



Fundação

CECIERJ

Consórcio **cederj**

Centro de Educação Superior a Distância do Estado do Rio de Janeiro

Confiabilidade

Volume Único

Henrique Martins Rocha



**GOVERNO DO
Rio de Janeiro**

**SECRETARIA DE CIÊNCIA,
TECNOLOGIA E INOVAÇÃO**

**UNIVERSIDADE
ABERTA DO BRASIL**

MINISTÉRIO DA
EDUCAÇÃO



**PÁTRIA AMADA
BRASIL**
GOVERNO FEDERAL

Apoio:



FAPERJ

Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo
à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro

Fundação Cecierj / Consórcio Cederj

www.cederj.edu.br

Presidente

Carlos Eduardo Bielschowsky

Vice-presidente

Marilvia Dansa de Alencar

Coordenação do Curso de Engenharia de Produção

CEFET - Diego Carvalho

UFF - Cecília Toledo Hernández

Material Didático

Elaboração de Conteúdo

Henrique Martins Rocha

Diretoria de Material Didático

Bruno José Peixoto

Coordenação de Design Instrucional

Flávia Busnardo da Cunha

Design Instrucional

Felipe M. Castello-Branco

Biblioteca

Simone da Cruz Correa de Souza

Vera Vani Alves de Pinho

Diretoria de Material Impresso

Ulisses Schnaider

Revisão Linguística e Tipográfica

Yana Gonzaga

Ilustração

Fernando Romeiro

Capa

Fernando Romeiro

Programação Visual

Larissa Averbug

Produção Gráfica

Fábio Rapello Alencar

Copyright © 2019 Fundação Cecierj / Consórcio Cederj

Nenhuma parte deste material poderá ser reproduzida, transmitida e/ou gravada, por qualquer meio eletrônico, mecânico, por fotocópia e outros, sem a prévia autorização, por escrito, da Fundação.

R672c

Rocha, Henrique Martins.

Confabilidade : volume único / Henrique Martins Rocha. –

Rio de Janeiro : Fundação Cecierj, 2019.

228p.; 19 x 26,5 cm.

ISBN: 978-85-458-0155-9

1. Confabilidade. 2. Confabilidade em Engenharia. 3.
Índices de Confabilidade. I. Título.

CDD: 620.00452

Referências bibliográficas e catalogação na fonte, de acordo com as normas da ABNT.
Texto revisado segundo o novo Acordo Ortográfico da Língua Portuguesa.

Governo do Estado do Rio de Janeiro

Governador

Wilson Witzel

Secretário de Estado de Ciência, Tecnologia e Inovação

Leonardo Rodrigues

Instituições Consorciadas

CEFET/RJ - Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca

Diretor-geral: Carlos Henrique Figueiredo Alves

FAETEC - Fundação de Apoio à Escola Técnica

Presidente: Alexandre Sérgio Alves Vieira

IFF - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense

Reitor: Jefferson Manhães de Azevedo

UENF - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro

Reitor: Luis César Passoni

UERJ - Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Reitor: Ruy Garcia Marques

UFF - Universidade Federal Fluminense

Reitor: Sidney Luiz de Matos Mello

UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro

Reitor: Roberto Leher

UFRRJ - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Reitor: Ricardo Luiz Louro Berbara

UNIRIO - Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro

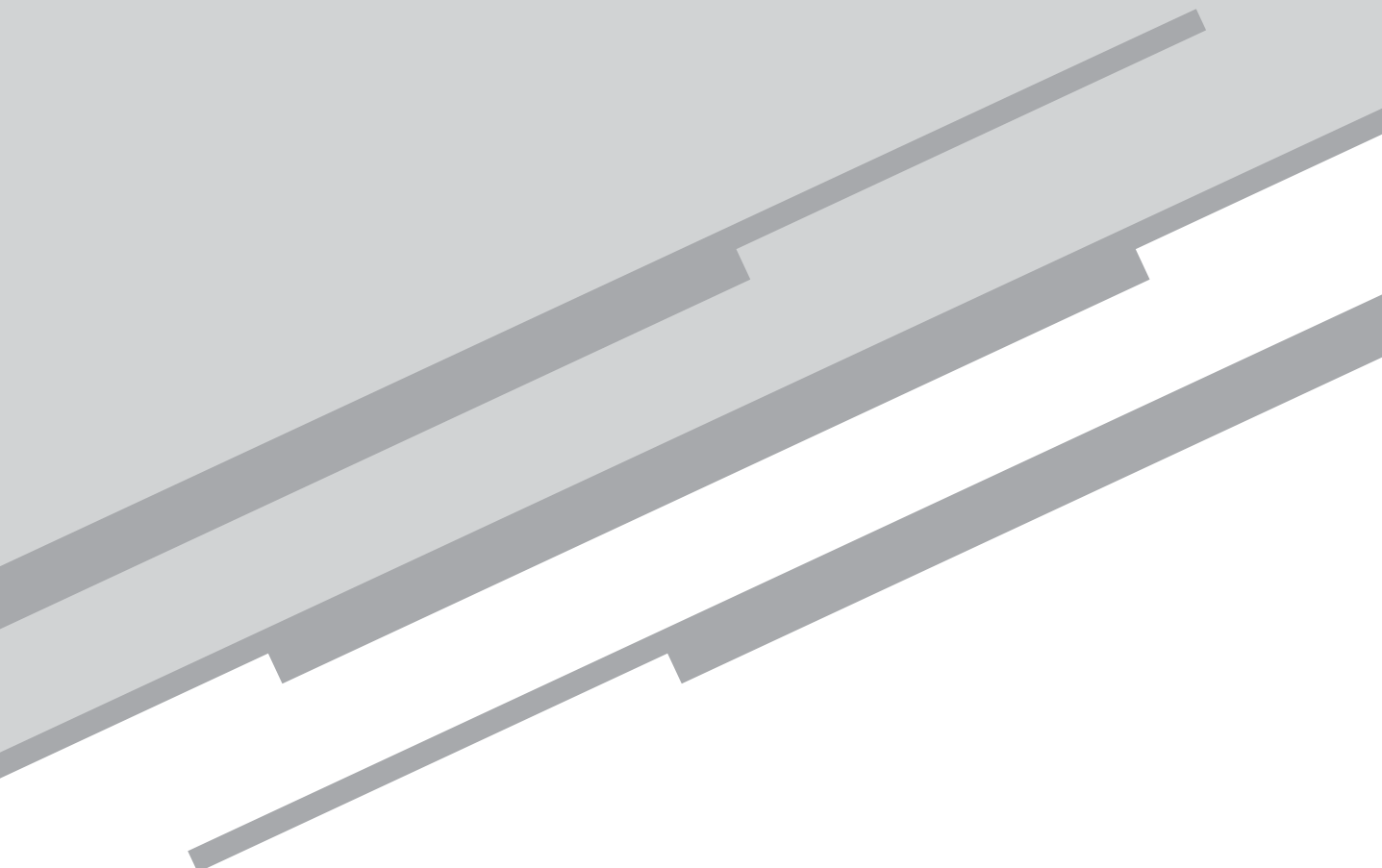
Reitor: Luiz Pedro San Gil Jutuca

Sumário

Aula 1 • Noções gerais de análise de confiabilidade	7
<i>Henrique Martins Rocha</i>	
Aula 2 • Índices de confiabilidade e manutenabilidade – parte 1	31
<i>Henrique Martins Rocha</i>	
Aula 3 • Índices de confiabilidade e manutenabilidade – parte 2	45
<i>Henrique Martins Rocha</i>	
Aula 4 • Confiabilidade de componentes e sistemas.....	61
<i>Henrique Martins Rocha</i>	
Aula 5 • Função densidade de confiabilidade – parte 1	79
<i>Henrique Martins Rocha</i>	
Aula 6 • Função densidade de confiabilidade – parte 2	99
<i>Henrique Martins Rocha</i>	
Aula 7 • Análise dos modos de falha, efeitos e criticidade – parte 1.....	123
<i>Henrique Martins Rocha</i>	
Aula 8 • Análise dos modos de falha, efeitos e criticidade – parte 2.....	143
<i>Henrique Martins Rocha</i>	
Aula 9 • Análise de árvore de falhas.....	159
<i>Henrique Martins Rocha</i>	
Aula 10 • Manutenção centrada em confiabilidade	175
<i>Henrique Martins Rocha</i>	
Aula 11 • Aplicações de confiabilidade em engenharia – parte 1	191
<i>Henrique Martins Rocha</i>	
Aula 12 • Aplicações de confiabilidade em engenharia – parte 2	219
<i>Henrique Martins Rocha</i>	

Aula 1

Noções gerais de análise de confiabilidade



Henrique Martins Rocha

Meta

Apresentar os conceitos fundamentais da análise de confiabilidade, bem como a evolução histórica dos estudos nesta área de conhecimento.

Objetivos

Esperamos que, ao final desta aula, você seja capaz de:

1. definir o que é confiabilidade;
2. apontar os marcos históricos sobre o desenvolvimento da análise de confiabilidade como um método científico;
3. relacionar a aplicação dos conceitos de confiabilidade com as atividades de Engenharia.

Ao ler esta aula, você provavelmente tem por perto alguns materiais e equipamentos: algumas canetas, lapiseira, calculadora, telefone celular etc. Você “confia” neles? Ou seja, você confia que a sua caneta vai escrever quando precisar dela? Que a calculadora vai poder ser usada quando você quiser fazer contas?

Obviamente você não tem certeza absoluta de que isso vai acontecer, mas deve acreditar que “provavelmente” funcionarão, afinal, funcionaram da última vez que precisou delas e, como nada anormal aconteceu (por exemplo, não caíram no chão, não foram molhadas etc.), tudo deve funcionar bem.

No entanto, ao mesmo tempo, você sabe que não funcionarão para sempre: ainda que devam funcionar como esperado agora, em algum momento, elas deixarão de funcionar adequadamente, ou seja, não cumprirão mais as suas funções e, conseqüentemente, não atenderão às suas necessidades.

Há regras e conceitos que se aplicam a essa situação, compondo a área de conhecimento da confiabilidade. É isso que você estudará aqui, começando pelas noções gerais que envolvem tal área de conhecimento: trataremos da classificação das características da qualidade e dos conceitos básicos de Confiabilidade. Discutiremos ainda as normas relacionadas à confiabilidade, e você terá a oportunidade de acompanhar a evolução histórica dessa área tão importante na Engenharia.

Bons estudos!

Introdução

Confiabilidade é a característica de ser confiável. Mas o que seria “ser confiável”? Por exemplo, a caneta que você usa é “confiável”?

Vamos mudar um pouco a pergunta para que possamos avançar nos nossos estudos: você “confia” que, quando precisar, sua caneta vai escrever?



Figura 1.1: Escrita com caneta: como mostrado na imagem, a escrita, seja para simples anotações ou cálculos, só vai ocorrer se a caneta que utilizamos estiver disponível, em boas condições de uso.

