 buscaram caracterizar os serviços como objeto de engenharia e gestão. Jim Spohrer, Paul P. Maglio, John Bailey e Daniel Gruhl

[SPO2007], pesquisadores da IBM, estudaram as características dos **sistemas de serviços**:

Sistema de serviços. *Sistema caracterizado pela criação compartilhada de valor baseada na configuração de pessoas, tecnologias e outros sistemas de serviço, compartilhando informações (linguagem, leis, medidas e métodos) e, geralmente, associado à troca econômica.*

Famílias, corporações, fundações, ONGs, órgãos do governo, departamentos nas corporações, cidades e até nações podem ser considerados sistemas de serviços.

12.3 Tecnologia e serviços

Os serviços são apoiados por estruturas ou ambientes que utilizam tecnologia e informação [JON2011]. Do ponto de vista físico, a estrutura envolve a localização (com aspectos como custos de terreno, energia e transportes, impostos etc.), a capacidade (que deve ser ajustada à demanda, ex.: dimensão das instalações), a capacitação (ex.: facilidade de acesso) e a elasticidade ou flexibilidade (do *layout*, por exemplo).

Os serviços são cada vez mais apoiados por tecnologia, que pode proporcionar flexibilidade e estender o conceito de serviço por multiplicar o conhecimento. As redes virtuais, por exemplo, podem ser utilizadas para atingir esses objetivos. Podem ser obtidos os seguintes resultados com o uso de tecnologia [JON2011]:

- alavancagem do conhecimento sobre os clientes (ex.: banco por telefone, registros sobre clientes que permitem atendimento personalizado, sistemas *CRM – Customer Relationship Management*);
- alavancagem do conhecimento sobre o produto-serviço (que permite que os profissionais do serviço ajam como especialistas, apesar da heterogeneidade típica dos serviços);
- multiplicação do conhecimento sobre o uso do produto-serviço pelos clientes (além de vender o produto, o fornecedor procura entender como o cliente o usa e fornecer assistência ou orientação sobre sua utilização mais eficaz);
- fluidez do serviço (a agilização é um desejo típico dos clientes, podendo ser conseguida com registros realizados uma única vez, por exemplo);
- customização e personalização do produto (baseadas no conhecimento prévio das características e informações dos clientes);
- aumento da confiabilidade (com informação integrada dos clientes para todos os serviços prestados);
- facilitação das comunicações (obtida com a convergência das diversas mídias de acesso, incluindo som, imagem e dados);

- aumento do serviço (o escopo do serviço pode ser ampliado com os recursos da tecnologia);
- redução do custo (com a remoção de etapas e do tempo de ciclo, principalmente);
- aumento do controle por parte do cliente (que pode acompanhar e interagir com o processo de prestação de serviço).

A esses objetivos do uso da tecnologia podem ser acrescentados outros mais. Eles podem ser utilizados como critérios de especificação dos serviços e da tecnologia que utilizarão.

12.4 Automação de serviços: conceitos fundamentais

A automação de serviços tem como objetivo realizar atividades automaticamente, com menor ou mesmo nenhuma interferência humana. Pode também servir para apoiar operações manuais, orientando o operador dos sistemas (o fornecedor ou o próprio usuário/cliente). Ela pode ser definida como o conjunto de métodos, técnicas e ferramentas automatizadas voltadas para apoiar as atividades de concepção, planejamento, execução, disseminação e controle de serviços.

À medida que a tecnologia evolui, os Sistemas de Informação recebem informações cada vez mais próximas dos eventos. Por exemplo: antigamente, os bancos operavam no caixa com anotações em papel, e à noite eram digitadas as transações para serem processadas e atualizarem os movimentos das contas. Hoje as transações são realizadas em tempo real (ou praticamente), por vezes sem intervenção humana.

Os principais elementos de automação para operações de serviços são os seguintes:

- sistemas de informação, que centralizam as informações e transações;
- dispositivos de entrada de eventos;
- dispositivos de saída de eventos.

Nas próximas seções são apresentadas algumas aplicações típicas de automação de serviços: comercial, bancária, logística e sistemas de atendimento.

