

ANÁLISE DOS SISTEMAS DE MEDAÇÃO

Profª. Maryah Elisa Morastoni Haertel



2018



Copyright © UNIASSELVI 2018

Elaboração:

Profª. Maryah Elisa Morastoni Haertel

Revisão, Diagramação e Produção:

Centro Universitário Leonardo da Vinci – UNIASSELVI

Ficha catalográfica elaborada na fonte pela Biblioteca Dante Alighieri

UNIASSELVI – Indaial.

003

H136a Haertel, Maryah Elisa Morastoni
 Análise dos sistemas de medição / Maryah Elisa Morastoni
Haertel. Indaial: UNIASSELVI, 2018.

153 p. : il.

ISBN 978-85-515-0130-6

1. Sistemas.
I. Centro Universitário Leonardo Da Vinci.

APRESENTAÇÃO

Caro acadêmico! Bem-vindo ao livro didático da disciplina Análise dos Sistemas de Medição! Sou a professora conteudista, Dra. Maryah Elisa Morastoni Haertel vou ajudá-lo a percorrer o caminho na análise de sistemas de medição. Sou professora da Universidade do Sul de Santa Catarina (UNISUL) e pesquisadora voluntária do Laboratório de Metrologia e Automatização da Universidade Federal de Santa Catarina (Labmetro/UFSC). Já atuei também no Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC/Campus Gaspar). Minha vida acadêmica começou no Bacharelado em Física na UFSC, prosseguiu no Mestrado em Metrologia Científica e Industrial (Pós MCI/UFSC). Licenciatura em Física e Doutorado em Engenharia Mecânica, dentro da área de concentração Metrologia e Instrumentação – Metrologia Óptica. Em 2012 auxiliei na fundação do UFSC Chapter da SPIE (*International Society for Optics and Photonics*), sendo sua primeira presidente. Atuo atualmente em pesquisa com projetos e artigos, na área de metrologia óptica, reconstrução geométrica tridimensional e *pocket laboratories*, desenvolvendo e avaliando sistemas de medição.

Na Unidade 1 será apresentado o conceito de medição no ambiente industrial, destacando a sua importância nos resultados e qualidade industrial. Para isso, vamos explorar o conhecimento do sistema de medição para facilitar o acompanhamento de seus resultados. Além disso, serão apresentados parâmetros de análise de instrumentos de medição como tendência, repetitividade, reproduzibilidade, estabilidade e desvio linear de tendência, que auxiliarão na tomada de decisão quando do monitoramento do processo produtivo.

Na Unidade 2 serão apresentadas algumas ferramentas para a qualidade industrial, no monitoramento e medição, como histogramas, fluxogramas, diagrama de Pareto etc. Enfoque especial à folha de verificação, ferramenta indispensável para o monitoramento e de grande aplicação nas indústrias.

Na Unidade 3 será abordado o conceito de controle de processos em ambiente industrial, com enfoque em controle automático. Para isso, serão explicados os principais conceitos envolvidos, com modelos métodos de análise e algoritmos.

Bons Estudos!



Você já me conhece das outras disciplinas? Não? É calouro? Enfim, tanto para você que está chegando agora à UNIASSELVI quanto para você que já é veterano, há novidades em nosso material.

Na Educação a Distância, o livro impresso, entregue a todos os acadêmicos desde 2005, é o material base da disciplina. A partir de 2017, nossos livros estão de visual novo, com um formato mais prático, que cabe na bolsa e facilita a leitura.

O conteúdo continua na íntegra, mas a estrutura interna foi aperfeiçoada com nova diagramação no texto, aproveitando ao máximo o espaço da página, o que também contribui para diminuir a extração de árvores para produção de folhas de papel, por exemplo.

Assim, a UNIASSELVI, preocupando-se com o impacto de nossas ações sobre o ambiente, apresenta também este livro no formato digital. Assim, você, acadêmico, tem a possibilidade de estudá-lo com versatilidade nas telas do celular, tablet ou computador.

Eu mesmo, UNI, ganhei um novo *layout*, você verá frequentemente e surgirei para apresentar dicas de vídeos e outras fontes de conhecimento que complementam o assunto em questão.

Todos esses ajustes foram pensados a partir de relatos que recebemos nas pesquisas institucionais sobre os materiais impressos, para que você, nossa maior prioridade, possa continuar seus estudos com um material de qualidade.

Aproveito o momento para convidá-lo para um bate-papo sobre o Exame Nacional de Desempenho de Estudantes – ENADE.

Bons estudos!

BATE SOBRE O PAPO ENADE!



Olá, acadêmico!



Você já ouviu falar sobre o ENADE?

Se ainda não ouviu falar nada sobre o ENADE, agora você receberá algumas informações sobre o tema.

Ouviu falar? Ótimo, este informativo reforçará o que você já sabe e poderá lhe trazer novidades.



Vamos lá!



Qual é o significado da expressão ENADE?

EXAME NACIONAL DE DESEMPENHO DOS ESTUDANTES

Em algum momento de sua vida acadêmica você precisará fazer a prova ENADE.



Que prova é essa?



É **obrigatória**, organizada pelo INEP – Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira.

Quem determina que esta prova é obrigatória... O **MEC – Ministério da Educação**.

O objetivo do MEC com esta prova é o de avaliar seu desempenho acadêmico assim como a qualidade do seu curso.



Fique atento! Quem não participa da prova fica impedido de se formar e não pode retirar o diploma de conclusão do curso até regularizar sua situação junto ao MEC.



Não se preocupe porque a partir de hoje nós estaremos auxiliando você nesta caminhada.

Você receberá outros informativos como este, complementando as orientações e esclarecendo suas dúvidas.



Você tem uma trilha de aprendizagem do ENADE, receberá e-mails, SMS, seu tutor e os profissionais do polo também estarão orientados.

Participará de webconferências entre outras tantas atividades para que esteja preparado para #mandar bem na prova ENADE.

Nós aqui no NEAD e também a equipe no polo estamos com você para vencermos este desafio.

Conte sempre com a gente, para juntos mandarmos bem no ENADE!



SUMÁRIO

UNIDADE 1 – O PROCESSO DE MEDIÇÃO NA INDÚSTRIA	1
TÓPICO 1 – A IMPORTÂNCIA DA MEDIÇÃO	3
1 INTRODUÇÃO	3
1.1 POR QUE MEDIR?	4
1.2 O QUE É MEDIR?	5
1.3 MEDIÇÃO E CONTROLE NA INDÚSTRIA.....	8
RESUMO DO TÓPICO 1	10
AUTOATIVIDADE	11
 TÓPICO 2 – O SISTEMA DE MEDIÇÃO	13
1 INTRODUÇÃO	13
2 COMPOSIÇÃO DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO	14
2.1 CARACTERÍSTICAS DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO	15
2.2 FONTES DE PROBLEMAS COM OS SISTEMAS DE MEDIÇÃO.....	18
RESUMO DO TÓPICO 2	22
AUTOATIVIDADE	23
 TÓPICO 3 – PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO	25
1 INTRODUÇÃO	25
2 PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO	26
RESUMO DO TÓPICO 3	44
AUTOATIVIDADE	45
 UNIDADE 2 – MEDIÇÃO E ACOMPANHAMENTO DE DADOS NA INDÚSTRIA.....	49
TÓPICO 1 – ENSAIOS INDUSTRIALIS.....	51
1 INTRODUÇÃO	51
2 ENSAIOS: QUANDO, ONDE E POR QUÊ?	52
3 PREPARAÇÃO PARA OS ENSAIOS.....	53
4 DADOS, POPULAÇÃO E AMOSTRAS.....	54
5 ESTRATIFICAÇÃO	55
RESUMO DO TÓPICO 1	57
AUTOATIVIDADE	58
 TÓPICO 2 – FERRAMENTAS PARA A QUALIDADE	59
1 INTRODUÇÃO	59
2 FLUXOGRAMA	60
2.1 DIAGRAMA DE CAUSA E EFEITO	62
2.2 DIAGRAMA DE PARETO.....	63

2.3 HISTOGRAMA	67
2.4 DIAGRAMA DE DISPERSÃO	68
2.5 DIAGRAMA DE CONTROLE	69
RESUMO DO TÓPICO 2	70
AUTOATIVIDADE	71
TÓPICO 3 – FOLHA DE VERIFICAÇÃO	73
1 INTRODUÇÃO	73
2 DEFINIÇÃO	73
2.1 VANTAGENS E DESVANTAGENS	74
2.2 COMO FAZER?	75
2.2.1 Tipos	76
2.2.2 Folha de verificação para distribuição de um item de controle de um processo produtivo	76
2.2.3 Folha de verificação para classificação de defeito	78
2.2.4 Folha de verificação para localização de defeitos	79
2.2.5 Folha de verificação para identificação de causas de defeitos	81
2.2.6 Checklist	81
RESUMO DO TÓPICO 3	83
AUTOATIVIDADE	84
TÓPICO 4 – COLETA DE DADOS E RELATÓRIO	91
1 INTRODUÇÃO	91
2 COLETA DE DADOS	91
3 RELATÓRIO – POR QUE E PARA QUEM?	92
4 ESTRUTURAÇÃO DE UM RELATÓRIO	93
5 GRÁFICOS E ILUSTRAÇÕES	93
RESUMO DO TÓPICO 4	99
AUTOATIVIDADE	100
UNIDADE 3 – INTRODUÇÃO AO CONTROLE AUTOMÁTICO DE PROCESSOS	101
TÓPICO 1 – CONCEITOS FUNDAMENTAIS EM CONTROLE DE PROCESSOS	103
1 INTRODUÇÃO	103
2 UM POUCO DE HISTÓRIA	104
3 DEFINIÇÕES IMPORTANTES	105
3.1 PLANTA	105
3.2 PROCESSO	105
3.3 SISTEMA	106
3.4 SISTEMA DE CONTROLE	106
3.5 DISTÚRBIO OU PERTURBAÇÃO	106
3.6 VARIÁVEL CONTROLADA	106
3.7 VARIÁVEL MANIPULADA	107
3.8 CONTROLE REALIMENTADO	107
3.9 SISTEMA DE CONTROLE REALIMENTADO	107
3.10 ALGORITMO DE CONTROLE	107
4 EXEMPLO DE SISTEMA DE CONTROLE	107
RESUMO DO TÓPICO 1	109
AUTOATIVIDADE	111

TÓPICO 2 – MALHAS DE CONTROLE	113
1 INTRODUÇÃO	113
2 DIAGRAMA DE BLOCOS	113
3 CONTROLE EM MALHA ABERTA	115
3.1 PARTES DO CONTROLE EM MALHA ABERTA	116
4 CONTROLE EM MALHA FECHADA	116
4.1 PARTES DO CONTROLE EM MALHA FECHADA	117
4.2 TIPOS DE CONTROLADORES	118
RESUMO DO TÓPICO 2	119
AUTOATIVIDADE	120
TÓPICO 3 – ESTABILIDADE E ALGORITMOS DE CONTROLE	121
1 INTRODUÇÃO	121
2 ESTABILIDADE	121
3 CARACTERÍSTICAS DINÂMICAS DO PROCESSO	122
3.1 FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA	122
3.2 CAPACITÂNCIA	123
3.3 TEMPO MORTO	123
3.4 SISTEMAS DE CONTROLE SISO E MIMO	124
4 ALGORITMOS DE CONTROLE	124
4.1 CONTROLE LIGA-DESLIGA	124
4.2 CONTROLE PROPORCIONAL (P)	125
4.3 CONTROLE INTEGRAL (I)	127
4.4 CONTROLE DERIVATIVO (D)	129
4.5 CONTROLES MISTOS	130
4.5.1 Controle Proporcional Integral Derivativo (PID)	131
5 ARGUMENTOS QUANTO À ESCOLHA DO CONTROLE	132
LEITURA COMPLEMENTAR	133
RESUMO DO TÓPICO 3	137
AUTOATIVIDADE	138
TÓPICO 4 – INDÚSTRIA 4.0	139
1 INTRODUÇÃO	139
2 UM POCO DE HISTÓRIA	140
3 PRINCÍPIOS DA INDÚSTRIA 4.0	141
4 INDÚSTRIA 4.0 NO BRASIL	144
RESUMO DO TÓPICO 4	146
AUTOATIVIDADE	147
REFERÊNCIAS	149
TABELA EM ANEXO COEFICIENTES t DE STUDENT	153

O PROCESSO DE MEDIÇÃO NA INDÚSTRIA

OBJETIVOS DE APRENDIZAGEM

A partir dos estudos desta unidade, você será capaz de:

- reafirmar a importância da medição e controle nos processos industriais;
- oferecer base de conhecimento para a tomada de decisão quanto ao resultado de ensaios e medições de grandezas de interesse;
- calcular e interpretar os parâmetros de análise de instrumentos de medição, como tendência, repetitividade, reproduzibilidade, estabilidade e desvio linear de tendência.

PLANO DE ESTUDOS

Caro acadêmico! Esta unidade de estudo encontra-se dividida em três tópicos de conteúdos. Ao longo de cada um deles, você encontrará sugestões e dicas que visam potencializar os temas abordados, e ao final de cada um estão disponíveis resumos e autoatividades que visam fixar os temas estudados.

TÓPICO 1 – A IMPORTÂNCIA DA MEDIÇÃO

TÓPICO 2 – O SISTEMA DE MEDIÇÃO

TÓPICO 3 – PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO

A IMPORTÂNCIA DA MEDAÇÃO

I INTRODUÇÃO

Conhecemos o que medimos, essa é a realidade dos nossos trabalhos em ciência, tecnologia e na indústria. O ato de medir, ou seja, de dar a uma grandeza um número, fornece base para nossas decisões cotidianas:

- Quantas pessoas estão no jantar?
- Teremos 10 convidados.
- Então, comprarei 20 pães de trigo.

O diálogo acima parece fora de contexto, não é? Afinal, estamos falando nessa disciplina de análise de sistemas de medição. É um bom exemplo da importância da medição, sabendo o número de pessoas que vêm para o jantar, podemos fornecer a quantidade adequada de comida. Afinal, se comprarmos pães a menos, poderia haver constrangimento; se comprarmos pães a mais, haveria desperdício de pães e, consequentemente, de dinheiro. Esse é o mesmo princípio das medições industriais, medir para determinar indicadores de produção, de forma que haja uma produção eficiente, sem desperdício de matéria-prima, produto e/ou dinheiro.

Segundo Fonseca (2008, p. 3), “os estudos de Análise do Sistema de Medição são importantes para a garantia da consistência nos processos produtivos, no sentido de avaliar a influência dos erros de medição na qualidade das decisões tomadas a partir dos dados coletados”.

Neste primeiro tópico discutiremos sobre a importância do processo de medição na indústria.

1.1 POR QUE MEDIR?

Como disse William Edwards Deming “não se gerencia o que não se mede, não se mede o que não se define, não se define o que não se entende, não há sucesso no que não se gerencia” (LUCINDA, 2010, p. 62).

A conformidade, qualidade e confiança nos produtos produzidos por uma certa empresa é um dos motivos que fazem o cliente gostar do produto e retornar à mesma empresa caso seja necessário fazer uma nova compra, certo? Claro que há outros motivos para o cliente voltar, o *design* do produto e o atendimento ao consumidor fazem parte do diferencial, porém, no mundo tecnológico atual, a busca por qualidade e conformidade também gera fator decisivo de compra. Segundo Konrath (2008, p. 15), “o aperfeiçoamento dinâmico da qualidade torna-se um instrumento para o aumento da produtividade e redução de custos”.

A busca de elevação da qualidade de conformação, evidentemente, também exige esforços tecnológicos voltados para aperfeiçoamentos do processo e dos materiais, de maneira que se obtenham melhorias na conformação e redução nos índices de perdas (TOLEDO, 1990, p. 44).

O processo de produção tecnológico, voltado à redução das perdas, é de interesse tanto da indústria quanto do consumidor. Além disso, dependendo do setor em que a indústria está inserida, pode haver multas por produtos fora de conformidade. Segundo Toledo (2014), as informações sobre os produtos vêm de ensaios e inspeções, e para que o resultado seja confiável, é necessária uma análise de adequação entre o mensurando e o sistema de medição, ou seja, não vamos medir o comprimento de uma parede usando um paquímetro, a escolha dos instrumentos corretos já diminui uma parcela das incertezas de medição. Somente com medição e inspeção é possível fabricar peças que se encaixem:

Um outro exemplo é a medição de vazão na transferência de custódia e nos controles de processos industriais. Neste caso, pode-se dizer que a transferência do produto (que pode ser um combustível, fluido lubrificante, produto de limpeza, água etc) é equivalente a um volume de dinheiro transferido de uma empresa a outra. Quanto mais exata é a medição, menor é a margem de injustiça que está sendo cometida com um dos lados, pois se a leitura do medidor de vazão mostrar um valor maior do que o verdadeiro, comete-se uma injustiça contra quem está comprando, na mesma proporção do seu erro (FERNANDES; COSTA; SILVA, 2009, p. 4).



Mensurando é a grandeza a ser quantificada na medição.

Além de garantir a produção de qualidade, ensaios e medições podem sinalizar meios e métodos de melhorar a produção:

controle de qualidade envolve um conjunto de operações de medição com função de assegurar que os produtos fabricados por uma empresa atendam plenamente às especificações técnicas para serem introduzidos no mercado, sendo um requisito fundamental para a sobrevivência de qualquer empresa” (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008, p. 279).

Um exemplo disso é o acompanhamento de produção de uma máquina de corte de tecidos, no qual é possível verificar a quantidade de partes cortadas por hora, determinando a produção máxima da máquina por hora e verificando a capacidade de produção. Portanto, uma enorme importância na medição em meio industrial.

A indústria brasileira está em crescimento consistente, demandando maior volume e maior qualidade dos serviços metrológicos. A inserção do Brasil no mercado globalizado requer uma forte base metrológica para promover exportações e barrar importações sem qualidade. A Metrologia viabiliza um subsídio ideal à competitividade, além do crescimento da consciência da cidadania, o que aumenta a demanda por serviços de qualidade relacionados com a saúde, a segurança e o meio ambiente (FERNANDES; COSTA; SILVA, 2009, p. 2).

O acompanhamento, a criação e análise dos sistemas de medição e de seus impactos na produção industrial são responsabilidade da metrologia.

Os sistemas de controles metrológicos acrescentam benefícios aos sistemas produtivos, reduzem os custos com trabalho e retrabalho. Influenciam diretamente na qualidade dos produtos e serviços, além de agregar credibilidade para as empresas que os adotam. Nesses sistemas, especificamente, a aplicação da calibração e a avaliação da incerteza conferem qualidade metrológica a instrumentos e padrões do processo de produção (FERNANDES; COSTA; SILVA, 2009, p. 3).

1.2 O QUE É MEDIR?

Medir é comparar uma característica de um objeto com outra, é atribuir um número e uma unidade de medida a um mensurando. Essa ação, que é quase que natural para nós, serve como base para as mais variadas partes da economia e política de um país. Imagine como seria a economia externa, com ações de compra e venda entre os países, sem que houvesse medições e a utilização de um padrão em comum.



Em 2018 a definição física de quilograma pode mudar. Disponível em:
<http://revistapesquisa.fapesp.br/2017/06/20/para-manter-o-peso/>.

Desta forma, podemos conceituar a ação de medir como o definido por Albertazzi e Sousa:



"Medir é o procedimento experimental pelo qual o valor momentâneo de uma grandeza física (mensurando) é determinado como um múltiplo e/ou fração de uma unidade, estabelecida por um padrão e reconhecida internacionalmente" (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008, p. 3).

A medição é sempre um procedimento experimental quantitativo, no qual seu resultado depende diretamente do instrumento de medição. Assim, o seu operador terá uma característica referente à forma física, atribuindo um valor e uma unidade de medida, desde que esta unidade tenha um padrão e tenha reconhecimento internacional. Claro que qualquer pessoa pode definir uma nova unidade, com um novo padrão, porém, justamente para resolver problemas de aceitação e conversão de uma nova unidade é que foi criado em 1960 o Sistema Internacional de Unidades (S.I.). Segundo o Inmetro, "o SI foi adotado também pelo Brasil em 1962, e ratificado pela Resolução nº 12 (de 1988) do Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial - Conmetro, tornando-se de uso obrigatório em todo o território nacional" (BRASIL, 2012, s.p.).

Quando falamos na importância da escolha do sistema de medição e do preparo do operador, sinalizamos a importância do procedimento de medição. Um procedimento de medição de qualidade no caráter industrial envolve algumas etapas:

De modo geral, a **quantificação de determinada característica de um produto** é obtida por meio de definição das unidades padronizadas, conhecidas por unidades de medida, que permitem a conversão

de abstrações em grandezas quantificáveis, como comprimento e massa em metro e quilograma, respectivamente; disponibilidades de instrumentos, que são calibrados em termos de capacidade para medição dessas unidades de medida padronizadas; uso desses instrumentos para quantificar ou medir as "dimensões" do produto ou do processo em análise, leitura e registro dos dados obtidos por meio das medições realizadas pelos instrumentos de medição (TOLEDO, 2014, p. 29).



Uma descrição mais completa desses passos será realizada na Unidade 2, abordando o procedimento de medição, ensaios e monitoramento.

Além do S.I., em algumas indústrias pode ser utilizado o sistema inglês. Embora não seja o padrão, o sistema inglês é mais antigo e ainda é muito utilizado em países como os Estados Unidos e pode ser importante quando o assunto é comércio exterior. É importante tomar cuidados extras quando for necessária a conversão de unidades dentro da avaliação de um sistema de medição, pois nem sempre esse cálculo é preciso.

Sempre que possível, utilize sistemas de medição que possuam a unidade de medição de interesse no processo industrial. Um exemplo de utilização de unidades do sistema inglês é a indústria automotiva. Pense em qual unidade é expresso o diâmetro de uma roda de um carro? Isso mesmo, polegada (no S.I. seria em milímetros). A pressão dentro do pneu? Ela é expressa em psi, quando no S.I. deveria ser expressa em Pascal (Pa).



Para dúvidas sobre as unidades, consultar o livro "Sistema Internacional de Unidades", publicação do INMETRO, que discute as unidades padrão adotadas no Brasil.

FIGURA 1 – SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES



FONTE: Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/si_versao_final.pdf>. Acesso em: 10 set. 2017.

1.3 MEDAÇÃO E CONTROLE NA INDÚSTRIA

"A instrumentação é a base para o controle de processos na indústria" (Dunn, 2013, p. 1) e o controle de processos só é possível com o conhecimento das diversas variáveis que fazem parte dele, como temperatura, pressão, entre outros. Neste caso, conhecer significa medir as grandezas necessárias para garantir a qualidade do processo em questão. Chamamos de instrumento industrial o dispositivo utilizado para essa medição. O controle dos processos industriais visa melhorar o sistema produtivo, sendo um aliado no controle de qualidade e eficiência do processo.

O controle de processos é o controle automático de uma variável de saída por meio da medição da amplitude do parâmetro de saída a partir do processo, comparando-a com um valor desejado ou estabelecido e realimentando um sinal de erro no intuito de controlar uma variável de entrada" (DUNN, 2013, p. 2).

A partir do conceito acima, relacionado por Dunn, observa-se que o controle pode ser um ajuste automatizado de uma variável de entrada a partir dos dados da saída do processo (ou de uma etapa dele). A automatização é a chave do processo de controle industrial. Desta forma, o conceito de medição torna-se amplo: para um controle efetivo e automatizado, a medição pode deixar de ser realizada por um operador a cada instrumento, apenas delegando a ele a supervisão e calibração do sistema. Diminui-se os erros humanos associados e cria-se uma conformidade no produto de saída, diminuindo a reprodutibilidade por operador e chegando a uma incerteza dentro do máximo desejado para o processo. Porém, depende-se cada vez mais de um sistema de controle e das tolerâncias determinadas pelo programador para a detecção e monitoramento de possíveis pontos de falha no processo industrial.

O estado de controle ideal de um processo (de manufatura, de medição etc.) é aquele em que as causas especiais estão sob controle, atuando no processo somente as causas aleatórias, as quais, dada uma determinada situação, não são possíveis de controlar (TOLEDO, 2014, p. 106).

Por isso, é necessário ter um grande conhecimento do processo a ser analisado, assim como de seus módulos e etapas. O conhecimento gera correções nos possíveis erros sistemáticos e melhora o processo como um todo. As causas aleatórias serão analisadas e compensadas/resolvidas pelo sistema controle de processos aplicado, agindo ativamente durante o processo industrial.



Conhecer o processo não significa apenas as ferramentas apresentadas. Significa entender todos os processos da manufatura, a forma como a matéria-prima é transformada e como os operadores atuam no processo.

No processo de controle indústrial é realizado o monitoramento de várias grandezas, como temperatura, vazão, pressão, tempo, entre outras, sendo que a automatização pode fazer com que todas possam ser observadas e monitoradas, e se necessário, corrigidas, ao mesmo tempo.

No controle também é realizada a verificação de interdependências, mostrando a influência de uma grandeza medida em outra, por exemplo, se a vazão medida aumentar, o tempo para chegar a tal equipamento diminui. Todos esses números são controlados via um sistema central que é conectado aos diversos sensores. Para isso a tecnologia está em pleno desenvolvimento e novos sensores, métodos e controladores são criados dia a dia (DUNN, 2013).

Além disso, o controle de processos fornece ferramentas para análise de produção e produtividade, diminuindo o desperdício de matérias-primas, insumos e produtos fora de conformidade; gera um conhecimento sobre a capacidade real de produção, melhorando a visão da empresa pelos clientes, que acabam tendo um produto com menos variabilidade e cumprimento do tempo de fabricação e entrega (DUNN, 2013). Além de diagnosticar problemas antes, mostrando uma maior quantidade de dados adquiridos, auxiliando na tomada de decisão e melhorando o tempo de correção do sistema, caso seja necessário.

RESUMO DO TÓPICO 1

Nesse tópico, você viu que:

- Metrologia é a ciência responsável por estudar e desenvolver meios e métodos de medição.
- A medição em sistemas industriais tem impacto na qualidade da produção.
- Somente é possível conhecer o seu processo medindo.
- Medir é atribuir um valor a uma grandeza física junto com uma unidade reconhecida internacionalmente.
- Sempre que possível, utilize um sistema de medição que exprime o resultado direto na unidade de medida de interesse.
- O controle de processos visa melhorar o sistema produtivo medindo variáveis de interesse e controlando seu valor e seu erro associado.
- É possível controlar um processo industrial com muitas variáveis ao mesmo tempo, agindo em correção, se necessário.



- 1 A partir da frase de Peter Drucker , “o que pode ser medido, pode ser melhorado” (QUINTELLA, 2017, p. 46), disserte sobre a importância da medição no sistema industrial.

FONTE: QUINTELLA, M. *Empreendedorismo e Gestão de Negócios*. Rio de Janeiro: Synergia, 2017.

- 2 Segundo Fernandes, Costa e Silva (2009, p. 3), ”os sistemas de controles metrológicos acrescentam benefícios aos sistemas produtivos, reduzem os custos com trabalho e retrabalho e influenciam diretamente na qualidade dos produtos e serviços, além de agregar credibilidade para as empresas que os adotam”.

FONTE: FERNANDES, W. D.; COSTA, P. L. O.; SILVA, J. Metrologia e Qualidade – Sua importância como fatores de competitividade nos processos produtivos. In: **XXIX Encontro Nacional de Engenharia de Produção**. Salvador: ABEPRO, 2009.

Procure em jornais, revistas, periódicos e dissertações exemplos reais de como a instrumentação pode auxiliar na melhoria do sistema produtivo nas empresas.

- 3 O custo pela não conformidade de produtos pode ser maior que o esperado e nem sempre os danos são somente financeiros. Segundo Toledo (2014), nessa situação a não conformidade existente poderá ser identificada apenas no futuro pelo cliente, quando o produto já tiver sido distribuído, ou em uso no mercado, por um organismo de regulamentação oficial, como o Instituto Nacional de Pesos e Medidas (INPM), o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro) e o Sistema de Inspeção Federal (SIF).

A partir do seu aprendizado neste tópico e da citação acima, responda Verdadeiro (V) ou Falso (F):

- () O controle de processos fornece ferramentas para análise de produção e produtividade e gera um conhecimento sobre a capacidade real de produção.
- () As atividades comerciais entre países (comércio exterior) é pouco afetado pelas definições metrológicas, pois todas as indústrias possuem o mesmo padrão de qualidade.
- () É inútil acompanhar o processo de medição, pois os sistemas de medição possuem estabilidade por um bom tempo.
- () A medição, ensaios e inspeções determinam indicadores de produção, de forma que haja uma produção eficiente, sem desperdício de matérias-primas, produtos e/ou dinheiro.
- () O controle de processos fornece ferramentas para análise de produção, porém sua análise gera mais problemas e desperdício com a alteração do processo, por isso só deve ser realizado se houver reclamação do consumidor ou de órgãos de regulamentação.

O SISTEMA DE MEDAÇÃO

1 INTRODUÇÃO

Segundo o Inmetro (2012), podemos definir um sistema de medição como:

Conjunto de um ou mais instrumentos de medição e frequentemente outros dispositivos, compreendendo, se necessário, reagentes e fontes de alimentação, montado e adaptado para fornecer informações destinadas à obtenção dos valores medidos, dentro de intervalos especificados para grandezas de naturezas especificadas (BRASIL, 2012, p. 34).



"Um sistema de medição pode consistir em apenas um instrumento de medição" (BRASIL, 2012, p. 34).

Desta forma, um sistema de medição normalmente é composto por várias partes e deve ser adequado para resolver um problema de medição. A escolha do sistema adequado requer análises de cunho tecnológico, científico e econômico. Alguns dos critérios levados em consideração para a escolha do sistema de medição adequado são citados abaixo:

- Custo do sistema de medição.
- Disponibilidade do sistema de medição.
- Adequação de parâmetros com o mensurando (resolução, dimensões etc.).
- Existência de calibradores adequados ao mensurando.
- Erro de medição associado.

Neste tópico, relembraremos alguns dos parâmetros característicos de um sistema de medição, junto com os principais cuidados a serem tomados com o sistema de medição, objetivando uma análise mais fiel dos parâmetros de avaliação de ensaios.

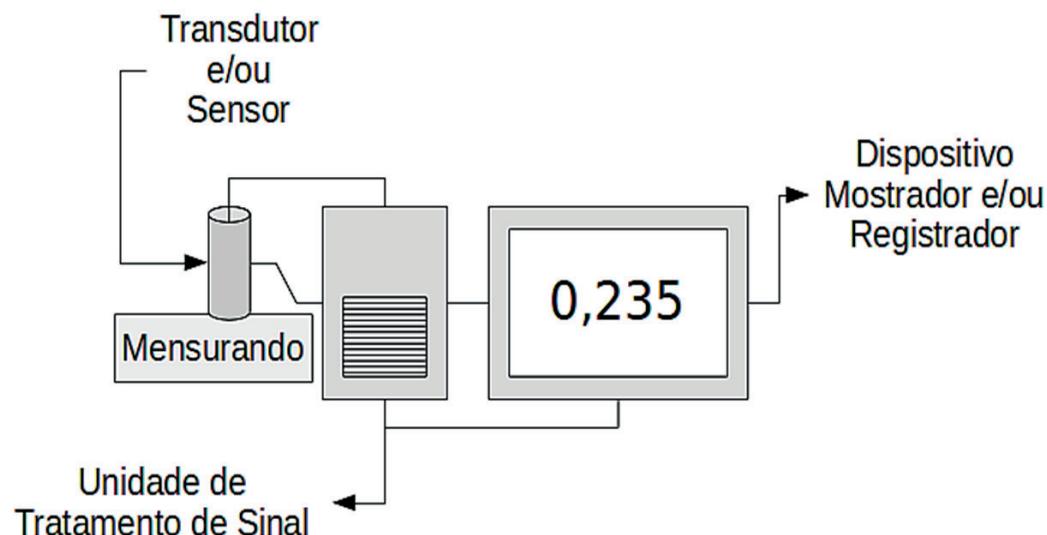
2 COMPOSIÇÃO DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO

Conforme a descrição de um sistema de medição do Inmetro (2012), observa-se que um sistema de medição não é somente um dispositivo, mas todos os outros dispositivos acoplados.

De forma geral, podemos descrever um sistema de medição conforme descrito e esquematizado por Albertazzi e Sousa (2008), como adaptado e mostrado na figura a seguir, em que temos um transdutor e/ou um sensor, uma unidade de tratamento de sinal e um dispositivo mostrador.