Fonte: http://www.freepik.com/free-photo/hands-of-male-graphic-designer-writing-on-a-diary_977299.htm#term=escrevendo&page=1&position=0

Bem, se você tem essa confiança, vai manter a caneta por perto quando precisar escrever. Se, por outro lado, você não tem essa confiança (por exemplo, se uma caneta está sem uso há muito tempo), você vai testá-la, isto é, verificar se ela consegue atender às suas necessidades, não é mesmo?

Os estudos sobre confiabilidade têm esse propósito: estabelecer o que é confiável e o que não é, ou seja, ainda que não possamos ter certeza, estabelecer probabilidades de que máquinas e equipamentos estejam em condições e disponíveis para uso, ou seja, que consigam atender a contento o que é esperado deles.

Trata-se de um conceito muito próximo ao de *qualidade*, pois um produto ou serviço é reconhecido como sendo “de qualidade” se atende (ou supera) nossas expectativas em termos de funcionar adequadamente.

Sua caneta e sua calculadora são “de qualidade”?



Figura 1.2: Calculadora e caneta: elas são “de qualidade”? Funcionam corretamente quando você precisa delas para efetuar cálculos diversos e fazer anotações?

Fonte: <https://pixabay.com/pt/calculadora-c%C3%A1lculo-seguro-finan%C3%A7as-385506/>

Classificação das características da qualidade

É comum associar-se a palavra *qualidade* a artigos caros, sofisticados e luxuosos, mas isso não é correto, pois a qualidade está associada ao atendimento de expectativas, ou seja, um produto é “de qualidade” se ele cumpre adequadamente o que é esperado dele.

Qual veículo, por exemplo, tem maior “qualidade”: um Fórmula 1 ou um automóvel popular?



Figura 1.3: Fórmula 1. Um carro de Fórmula 1 é reconhecido como um produto de altíssima tecnologia e desempenho, superior aos demais veículos que conhecemos. Mas será que isso faz dele um produto de maior “qualidade” em comparação a outros veículos, como automóveis comuns, caminhões etc.?

Fonte: <https://pixabay.com/pt/f1-formula-um-ayrton-senna-1906666/>

A princípio estaríamos tentados a responder rapidamente: um Fórmula 1! Ele tem muita tecnologia, alcança altas velocidades, tem grande potência, estabilidade e poder de aceleração e frenagem, sendo dotado dos recursos eletrônicos mais sofisticados etc.

Ok, mas, que tal colocarmos um Fórmula 1 para andar em uma rua cheia de buracos? Ou na lama?



Figura 1.4: Obras em rodovias buscam garantir condições de uso aos veículos que usualmente circulam nelas. Isso não engloba, por exemplo, automóveis de corrida, que precisam de pistas específicas para tal.

Fonte: http://www.freepik.com/free-vector/construction-man-with-a-shovel_716399.htm#term=buraco&page=2&position=37

Nesse caso, um veículo popular seria muito superior ao de Fórmula 1, não é mesmo? Pois bem, isso nos remete a um conceito muito importante sobre qualidade: qualidade é a adequação ao uso, u, de forma mais aprofundada, com as duas definições apresentadas por Joseph M. Juran (CORRÊA; CORRÊA, 2004, p. 183): “1. Qualidade são aquelas características dos produtos que atendem às necessidades dos clientes e, portanto, promovem a satisfação com o produto; e 2. Qualidade consiste na ausência de deficiências.”

Assim, um carro de Fórmula 1 é adequado para alto desempenho em pistas de corrida, construídas especificamente para tal e nas quais ele deve desenvolver altas velocidades médias, acelerando e freando de

forma bastante intensa durante o período de treinos e, principalmente, durante o tempo de corrida (não mais que duas horas), tendo espaço suficiente para seu único ocupante: o piloto. Já o automóvel popular, de uma forma geral, deve ser econômico, apresentar relativo conforto aos seus ocupantes, geralmente quatro ou cinco (ou seja, pode ser utilizado durante algumas horas todos os dias), ser capaz de resistir, dentro de certos limites, a irregularidades no piso, bem como condições climáticas adversas. Deve, também, ter espaço suficiente para alguma bagagem, estepe etc., algo que é impensável em um carro de Fórmula 1.

Outro estudioso, David A. Garvin, expandiu esse conceito, estabelecendo que a qualidade é composta por oito dimensões (CORRÊA; CORRÊA, 2004; MUNIZ Jr., 2010):

1. Desempenho (*Performance*): características primárias, operacionais de um produto. Para um automóvel seria, por exemplo, aceleração, velocidade final, nível de conforto, enquanto para um aparelho de som, seria sua potência e fidelidade etc.;
2. Características acessórias (*Features*): são os adicionais, os detalhes, o supérfluo que valoriza o produto. Por exemplo, a capacidade extra de memória em um computador ou o *drink* grátis no voo de carreira, o volante regulável no automóvel etc.;
3. Confiabilidade (*Reliability*): reflete a probabilidade de o produto falhar em determinado período de tempo. Um produto com reputação confiável obtém boa vantagem competitiva. Por exemplo, a constante operação de um provedor de Internet;
4. Conformidade (*Conformance*): diz respeito a quão próximo da especificação (ou, implicitamente, da expectativa do cliente) um produto ou serviço se comporta. É possível, que, nesta dimensão, um Fórmula 1 e um automóvel popular tenham o mesmo nível de qualidade;
5. Durabilidade (*Durability*): é a medida da vida do produto, sua resistência ao uso, bastante ligada à confiabilidade e muito valorizada em diversos tipos de produtos;
6. Atendimento (*Serviceability*): refere-se à velocidade e eficiência para sanar um problema. Por exemplo, rapidez na manutenção e competência nos serviços de pós-vendas. Os consumidores não estão apenas preocupados com a eventual quebra do produto, mas também com o tempo decorrido entre o problema e a solução;

7. Aparência (*Aesthetics*): dimensão bastante subjetiva, relativa à maneira como o consumidor enxerga e percebe o produto, o que se sente com ele, qual o seu som, sabor ou cheiro, aparência do ambiente, limpeza etc. e
8. Qualidade percebida (*Perceived quality*): é a mais subjetiva das dimensões e associa-se a uma série de fatores combinados – forma de tratamento, aparência, cortesia, flexibilidade para alterações, robustez, tradição, publicidade, marca, reputação. É aquela dimensão que se manifesta por meio da associação de diversas delas, levando a uma percepção do cliente sobre o produto ou serviço como um todo.

Observe, então, que o conceito de qualidade é bastante amplo, mas que, invariavelmente, está relacionado a atender ou superar as expectativas em diversos sentidos. Mas, há um problema...

Todo componente, máquina ou equipamento, irá falhar em algum momento: peças se desgastam com o uso, materiais se deterioram com o tempo, conjuntos montados se soltam, materiais expostos são contaminados por agentes diversos ou se oxidam etc., fazendo com que peças e máquinas deixem de cumprir adequadamente suas funções. Um pneu que fure, por exemplo, impede que o veículo possa transportar pessoas e cargas.

Falhas podem acarretar comprometimentos significativos para a imagem institucional das empresas, principalmente se incluírem aspectos de segurança pessoal e patrimonial e de meio ambiente (WUTTKE; SELLITTO, 2008).

Nesse sentido, as falhas que surgem podem se caracterizar pela total incapacidade de a peça/equipamento exercer sua função (por exemplo, quando há a queima de uma lâmpada) ou pela incapacidade parcial, isto é, quando a função ocorre, mas com um desempenho abaixo do esperado (por exemplo, uma geladeira que, apesar de estar funcionando, não consegue manter a temperatura fria que se espera em seu interior por conta de má vedação ou vazamento no compressor).

Outro aspecto a ser analisado diz respeito ao componente ou equipamento que venha a apresentar as falhas. Ele pode ser reparável, como no exemplo do pneu que fura, ou irreparável, como no caso de uma lâmpada queimada.

Isso significa “ausência de qualidade”? Será que qualidade é algo transitório, ou seja, passa-se da situação de qualidade para uma de não qualidade? Na realidade, é preciso diferenciar a qualidade como um

todo – que é algo bastante amplo e sujeito a diferentes interpretações – do conceito de confiabilidade, que é mais específico.

Conceitos básicos relacionados à confiabilidade

Devemos associar a ausência de tais falhas ao conceito de confiabilidade, ou seja, uma peça ou equipamento que não falhe é confiável, isto é, podemos contar com ele para exercer as funções a que se destina. No entanto, se como citado anteriormente, toda peça ou equipamento apresentará falhas em algum momento, seria correto dizer que não existe confiabilidade? Certamente esse não é o caso...

O conceito de confiabilidade precisa, então, incorporar a noção de tempo, ou seja, a ausência de falhas ao longo de determinado período de tempo. Mas, ainda assim, há pouca aplicação prática em sabermos se alguma coisa falhou ou não em determinado período de tempo: as decisões empresariais referentes às ações de manutenção e garantia de produtos e serviços, por exemplo, lidam com expectativas futuras, ou seja, por quanto tempo se espera que as falhas não ocorram. Lidamos, então, com probabilidades.

Fogliatto e Ribeiro (2009, p. 2) apresentam a definição de confiabilidade dada por Lawrence M. Leemis em seu livro *Reliability: Probabilistic Models and Statistical Methods*, de 2009: “A confiabilidade de um item corresponde à sua probabilidade de desempenhar adequadamente o seu propósito especificado, por um determinado período de tempo e sob condições ambientais predeterminadas” (grifo nosso).

Observem que o denominado “propósito especificado” está relacionado ao uso, como uma lâmpada que deve iluminar e uma geladeira que deve resfriar o que estiver em seu interior. Um aspecto importante a ser considerado é, então, o uso previsto. Por exemplo, como discutimos anteriormente, um automóvel popular deve ser capaz de transportar pessoas e alguma bagagem, sendo, também econômico; um Fórmula 1 deve ser rápido, potente e estável, ao passo que um caminhão deve ser capaz de transportar um volume de carga bem maior que um automóvel.

Já o “período de tempo”, na definição de confiabilidade, estabelece a vida esperada. Por exemplo, as lâmpadas incandescentes (que não estão mais em uso) tinham uma vida esperada de 1.000 horas, enquanto as lâmpadas de *led* podem chegar a mais de 50.000 horas (SANTA RITA, 2012).

O tempo relacionado ao uso, entretanto, pode ser estabelecido em diferentes unidades. Por exemplo: “Pneus de boa qualidade tem uma quilometragem de vida útil esperada de 60.000 quilômetros” (CARRO DE GARAGEM, s.d.). Dessa forma, conforme Siqueira (2005), a análise de confiabilidade foca na probabilidade de que o item sobreviva a um dado intervalo (de tempo, ciclo, distância etc.).

A incorporação da variável “tempo” na noção de confiabilidade é um elemento chave na sua diferenciação da qualidade estática, pontual àquela que, por exemplo, é avaliada por inspetores de qualidade em uma fábrica: nesse caso há uma verificação de componentes ou conjuntos, os quais podem estar de acordo com a especificação no momento em que é executada a inspeção. Não há qualquer análise sobre eventuais falhas que possam ocorrer no futuro (LAFRAIA, 2014).