12.5 Automação comercial

A automação comercial envolve basicamente dois tipos: a automação do comércio tradicional e o comércio eletrônico.

12.5.1 Automação do comércio tradicional

No comércio tradicional, as tecnologias de entrada mais típicas são o código de barras, o RFID e as leitoras de cartões. Eles estão ilustrados na [Figura 12.1](#).

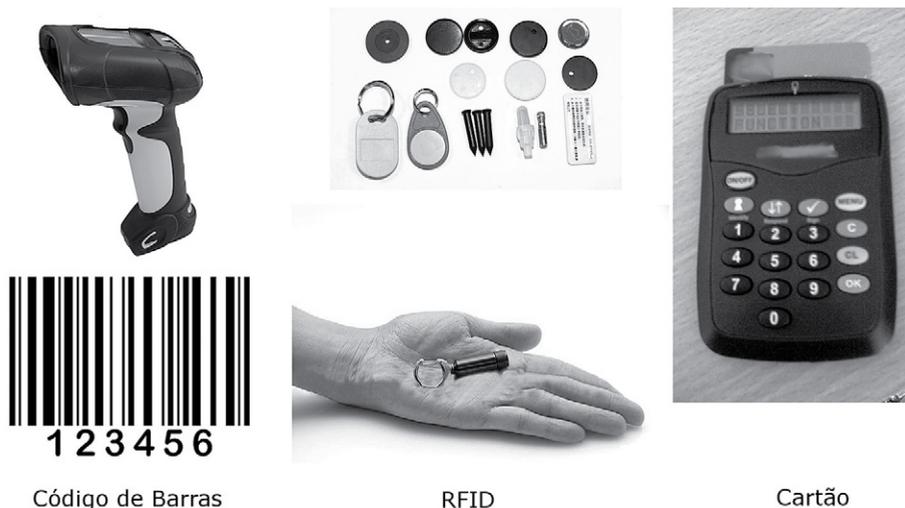


FIGURA 12.1 Tecnologias de entrada para automação comercial.

A decodificação (leitura) dos dados do **código de barras** é realizada por um tipo de *scanner*, o leitor de código de barras. O leitor emite um raio vermelho que percorre todas as barras. Onde a barra for escura, a luz é absorvida; onde a barra for clara (espaços), a luz é refletida novamente para o leitor.

Há um sistema internacional, o EAN/UPC, que auxilia na identificação inequívoca de um item a ser vendido. O padrão EAN-13 (com 13 dígitos) é utilizado mundialmente, exceto nos Estados Unidos e Canadá. Esse padrão estabelece a seguinte regra:

- os três primeiros dígitos representam a origem da organização responsável por controlar e licenciar a numeração;
- os próximos quatro a sete dígitos representam a identificação da empresa proprietária de tal prefixo;
- os três dígitos seguintes representam a identificação do produto, e são atribuídos pelo fabricante, quando o mesmo possui um prefixo próprio;
- o último dígito é verificador.

A **Identificação por Radiofrequência (RFID, *Radio-Frequency Identification*)**, também conhecida como etiqueta inteligente, ou *smart tag* ou ainda *e-tag*, é um *microchip* capaz de armazenar grande quantidade de informações, como, data de validade, processo de produção, descrição do produto e lote, que podem ser acessados por meio de radiofrequência. Uma etiqueta RFID é um transponder, pequeno objeto que pode ser colocado em um objeto a ser identificado (produto, embalagem, animal, equipamento etc.).

O **cartão magnético** é um objeto de plástico de formato retangular que armazena diversos tipos de dados digitais, através de uma tarja magnética. O

cartão inteligente (*smart card*), tecnologia mais recente, é um cartão semelhante ao cartão magnético que embute microprocessador e memória (tem maior capacidade de processamento).

Além desses dispositivos de entrada, a automação de comércio tradicional possui também os seguintes elementos essenciais:

- canal de comunicação de dados, que permite a transmissão de informações para os Sistemas de Informação;
- sistemas de supervisão e segurança, como câmeras, por exemplo.

Os **Sistemas de Informação** de apoio à automação comercial reúnem informações integradas referentes a clientes, processos e produtos.