O transdutor é a parte do sistema de medição que tem contato com o mensurando, ou seja, segundo Albertazzi e Sousa (2008), é a parte do sistema de medição que transforma a grandeza física a ser medida em outro tipo de sinal, mais fácil de ser medido. Vamos chamar esse sinal de sinal de medição. “O sinal de medição pode ser mecânico, pneumático, elétrico ou de outra natureza, mas estará sempre relacionado ao valor do mensurando por meio de uma função bem definida, normalmente linear” (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008, p. 99).

FIGURA 2 – PARTES DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO



FONTE: Adaptado de Albertazzi e Sousa (2008)

A unidade de tratamento de sinais é responsável por “processar o sinal de medição do transdutor e normalmente amplificar a sua potência” (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008, p. 100). Esta unidade é responsável por melhorar o sinal vindo do transdutor, apto a ser interpretado pelo dispositivo mostrador/registrador. Para isso, a unidade pode realizar operações de processamento nos sinais, como filtragem, integração e amplificação. Esse procedimento pode ser feito via meios analógicos diretos ou digitais (é feita uma amostragem do sinal analógico vindo do transdutor e gerando um sinal digital).

Por fim, o dispositivo mostrador/registrador é o responsável por levar a informação da medição, ou seja, o número relacionado com a grandeza, para o usuário do sistema. Este dispositivo pode ser um número simples mostrado num monitor (neste caso, um dispositivo mostrador), ou num ponto impresso em um gráfico (nesse caso, um dispositivo registrador).



É importante lembrar que nem todos os sistemas de medição são compostos pelas três partes. Sistemas de medição simples, como um paquímetro, não necessitam de uma unidade de tratamento de sinais.

2.1 CARACTERÍSTICAS DE UM SISTEMA DE MEDAÇÃO

Um sistema de medição pode ser definido a partir de diversos parâmetros. Vamos relembrar alguns, visando sua utilização na próxima unidade.

a) Resolução

Segundo Toledo (2014, p. 33), resolução é “a menor unidade de leitura do dispositivo de medição que limita o processo de detecção de variáveis entre os objetos medidos”. A resolução é importante porque informa ao operador/usuário qual a menor diferença de valores que o sistema de medição poderá medir.

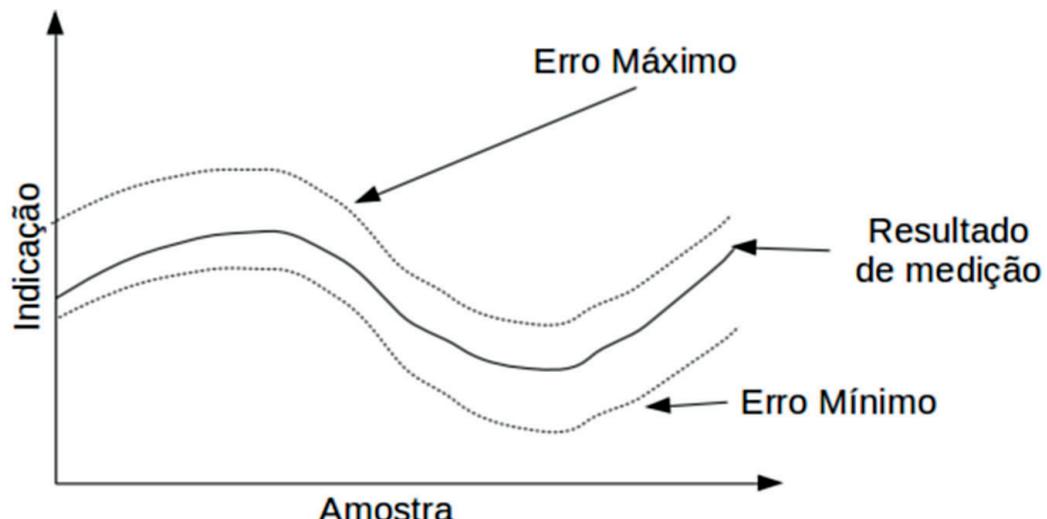
b) Sensibilidade

Segundo Albertazzi e Sousa (2008, p. 110), sensibilidade é “o cociente entre a variação da resposta (sinal de saída) e a correspondente variação do estímulo sinal de entrada”. A acessibilidade mostra o quanto varia a indicação do sinal de saída conforme a variação do sinal de entrada (variação da grandeza física medida).

c) Curva de erros

Segundo Albertazzi e Sousa (2008), a curva de erros é um gráfico que representa os erros apresentados pelo sistema de medição como função da sua indicação. Para cada valor da indicação o gráfico mostra dois outros valores, seu limite mínimo de erro e seu limite máximo de erro. Sua construção pode ser muito vantajosa, pois a variação dos erros numa medida não é necessariamente constante em toda a faixa de medição do sistema de medição, sendo possível assim analisar quais áreas têm menores (ou maiores) erros associados.

FIGURA 4 – EXEMPLO DE CURVA DE ERROS



FONTE: A Autora

d) Estabilidade

Segundo Albertazzi e Sousa (2008, p. 121), estabilidade é “a aptidão de um sistema de medição em manter constantes suas características metrológicas”. Essa avaliação é feita sobre uma grandeza de influência, sendo muito comum a estabilidade temporal, visto a importância de um sistema de medição se manter estável por longos períodos de tempo, principalmente em condições industriais. Outra estabilidade de interesse é a térmica, pois nas condições de chão de fábrica sabemos que pode haver grande variação de temperatura. Quando ocorre uma variação na indicação por influência de outra grandeza, denominamos sua taxa como deriva.

e) Precisão e Exatidão

Precisão e exatidão são expressões qualitativas (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008) que se referem ao grau de concordância entre diversas medições, assim como entre a medição e seu valor de referência. Uma medição exata possui valor medido muito próximo ao seu valor de referência. Já uma medição precisa mostra pouca diferença entre vários valores medidos.

f) Rastreabilidade

Segundo Toledo (2014, p. 34), rastreabilidade é “a propriedade de uma medição ou do valor de um padrão estarem relacionados a referências estabelecidas, geralmente padrões nacionais ou internacionais, por meio de uma cadeia contínua de comparações”. A rastreabilidade é muito importante no contexto industrial, pois mostra ao mercado a confiabilidade da empresa, de sua produção e de seus produtos.

g) Incerteza-padrão

Segundo Albertazzi e Souza (2008, p. 57), “a incerteza-padrão é uma medida da intensidade da componente aleatória do erro de medição”. Desta forma, quando calculamos a incerteza-padrão de uma população (n), usamos o cálculo do desvio padrão da amostra, na forma:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_i - \bar{I})^2}{n-1}} \quad (1)$$

Em que:

S é o desvio padrão da amostra;

I_i é a i-ésima medição do sistema de medição;

\bar{I} é a média das n medições do sistema de medição;

n é o número de medições realizadas.

2.2 FONTES DE PROBLEMAS COM OS SISTEMAS DE MEDIÇÃO

Além das características técnicas do sistema, a medição pode ser afetada por outros parâmetros. Podemos citar, por exemplo, o método e procedimento estabelecido pelo operador para a medição. O Inmetro (2012) define o método e o procedimento de medição como “método de Medições de descrição genérica de uma organização lógica de operações utilizadas na realização de uma medição” (BRASIL, 2012, p. 17).

Procedimento de Medições de descrição detalhada de uma medição de acordo com um ou mais princípios de medição e com um dado método de medição, baseada num modelo de medição e incluindo todo cálculo destinado à obtenção de um resultado de medição.



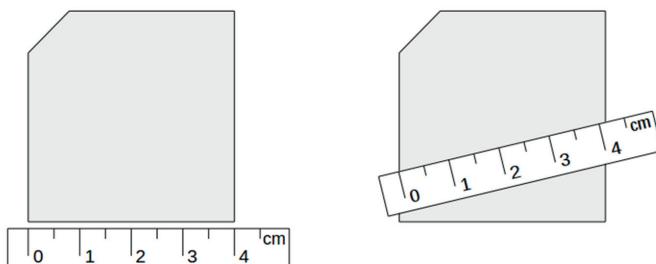
“Um procedimento de medição é geralmente documentado com detalhes suficientes para permitir que um operador realize uma medição” (INMETRO, 2012, p. 17).

Assim sendo, é de responsabilidade da indústria assegurar que os métodos e procedimentos corretos sejam aplicados nos momentos de medição, ensaio e inspeção. Segundo a ISO 9001: 2008, que discorre sobre os requisitos dos sistemas de controle de qualidade,

A organização deve planejar e implementar os processos necessários de monitoramento, medição, análise e melhoria para, a) demonstrar a conformidade aos requisitos do produto, b) assegurar a conformidade do sistema de gestão da qualidade, e c) melhorar continuamente a eficácia do sistema de gestão da qualidade. Isto deve incluir a determinação dos métodos aplicáveis, incluindo técnicas estatísticas e a extensão de seu uso (BRASIL, 2008, p. 12).

Um procedimento de medição inadequado pode invalidar as medições, não detectando as variações do mensurando, por exemplo, o uso de um instrumento de forma inadequada pode gerar erros importantes. Um exemplo simples para entender o que o uso de um instrumento pode gerar é a medição de um pedaço de papel com uma régua, como as réguas escolares de 30 cm. É muito fácil medir o comprimento do papel se a régua usa como guia a borda desse papel. Porém, para medir seu comprimento a partir de outra posição, sem uma guia específica, normalmente ocorrem erros de posicionamento, que geram medições incorretas. O exemplo está ilustrado na figura a seguir:

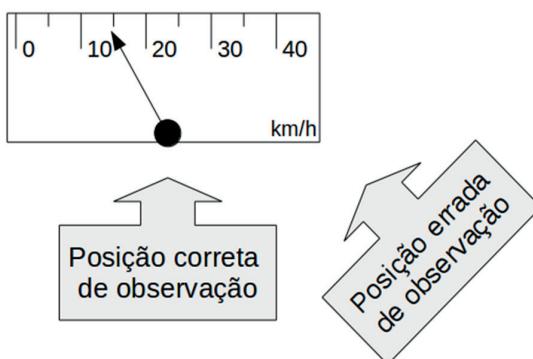
FIGURA 5 – EXEMPLO DE ERRO DE POSICIONAMENTO DE SISTEMA DE MEDIÇÃO



FONTE: A autora

O próprio posicionamento do operador em relação à escala pode gerar problemas como o erro de paralaxe. Observa-se lateralmente um valor na escala, porém, ao olhar a escala de frente (jeito correto), observa-se um valor completamente diferente. Esse problema ocorre em sistemas de medição com dispositivo mostrador composto por uma escala e um ponteiro, mas vemos também em sistemas digitais, nos quais, muitas vezes, fica impossível ler o resultado de medição caso haja um certo ângulo entre a linha de visão do operador e do mostrador digital. Acompanhe a seguir a Figura 6, que apresenta o posicionamento do operador em relação à escala.

FIGURA 6 – EXEMPLO DE ERRO DE POSICIONAMENTO DO OPERADOR EM RELAÇÃO À ESCALA



FONTE: A autora

Dentre os problemas que podem ocorrer na utilização de um sistema de medição, além da escolha do método e procedimento, podemos citar:

- **Escolha de um sistema de medição inadequado:** ao conhecer o problema de medição, é necessário fazer uma busca sistemática pelo sistema de medição adequado. Um exemplo de má escolha é a utilização de um termômetro de mercúrio para aferir temperatura dentro de uma máquina, cujas alterações de valor sejam da ordem de $0,05^{\circ}\text{C}$. Neste caso, é recomendado o uso de um termopar, com resolução adequada e possibilidade de automação da medição em conjunto com a máquina.
- **Variabilidade da peça a ser medida:** por motivos de fabricação, as peças a serem medidas podem vir com erros estruturais, como medidas realmente fora da convencional, falta de paralelismo entre lados, entre outros. O processo espera peças dentro da tolerância, a existência dessas deformidades pode causar incertezas quanto ao resultado das medições realizadas.
- **Preparação inadequada do operador do sistema de medição:** o operador do sistema de medição deve ter todo o preparo necessário para aferir qualidade às medições realizadas, sendo um importante efeito de incerteza nos resultados dos sistemas de medição. Operadores mal preparados podem executar os ensaios e medições de maneiras incorretas, podendo inclusive gerar defeitos no sistema de medição. Um exemplo disso é na utilização de paquímetros, um excesso de força no posicionamento do encosto móvel pode acarretar em folgas, resultando no aumento de incerteza de medição.
- **Ambiente de medição inadequado:** o ambiente pode ser fundamental durante o processo de medição, agindo diretamente no sistema de medição, assim como no mensurando. Um exemplo da influência do ambiente são alterações na temperatura durante a medição de grandezas geométricas, como o comprimento, por exemplo. As alterações na temperatura provocam alterações no comprimento, ocasionando incertezas no resultado de medição. Outros exemplos de agentes que podem estar no ambiente de medição e podem acarretar incertezas são a sujeira, umidade, óleo etc.
- **Método de calibração adequado:** todo sistema de medição deve ser calibrado. Alguns têm uma necessidade de uma periodicidade maior, ou precisam de uma variação de tempo menor entre as medições. A calibração pode ser realizada na indústria ou em um laboratório credenciado. Porém, a escolha do método e padrão de calibração, junto com o período necessário entre calibrações, pode fornecer incertezas ao resultado da medição.
- **Registro inadequado dos dados de medição:** mesmo sendo parte do procedimento de medição, é importante ressaltar a necessidade de cuidados no registro. Detalhes como localização do sistema de medição, temperatura, data, hora, operador, leitura e correção aplicada devem ser corretamente anotados.

- **Análise inadequada dos dados de medição:** a estatística é a ferramenta utilizada para a análise de dados pontuais, de forma que possam ser extrapolados. O correto do procedimento de cálculo e interpretação das análises realizadas é necessário para a tomada de decisões.

RESUMO DO TÓPICO 2

Nesse tópico, você viu que:

- Um sistema de medição pode ser constituído de um transdutor/sensor, unidade de tratamento de sinais e um dispositivo mostrador/registrador. Sistemas de medição mais simples podem não ter a unidade de tratamento de sinais.
- Relembramos os conceitos de resolução, sensibilidade, curva de erros, estabilidade, precisão e exatidão e rastreabilidade.
- Erros de medição podem estar atrelados a vários fatores, como escolha errada de sistema de medição, operador mal preparado, não haver controle do ambiente e nas análises e registros dos dados de medições e ensaios.
- Os sistemas de medição podem fazer parte de um sistema de controle de processos e, assim, temos uma atuação automática caso apareçam medições com valores diferenciados.



- 1 Qual a diferença na determinação da resolução em instrumentos de medição analógicos (contendo escala e um ponteiro) e digitais (contendo um mostrador eletrônico)?
- 2 Considerando a citação:

Um sistema de medição que não propicia a certeza ou confiança na medição pode levar a empresa a realizar grandes investimentos na aquisição de instrumentos e outros meios de medição. É importante identificar o que pode causar esta deficiência, antes de tomar a decisão. Além disso, estudos mal elaborados podem fazer com que a empresa direcione seus recursos para o lugar errado ou, talvez, que não precisem ser realizados (FONSECA, 2008, p. 1).

FONTE: FONSECA, M. P. **A análise do sistema de medição (MSA) como ferramenta no controle de processos em uma indústria de dispositivos médicos descartáveis**. Monografia. Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora: Graduação em Engenharia de Produção, 2008.

Cite as principais fontes de influência no sistema de medição:

- 3 O texto abaixo mostra a comparação entre três métodos de medição diferentes para a medição de vazão. Considere os argumentos das autoras e discorra sobre como a escolha do método de medição pode influenciar no resultado de medição.

Tomando como base a elevada precisão do equipamento para medição de vazão pelo método acústico, os resultados obtidos mostraram uma grande variação entre os métodos do molinete hidrométrico e do flutuador. Isto indica que a aquisição de dados pelos referidos métodos supracitados não representou fielmente a realidade dos cursos d'água em estudo. Neste aspecto, cabe observar que diante de uma situação de escolha de métodos de medição, deve-se procurar equipamentos que possuam tecnologias de precisão e controle de dados. Em relação aos erros, o molinete mostrou ser uma alternativa viável. O método do flutuador apresentou o maior erro relativo para a estimativa da vazão nos dois cursos d'água. Assim, esse método não deve ser utilizado ou empregado ao menos se, e somente se, não houver alternativa viável para a mensuração (BONIFÁCIO; FREIRE, 2013, p. 413).

FONTE: BONIFÁCIO, Cássia Maria; FREIRE, Rosane. **Comparação de três métodos para medição da vazão e velocidade aplicados em dois cursos d'água da bacia do ribeirão Maringá**. periódico eletrônico fórum ambiental da alta paulista, 2013.

PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE MEDAÇÃO

1 INTRODUÇÃO

Nos tópicos anteriores entendemos a importância de se fazer medições e ter um sistema de medição adequado ao seu uso, assim como ter um ambiente propício com um operador com conhecimento adequado e método com procedimento de medição condizentes. Neste tópico, vamos aprender um pouco mais sobre a validação de ensaios usando os parâmetros de avaliação mais comuns. Afinal, é necessário conhecer o seu sistema de medição e o seu mensurando para a tomada de decisões, mas também são necessários métodos, procedimentos e parâmetros específicos e reconhecidos para que a análise seja o mais fiel possível ao desempenho do seu sistema de medição.

Segundo Werkema (2006), a avaliação de sistemas de medição também tem importância quando:

- São realizados ajustes ou consertos nos sistemas de medição.
- São incorporados novos operadores, métodos e sistemas de medição em um processo.
- É necessário comparar sistemas de medição.

Nos itens a seguir, vamos explorar os parâmetros de avaliação via variáveis, indicando as influências diversas contidas nos resultados de ensaios de medição.

2 PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO

A análise dos sistemas de medição usa a estatística como ferramenta. Desta forma, diversos parâmetros foram desenvolvidos para avaliar o sistema de medição com base em um número finito de medições. Idealmente, deveríamos fazer infinitas medições para aferir o seu funcionamento, porém como isso não é possível, utilizamos a estatística como aliada para dar segurança aos dados coletados.

Nesse item veremos como se avalia a repetibilidade, a reprodutibilidade, estabilidade, tendência, desvio linear de tendência, variação entre peças e variância total.

a) Repetibilidade



A repetibilidade mostra a influência de variáveis aleatórias no resultado de medição.

“A repetibilidade de um sistema de medição é a variação nas medidas obtidas quando um avaliador utiliza o instrumento para medir repetidas vezes a característica de interesse dos mesmos itens” (WERKEMA, 2006, p. 25).

O cálculo da repetibilidade é realizado a partir da execução de algumas medições do mesmo objeto, nas mesmas condições ambientais de sua utilização na indústria/laboratório, pelo mesmo operador em espaço curto de tempo. Tentamos diminuir ao máximo a influência de fatores externos ao sistema de medição no resultado e, dessa forma, conseguimos medir simplesmente o quanto o sistema de medição é repetitivo em seus resultados. A estimativa da repetibilidade mostra a confiança que podemos ter na medida feita por um determinado instrumento e, muitas vezes, é considerado o parâmetro mais importante na escolha do sistema de medição.

Condição de medição num conjunto de condições, as quais incluem 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 (BRASIL, 2012, p. 22).

Lembrando da definição de incerteza padrão no Tópico 2, definimos a repetibilidade conforme Albertazzi e Sousa (2008):

$$Repe = \pm t \cdot s \quad (2)$$

Em que:

$Repe$ é a repetibilidade

t é o Coeficiente t de *Student*

s é a incerteza-padrão, calculada pela equação (1)

O Coeficiente t de *Student* é um ente estatístico que auxilia na estimativa de parâmetros estatísticos de amostras finitas. Ele se baseia no fato de que quanto mais dados tiverem na amostra, maior será a sua confiabilidade (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008).



A tabela com os Coeficientes t de *Student* encontram-se no final do livro.

“A incerteza-padrão e a repetibilidade são parâmetros com os quais é possível, de alguma forma, quantificar a intensidade do erro aleatório de um sistema de medição. São informações importantes e que permitem uma expressão confiável para o resultado de medição” (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008, p. 62).

Vamos ver um exemplo?

“Os corantes sintéticos têxteis representam um grande grupo de substâncias orgânicas que podem apresentar efeitos indesejáveis ao meio ambiente; além disso, algumas delas podem apresentar riscos aos usuários” (GUARATINI; ZANONI, 2000, p. 78).

O artigo de Guaratini e Zanoni (2000) fala sobre os tipos de corantes utilizados na indústria têxtil e seu grau de toxicidade, concluindo que há necessidade de uma metodologia dentro das indústrias têxteis para a aferição da quantidade de corantes utilizados na sua produção. Nessa metodologia, após a extração do corante é realizada a medição de massa utilizando uma balança analítica digital. Considerando um caso hipotético no qual foram realizadas as medições de um padrão de massa para a análise da balança utilizada em laboratório, conforme disposto na tabela a seguir:

TABELA 1 – EXEMPLO DE MEDIÇÕES DE UMA MASSA PADRÃO

Massa-padrão calibrada	(5,000 + 0,001) g
Sistema de medição a ser analisado	Balança Analítica
Medições	
01	4,99 g
02	5,02 g
03	4,97 g
04	5,00 g
05	4,99 g

FONTE: A autora

Primeiro, calculamos a média aritmética das cinco medições realizadas:

$$\bar{I} = \frac{4,99 + 5,02 + 4,97 + 5,00 + 4,99}{5} \quad (3)$$

$$I = 4,994g$$

Após, calculamos a incerteza-padrão:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_i - \bar{I})^2}{n-1}}$$

$$s = \sqrt{\frac{(4,99 - 4,994)^2 + (5,02 - 4,994)^2 + (4,97 - 4,994)^2 + (5,00 - 4,994)^2 + (4,99 - 4,994)^2}{5-1}} \quad (4)$$

$$s = \sqrt{\frac{1,6 \times 10^{-5} + 6,76 \times 10^{-4} + 5,76 \times 10^{-4} + 3,6 \times 10^{-5} + 1,6 \times 10^{-5}}{4}}$$

$$s = \sqrt{3,3 \times 10^{-4}}$$

$$s = 0,018$$

Então podemos calcular a repetibilidade usando o coeficiente de *Student* para 95,45% de confiança e 4 graus de liberdade (n-1). Neste caso, utilizando a tabela no final do livro, percebemos que t=2,869.

$$Repe = \pm 2,869 \cdot 0,018 \quad (5)$$

$$Repe = \pm 0,05g$$

Logo, a repetibilidade da balança é avaliada em $\pm 0,05\text{g}$ com 95,45% de confiança.

É interessante notar que, quando é realizado um grande número de medições de uma mesma grandeza, o erro aleatório associado tende a diminuir. Porém, os erros sistemáticos permanecem inalterados. (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008). Por isso, normalmente considera-se um determinado número de repetições para cada ensaio, mas deve haver um balanço entre o custo do ensaio (tempo, dinheiro etc.) e a melhoria do coeficiente calculado.

Além disso, Werkema (2006) traz um conselho importante sobre a avaliação de repetibilidade:

Nos estudos para avaliação de sistemas de medição é aconselhável que a quantificação da repetibilidade seja a primeira atividade a ser realizada, antes da análise das outras fontes de variação. Essa recomendação é importante porque uma repetibilidade inadequada dificulta a estimativa das outras fontes de variabilidade associadas à medição (WERKEMA, 2006, p. 28).

“De modo geral, a avaliação da repetibilidade deve ser realizada logo após a compra de um instrumento de medição e antes da coleta de dados necessários à condução de análise de interesse sobre o processo produtivo considerado” (WERKEMA, 2006, p. 28).

Há outra maneira de calcular a repetibilidade, mais comum em ambientes industriais, utilizando os resultados de medições repetidas de cada amostra durante o processo industrial.

Neste caso é utilizada a confiança de 99% e é utilizada toda a faixa de simetria em relação ao valor central (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008). Duplicamos o valor do Coeficiente t de *Student* para $t=99\%$ e mais de 10000 graus de liberdade, ou seja, o $2t=5,152$. Tecnicamente falando, não consideramos a repetibilidade como \pm o valor indicado e sim toda a faixa. O cálculo da repetibilidade é realizado utilizando a equação (6):

$$Repe = 5,152 \cdot \frac{\bar{I}}{d_2} \quad (6)$$

Em que:

R_{pe} é a repetibilidade;

\bar{I} é a média das medições;

d_2 é um coeficiente que relaciona o número de ciclos (m) ou de vezes que a grandeza é medida pelo mesmo operador, pela multiplicação do número de amostras medidas pelo número de operadores (g).

Alguns coeficientes estão dispostos na tabela a seguir:

TABELA 2 – COEFICIENTES D_2 , EM QUE A FAIXA HORIZONTAL É O NÚMERO DE CICLOS M E A FAIXA VERTICAL É A MULTIPLICAÇÃO DO NÚMERO DE AMOSTRAS PELO NÚMERO DE OPERADORES G

d_2		m									
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	
g	1	1,14	1,91	2,24	2,48	2,67	2,83	2,96	3,08	3,18	
	2	1,28	1,81	2,15	2,40	2,60	2,77	2,91	3,02	3,13	
	3	1,23	1,77	2,12	2,38	2,58	2,75	2,89	3,01	3,11	
	4	1,21	1,75	2,11	2,37	2,57	2,74	2,88	3,00	3,10	
	5	1,19	1,74	2,10	2,36	2,56	2,73	2,87	2,99	3,10	
	6	1,17	1,73	2,09	2,35	2,56	2,73	2,87	2,99	3,10	
	7	1,17	1,73	2,09	2,35	2,55	2,72	2,87	2,99	3,10	
	8	1,16	1,72	2,08	2,35	2,55	2,72	2,87	2,98	3,09	
	9	1,16	1,72	2,08	2,34	2,55	2,72	2,86	2,98	3,09	
	10	1,16	1,72	2,08	2,34	2,55	2,72	2,86	2,98	3,09	

FONTE: Adaptado de Albertazzi e Sousa (2008)

Vamos fazer um exemplo para o cálculo da repetibilidade?

Em uma empresa de metalurgia são realizadas 3 medições do diâmetro de uma peça feita com um paquímetro por um operador, na etapa do controle de qualidade de uma empresa. Na tabela a seguir está anotado o valor da amplitude de três medições realizadas por um paquímetro.



A amplitude de uma medição é a diferença entre o maior e o menor valor de medição anotados durante uma série de medições.

TABELA 3 – MEDIÇÕES DO DIÂMETRO DE UMA PEÇA

Operador	João
Sistema de medição	Paquímetro
Peças	Medições
01	0,05 mm
02	0,02 mm
03	0,07 mm
04	0,03 mm
05	0,04 mm

FONTE: A autora

O primeiro cálculo a ser feito é a média aritmética das cinco medições de amplitude:

Em que:

$$\bar{I} = \frac{0,05 - 0,02 + 0,07 + 0,03 + 0,04}{5} \quad (7)$$

$$I = 0,042$$

Neste caso, temos m=3 (três medições realizadas em cada peça para obter os valores descritos na Tabela 3) e g = 5x1 (cinco amostras de peças produzidas medidas e um operador realizando a medição). Observando a Tabela 2, temos o coeficiente $d_2=1,74$. Assim, podemos calcular a repetibilidade conforme a equação (6):

Em que:

$$Repe = 5,152 \cdot \frac{\bar{I}}{d_2}$$

$$Repe = 5,152 \cdot \frac{0,042}{1,74} \quad (8)$$

$$Repe = 5,152 \cdot 0,024$$

$$Repe = 0,124$$

Logo, a repetibilidade avaliada é de 0,124 mm (sendo toda a faixa ao redor do valor médio) ou $\pm 0,062$ mm em torno do valor médio com 99% de probabilidade.

b) Reprodutibilidade



A reprodutibilidade mostra a influência de variáveis aleatórias no resultado de medição.

A reprodutibilidade avalia o quanto o processo de medição sofre de variações quando diferentes operadores ou usuários procedem a medição. Desta forma, tenta-se quantificar a influência do operador na medição, pois o procedimento, o instrumento e o mensurando continuam iguais.

“A reprodutibilidade de um sistema de medição é a variação na média das medidas obtidas quando diferentes avaliadores utilizam o mesmo instrumento para medir repetidas vezes a característica de interesse dos mesmos itens” (WERKEMA, 2006, p. 28).

Porém, observamos que a reprodutibilidade poderia considerar outras mudanças realizadas no procedimento de medição, segundo Toledo (2014):

Conceitualmente, a reprodutibilidade envolve mudanças diversas nas condições de medição, mas na prática, como é difícil medir e controlar todas as possíveis mudanças, considera-se apenas uma mudança ou a diferença entre avaliadores, pois é mais fácil e viável fazer comparações de resultados obtidos com diferentes pessoas (TOLEDO, 2014, p. 103).

O procedimento de cálculo da reprodutibilidade vai depender das variações da média medida por cada operador. Vamos seguir o procedimento adotado por Albertazzi e Sousa (2008) para o cálculo da reprodutibilidade. Primeiro precisamos estimar a média das medições (valor global) para cada operador. A partir daí, calculamos a diferença entre o maior e o menor valor (amplitude da média):

Em que:

$$R_{op} = \overline{I_{maior}} - \overline{I_{menor}} \quad (9)$$

Após, calculamos o desvio-padrão associado usando:

Em que:

$$S_{op} = \frac{R_{op}}{d_2} \quad (10)$$

Vamos utilizar novamente a Tabela 2 para determinação do d_2 . Após o cálculo do desvio-padrão, usaremos novamente 99% de probabilidade e a faixa total para o cálculo da reprodutibilidade usando:

Em que:

$$Repro = 5,152 s_{op} \quad (11)$$

O índice calculado na equação (10) é uma boa aproximação, porém esse resultado é afetado pelo parâmetro de repetibilidade, o que nem sempre é desejável. Neste caso, utilizamos a equação (12) para o cálculo da reprodutibilidade sem a interferência da repetibilidade.

$$Repro = \sqrt{\left[5,152 s_{op} \right]^2 - \left[\left(\frac{Repe^2}{n \cdot r} \right) \right]} \quad (12)$$

Em que:

R_{pro} é a reprodutibilidade

s_{po} é o desvio-padrão calculado para os diferentes operadores na equação (10)

R_{pe} é a repetibilidade calculada para os dados pela equação (6)

n é o número de amostras medidas

r é o número de operadores

Se o resultado da equação (12) for uma raiz de valor negativo, consideramos $R_{pro} = 0$, ou seja, “a influência dos operadores sobre o processo de medição não é significativa” (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008, p. 367).

TABELA 4 – MEDIÇÕES DO DIÂMETRO DE UMA PEÇA

Operador	João	José
Sistema de medição	Paquímetro	
Medições		
01	10,05 mm	10,02 mm
02	10,02 mm	9,99 mm
03	10,07 mm	9,96 mm
04	9,97 mm	10,03 mm
05	10,01 mm	10,00 mm

FONTE: A autora

Considerando a Tabela 4, como análise das medições feitas pelo paquímetro, no mesmo processo de medição utilizado no item anterior. Lembrando que cada medida anotada é a média de três indicações do sistema de medição. Desta forma, primeiro calculamos as médias das medições de ambos os operadores e em seguida a diferença entre o maior e o menor valor (amplitude da média):

Em que:

$$\overline{I_{\text{João}}} = \frac{10,05 + 10,02 + 10,07 + 9,97 + 10,01}{5}$$

$$\overline{I_{\text{João}}} = 10,024$$

$$\overline{I_{\text{José}}} = \frac{10,02 + 9,99 + 9,96 + 10,03 + 10,00}{5} \quad (13)$$

$$\overline{I_{\text{José}}} = 10,00$$

$$R_{op} = 10,024 - 10,00$$

$$R_{op} = 0,024$$

Após, calculamos o desvio-padrão associado usando o coeficiente d_2 com $m = 3$ e $g = 5 \times 2 = 10$:

$$s_{op} = \frac{0,024}{1,72} \\ (14)$$

$$s_{op} = 0,0139$$

A reprodutibilidade com influência da repetibilidade é:

$$Repro = 5,152 \cdot 0,0139 \\ (15)$$

$$Repro = 0,0716$$

Considerando o cálculo da reprodutibilidade sem a influência da repetibilidade (equação 12), precisamos calcular primeiro a repetibilidade, considerando a diferença da média de todas as amplitudes das medições:

$$Repe = 5,152 \cdot \frac{\bar{I}}{d_2} \\ Repe = 5,152 \cdot \frac{0,024}{1,72} \\ (16)$$

$$Repe = 0,0719$$

Então, é só utilizar a equação (12):

$$Repro = \sqrt{[5,152 s_{op}]^2 - \left[\left(\frac{Repe^2}{n \cdot r} \right) \right]} \\ Repro = \sqrt{[5,152 \cdot 0,0139]^2 - \left[\left(\frac{0,0719^2}{5 \cdot 2} \right) \right]} \\ (17)$$

$$Repro = \sqrt{[0,072]^2 - \left[\left(\frac{0,0052}{10} \right) \right]}$$

$$Repro = \sqrt{0,0051 - [5,2 \times 10^{-4}]}$$

$$Repro = \sqrt{4,6 \times 10^{-3}}$$

$$Repro = 0,0678$$

c) Estabilidade

Segundo Albertazzi e Sousa (2008, p. 345), “o parâmetro estabilidade está associado à capacidade do sistema de medição em manter suas capacidades estatísticas ao longo do tempo”. Os autores também citam a importância da medição da estabilidade ao longo do tempo para a previsão do comportamento futuro do sistema de medição. Para o ensaio de estabilidade é utilizado um padrão de grandeza ou uma grandeza de referência. Desta forma, alterações na tendência das medições podem indicar problemas na estabilidade do processo de medição (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008).