Quanto às “condições ambientais predeterminadas”, também presente na definição de confiabilidade, podemos exemplificar com o uso específico: uma lâmpada, se usada debaixo d’água, caso não seja específica para esse uso, não vai durar as milhares de horas previstas. Também quanto ao uso e à forma como ele afeta a confiabilidade, observe as considerações de um fabricante de pneus (GOODYEAR, s.d.):

A pressão de ar é um fator primordial na vida de um pneu. É o que mais afeta o desgaste do pneu e, consequentemente, reduz sua vida útil [...] Para se obter o máximo de rendimentos de seus pneus, efetue um rodízio a cada 5.000 km. O rodízio serve para compensar as diferenças de desgastes, permitindo um aumento de quilometragem e eficiência [...] Os hábitos e costumes de cada motorista têm grande influência no desgaste e na durabilidade dos pneus do seu carro [...] Evite freadas ou arrancadas bruscas. Essa prática favorece o desgaste irregular e acelerado da banda de rodagem.

Perceba como tais recomendações deixam claro que o ambiente e as condições e uso afetam diretamente a vida útil e, consequentemente, a confiabilidade de determinado item, corroborando com a definição de confiabilidade apresentada por Leemis (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009).

Os estudos sobre confiabilidade são de vital importância para o projeto de produtos e processos, garantia e assistência técnica de produtos e serviços, análise de riscos patrimoniais e pessoais, e instalações industriais e uso de máquinas e equipamentos.

Normas

Como objeto de estudo e ciência, a confiabilidade conta com normas nacionais e internacionais. Você encontra a seguir as principais, além de algumas referentes a temas correlatos:

Norma
ABNT NBR ISO 20815:2017 Indústrias de petróleo, petroquímica e gás natural - Garantia da produção e gestão da confiabilidade.
ABNT NBR IEC 62660-2:2015 Células de lítio-íon secundárias para propulsão de veículos elétricos rodoviários . Parte 2: Ensaios de confiabilidade e abuso.
ABNT NBR ISO 14224:2011 Indústrias de petróleo e gás natural - Coleta e intercâmbio de dados de confiabilidade e manutenção para equipamentos.
ABNT NBR IEC 60749-30:2011 Dispositivos semicondutores - Métodos de ensaios mecânicos e climáticos. Parte 30: Pré-condicionamento de dispositivos de montagem em superfície não herméticos, antes de ensaios de confiabilidade.
ABNT NBR 5462:1994 Confiabilidade e manutenibilidade.
ABNT NBR ISO 19973-1:2012 Sistemas pneumáticos - Determinação da confiança nos componentes por meio de ensaios. Parte 1: Procedimentos gerais.
ABNT NBR ISO 19973-2:2012 Sistemas pneumáticos - Determinação da confiança nos componentes por meio de ensaios. Parte 2: Válvulas de controle direcionais.
ISO 14224:2016 <i>Petroleum, petrochemical and natural gas industries -- Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment.</i>
ISO 19973-2:2015 <i>Pneumatic fluid power - Assessment of component reliability by testing. Part 2: Directional control valves.</i>

ISO 19973-3:2015

Pneumatic fluid power - Assessment of component reliability by testing-- Part 3: Cylinders with piston rod.

ISO 19973-5:2015

Pneumatic fluid power - Assessment of component reliability by testing - Part 5: Non-return valves, shuttle valves, dual pressure valves (AND function), one-way adjustable flow control valves, quick-exhaust valves.

ISO 19973-1:2015

Pneumatic fluid power - Assessment of component reliability by testing - Part 1: General procedures.

ISO 2394:2015

General principles on reliability for structures.

ISO 19973-4:2014

Pneumatic fluid power - Assessment of component reliability by testing- Part 4: Pressure regulators.

ISO/TR 12489:2013

*Petroleum, petrochemical and natural gas industries
- Reliability modelling and calculation of safety systems.*

ISO/TR 15801:2009

*Document management - Information stored electronically --
Recommendations for trustworthiness and reliability.*

ISO/TR 19972-1:2009

Hydraulic fluid power - Methods to assess the reliability of hydraulic components - Part 1: General procedures and calculation method.

ISO 20815:2008

Petroleum, petrochemical and natural gas industries - Production assurance and reliability management.

ISO 16708:2006

Petroleum and natural gas industries - Pipeline transportation systems - Reliability-based limit state methods.

ISO 14461-2:2005

Milk and milk products - Quality control in microbiological laboratories- - Part 2: Determination of the reliability of colony counts of parallel plates and subsequent dilution steps.

ISO 3977-9:1999

Gas turbines - Procurement - Part 9: Reliability, availability, maintainability and safety.

ISO 2382-14:1997

Information technology - Vocabulary -- Part 14: Reliability, maintainability and availability.

ISO 5843-8:1988

Aerospace - List of equivalent terms - Part 8: Aircraft reliability.

ISO 8930:1987

General principles on reliability for structures - List of equivalent terms.

ISO 7385:1983

Nuclear power plants -- Guidelines to ensure quality of collected data on reliability.

ISO 6527:1982

Nuclear power plants - Reliability data exchange - General guidelines.

ISO 12510:2004

Earth-moving machinery - Operation and maintenance - Maintainability guidelines.

ISO 8107:1993

Nuclear power plants - Maintainability - Terminology.

ISO 8927:1991

Earth-moving machinery - Machine availability -- Vocabulary.

JIS C 2162:2010

Test method of long-term reliability of gate insulator for SiC devices at high temperature.

NF EN 61703:2017

Mathematical expressions for reliability, availability, maintainability and maintenance support terms.

NF EN 61078:2017

Reliability block diagrams.

NF EN 16602-70-30:2016

Space product assurance -Wire wrapping of high-reliability electrical connections.

NF EN 62572-3:2014

Composants et dispositifs actifs en fibres optiques - Normes de fiabilité - Partie 3 : modules laser utilisations pour les télécommunications.

NF EN 61124:2012

Essais de fiabilité. Plans d'essais de conformité d'un taux de défaillance constant et d'une intensité de défaillance constante.

NF EN 62660-2:2012

Éléments d'accumulateurs lithium-ion pour la propulsion des véhicules routiers électriques. Partie 2 : essais de fiabilité et de traitement abusif.

NF EN ISO 14224:2012

Industries du pétrole, de la pétrochimie et du gaz naturel. Recueil et échange de données de fiabilité et de maintenance des équipements.

NF EN ISO 14224:2012

Petroleum, petrochemical and natural gas industries - Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment.

NF EN 60749-30/A1:2011

Dispositifs à semiconducteurs. Méthodes d'essais mécaniques et climatiques. Partie 30 : préconditionnement des composants pour montage en surface non hermétiques avant les essais de fiabilité.

NF EN 61709:2011

Composants électriques. Fiabilité. Conditions de référence pour les taux de défaillance et modèles de contraintes pour la conversion.

NF EN 61810-2:2011

Relais électromécaniques élémentaires. Partie 2 : fiabilité.

NF EN 61810-2-1:2011

Relais électromécaniques élémentaires. Partie 2-1 : fiabilité - Procédure de vérification des valeurs de B10.

NF EN 62343-2:2011

Modules dynamiques. Partie 2 : qualification de fiabilité.

UTE C80-811:2011

Méthodologie de fiabilité pour les systèmes électroniques. Guide FIDES 2009 Édition A.

UTE C80-811:2011

Reliability Methodology for Electronic Systems - FIDES Guide 2009 issue A.

NF EN 61747-5-3:2010

Dispositifs d'affichage à cristaux liquides. Partie 5-3 : méthode d'essais d'environnement, d'endurance et mécaniques - Résistance et fiabilité du verre.

NF EN ISO 20815:2010

Petroleum, petrochemical and natural gas industries - Production assurance and reliability management

NF EN ISO 20815:2010

Industries du pétrole, de la pétrochimie et du gaz naturel. Assurance de la production et management de la fiabilité.

NF EN 60300-3-11:2010

Gestion de la sûreté de fonctionnement. Partie 3-11 : guide d'application - Maintenance basée sur la fiabilité.

NF EN 62059-31-1:2009

Équipements de comptage de l'électricité. Sûreté de fonctionnement. Partie 31-1 : essais de fiabilité accélérés - Température et humidité élevées.

NF EN 62429:2008

Croissance de fiabilité. Essais de contraintes pour révéler les défaillances précoces d'un système complexe et unique.

NF EN 62308:2007

Fiabilité de l'équipement. Méthodes d'évaluation de la fiabilité.

NF EN 61163-1:2007

Déverminage sous contraintes. Partie 1 : assemblages réparables fabriqués en lots.

NF EN ISO 16708:2007

Petroleum and natural gas industries - Pipeline transportation systems - Reliability-based limit state methods.

NF EN 60812:2006

Techniques d'analyses de la fiabilité du système. Procédure d'analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE).

NF EN 61078:2006

Techniques d'analyse pour la sûreté de fonctionnement. Bloc-diagramme de fiabilité et méthodes booléennes.

NF EN 62059-41:2006

Équipements de comptage de l'électricité. Sûreté de fonctionnement. Partie 41 : prévision de fiabilité.

NF EN 50390:2004

Space product assurance - The manual soldering of high-reliability electrical connections.

NF EN 61086-3-1:2004

Revêtements appliqués sur les cartes de câblage imprimées (revêtements enrobants). Partie 3 -1 : spécifications pour matériaux particuliers - Revêtement à usage général (classe 1), pour hautes performances (classe 2) et pour l'aérospatiale (classe 3).

NF EN 61164:2004

Croissance de la fiabilité. Tests et méthodes d'estimation statistiques.

NF EN 62005-7:2004

Fiabilité des dispositifs d'interconnexion et des composants optiques passifs à fibres optiques. Partie 7 : modélisation de contrainte de durée de vie.

NF EN 62211:2004

Composants inductifs. Gestion de la fiabilité.

NF EN 13631-7:2004

Explosifs à usage civil. Explosifs. Partie 7 : détermination de la sécurité et de la fiabilité aux températures extrêmes.

NF EN 13631-7:2004

Explosives for civil uses - High explosives - Part 7 : determination of safety and reliability at extreme temperatures

NF EN 61014:2003

Programmes de croissance de fiabilité.

NF EN 61291-5-2:2003

Amplificateurs optiques. Partie 5-2 : spécification de qualification - Qualification de fiabilité pour amplificateurs à fibres optiques.

NF EN 13630-7:2003

Explosives for civil uses - Detonating cords and safety fuses - Part 7 : determination of reliability of initiation of detonating cords

NF EN 13630-7:2003

Explosifs à usage civil. Cordeaux détonants et mèches de sûreté. Partie 7 : détermination de la fiabilité de l'amorçage des cordeaux détonants.