Os **Sistemas Integrados de Gestão (ERP – *Enterprise Resources Planing*)** realizam a gestão integrada das informações e operações da organização. Controlam e apoiam os processos operacionais, produtivos, administrativos e comerciais. Possibilitam um fluxo de informações único, contínuo e consistente por toda a empresa, sob uma única base de dados. Para permitir a aplicação de suas funções em empresas de diversos segmentos e portes, os sistemas ERP são desenvolvidos de modo que a solução genérica possa ser adaptada (customizada) a contextos e necessidades específicas [PAD2005]. A **Figura 12.2** apresenta as funções típicas de um sistema ERP.

Os **Sistemas de Gestão do Relacionamento com o Cliente (CRM – *Customer Relationship Management*)** colocam o cliente no centro do desenho

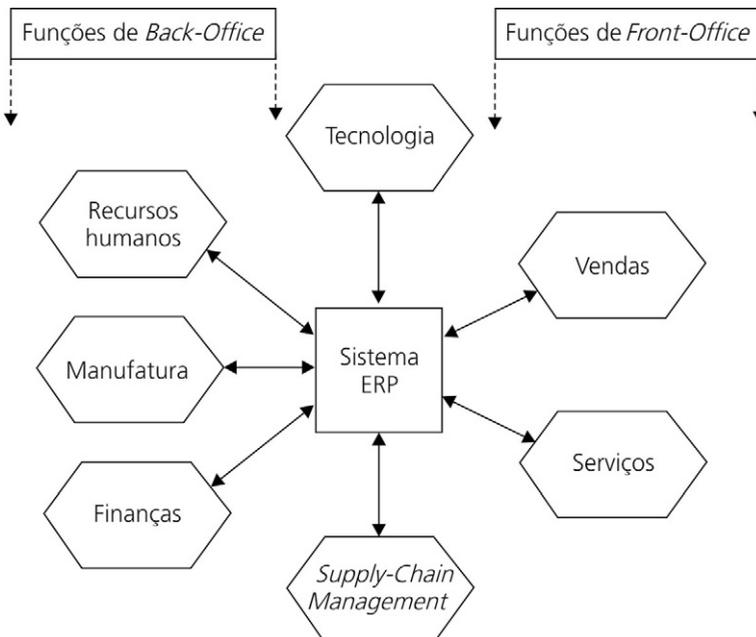


FIGURA 12.2 Funções típicas de sistemas ERP [PAD2005; DAV1998]

dos processos de negócio. Visam perceber e antecipar as necessidades dos clientes atuais e potenciais, de forma a procurar supri-las da melhor maneira. São sistemas integrados de gestão com foco no cliente, constituídos por um conjunto de procedimentos/processos organizados e integrados em um modelo de gestão de negócios. Através do seu uso poupa-se tempo das pessoas e de máquinas que até então seriam utilizados para processamento de dados manual e automaticamente.

Os principais elementos dos sistemas CRM são:

- **Vendas.** Atividades voltadas para automatizar a força de vendas (*SFA – Sales Force Automation*): prospecção e previsões, principalmente.
- **Serviço ao cliente.** Registro e acompanhamento de questões, problemas, reclamações, sugestões, pedidos de informação relacionados com clientes. Envolve acompanhamento dos assuntos, agendamento e gestão do conhecimento.
- **Marketing.** Recursos de *data warehouse e data mining* facilitam análise, permitindo descobrir relações não antecipadas e padrões de consumo e comportamento. São identificados perfis de consumo, auxiliando na tomada de decisão.

12.5.2 Comércio eletrônico

Ao uso de recursos eletrônicos para a compra e venda de produtos, serviços ou informações dá-se o nome de **comércio eletrônico** (*e-commerce*). A internet é o principal instrumento desse tipo de atividade. Nesses sistemas, são pontos essenciais:

- informações detalhadas sobre os produtos;
- informações sobre o relacionamento com cliente, seus costumes, suas preferências;
- mecanismos de proteção contra fraudes para estabelecer um ambiente onde o cliente se sinta seguro para realizar as transações.