Idealmente gostaríamos de estimar a estabilidade a longo prazo de todo o processo de medição, porém, nem sempre temos meios de fazer isso. Desta forma, podemos estimar a estabilidade a curto prazo como método de verificar a estabilidade do processo utilizando uma carta de amplitudes.



Normalmente, quando falamos de estabilidade nos referimos à estabilidade temporal, ela também pode ser relativa a outras grandezas, como temperatura, pressão, entre etc. Caso seja necessário levá-las em consideração, deixe bem claro que está falando de outra estabilidade, como a estabilidade térmica.



A carta de amplitudes será melhor explicada na próxima disciplina, que aboradarará o Controle Estatístico de Processos (CEP).

d) Tendência

Segundo Albertazzi e Sousa (2008, p. 344), “a tendência corresponde à diferença entre a média das indicações obtidas de um processo de medição e um valor de referência”. Segundo INMETRO (2012), esse erro sistemático também pode ser denominado tendência instrumental.

“Para o cálculo do erro sistemático ou tendência deve-se considerar um número suficiente de réplicas, tendo em vista que uma única medição não é o suficiente para se ter certeza do comportamento metrológico de um instrumento de medição” (SILVA; NETO, 2015, p. 2).

O monitoramento da tendência de medição durante o processo produtivo é um aliado na inferência de qualidade. Quando esse valor é constante em toda a faixa de medição, é possível monitorá-lo utilizando peças de referência ou padrões, com o valor determinado por calibração em laboratórios autorizados. A tendência é a simples subtração da média da indicação de uma série de medições da peça padrão pelo valor de referência, conforme mostra a equação (18).

$$T = \bar{I} - I_{\text{padrão}} \quad (18)$$

Com o valor da tendência calculado, é possível corrigir os resultados das indicações:

$$I_{\text{corrigida}} = I - T \quad (19)$$

Um monitoramento do valor da tendência dos sistemas de medição contidos em um processo produtivo pode mostrar desgastes nos sistemas de medição ou até mesmo nas ferramentas utilizadas, sendo um alerta para um monitoramento mais ativo, revisões ou alterações no processo.

e) Desvio Linear de Tendência



A tendência e o desvio linear de tendência mostram a ação de erros sistemáticos no processo.

Segundo Albertazzi e Sousa (2008, p. 345), “o desvio linear de tendência está associado à forma como varia a tendência em função do valor da indicação”. O desvio linear de tendência é utilizado quando há variação no valor da tendência conforme a medição é realizada em diferentes regiões da faixa de medição de um sistema de medição. Desta forma, são necessários vários padrões com grandezas de valores diferentes dentro da faixa de medição para avaliar a tendência de um sistema de medição.

Desta maneira, é realizada a medição e cálculo da tendência para alguns padrões, com dimensões importantes e bem variadas dentro da faixa de medição do instrumento. A partir desses valores (padrões x tendência) é possível realizar uma análise de regressão, interpolando os dados numa função de 1º. grau (reta) conforme a equação (18), em que a é o coeficiente angular e b é o coeficiente linear.

$$y = ax + b \quad (20)$$

Um exemplo desse cálculo do desvio de tendência está abaixo. Usando o mesmo cenário anterior, temos algumas medições de um objeto com diâmetro de referência com faixa de medição variando entre 5 e 25 mm. Para cada padrão foram realizadas três medições e o valor médio anotado na Tabela 5. Após, foi calculada a tendência, pelos dados podemos observar que não há um valor padrão constante.

TABELA 5 – MEDIÇÕES DO DIÂMETRO DE UMA PEÇA

Operador	João		
Sistema de Medição	Paquímetro		
	Valor de Referência	Valor Medido Médio	Tendência
01	5,000 mm	5,001 mm	+0,001
02	12,000 mm	12,001 mm	+0,001
03	16,000 mm	16,003 mm	+0,003
04	20,500 mm	20,505 mm	+0,005
05	24,000 mm	24,007 mm	+0,007

FONTE: A autora

Usando os coeficientes de reta de regressão contidos em Albertazzi e Sousa (2008) pode-se calcular o desvio de tendência. Explicitamente, o desvio linear de tendência é o coeficiente angular da reta. Desta forma, a partir dos dados experimentais é possível calcular o coeficiente angular como:

$$a = \frac{n \sum xy - \sum x \cdot \sum y}{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \quad (21)$$

Para os dados do exemplo da Tabela 5:

$$n = 5$$

$$\sum x \cdot y = 5,000 \cdot 0,001 + 12,000 \cdot 0,001 + 16,000 \cdot 0,003 + \\ 20,500 \cdot 0,005 + 24,000 \cdot 0,007$$

$$\sum x \cdot y = 0,3355$$

$$\sum x = 5,000 + 12,000 + 16,000 + 20,500 + 24,000$$

$$\sum x = 77,500$$

$$\sum y = 0,001 + 0,001 + 0,003 + 0,005 + 0,007$$

$$\sum y = 0,017$$

$$\sum x^2 = 5,000^2 + 12,000^2 + 16,000^2 + 20,500^2 + 24,000^2$$

$$\sum x^2 = 1421,25$$

$$(\sum x)^2 = (5,000 + 12,000 + 16,000 + 20,500 + 24,000)^2$$

$$(\sum x)^2 = 6006,25$$

$$a = \frac{n \sum x \cdot y - \sum x \cdot \sum y}{n(\sum x^2) - (\sum x)^2}$$

$$a = \frac{5 \cdot 0,3355 - 77,500 \cdot 0,017}{5 \cdot 1421,25 - 6006,25}$$

$$a = \frac{0,36}{1100}$$

$$a = 3,27 \times 10^{-4}$$

Para a determinação do desvio de tendência em relação a cada medição, é necessário também o cálculo do coeficiente linear:

$$b = \frac{(\sum y) - a \cdot (\sum x)}{n}$$

$$b = \frac{0,017 - (3,27 \times 10^{-4}) \cdot 77,500}{5} \quad (23)$$

$$b = \frac{-8,36 \times 10^{-3}}{5}$$

$$b = -1,67 \times 10^{-3}$$

Assim, podemos definir a reta de desvio linear de tendência como:

$$y = ax + b$$

$$y = 3,27x10^{-4}x - 1,67x10^{-3} \quad (24)$$

Em que **x** é o valor de medição e **y** é o valor corrigido.

Segundo Albertazzi e Sousa (2008, p. 362), “quando a calibração do sistema de medição é realizada em laboratório, o desvio linear de tendência é bem determinado”. A comparação futura e periódica desse valor é um meio de extrair informações sobre o comportamento do sistema e do processo de medição.

f) Variação entre as peças e variação total



A variação entre peças e a variação total apresenta a influência de variáveis aleatórias.

Dentro de um processo industrial também há uma variação (variabilidade) entre as peças produzidas, resultado natural do processo com uma margem de variação calculada e aceita dentro da indústria. Por mais que queiramos peças iguais, sempre haverá uma tolerância de aceitação entre as medidas das peças produzidas.

Segundo Toledo (2014), a variação entre as peças pode ser calculada com o desvio-padrão: s_p .

$$s_p = \frac{R_p}{d_2} \quad (25)$$

Em que:

s_p é o desvio-padrão entre as peças – a variação;

R_p é a amplitude das médias de medição;

d_2 é um coeficiente disposto na Tabela 2.

Com a variação entre peças calculadas, é possível determinar a variação total do processo de medição:

$$S_t = \sqrt{S_p^2 + S_{op}^2 + S_r^2} \quad (26)$$

Em que:

S_p é o desvio-padrão entre as peças – a variação;

S_{op} é o desvio-padrão relativo à reproduutividade (corrigido ou não);

S_r é o desvio-padrão relativo à repetibilidade;

S_t é a variância total do processo de medição.

Considerando o exemplo da medição do diâmetro de uma peça (dados na Tabela 4), já sabemos que $s_{op} = 0,0139$. Então, vamos calcular o s_p e o s_r , considere a Tabela 6, a seguir, como a relação de amplitude entre as três medições para cada amostra, e assim podemos calcular a repetibilidade.

TABELA 6 – MEDIÇÕES DO DIÂMETRO DE UMA PEÇA

Operador	João	José
Sistema de medição	Paquímetro	
Medições		
01	0,03 mm	0,02 mm
02	0,02 mm	0,01 mm
03	0,04 mm	0,05 mm
04	0,03 mm	0,04 mm
05	0,01 mm	0,02 mm

FONTE: A autora

Podemos determinar a média das amplitudes e depois o sr. Lembrando que neste exemplo temos $m=3$ e $g=5 \times 2$ para determinar o d_2 .

$$\bar{I} = \frac{0,03 + 0,02 + 0,04 + 0,03 + 0,01 + 0,02 + 0,01 + 0,05 + 0,04 + 0,02}{10}$$

$$\bar{I} = 0,027$$

$$s_r = \frac{0,027}{1,72}$$

(27)

$$s_r = 0,016$$

Temos o $s_r = 0,016$ mm.

Vamos calcular a variação entre as peças, primeiro calculamos a média aritmética entre os diâmetros das peças considerando os dois operadores, cujos dados brutos estão na Tabela 4. Na Tabela 7 a seguir, temos a média para cada amostra, independente do operador.

TABELA 7 – MÉDIA DAS MEDIÇÕES DO DIÂMETRO DE UMA PEÇA

Sistema de medição	Paquímetro
Mediações	Média
01	10,035 mm
02	10,005 mm
03	10,015 mm
04	10,000 mm
05	10,005 mm

FONTE: A autora

Com esses valores calculamos a amplitude das médias R_p , subtração entre a maior e a menor média anotada na Tabela 7 e após o desvio-padrão de variação s_p :

$$R_p = 10,035 - 10,000$$

$$R_p = 0,035$$

$$s_p = \frac{R_p}{d_2} \quad (28)$$

$$s_p = \frac{0,035}{1,72}$$

$$s_p = 0,020$$

Calculamos a variância total:

$$S_t = \sqrt{s_p^2 + s_{op}^2 + s_r^2}$$

$$S_t = \sqrt{0,020^2 + 0,0139^2 + 0,016^2} \quad (29)$$

$$S_t = 0,029$$

Desta forma, a variância total entre o diâmetro das peças é de 0,029 mm.



Os métodos apresentados neste tópico são a chave para a análise dos sistemas de medição dentro de um processo industrial. Devem ser utilizados visando cada tipo de indústria, instrumento de medição, condições ambientais e disponibilidade de operadores e sendo, assim, escolhidos a partir do conhecimento dos módulos do processo industrial a ser analisado. Mesmo não utilizando todos os parâmetros juntos ou analisando somente componentes aleatórios de incerteza, como a variância total, o estudo fornece informações importantes para a definição de decisões dentro da indústria.

RESUMO DO TÓPICO 3

Nesse tópico, você viu que:

- Há parâmetros estatísticos responsáveis pela análise dos resultados de medição.
- A repetibilidade mostra a variação da indicação de um sistema de medição medindo um mesmo objeto, por um mesmo operador, em um mesmo ambiente e num curto prazo de tempo.
- A reprodutibilidade mostra a variação da indicação de um sistema de medição medindo um mesmo objeto por vários operadores.
- A reprodutibilidade pode ser calculada variando outros aspectos da medição, embora a alteração de operadores seja a mais comum e mais fácil de ser feita.
- A estabilidade mostra como o seu sistema de medição se comporta com a variação de uma outra grandeza de interesse. Normalmente é considerado o tempo, porém há outras grandezas que podem ser importantes, como a temperatura.
- A tendência mostra a diferença entre o valor dado pelo sistema de medição e o valor referência para um objeto padrão. Em alguns sistemas a tendência é um valor constante para toda a faixa de medição, sendo importante monitorar seu valor para prever problemas no processo de medição.
- Da mesma forma que a tendência, o desvio linear de tendência mostra a diferença entre o valor dado pelo sistema de medição e o valor referência para um objeto padrão, porém esse valor pode ser diferente dependendo da região da faixa de medição em que se encontra. Por isso, é feita uma interpolação dentro de uma reta, para calcular a tendência com base na indicação do sistema de medição.
- Sempre haverá uma variação entre as peças produzidas no processo. Essa variação é natural e considerada dentro de uma tolerância determinada na produção.
- A variação total da indicação do processo de medição é a raiz da soma quadrática entre os desvios-padrão de repetibilidade, reprodutibilidade e variação entre peças.

AUTOATIVIDADE



- 1 Nesta unidade, aprendemos vários parâmetros utilizados para avaliar os sistemas de medição em um processo industrial. Sobre um deles, a repetibilidade, citamos que “a incerteza-padrão e a repetibilidade são parâmetros com os quais é possível, de alguma forma, quantificar a intensidade do erro aleatório de um sistema de medição. São informações importantes e que permitem uma expressão confiável para o resultado de medição” (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008, p. 62).

FONTE: ALBERTAZZI, A. G. Jr.; SOUSA, A. R. **Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial**. Barueri: Manole, 2008.

A partir da sua leitura desta unidade, responda:

Qual a importância de se monitorar o erro ou incerteza de um sistema de medição no processo industrial? Quando essa avaliação deve ser realizada?

- 2 A indicação da medição sempre inclui incertezas:

Como a determinação do resultado de uma medição (RM) depende de vários fatores, a determinação analítica da mesma requer procedimentos que envolvem cálculos matemáticos e estatísticos que levam em consideração tanto aspectos físicos do instrumento, bem como a existência de erros (SILVA; CIRILO, 2015, p. 4).

FONTE: SILVA, N.; CIRILO, J. Estudo do erro sistemático ou tendência e repetitividade de um instrumento de medição. In: 8º Congresso Brasileiro de Metrologia. **Anais**. Bento Gonçalves: 2015.

A partir disso, faça um fluxograma indicando como é realizado o cálculo da repetibilidade.

- 3 Para a solução dessa questão analise a situação a seguir: em um estudo da medição da distância de fuga e depuração do ar em equipamentos médicos, observou-se que a medição, mesmo que descrita em normas e documentos, pode ser realizada de maneira diferente por diferentes operadores, devido a diferentes conceitos e termos não especificados (SILVA, 2016). Esse estudo mostra como pode ser grande a influência do operador durante uma medição, mesmo usando o mesmo instrumento e procedimento de medição. Baseado nisso, faça um fluxograma indicando como deve ser realizado o cálculo do coeficiente de reprodutibilidade.

- 4 Mário é dono de uma indústria de pães, que fornece pães pré-assados e congelados para padarias. Na linha de produção, após a mistura dos ingredientes, a massa é particionada manualmente em pequenas porções de 50 g, para serem pré-assadas, depois congeladas e por fim embaladas. O processo de medição é realizado em três turnos, por três operadores diferentes. A tabela a seguir apresenta as amplitudes e as três medições realizadas, em gramas, pelos diferentes operadores:

A partir da tabela, calcule a repetibilidade e a reprodutibilidade (com e sem o efeito da repetibilidade) desse processo de medição.

TABELA 8 – MEDIÇÕES DA MASSA DO PÃO PRÉ-ASSADO

Operador 01	Pão 1	Pão 2	Pão 3	Op.02	Pão 1	Pão 2	Pão 3	Op.03	Pão 1	Pão 2	Pão 3
Amplitude	0,02	0,05	0,01		0,03	0,07	0,02		0,06	0,10	0,04
Medida 01	50,01	50,10	50,01		50,02	50,01	50,03		50,02	50,03	50,02
Medida 02	50,03	50,05	50,00		50,05	50,08	50,05		50,01	50,08	49,98
Medida 03	50,01	50,07	50,01		50,03	50,05	50,04		50,07	49,98	49,99
Média	50,016	50,073	50,007		50,033	50,047	50,040		50,033	50,030	49,997

FONTE: A autora

$$Repro = \sqrt{[5,152 s_{op}]^2 - \left[\left(\frac{Repe^2}{n \cdot r} \right) \right]}$$

$$Repro = \sqrt{[5,152 \cdot 0,0116]^2 - \left[\left(\frac{0,0136^2}{3 \cdot 3} \right) \right]}$$

$$Repro = \sqrt{[0,060]^2 - [2,05 \times 10^{-3}]}$$

$$Repro = \sqrt{1,54 \times 10^{-3}}$$

$$Repro = 0,039$$

- 5 Defina a variância total para o processo de medição da indústria de pães do exercício 4.
- 6 Visando observar o desvio de tendência da balança utilizada na indústria de pães, Mario fez um ensaio de desvio de linearidade. Os dados, em gramas, estão na tabela a seguir. Calcule a função de correção de desvio de linearidade da balança.

TABELA 9 – RESULTADO DO ENSAIO DE DESVIO DE LINEARIDADE

	Massa-padrão	Medida 01	Medida 02	Medida 03	Tendência
Medida 01	10,00	10,02	10,01	10,02	+0,017
Medida 02	21,00	21,05	21,06	21,07	+0,060
Medida 03	35,00	35,10	35,12	35,09	+0,103
Medida 04	50,00	50,23	50,20	50,21	+0,213
Medida 05	60,00	60,40	60,35	60,38	+0,377

FONTE: A autora

$$\sum x \cdot y = 10,00 \cdot 0,017 + 21,00 \cdot 0,060 + 35,00 \cdot 0,103 + 50,00 \cdot 0,213 + 60,00 \cdot 0,377$$

$$\sum x \cdot y = 38,305$$

$$\sum x = 10,00 + 21,00 + 35,00 + 50,00 + 60,00$$

$$a = \frac{n \sum x \cdot y - \sum x \cdot \sum y}{n(\sum x^2) - (\sum x)^2}$$

$$a = \frac{5 \cdot 38,305 - 176,00 \cdot 0,770}{5 \cdot 7866,00 - 30976,00}$$

$$b = \frac{(\sum y) - a \cdot (\sum x)}{n}$$

$$b = \frac{0,770 - (6,70 \cdot 10^{-3}) \cdot 176,00}{5}$$

$$y = 6,70 \cdot 10^{-3}x - 0,081$$

MEDIDA E ACOMPANHAMENTO DE DADOS NA INDÚSTRIA

OBJETIVOS DE APRENDIZAGEM

Esta unidade tem por objetivo:

- conhecer e aplicar algumas ferramentas para a qualidade industrial;
- oferecer base de conhecimento para a tomada de decisão quanto ao resultado de ensaios e medições de grandezas de interesse;
- definir a folha de verificação e sua aplicação industrial.

PLANO DE ESTUDOS

Esta unidade está dividida em quatro tópicos, conforme segue. No decorrer da unidade você encontrará autoatividades com o objetivo de reforçar o conteúdo apresentado.

TÓPICO 1 – ENSAIOS INDUSTRIALIS

TÓPICO 2 – FERRAMENTAS PARA A QUALIDADE

TÓPICO 3 – FOLHA DE VERIFICAÇÃO

TÓPICO 4 – COLETA DE DADOS E RELATÓRIO

ENSAIOS INDUSTRIAL

1 INTRODUÇÃO

Na Unidade 1 foi relatada a importância da medição no contexto industrial e as bases estatísticas utilizadas para aferir medidas e incertezas dos processos. Essas ferramentas matemáticas apresentam grande importância no contexto industrial e são utilizadas para avaliar e identificar problemas nos processos industriais.



O processo industrial é definido como um conjunto de uma ou mais ações, que contêm transformações físicas e/ou químicas e compõem a produção de um produto ou serviço.

Você já compreendeu os fatores que influenciam uma medição, como o procedimento, ambiente, operador, instrumento e até mesmo o próprio mensurando. A partir de tantas fontes de incerteza, como realizar ensaios em ambiente industrial, que mostrem o valor verdadeiro de uma medição? Como escolher a melhor hora de fazer o ensaio? Somente o ensaio em ambiente industrial é suficiente? São muitas as perguntas que vamos tentar responder neste tópico.

2 ENSAIOS: QUANDO, ONDE E POR QUÊ?

Segundo Werkema (2014, p. 3), “a redução da variabilidade dos processos implica em uma diminuição do número de produtos defeituosos fabricados”, ou seja, tudo o que buscamos em uma linha industrial é a minimização da variabilidade dos processos envolvidos. Qual seria a melhor maneira de minimizar essa variação? Monitorar os processos seria a melhor maneira. Essa monitoração necessita de coleta, tratamento e apresentação dos resultados de forma que seja simples acompanhar, analisar e identificar variações (WERKEMA, 2014).

Na unidade anterior, estudamos os parâmetros importantes de uma medição e vimos que existem dois tipos de erros relativos ao sistema de medição: erros aleatórios e erros sistemáticos. Nesse caso, com a monitoração buscamos diminuir os erros sistemáticos envolvidos e definimos algumas ferramentas para identificar processos fora do padrão, ou seja, ensaios, experimentos e monitoramentos são realizados para manter a qualidade e/ou melhorar o processo industrial existente.



As ferramentas para monitoramento da qualidade serão abordadas no Tópico 2.

A escolha entre ensaios pontuais e monitoramento contínuo deve levar em conta a natureza do processo e do sistema industrial como um todo. Além disso, a existência de normas internacionais e de agências regulamentadoras pode ser o motivo da escolha de quando e como monitorar. Um exemplo é a indústria de carnes in natura, por normas brasileiras e internacionais, todos os produtos devem ser inspecionados e receberem o selo do SIF (Serviço de Inspeção Federal), entre outras normas.

Há possibilidade de realizar os experimentos em ambiente controlado, como laboratórios na própria indústria ou em laboratórios credenciados; ou em ambiente industrial, perto das condições de funcionamento habitual do sistema/processo. A escolha do ambiente do experimento vai depender do seu objetivo. Os ensaios em laboratório normalmente são utilizados para a calibração de equipamentos, verificando seu funcionamento em condições ideais. Ensaios em fábrica mostram o comportamento real do instrumento. O monitoramento em fábrica adiciona os componentes de erro aleatório do ambiente industrial, mostrando as condições do processo/produto nesse ambiente.

3 PREPARAÇÃO PARA OS ENSAIOS

Ensaios em ambientes industriais requerem cuidados especiais e a maioria deles se refere ao planejamento do ensaio. Ensaios e aquisição de dados no processo constituem ferramentas importantes de diagnóstico, mas podem ser também fontes de custo e de aumento do tempo de processo. Dessa forma, deve estar claro o porquê da realização do mesmo e qual a sua importância dentro do processo de interesse.

Há vários motivos de monitoramento em um processo industrial. Dentre eles, podemos citar:

- calibração e aferição de instrumentos;
- controle de qualidade de partes do processo;
- controle de qualidade do processo;
- inspeção do produto final.

Dessa forma, é importante estabelecer os objetivos do ensaio/monitoramento e os detalhes de planejamento. Planejar não significa que tudo deve ocorrer dentro do esperado, mas significa ter um maior controle do que será feito.

O planejamento de um ensaio deve conter pelo menos as seguintes informações:

- Identificação: empresa, localização e setor de produção.
- Responsável: setor e/ou profissional responsável pelo ensaio.
- Etapa de produção: processo da produção em que será realizado o ensaio.
- Objetivo: motivo pelo qual os atributos/variáveis devem ser aferidos.
- Condições ambientais: temperatura, umidade, pressão e outras características que podem ter influência no resultado do ensaio.
- Métodos: método e técnica utilizada; necessitamos nos perguntar como obter dados do processo. Afinal, há inúmeros meios e formas de serem obtidos e métodos numéricos e estatísticos utilizados para processar esses dados.
- Periodicidade: quando o ensaio deve ser realizado. Pode ser colocado em questão de tempo (uma vez por mês) ou por ocorrência (quando houver dez produtos produzidos não conformes no mesmo lote).
- Impacto: determinar quais os impactos da realização do ensaio no sistema produtivo, apresentando aspectos positivos e negativos, por exemplo, positivo seria diminuir produtos não conformes ou melhorar a qualidade dos produtos; e um exemplo negativo seria o custo do ensaio, ou o tempo da linha de produção parada (caso seja necessário) para realizá-lo.

Observações: outras observações pertinentes. Isso significa quaisquer outra situação que possa ocorrer durante o ensaio e possa ter importância em sua interpretação e/ou execução. Um exemplo é a possibilidade de realização por um operador diferente em casos especiais. Outro caso é a inviabilidade do ensaio caso alguma condição ambiental esteja em valor extremo, por exemplo, não realizar esse ensaio caso a temperatura esteja acima dos 38º C.

Realizando o planejamento será possível determinar a importância do ensaio, assim como seu impacto na produção. Caso o ensaio venha do monitoramento contínuo, por exemplo, embora as variáveis sejam de constante acesso, ou seja, a medição seja feita continuamente, o ensaio é considerado como o processamento dos dados. Além disso, com o planejamento, o ensaio será realizado no melhor momento para a indústria.

4 DADOS, POPULAÇÃO E AMOSTRAS

Sabemos que há uma enorme quantidade de informação que pode ser obtida dos processos industriais. Dessa forma, é necessário conceituarmos alguns tópicos. Os dados, por exemplo, podem vir de diversas maneiras. Conceituamos os dados como as informações, numéricas ou booleanas, obtidas de uma aferição. Vamos classificar os dados conforme a tabela a seguir, baseada em Werkema (2014) e Vieira (2014):

TABELA 10 – INFORMAÇÕES NUMÉRICAS OBTIDAS DE UMA AFERIÇÃO

Categoria	Classificação	Descrição
Cronológica	Histórico	<ul style="list-style-type: none"> Dados já disponíveis na empresa, podem ser resultados do controle de uma variável de interesse e ser um subproduto do processo.
	Experimental	<ul style="list-style-type: none"> Dado proveniente de experimento planejado, pode ser um experimento singular e ser experimentos programados;
Tipo	Atributo	<ul style="list-style-type: none"> Dados discretos. Resultado de uma atribuição. Avaliação fácil e rápida, porém menos exata, e podem ser booleanos ou número inteiro.
	Variável	<ul style="list-style-type: none"> Dados contínuos. Resultado de uma medição. Avaliação mais demorada, necessita de instrumentos, porém mais exata. Números com casas decimais e incerteza quantificada.

FONTE: Adaptada de Werkema (2014) e Vieira (2014)

É importante observarmos qual o tipo de dados que temos, ou o tipo que será necessário, para garantir o entendimento correto do processo. Afinal, o tipo de dado vai influenciar diretamente no tipo de ferramenta que iremos escolher para monitorar o processo.

Outro conceito de interesse é o de população. Segundo Werkema (2016, p. 28), "população é a totalidade dos elementos de um universo sobre o qual desejamos estabelecer conclusões ou exercer ações". Um exemplo de população seriam todos os dados que extraímos sobre uma determinada característica de um produto, porém pode ser inviável utilizar toda a população para caracterizar um processo, e dessa forma é comum a utilização de amostras. Segundo Werkema (2016, p. 28), "a amostra é um subconjunto de elementos extraídos de uma população".

Enquanto torna-se impraticável a utilização de toda uma população para aquisição de dados, a utilização de amostras também necessita de cuidados, pois a amostra deve representar plenamente a população da qual foi extraída. Sabemos que as decisões quanto ao processo produtivo serão tomadas com base nos dados colhidos e, utilizando-se uma amostra, deve-se ter em mente a importância dos critérios de escolha da amostra. Hoje em dia, os métodos de controle e aferição de processos, principalmente na inspeção de produção, são baseados na amostragem de produtos, a não ser que haja norma específica de entidade reguladora que determine 100% de amostragem.

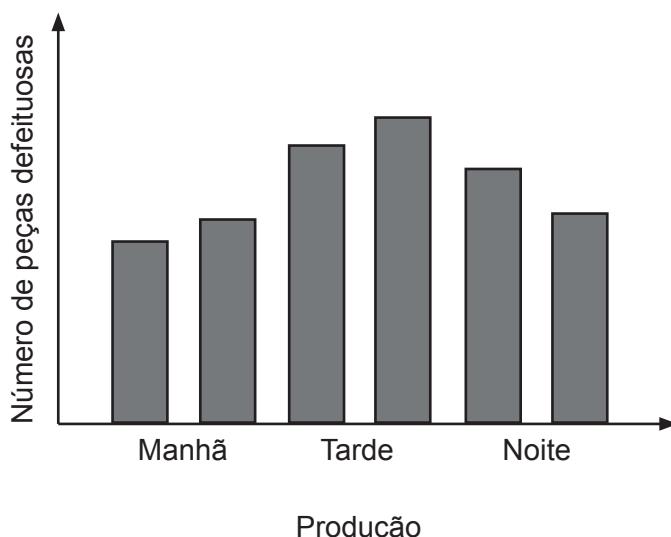
5 ESTRATIFICAÇÃO

Quando realizamos estudos na produção industrial, podemos investigar como diferentes fatores influenciam nos resultados. Essa abordagem chama-se estratificação. Segundo Cesar (2011, p. 15), "a estratificação consiste na divisão de um grupo em diversos subgrupos com base em fatores apropriados, os quais são conhecidos como fatores de estratificação". A estratificação é um tipo de abordagem que foca na visualização e análise dos dados obtidos, observando a influência de fatores diversos e apropriados sobre eles.

Podemos analisar vários fatores de estratificação em um mesmo conjunto de dados, por exemplo, qual a influência do turno na quantidade de produtos não conformes? Há influência da temperatura ambiente (verão/inverno) nesses resultados? Os fatores, em geral, dependerão da natureza do processo industrial.

Os resultados da estratificação normalmente são apresentados por gráficos ou tabelas.

FIGURA 6 – EXEMPLO DE FATOR DE ESTRATIFICAÇÃO: NÚMERO DE PEÇAS DEFETUOSAS FABRICADAS EM RELAÇÃO AO TURNO DE PRODUÇÃO



FONTE: Autora

TABELA 11 – EXEMPLO DE FATOR DE ESTRATIFICAÇÃO: RELAÇÃO OPERADOR POR TURNO

Operador	1º Turno	2º Turno	3º Turno
01	5	12	9
02	7	15	7

FONTE: A autora

RESUMO DO TÓPICO 1

Nesse tópico, você viu que:

- Ensaios e monitoramento fornecem informações importantes sobre os processos industriais.
- A escolha entre ensaios pontuais e monitoramento contínuo deve levar em conta a natureza do processo e do sistema industrial como um todo.
- Ensaios em ambientes industriais requerem cuidados especiais, e a maioria deles se refere ao planejamento do ensaio.
- Um bom planejamento deve ter um objetivo bem claro, único e específico.
- No plano do ensaio deve-se ter: identificação, responsável, etapa de produção, objetivo, condições ambientais, métodos, periodicidade, impacto e observações.
- Ter um planejamento não quer dizer que o ensaio seja completamente estático a ele, mas que os operadores estejam preparados para conduzi-lo.
- Os dados dividem-se em categorias quanto à cronologia, eles podem ser históricos ou pontuais, podem ser variáveis ou atributos.
- Dado é a informação adquirida de uma aferição.
- População é todos os elementos de interesse.
- Amostra é uma fração com características representativas da população.
- A estratificação auxilia o processamento dos dados obtidos em ensaios, observando seu comportamento a partir de diversos fatores, chamados fatores de estratificação.

AUTOATIVIDADE



- 1 Com base na citação de Possani et al., cite exemplos de como o monitoramento pode prevenir problemas ou atuar como acelerador da eficiência do processo.

Com o aumento da complexidade e do volume de operações nas indústrias de petróleo e mineração, há uma demanda cada vez maior para sistemas integrados de monitoramento de integridade estrutural, que incluem ensaios não destrutivos (POSSANI et al., 2017, p. 16.).

FONTE: POSSANI, D. et al. Ondas Ultrassônicas: teoria e aplicações industriais em ensaios não destrutivos. Revista Brasileira de Física Tecnológica Aplicada, Ponta Grossa, v. 4, n. 1. p. 16-33. mai/jun 2017.