NF EN 61703:2002

Expressions mathématiques pour les termes de fiabilité, de disponibilité, de maintenabilité et de logistique de maintenance

NF EN 62005-3:2001

Fiabilité des dispositifs d'interconnexion et des composants passifs à fibres optiques. Partie 3 : essais significatifs pour l'évaluation des modes et mécanismes de défaillance des composants passifs.

NF EN 62005-1:2001

Fiabilité des dispositifs d'interconnexion et des composants passifs à fibres optiques. Partie 1 : guide d'introduction et définitions.

NF EN 62005-2:2001

Fiabilité des dispositifs d'interconnexion et des composants passifs à fibres optiques. Partie 2 : évaluation quantitative de la fiabilité en fonction d'essais de vieillissement accélérés - Température et humidité, régimes continus.

NF EN 62005-4:2000

Fiabilité des dispositifs d'interconnexion et des composants optiques passifs à fibres optiques. Partie 4 : sélection des produits.

NF ISO 3977-9:2000

Turbines à gaz. Spécifications pour l'acquisition. Partie 9 : fiabilité, disponibilité, maintenance et sécurité.

NF ISO 3977-9:2000

Gas turbines - Procurement - Part 9 : reliability, availability, maintainability and safety.

UTE C20-300-3-7:2000

Gestion de la sûreté de fonctionnement. Partie 3 : guide d'application - Section 7 : déverminage sous contraintes du matériel électronique.

NF EN 50126-1:2000

Applications ferroviaires. Spécification et démonstration de la fiabilité, de la disponibilité, de la maintenabilité et de la sécurité (FDMS). Partie 1 : exigences de base et procédés génériques.

NF EN 61751:1998

Modules laser utilisés pour les télécommunications. Évaluation de la fiabilité

FD ISO/CEI 2382-14:1998

Information technology. Vocabulary. Part 14 : reliability, maintainability and availability.

FD ISO/CEI 2382-14:1998

Technologies de l'information. Vocabulaire.

UTE C80-804:1995

Composants électroniques. Document guide : application de la "EN 29000" à la fiabilité des composants électroniques.

UTE C20-316:1982

Guide pour l'inclusion de clauses de fiabilité dans les spécifications de composants (ou pièces détachées) pour l'équipement électronique.

UTE C20-315:1981

Présentation des données de fiabilité pour les composants (ou pièces détachées) électroniques.

MIL-HDBK-218R.

Reliability prediction of electronic equipment. Department of Defense - United States of America. Washington, 1991.

MIL-HDBK-781.

A Handbook for Reliability Test Methods, Plans, and Environments for Engineering, Development Qualification, and Production. Department of Defense - United States of America. Washington, 1996.

MIL-STD-1629A.

Procedures for performing a failure mode, effects and criticality analysis. Department of Defense - United States of America. Washington, 1980.

SAE. Aerospace AS 9102.

Aerospace First Article Inspection Requirement. Rev. A, 2004.

Histórico de confiabilidade

Fogliatto e Ribeiro (2009), Lafraia (2014), Marques (2004), Rocha (2005) e Siqueira (2014) apresentam um histórico evolutivo da Engenharia de Confiabilidade e suas aplicações.

De acordo com os autores, os estudos iniciais ocorreram ao fim da Primeira Guerra Mundial (1914-1918), ao compararem-se as taxas de acidentes por hora de voo entre aviões com um, dois e quatro motores. No final dos anos 1930, foram publicadas as primeiras pesquisas sobre o tempo de vida de materiais submetidos à fadiga e, em 1939, Waloddi Weibull (1887-1979) apresentou a distribuição de probabilidades em testes de vida de rolamentos.

Nos anos 1940, surgiram as primeiras formulações matemáticas relacionadas ao tema, sendo que o engenheiro e aviador alemão Robert Lusser (1899-1969), que trabalhou no desenvolvimento de naves e mísseis na Segunda Guerra Mundial (1939-1945), transferiu-se para os Estados Unidos em 1948 e desenvolveu estudos sobre confiabilidade, em especial, a probabilidade de falha envolvendo componentes em série (Lei de Lusser).

O crescimento da indústria aeroespacial e eletrônica e o surgimento da indústria nuclear deram grande impulso às pesquisas sobre confiabilidade a partir dos anos 1950, acelerada nos anos 1960 pela corrida espacial. Nesse período surgiu, também, ainda de forma embrionária, a aplicação da confiabilidade na manutenção industrial, por meio da **manutenção preditiva**.

Manutenção preditiva

tipo de manutenção que busca prever o estado futuro dos equipamentos mediante a observação (monitoramento) de suas condições, como por exemplo, nível de ruído ou vibração de um motor ou rolamento. Quando há uma mudança na sua condição de operação, significa que algo no funcionamento normal foi alterado. Assim, busca-se determinar o momento de atuação necessária antes da ocorrência de falha, permitindo a operação contínua do equipamento pelo maior tempo possível.

Os anos 1960 foram profícuos no desenvolvimento de modelos de confiabilidade, com o desenvolvimento da análise da árvore de falhas na Bell Laboratories, em 1961, a criação da Associação dos Engenheiros de Confiabilidade e do primeiro periódico voltado à publicação de estudos e pesquisas na área, o IEEE – Transactions on Reliability, em 1963.

Na década de 1970, ainda impulsionada pela corrida espacial, pelo crescimento da indústria nuclear e pela crescente automação nos processos produtivos e na busca da certificação para aeronaves pela Federal Aviation Authority – FAA, nos Estados Unidos, a Engenharia de Confiabilidade expandiu-se, passando a ser utilizada em áreas diversas, como sistemas de telecomunicações, defesa, sistemas aeroviários etc., chegando, nos anos 1980, à área de *software*, com a criação, em 1984, do SEI – Software Engineering Institute, sediado na CMU – Carnegie Mellon University – em Pittsburgh, Pennsylvania, Estados Unidos.

Atividade 1

Atende aos objetivos 1 e 3

1. Assinale a alternativa correta referente às falhas em um componente, máquina ou equipamento:
 - (a) Nunca ocorrem, devido à confiabilidade.
 - (b) São consideradas quando há um desempenho abaixo do esperado.

(c) São consideradas quando há total incapacidade da peça/equipamento de exercer sua função.

(d) São consideradas quando há um desempenho abaixo do esperado ou quando há total incapacidade da peça/equipamento de exercer sua função.

2. Um produto com alto grau de confiabilidade é aquele...

(a) que não falha nunca.

(b) que não falha dentro de um período de tempo.

(c) que tem baixa probabilidade de falhas dentro de um período de tempo.

(d) que tem boa aceitação dos consumidores.

3. Podemos mensurar o grau de confiabilidade de um produto ao analisarmos um lote dele e...

(a) inspecionamos uma amostra e não encontramos defeitos.

(b) inspecionamos todos os produtos e não encontramos defeitos.

(c) submetemos uma amostra a testes de uso durante determinado tempo e não temos qualquer falha.

(d) submetemos uma amostra a testes de uso durante determinado tempo e calculamos a taxa de falhas por unidade de tempo.

Resposta comentada

1. Letra d. São consideradas falhas consideradas quando há um desempenho abaixo do esperado ou quando há total incapacidade da peça/equipamento de exercer sua função.

2. Letra c. A confiabilidade é definida como a probabilidade de não apresentar falhas durante determinado tempo.

3. Letra d. A inspeção é uma mensuração estática, do tipo passa-não passa, enquanto a confiabilidade é a probabilidade de não falhar durante determinado tempo. Consequentemente, o grau de confiabilidade é dado pela taxa de falhas que ocorrem durante determinado tempo .

Atividade 2

Atende aos objetivos 2 e 3

Analise a situação apresentada a seguir, reflita sobre ela e procure oferecer potenciais soluções:

Você concluiu seu curso de Engenharia de Produção e assumiu o negócio de sua família, uma marcenaria que funciona com bastante sucesso há três gerações. Resolveu, então, modernizá-la e, para isso, visitou algumas feiras de negócio.

Lá você tomou conhecimento da existência de uma série de máquinas bem mais sofisticadas que as que são usadas atualmente na marcenaria da sua família. Analisou o atual processo produtivo e percebeu ser possível aumentar a produtividade em mais de 100% pela substituição das máquinas, o que permitiria que o retorno do investimento ocorresse em pouco mais de dois anos.

No entanto, a empresa não dispõe de todo o capital necessário para tal investimento, e o conselho da empresa, composto pelos familiares, tem receio de recorrer a um financiamento tão volumoso.

Concordaram, no entanto, que a modernização é necessária para a continuidade do negócio e sugeriram que ela ocorresse em fases, ou seja, a substituição dos equipamentos ocorreria conforme os recursos financeiros da empresa assim o permitissem.

Satisfeito com a saída encontrada, você iniciou o processo de substituição, adquirindo inicialmente as grandes serras que cortam as toras: elas seriam usadas em conjunto com o maquinário atual, até que houvesse folga no orçamento para substituir, também, serras menores, plainas, seccionadoras, fresadoras etc. ao longo dos próximos meses. Com isso, você imaginou que já haveria um aumento na produtividade, o que aceleraria a aquisição dos demais equipamentos.

Poém as coisas não funcionaram bem...

A produtividade caiu e os móveis estavam levando muito mais tempo para serem produzidos, fazendo com que houvesse redução de receita e gerando reclamações dos clientes pelos constantes atrasos nas entregas.

No início você imaginou que seria somente um problema temporário de adaptação. Talvez o tempo necessário para a adaptação da mão de obra ao novo maquinário, mas percebeu ser algo mais sério, inclusive gerando reclamações dos trabalhadores. As máquinas novas produziam

a uma velocidade muito grande e as demais máquinas não estavam conseguindo acompanhar o ritmo de produção.

As paradas para manutenção tornaram-se mais frequentes, comprometendo todo o ciclo produtivo.

O que pode ter acontecido e como reverter a situação, salvando a empresa e garantindo o sucesso no mercado?

Resposta comentada

Pela descrição, pode ser que exista alguma incompatibilidade entre as novas máquinas e o maquinário antigo. Provavelmente, a maior capacidade e velocidade de produção das novas máquinas alteraram significativamente o ritmo de trabalho do maquinário antigo, comprometendo sua capacidade de se manter em funcionamento, fazendo com que as quebras e o mau funcionamento se tornassem mais frequentes.

Ou seja, a confiabilidade do maquinário antigo foi negativamente influenciada, comprometendo todo o ciclo produtivo. Isso explicaria a queda na produtividade, associada ao desgaste e à fadiga dos trabalhadores.

Seria importante analisar as mudanças ocorridas no processo produtivo a partir da incorporação das novas máquinas: foi somente o ritmo de produção que se tornou mais intenso? As dimensões das placas serradas alteraram-se, causando uma sobrecarga no maquinário? Passou a haver alguma variação no sistema de distribuição de energia elétrica? Enfim, quais fatores comprometeram as condições de uso do maquinário, seja no propósito ou nas condições, deteriorando seu desempenho e, consequentemente, reduzindo a confiabilidade nele?