Há várias categorias de transações, destacando-se:

- *B2B (Business-to-Business)*: transações entre empresas;
- *B2C (Business to Consumer)*: transações entre empresas e os consumidores finais;
- *C2C (Consumer-to-Consumer)*: transações entre os consumidores finais;
- *G2C (Government-to-Consumer)*: transações entre governo e consumidores finais;
- *G2B (Government-to-Business)*: transações entre governo e empresas, envolvendo licitações, compra e venda etc.;
- *G2G (Government-to-Government)*: transações entre departamentos do governo.

O B2B corresponde à maioria das transações.

12.6 Automação bancária

A **automação bancária** compreende o conjunto de métodos, técnicas e ferramentas automatizadas voltadas para apoiar as atividades de concepção, planejamento, execução, disseminação e controle de serviços bancários. Essencialmente são Sistemas de Informação integrados que permitem o fluxo de informação entre as empresas financeiras e usuárias do sistema financeiro.

A automação bancária brasileira é considerada uma das mais avançadas do mundo.

O setor financeiro realiza investimentos anuais em TI da ordem de 2 a 4 bilhões de reais, visando minimizar a interferência humana em suas operações.

Uma das tecnologias mais importantes para viabilizar esse nível de automação foi o desenvolvimento de Sistemas de Telecomunicações, que interligam os mais diversos pontos do processo de serviço ao agente financeiro.

Outro elemento importante para a automação bancária de pessoas físicas e jurídicas são os dispositivos de entrada e saída de dados como:

- terminais de autoatendimento (*ATM - Automatic Teller Machine*);
- leitoras de cartão (v. [Seção 12.5.1](#));
- canais de internet para a transação completa.

Os principais equipamentos da automação bancária são os **terminais de autoatendimento (ATMs, caixas eletrônicos, caixas automáticas ou terminais bancários)**, dispositivos eletrônicos que permitem que clientes realizem direta e independentemente – sem a necessidade de atuação de funcionários dos bancos – operações como retiradas de dinheiro, depósitos, pagamentos, transferências, investimentos, verificações de saldos e movimentações etc. A [Figura 12.3](#) ilustra os terminais de autoatendimento.



FIGURA 12.3 Terminais de autoatendimento.

Em média, o custo de uma transação realizada através desses equipamentos é de 1/5 do valor da transação não automática.

12.7 Automação de serviços logísticos

A movimentação de materiais é uma atividade importante para ser suportada pelos sistemas de TI, pois envolve controle, algoritmos complexos e grande volume de informações. Essa movimentação pode ser interna ou externa à empresa.

Uma das mais sofisticadas atividades da automação logística é o traçado de rotas, levando em consideração os pontos de origem e destino, os caminhos alternativos e os tempos previstos para cada trajeto. A [Figura 12.4](#) ilustra o traçado de uma rota realizada por software roteador.



FIGURA 12.4 Rota traçada por software. Fonte: Google Maps.

Similarmente à automação comercial, os elementos essenciais da automação de serviços logísticos são os seguintes:

- dispositivos de entrada (códigos de barras, RFID, tag eletrônico);
- Sistema de Informações;
- Sistema de Posicionamento Global (*GPS – Global Positioning System*) para acompanhamento da circulação de materiais.

12.8 Sistemas de atendimento

Uma classe especial de automação na área de operações e serviços são os Sistemas de Atendimento, que automatizam o atendimento de clientes. Envolvem um Sistema de Informações integrado a um PABX que gerencia os tempos e direciona para diversos atendedores as chamadas externas.

Os sistemas de atendimento permitem atender um grande volume de chamadas de forma padronizada.

As centrais de atendimento (*call centers*) centralizam o recebimento de ligações telefônicas dos clientes, distribuindo-as automaticamente aos atendentes e permitindo que realizem o atendimento. Podem realizar serviços de vendas, pesquisas de mercado, suporte a usuários etc.

As centrais de atendimento modernas possuem sistemas de gerenciamento que apoiam os serviços prestados pelos atendentes (com controle do fluxo de chamadas, consulta e registro de informações referentes ao cliente e aos produtos). Permitem também que as ligações sejam gravadas. A [Figura 12.5](#) ilustra o ambiente de trabalho de uma central de atendimento.