- 2 O trabalho realizado por Berezowski et al. (2002) mostra a importância da eficiência balística nos sistemas de blindagem compostos por cerâmica/metal, conforme podemos ler na citação abaixo. No artigo é encontrada a seguinte tabela de resultado de ensaios de dureza e densidade e massa específica. Faça o planejamento de um ensaio de Dureza Vickers para cerâmica utilizando os passos abordados no Tópico 1 desta unidade:

TABELA 12 – RESULTADOS DE MASSA ESPECÍFICA E DE ENSAIO DE DUREZA

Composição	Massa Específica (g/cm ³)	Dureza Vickers (kg/mm ²)
A1	2,94	1922
A2	3,10	1992
B1	2,86	1981
B2	3,34	2004

FONTE: Adaptado de Berezowski et al. (2002)

A eficiência balística dos sistemas de blindagem compostos cerâmica/metal é, em grande parte, determinada pelas propriedades resistivas do estágio cerâmico. O trabalho consiste na avaliação dos efeitos, sobre a resistência mecânica de uma composição básica de β -SiC, da adição de 5% de α -SiC e da utilização da prensagem isostática no processo de conformação dos corpos-de-prova (BEREZOWSKI et al., 2002, p. 1.).

FONTE: BEREZOWSKI, L. R.; NETO, C. D. M.; MELO, F. C. L. D. **Avaliação da resistência mecânica de cerâmicas à base de carbeto de silício**. Instituto de Aeronáutica. Divisão de Engenharia Mecânica Aeronáutica. São José dos Campos, 2002.

- 3 Crie um exemplo de monitoramento de dados industriais em que é possível ver a importância dos fatores de estratificação. Nesse exemplo, indique qual a população analisada e qual a amostra.

FERRAMENTAS PARA A QUALIDADE

1 INTRODUÇÃO

Já entendemos a íntima e importante ligação entre metrologia e qualidade industrial. A qualidade, de uma maneira geral, é a diminuição da variação de determinada característica entre os produtos produzidos, e a metrologia visa quantificar e analisar as incertezas de um processo de medição. Dessa forma, a metrologia é uma das bases científicas da análise de qualidade, junto com a estatística.

Sabemos que às vezes, é complicado realizar todos os experimentos necessários e aplicar o conhecimento científico diretamente nos dados extraídos na indústria. Por isso, foram criadas ferramentas de fácil aplicação, de forma que seja possível analisar e identificar problemas, reduzindo variações controláveis nos processos industriais.

As sete ferramentas estatísticas da qualidade são um conjunto de técnicas gráficas usadas para compreender e melhorar um processo de produção. A denominação “sete ferramentas estatísticas da qualidade” surgiu no Japão, logo após a Segunda Guerra Mundial, quando as empresas precisaram capacitar grande quantidade de mão de obra para o controle de qualidade. Como não era possível ensinar estatística para todo o chão de fábrica, isto é, todos os trabalhadores, foram concentrados esforços no treinamento de pessoas para desenhar gráficos que fossem simples, mas resolvessem a maior parte das questões (VIEIRA, 2014, p. 4.).

Os métodos são visuais, ou seja, apresentam as informações de maneira gráfica, facilitando a compreensão dos resultados obtidos. Segundo Vieira (2014), é importante salientar que algumas das sete ferramentas mudam de autor para autor. Nesse livro serão consideradas as ferramentas fluxograma, diagrama de causa e efeito, folha de verificação, diagrama de Pareto, histograma, diagrama de dispersão e diagrama de controle.



A folha de verificação, pela sua grande utilização na coleta de dados, será abordada com mais detalhes no Tópico 3. Por isso, não aparecerá no desenvolvimento deste tópico.

As ferramentas da qualidade têm impacto direto e positivo sobre a produção. Moraes (2009) cita alguns dos benefícios de sua aplicação:

Aumento da produtividade; melhoria na qualidade de produto; redução do custo de cada unidade; redução nas perdas de refugos; redução nos prazos de entrega; redução na inspeção; redução dos gargalos de produção; melhoria no moral dos empregados; aumento do prestígio na empresa; menor número de reclamações de consumidores; economia em uso de material; maior interesse nas atividades; motivação para melhorar o trabalho; aprimoramento dos métodos e nos testes de inspeção; otimização do tempo nas realizações das tarefas; melhor disponibilidade dos dados relevantes para que possa ser feito o *marketing* da empresa (MORAES, 2009, p. 20).

2 FLUXOGRAMA

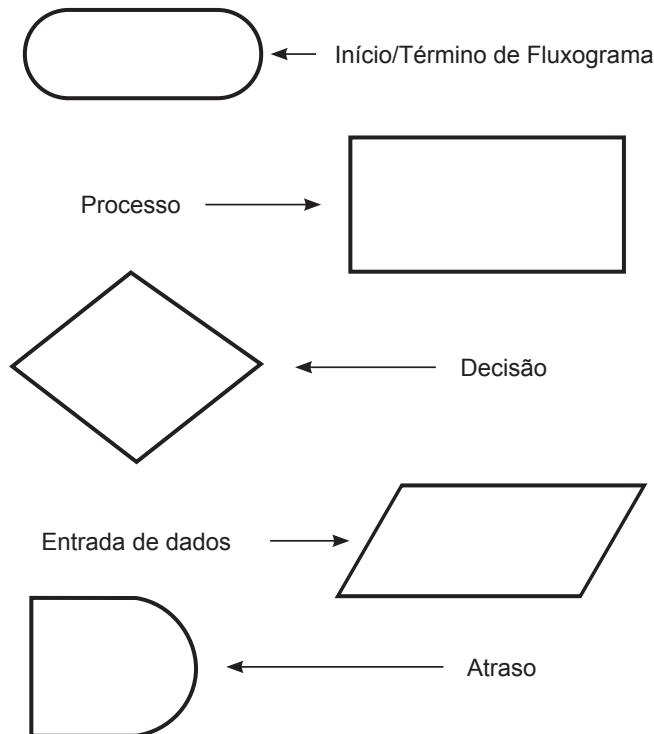
Fluxograma mostra a relação entre os processos de um determinado sistema. É uma ferramenta não só utilizada em meios industriais, mas também na determinação de passos de resolução e definição de algoritmos, por exemplo, visto a sua facilidade de interpretação.



"O fluxograma é um autêntico mapa da sequência de passos de um processo, evidenciando relações, dependências, trocas e interconexões, ajudando assim a corrigir deficiências" (VIEIRA, 2014, p. 11).

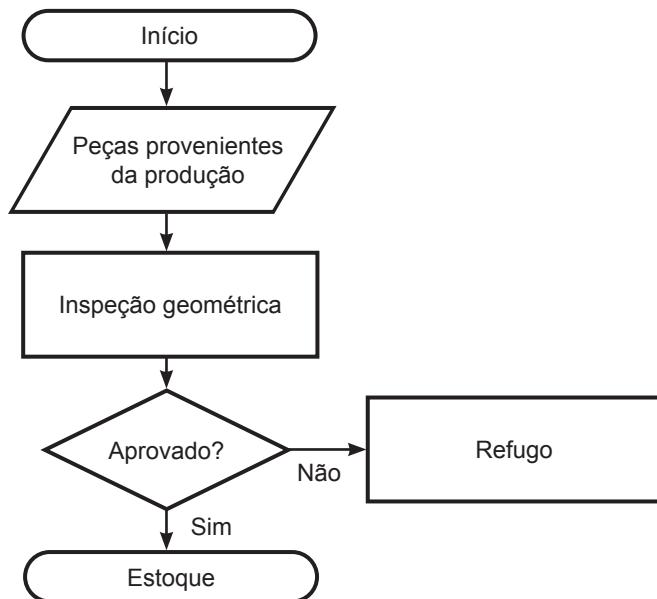
O tipo de fluxograma mais utilizado é o de diagrama de blocos, em que cada etapa de um processo é caracterizada por uma figura geométrica. As mais comuns, citadas por Vieira (2014), estão ilustradas a seguir.

FIGURA 7 – TIPOS DE BLOCOS DE UM FLUXOGRAMA



FONTE: A Autora

FIGURA 8 – EXEMPLO DE FLUXOGRAMA DA PARTE DE CONTROLE E INSPEÇÃO DE QUALIDADE



FONTE: A Autora

Um exemplo de fluxograma está na Figura 8, em que temos as etapas para aprovação de uma peça na inspeção geométrica.

É importante salientar que a maioria dos softwares utilizados nas empresas já possui as ferramentas apropriadas para a sua elaboração, como o pacote Microsoft Office (na barra de ferramentas de desenho existe um botão com as figuras geométricas utilizadas em fluxogramas).

Outro detalhe importante é a simplificação do processo no desenho, embora existam detalhes importantes, normalmente o fluxograma serve para dar uma ideia geral do processo em análise.

2.1 DIAGRAMA DE CAUSA E EFEITO

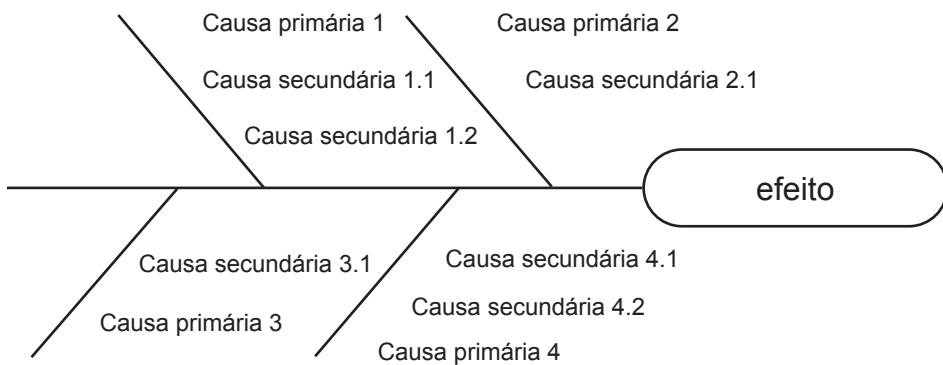
O diagrama de causa e efeito também é chamado de diagrama de Ishikawa ou, ainda, diagrama espinha de peixe. Segundo Vieira (2014), seu objetivo é a determinação de causas aos problemas encontrados no processo.



"Diagrama de causa e efeito (*cause and effect diagram*) é a ferramenta estatística que mostra a relação entre todos os fatores (as causas) que levam a determinada situação (o efeito). As causas primárias, depois de identificadas, são subdivididas em causas secundárias" (VIEIRA, 2014, p. 11).

O diagrama é desenhado conforme o modelo a seguir, em que a cada ramo é adicionada uma causa primária. Nos sub-ramos estarão as causas secundárias.

FIGURA 9 – MODELO DO DIAGRAMA DE CAUSA E EFEITO

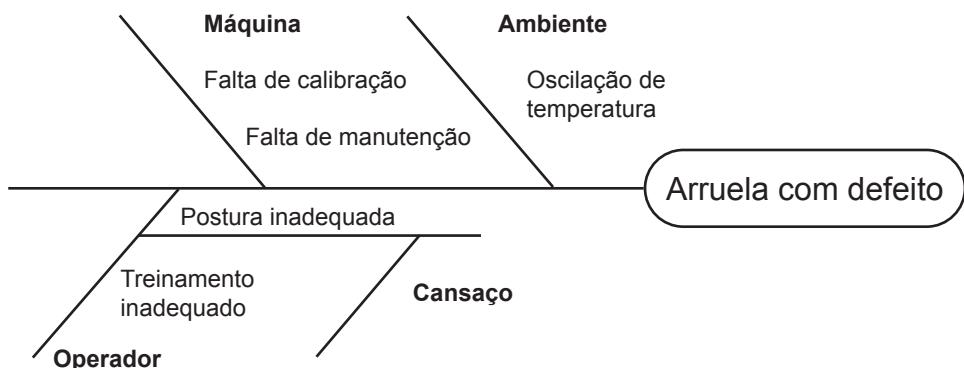


FONTE: A Autora

Para a confecção do diagrama de causa e efeito normalmente é realizada uma reunião com todos os principais envolvidos no processo. Nessa reunião, os diferentes atores do processo mostram as suas observações, contribuindo com diferentes causas primárias e secundárias.

Um exemplo de diagrama de Pareto está exposto na figura a seguir. Considerando o problema das peças não conformes produzidas por uma empresa de arruelas.

FIGURA 10 – EXEMPLO DE DIAGRAMA DE CAUSA E EFEITO PARA A PRODUÇÃO DE ARRUELAS COM DEFEITO



FONTE: A Autora



O vídeo Diagrama de Ishikawa (Ferramenta da Qualidade): Teoria + Exemplo Prático, do canal Aprendendo Gestão no YouTube, fala sobre o diagrama de causa e efeito. Acesse o link e assista: <<https://www.youtube.com/watch?v=U-0qzmFqH-0>>.

2.2 DIAGRAMA DE PARETO

O diagrama de Pareto é uma ferramenta para estudar as perdas decorrentes do processo produtivo.



Diagrama de Pareto (Pareto Chart) é um gráfico de barras ordenadas da maior para a menor. No eixo horizontal são colocados os tipos de perdas e no eixo vertical, as quantidades perdidas, de maneira que a ordem das barras mostre a importância relativa dos tipos de perdas (VIEIRA, 2014).

O estudo e definição dos motivos das perdas decorrentes do processo produtivo podem auxiliar na solução desses problemas, assim como, melhorar o entendimento sobre o processo produtivo em estudo.

Normalmente o diagrama de Pareto mostra as quantidades de forma decrescente de importância em porcentagem em relação ao total produzido. Dessa forma, o diagrama é utilizado para rastrear problemas e focar esforços de solução no problema com mais impacto na produção.

Vieira (2014) descreve alguns passos para fazer o diagrama de Pareto. Primeiro, selecione o tipo de perda a ser estudado. No nosso exemplo, defeitos em arruelas. Após, determine os motivos da perda. Nas arruelas temos o diâmetro interno fora no nominal, falta de planeza, alteração de cor e diâmetro externo fora do nominal. Faça um ensaio na indústria e colete dados relativos ao problema, anotando-os em uma folha de verificação, em que haverá o número de ocorrências pelo motivo da não conformidade. Lembre-se de usar a categoria “outros”, para outros motivos com pouca frequência de ocorrência. Com esses dados, arrumados em uma tabela, calcule porcentagens, frequências, e assim será possível construir o diagrama de Pareto.



O Tópico 3 falará somente sobre a folha de verificação.

Por exemplo, na fabricação de arruelas obteve-se a tabela de ocorrências a seguir.

TABELA 13 – EXEMPLO DE TABELA COM FREQUÊNCIA DE OCORRÊNCIA DE NÃO

Motivo	Ocorrências
Diâmetro interno fora no nominal	10
Falta de planeza	4
Alteração de cor	2
Diâmetro externo fora do nominal	15
Outros	4
Total	35

FONTE: A Autora

Com esses dados é possível calcular as frequências de ocorrência e frequência acumulada, conforme a tabela a seguir:

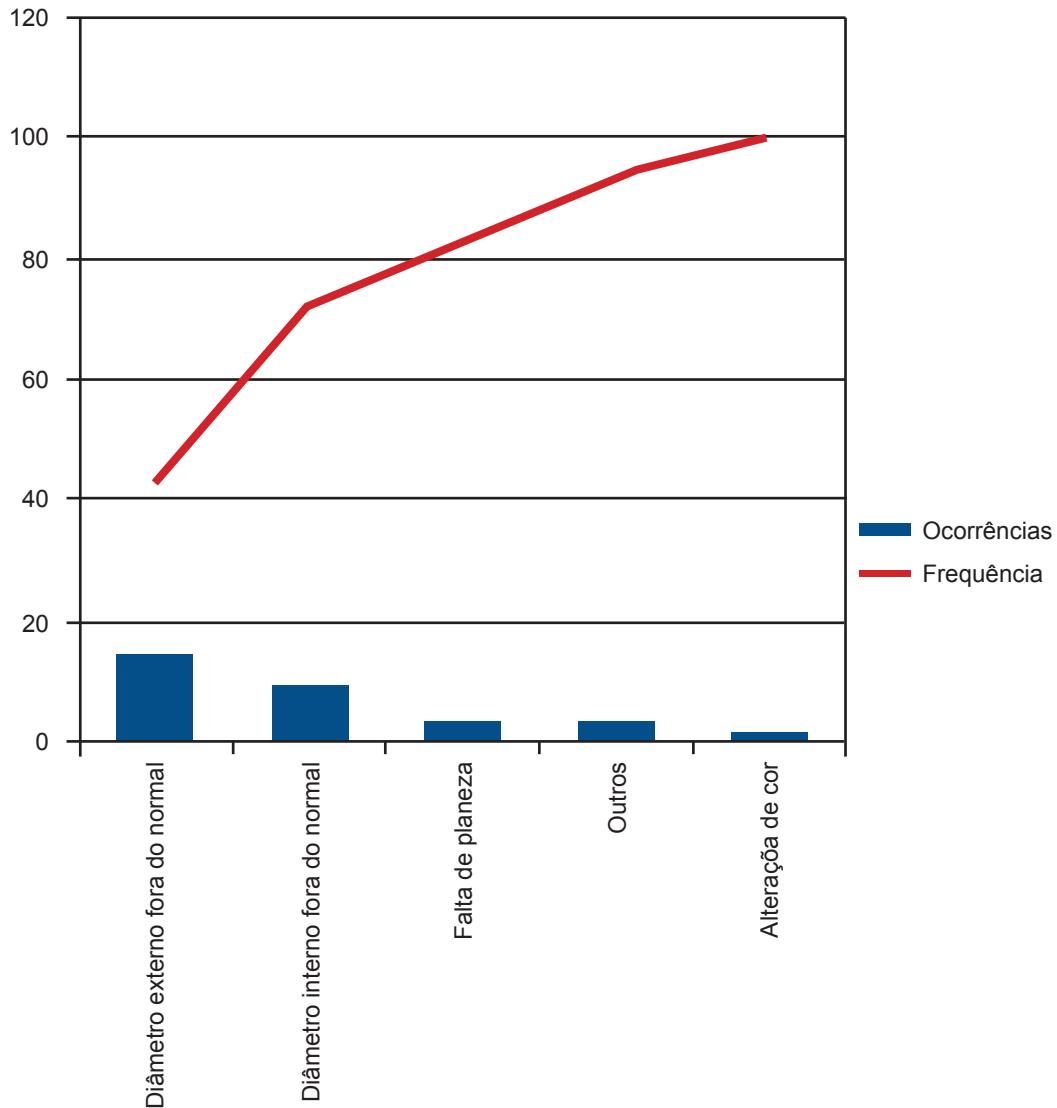
TABELA 14 – TABELA COM CÁLCULO DA FREQUÊNCIA DE OCORRÊNCIA E FREQUÊNCIA ACUMULADA

Motivo	Ocorrência	Frequência	Frequência Acumulada
Diâmetro interno fora do nominal	10	29	29
Falta de planeza	4	11	40
Alteração de cor	2	6	46
Diâmetro externo fora do nominal	15	43	89
Outros	4	11	100
Total	35	100	

FONTE: A Autora

Finalmente, construir o gráfico de barras:

FIGURA 11 – DIAGRAMA DE PARETO PARA AS PERDAS NA PRODUÇÃO DE ARRUELAS



FONTE: A autora



O vídeo Diagrama de Pareto (Ferramenta da Qualidade), Teoria + Exemplo Detalhado, do canal Aprendendo Gestão no YouTube, mostra um exemplo detalhado de confecção do Diagrama de Pareto. Acesse o link e assista ao vídeo: <<https://www.youtube.com/watch?v=1XKzMz7wOw0>>.

2.3 HISTOGRAMA

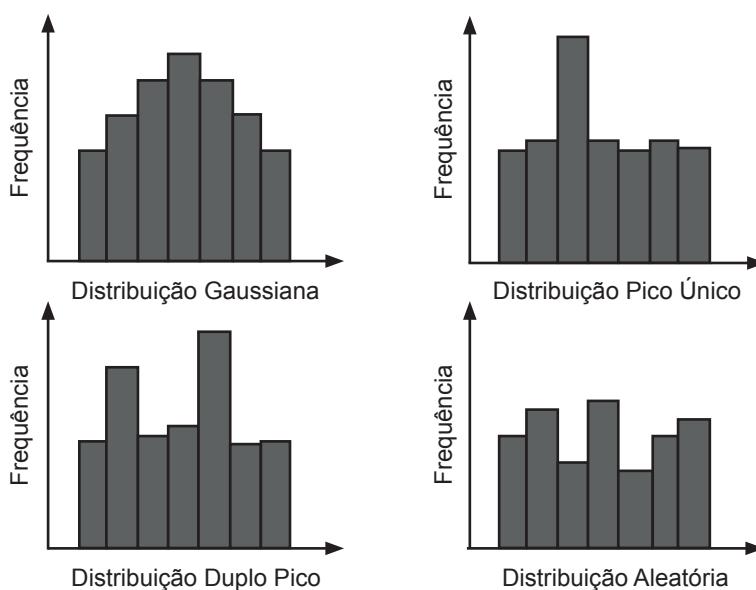
O histograma também é uma opção para visualização gráfica dos dados obtidos. Normalmente, construímos um histograma para determinar a variação dos dados obtidos do processo industrial. Segundo o Blog Ferramentas da Qualidade (2017), o histograma representa “um modelo estatístico para a organização dos dados, exibindo a frequência com que uma determinada amostra de dados ocorre”.



O vídeo Histogramas (Ferramenta da Qualidade) - Fundamentos e exemplos, do canal Aprendendo Gestão no YouTube, mostra a diferença entre um histograma e outros gráficos. Acesse o link: <https://www.youtube.com/watch?v=l233_bZVxNc>.

A importância de sua construção vem da possibilidade de analisar um grande número de dados apenas pela forma apresentada pelo histograma, que remete ao padrão dos dados. Pode apresentar uma distribuição gaussiana, um pico bem delimitado, mais de um pico, ou simplesmente, mostrar uma distribuição aleatória de dados, que pode ser observada na figura a seguir. Todas essas distribuições mostram o comportamento dos dados e, por consequência, nos dão informações sobre o processo em estudo.

FIGURA 12 – EXEMPLOS DE DISTRIBUIÇÃO DE DADOS EM UM HISTOGRAMA



FONTE: A Autora

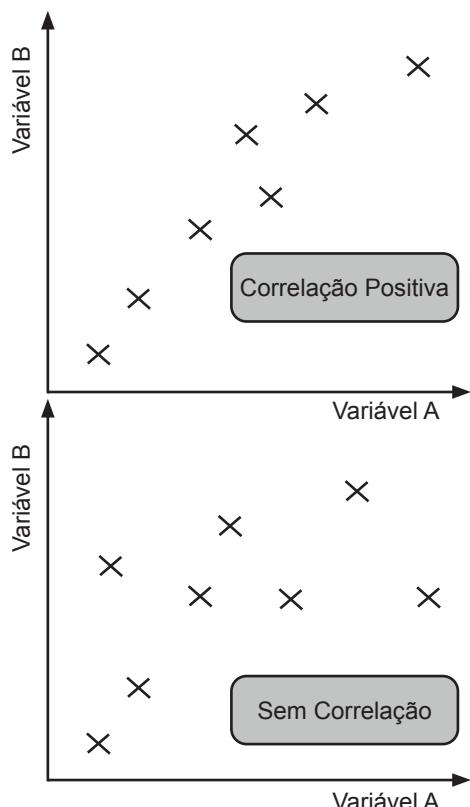
2.4 DIAGRAMA DE DISPERSÃO

O diagrama de dispersão mostra a relação entre duas variáveis considerando os dados colhidos no processo industrial. Sabemos que algumas variáveis são dependentes de outras, por exemplo, o comprimento de uma peça com a temperatura ambiente, a física nos diz que quanto maior a temperatura, maior o comprimento da peça, e dessa forma consideramos as duas variáveis diretamente dependentes. Porém, quando analisamos processos, nem sempre é clara a relação entre as diversas variáveis e, por isso, pode-se utilizar o diagrama de dispersão para mostrar a dependência ou independência entre duas variáveis, como é possível ver na Figura 13.



O vídeo Diagrama de Dispersão (Ferramenta da Qualidade): Teoria + Exemplo no Excel, do canal Aprendendo Gestão no YouTube, mostra como construir um diagrama de dispersão no Excel. Acesse o link: <<https://www.youtube.com/watch?v=rTcP161k8q4>>.

FIGURA 13 – TIPOS COMUNS DE DIAGRAMAS DE DISPERSÃO



FONTE: A autora

Lembre-se de que o diagrama de dispersão quer mostrar a relação entre duas variáveis, mas, para isso, deve-se cuidar com os dados que serão inseridos. A escolha das variáveis a serem consideradas deve ser feita levando em consideração que foram adquiridas ao mesmo tempo, no mesmo processo. Isso serve para minimizar efeitos de outras dependências dessas mesmas variáveis, como a diferença de temperatura, por exemplo.

2.5 DIAGRAMA DE CONTROLE

O Diagrama de Controle, também chamado de carta de controle, é um gráfico que mostra os dados de interesse do processo através de uma linha temporal (DOTY, 1996). Nesse tipo de gráfico, o valor da variável de interesse está no eixo vertical e o tempo no eixo horizontal. Normalmente acompanham o gráfico uma linha central sólida, que representa o valor médio, assim como duas linhas pontilhadas, que indicam o valor máximo e mínimo da variável.

Doty (1996) comenta que o gráfico de controle é muito utilizado no monitoramento de um novo processo, produto ou ferramenta, muitas vezes sendo colocado em desuso assim que a qualidade do novo componente se mostre satisfatória.



Existem vários tipos de cartas de controle, agrupadas por atributo ou por medição. Uma melhor análise deles será realizada na matéria de Controle Estatístico de Processos.

RESUMO DO TÓPICO 2

Nesse tópico, você viu que:

- As ferramentas da qualidade são sistemas gráficos criados para facilitar a solução de problemas no chão de fábrica.
- O Fluxograma mostra a sequência de processo no sistema industrial.
- Diagrama de causa e efeito mostra as possíveis causas para um efeito indesejável no produto produzido.
- Diagrama de Pareto é um gráfico de barras construído para analisar as perdas de produção.
- O Histograma mostra a distribuição de determinada característica entre produtos, ou a distribuição de sua ocorrência.
- O Diagrama de Dispersão indica a relação entre duas variáveis do processo.
- Diagrama de Controle é uma análise temporal dos dados coletados.

AUTOATIVIDADE



- 1 Pesquise sobre a produção de asfalto na internet e construa o fluxograma dos processos envolvidos.
- 2 A incerteza de medição pode ser influenciada por diversos fatores, entre eles fatores relativos ao instrumento, ao ambiente, ao operador e ao procedimento. Faça o diagrama de causa e efeito para a incerteza de medição.
- 3 Uma fábrica de sapatos fez uma avaliação no seu controle de qualidade e encontrou os seguintes motivos de perdas de produção:

TABELA 15 – MOTIVOS DE NÃO CONFORMIDADE DA PRODUÇÃO DE SAPATOS

Motivo	Quantidade de Peças
Solado irregular	50
Tamanho fora de padrão	24
Cor fora de padrão	16
Outros	10

FONTE: A autora

A partir desses dados, faça a tabela de frequência e o Diagrama de Pareto para a avaliação desta indústria. Qual seria o maior motivo de perda de produção?

- 4 Considerando que o solado irregular é o maior motivo de perda de produção, o gerente pediu para fazer uma inspeção mais detalhada dessa característica, medindo a largura do solado. Os dados obtidos estão na tabela a seguir. Conforme esses dados, construa um histograma e o classifique quanto ao tipo de distribuição.

TABELA 16 – TABELA RELACIONANDO AS MEDIÇÕES DA LARGURA DO SOLADO DE 20 SAPATOS

Peça	Dado	Peça	Dado	Peça	Dado	Peça	Dado
01	30,05	06	30,01	11	29,97	16	30,04
02	29,95	07	30,00	12	29,99	17	30,02
03	30,01	08	30,02	13	30,00	18	29,98
04	30,00	09	29,98	14	30,03	19	30,01
05	29,99	10	30,00	15	29,96	20	29,99

FONTE: A autora

- 5 João acredita que a variação da sola é fruto da variação da temperatura no ambiente fabril durante a fabricação. Por isso, foi medida a temperatura junto com a variação das peças, e anotado na tabela a seguir. Existe relação entre essas duas variáveis?

Dica: faça o diagrama de dispersão usando a função gráfico de dispersão, disponível em softwares de planilha eletrônica, como o Microsoft Office Excel e o LibreOffice Calc.

TABELA 17 – RELACIONANDO MEDIDA DA LARGURA DO SOLADO EM RELAÇÃO À TEMPERATURA AMBIENTE

Largura do solado (mm)	Temperatura ambiente (°C)
30,01	23,5
30,00	25,0
30,01	23,0
30,02	23,5
30,05	24,0
30,02	23,2
29,98	22,9
29,98	24,6
29,99	23,0
30,03	22,4
30,04	24,5
30,06	22,9
30,00	23,7
29,97	24,0

FONTE: A autora

FOLHA DE VERIFICAÇÃO

1 INTRODUÇÃO

Até agora relacionamos a necessidade de ensaios e monitoramento com algumas ferramentas que possam ajudar a entender os dados coletados. Uma dessas ferramentas, com uso frequente no meio industrial, é a folha de verificação. Segundo Vieira (2014):

Todo processo gera grande quantidade de informações que precisam ser analisadas, mas, na maioria das vezes, é impossível analisar tudo o que está acontecendo. Examinam-se amostras desse universo. As informações coletadas precisam ser registradas para que o padrão das ocorrências possa ser apreendido. Há uma ferramenta para isso: é a folha de verificação (VIEIRA, 2014, p. 20).

Há vários tipos e formas de folhas de verificação, que vão desde tabelas desenhadas em papel até planilhas eletrônicas, e seus dados fornecem informações importantes sobre o andamento do processo. As folhas de verificação são, por definição, práticas e diretas, e são utilizadas em todas as outras ferramentas de qualidade.

Neste tópico iremos estudá-la, em sua definição, tipos e finalidades.

2 DEFINIÇÃO

A folha de verificação nada mais é que uma planilha para registro dos dados obtidos de um determinado processo. Segundo Vieira (2014, p. 20), “também devem ser registrados em folhas de verificação: a) causas de acidentes de trabalho; b) causas de quebra de equipamentos; c) tempo para completar tarefas; d) erros de funcionários; e) reclamações de clientes”.

A organização dos dados em folhas de verificação tem várias utilidades. O site Marketing Futuro cita algumas delas:

Tornar os dados fáceis de obter e de utilizar-se; dispor os dados de uma forma mais organizada; verificar a distribuição do processo de produção: coleta de dados de amostra da produção; verificar itens defeituosos: saber o tipo de defeito e sua percentagem; verificar a localização de defeito: mostrar o local e a forma de ocorrência dos defeitos; verificar as causas dos defeitos; fazer uma comparação dos limites de especificação; investigar aspectos do defeito: trinca, mancha; obter dados da amostra da produção; determinar o turno, dia, hora, mês e ano, período em que ocorre o problema; criar várias ferramentas, tais como: diagrama de Pareto, diagrama de dispersão, diagrama de controle, histograma (MARKETING FUTURO, 2017).

Como é possível ver, a folha de verificação fornece base para todas as outras ferramentas da qualidade citadas no Tópico 2. Segundo Ferramentas da Qualidade (2017), a folha de verificação é apontada como uma ferramenta genérica. Esse caráter genérico faz com que seja uma ferramenta altamente adaptável, podendo ser incorporada em qualquer tipo de indústria. Normalmente ela é usada no início de um novo controle de processo ou quando há problemas a serem solucionados na indústria.

2.1 VANTAGENS E DESVANTAGENS

A utilização da folha de verificação possui vantagens e desvantagens. Entre as vantagens podemos citar:

- Simples preenchimento da folha de verificação.
- Facilita a identificação da causa de problemas.
- Auxilia na melhoria do processo.
- A anotação é realizada na hora em que o fato acontece.
- Organiza os dados.
- Simples adaptação da estrutura da folha ao processo em estudo.

Entre as desvantagens:

- Sistema lento de coleta de dados.
- Pode ter custos extras e interferir no processo de produção.
- Aquisição de dados discretos.
- O preenchimento deve ser sequencial em alguns casos.
- Possibilidade de confusão se os dados não aparecerem nos formulários.
- Exige planejamento cuidadoso do formato, antes de ver os dados.
- Pode haver problemas com os instrumentos de medida.

2.2 COMO FAZER?

Para a elaboração da folha de verificação não existe um padrão. Porém, assim como o planejamento de ensaios e experimentos, discutidos no Tópico 1, é necessário definir o objetivo da folha de verificação, delimitando o tamanho das amostras, métodos e instrumentos utilizados, quando será feita a coleta de dados, entre outros aspectos (MORAES, 2009, p. 58).