Uma vez compreendido o que aconteceu, onde as condições foram inapropriadas, devem ser feitas adaptações (reduzir o ritmo? Alterar espessuras? Incorporar estabilizadores de voltagem?) até que se restabeleçam, ao menos, as condições iniciais, e o plano de modernização possa avançar.

Conclusão

A compreensão dos conceitos sobre confiabilidade permite aos engenheiros e gestores planejar, de forma mais adequada, suas ações sobre o processo produtivo, seja sobre capacidade e velocidade de produção, atendimento a demandas mercadológicas e contratuais, planejamento de paradas de manutenção etc., sendo uma área de conhecimento das mais relevantes para a competitividade das indústrias e serviços.

Resumo

A qualidade apresenta diversas dimensões: desempenho, características acessórias, confiabilidade, conformidade, durabilidade, atendimento, aparência e qualidade percebida.

Diferentemente da qualidade pontual e estática do tipo “passa - não passa”, a confiabilidade pode ser definida como a probabilidade de um componente, equipamento ou sistema funcionar de acordo com o que é esperado, sem falhas, durante determinado período de tempo.

A confiabilidade, ou seja, a probabilidade de funcionar sem falhas, pode ser afetada pelas condições de uso. Há diversas normas nacionais e internacionais referentes à confiabilidade.

Seu início ocorreu ao final da Primeira Guerra Mundial e vem se expandindo desde então, em áreas diversas: defesa, energia, transportes, manutenção etc.

Leitura recomendada

SELLITTO, Miguel Afonso. *Formulação estratégica da manutenção industrial com base na confiabilidade dos equipamentos*. Prod., São Paulo, v. 15, n. 1, p. 44-59, jan./apr. 2005. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-65132005000100005&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 18 jan. 2017.

Informações sobre a próxima aula

Na próxima aula, daremos início ao estudo dos índices (ou indicadores) de confiabilidade e manutenibilidade, ou seja, medidas que nos permitem mensurar o desempenho de componentes, máquinas, equipamentos e sistemas.

Referências Bibliográficas

CARRO DE GARAGEM. *Qual a vida útil de um pneu?* Disponível em: <<https://www.carrodegaragem.com/qual-vida-util-pneu/>>. Acesso em: 05 jan. 2017.

CORRÊA, Henrique L.; CORRÊA, Carlos. A. *Administração de produção e operações: manufatura e serviços – uma abordagem estratégica*. São Paulo: Atlas, 2004. 690 p.

FOGLIATTO, Flávio Sanson; RIBEIRO, José Luis Duarte. *Confiabilidade e Manutenção Industrial*. São Paulo: Elsevier, 2009, 288 p.

GOODYEAR. *Vida Útil de um Pneu*. Disponível em: <<http://www.goodyear.com.br/pneus-passeio/conservando-pneu/vida-util-pneu/>>. Acesso em: 05 jan. 2017

LAFFRAIA, João Ricardo Barusso. *Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade*. 3. ed. Rio de Janeiro: QualityMark, 2001. 388 p.

LEEMIS, Lawrence Mark. *Reliability: Probabilistic Models and Statistical Methods* 2nd ed. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 2009. 384 p.

MARQUES, Denilson. *Metodologia para ajuste e comparação de modelos de confiabilidade*. 2004. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2004.

MUNIZ JUNIOR, Jorge. Qualidade. In: MUNIZ JUNIOR, J. *et al. Administração da Produção*. Curitiba: IESDE, 2010. 320 p.

ROCHA, Henrique Martins. *Fatores Críticos de Sucesso do Start up de veículos e a Qualidade (CMMI) do desenvolvimento de Produtos no Sul Fluminense*. 2005, 353f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Gestão). Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2005.

SANTA RITA. *As vantagens da substituição de lâmpadas tradicionais por LED*. Disponível em: <<http://www.santarita.com.br/as-vantagens-da-substituicao-de-lampadas-tradicionais-por-led/>>. Acesso em: 05 jan. 2017.

SIQUEIRA, Iony Patriota. *Manutenção Centrada na Confiabilidade - Manual de Implementação*. Rio de Janeiro: QualityMark, 2005. 408 p.

WUTTKE, Régis André; SELLITTO, Miguel Afonso. Cálculo da disponibilidade e da posição na curva da banheira de uma válvula de processo petroquímico. *Produção Online*. v. 8, n. 4, , 2008. Disponível em: <https://www.producaoonline.org.br/rpo/article/view/134>. Acesso em: 14 mai. 2018.

Aula 2

Índices de confiabilidade e
manutenabilidade – parte 1

Metas

Apresentar os conceitos básicos referentes aos índices de confiabilidade e manutenabilidade, bem como diferenciar os conceitos de tempo médio entre falhas e tempo médio até falhar.

Objetivos

Esperamos que, ao final desta aula, você seja capaz de:

1. discutir a importância das medidas de desempenho no âmbito da confiabilidade;
2. explicar a diferença entre tempo médio entre falhas e tempo médio até falhar;
3. identificar situações práticas para utilização dos índices de confiabilidade.

Pré-requisitos

Ser capaz de expressar o conceito de confiabilidade, apresentado na Aula 1.

If you can't measure it, you can't manage it

(tradução: Se você não consegue medir,
você não consegue gerenciar)

– frase de autoria desconhecida, erroneamente
atribuída a W. Edwards Deming (1900-1993)

Mesmo não sendo uma frase de Deming, ela contém uma lógica inquestionável: sem medir o desempenho de um atleta, de um negócio ou de um equipamento não há como saber se ele está indo bem ou não. E, se não sabemos como está indo, como tomar decisões para manutenção ou melhoria do desempenho? É importante definir o que medir para podermos agir de forma adequada. É isso que você estudará nesta aula.

Bons estudos!



Figura 2.1: Instrumentos de medição. Por meio do uso deles, podemos verificar se peças e componentes têm medidas adequadas, de tal forma que possam funcionar conforme previsto. Sem a medição, tal tipo de avaliação não é possível.

Fonte: <https://pixabay.com/pt/instrumentos-medi%C3%A7%C3%A3o-medida-860912/>

Introdução

Você é o responsável por uma unidade de produção de canetas esferográficas, que funciona ininterruptamente no regime 24 x 7 (24 horas por dia, 7 dias por semana), e há um contrato para atender uma demanda de 20.000 canetas por semana.



Figura 2.2: Fábrica. As unidades fabris precisam ter uma estrutura física (máquinas, equipamentos, construções, instalações de energia, água etc.), bem como de pessoal (engenheiros, técnicos, operários, inspetores, movimentadores de material, pessoal de manutenção e administrativo, gestores etc.) para produzir bens diversos, abastecendo o mercado e atendendo necessidades de clientes.

Fonte: <http://pt.freeimages.com/photo/industry-1164148>

Sabendo que o tempo de produção de cada caneta é de 30 segundos, você fez uma rápida conta: 0,5 minuto por caneta multiplicado por 60 significa que 120 canetas seriam produzidas a cada hora. Produzindo 24 horas por dia, seriam produzidas 2.880 canetas por dia e, consequentemente, poderiam ser produzidas até 20.160 canetas por semana (2.880×7). Assim, não haveria problema em fechar o contrato nessas condições.



Figura 2.3: Análise de negócio. Além da estrutura física e de pessoal, as empresas precisam utilizar métodos, processos e ferramentas que suportem as decisões necessárias à gestão do negócio. Isso inclui procedimentos de trabalho, ferramentas de análise e cálculo, planilhas e sistemas integrados de gestão.

Fonte: http://www.freepik.com/free-photo/close-up-businessmen-working-together-with-diagrams_854339.htm#term=esferografica&page=1&position=25

Entretanto, relendo o conteúdo da Aula 1, um trecho chama atenção: “Todo componente, máquina ou equipamento irá falhar em algum momento: peças se desgastam com o uso, materiais se deterioram com o tempo, conjuntos montados se soltam, materiais expostos são contaminados por agentes diversos ou se oxidam etc., fazendo com que peças e máquinas deixem de cumprir adequadamente suas funções”.

Se máquinas falharão em algum momento, isso pode acontecer com as máquinas que deveriam trabalhar “24 x 7” e, assim, não seriam produzidas, de fato, 20.160 canetas por semana, o que poderia gerar pesadas multas pela falha nas entregas previstas no contrato. Porém quantas poderiam ser produzidas?

Não há como sabermos antecipadamente, nem como termos valores precisos, mas podemos trabalhar com previsões, ou seja, probabilidades oriundas dos estudos de confiabilidade. Para isso, precisamos estabelecer índices de medidas.

Classificação qualitativa e quantitativa

Os estudos de confiabilidade dividem-se em dois pilares:

- **Análises quantitativas:** voltadas à medição de desempenho de componentes, equipamentos e sistemas, abrangendo a quantidade de falhas e suas frequências de ocorrência, tempo de paradas por falhas, custos e perda de receita envolvidos etc. Utiliza-se a estatística para, baseados em dados históricos, fazerem-se previsões e projeções de desempenho (por exemplo, analisar a garantia de um produto ou estabelecer rotinas de manutenção de máquinas e equipamentos); e
- **Análises qualitativas:** com elas, busca-se compreender os mecanismos das falhas: como e por que elas ocorrem, bem como suas consequências para o sistema. Ou seja, é também possível fazer previsões sobre como as falhas podem ocorrer, mas não de uma forma quantitativa.

Ainda que não sejam excludentes, sendo utilizadas conjuntamente nos estudos de confiabilidade, apresentaremos para você as duas formas separadamente: iniciaremos pela abordagem quantitativa por meio do estudo das medidas de desempenho ligadas à confiabilidade.

Conceitos básicos

Tudo o que precisa ser gerenciado necessita englobar as atividades de planejamento, execução e controle para que se possa aumentar a chance de sucesso e de atingimento dos objetivos traçados (CORRÊA; CORRÊA, 2004). Vemos, então, uma clara semelhança com o método PDCA, desenvolvido nos anos 1930 na Bell Laboratories por Walter Shewhart e disseminada posteriormente por Deming. Trata-se de um processo de melhoria contínua que se baseia na repetição do ciclo de planejamento (P), execução (D), verificação (C) e ação (A), aplicável em qualquer processo ou problema (ANDRADE, 2003).



Figura 2.4: Ciclo PDCA. Trata-se de um ciclo de melhoria contínua, cuja sigla vem das iniciais em inglês: Plan (planejar), Do (fazer, executar), Check (verificar) e Act (agir, atuar).

Fonte: <https://pixabay.com/pt/plano-fazer-sele%C3%A7%C3%A3o-ato-artes-686327/>

A lógica por trás de tal afirmação justifica-se pelo fato de que se faz necessário estabelecer as ações a serem executadas, sua sequência de execução, os recursos necessários para tal (pessoas, máquinas, equipamentos e capital), bem como a calendarização das ações e da necessidade dos recursos envolvidos.