FIGURA 12.5 Central de atendimento.

Devido a várias características dos serviços prestados e a forte pressão exercida pelas exigências de produtividade e efetividade esperadas para os atendimentos, tem havido grande impacto sobre a saúde de pessoas que realizam essa atividade.

12.9 Na prática

Na área de engenharia, é comum existir, na prática, a necessidade de desenvolver um projeto de serviço, com possível envolvimento de automação. O projeto de sistemas de serviços segue, em vários aspectos, os mesmos métodos de projetos de sistemas já consolidados em outros segmentos, mas possui certas especificidades.

Considerando isso, o modelo CMMITM, inicialmente desenvolvido para desenvolvimento e manutenção de software, desdobrou-se depois em três

versões, sendo uma especificamente voltada para serviços, o *CMMI for Services (CMMI-SVC)* [CMM2012].

O modelo CMMI-SVC pode orientar e servir de roteiro prático para projetos de sistemas de serviços. Ele apresenta práticas voltadas para gestão do trabalho, gestão de processo, estabelecimento de serviço, liberação e suporte a serviço, além de processos de apoio a serviços.

12.10 Leituras recomendadas

A sistematização da ciência de serviços é relativamente recente. Para elucidar os conceitos fundamentais e os impactos dessa área de estudo, um artigo de referência intitulado “Fundamentals of service science”, sucinto e claro, foi desenvolvido por Paul P. Maglio e Jim Spohrer [MAG2008]. Recomenda-se também a leitura do artigo “Steps Toward a Science of Service Systems” [SPO2007].

Os **impactos da automação sobre o emprego** na área de serviços têm sido sentidos e discutidos desde o início da crescente tendência de automação desse setor. Um estudo metódico sobre esses impactos – denominado “Tecnologia, automação e desemprego no setor bancário brasileiro (1986 – 2000)” foi desenvolvido por Gilson César Pianta Corrêa [COR2012].

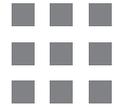
12.11 Exercícios e atividades

Procure um serviço comercial ativo em seu bairro ou sua cidade. Realize as seguintes atividades:

1. Descreva os objetivos do serviço e caracterize seu fornecedor e seu cliente. Desenhe o fluxo do processo de serviço.
2. Há algum sistema de automação associado? Se houver, observe e responda:
 - a. Quais são as suas funções e características gerais?
 - b. Quais são os dispositivos de entrada de dados utilizados? Descreva-os.
 - c. Quais são os sistemas de informação de apoio? Quais as suas funções específicas?
 - d. Levante os problemas e as necessidades de melhoria do serviço atual.
 - e. Que melhorias você propõe para aprimorar o sistema de automação atual de forma que o serviço seja também melhorado?
3. Se não houver nenhum tipo de automação instalado, faça o seguinte:
 - a. Levante os problemas e as necessidades de melhoria do serviço atual.
 - b. Levante os requisitos de um sistema de automação para o serviço em análise, considerando funções, características não funcionais, dispositivos de entrada e saída, sistemas de informação de apoio.
 - c. Discuta as melhorias do serviço que a automação proposta deverá conseguir.