Vieira (2014) apresenta algumas etapas genéricas a serem seguidas:

Decida o que deve ser observado, julgado ou medido; decida quando os dados devem ser coletados (o horário das coletas) e por quanto tempo; desenhe a planilha de maneira que os dados possam ser registrados quando possível, por meio de marcações com um X ou qualquer outro símbolo; escreva legendas, ponha nomes em linhas e colunas; deixe espaço suficiente para registrar aspectos de interesse da fonte de dados, como: máquina, operador, condições do ambiente, material, fornecedor, hora, equipamento (instrumento) de medição, nome do responsável pela coleta de dados; verifique se o tempo disponível é suficiente para registrar todos os dados; faça um teste, ou seja, experimente usar a folha de verificação que você desenhou em condições reais (VIEIRA, 2014, p. 21).

Após os testes de coleta de dados em ambiente industrial poderá ser necessário realizar ajustes para adequação. Após os ajustes, novos testes devem ser realizados, e esse ciclo repetido até a folha de verificação ter uma utilização otimizada.

Vieira (2014) comenta a importância de a folha de verificação ser direta ao ponto de estudo, economizando tempo do operador. Além disso, existe a importância do operador da folha de verificação. Moraes (2009) comenta que dados ruins são piores que a falta deles. Lembre-se de que a folha de verificação deve ser muito bem projetada para que sua simplicidade e eficácia sejam notadas.



"Uma folha de verificação bem elaborada é o ponto de partida de todo procedimento de transformação de opiniões em fatos e dados" (WERKEMA, 2016, s.p.).

2.2.1 Tipos

Conforme a finalidade, podemos ter folhas de verificação diferentes. Werkema (2016) elenca os quatro tipos mais utilizados:

- folha de verificação para distribuição de um item de controle de um processo produtivo;
- folha de verificação para classificação;
- folha de verificação para localização de defeitos;
- folha de verificação para identificação de causas de defeitos.

Além dessas quatro citadas acima, consideraremos também o *check list*, que, embora não seja uma folha de verificação, pode ser considerado como uma lista de verificação.

2.2.2 Folha de verificação para distribuição de um item de controle de um processo produtivo

No Tópico 2 vimos a ferramenta histograma como meio de verificar a distribuição de um item. Porém, antes de fazê-lo é necessário coletar os dados, depois processá-los e, por fim, construir o histograma. Existe um método de folha de verificação que torna essa tarefa mais fácil, já classificando as ocorrências conforme sua observação. No final do tempo de observação, o histograma já estará construído. No exemplo a seguir, temos a medição do diâmetro interno de arruelas produzidas em uma indústria.

QUADRO 1 – EXEMPLO DE FOLHA DE VERIFICAÇÃO PARA DISTRIBUIÇÃO DE UM ITEM DE CONTROLE DE UM PROCESSO PRODUTIVO

Operador		Data									
		Frequência (Nº. De ocorrências)									
Diâmetro interno da arruela (9 mm)	-0,6										
	-0,5										
	-0,4										
	-0,3										
	-0,2										
	-0,1										
	0,0										
	+0,1										
	+0,2										
	+0,3										
	+0,4										
	+0,5										
	+0,6										
Observações:											

FONTE: A autora

No Quadro 1 temos um esqueleto da folha de verificação para distribuição de item. Observamos nela que temos, além do cabeçalho, um campo para número de ocorrências. Para cada arruela medida, seu dado será colocado na tabela em forma de X. Considerando o exemplo de preenchimento desta folha, vamos medir todas as arruelas produzidas por uma nova ferramenta instalada no parque industrial. Os índices +0,6 e -0,6 são os pontos máximos de aceitação da arruela.

Considerando a primeira medida da peça 1 como 9,1 mm, feita pelo operador Robson Silva, no dia 10 de outubro de 2017. Com esse resultado ele deve fazer a marcação na ocorrência 1 com variação +0,1 mm, conforme o Quadro 2 a seguir.

QUADRO 2 – EXEMPLO DE PREENCHIMENTO DE FOLHA DE VERIFICAÇÃO PARA DISTRIBUIÇÃO DA MEDIDA DO DIÂMETRO INTERNO DE ARRUELAS PRODUZIDAS EM UMA INDÚSTRIA

Operador	Robson da Silva		Data	10/10/2017					
				Frequência (Nº. de ocorrências)					
Diâmetro interno da arruela (9 mm)	-0,6								
	-0,5								
	-0,4								
	-0,3								
	-0,2								
	-0,1								
	0,0								
	+0,1	X							
	+0,2								
	+0,3								
	+0,4								
	+0,5								
	+0,6								
Observações: medições realizadas entre 15 e 16h.									

FONTE: A autora

Para simplificar, vamos considerar que as próximas medições serão conforme a tabela a seguir:

QUADRO 3 – DADOS PARA O EXEMPLO DE PREENCHIMENTO DA FOLHA DE VERIFICAÇÃO

Medição	Valor	Medição	Valor	Medição	Valor
01	9,1	08	9,2	15	9,2
02	9,0	09	8,9	16	8,9
03	9,4	10	9,3	17	8,8
04	8,9	11	8,8	18	9,0
05	8,7	12	9,0	19	8,9
06	9,2	13	9,1	20	9,1
07	9,0	14	9,1	21	9,0

FONTE: A autora

Dessa forma, a folha de verificação para a distribuição da medida do diâmetro interno das arruelas será o Quadro 4 a seguir, incluindo as 21 medidas do Quadro 3.

QUADRO 4 – EXEMPLO DE PREENCHIMENTO DE FOLHA DE VERIFICAÇÃO PARA DISTRIBUIÇÃO DA MEDIDA DO DIÂMETRO INTERNO DE ARRUELAS PRODUZIDAS NUMA INDÚSTRIA

Operador	Robson da Silva			Data	10/10/2017				
	Frequência (Nº. de ocorrências)								
Diâmetro interno da arruela (9 mm)	-0,6								
	-0,5								
	-0,4								
	-0,3	X							
	-0,2	X	X	X					
	-0,1	X	X	X	X	X			
	0,0	X	X	X	X	X			
	+0,1	X	X	X	X				
	+0,2	X	X	X					
	+0,3	X							
	+0,4	X							
	+0,5								
	+0,6								
Observações: medições realizadas entre 15 e 16h.									

FONTE: A autora

Como pode-se observar no Quadro 4, o resultado final da folha de verificação para distribuição é o próprio histograma. Werkema (2014) alerta sobre marcações diferentes caso seja necessário considerar diferentes operadores ou matérias-primas, considerando isso para uma futura estratificação dos dados.

2.2.3 Folha de verificação para classificação de defeito

A folha de verificação para classificação é uma das mais utilizadas. Normalmente ela cobre a qualidade da produção, indicando, por exemplo, a quantidade de itens não conformes produzidos. Dessa forma, temos a listagem de defeitos e sua frequência, auxiliando na busca por soluções.

Esse tipo de folha de verificação possui particularidades, e novamente requer muitos cuidados em sua elaboração, isso se deve ao fato de que, se ele explicitar os tipos de defeitos ocorridos, é importante que abranja todas as opções importantes para o processo. Além disso, podem ser feitas diferentes folhas para diferentes operadores, turnos e inspetores, objetivando a estratificação dos dados. Os Quadros 6 e 7 mostram exemplos de folhas de verificação para classificação de defeitos.

O Quadro 6 mostra uma folha de verificação em que, temos o total de produtos não conformes em relação a hora de produção e ao total de produtos.

QUADRO 6 – EXEMPLO DE FOLHA DE VERIFICAÇÃO DE CLASSIFICAÇÃO DE DEFEITOS

Operador	João	Data	03/04/15
Horário	Total de produtos		Produtos Não Conforme
13-14h	50		4
14-15h	43		7
15-16h	52		6
16-17h	60		8

FONTE: A autora

O Quadro 7, por sua vez, é uma folha de verificação com a classificação dos defeitos encontrados, sendo anotado o defeito conforme a sua ocorrência na linha de produção.

QUADRO 7 – EXEMPLO DE FOLHA DE VERIFICAÇÃO DE CLASSIFICAÇÃO DE DEFEITOS

Operador	Marcelo	Data:	07/01/02
Equipamento	Extrusora E injetora de plástico		
Defeito	Ocorrência		
Bolhas			18
Material insuficiente			5
Superaquecimento			6
Outros			4
Total		32	

FONTE: A autora

2.2.4 Folha de verificação para localização de defeitos

A folha de verificação para localização de defeitos é mais utilizada para indicação de defeitos externos em produtos (MORAES, 2009; FERRAMENTAS DA QUALIDADE, 2017). Durante o ciclo produtivo é possível que ocorram diversos defeitos externos, e que não obrigatoriamente estão relacionados com a ação de produção em si, um exemplo são as manchas de óleo em tecido causadas pelas esteiras que os movem entre máquinas. Entre os defeitos mais comuns estão manchas, riscos, bolhas e sujeiras.

Moraes (2009, p. 24) comenta que “esse tipo de folha de verificação é uma importante ferramenta para a análise do processo, pois nos conduz para onde e como ocorre o defeito”. Isso porque, além do tipo de defeito, também é colocada a localização do mesmo no produto. Normalmente os defeitos são anotados na forma de desenhos, ou pequenos ícones, e colocados numa estrutura parecida com o produto produzido.

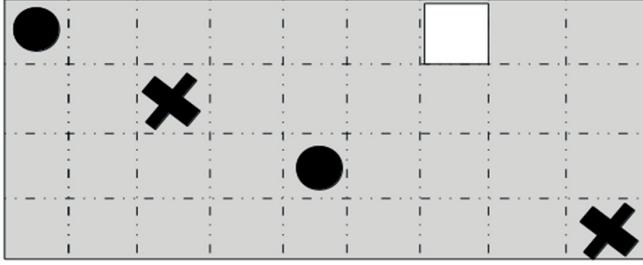
FIGURA 14 – EXEMPLO DE LEGENDA DE FOLHA DE VERIFICAÇÃO PARA LOCALIZAÇÃO DE DEFEITOS EM UMA CHAPA DE MADEIRA

Folha de verificação para localização de defeitos		
Inspetor(a):	Data:	
Legenda:		
		
Bolha	Sujeira	Orifício

FONTE: A autora

Considerando a produção de placas de madeira MDF, a folha de verificação para localização de defeitos seria como a figura a seguir, em que temos o desenho da placa de MDF em cinza.

FIGURA 15 – EXEMPLO DE FOLHA DE VERIFICAÇÃO PARA LOCALIZAÇÃO DE DEFEITOS

Folha de verificação para localização de defeitos		
Inspetor(a):	Data:	
Legenda:		
	Bolha	Sujeira
Localização:		
Ocorrências:		
Observações:		

FONTE: A autora

2.2.5 Folha de verificação para identificação de causas de defeitos

Esse tipo de folha de verificação é uma aplicação do tipo anterior, em que é possível ver os defeitos em relação a cada produto produzido. Ferramentas da Qualidade (2017) cita que esse modelo é mais amplo e melhor para procurar fatores de estratificação. No modelo de folha, que será apresentado, temos um desenho mais simples, conforme a figura a seguir.

FIGURA 16 – EXEMPLO DE FOLHA DE VERIFICAÇÃO PARA IDENTIFICAÇÃO DE CAUSAS DE DEFEITOS

Inspector:	José	Data:	03/02/17	Turno:	Geral
Produto/Defeito		Causa 01	Causa 02	Causa 03	Causa 04
01	X				
02			X		X
03	X				
04				X	
05	X				X
06					X
07		X			
Total	03	02	01	03	

Causa 01: bolha na superfície; causa 02: mancha de óleo; causa 03: risco na superfície; causa 04: buraco na superfície.

Observações:

FONTE: A autora

2.2.6 Checklist

A quinta ferramenta da qualidade a ser abordada aqui é o *checklist*.

Checklist é uma lista de itens para verificação (checagem) que varia conforme o setor no qual é utilizada. Pode ser elaborada para verificar as atividades já efetuadas ou ainda a serem feitas, necessárias para a execução dos passos de um procedimento (VIEIRA, 2014, p. 24).

Embora não seja considerado uma ferramenta da qualidade, o *checklist* entra na lista por ser uma ferramenta de checagem de atributos. É uma ferramenta importante em diversos setores da economia, tendo papel de destaque nos sistemas de organização.



Embora a tradução de *checklist* seja lista de verificação, o *checklist* não é a mesma coisa que lista de verificação (WERKEMA, 2016).

O *checklist* pode ser utilizado, no entanto, no acompanhamento de atributos de qualidade, por exemplo, se houver cinco produtos não conformes, deve-se tomar uma ação de um *checklist*.



O site Ferramentas da Qualidade traz alguns exemplos de utilização da folha de verificação. Acesse o link: <<http://www.ferramentasdaqualidade.org/folha-de-verificacao/>>.

RESUMO DO TÓPICO 3

Nesse tópico, você viu que:

- A folha de verificação é uma das ferramentas de qualidade que tem como objetivo a coleta de dados de maneira sistemática.
- Pelo seu caráter genérico, a folha de verificação é muito utilizada em todo tipo de indústria.
- A utilização da folha de verificação tem vantagens como sistematizar a coleta de dados, facilitar a observação de problemas no local onde é realizada e facilidade de ser utilizada.
- Algumas das desvantagens de sua utilização: possível tempo perdido de produção, problemas caso os dados não sejam fiéis à realidade, e a possibilidade de folhas mal projetadas.
- Alguns tipos mais comuns de folha de verificação: folha de verificação para distribuição de um item de controle de um processo produtivo; folha de verificação para classificação; folha de verificação para localização de defeitos e folha de verificação para identificação de causas de defeitos.
- A folha de verificação para distribuição de um item de controle de um processo produtivo mostra o tipo de distribuição de maneira gráfica, construindo um histograma *in loco*.
- A folha de verificação para classificação mostra os itens que estão contidos em determinadas classificações. A mais comum é produtos conforme e produtos defeituosos.
- A folha de verificação para localização de defeitos mostra quais os defeitos superficiais estão presentes em um produto e a sua localização.
- A folha de verificação para identificação de causas de defeitos é uma expansão da folha de verificação para localização de defeitos agrupando as causas dos diferentes defeitos encontrados.

AUTOATIVIDADE



1 Marque verdadeiro (V) e falso (F) nas afirmações a seguir:

- () Qualquer tabela é uma folha de verificação.
- () A folha de verificação deve ser um instrumento intuitivo e de fácil preenchimento.
- () Uma das vantagens da folha de verificação é a existência de padrões que servem para qualquer indústria.
- () O checklist é uma folha de verificação.
- () A folha de verificação exige conhecimento do processo e planejamento cuidadoso do formato antes de sua aplicação.
- () A folha de verificação pode fornecer dados para as outras ferramentas da qualidade.

2 Descreva o passo a passo para a elaboração de uma folha de verificação eficiente.

3 Construa a folha de verificação para determinar a distribuição de valores da pressão de determinado equipamento do processo, a partir dos dados da tabela a seguir. Lembre-se de que a folha de verificação deve conter todas as informações necessárias para análise dos dados.

TABELA 18 – RELAÇÃO DE MEDIDAS DA PRESSÃO EM DETERMINADO EQUIPAMENTO DO PROCESSO PRODUTIVO

Dado	Valor (Pa)
01	5,2
02	5,1
03	4,9
04	5,3
05	4,8
06	5,0
07	4,9
08	5,5
09	5,4
10	4,9
11	4,6
12	4,9
13	5,2
14	5,3
15	4,7
16	4,8
17	5,2
18	5,1
19	5,0
20	4,5
21	5,1

22	5,4
23	4,6
24	4,7
25	5,3

FONTE: A autora

4 Leia e observe as figuras a seguir.

Em uma indústria têxtil que produz produtos de cama, mesa e banho, a inspeção final classifica os produtos em 1º, 2º e 3º tipo. O 1º tipo é o produto que será entregue ao cliente, o 2º tipo são defeitos leves e serão revendidos com preços mais baixos na loja de fábrica e o 3º tipo são produtos inviáveis para utilização sendo remetidos para a reciclagem. A diferença principal entre os tipos está no tipo de defeito apresentado pelo produto. No lençol, por exemplo, os produtos de 1º tipo não podem ter defeitos. Os produtos de 2º tipo podem ter manchas de óleo e pequenos buracos, mas apenas no perímetro da peça, nunca na parte central. O 3º tipo compreende todos os outros tipos de defeito localizados na peça, ou os do 2º tipo, mas localizados na parte central da peça. Os defeitos possíveis em um lençol são as manchas de óleo, pequenos buracos, bainha descosturada, trama aberta e a prega de estamparia. A mancha de óleo e a bainha são defeitos que ocorrem no setor de costura. A prega ocorre no setor de estamparia e a trama aberta e o buraco ocorrem no setor de tecelagem. Durante uma inspeção de final de produção foram produzidas as seguintes folhas de verificação de localização de defeitos:

FIGURA 17 – FOLHA DE VERIFICAÇÃO 01 PARA LOCALIZAÇÃO DE DEFEITOS

Folha de Verificação de Localização de Defeitos					
Produto: Lençol	ID do produto: 01				
Inspetor(a): João	Data: 02/05/2016				
Legenda:					
Mancha de óleo	Buraco	Bainha	Trama aberta	Prega	
Localização:					

FONTE: A autora

FIGURA 18 – FOLHA DE VERIFICAÇÃO 02 PARA LOCALIZAÇÃO DE DEFEITOS

Folha de Verificação de Localização de Defeitos				
Produto: Lençol	ID do produto: 02			
Inspetor(a): João	Data: 02/05/2016			
Legenda:				
Mancha de óleo	Buraco	Bainha	Trama aberta	Prega
Localização:				

FONTE: A autora

FIGURA 19 – FOLHA DE VERIFICAÇÃO 03 PARA LOCALIZAÇÃO DE DEFEITOS

Folha de Verificação de Localização de Defeitos				
Produto: Lençol	ID do produto: 03			
Inspetor(a): João	Data: 02/05/2016			
Legenda:				
Mancha de óleo	Buraco	Bainha	Trama aberta	Prega
Localização:				

FONTE: A autora

FIGURA 20 – FOLHA DE VERIFICAÇÃO 04 PARA LOCALIZAÇÃO DE DEFEITOS

Folha de Verificação de Localização de Defeitos				
Produto: Lençol	ID do produto: 04			
Inspetor(a): João	Data: 02/05/2016			
Legenda:				
Mancha de óleo	Buraco	Bainha	Trama aberta	Prega
Localização:				

FONTE: A autora

FIGURA 21 – FOLHA DE VERIFICAÇÃO 05 PARA LOCALIZAÇÃO DE DEFEITOS

Folha de Verificação de Localização de Defeitos				
Produto: Lençol	ID do produto: 05			
Inspetor(a): João	Data: 02/05/2016			
Legenda:				
Mancha de óleo	Buraco	Bainha	Trama aberta	Prega
Localização:				

FONTE: A autora

FIGURA 22 – FOLHA DE VERIFICAÇÃO 06 PARA LOCALIZAÇÃO DE DEFEITOS

Folha de Verificação de Localização de Defeitos				
Produto: Leçol	ID do produto: 06			
Inspetor(a): João	Data: 02/05/2016			
Legenda:				
Mancha de óleo	Buraco	Bainha	Trama aberta	Prega
Localização:				

FONTE: A autora

FIGURA 23 – FOLHA DE VERIFICAÇÃO 07 PARA LOCALIZAÇÃO DE DEFEITOS

Folha de Verificação de Localização de Defeitos				
Produto: Lençol	ID do produto: 07			
Inspetor(a): João	Data: 02/05/2016			
Legenda:				
Mancha de óleo	Buraco	Bainha	Trama aberta	Prega
Localização:				

FONTE: A autora

FIGURA 24 – FOLHA DE VERIFICAÇÃO 08 PARA LOCALIZAÇÃO DE DEFEITOS

Folha de Verificação de Localização de Defeitos				
Produto: Leçol	ID do produto: 08			
Inspetor(a): João	Data: 02/05/2016			
Legenda:				
Mancha de óleo	Buraco	Bainha	Trama aberta	Prega
Localização:				

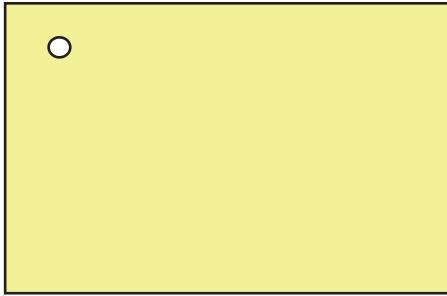
FONTE: A autora

FIGURA 25 – FOLHA DE VERIFICAÇÃO 09 PARA LOCALIZAÇÃO DE DEFEITOS

Folha de Verificação de Localização de Defeitos				
Produto: Lençol	ID do produto: 09			
Inspetor(a): João	Data: 02/05/2016			
Legenda:				
Mancha de óleo	Buraco	Bainha	Trama aberta	Prega
Localização:				

FONTE: A autora

FIGURA 26 – FOLHA DE VERIFICAÇÃO 10 PARA LOCALIZAÇÃO DE DEFEITOS

Folha de Verificação de Localização de Defeitos				
Produto: Lençol	ID do produto: 10			
Inspetor(a): João	Data: 02/05/2016			
Legenda:				
Mancha de óleo	Buraco	Bainha	Trama aberta	Prega
Localização:				
				

FONTE: A autora

Considerando as folhas de verificação de localização de defeito, responda:

- Das dez peças apresentadas, quantas serão vendidas ao público?
- Qual é o setor de produção que mais produz defeitos nas peças?
- Qual o defeito mais comum?
- Qual o defeito menos comum?
- A partir das folhas de verificação de localização de defeito, esboce uma folha de verificação para identificação de causa de defeito.

COLETA DE DADOS E RELATÓRIO

1 INTRODUÇÃO

As ferramentas de qualidade mostram meios simples de obter informações sobre o processo industrial de interesse. Porém, devemos lembrar que há várias maneiras de obter informações, por exemplo, a coleta de dados pode ser realizada de forma automatizada ou manual, de maneira periódica ou de situação.

Além disso, esses dados coletados devem ser apresentados de forma simples, porém completa, auxiliando nas mais variadas tomadas de decisão. Segundo Machline (1985, p. 5) “o planejamento e controle da produção é uma área central na administração das empresas manufatureiras”. Por isso, é tão importante monitorar e colher informações do processo produtivo.

Neste tópico discorreremos sobre os cuidados e boas maneiras na coleta de dados e na estruturação de relatórios.

2 COLETA DE DADOS

Já sabemos que a coleta de dados é importante para a gestão industrial. Afinal, como gerir algo que não se conhece? Devemos observar alguns critérios na hora de coletar os dados. Coleta de dados se refere a aquisição de dados experimentais retirados no processo de produção.

No Tópico 1 conversamos sobre o planejamento de ensaios, destacando informações importantes para a sua realização. Além dos cuidados anteriores determinados no planejamento, que auxiliam no seu desenvolvimento e diminuem o tempo e o custo do ensaio, na coleta de dados deve haver outros cuidados especiais:

- Atenção ao objetivo: o dado não é coletado para nada. Ele servirá como base para a descrição do estado, da saúde do processo. Fique atento ao objetivo da coleta e siga seus preceitos.
- Controle: tenha atenção a todas as variáveis ambientais durante a coleta de dados. Alterações bruscas de temperatura, por exemplo, podem alterar o resultado do ensaio.

Durante a vida da empresa, vários dados são coletas e para os mais diversos objetivos. Dessa forma, a coleta de dados pode ser classificada quanto ao tempo e quanto a automação. Quanto ao tempo ela pode ser classificada em:

- Periódica: quando é realizada em intervalos de tempo regular;
- Situação: quando é realizada a partir de um determinado acontecimento;

Quanto a automação, a coleta de dados é dividida em:

- Automatizada: coleta e registro realizado a partir de sensores, sem a interferência de um operador.
- Manual: coleta e registro realizado por um operador.

3 RELATÓRIO – POR QUE E PARA QUEM?

Um relatório sempre é feito para ser lido. Dentro de uma empresa, os relatórios costumam ser o melhor método de disseminação de informação sobre a própria empresa e sobre seus funcionários.

Brasil (2001) discorre sobre a importância de saber quem será o leitor do relatório. A informação deve ser passada de forma clara e precisa, antecipando quais serão os possíveis interesses do leitor.

Durante a primeira etapa, os leitores costumam focalizar, predominantemente os seguintes aspectos: sumário, títulos e subtítulos; resumo executivo, parágrafos conclusivos e resultados ou recomendações realçadas no texto; ilustrações que capturem a atenção do leitor, como caixa-de-texto, diagramas, gráficos, mapas e tabelas (BRASIL, 2001, p. 9).

O relatório deve ser uma ferramenta de informação concisa e direta em que, é possível utilizar ferramentas como ilustrações, gráficos e diagramas. Dessa forma, ao fazer um relatório deve-se perguntar: Para quem?

4 ESTRUTURAÇÃO DE UM RELATÓRIO

Todo relatório tem uma estrutura em comum, e que pode ser modificada dependendo do seu objetivo. Banzanella (2013) comenta que num relatório não se espera uma interpretação dos dados coletados, ou seja, não necessariamente há uma conclusão sobre os dados, embora possa ocorrer.

De forma geral a estrutura de um relatório compreende:

- 1 - Capa: página de apresentação em que, encontra-se as informações sobre a empresa, autor, data e título do relatório.
- 2 - Sumário: no caso de relatórios com grande número de páginas, sistema de organização das informações, títulos e subtítulos por página.
- 3 - Introdução: breve relato sobre o objetivo do relatório.
- 4 - Apresentação de métodos e dados: apresentação dos instrumentos e métodos utilizados junto com os dados brutos coletados, normalmente apresentados na forma de uma tabela. Pode conter gráficos e ilustrações.
- 5 - Resultados: se for necessário, apresentação dos resultados a partir de métodos estatísticos, deve conter gráficos e ilustrações.
- 6 - Considerações finais: descrição simples dos dados alcançados. Se houver alguma interpretação sobre os dados pode-se chama conclusão.
- 7 - Referências (se tiver): referências utilizadas para a determinação dos métodos de coleta e análise.

5 GRÁFICOS E ILUSTRAÇÕES

Gráficos, imagens e ilustrações são importantes para o entendimento do conteúdo apresentado. Porém, devem ser utilizadas com parcimônia, sem poluir o documento. Como critério geral de inclusão de imagens (ou gráficos, tabelas, ilustrações) em documentos podemos utilizar a pergunta: Essa imagem é necessária para o entendimento do texto? Se a resposta for não, remova-a.

Brasil (2001) agrupa alguns conselhos na utilização desses elementos:

- Tabelas devem ser utilizadas, desde que seja possível ver todos os elementos presentes.
- Se a tabela for muito grande, pode ser colocada como anexo do relatório.
- Observar se o nível de detalhamento da tabela é o que o leitor deseja ou precisa.

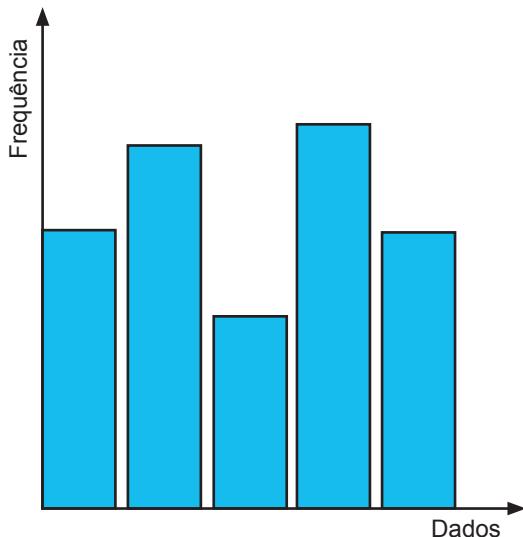
Os gráficos têm lugar especial no detalhamento de dados ou do processamento deles. Isto porque, o gráfico nada mais é do que a expressão ilustrada dos dados apresentados. Dessa forma, olhar um gráfico significa olhar a tendência dos dados. Um exemplo é o gráfico de dispersão, mostrado na Figura 13, pela localização dos dados no gráfico é possível saber se há correlações entre eles.

Seguindo as definições Brasil (2001), há vários tipos de gráficos e cada um tem um objetivo e forma de usar:

a) Colunas

Normalmente utilizado para mostrar a frequência de determinados dados ou acontecimentos; ou ainda o tipo de distribuição dos dados.

FIGURA 27 – EXEMPLO DE GRÁFICO DE COLUNAS

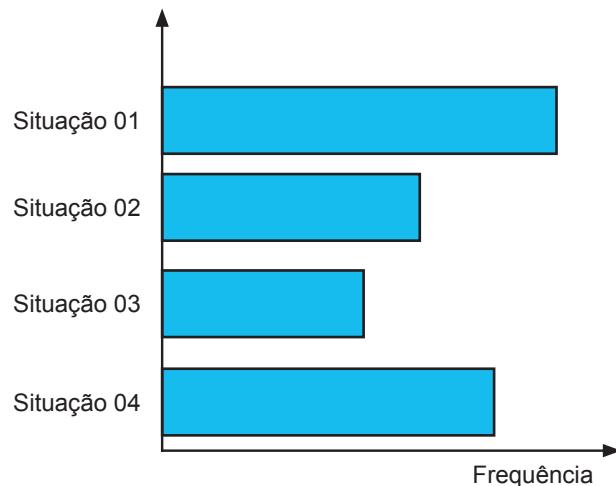


FONTE: A Autora

b) Barras

Tem o mesmo objetivo do gráfico de colunas, porém é mais usado quando os títulos ou parâmetros são longos.

FIGURA 28 – EXEMPLO DE GRÁFICO DE BARRAS

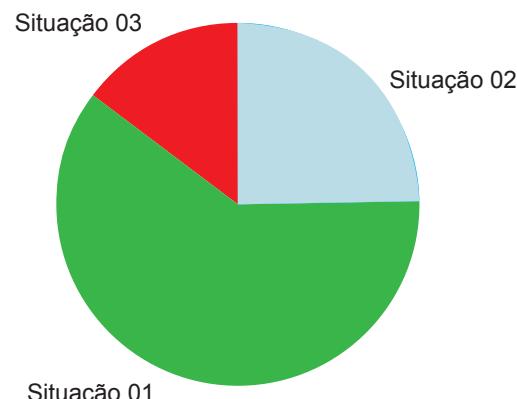


FONTE: A Autora

c) Pizza

Apresentação dos dados com relação a proporção da população total.

FIGURA 29 – EXEMPLO DE GRÁFICO DE PIZZA

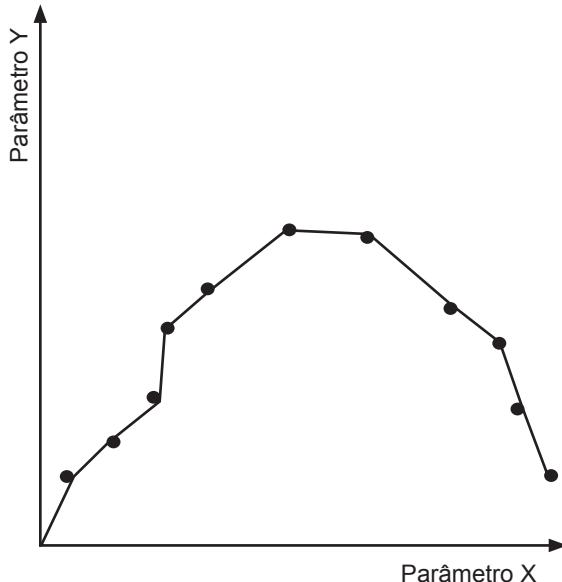


FONTE: A Autora

d) Linhas

Apresenta a evolução dos dados em relação a outro parâmetro, como o tempo. A forma dos pontos pode mostrar uma relação entre as variáveis, que pode ser descoberta a partir da interpolação dos pontos.

FIGURA 30 – EXEMPLO DE GRÁFICO DE LINHA

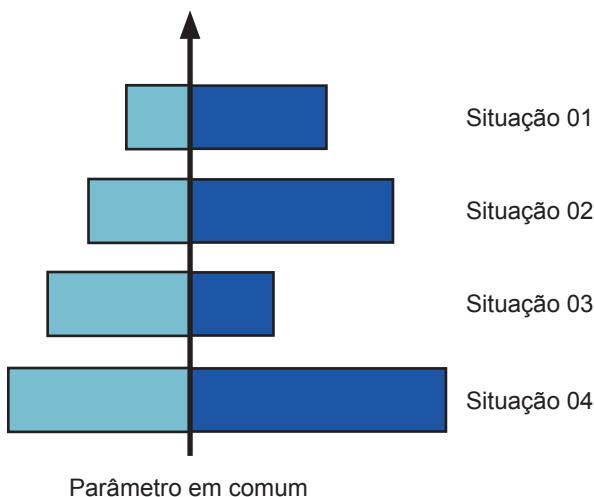


FONTE: A Autora

e) Barras Contrapostas

Apresenta a comparação entre dois conjuntos de dados que possuem um mesmo parâmetro em comum.