No entanto, tais passos referentes ao planejamento, ainda que necessários, não garantirão que a execução ocorra exatamente conforme o planejado: fatores internos e externos, falhas eventuais, execução inadequada etc. podem causar desvios no andamento das atividades.

Surge, então, a necessidade das atividades de controle, que dizem respeito à comparação, ou seja, comparar os resultados da execução com o que foi planejado. Por exemplo, se uma empresa estabelece um plano de vendas, ela precisa controlar esse processo, ou seja, monitorar as vendas, comparando-as constantemente com o plano, de tal forma que os desvios sejam detectados e as ações pertinentes sejam tomadas

para reverter qualquer tendência desfavorável, de forma que os objetivos da empresa sejam alcançados.

Essa comparação/monitoramento exige, então, a existência de um sistema de medidas, ou seja, um processo sistematizado para coleta, processamento e distribuição das informações referentes ao planejamento e à execução das atividades, suportando, dessa forma, a gestão do negócio.

No âmbito da Engenharia de Confiabilidade, a lógica é exatamente a mesma: precisamos mensurar o desempenho de máquinas, equipamentos e sistemas e isso é feito por meio dos índices (ou indicadores) de confiabilidade e manutenibilidade.

Os índices de confiabilidade (também chamados de indicadores ou parâmetros de confiabilidade) e manutenibilidade compõem a base do que é conhecido como R/A/M (*reliability, availability e maintainability* – confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade), fatores importantes para determinar a capacidade real de produção (HOPP; SPEARMAN, 2013), os quais devem ser analisados conjuntamente.



Figura 2.5: Reliability (Confiabilidade). A palavra tem sua origem em inglês no verbo *to rely*, que pode ser traduzido como depender ou contar com. Assim, uma máquina ou equipamento *reliable* é aquele com o qual podemos contar e confiar, pois ele tem tal característica.

Fonte: <https://pixabay.com/pt/confiabilidade-black-branco-1992960/>

Iniciaremos por dois índices, MTBF e MTTF, que são muito parecidos, diferenciando-se pelo fato de o primeiro aplicar-se a produtos e sistemas reparáveis e o segundo a produtos e sistemas não reparáveis.

Salgado (2008) esclarece a diferença entre eles quando expõe que *sistemas reparáveis* são passíveis de manutenção, ou seja, uma vez detectada uma falha, sua condição operacional pode ser restaurada mediante algum tipo de intervenção ao invés de sua substituição (por exemplo, quando levamos um automóvel para uma oficina ou quando chamamos

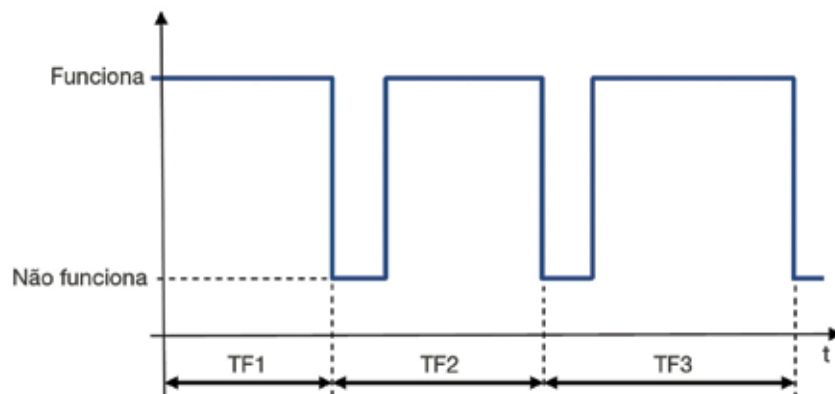
um técnico para reparar uma geladeira que apresenta algum defeito). Já os *sistemas não reparáveis* não são passíveis de manutenção, ou seja, uma vez apresentada uma falha, não podem ter sua função restabelecida, não havendo outra opção além de sua substituição/descarte (por exemplo, quando uma lâmpada queima, não temos como consertá-la: ela é, então, substituída por outra).

MTBF – Tempo médio entre falhas

O MTBF (do inglês *Mean Time Between Failures*: tempo médio entre falhas) é o parâmetro mais comum em confiabilidade. É o tempo médio entre falhas sucessivas de um produto reparável (SILVA et al., 2015). Por exemplo, um motor elétrico com um MTBF de 40.000 horas.

Vamos ver uma representação gráfica do que seria o MTBF:

Gráfico 1:



O gráfico mostra um componente ou sistema em funcionamento e sua situação ao longo do tempo: após um tempo em funcionamento normal, uma falha ocorre. Chamamos de tempo de falha 1 (TF1).

Durante determinado tempo, há o reparo, e o funcionamento volta a se regularizar, permanecendo assim até que venha a falhar novamente: chamamos o intervalo entre a 1ª falha e a próxima de tempo de falha 2 (TF2). O ciclo se repete com novo reparo, funcionamento, até nova falha e assim sucessivamente.

Como você pode ver no gráfico, o tempo entre falhas não é constante e, dessa forma, calcula-se um valor médio do tempo entre as falhas de acordo com a Equação 1:

$$MTBF = \sum_{k=1}^n TF_k / n$$

Sendo:

$TF_k \rightarrow$ tempo entre a k -ésima e a $k+1$ -ésima falha;

$n \rightarrow$ quantidade de falhas.

Caso a coleta de dados sobre as falhas ocorra em mais de um componente ou sistema, calcula-se o valor médio do tempo entre as falhas de acordo com a Equação 2:

$$MTBF = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^n TF_{ki} / n$$

Sendo:

$TF_{ki} \rightarrow$ tempo entre a k -ésima e a $k+1$ -ésima falha do i -ésimo elemento testado;

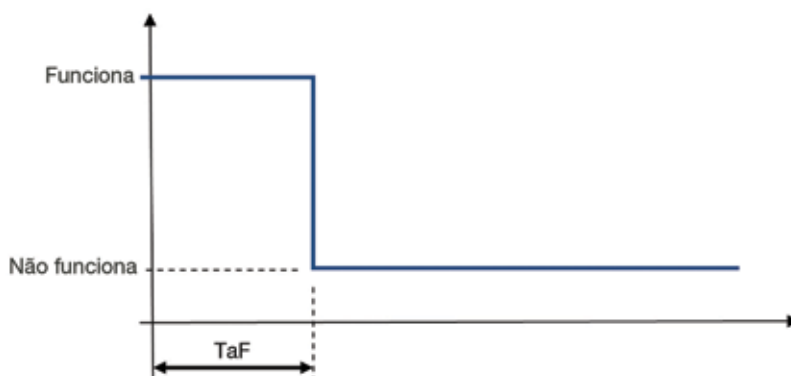
$n \rightarrow$ quantidade total de falhas nos m elementos testados.

MTTF – Tempo médio até falhar

O MTTF (do inglês *Mean Time to Failure*: tempo médio até falhar ou tempo médio até a falha ou tempo médio para falha) é geralmente utilizado para produtos não reparáveis (VACCARO, 1997), medindo o tempo médio até sua falha ou o tempo médio até a primeira falha de um produto reparável. Por exemplo, uma lâmpada de led com um MTTF de 50.000 horas.

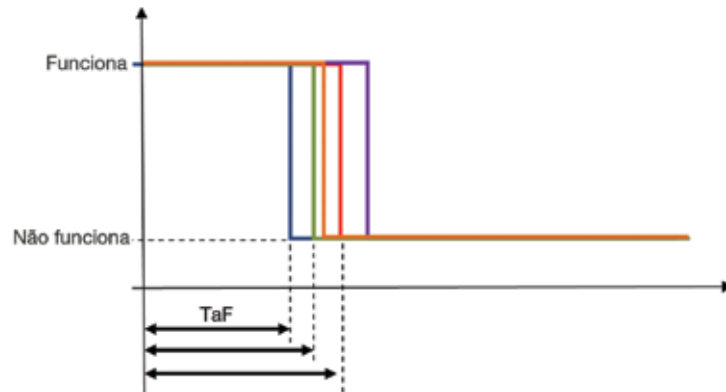
A representação gráfica do MTTF de um único componente ou sistema é mais simples que do o MTBF, pois, como não há reparo, uma vez que ocorra a falha, encerra-se a coleta dos dados, como pode ser visto no gráfico a seguir.

Gráfico 2:



O cálculo do MTTF ocorre, então, mediante a coleta dos tempos de falha de diversos componentes/sistemas, como representado no gráfico a seguir.

Gráfico 3:



Como você pode ver, diferentes componentes/sistemas apresentam diferentes tempos até falhar. O MTTF calculado de acordo com a Equação 3:

$$MTTF = \sum_{k=1}^n TaF_k / Nn$$

Sendo:

$TaF_k \rightarrow$ tempo até a falha do k-ésimo elemento testado;

$n \rightarrow$ quantidade de elementos testados.

Atividade 1

Atende aos objetivos 1, 2 e 3

De forma a auxiliar na fixação dos conceitos apresentados, responda às quatro questões a seguir:

1. Visando atingir os objetivos específicos, o processo de gestão deve utilizar três tipos de atividades. Assinale a alternativa que apresenta a sequência correta de tais atividades.
 - (a) planejamento, execução e controle.
 - (b) execução, controle e planejamento.
 - (c) controle, execução e planejamento.
 - (d) execução, planejamento e controle.

2. Os índices de confiabilidade e manutenibilidade são utilizados nos seguintes tipos de atividades:

I. controle.

II. execução.

III. planejamento.

É correto o que se afirma em:

(a) Somente I.

(b) I e II.

(c) I e III.

(d) II e III.

3. A empresa X testou cinco motores e o histórico dos testes é mostrado na tabela a seguir.

Motor	Horas de teste	Quantidade de falhas
# 1	2.000	3
# 2	3.000	5
# 3	2.000	4
# 4	4.000	6
# 5	1.000	2

Com base nos dados apresentados, assinale a alternativa correta.

(a) A disponibilidade é de 600 horas.

(b) O MTBF é de 600 horas.

(c) O MTTF é de 600 horas.

(d) O MTTR é de 600 horas.

4. A empresa Z testou seis fusíveis com carga máxima e o histórico dos testes é mostrado na tabela a seguir.

Fusível	Horas de teste até falhar
# 1	1.305
# 2	2.124
# 3	1.842
# 4	2.072
# 5	1.220
# 6	1.037

Com base nos dados apresentados, assinale a alternativa correta.

- (a) A disponibilidade é de 1.600 horas.
- (b) O MTBF é de 1.600 horas.
- (c) O MTTF é de 1.600 horas.
- (d) O MTTR é de 1.600 horas.

Resposta comentada

1. A sequência correta é planejamento-execução-controle (alternativa a).
2. Alternativa c. São utilizados no planejamento, para estabelecer metas de desempenho, e no controle, comparando os resultados com as metas planejadas.
3. Alternativa b. Foi um total de 12.000 horas de teste, com 20 falhas. Consequentemente, o tempo médio entre falhas (MTBF) é de $12.000/20 = 600$ horas .
4. Alternativa c. De acordo com o enunciado, o tempo médio até falhar (MTTF) foi de $9.600/6 = 1.600$ horas.