Referências bibliográficas

- [CMM2012] CMMI Product Team. **CMMI for Services**, Version 1.3 (CMU/SEI-2010-TR-034). Pittsburgh, PA: Software Engineering Institute, Carnegie Mellon University, November 2010a. Disponível em: <http://www.sei.cmu.edu/library/abstracts/reports/10tr034.cfm>. (Acessado em: 02-12-2012.)
- [COR2012] CORRÊA, Gilson Cesar Pianta. Tecnologia, automação e desemprego no setor bancário brasileiro (1986 – 2000). **Revista Organização Sistêmica**. 2(jul-dez, 2012)(1). Disponível em <http://www.grupouninter.com.br/web/revistaorganizacao sistemica/index.php/organizacaoSistemica/article/view/136/50>. (Acessado em: 01/12/2012.)
- [DAV1998] DAVENPORT, T.H. Putting the enterprise into the enterprise system. **Harvard Business Review**. (Jul/ug 1998):121–131.
- [HIL1977] HILL, Peter. On goods and services. **The Review of Income and Wealth**. (dez 1977)(4):315–338.
- [JOH2011] JOHNSTON, Robert; CLARK, Graham. **Administração de operações de serviços** [Trad. Ailton Bonfim Brandão. Rev. Téc. Henrique Luiz Corrêa]. Atlas: São Paulo, 2011.
- [MAG2008] MAGLIO, Paul P; SPOHRER, Jim. Fundamentals of service science. **Journal of the Academic Marketing Science**. 36(2008):18–20. 10.1007/s11747-007-0058-9. Disponível em: <http://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs11747-007-0058-9.pdf>. (Acessado em: 01/12/2012.)
- [PAD2005] PADILHA, Thais Cássia Cabral; MARINS, Fernando Augusto Silva. Sistemas ERP: características, custos e tendências. **Revista Produção**. 15(Abr 2005)(1):102–113. ISSN 0103-6513. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/prod/v15n1/n1a08.pdf>. (Acessado em: 01/12/2012.)
- [ROT2012] ROTONDARO, Roberto Gilioli; CARVALHO, Marly Monteiro. Qualidade em serviços. In: CARVALHO Marly Monteiro, PALADINI Edson Pacheco, eds. **Gestão da qualidade: teoria e casos**. Elsevier / ABEPRO: Rio de Janeiro, 2012:327–350. Série ABEPRO.
- [VAR2004] VARGO, Stephen L.; LUSCH, Robert F. Evolving to a new dominant logic for marketing. **Journal of Marketing**. 68(Jan 2004)(1):1–17. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/pdfplus/30161971.pdf>. (Acessado em: 01/12/2012.)
- [SPO2007] SPOHRER, Jim; MAGLIO, Paul P; BAILEY, John; GRUHL, Daniel. Steps Toward a Science of Service Systems. **IEEE Computer Society. Computer**. 40(2007)(1):71–77. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4069198>. (Acessado em: 01/12/2012.)



Índice remissivo

A

Abordagem sistêmica, 53
Aceleração, 191
Amplificadores, 130
Amplitude de medição, 166
Analisadores, 211
 de gases, 211
 de líquidos, 214
 de tratamento de água, 215
Análise das falhas, 301
Anemômetro, 198
Arquitetura
 de sistema, 258, 272
 orientada a serviço, 272, 277
Atuadores, 217
 elétricos, 238
 hidráulicos, 243
 pneumáticos, 244
Automação, 2
 bancária, 317, 324
 comercial, 317, 320
 de serviços, 5, 318, 320
 logísticos, 325
 do comércio tradicional, 320

B

Bolômetros, 176

C

CAD, 308
 dimensionalidade, 309
 geometria, 309
 sistemas paramétricos, 310
 sistemas variacionais, 310
 sólidos, 309
 superfícies, 309
 topologia, 309
CAE, 311
 na indústria automotiva, 312
CAID, 310
Calibração, 154

Calibrador, 161
CAM, 312
Cartão inteligente (*smart card*), 322
Cartão magnético, 321
CAS, 306, 311
Certificação, 163
 de processo, 163
 de produto, 163
 de terceira parte, 164
CIM, 312
Classe de exatidão, 158
CMMI, 292
CNC, 247
Código de barras, 321
Comércio eletrônico, 323
Componente de sistema, 265
Computer-Aided Design, 306, 308
Computer-Aided Engineering, 311
Computer-Aided Industrial Design, 310
Computer-Aided Manufacturing, 312
Computer-Aided Styling, 306, 311
Computer-Integrated
 manufacturing, 312
Confiabilidade, 127, 262
 de sistema, 258
Construção
 de estradas, 38
 de petroleiro, 40
 de sistema, 258
 de sistemas de automação, 265
Contactores, 238
Controlador(es), 2, 127
 industriais, 66
 programável, 222
 proporcional, 67
 proporcional-derivativo, 68
 proporcional-integral-derivativo, 68
 proporcional-integral, 67
Controle
 automático, 3
 básico, 276