FIGURA 31 – EXEMPLO DE GRÁFICO DE BARRAS CONTRAPOSTAS

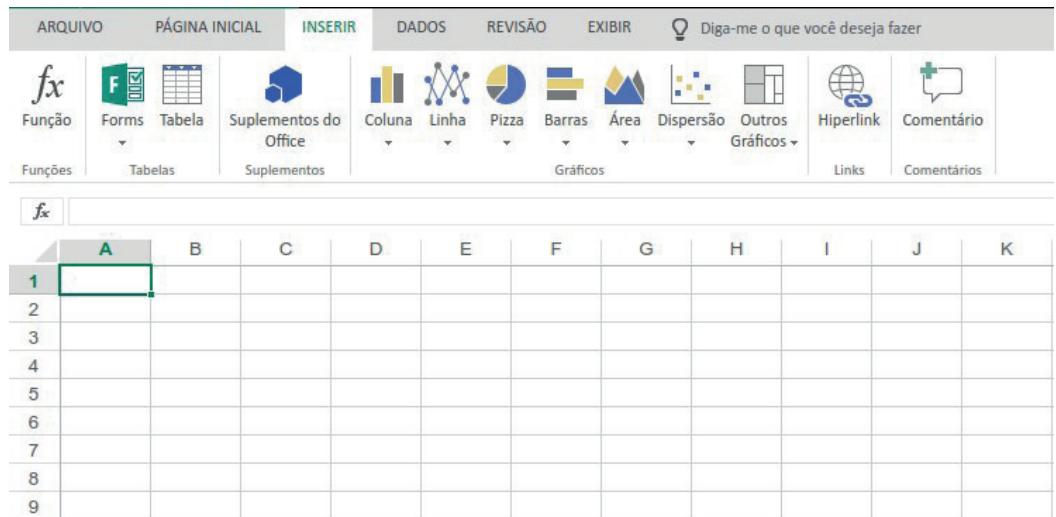


FONTE: A Autora

Há diversos outros tipos de gráfico, porém abordamos apenas os mais comuns. Todos os *softwares* de planilha eletrônica apresentam ferramentas de construção de gráficos a partir de tabelas. No Microsoft Excel, por exemplo, os

gráficos são construídos a partir da aba inserir. Podemos observar na figura que os gráficos mais utilizados têm atalhos diretos, como os gráficos de coluna, linha, pizza, barras, área e dispersão. Outros tipos poderão ser construídos a partir do botão outros gráficos.

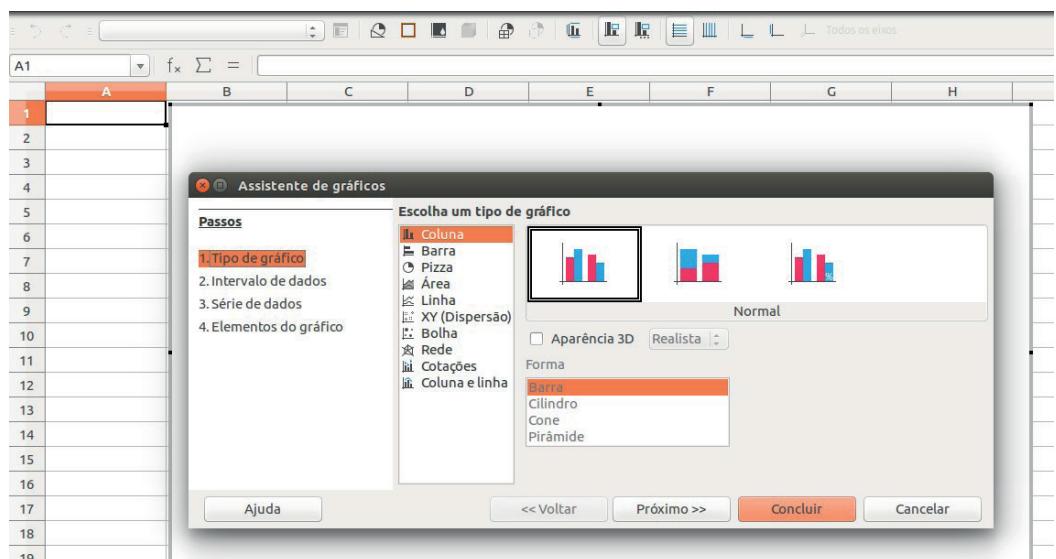
FIGURA 32 – TELA DO SOFTWARE MICROSOFT EXCEL A PARTIR DA SUA FERRAMENTA-ONLINE



FONTE: A Autora

No LibreOffice Calc a construção de gráficos é realizada a partir do menu Inserir > Gráfico. A partir desse menu é aberta a janela exposta na figura em que, é possível escolher um tipo de gráfico.

FIGURA 33 – TELA DO ASSISTENTE DE GRÁFICOS DO SOFTWARE LIBREOFFICE CALC



FONTE: A Autora



O site do Microsoft Office apresenta exemplos dos tipos de gráficos bidimensionais e tridimensionais. Disponível em: <<https://support.office.com/pt-br/article/Exemplos-de-tipos-de-gráficos-96ac1fbf-ac20-40e1-a3c0-54ec215031fe>>.



O Blog TechMundo também apresenta exemplos dos tipos de gráficos. Disponível em: <<https://www.tecmundo.com.br/excel/1745-saiba-qual-tipo-de-grafico-representa-melhor-os-seus-dados-no-excel-2007.htm>>.

RESUMO DO TÓPICO 4

Nesse tópico, você viu que:

- Cuidados são necessários na coleta de dados de processos industriais.
- Atenção ao objetivo e controle da coleta são importantes para que os dados sejam fidedignos.
- O relatório deve ser uma ferramenta simples e fácil de passar informações.
- A escrita do relatório deve ser feita para o leitor.
- Um relatório pode ou não apresentar interpretações dos dados.
- A estrutura de um relatório contém: capa, sumário, introdução, apresentação de métodos e dados, resultados, considerações finais e referências.
- Gráficos, imagens e ilustrações são ferramentas importantes e devem ser usados apenas quando é estritamente necessário.
- Os gráficos mais comuns são de colunas, barras, pizza, linha e barras contrastantes.
- Os *softwares* de planilha eletrônica possuem ferramentas prontas para a construção de gráficos.

AUTOATIVIDADE



- 1 A coleta de dados é importante para a tomada de decisões em ambientes industriais. Quais são os cuidados que devemos ter na coleta de dados?
- 2 A coleta de dados pode ser periódica ou de situação; manual ou automatizada. Dê exemplos dos quatro tipos de coleta de dados.
- 3 A partir dos dados a seguir, que relacionam duas variáveis, construa um gráfico adequado para revelar a relação entre as variáveis.

TABELA 19 – DADOS DE FORÇA PARA CADA DE FORMAÇÃO

Força (N)	Deformação (mm)
1,0	0,07
2,0	0,10
3,0	0,12
4,0	0,14
5,0	0,16
6,0	0,17
7,0	0,19
8,0	0,20
9,0	0,21
10,0	0,22

FONTE: A autora

INTRODUÇÃO AO CONTROLE AUTOMÁTICO DE PROCESSOS

OBJETIVOS DE APRENDIZAGEM

A partir dos estudos desta unidade, você será capaz de:

- Explicar a importância do controle de processos industriais;
- Identificar os conceitos fundamentais de controle de processos;
- Avaliar os parâmetros de análise, estabilidade e algoritmos de controle.

PLANO DE ESTUDOS

Caro acadêmico! Esta unidade de estudo encontra-se dividida em quatro tópicos de conteúdos. Ao longo de cada um deles, você encontrará sugestões e dicas que visam potencializar os temas abordados, e ao final de cada um estão disponíveis resumos e autoatividades que visam fixar os temas estudados.

TÓPICO 1 – CONCEITOS FUNDAMENTAIS EM CONTROLE DE PROCESSOS

TÓPICO 2 – MALHA DE CONTROLE

TÓPICO 3 – ESTABILIDADE E ALGORITMOS DE CONTROLE

TÓPICO 4 – INDÚSTRIA 4.0

CONCEITOS FUNDAMENTAIS EM CONTROLE DE PROCESSOS

1 INTRODUÇÃO

Como vimos na Unidade 1, a medição e o controle estão intimamente ligados à qualidade de produção. Aprendemos aspectos importantes da análise de medições em ambientes industriais e agora vamos iniciar nossos estudos em controle de processos. Mas, afinal, o que é controle de processos?

Controlar um processo é analisá-lo e decidir, a partir de dados, as ações que devem ser tomadas em relação a ele, ou seja, o controle de um processo objetiva manter determinada variável medida (ou estado) em torno de um valor (ou estado) de referência.



Controle de processos “refere-se aos métodos utilizados para controlar variáveis de processo, quando um produto é manufaturado. Os objetivos do controle de processo podem se resumir em três: reduzir variabilidade, aumentar eficiência e a segurança” (FRANCHI, 2011, p. 21).

É importante salientar que quando o ajuste das variáveis de controle é realizado por seres humanos, é dito controle manual. Quando o ajuste é realizado sem a ação humana, é chamado controle automático (FRANCHI, 2011).

Hoje, o controle automático está presente em muitas indústrias, é tendência a automatização de plantas industriais.

O objetivo do controle automático é atuar de modo que um processo mantenha uma determinada variável contínua em um valor pré-ajustado (*setpoint*). No caso de eventos discretos, o objetivo do controle automático é a execução de comandos que produzam um determinado evento após o processo alcançar um determinado estado (FILIPPO, 2014, p. 40).

"A prática da engenharia de controle moderna inclui o uso de estratégias de projeto de controle para aprimorar processos de manufatura, eficiência do uso de energia, controle avançado de automóveis, incluindo trânsito rápido, entre outros" (DORF; BISHOP, 2001, p. 1).

2 UM POUCO DE HISTÓRIA

O desenvolvimento do controle automático de processos ocorreu simultaneamente à evolução da indústria. Dorf e Bishop (2001) citam que o primeiro desenvolvimento foi um regulador de boia em 300 a.C; a criação de reguladores de temperatura e pressão na Idade Média, mas a utilização de um sistema de controle com realimentação em uma aplicação industrial iniciou em 1769, com a utilização de um regulador de esferas para controlar a velocidade de máquinas a vapor, desenvolvido por James Watt. Como sempre, há uma competição quanto à determinação do posto de primeiro sistema de controle, pois houve desenvolvimentos simultâneos nos Estados Unidos, Europa e Rússia:

Antes da Segunda Guerra Mundial, a teoria e prática de controle se desenvolveram nos Estados Unidos e no Oeste da Europa de maneira diferente da que ocorreu na Rússia e no Leste Europeu. O principal incentivo para o uso da retroação nos Estados Unidos foi o desenvolvimento do sistema telefônico e dos amplificadores eletrônicos com retroação de Bode, Nyquist e Black, nos Laboratórios da Bell Telephone. O domínio da frequência foi usado principalmente para descrever a operação de amplificadores com retroação em termos de banda passante e outras variáveis freqüências. Em contraste, matemáticos eminentes e mecânicos aplicados na então União Soviética inspiraram e dominaram o campo da teoria de controle. Por isso, a teoria russa cuidou de utilizar uma formulação no domínio do tempo usando equações diferenciais (DORF; BISHOP, 2001, p. 4).

A Segunda Guerra Mundial foi um marco na história do desenvolvimento dos sistemas de controle, pois antes dela a maioria dos projetos era desenvolvido no método de tentativa e erro. Dorf e Bishop (2001) comentam que na época da guerra houve um grande aumento de profissionais nas áreas de matemática, análise e estatística, o que forneceu uma melhor abordagem matemática aos sistemas de controle, fazendo disso uma subárea da engenharia.

Desde então, o desenvolvimento das Teorias de Controle só aumentou, sendo marcado pelo uso da Transformada de Laplace após a Segunda Guerra Mundial e pela abordagem do lugar das raízes na década de 1950.

Segundo Ogata (1985), com a utilização ostensiva do computador a partir da década de 1980, o controle passou a fazer parte do dia a dia. O processamento digital tornou possível o cálculo envolvendo muitas variáveis em sistemas complexos, tornando a automação de sistemas uma prática comum. Em 1994, o controle com retroação já era utilizado em automóveis, pois havia a demanda por segurança e confiabilidade (DORF; BISHOP, 2001).

3 DEFINIÇÕES IMPORTANTES

Segundo Franchi (2011, p. 22):

A grande maioria dos sistemas de controle realiza as seguintes etapas:

- 1- Medição de um estado ou condição de um processo.
- 2- Um controlador calcula uma ação com base em um valor medido de acordo com um valor desejado.
- 3- Um sinal de saída resultante dos cálculos do controlador é utilizado para manipular uma ação do processo na forma de atuador.
- 4- O processo reage ao sinal aplicado, mudando o seu estado ou condição.

Para melhorar o nosso entendimento dos sistemas de controle foi elaborada uma lista com as principais definições utilizadas:

3.1 PLANTA

Planta “é uma parte de equipamento, eventualmente um conjunto de itens de uma máquina, que funcionam conjuntamente, cuja finalidade é desempenhar uma dada operação” (OGATA, 1985, p. 2).

3.2 PROCESSO

Segundo Franchi (2011, p. 18), processo “é um termo utilizado para descrever métodos de mudança ou refinamento de matérias-primas para obter produtos finais”, ou seja, toda etapa do sistema industrial em que há ação sobre a matéria-prima.

3.3 SISTEMA

Uma definição importante é a definição de sistema. Em Controle de Processos sistema é o todo utilizado para um determinado fim, ou seja, “um sistema é uma combinação de componentes que atuam conjuntamente e realizam um certo objetivo” (OGATA, 1985, p. 3).

3.4 SISTEMA DE CONTROLE

Um sistema de controle é utilizado para manipular as variáveis de entrada, objetivando uma determinada saída para o sistema. Segundo Dorf e Bishop:

Um sistema de controle é uma interconexão de componentes formando uma configuração de sistema que produzirá uma resposta desejada do sistema. A base para análise de um sistema é formada pelos fundamentos fornecidos pela teoria dos sistemas lineares, que supõe uma relação de causa e efeito para os componentes de um sistema (DORF; BISHOP, 2001, p. 2).

3.5 DISTÚRBIO OU PERTURBAÇÃO

“Um distúrbio é um sinal que tende a afetar adversamente o valor da saída de um sistema. Se um distúrbio é gerado dentro do sistema, ele é denominado interno; ao passo que um distúrbio externo é gerado fora do sistema e constitui uma entrada” (OGATA, 1985, p. 3).

Segundo Franchi (2011, p. 5), existem dois tipos de distúrbios:

Carga: perturbação no processo que ocorre devido à variação em uma variável secundária que altera a variável de processo. Por exemplo, em um controle de vazão, se for alterada a pressão de fluido, a vazão do processo é afetada indiretamente.

Setpoint: ocorre quando se altera o valor desejado da variável do processo no momento em que ocorre o controle. Desta forma, o processo terá de se reajustar para manter a variável de processo próxima ao novo *setpoint*.

3.6 VARIÁVEL CONTROLADA

A variável controlada é aquela cuja saída tem valores determinados, ou seja, a “variável sobre a qual o controle atua, no sentido de manter um determinado comportamento desejável no processo” (BAYER; ARAÚJO, 2010, p. 16).

3.7 VARIÁVEL MANIPULADA

Objetivando que a saída do sistema seja em um valor ou tipo desejável, utilizamos uma variável manipulada para gerar essa resposta desejável no sistema. Assim, a variável manipulada é “qualquer variável do processo que causa uma variação rápida na variável controlada e que seja fácil de manipular” (BAYER; ARAÚJO, 2010, p. 16).

3.8 CONTROLE REALIMENTADO

O controle realimentado é aquele que “mede” a variável de saída e atua na variável manipulada, para manter a variável de saída em valores ou tipos desejáveis. Segundo Ogata (1985, p. 3):

Controle realimentado é uma operação que, na presença de distúrbios, tende a reduzir a diferença entre a saída de um sistema e a entrada de referência (ou estado desejado, arbitrariamente variado) e que opera com base nessa diferença. Aqui, apenas distúrbios não previsíveis (isto é, aqueles não conhecidos *a priori*) são designados como tais, desde que com distúrbios conhecidos ou previsíveis é sempre possível incluir compensação dentro do sistema de modo que aquelas medidas sejam desnecessárias.

3.9 SISTEMA DE CONTROLE REALIMENTADO

“Um sistema de controle realimentado é aquele que tende a manter uma relação prescrita entre a saída e a entrada de referência, comparando-as e utilizando a diferença como um meio de controle” (OGATA, 1985, p. 3).

3.10 ALGORITMO DE CONTROLE

O controle de processos é realizado utilizando algoritmos de controle, que nada mais são do que métodos matemáticos. Segundo Franchi (2011, p. 24), algoritmo de controle “é a expressão matemática de uma função de controle”.

4 EXEMPLO DE SISTEMA DE CONTROLE

Há vários exemplos cotidianos de sistemas de controle, como semáforos, ligação das luzes em postes, entre outros. Nos sistemas industriais temos o controle de vazão e temperatura de matérias-primas. Há também exemplos históricos com enorme valor. Como comentado no breve histórico do desenvolvimento dos sistemas de controle, a época da Segunda Guerra Mundial foi fértil para ideias de controle. Um exemplo é o texto de Dorf e Bishop (2001, p. 6):

Um outro exemplo de descoberta de uma solução de engenharia para um problema de sistema de controle foi a criação de um sistema de direção de tiro por David B. Parkinson, dos Laboratórios Bell Telephone. Na primavera de 1940, Parkinson, engenheiro de 29 anos de idade, tenta aperfeiçoar o registrador de nível automático, um instrumento que usava um registrador de papel para plotar a gravação de uma voltagem. Um componente crítico era um pequeno potenciômetro usado para controlar a pena do registrador por meio de um atuador.

Parkinson teve um sonho com um canhão antiaéreo capaz de abater aviões com sucesso. Ele descreveu a situação:

- Após três ou quatro tiros um dos homens da tripulação sorriu para mim e me encorajou a chegar mais perto do canhão. Quando me aproximei, ele apontou a extremidade exposta do munhão esquerdo. Lá estava montado o potenciômetro de controle do meu registrador de nível!

Na manhã seguinte Parkinson comprehendeu o significado do seu sonho:

- Se meu potenciômetro podia controlar a pena do registrador, algo similar poderia, com a engenharia adequada, controlar um canhão antiaéreo.

Depois de considerável esforço, em 1 de dezembro de 1941 foi entregue ao Exército dos Estados Unidos, para ser testado, um modelo de engenharia. Modelos de produção se tornaram disponíveis no início de 1943, e finalmente, 3.000 controladores de canhões foram entregues. A entrada do controlador era fornecida pelo radar, e o canhão era apontado considerando-se os dados da posição atual do avião e os cálculos da posição futura do alvo.

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

Quando o sistema de controle é utilizado em ambiente industrial frequentemente é chamado de automação (DORF; BISHOP, 2001). Um exemplo é a descrição do sistema de controle de pressão por Ogata (1985, p. 8):

A pressão na caldeira é controlada pela posição do regulador. Esta pressão é medida por um elemento medidor de pressão. O sinal então obtido é enviado ao controlador para comparação com o valor desejado. Se houver qualquer diferença ou erro, a saída do controlador é enviada ao atuador, que posiciona o regulador convenientemente de modo a reduzir o erro.

RESUMO DO TÓPICO 1

Nesse tópico, você viu que:

- O controle de processos surgiu para controlar variáveis de um processo.
- Os seus principais objetivos são: reduzir a variabilidade da produção, aumentar a eficiência industrial e aumentar a segurança.
- O controle de processos surgiu junto com o desenvolvimento industrial, e teve grande desenvolvimento na época da Segunda Guerra Mundial e com o advento do computador digital.
- Um sistema de controle realiza a medição de uma variável ou estado, calcula uma ação com base em um valor de referência, manipula uma variável para atuar na variável de interesse com base nos cálculos realizados, gerando uma reação do processo.
- As definições de: planta, processo, sistema, sistema de controle, distúrbio, variável controlada e manipulada, controle realimentado, sistema de controle realimentado e algoritmo de controle.
- Planta é uma parte de um equipamento que faz determinada função.
- Processo, no contexto industrial, é uma ação sobre a matéria-prima.
- Sistema é uma junção de componentes que realizam juntos determinado objetivo.
- Sistema de controle é um sistema que objetiva produzir determinada resposta, atuando sobre ele.
- Distúrbio ou perturbação é um sinal que atua no sistema de maneira não convencional.
- Variável controlada, ou variável de processo, é aquela cujo valor é objetivo de um sistema de controle.

- Variável manipulada é aquela cujo valor pode ser alterado facilmente objetivando a alteração da variável controlada.
- Controle realimentado é aquele que atua dinamicamente sobre o valor de uma variável manipulada objetivando manter constante a variável controlada.
- Sistema de controle realimentado é o sistema que mantém a relação entre as variáveis de forma a ter uma variável controlada de saída.
- Algoritmo de controle é a expressão matemática da função de controle.

AUTOATIVIDADE



- 1 A automação e controle de processos está cada vez mais presente na vida atual, partindo deste ponto, leia a citação a seguir:

A tecnologia moderna tem produzido, em escala crescente, sistemas com a finalidade de executar tarefas que, seja pela importância que adquirem em seu contexto, seja por sua complexidade e seu custo, justificam o esforço despendido na sua otimização e automação. Tais sistemas estão presentes em uma série de aplicações, incluindo por exemplo a automação da manufatura, a robótica, a supervisão de tráfego, a logística (canalização e armazenamento de produtos, organização e prestação de serviços), sistemas operacionais, redes de comunicação de computadores, concepção de *software*, gerenciamento de bases de dados e otimização de processos distribuídos (CURY, 2001, p. 7).

FONTE: CURY, J. E. R. **Teoria de Controle Supervisório de Sistemas a Eventos Discretos**. In: V Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente. Canela: nov. 2001.

A partir da citação de Cury (2001), discuta sobre os benefícios da utilização do controle de processos no ambiente industrial.

- 2 Pesquise um exemplo de controle manual aplicado ao ambiente industrial e mencione a seguir:
- 3 Escreva (V) nas alternativas verdadeiras e (F) nas alternativas falsas:

- a) () Um sistema de controle realiza sempre a medição de uma variável ou estado, calcula uma ação com base em um valor de referência, manipula uma variável para atuar na variável de interesse com base nos cálculos realizados, gerando uma reação do processo.
- b) () Os sistemas de controle realimentados já eram conhecidos pelos gregos em 300 a.C.
- c) () Processo é uma junção de componentes que realizam juntos determinado objetivo.
- d) () Sistema de controle é um sistema que objetiva produzir determinada resposta, atuando sobre ele.
- e) () Variável controlada, ou variável de processo, é aquela cujo valor é objetivo de um sistema de controle.
- f) () Variável manipulada é aquela cujo valor pode ser alterado facilmente objetivando a alteração da variável controlada.
- g) () Controle realimentado é aquele que atua dinamicamente sobre o valor de uma variável manipulada, medindo-a e alterando-a, sempre com o objetivo de manter constante a variável controlada.

MALHAS DE CONTROLE

1 INTRODUÇÃO

Como visto no Tópico 1, os sistemas de controle necessitam da medição de uma variável de interesse e na sua comparação com um valor desejável. Com essa comparação, muitas vezes é necessário haver uma manipulação de uma outra variável presente no processo:

A variável manipulada é ajustada de acordo com o valor da variável de processo e conforme análise do erro entre esse valor e o *setpoint*, sendo esta configuração denominada malha de controle. As malhas de controle têm como finalidade reduzir o efeito das perturbações na variável de processo (FRANCHI, 2011, p. 25).

Neste tópico serão apresentados os conceitos de malha aberta e malha fechada e uma ferramenta gráfica para a ilustração deles, o diagrama de blocos.

2 DIAGRAMA DE BLOCOS

Segundo Distefano III, Stubberud e Williams (2014, p. 14), “um diagrama em bloco é uma representação simplificada e pictórica da relação de causa e efeito entre a entrada e a saída de um sistema físico”.

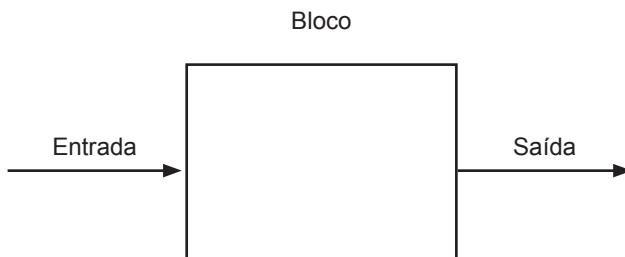


O objetivo do diagrama de blocos é mostrar de forma gráfica as relações entre os elementos de um sistema de controle.

A seguir, relaciona-se alguns dos elementos mais comuns utilizados, segundo Distefano III, Stubberud e Williams (2014):

- a) Elemento único: bloco retangular com uma entrada e uma saída.

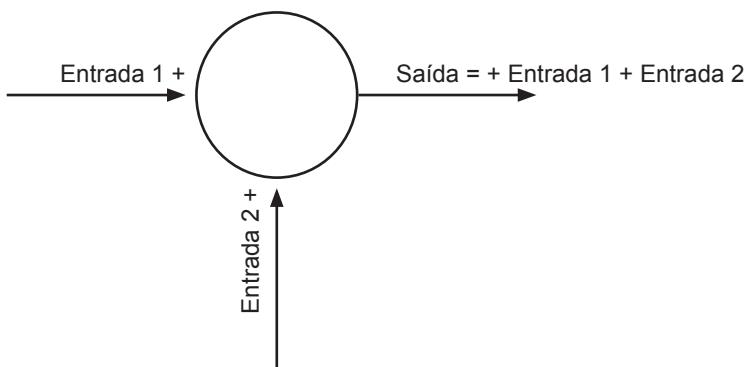
FIGURA 34 – DIAGRAMA DE BLOCOS DE UM CONTROLE EM MALHA ABERTA



FONTE: A autora

- b) Elemento de adição: elemento circular que relaciona uma operação de adição ou subtração, entre duas ou mais entradas.

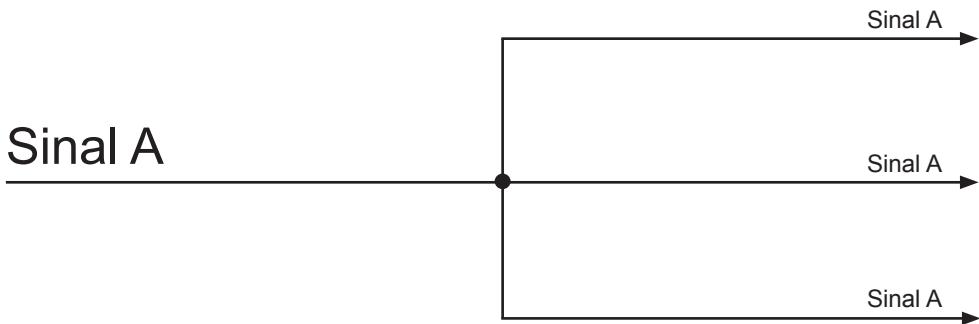
FIGURA 35 – DIAGRAMA DE BLOCOS DE UM CONTROLE EM MALHA ABERTA



FONTE: A autora

- c) Ponto de tomada: pequeno círculo preenchido que mostra a divisão do sinal para utilizar o mesmo sinal como entrada em blocos diferentes.

FIGURA 36 – DIAGRAMA DE BLOCOS DE UM CONTROLE EM MALHA ABERTA

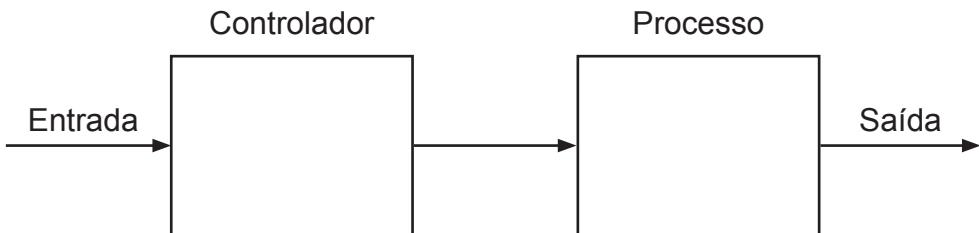


FONTE: A autora

3 CONTROLE EM MALHA ABERTA

No controle em malha aberta não há uma verificação da saída do processo, ou seja, “a ação de controle é independente da saída” (FRANCHI, 2011, p. 27). Não há medições ou aferições e não existe realimentação nem comparação.

FIGURA 37 – EXEMPLO DO DIAGRAMA DE BLOCOS DE UM CONTROLE EM MALHA ABERTA



FONTE: A autora

O controle em malha aberta é simples e normalmente de baixo custo, porém deve ser utilizado com atenção, pois o sinal de saída pode ser instável, visto que o controlador é ajustado a partir de variáveis predeterminadas (BAYER; ARAÚJO, 2010).

3.1 PARTES DO CONTROLE EM MALHA ABERTA

O controle em malha aberta possui apenas duas partes principais. Segundo Bayer e Araújo (2010):

- Controlador: elemento de controle e correção, que altera a variável de saída a partir de valores predeterminados.
- Processo: operação em que a variável é controlada.



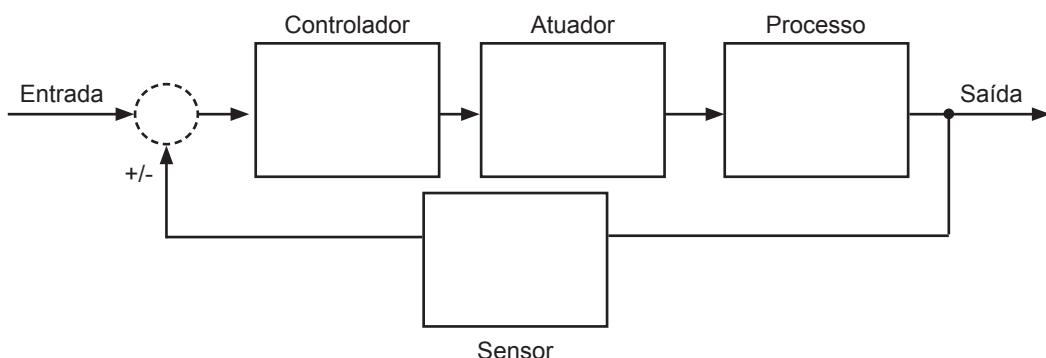
Um exemplo simples de controle em malha aberta são os antigos aparelhos de ar-condicionado de janela. Nesses aparelhos só era possível ligar o aparelho, definir ar frio ou ar quente e o tamanho do fluxo. A partir do momento em que essas características fossem ajustadas, só haveria alguma mudança de cenário caso haja alguma ação externa, alternando a característica.

4 CONTROLE EM MALHA FECHADA

Sistema de controle em malha fechada, também conhecido como sistema de controle realimentado ou *feedback*, “implica no uso de ação de realimentação com finalidade de reduzir o erro do sistema” (OGATA, 1985, p. 4).

É o tipo de controle mais empregado, também chamado de controle (*feedback*), no qual se mede a variável de processo, compara-se com o valor desejado (*setpoint*), sendo obtido um erro. Esse sinal de erro é enviado a um controlador para efetuar a correção (FRANCHI, 2011, p. 27).

FIGURA 38 – EXEMPLO DO DIAGRAMA DE BLOCOS DE UM CONTROLE EM MALHA FECHADA



FONTE: A autora



"Em um processo industrial, a variável de processo é sempre influenciada por diversas variáveis. Uma delas é a variável manipulada. Todas as outras que afetam a variável de processo são consideradas perturbações" (FRANCHI, 2011, p. 28).

O controle em malha fechada requer um investimento maior, gerando um processo mais complexo.

4.1 PARTES DO CONTROLE EM MALHA FECHADA

Existem quatro partes essenciais no sistema de controle em malha fechada, e vamos abordar cada uma delas (FRANCHI, 2011; BAYER; ARAÚJO, 2010):

- a) Comparador: determina o erro, ou seja, a subtração entre o sinal de entrada e a variável medida após o processo.
- b) Controlador: recebe o sinal de um sensor, compara com um valor de referência e minimiza a variável manipulável para que o erro calculado pelo comparador tenda a zero.
- c) Atuador: dispositivo que atua sobre a variável manipulável para mudar o valor da variável controlável.
- d) Processo: operação em que a variável é controlada.
- e) Sensor: afere a variável controlada e envia seu valor para o comparador. O sinal vindo do sensor pode ser de vários tipos, como elétrico, mecânico e digital. (BAYER; ARAÚJO, 2010).