Conclusão

A definição de um sistema de medidas auxilia o processo de gestão, pois os objetivos qualitativos são definidos – ou seja, planeja-se o que se quer atingir –, quantificam-se as metas – ou seja, torna os objetivos mensuráveis e, conseqüentemente, claros, não subjetivos –, e permite adequado acompanhamento comparativo – isto é, avaliar quantitativamente se objetivos e metas estão sendo atingidos para disparar as ações necessárias sempre que necessário.

Dessa forma, os índices de confiabilidade são instrumentos de extrema importância para garantir que os processos produtivos são mantidos e constantemente aperfeiçoados.

Resumo

A confiabilidade é estudada sob uma abordagem qualitativa (como as falhas ocorrem e seus efeitos) e quantitativa (quantidade de falhas e suas frequências de ocorrência etc.)

Sob a perspectiva da análise quantitativa em engenharia de confiabilidade, “o desempenho de sistemas pode ser medido em termos do tempo médio até a falha (MTTF ou Mean Time to Failure), no caso de sistemas não-reparáveis, ou [...] o tempo médio entre falhas (MTBF ou Mean Time between Failures) [...] no caso de sistemas reparáveis” (SALGADO, 2008, p. 11).

Leituras Recomendadas

PACE, Eduardo Sérgio Ulrich; BASSO, Leonardo Fernando Cruz; SILVA, Marcos Alessandro da. Indicadores de desempenho como direcionadores de valor. *Revista de Administração contemporânea*, Curitiba, v. 7, n. 1, p. 37-65, mar. 2003. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-65552003000100003&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 21 jan. 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-65552003000100003>.

SELLITTO, Miguel Afonso; BORCHARDT, Miriam; ARAÚJO, Daniel Ribeiro Campos de. Manutenção centrada em confiabilidade: aplicando uma abordagem quantitativa. In: XXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Curitiba, 23 a 25 de outubro de 2002, *Anais...*

Informações sobre a próxima aula

Na próxima aula, continuaremos o estudo dos índices (ou indicadores) de confiabilidade e manutenibilidade, abordando o tempo médio de reparo, taxa de falhas, disponibilidade e manutenibilidade.

Referências Bibliográficas

ANDRADE, Fábio Felipe de. *O método de melhorias PDCA*. 2003, 169f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

CORRÊA, Henrique L.; CORRÊA, Carlos A. *Administração da produção e operações: manufatura e serviços – uma abordagem estratégica*. São Paulo: Atlas, 2004. 690p.

HOPP, Wallace J.; SPEARMAN, Mark L. *A ciência da fábrica*. 3. ed. Porto Alegre : Bookman, 2013. 691p.

SALGADO, Marcia de Fatima Plátilha. *Aplicação de Técnicas de Otimização na Engenharia de Confiabilidade*. 2008, 122f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

SILVA, Josiane Roberta dos Santos et al. Análise da confiabilidade: um estudo de caso. In: XXXV Encontro Nacional de Engenharia de Produção – ENEGEP. Fortaleza, 13 a 16 de outubro de 2015. *Anais...*

VACCARO, Guilherme Luis Roêhe. *Modelagem e análise da confiabilidade de sistemas*. 1997, 222f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

Aula 3

Índices de confiabilidade e
manutenabilidade – parte 2

Meta

Apresentar os conceitos básicos referentes aos índices de confiabilidade e manutenabilidade, em especial, o MTTR, as taxas de falhas, a disponibilidade e a manutenabilidade.

Objetivos

Esperamos que, ao final desta aula, você seja capaz de:

1. definir o conceito de tempo médio de reparo;
2. aplicar o conceito de taxa de falhas;
3. explicar o conceito de disponibilidade em confiabilidade.

Pré-requisitos

Ser capaz de apontar a importância das medidas de desempenho no âmbito da confiabilidade (Aula 2).

Introdução

Como você viu na aula anterior, é importante definirmos um sistema de medidas para gerenciar qualquer processo e, no caso da confiabilidade, há uma série de medidas que nos permitem avaliar o desempenho de componentes, máquinas, equipamentos e sistemas.

Nesta aula, continuaremos a explorar os índices de confiabilidade, estudando o tempo médio de reparo, taxas de falhas, disponibilidade e manutenabilidade.

Você já aprendeu sobre MTBF e MTTF na Aula 2, que são medidas de confiabilidade relacionadas ao tempo em que ocorrem as falhas. Mas elas, isoladamente, não nos dão uma percepção completa sobre o desempenho de um equipamento, pois, se for um item reparável, precisamos levar em conta o tempo necessário para tal reparo, ou seja, o tempo em que o equipamento deixa de produzir.



RyanMcGuire

Figura 3.1: Reparo. Máquinas e equipamentos apresentam falhas e, quando elas podem ser sanadas mediante ajustes, fixações ou substituição de alguns componentes, é possível fazê-los voltar a condições de uso, sem a necessidade de substituí-los.

Fonte: <https://pixabay.com/pt/repara%C3%A7%C3%A3o-de-autom%C3%B3veis-362150/>

Além disso, a composição da frequência de falhas e do tempo de reparo permite-nos avaliar o tempo em que o equipamento pode ser usado para produzir, ou seja, sua disponibilidade.



Julie Elliot-Absshire

Figura 3.2: Fábrica química. Paralisações nas atividades fabris, seja por quebra, falta de energia, ou mesmo tempo necessário à qualquer forma de manutenção, causam grandes prejuízos. Desta forma, é dada grande importância à disponibilidade de equipamentos e instalações.

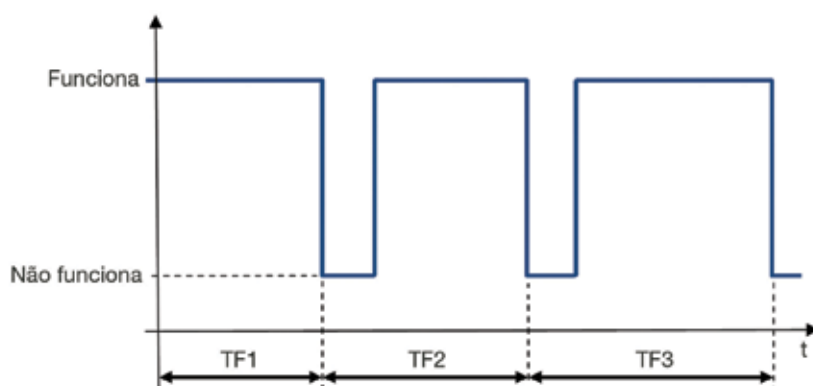
Fonte: <http://pt.freeimages.com/photo/refinery-row-2-1545671>

É isso que você vai estudar nesta aula. Bons estudos!

MTTR –Tempo médio de reparo

O MTTR (do inglês Mean Time to Repair: Tempo médio de reparo) aplica-se a produtos reparáveis, mensurando o tempo necessário para que a falha possa ser sanada e, conseqüentemente, as funções previstas para o produto voltem a ser exercidas normalmente. Por exemplo, reparo de um motorizador com um MTTR de 8 horas.

Vamos ver uma representação gráfica do que seria o MTBF:

Gráfico 3.1:

O gráfico, já exposto na Aula 2, mostra um componente ou sistema em funcionamento e sua situação ao longo do tempo: após um tempo em funcionamento normal, uma falha ocorre (TF1) e, durante determinado tempo, há o reparo, e o funcionamento volta a se regularizar, permanecendo assim até que venha a falhar novamente.

Pois bem, o tempo de reparo nem sempre será o mesmo após cada falha, pois vai depender da severidade da falha e o que precisa ser feito para fazer com que o equipamento volte a funcionar.

De acordo com Vaz (2004), o MTTR considera os seguintes elementos de tempo:

- constatação da falha;
- acesso;
- diagnóstico;
- obtenção de sobressalente;
- substituição;
- verificação;
- ajustes;
- logística; e
- administração.

Se chamarmos o tempo de reparo como TR, teríamos, então, o TR1 para reparar a 1ª falha, TR2 para reparar a 2ª e assim sucessivamente. Calcula-se um valor médio do tempo entre as falhas de acordo com a equação 1:

$$MTTR = \sum_{k=1}^n TR_k / n$$

Sendo:

$TR_k \rightarrow$ tempo de reparo da k-ésima falha;

$n \rightarrow$ quantidade de falhas.

Dessa forma, se, por exemplo, os apontamentos de manutenção em determinado equipamento mostram que, ao longo dos últimos 12 meses, foram feitos cinco reparos, com tempos de 50, 90, 20, 30 e 120 minutos, o MTTR será:

$$MTTR = (50 + 90 + 20 + 30 + 120) / 5 = 62 \text{ minutos}$$

Taxa de falhas

Como discutimos na Aula 1, “todo componente, máquina ou equipamento irá falhar em algum momento”. Slack et al. (2002) definem falhas como comprometimentos significativos para a imagem institucional das empresas, principalmente se incluírem aspectos de segurança pessoal, patrimonial e de meio ambiente, e levantaram as origens das falhas:

- falhas de projeto;
- falhas de instalações;
- falhas de pessoal;
- falhas de fornecedores;
- falhas de clientes.

Um dos índices de confiabilidade mais importantes é a taxa de falhas (λ), leia-se *lambda*, utilizada para expressar a frequência e a velocidade de ocorrência das falhas. Ela pode ser medida de duas formas:

a) calculada pela quantidade de falhas por período de tempo, quando utilizamos a equação 2.

$$\lambda = \text{Quantidade de falhas} / \text{tempo de operação}$$

b) medida como uma porcentagem do número total de produtos testados (SLACK et al., 2002), calculada pela equação 3.

$$\lambda(\%) = \text{Quantidade de falhas} / \text{quantidade de produtos testados}$$

Vamos ver a diferença entre as duas formas de cálculo, utilizando um exemplo apresentado por Slack et al. (2002, p. 631):

Um lote de 50 componentes eletrônicos (não reparáveis) foi testado durante 2.000 horas, e quatro falharam durante o teste:

- falha 1: após 1.200 horas;
- falha 2: após 1.450 horas;
- falha 3: após 1.720 horas;
- falha 4: após 1.905 horas.

Calculando a taxa de falhas como percentual, temos:

$$\lambda(\%) = 4 / 50 = 8\%$$

E calculando com base no tempo, temos:

- A 1ª falha ocorreu após 1.200 horas – o componente não operou por 800 horas;
- A 2ª falha ocorreu após 1.450 horas – o componente não operou por 550 horas;
- A 3ª falha ocorreu após 1.720 horas – o componente não operou por 280 horas;
- A 4ª falha ocorreu após 1.905 horas – o componente não operou por 95 horas;
- Como não houve mais falhas, os demais componentes (ou seja, os outros 46) operaram durante 2.000 horas.