Controle (*cont.*)

- de área e inter-áreas, 276
- de processo, 3, 9
- digital hierárquico, 276
- discreto de grandezas contínuas, 225
- discreto de grandezas discretas, 224
- supervisório, 276

Conversor(es), 126

- análogo-digital, 133
- digital-analógico, 135

Correção, 155

Corrente, 169

CRM, 322

Cromatógrafo, 216

Curva de calibração, 159

D

Dejetos industriais, 7

Design

- de sistema, 258
- de sistemas de automação, 265

Deslocamento e posição, 186

Detector, 156

Diagrama causal, 55

Diagramas de Forrester, 59

Disponibilidade, 260

- de sistema, 258
- de sistemas de automação, 260, 261

Dispositivos de medição, 155, 156

Distúrbio, 3

E

E-commerce, 323

Efeito Coriolis, 200

Elemento(s)

- de controle, 12
- mecânico sensível, 193
- de controle finais, 13
- finais de controle, 127
- primários, 126

Energia, 148

Engenharia de Requisitos, 263

Engenheiro

- de automação, 8
- de processo, 7
- de produção, 8

Equações de Forrester, 61

Equipamentos dedicados, 247

ERP, 322

Erro de medição, 153

Escalabilidade, 128

Especificação

- de sistemas de automação, 262

Espectro de frequência, 279

Espectrômetro de massa, 216

Estabilidade, 158

Estratégia de automação, 290

Exatidão da medição, 152

F

Fábrica do Audi A1 em Bruxelas, 28

Fábrica da Ford Modelo

T preto, 27

Facilidade de manutenção

e migração, 128

Fase, 166

Fluxo contínuo, 21

Força, 183

Frequência, 171

Função de transferência, 90

- de um circuito elétrico RLC, 90

- de um sistema

- massa-mola-amortecedor, 93

G

Gestão

- da configuração, 296
 - da inovação tecnológica, 297
 - da manutenção, 300
 - da qualidade, 295
 - da qualidade e da produtividade, 300
 - da segurança, 302
 - de apoio à produção, 299
 - de aquisição, 294
 - de configuração, 296
 - de manutenção, 300
 - de operações, 298
 - de projetos de automação, 292
 - de requisitos, 264
- Grandes projetos, 36
- Grandeza(s), 148
- cinéticas, 183
 - e unidades, 148
 - elétricas, 166

I

Identificação e contexto, 259
Identificadores, 235
 eletromagnéticos, 237
 eletrônicos, 238
 identificadores por imagem, 238
 magnéticos, 237
 óticos, 236
Implantação
 de sistema, 258
 de sistemas de automação, 266
Incerteza de Medição, 154
Indicador, 157
Infravermelho e pirômetro, 176
Inspeção automatizada, 253
Instrumentação, 125
Instrumento(s)
 cegos, 113
 de medição, 155
 de medição indicador, 155
 indicadores, 127
 registradores, 127
Intertravamento, 226
Inversores, 243
ISA, 275
ISO/OSI, 284, 285
ITIL, 298

K

Know-how, 8

L

Linearizadores, 130
Localização física da equipe
 de automação, 299

M

Malha
 aberta, 57
 fechada, 57
Manutenção
 corretiva, 300
 de sistema, 258
 de sistemas de automação, 267
 preventiva, 301
Máquina de estados, 227
Mecanização, 5

Medição, 149
 de nível, 201
 de pressão, 192
 de vazão, 195
Medida(s)
 de composição de gases, 166
 de líquidos e gases, 166
 de temperatura, 175
 de umidade, pH e viscosidade, 166
Mensurando, 150
Método de medição, 151
Metrologia, 145
Modelamento matemático, 9
Modelo, 52
 de 7 camadas ISO / OSI, 284
 matemático, 11
Motores: CC, CA e de passo, 238

N

Norma IEC, 61131-3, 229
Norma S5.1, 113

O

Observabilidade, 2
Operação, 290, 298
 de sistema, 258
 de sistemas de automação, 267