Na mesma linha do exemplo anterior (malha aberta), o sistema de controle em malha fechada pode ser exemplificado com um ar-condicionado atual, onde é possível configurar a temperatura do ambiente (entre outras variáveis). Neste caso, após ligar o aparelho e selecionar a temperatura, ele irá funcionar até atingir uma diferença preestabelecida da temperatura selecionada. A partir desse valor inferior de referência, o aparelho irá desligar e só retornará a ligar quando a temperatura atingir um novo valor superior de referência. Toda essa ação será realizada sem interferências externas, consistindo assim num controle em malha fechada.

4.2 TIPOS DE CONTROLADORES

Nem todos os controladores funcionam da mesma maneira. Por isso, o efeito externo é o mesmo, porém, é realizado por meios diferentes.

Controlador Lógico Programável (CLP):

Projetado para uso em um ambiente industrial, que tem como finalidade desempenhar funções lógicas, sequenciais, temporização, contagem e aritmética, para controlar, através de entradas e saídas digitais ou analógicas, vários tipos de máquinas ou processos. O controlador programável e seus periféricos associados são projetados para serem facilmente integráveis em um sistema de controle industrial (FRANCHI, 2011, p. 32).

Sistema de Controle Distribuído (DCS):

Controladores que, além de realizarem funções de controle, fornecem leituras de status do processo, mantêm bases de dados e avançadas interfaces homem/máquina (IHM). A aplicação de DCS é recomendada para plantas complexas com malhas de controle na ordem de centenas. Esses sistemas são fornecidos por fabricantes como Foxboro, Honeywell, Rosemont, Yokogawa etc. O DCS tem algumas características particulares. A primeira é que o *hardware* e o *software* são mais flexíveis, sendo mais fáceis de modificar e configurar. Também são equipados com ferramentas de otimização e controle de alta performance (FRANCHI, 2011, p. 33).

RESUMO DO TÓPICO 2

Nesse tópico, você viu que:

- A malha de controle é onde a variável manipulável é alterada para minimizar o erro da variável controlada.
- Diagrama de blocos é uma ferramenta gráfica para entendimento de um sistema de controle.
- Há dois tipos de malha de controle: aberta e fechada.
- O controle por malha aberta é mais simples e barato, onde a alteração é predeterminada e não há retroação (retroalimentação) no sistema.
- O controle por malha aberta é composto por um controlador e um processo.
- O controle por malha fechada é mais robusto a perturbações, havendo uma medição da variável controlada de saída, de forma que, se for necessário é possível ter a manipulação de uma variável manipulável para alteração no valor da variável de saída.
- O controle por malha fechada é composto por um comparador, um controlador, um processo, um atuador e pelo menos um sensor.
- Há dois tipos básicos de controlador.

AUTOATIVIDADE



- 1 Qual a principal diferença entre controle em malha fechada e malha aberta? Existe algum tipo de controle de variáveis no sistema de controle de malha aberta? Cite.
- 2 Considere o sistema de controle de um refrigerador. Pesquise e elabore o diagrama de blocos do controle de temperatura.
- 3 Defina CLP e DCS.
- 4 Quais são os diferentes tipos de sinais empregados em sistemas de controle de processos industriais? Cite exemplos.
- 5 Com base nas informações a seguir, assinale a alternativa condizente:

I – Nos sistemas de controle em malha aberta não há interferência (controle) do sinal.
II – Os sistemas de controle em malha fechada têm grande importância industrial.
III – O controle em malha aberta é composto de controlador e processo, enquanto o controle em malha fechada é composto por controlador, comparador, processo, atuador e sensor.

Somente estão corretas:

- a) () I, II e III.
- b) () I e II.
- c) () I e III.
- d) () II e III.
- e) () Apenas II.

ESTABILIDADE E ALGORITMOS DE CONTROLE

1 INTRODUÇÃO

Nos tópicos anteriores vimos o que é controle automático de processos, a história de seu desenvolvimento e sua classificação. Também discutimos duas configurações para a malha de controle (aberta e fechada). Um controle em malha fechada tenta corrigir as diferentes perturbações que possam acontecer, porém isso pode levar algum tempo para ser realizado. Por isso é necessário analisar a estabilidade do sistema de controle e os algoritmos que estão sendo utilizados.

Nos itens a seguir, vamos explorar os parâmetros de avaliação de algoritmos de controle e a estabilidade.

2 ESTABILIDADE

A estabilidade pode ser definida de várias maneiras, por exemplo, que “um sistema é estável se para todo sinal com amplitude aplicado na entrada, o sinal de saída também é limitado” (BAYER; ARAÚJO, 2010, p. 26), ou seja, quando há uma perturbação no sinal de entrada, espera-se que o sinal de saída seja afetado e tenda a um valor bem definido. Esse tipo de estabilidade também é conhecido como BIBO-estabilidade (Bounded Input – Bounded Output) ou estável no sentido entrada limitada-saída limitada (FRANKLIN, POWELL; EMANI-NAEINI, 2013).

É interessante notar que há dois momentos distintos no sinal de saída após a inclusão de um distúrbio no sistema de controle, o regime transitório e o regime permanente. O regime transitório é o período logo após a inclusão do distúrbio, em que a variável controlada é alterada até chegar à minimização do erro. Após esse período vem o regime permanente, caracterizado por um sinal de saída estável, ou seja, controlado (BAYER; ARAÚJO, 2010).

Durante o regime transitório o sinal permanece variando entre valores máximos de erro. A estabilidade do algoritmo de controle é relativa ao tempo de resposta ao distúrbio além do erro produzido no regime permanente.

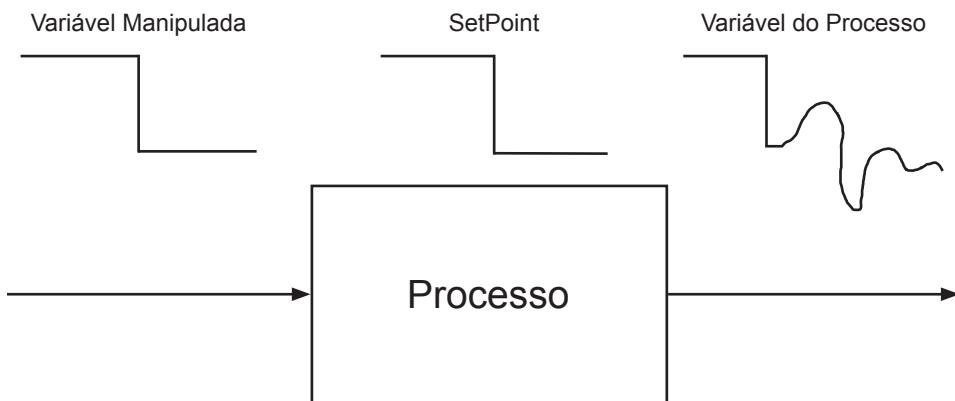
3 CARACTERÍSTICAS DINÂMICAS DO PROCESSO

Franchi (2011, p. 61) comenta:

O termo dinâmica é empregado em controle de processos para representar as mudanças que ocorrem em um processo, as quais envolvem a resposta do processo para alterações na entrada (variável manipulada) devido a modificações no *setpoint* ou perturbações. A dinâmica do processo depende da relação entre a variável manipulada e a variável de processo.

Dessa forma, o controle em malha fechada é dinâmico, e as respostas do processo em relação a perturbações podem ser variadas, porém sempre buscando a estabilidade, conforme ilustrado na figura a seguir.

FIGURA 39 – ALTERAÇÃO NA VARIÁVEL DO PROCESSO A PARTIR DE UMA ALTERAÇÃO NO SETPOINT



FONTE: A autora

Podemos caracterizar a dinâmica do processo por algumas características, como a função de transferência, capacidade, tempo morto e configurações SISO e MIMO. Vamos analisar cada uma dessas características separadamente a seguir.

3.1 FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA

Definimos função de transferência como a equação que relaciona a variável manipulada e a variável do processo. Essa função é personalizada para cada processo, dependendo das suas características (FRANCHI, 2011). A função de transferência mostra a dinâmica do processo e só pode ser definida para sistemas lineares e estacionários (DORF; BISHOP, 2001). A formulação da função de transferência leva em conta aspectos químicos, físicos e técnicos do processo a ser analisado.

Uma característica importante dessa função é a resposta transiente, que é definida como “tempo necessário para a saída atingir o valor em regime permanente” (FRANCHI, 2011, p. 62). Como a resposta (variável do processo) vai se comportar após a inclusão de uma perturbação no processo e quanto tempo demorará para a variável do processo se estabilizar.

3.2 CAPACITÂNCIA

“A capacidade representa a habilidade de um sistema para absorver ou armazenar massa ou energia. Também pode ser definida como a resistência de um sistema para mudanças de massa ou de energia armazenada nele, ou seja, equivalente a uma inércia” (FRANCHI, 2011, p. 65).



A capacidade atua no processo diminuindo os efeitos das perturbações, pois altera a forma da perturbação na entrada do processo (FRANCHI, 2011).

3.3 TEMPO MORTO

O tempo morto (ou atraso do transporte) é a grandeza que mostra o tempo que o processo leva para perceber que houve uma perturbação no sistema. Ou seja, o tempo entre uma perturbação ser inserida no processo e haver uma alteração na variável de processo.



Quanto maior o tempo morto, mais difícil é controlar um processo (FRANCHI, 2011).

3.4 SISTEMAS DE CONTROLE SISO E MIMO

Os sistemas de controle podem ter diferentes configurações quando se leva em conta o número de variáveis de processo e manipulada. Franchi (2011, p. 67) define:

SISO (Single-Input, Single-Output): nessa configuração estão representadas uma variável de entrada (de processo) e uma variável de saída (manipulada). MIMO (Multiple-Input, Multiple-Output): nessa configuração existe mais de uma variável de entrada e mais de uma variável de saída.

Assim, a resposta dinâmica do processo também é alterada dependendo da quantidade de variáveis de controle e manipulada envolvidas.

4 ALGORITMOS DE CONTROLE

Segundo Bayer e Araújo (2010), o principal problema de se controlar um sistema é decidir quais sinais de entrada devem alterar o valor da variável manipulada, ou seja, quais as perturbações que realmente importam para minimizar o erro no sinal de saída.

O cálculo do erro é feito a partir de algoritmos, dessa forma é a sensibilidade desses algoritmos que determina as ações de controle. Há quatro tipos principais de controle (FRANCHI, 2011):

- controle liga-desliga (on-off);
- controlador proporcional (P);
- controlador integral (I);
- controlador derivativo (D).

Há também outros tipos de algoritmos, que podem ser definidos a partir da junção de um ou mais dos tipos básicos. A seguir vamos explicar cada um dos tipos básicos e alguns exemplos de controle com múltiplos modos.

4.1 CONTROLE LIGA-DESLIGA

O controle liga-desliga (ou on- off) é o tipo mais simples e barato de controle (FRANCHI, 2011; OGATA, 1985). Nesse tipo de controle só há duas posições possíveis, ligado (variável manipulada no valor máximo) e desligado (variável manipulada no valor mínimo). Por sua simplicidade é muito utilizado em sistemas de controle industriais e domésticos (OGATA, 1985).

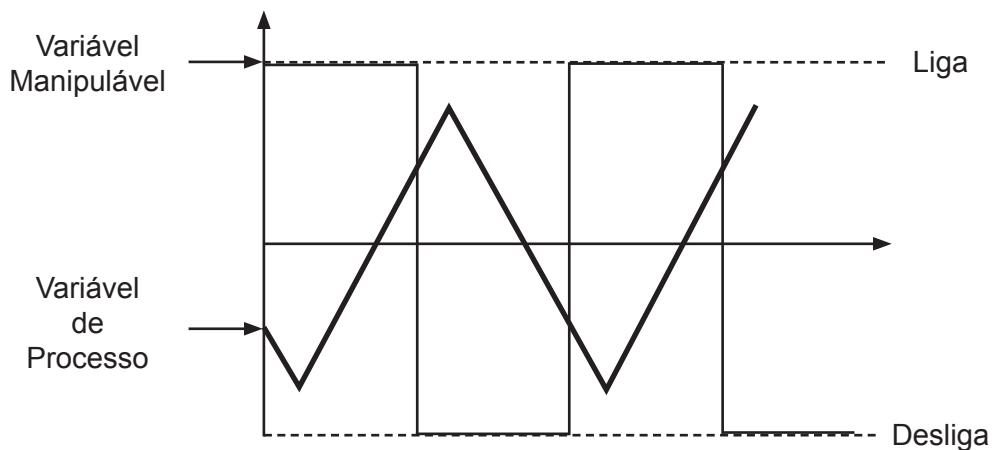
Franchi (2011) comenta dois pontos importantes que constituem desvantagens para esse tipo de controle:

- Esse tipo de controle é ideal para processos em que um controle muito preciso não é necessário.
- Pode haver problemas de vida útil, visto que a abertura e fechamento repetido de válvulas, por exemplo, diminuem a sua vida útil.

O controlador liga-desliga apresenta as seguintes características:
A saída do controlador não depende do tamanho do erro.
A atuação do controlador pode provocar oscilações no processo.
Nunca consegue fazer a variável de processo igual ao *setpoint*, havendo sempre *offset*.
Desta forma, esse tipo de controlador tem como aplicações: sistemas de aquecimento, controle de nível, entre outros (FRANCHI, 2011, p. 96).

Observe a seguir, na Figura 40, que há um atraso entre a alteração da variável manipulável e a resposta da variável de processo.

FIGURA 40 – ALTERAÇÃO NA VARIÁVEL DE PROCESSO A PARTIR DA VARIÁVEL MANIPULÁVEL NO CONTROLE LIGA-DESLIGA



FONTE: A autora

4.2 CONTROLE PROPORCIONAL (P)

No controle proporcional tem-se a preocupação que a correção a uma dada perturbação seja proporcional ao seu efeito. Ele é considerado o tipo mais simples de controle contínuo que minimiza efeitos de perturbações. “Ele é mais efetivo que o controle on-off, entretanto não faz com que a variável de processo seja igual ao *setpoint*” (FRANCHI, 2011, p. 96).

Podemos equacionar o controle proporcional a partir da equação linear (1) (FRANCHI, 2011):

$$MV = K_p \cdot SD + S_0$$

Em que:

MV é o sinal de saída do controlador (Variável Manipulável);
 K_p é a constante de proporcionalidade ou ganho proporcional;
 DV é o desvio em relação ao valor de referência: $DV = |PV - SP|$;
 S_0 é o sinal de saída inicial;
 PV é a variável do processo;
 SP é o valor de referência (ou valor desejado).

A constante de proporcionalidade pode ser calculada a partir da equação (2). Pode-se observar que a constante é a relação entre as alterações ocorridas na variável manipulável pelas variações da variável de processo (FRANCHI, 2011).

$$K_p = \frac{\ddot{A}MV}{\ddot{A}PV}$$

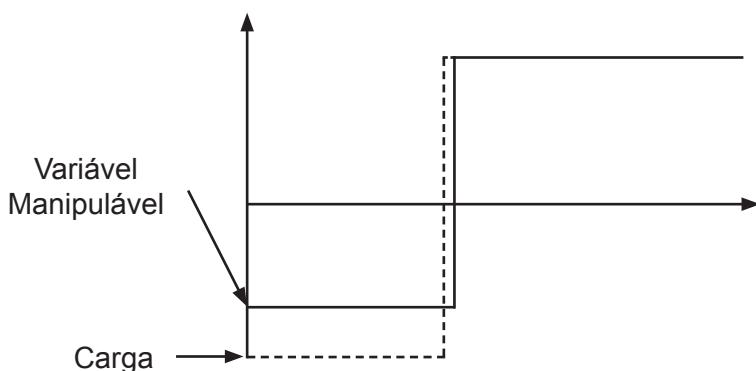
Em geral, um controlador proporcional fornece uma rápida resposta quando comparado com outros controladores, entretanto fornece um erro em regime permanente, pois a PV não retorna para o *setpoint*. Esse erro (*offset*) geralmente é indesejado em aplicações de controle. Desta forma, é necessário eliminar o *offset* combinando o controle proporcional com um dos outros modos de controle básicos.

Pode-se dizer que o controle proporcional tem as seguintes características:

Saída do controlador proporcional ao erro.

Apresenta *offset* após perturbação na carga (FRANCHI, 2011, p. 101).

FIGURA 41 – ALTERAÇÃO DA VARIÁVEL MANIPULÁVEL A PARTIR DE UMA CARGA NO SISTEMA



FONTE: A autora

4.3 CONTROLE INTEGRAL (I)

O controle proporcional possui a desvantagem de apresentar um erro de *offset*, e para resolver esse problema foi criado o controle integral:

A ação integral vai atuar no processo ao longo do tempo enquanto existir diferença entre o valor desejado e o valor medido. Assim, o sinal de correção é integrado no tempo e, por isto, enquanto a ação proporcional atua de forma instantânea quando acontece um distúrbio em degrau, a ação integral vai atuar de forma lenta até eliminar por completo o erro (SENAI/CST, 1999, p. 30).

Diferentemente do controle proporcional, em que a ação de correção ocorre quando há a percepção de um erro, o controle integral corrige enquanto houver uma diferença entre o valor da variável do processo e o valor desejado (*setpoint*). Desta forma, enquanto houver uma diferença, o controle tentará corrigi-la (FRANCHI, 2011).



"A ação de controle integral tem como finalidade remover o erro que permanece no controle" (FRANCHI, 2011, p. 102).

Matematicamente podemos equacionar a saída do controlador conforme a equação (3):

$$MV = \frac{1}{T_I} \int Edt + MV_0$$

Em que:

MV é o sinal de saída do controlador (Variável Manipulável).

T_I é o tempo integral, que pode ser definido como “o tempo necessário para o integral repetir o que fez o proporcional” (FRANCHI, 2011, p. 103).

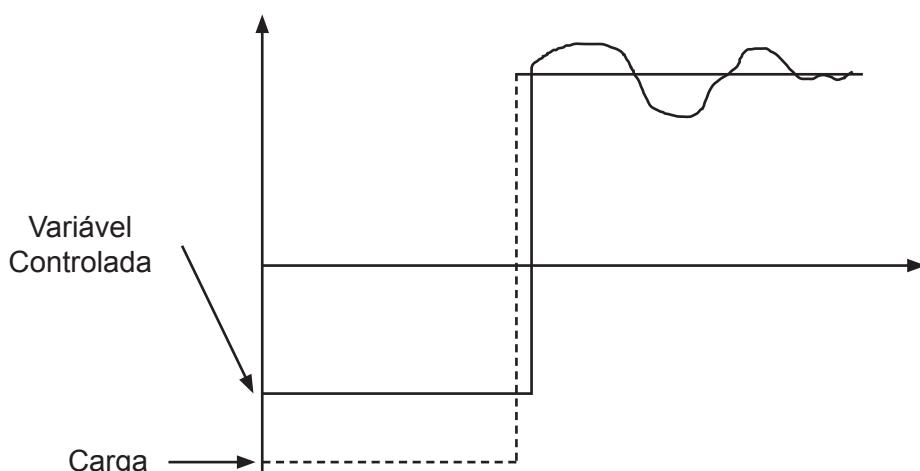
E é a magnitude do erro.

MV_0 é “a saída do controlador antes da integração, ou condição inicial quando o controlador é colocado em automático” (FRANCHI, 2011, p. 102).



A integral é uma operação matemática definida a partir do limite matemático de uma função. Geometricamente, a integral de uma função é a área sob a curva dessa função. O símbolo \int indica a integral, dessa forma, na equação acima, dizemos que $\int Edt$ é uma integral da função E em relação à variável t. Mais informações sobre esses métodos matemáticos podem ser encontrados em livros de Cálculo Integral.

FIGURA 42 – ALTERAÇÃO DA VARIÁVEL MANIPULÁVEL POR UM CONTROLADOR INTEGRAL A PARTIR DE UMA CARGA NO SISTEMA



FONTE: A autora

Segundo o SENAI/CST (1999, p. 32):

As principais características do controle integral são:

- Correção depende não só do erro, mas também do tempo em que ele perdurar.
- Ausência do erro de *offset*.
- Quanto maior o erro, maior será a velocidade de correção.
- No controle integral, o movimento da válvula não muda de sentido enquanto o sinal de desvio não se inverter.

É importante observar que, como a correção é uma função do tempo, a sua resposta pode ser demorada. Isso implica na defasagem de correção nos casos de grandes desvios em pequenos espaços de tempo. Além disso, o fato do movimento de válvula somente alterar o sentido quando houver alteração do sinal do desvio pode causar instabilidades na resposta (SENAI/CST, 1999).

4.4 CONTROLE DERIVATIVO (D)

Os tipos de controles que vimos até agora atuam na forma de correção após o aparecimento de uma perturbação. O controle derivativo foge dessa regra, atuando em função da velocidade em que a perturbação aparece.

Segundo o SENAI/CST (1999, p. 36), o controle derivativo “atua fornecendo uma correção antecipada do desvio, isto é, no instante em que o desvio tende a acontecer, ela fornece uma correção de forma a prevenir o sistema quanto ao aumento do desvio, diminuindo assim o tempo de resposta”.

Desta forma, “o objetivo da ação derivativa é aplicar ganho para eliminar atrasos na malha de controle” (FRANCHI, 2011, p. 113).

Segundo Franchi (2011), essa ação proporcional à velocidade em que ocorre a perturbação pode ser equacionada como (4):

$$MV = T_D \frac{dE}{dt} + MV_0$$

Em que:

MV é o sinal de saída do controlador (Variável Manipulável);
 T_D é o tempo derivativo;

O tempo derivativo é “o tempo gasto para se obter a mesma quantidade operacional da ação proporcional somente pela ação derivativa, quando o desvio varia numa velocidade constante” (SENAI/CST, 1999, p. 37).

$\frac{dE}{dt}$ é a taxa de variação do erro;

MV_0 é a condição inicial da variável manipulável.



A derivada também é uma operação matemática definida a partir do limite matemático de uma função. A expressão $\frac{dE}{dt}$ significa a derivada da função E em relação a t. A derivada pode ser entendida geometricamente como a inclinação da curva de determinada função, num determinado ponto. Outro entendimento é que a derivada também é considerada uma taxa de variação infinitesimal, ou seja, uma variação tão pequena quanto o necessário.

Segundo o SENAI/CST (1999, p. 38):

As principais características do controle derivativo são:

- A correção é proporcional à velocidade de desvio.
- Não atua caso o desvio for constante.
- Quanto mais rápida a razão de mudança do desvio, maior será a correção.

Franchi (2011) esclarece que o controle derivativo auxilia muito na diminuição do atraso do controlador, porém não deve ser utilizado sozinho, pois não identifica a amplitude da perturbação imposta, apenas é sensível à sua variação.

4.5 CONTROLES MISTOS

- Controle Proporcional Integral (PI)

Controle advindo da junção entre o controlador proporcional e o controlador integral, juntando as melhores características de cada um deles, a minimização do erro do controlador integral junto com a otimização temporal do controlador proporcional.

Um controlador proporcional integral dá uma resposta com período maior que o do controlador P, mas muito menor que o de um controlador integral. O controlador PI hoje é certamente um dos mais empregados na indústria. Estima-se que aproximadamente 90% dos controladores encontrados em plantas industriais sejam PI (FRANCHI, 2011, p. 108).

Existem dois tipos de controladores PI (FRANCHI, 2011):

$$MV = K_p E + K_I \int Edt + MV_0$$

- Paralelo: a correção calculada pelo controle é realizada pela adição das correções dos dois controladores (proporcional e integral), e que agem independentemente. A saída do controlador PI paralelo pode ser obtida pela equação (5).

$$MV = K_p E + K_I \int K_p Edt + MV_0$$

Em que:

MV é o sinal de saída do controlador (Variável Manipulável);

K_p é a constante de proporcionalidade;

E é a magnitude do erro;

K_I é a constante de integração;

MV_0 é condição inicial do controlador.

- Série: primeiro é realizado o controle proporcional, seguido do controle integral, conforme a equação (6).

Em que:

MV é o sinal de saída do controlador (Variável Manipulável);

K_p é a constante de proporcionalidade;

E é a magnitude do erro;

K_I é a constante de integração;

MV_0 é condição inicial do controlador.

O controlador PI elimina as oscilações e o desvio de *offset*, porém, além de unir as vantagens dos controladores proporcional e integral, o controle PI também une algumas desvantagens. Uma delas é apresentar instabilidade caso haja perturbações grandes e rápidas no processo. Outra é a ineficiência quando atua num processo com mudanças lentas (SENAI/CST, 1999).

4.5.1 Controle Proporcional Integral Derivativo (PID)

O controle PID é o mais complexo, pois une três tipos de controle: proporcional, integral e derivativo. Dessa forma, ele une as vantagens e desvantagens dos três tipos:

A proporcional elimina as oscilações, a integral elimina o desvio de *offset*, enquanto a derivativa fornece ao sistema uma ação antecipativa, evitando previamente que o desvio se torne maior quando o processo se caracteriza por ter uma correção lenta comparada com a velocidade do desvio, por exemplo, alguns controles de temperatura (SENAI/CST, 1999, p. 39).

A expressão matemática do controlador PID está na equação (7).

$$MV = K_p E + K_I \int Edt - K_D \frac{dE}{dt} + MV_0 \quad (7)$$

Em que:

MV é o sinal de saída do controlador (Variável Manipulável);

K_p é a constante de proporcionalidade

E é a magnitude do erro;

K_I é a constante de integração;

K_D é a constante de derivação;

MV_0 é condição inicial do controlador.

“O principal objetivo de um controlador PID é apresentar um período de resposta semelhante ao controlador P, entretanto sem *offset*” (FRANCHI, 2011, p. 123).

O controlador PID junta as vantagens dos três tipos de controladores e, na teoria, deveria ser utilizado em qualquer condição de controle, porém, SENAI/CST (1999) comenta que a utilização desse controle é comum apenas em processos com resposta lenta e quase sem ruído.

5 ARGUMENTOS QUANTO À ESCOLHA DO CONTROLE

Na seção anterior há várias opções quanto à escolha do melhor tipo de controle considerando características técnicas do processo. Franchi (2011) apresenta um guia para a escolha do controle ideal:

- Se o *offset* for pequeno, use o controlador proporcional.
- Se o *offset* não for pequeno e existir ruído, use o controlador proporcional integral.
- Se o *offset* não for pequeno e não existir ruído e grande tempo morto, use o controlador proporcional integral.
- Se o *offset* não for pequeno e não existir ruído e pequeno tempo morto e pequena capacidade, use o controlador proporcional integral.
- Se o *offset* não for pequeno e não existir ruído e pequeno tempo morto e grande capacidade, use o controlador proporcional integral derivativo.



Um material extra sobre PID foi desenvolvido pela Novus em 2003. Intitulado Controle PID Básico. Disponível em: <<https://www.novus.com.br/artigosnoticias/arquivos/ArtigoPIDBasicoNovus.pdf>>.

A utilização e escolha do tipo de controlador depende muito do problema a ser tratado, porém é notável as diferenças entre os diversos tipos. Por isso, a fábula publicada por Matias (2002) é uma forma diferente de ver a utilização e impacto dos diferentes tipos de controle.

LEITURA COMPLEMENTAR

A FÁBULA DO REGULADOR PID E DA CAIXA D'ÁGUA

Era uma vez uma pequena cidade que não tinha água encanada, mas um belo dia, o prefeito mandou construir uma caixa d'água na serra e ligou-a a uma rede de distribuição. A ligação da caixa com o rio foi feita por meio de uma tubulação. Nessa tubulação colocou-se uma válvula para restringir ou aumentar a vazão. Faltava somente uma pessoa para acionar a válvula.

Enfim, foi empregado um velho sem quaisquer conhecimentos técnicos. Apesar disso, executou o seu serviço durante muitos anos, limitando-se a manter o nível d'água na caixa tão constante como podia, alterando a vazão sempre que necessário.

Quando o velho alcançou a idade da aposentadoria, os seus três filhos, de nomes Isidoro, Pedro e Demétrio, ofereceram-se para substituir o pai. Cada um queria resolver a tarefa da maneira mais simples possível. Discutiram as possibilidades de instalar uma válvula acionada por boia. Ou de um ventil eletropneumático, ou de um regulador hidráulico etc. Certo dia, em meio a essas discussões, apareceu um primo de visita à casa. Sendo esse, engenheiro, pediram-lhe a sua opinião quanto às ideias em discussão.

O primo pensou e, ao invés de apontar uma das alternativas como a melhor, perguntou qual a característica de função que possuíam os reguladores por eles idealizados. Ficando os três irmãos um pouco desapontados, pois esperavam uma resposta mais concreta, o primo explicou: mais de um tipo de regulador poderá servir para solucionar o caso, desde que sua função obedeça às seguintes características principais:

- 1 - Dando-se uma variação do valor desejado, o regulador deverá eliminá-la rápida e energicamente, restabelecendo o ajuste com exatidão.
- 2 - Terá que alcançar esse ajuste sem provação de oscilações no valor desejado, não influenciando assim outros valores que dependam de qual está sendo regulado, por exemplo, do nível de água depende a pressão na rede de distribuição).

Assim, no começo do dia, Isidoro, o filho mais velho, estava no lugar do pai. É um rapaz simples, mas metódico. Quando nota que o nível d'água está dez cm abaixo do nível desejado, pensa que o consumo aumentará. Por isso, começa a abrir a válvula lentamente de maneira contínua, constatando ao mesmo tempo que, pouco a pouco, o nível abaixa mais devagar, depois se estabiliza e, enfim, começa a subir. No entanto, Isidoro abre a válvula ainda mais até que alcance o nível anterior. Pouco depois, Isidoro percebe que a água continua a subir, estando

já acima do nível desejado. Por isso, só com a metade da velocidade Isidoro começa a fechar a válvula, restabelecendo pouco a pouco o nível exato. Mas, a água continua baixando. Assim, Isidoro vê-se forçado a repetir a sua manobra ainda algumas vezes sem que a água se mantenha no nível desejado.

Isidoro é a própria imagem integral de controle, cuja velocidade de ação é proporcional ao desvio. Isidoro acionará a válvula enquanto este existir, sem nunca alcançar estabilidade por ter a zona de regulagem também comportamento integral.

Ao meio-dia, Pedro substitui seu irmão Isidoro. Pedro possui o costume de calcular tudo que faz. Ele percebe logo que, quando o nível d'água se encontra dez cm abaixo do nível desejado, deve dar cinco voltas ao volante da válvula no sentido de abertura para eliminar o desvio. Por outro lado, Pedro não se preocupa muito em voltar ao nível original, contentando-se em estabilizar o mesmo. Pensa consigo que este voltará à marca certa assim que diminuir o consumo na aldeia. Pedro descansa até constatar que o nível efetivo se encontra cinco cm acima do desejado. Conforme seu cálculo, Pedro aciona o volante da válvula 2,5 voltas em sentido de fechamento, estabilizando assim o nível novamente. Sua manobra é segura e rápida. Mas, quanto à exatidão, Pedro diz que somente é preciso conservar “aproximadamente” a pressão d’água para satisfazer as necessidades da sua cidade. Pedro é a própria imagem da ação de controle proporcional.

Ao fim do dia, Demétrio toma conta do serviço. Demétrio é o mais sofisticado dos três irmãos. Não se preocupa somente com o valor do desvio, mas também com a velocidade com a qual este se altera. Caso a água desça rapidamente dez cm abaixo do nível desejado, Demétrio dá de uma só vez dez voltas no volante da válvula em sentido de abertura. Vendo depois que a água sobe devagar, fecha também devagar a válvula, e mais devagar quanto menor for a velocidade de aumento de nível, até chegar progressivamente à abertura inicial. Caso a água ultrapasse o nível desejado por cinco cm, Demétrio executa a mesma manobra de antes, porém em sentido contrário e, além disso, 50% menos acentuado. Demétrio é a própria imagem da ação diferencial, cujo valor é diretamente proporcional ao grau do desvio e inversamente proporcional à duração deste.

O prefeito encontrou-se diante uma decisão difícil. A qual dos candidatos deveria dar o emprego definitivo?

Isidoro, a imagem do comportamento integral, demorou bastante tempo para restituir o nível desejado na caixa d’água. Verdade é que ele acertou todas as vezes o nível exato. Seu método, porém, resultou numa instabilidade absoluta, porque, devido à sua atividade contínua, diversas vezes o nível oscilou fortemente. Seu único recurso contra esse inconveniente foi acionar a válvula lentamente. Mas, na proporção que a manobra era lentamente executada, aumentou-se o tempo que a população deveria esperar até receber água mesmo nos bairros mais elevados.

Pedro, a imagem do comportamento proporcional, obteve um resultado diametralmente oposto. Seu método não resultou em oscilações do nível nem em desvios consideráveis, mas também não foi capaz de assegurar o nível exato.

Demétrio, a imagem do comportamento diferencial, trabalhou com energia exagerada demais. Abrindo ou fechando abruptamente a válvula, deu praticamente uma chicotada na vazão. Por causa dessa atitude brusca, provocava fortes variações de pressão na rede, não conseguindo também estabelecer o nível exato. Assim, apesar de todos seus esforços, os habitantes da cidade acharam o seu serviço o menos satisfatório.

Diante desses resultados, o prefeito decidiu combinar o trabalho dos três candidatos para verificar o efeito. Para esse fim mandou colocar dois tubos de ligação a mais entre o rio e a caixa d'água. Demétrio, porém, encontrava-se impedido, assim que Pedro e Isidoro trabalharam em conjunto, manobrando cada um em uma válvula diferente de acordo com o seu próprio método. Quando o nível d'água encontra-se 10 cm abaixo do nível desejado, Pedro abre a válvula, dando cinco voltas ao volante, acabando assim com a queda d'água. Isidoro, por sua parte, executa o seu trabalho lentamente e continuamente até reconduzir o nível d'água ao valor desejado. Desta vez ele não precisa preocupar-se com a variação de consumo na cidade. É suficiente que ele corrija a inexatidão do serviço de Pedro. Assim, sua manobra é restrita e não provoca mais, por aberturas exageradas da válvula, a instabilidade do nível. O método conjunto de Pedro e Isidoro é a própria imagem da ação proporcional-integral, caracterizada pela estabilização instantânea do nível desejado e por uma excelente exatidão graças à ação integração de Isidoro.

No dia seguinte é Isidoro que se encontra impedido, Pedro e Demétrio vão trabalhar. "Desvio de nível de dez cm abaixo". Pedro, como sempre, estabiliza imediatamente por uma ação proporcional (abertura de cinco voltas). Demétrio abre sua válvula de dez voltas de uma vez (ação diferencial), exagerando a alimentação, prevê a inércia da subida e fecham as dez voltas num tempo proporcional à inércia estimada por ele. Ele sabe que Pedro já fez o trabalho principal e que a sua própria chicotada serve apenas para restabelecer mais rapidamente o nível exato. Ele confia mais na sua estimativa do que na marca de nível, e como Pedro, ele não lê o desvio residual após a sua manobra. Pedro parou a queda por uma ação medida e imediata. Demétrio acrescentou uma manobra energética, mas esporádica, que exagera a ação momentaneamente, acelera o restabelecimento e diminui o desvio. Mesmo assim, o nível prescrito não está ainda exatamente restabelecido.

A ação PROPORCIONAL-DIFERENCIAL é caracterizada por uma estabilização imediata no momento em que o desvio acontece. Um exagero da ação para obter uma absorção rápida do desvio, mas também, infelizmente, uma certa imprecisão final do resultado.

No dia seguinte, finalmente, os três trabalham juntos e cada um ao seu modo. Para uma queda de dez cm, Pedro abre cinco voltas, Demétrio exagera a ação (diferencial) até dez voltas, para depois cancelar a manobra num tempo que é em função da inércia do aumento de nível. Isidoro, como de costume, não tem pressa, abre a válvula devagar (integraliza), até o momento em que ele constata que o nível prescrito é atingido, mas desta vez, a sua manobra é bem menor, porque antes dele, os seus irmãos já fizeram o principal. Pedro efetuou a compensação da perturbação. Demétrio, o exagero que elimina energicamente o desvio. Isidoro determina a precisão final da operação. Ele tomou cuidado para que nenhum desvio residual subsista.

A ação PROPORCIONAL – DIFERENCIAL - INTEGRAL é a combinação perfeita que reúne:

- A compensação imediata da perturbação proporcional.
- O exagero necessário para combater a inércia de mudança de nível (diferencial);
- A volta exata ao valor prescrito (integral).

Em recompensa pela eficiência, a prefeitura contrata os três como encarregados do chafariz para contento geral da aldeia, a não ser um único habitante... o tesoureiro municipal, que pensa.

“Eu devo agora pagar três encarregados em vez de um. Vou ter que aumentar o preço da água”.

FONTE: Disponível em: <http://coral.ufsm.br/beltrame/arquivos/disciplinas/medio_automacao_industrial/Artigo_Teorica_controle_PID.pdf>.

RESUMO DO TÓPICO 3

Nesse tópico, você viu que:

- Estabilidade está ligada à noção de uma perturbação em gerar um sinal convergente de saída.
- Algoritmos de controle são utilizados para determinar a ação a ser tomada quando a variável controlada tem um erro em relação ao valor de referência.
- Há quatro tipos básicos de algoritmos de controle: liga-desliga, proporcional, integral e derivativo.
- Os tipos de controle são, em geral, a junção de dois ou mais tipos básicos.
- O controle liga-desliga fornece apenas duas situações: valor máximo e valor mínimo.
- O controle proporcional atua quando ocorre uma perturbação, porém sua desvantagem é apresentar um erro de *offset*.
- O controle integral atua o tempo todo tentando minimizar o erro, porém pode demorar.
- O controle derivativo atua quando há mudanças no erro, porém não atua quanto à amplitude do mesmo.
- Há algumas características técnicas nos sistemas que devem ser observadas para a escolha do melhor tipo de controle.



- 1 Defina estabilidade de um sinal.
- 2 O que é controle liga-desliga, em que é utilizado? Pesquise exemplos de operação industrial.
- 3 Como age um controle proporcional? Qual a sua desvantagem?
- 4 O controle derivativo é correção relativa a qual característica da perturbação?
- 5 Marque a alternativa em que os passos a seguir estão corretos para se escolher o controlador ideal.
 - a) () Se o *offset* for grande, use o controlador proporcional.
 - b) () Se o *offset* não for pequeno e não existir ruído, use o controlador proporcional integral.
 - c) () Se o *offset* não for pequeno, existir ruído e grande tempo morto, use o controlador proporcional integral.
 - d) () Se o *offset* não for pequeno, não existir ruído e pequeno tempo morto, pequena capacidade, use o controlador proporcional integral.
 - e) () Se o *offset* não for pequeno, não existir ruído e grande tempo morto, grande capacidade, use o controlador proporcional integral derivativo.
- 6 O controlador PID une três tipos diferentes de controladores: Proporcional + Integral + Derivativo. Quais são suas vantagens e desvantagens?

INDÚSTRIA 4.0

1 INTRODUÇÃO

Imagine a indústria do filme clássico de Charlie Chaplin Tempos Modernos (*Modern Times*, 1936). Um empregado em uma empresa mecanizada, em que a produção é em massa. Agora pense, indústria japonesa ou alemã, nos dias de hoje, com toda a tecnologia e automatização utilizada. Bem diferentes, não é?

A indústria de hoje vive uma quebra de paradigma, temos desenvolvimento tecnológico, mas como utilizar tudo de forma a otimizar a produção? Por que não a relação da indústria com a sociedade e o meio ambiente?

O desenvolvimento do controle de processos vem junto com o desenvolvimento tecnológico. Hoje, este desenvolvimento denominamos a quarta Revolução Industrial. Sabemos que a indústria é a base da economia mundial e que sua automatização só tende a crescer. Isso junto com outros fatores, como o advento da internet das coisas (IOT), *big data* e computação em nuvem, gerou um novo paradigma industrial, também chamado de indústria 4.0.

A incorporação da digitalização à atividade industrial resultou no conceito de Indústria 4.0, em referência ao que seria a 4^a revolução industrial, caracterizada pela integração e controle da produção a partir de sensores e equipamentos conectados em rede e da fusão do mundo real com o virtual, criando os chamados sistemas ciberfísicos e viabilizando o emprego da inteligência artificial (CNI, 2016, p. 11).

Nesse tópico iremos aprender um pouco sobre essa recente revolução industrial, entender a sua origem, seus princípios e como o Brasil se encaixa hoje nessa revolução.

2 UM POUCO DE HISTÓRIA

O conceito de indústria vem da chamada Primeira Revolução Industrial, em que a produção artesanal foi substituída pela mecanização, utilizando o vapor de água, entre o final do século XVIII e o início do século XIX. Depois, entre os séculos XIX e XX vem a Segunda Revolução Industrial, marcada pela utilização da energia elétrica. Se as máquinas já funcionavam bem com vapor, imagine com eletricidade. No final do século XX aparecem os componentes eletrônicos e a automação, caracterizando a Terceira Revolução Industrial. No início do século XXI, com a internet e outras possibilidades tecnológicas que iremos discutir mais para frente, outra revolução: a Quarta Revolução Industrial (AIRES, MOREIRA; FREIRE, 2017).

As revoluções industriais são caracterizadas por mudanças profundas no sistema produtivo, mudando a forma como a sociedade e a indústria se relacionam. Se na Primeira Revolução Industrial aparece o conceito de trabalho manual e intelectual, na Segunda esses conceitos se distanciam ainda mais com o aumento da produção e da eficiência das fábricas. Na Terceira Revolução Industrial temos o aparecimento do computador e de uma mudança no modo de administrar o negócio. A Quarta Revolução Industrial é iniciada com a ampla utilização da internet, porém para ser chamada de Indústria 4.0 são necessários outros aspectos, que serão abordados no próximo item. Um resumo sobre as revoluções e suas características está na tabela a seguir:

TABELA 20 – CARACTERÍSTICAS TECNOLÓGICAS DAS REVOLUÇÕES INDUSTRIALIS

Revolução Industrial	Período	Características Tecnológicas
Primeira Revolução Industrial	Iniciou na segunda metade do século XVIII e avançou até meados do século XIX. Ocorreu entre as décadas de 1760 a 1840.	Máquina a Vapor. Substituição da produção artesanal pela produção fabril. Sistema de produção taylorista-fordista - divisão do trabalho manual e intelectual.
Segunda Revolução Industrial	Iniciou na século XIX e avançou a primeira metade do século XX.	Energia Elétrica. Automação e produção em massa. Sistema de produção taylorista-fordista - divisão do trabalho manual e intelectual.
Terceira Revolução Industrial	Iniciou na segunda metade do século XX e avançou até o final desta século. Ocorreu entre as décadas de 1960 e 1990.	Surgimento da informática e avanço das comunicações. Surge a sociedade do conhecimento. Sistema de produção flexível.
Quarta Revolução Industrial	Iniciou na primeira década do século XXI, na década de 2000.	Internet mais ubíqua e móvel, sensores menores, mais poderosos e baratos e inteligência artificial. Fusão das tecnologias e a interação entre domínios físicos, digitais e biológicos. Sistemas e máquinas inteligentes conectados possibilitando um sistema de produção de personalização em massa.

FONTE: Aires; Moreira e Freire (2017)

3 PRINCÍPIOS DA INDÚSTRIA 4.0

Segundo a CNI (2016, p. 11), a Quarta Revolução Industrial é “caracterizada pela integração e controle da produção a partir de sensores e equipamentos conectados em rede e da fusão do mundo real com o virtual, criando os chamados sistemas ciberfísicos e viabilizando o emprego da inteligência artificial”.

As principais tecnologias habilitadoras por trás dessa revolução incluem a já mencionada internet das coisas, o big data, a computação em nuvem, a robótica avançada, a inteligência artificial, novos materiais e as novas tecnologias de manufatura aditiva (impressão 3D) e manufatura híbrida com funções aditivas e de usinagem em uma mesma máquina (CNI, 2016, p. 12).

Além de um novo meio de produção e distribuição, há também alterações nos métodos de desenvolvimento de produtos, desde o projeto até o pós-venda. Uma indústria 4.0 tem um novo olhar sobre a produção, sendo possível lançar produtos novos com mais rapidez, atender as demandas específicas de clientes e economizar recursos (CNI, 2016).



O conceito de Indústria 4.0 nasceu na Alemanha, em que o termo foi utilizado a primeira vez em Hannover em 2011, em alemão, “Industrie 4.0”. Em paralelo, a GE (General Electric) usou o termo “Industrial Internet” ou Internet Industrial, e a Cisco, o termo “Internet of Everything” ou Internet de tudo (GILCHRIST, 2016). Além desses termos, também é comum “smart factory”, “intelligent factory”, “factory of the future”, “Integrated Industry” ou ainda “Digital Twins”. Mesmo sem um consenso de termo, o que importa é que a indústria do futuro já nasceu e deverá se espalhar por todo o globo.

Segundo Rüßmann (2015), a indústria 4.0 é apoiada em nove pilares tecnológicos. Cada tecnologia, por si só, não torna a indústria 4.0: a integração entre os pilares é o que gera a nova indústria. Os nove pilares são o Big Data, Robôs Autônomos, Simulação, Integração Vertical e Horizontal de Sistemas, Internet das Coisas, Cybersegurança, Armazenamento em Nuvem, Realidade Aumentada e Manufatura Aditiva. Vamos entender o que cada um significa:

a) BIG DATA

Como comentado na Unidade 1, o monitoramento industrial é base para o gerenciamento dos processos. Com a automatização das plantas industriais junto com o crescimento em número e tipo dos sensores de medição, vários dados podem ser extraídos, muitas vezes em tempo real, de uma indústria. Isso sem contar indicadores de gestão, vendas, entre outros. Nesse contexto, a análise de um grande número de dados em tempo real deve ser a principal fonte de decisões (RÜßMANN, 2015).

A estatística, junto com a computação, está em pleno desenvolvimento para dar suporte a essa tecnologia, auxiliando desde o momento da aquisição, processamento, e até o armazenamento. Novos métodos estão sendo desenvolvidos para transformar um grande número de dados em uma realidade de fácil entendimento e que facilite o gerenciamento e administração industrial.

b) ROBÔS AUTÔNOMOS

Robôs já são utilizados nos diversos meios industriais, mas quando falamos de robôs autônomos, nos referimos a robôs mais independentes e, até mesmo, cooperativos (RÜßMANN, 2015). No futuro espera-se que os robôs custem menos e possam desempenhar várias outras funções, além das já realizadas nos dias de hoje. Além disso, espera-se que seja possível haver a interação entre robôs, assim como com humanos, aprendendo pela vivência na indústria (RÜßMANN, 2015).

c) SIMULAÇÃO

Com o avanço computacional, hoje a simulação já faz parte do planejamento de diversos produtos e serviços. Espera-se que na indústria 4.0 a simulação também seja uma ferramenta utilizada nas indústrias, em tempo real, junto com o funcionamento do processo. Assim será possível otimizar o maquinário, por exemplo, a partir de simulações feitas simultaneamente com a produção, de forma que já haja alterações na produção do próximo lote (RÜßMANN, 2015).

d) INTEGRAÇÃO VERTICAL E HORIZONTAL DE SISTEMAS

Integração entre fornecedores, indústria e consumidores é possível? É o esperado. Um trabalho conjunto entre todos os departamentos da indústria em conjunto com os fornecedores, de forma a fornecer produtos cada vez mais personalizados aos consumidores, e com menor custo (RÜßMANN, 2015).

e) INTERNET DAS COISAS

Nos tópicos anteriores foi discutido como as indústrias devem estar automatizadas e como isso deve melhorar a produtividade. A internet das coisas vem para fazer esse trabalho de um jeito melhor, todos os dispositivos devem estar interconectados, de forma que a informação seja dividida entre todos os dispositivos. Dessa forma é possível decentralizar o controle sobre as informações e sobre as decisões (RÜßMANN, 2015).

f) CYBERSEGURANÇA

Com o big data e a internet das coisas fica fácil imaginar o porquê da necessidade da cybersegurança. Um novo método será necessário, visto que as informações (e as decisões) serão decentralizadas. Novos protocolos de segurança industrial, novos métodos de identificação e de armazenamento deverão ser implementados (RÜßMANN, 2015).

g) COMPUTAÇÃO EM NUVEM

A computação em nuvem já é utilizada em muitas indústrias e sua utilização só deve aumentar. Junto com o big data, a integração e a internet das coisas, necessitaremos de dados compartilhados em locais diferentes, muitas vezes com continentes diferentes. Seus principais atrativos são o baixo custo junto com baixo tempo de reação, o que faz as informações serem compartilhadas em alguns milissegundos, até mesmo sistemas de controle de processos deverão ser baseados em nuvem (RÜßMANN, 2015).

h) REALIDADE AUMENTADA

Realidade aumentada se refere à utilização de realidade virtual junto com a visão natural, adicionando pequenos objetos que não estão presentes. Sua utilização hoje está em pleno crescimento, principalmente por dois usos, pré-visualização de locais em que se vai fazer um reparo. Treinamento em que é possível ter diferentes cenários para a formação de um profissional. Claro que muitos outros usos devem aparecer, sendo uma ferramenta importante para a disseminação de informações, sendo possível mostrar o que está acontecendo de verdade em uma planta industrial, em uma sala com especialistas a quilômetros de distância.

i) MANUFATURA ADITIVA

A manufatura aditiva fornece um novo meio de fabricação de produtos. Um dos principais exemplos dela é a utilização de impressoras 3D no ambiente industrial. Seus atrativos são a facilidade de uso, facilidade de fabricação de peças com *design* complexo, junto com menor tempo de produção, facilitando desde a prototipagem de novos produtos, assim como a fabricação de produtos em linha de produção. Sistemas de manufatura aditiva devem ajudar na descentralização da informação, sendo possível estar presente em várias filiais da mesma indústria, possivelmente diminuindo as distâncias para o transporte de produtos, assim como a necessidade de grandes estoques (RÜßMANN, 2015).

Como é possível observar, muitos desses pilares tecnológicos já estão presentes nas indústrias de hoje. O que difere na indústria 4.0 é a forma integrada de utilização deles, o que é possível notar até mesmo nas descrições acima. Uma palavra que pode definir a indústria 4.0 é informação.

4 INDÚSTRIA 4.0 NO BRASIL

Uma pesquisa feita pela CNI em 2016 mostra que o Brasil ainda tem que evoluir muito no que tange à indústria 4.0. Na pesquisa, 42% das empresas entrevistadas não conhecem a importância das tecnologias digitais e (52%) não utilizam nenhuma tecnologia digital, dentre 10 citadas na pesquisa. Além disso, 31% não sabiam responder se utilizavam alguma das tecnologias digitais (CNI, 2016). A Tabela 21 mostra o uso de tecnologias digitais por tipo de indústria.

Entre os setores pesquisados, 63% das empresas de vestuário não sabem se usam tecnologias digitais (CNI, 2016). O índice de desconhecimento preocupa mais que o índice de não utilização: além da barreira natural da mudança tecnológica, haverá necessidade de mostrar que a tecnologia já existe. Há esforços de vários órgãos, como a CNI e o Governo Federal, para que a barreira do desconhecido seja superada.

Segundo a CNI (2016), “outra característica da digitalização na indústria brasileira é o foco nos processos, ou seja, no aumento da eficiência e da produtividade”. Espera-se que logo seja observada também a melhoria na gestão e nos tipos de negócios quando há utilização das novas tecnologias.

TABELA 21 – USO DE TECNOLOGIAS DIGITAIS EM INDÚSTRIAS BRASILEIRAS

Percentual de empresas que utilizam pelo menos uma das tecnologias digitais listadas (%)

	SETOR	%
Que mais usa	Equipamentos de informática, produtos eletrônicos e outros	61
	Máquinas, aparelhos e materiais elétricos	60
	Coque, derivados do petróleo e biocombustíveis	53
	Máquinas e equipamentos	53
	Metalurgia	51
Que menos usa	Outros equipamentos de transporte	23
	Manutenção, reparação e instalação de máquinas e equipamentos	25
	Produtos farmacêuticos	27
	Minerais não metálicos	28
	Vestuário	29
	Calçados	29

FONTE: CNI (2016)

Desta forma, ainda há um grande caminho a ser trilhado pela indústria brasileira. No que tange à indústria 4.0 estamos muito longe, porém todos concordam que será necessária essa mudança de paradigma industrial para manter a competitividade. Como já foi comentado no início do texto, essas mudanças já existem e chegaram ao país, pois não há como escapar da Quarta Revolução Industrial.



A sondagem do CNI é um ótimo material para se ter em mente o atual panorama da Indústria 4.0 no Brasil. Disponível em: <http://www.portaldaindustria.com.br/relacoesdotrabalho/media/publicacao/chamadas/SondEspecial_Industria4.0_Abril2016.pdf>.



A tabela com os Coeficientes t de Student encontram-se no final do livro.

RESUMO DO TÓPICO 4

Nesse tópico, você viu que:

- O conceito de indústria 4.0 está ligado à Quarta Revolução Industrial.
- Além de um novo meio de produção e distribuição, há também alterações nos métodos de desenvolvimento de produtos, desde o projeto até o pós-venda.
- Há vários termos que descrevem a indústria 4.0, como “Industrial Internet”, “Internet of Everything”, “smart factory”, “intelligent factory”, “factory of the future”, “Integrated Industry” ou ainda “Digital Twins”.
- Os nove pilares da Indústria 4.0 são o Big Data, Robôs Autônomos, Simulação, Integração Vertical e Horizontal de Sistemas, Internet das Coisas, Cybersegurança, Armazenamento em Nuvem, Realidade Aumentada e Manufatura Aditiva.

AUTOATIVIDADE



1 A indústria 4.0 necessita de integração de informações. Conforme Silva et al. (2017):

A Indústria 4.0 utiliza diferentes tecnologias para gerir os processos de forma que tudo esteja integrado, desde o desenvolvimento de produtos até a sua distribuição ao longo da cadeia de suprimentos. Além disso, na Indústria 4.0 os elementos envolvidos no processo comunicam, pensam e decidem, tornando o processo produtivo muito mais flexível, desta forma, as empresas são capazes de atender demandas específicas advindas de um mercado cada vez mais exigente.

A modularização, por sua vez, dividindo os produtos ou processos em partes distintas que funcionam separadas ou em conjunto, possibilita para a empresa otimizar seu processo produtivo. Acredita-se que a modularização dos produtos pode influenciar a flexibilidade da Indústria 4.0. A utilização de módulos identificados e rastreados por sensores no processo produtivo pode gerar ganhos de escala, sem perder a flexibilidade, pois ao invés de se trabalhar com os dados de cada peça, trabalha-se com os dados de conjuntos de peças (SILVA et al., 2017, p. 13).

FONTE: SILVA, A. C. S. et al. A modularização e a indústria 4.0. In: Simpósio Gaúcho de Engenharia de Produção. *Anais*. p.1-19. ago. 2017.

- a) Por que integrar as informações de setores modularizados? Qual os possíveis impactos da integração de informação no setor industrial no seu resultado produtivo?
- 2 Faça uma linha do tempo relacionando as diferentes revoluções industriais focando na mudança de paradigma tecnológico.
- 3 Sobre os pilares da Indústria 4.0, assinale (V) para afirmações verdadeiras e (F) para as falsas:
 - a) () O big data está sendo desenvolvido a partir da estatística, junto com a computação, para dar suporte ao grande número de dados colhidos na indústria, auxiliando desde o momento da aquisição, processamento, e até o armazenamento.
 - b) () No futuro espera-se que os robôs custem menos e possam desempenhar várias outras funções, além das já realizadas nos dias de hoje. Além disso, espera-se que seja possível haver a interação entre robôs, substituindo os operários humanos.
 - c) () A simulação servirá apenas para planejar o processo produtivo.
 - d) () Com a integração dos sistemas e a internet das coisas será necessário um novo paradigma de cybersegurança, pensando nas informações descentralizadas.
 - e) () A manufatura aditiva tem como pontos positivos a facilidade de uso, facilidade de fabricação de peças com design complexo, junto com menor tempo de produção, facilitando desde a prototipagem de novos produtos, assim como a fabricação de produtos em linha de produção.

REFERÊNCIAS

ALBERTAZZI, A. G.; SOUSA, A. R. **Fundamentos de metrologia científica e industrial.** Barueri: Manole, 2008.

ABNT ISSO 9000. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Sistemas de gestão da qualidade - Requisitos. Rio de Janeiro: 2008.

ASQ. Kauro Ishikawa. Developing a specifically japanese quality strategy. S.L. 2017.

AIRES, R. W. A.; MOREIRA, F. K; FREIRE, P. S. Indústria 4.0: Competências requeridas aos profissionais da quarta revolução industrial. In: VII congresso internacional de conhecimento e inovação. 2017. **Anais.** Florianópolis: EGC/UFSC, 2017.

BONIFÁCIO, C. M.; FREIRE, R. **Comparação de três métodos para medição da vazão e velocidade aplicados em dois cursos d'água da bacia do ribeirão Maringá.** Maringá: Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista, 2013.

BAZZANELLA, A; TAFNER, P. E.; SILVA, E.; MÜLLER, J. A. **Metodologia científica.** Indaiatuba: Uniasselvi, 2013.

BRASIL. INMETRO. **Sistema Internacional de Unidades:** SI. Duque de Caxias: INMETRO/CICMA/SEPIN, 2012.

BEREZOWSKI, L. R.; NETO, C. D. M.; MELO, F. C. L. D. **Avaliação da resistência mecânica de cerâmicas à base de carbeto de silício.** São José dos Campos: Instituto de Aeronáutica, 2002.

BRASIL. Tribunal de Contas da União. **Técnicas de apresentação de dados.** Brasília: TCU, Secretaria-Adjunta de Fiscalização, 2001.

_____. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia – INMETRO. **Designa as unidades de medidas legais no país e sobre o sistema internacional de unidades de medida, da conferência geral de pesos e medidas.** Portaria n. 590, 2 dez. 2013.

BAYER, F. M.; ARAÚJO, O. C. B. **Curso técnico em automação industrial:** controle automático de processos. 3. ed. Santa Maria: UFSM, 2010.

CASTRUCCI, P. L.; BITTAR, A. SALES, R. M. **Controle automático.** Rio de Janeiro: LTC, 2011.

CNI. CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Desafios para a indústria 4.0 no Brasil.** Brasília: CNI, 2016.

CNI.CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Indicadores CNI:** sondagem especial indústria 4.0. n. 2, abr. 2016.

CESAR, F. I. G. **Ferramentas básicas da qualidade.** 1. ed. São Paulo: Biblioteca 24 horas, 2011.

CURY, J. E. R. **Teoria de controle supervisório de sistemas a eventos discretos.** In: V simpósio brasileiro de automação inteligente. Canela: Departamento de Automação de Sistema, 2001.

DUNN, W. C. **Fundamentos de instrumentação industrial e controle de processos.** Porto Alegre: Bookman, 2013.

DISTEFANO III, J. J.; STUBBERUD, A. R.; WILLIANS, I. J. **Sistemas de controle.** 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2014.

DORF, R. C.; BISHOP, R. H. **Sistemas de controle moderno.** 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

DOTY, L. A. **Statistical process control.** 2. ed. Nova York: Industrial Press Inc., 1996.

FILIPPO Filho, G. **Automação de processos e de sistemas.** 1. ed. São Paulo: Érica, 2014.

FERNANDES, W. D.; COSTA, P. L. O.; SILVA, J. **Metrologia e qualidade:** sua importância como fatores de competitividade nos processos produtivos. In: XXIX Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Salvador: ABEPRO, 2009.

FONSECA, M. P. **A análise do sistema de medição (MSA) como ferramenta no controle de processos em uma indústria de dispositivos médicos descartáveis.** Monografia. Graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal de Juiz de Fora. 2008.

FRANCHI, C. M. **Controle de processos industriais: princípios e aplicações.** 1. ed. São Paulo: Érica, 2011.

FRANKLIN, G. F.; POWELL, J. D.; EMANI-NAEINI, A. **Sistemas de controle para engenharia.** 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

Folha de verificação. **Blog Ferramentas da Qualidade.** 2016.
Disponível em: <<http://www.ferramentasdaqualidade.org/folha-de-verificacao/>>. Acesso em: 10 out. 2017.

GUARATINI, C. C. I.; ZANONI, M. **Corantes têxteis**. Química Nova. Sociedade Brasileira de Química, v. 23, n. 1, p. 71-78, São Paulo: 2000.

_____. **Vocabulário internacional de metrologia**: conceitos fundamentais e gerais e termos associados. Rio de Janeiro: INMETRO, 2012.

GILCHRIST, A. **Industry 4.0: the industrial internet of things**. Thailandia: Apress, 2016.

GUERRA, W. A. **Implementação de controle proporcional, integral e derivativo digital em controladores lógico-programáveis**. 2009. 40f. Monografia (Especialização em Engenharia de Instrumentação). Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

KONRATH, Andréa, C. Influência do processo de medição no controle estatístico de processos. Tese, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

LIRA, F. A. **Metrologia na indústria**. 10. ed. São Paulo: Érica, 2015.

MOURA, E. C. As sete ferramentas gerenciais da qualidade. Porto Alegre: Engenharia de Produção – UFRGS. Disponível em: <http://www.producao.ufrgs.br/arquivos/disciplinas/386_3._ferramentas.pdf>. Acesso em: 10 out. 2017.

MACHLINE, C. Planejamento e controle de produção na indústria nacional de bens de equipamento. **Folha de verificação ferramenta de qualidade**. São Paulo, p. 5-28, v. 25. 1985. Marketing Futuro. 2017.

MEIRELLES, M. **Ferramentas administrativas para identificar, observar e analisar problemas**. Série excelência empresarial. São Paulo: Artes & Ciência, 2001.

MORAES, D. Q. **Utilização das ferramentas da qualidade para identificação, minimização e possível solução de problemas em equipamentos no setor de manutenção de equipamentos laboratoriais**. 2009. Monografia (Especialização em Administração da Qualidade). Universidade Cândido Mendes, Rio de Janeiro, 2009.

MATIAS, J. Teoria de controle PID. **Revista Mecatrônica Atual**. n. 3. p. 17-25, abr. 2012.

NETO, S. C. J. Estudo do erro sistemático ou tendência e repetitividade de um instrumento de medição. In: 8. Congresso Brasileiro de Metrologia. **Anais**. Bento Gonçalves: 2015.

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 3. ed. Rio de Janeiro: Prentice-Hall do Brasil, 1985.

PRADO, P. P. L.; GONÇALVES, J. B.; MARCELINO, M. A. **Sistemas de medição, erros e calibração**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2014.

POSSANI, D. et al. Ondas ultrassônicas: teoria e aplicações industriais em ensaios não destrutivos. **Revista Brasileira de Física Tecnológica Aplicada**. Ponta Grossa, v. 4 n. 1. 2017. Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.br/rbfta/article/view/5073>>. Acesso em: 10 out. 2017.

QUINTELLA, M. **Empreendedorismo e gestão de negócios**. Rio de Janeiro: Synergia, 2017.

RÜFFMANN, M. et al. **Industry 4.0: the future of productivity and growth in manufacturing industries**. The Boston Consulting Group, 2015.

SENAI/CST. **Fundamentos de controle de processos**. Vitória: SENAI, 1999.

SILVA, A. C. S., et al. A modularização e a indústria 4.0. In: simpósio gaúcho de engenharia de produção. **Anais**. p.1-19, ago. 2017.

SILVA, A. O. Measurement of creepage distance and air clearance: differences between different professionals. **Journal of Physics: Conference Séries**, 2016.

SAKKIS, A; AFONSO, I. **Nova era industrial transformará produtividade global**. São Paulo: CNI de Notícias, abr. 2016.

TOLEDO, J. C. Qualidade, estrutura de mercado e mudança tecnológica. **Revista de Administração de Empresas**, São Paulo: 1990.

_____. **Sistemas de medição e metrologia**. 1. ed. Curitiba: InterSaber, 2014.

VIEIRA, S. **Estatística para qualidade**. 3. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

WERKEMA, C. **Avaliação de sistemas de medição**. 1. ed. Belo Horizonte: Werkema, 2016.

_____. **Ferramentas estatísticas básicas do Lean seis sigma integradas**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

ANEXO A – COEFICIENTES t DE STUDENT

Graus de Liberdade	1,96 σ (95,00%)	2,00 σ (95,45%)	2,58 σ (99,00%)
1	12,706	13,968	63,656
2	4,303	4,527	9,925
3	3,182	3,307	5,841
4	2,776	2,869	4,604
5	2,571	2,649	4,032
6	2,447	2,517	3,707
7	2,365	2,429	3,499
8	2,306	2,366	3,355
9	2,262	2,320	3,250
10	2,228	2,284	3,169
11	2,201	2,255	3,106
12	2,179	2,231	3,055
13	2,160	2,212	3,012
14	2,145	2,195	2,977
15	2,131	2,181	2,947
20	2,086	2,133	2,845
30	2,042	2,087	2,750
50	2,009	2,051	2,678
100	1,984	2,025	2,626
1000	1,962	2,003	2,581
10000	1,960	2,000	2,576
100000	1,960	2,000	2,576

FONTE: Adaptado de Albertazzi e Sousa (2008)