P

Padrão(ões), 159
 de trabalho, 160
 primário, 160
 secundário, 160
PDFE, 280
Perturbação, 3
Placa de orifício, 200
Planejamento
 e gerência de projeto, 293
 programação e controle
 da produção, 8, 9
Plano
 da qualidade, 295
 de configuração, 296
Planta, 3
PLM, 306
PMBOK, 292
Política de automação, 290, 291

Potência, 172
PPCP, 8, 9
Precisão da medição, 153
Pressão diferencial, 193
Princípio de medição, 150
Procedimento de medição, 151
Processo, 3, 276
Produção
 agroindustrial, 29
 de autopeças, 33
 de cimento, 23
 de derivados de petróleo, 24
 de edifícios de aço no Japão e China, 37
 de energia elétrica, 23
 de paredes de madeira, 34
 de telefones celulares, 29
 discreta em massa, 20, 26
 com diferenciação, 20
 pura, 20
 discreta intermitente, 21
 em massa, 19
 na indústria moveleira, 34
Produto, 2
Programação da produção, 276
Projeto, 290, 292
Propriedade(s), 82
 do fluido, 198
 de tempo real, 128
 dos dispositivos de medição, 156
Protocolo de comunicação, 282

Q

Qualidade
 do processo, 146
 do projeto, 145
 e medição, 145

R

Redes de comunicação, 278
Relés, 238
Repetitividade de medição, 153
Reprodutibilidade de medição, 153
Requisitos
 desenvolvimento de, 263
 funcionais, 263
 gestão de, 264

 não funcionais, 263
 não técnicos, 263
Resolução, 158
Resposta
 do circuito elétrico RLC, 95
 do sistema mecânico, 102
Resultado de medição, 151
RFId, 321
Robôs para manufatura, 245
Rotâmetro, 200

S

Sala de controle, 138
SCADA, 137
Segurança, 116, 259, 260
 contra incidentes intencionais, 261
 contra incidentes randômicos, 261
Seletividade, 157
Semicondutores, 180
Sensibilidade, 157
Sensor, 156
 capacitivo, 233
 fotoelétrico, 233
 indutivo, 233
 mecânico, 232
 ultrassônico, 234
Serviço, 318
Set point, 2
Simulação de sistema, 52
Sintonia de controladores PID, 69
Sistema(s), 52
 controlado, 12
 de atendimento, 325
 de duas dimensões (2D), 309
 de duas e meia dimensões (2½D), 309
 de gestão do relacionamento com o cliente, 322
 de medição, 155
 de proteção, 226
 de serviço, 318
 de três dimensões (3d), 309
 de unidades, 149
 digital com alguns valores analógicos, 224
 integrados de gestão, 322
 metrológico, 161

Nacional de Metrologia, 161
 produtivo, 5, 19
 supervisórios, 136
SOA, 272, 277
Solenoides, 239
Stakeholder, 259
Supervisory Control and Data
 Acquisition, 137

T

TCP/IP, 286
Tecnologia(s)
 de processo, 8
 e serviços, 319
 eletrônica analógica, 129
 eletrônica digital, 132
 pneumática, 129
 sem fio, 280, 281
Telecomunicações
 a revolução das, 278
Tensão, 167
Termistores NTC e PTC, 179
Termógrafo, 182
Termômetros de resistência, 175
Termopares, 176
Topologia de rede, 282
Transdutor de Medição, 156
Transdutores, 165
Transformada de Laplace, 78
 de controladores automáticos,
 102
 de funções comuns, 79
Transmissores, 126

Trocador de calor, 111
Tubo
 de Pitot, 200
 de Venturi, 200
Turn-key, 8

U

Unidade de medida, 148

V

Validação de sistema, 259
Valor
 de uma grandeza, 149
 medido, 151
 nominal, 157
 verdadeiro, 152
Variável(is)
 controlada, 111
 de um sistema, 56
 discreta, 222
 manipulada, 111
Veículos automatizados, 251
Velocidade, 189
Vensim, 65
Verificação de sistema, 259
Vibração, 183
VIM, 146
Vocabulário Internacional
 de Metrologia, 146
Vórtice, 200

W

Wire frame, 309