Dessa forma, o total de horas de operação foi de $1.200 + 1.450 + 1.720 + 1.905 + 46 \times 2.000 = 98.275$ horas. Calculando a taxa de falhas, temos:

$$\lambda = 4 / 98.275 = 0,000041 \text{ (} 4,1 \times 10^{-5} \text{) falhas/hora de operação}$$

Perceba uma relação importante: usando os dados do exemplo, se invertermos a taxa de falhas, ou seja, se dividirmos o tempo de operação pela quantidade de falhas, isto é, $98.275 / 4$, encontraremos 24.568,75 e teremos como unidade horas/falha. Isso significa que, no exemplo, teríamos, em média, uma falha a cada 24.568,75 horas. Ou seja, o MTBF (que você estudou na Aula 2) seria de 24.568,75 horas.

Temos, assim, as equações 4 e 5:

$$\lambda = 1 / \text{MTBF}$$

$$\text{MTBF} = 1 / \lambda$$

Disponibilidade

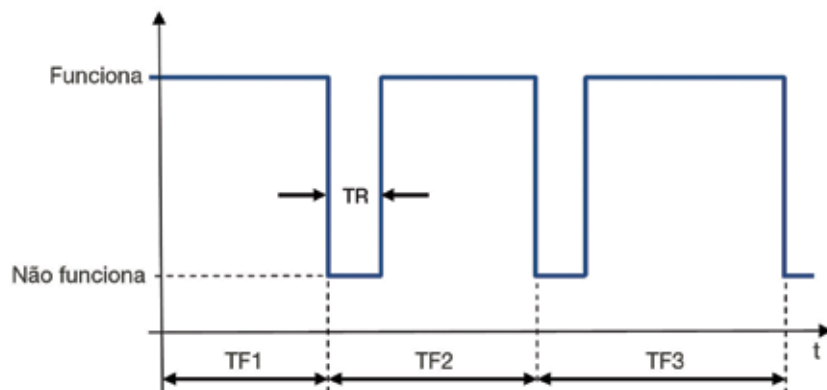
Folgliatto e Ribeiro (2009) definem disponibilidade como a capacidade de um componente, máquina, equipamento ou sistema desempenhar sua função em determinado período ou instante de tempo, ao passo que Lafraia (2014) estabelece que, na prática, é o percentual de tempo em que o sistema se encontra em condições de operar normalmente.

A NBR 5462 - Confiabilidade e manutenibilidade (ABNT, 1994, p.2) apresenta uma definição mais abrangente:

Capacidade de um item estar em condições de executar uma certa função em um dado instante ou durante um intervalo de tempo determinado, levando-se em conta os aspectos combinados de sua confiabilidade, manutenibilidade e suporte de manutenção, supondo que os recursos externos requeridos estejam assegurados.

Vamos analisar graficamente o que seria a disponibilidade:

Gráfico 3.2:



Como discutimos anteriormente, após um tempo em funcionamento normal, uma falha ocorre (TF1), havendo o reparo (TR). Em seguida, o funcionamento volta a se regularizar, permanecendo assim até que venha a falhar novamente (TF2), e assim sucessivamente.

Com base nos conceitos estudados – MTBF, MTTF e MTTR –, podemos inferir que os picos vistos no gráfico (ou seja, a região que mostra o status de “Funciona”) dariam-nos o MTTF, os vales (região de “Não Funciona”), o MTTR, enquanto os ciclos dariam-nos o MTBF.

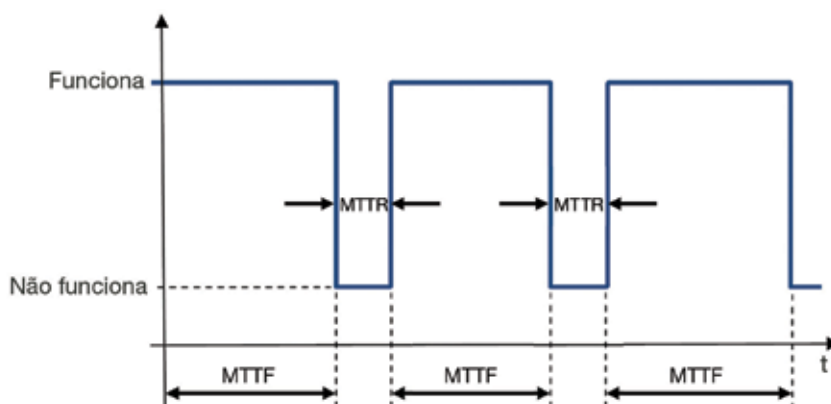
Se o TR fosse zero, o equipamento não pararia nunca, ou seja, estaria em constante funcionamento porque as falhas, ainda que ocorressem, seriam instantaneamente reparadas. Ou seja, o equipamento estaria disponível 100% do tempo. Como isso não acontece, ele só está disponível em parte do tempo, e esse é o conceito da disponibilidade: quanto é esse percentual do tempo.

Diferentes autores propõem diferentes formas de cálculo para a disponibilidade (A). Slack et al. (2002), Vaz (2004), Moscheto (2009) e Lafraia (2014) defendem que a disponibilidade seja calculada pela equação 6.

$$A = \text{MTBF} / (\text{MTBF} + \text{MTTR})$$

Ainda que o cálculo anterior seja o mais comum, Folgliatto e Ribeiro (2009) apontam que a disponibilidade deve ser calculada pela equação 7, desde que o MTTF, aplicado a um elemento reparável, seja mensurado pelo tempo em funcionamento, como mostrado no **Gráfico 3.3** a seguir.

Gráfico 3.3:



$$A = \text{MTTF} / (\text{MTTF} + \text{MTTR})$$

Tal abordagem está alinhada com a NBR 5462 - Confiabilidade e manutenibilidade (ABNT, 1994, p.2), a qual define a disponibilidade por meio da equação 8.

$$A = \text{MUT} / (\text{MUT} + \text{MDT}), \text{ sendo:}$$

MUT → Tempo médio de disponibilidade (do inglês *mean up time*) e

MDT → Tempo médio de indisponibilidade (do inglês *mean down time*)

Apesar de ser mais correto utilizar o MTTF para cálculos envolvendo capacidade produtiva, com vistas a avaliar a proporção de tempo produtivo e tempo indisponível para produzir, utilizar o MTBF ou MTTF para calcular a disponibilidade, normalmente, faz pouca diferença, visto que, de uma forma geral, o MTTR é muito inferior ao MTBF e ao MTTR. Por exemplo, se tivermos um MTBF de 100 horas e um MTTR de 10 horas, calculando a disponibilidade com base do MTBF, teremos:

$$A = 100 / (100 + 10) = 90,91\%$$

E, se calcularmos com base no MTTF, teríamos o mesmo como $100 - 10 = 90\text{h}$ e, dessa forma...

$$A = 90 / (90 + 10) = 90\%.$$

Mantenabilidade

O mercado deseja que os produtos estejam sempre prontos para o uso, quando necessitamos deles. Isso está alinhado com o conceito de disponibilidade, ou seja, a aptidão de um item no desempenho de sua função designada quando requerido para uso. A disponibilidade de um produto depende da quantidade de falhas que ocorrem (confiabilidade) e do tempo para sanar essas falhas (manutenibilidade), que é calcado no índice MTTR.

Mantenabilidade (*maintainability*) ou manutenibilidade é definida como a “capacidade de um item ser mantido ou recolocado em condições de executar suas funções requeridas, sob condições de uso especificadas, quando a manutenção é executada sob condições determinadas e mediante procedimentos e meios prescritos” (ABNT, 1994, p.3) e, também, a “probabilidade de uma dada ação de manutenção efetiva, para um item sob dadas condições de uso, poder ser efetuada dentro de um intervalo de tempo determinado, quando a manutenção é feita sob condições estabelecidas e usando procedimentos e recursos prescritos” (ABNT, 1994, p.12).

É um parâmetro de projeto voltado a minimizar o tempo de reparo de um sistema (SALGADO, 2008), aplicável tanto à manutenção corretiva como à preventiva, e sua verificação pode ocorrer por meio da análise de dados apropriados ou pela demonstração prática de manutenibilidade. A confiabilidade do produto deve ser definida durante o processo de projeto, o que inclui sua manutenibilidade.

De acordo com Baxter (2003), a auditoria do produto deve estimar o custo de uma possível falha do mesmo e, em vista disso, deve-se dimensionar a profundidade de mudança que precisa ser introduzida no produto para enfrentar esse perigo: analisam-se as diferentes alternativas de desenvolvimento comparando com os recursos humanos disponíveis na empresa e seu desempenho passado na área.

Algumas práticas utilizadas para melhoria da manutenibilidade são o denominado *Design for Serviceability* (ou *Design for Service*, ou ainda *Supportability*) e o *Design for Maintainability*, respectivamente projetos orientados para serviço e para manutenibilidade, que buscam incorporar, já no projeto do produto, a forma na qual se realizará sua manutenção ao longo do seu ciclo de vida (MOSCHETO, 2009). Ou seja, “a manutenibilidade está diretamente ligada à busca por facilitar e baratear a manutenção de um produto e/ou sistema” (ABNT, 1994, p.34).



Figura 3.3: Manutenção no espaço. Trata-se de um ambiente inóspito e, por isso, qualquer manutenção necessária deve ser rápida e eficaz. Assim sendo, as preocupações com manutenibilidade têm alta prioridade. O mesmo se aplica a usinas nucleares e similares.

Fonte: <https://pixabay.com/pt/astronauta-caminhada-no-espaco-C3%A7o-600990/>

Aspectos referentes à facilidade de acesso e visualização, padronização, simplificação do produto (menor quantidade de componentes), baixa necessidade de ferramentas especiais, política adequada de estoques de peças de reposição, estudos ergonômicos, análise da sequência de reparos e facilidades para diagnósticos (ex: marcação de níveis de desgaste) são alguns dos princípios de tais práticas (ROZENFELD et al., 2006; MOSCHETO, 2009).

Atividade 1

Atende aos objetivos 1, 2 e 3

De forma a auxiliar na fixação dos conceitos apresentados, responda às três questões a seguir:

1. A manutenibilidade está associada a qual indicador? Assinale a alternativa correta.

- (a) Disponibilidade
- (b) MTBF
- (c) MTTF
- (d) MTTR

2. A empresa Y produz veículos especiais de carga e o tempo médio entre falhas deles é de 500 horas, enquanto o tempo médio de reparo é de 10 horas. Com base nessas informações, é correto afirmarmos que:

- (a) A disponibilidade é de 98%.
- (b) O MTBF é de 98%
- (c) O MTTF é de 98%.
- (d) O MTTR é de 98%.

3. A empresa XYZ tem um equipamento cujo tempo médio entre falhas é de 70 horas e o tempo médio para consertá-lo é de 6 horas. Ela recebe duas propostas com o mesmo custo de uma empresa especializada em manutenção:

I. Um plano de manutenção preventiva que fará aumentar o tempo médio entre falhas para 90 horas;

II. Um serviço de reparos rápidos que reduziria o tempo médio para consertar o equipamento em 4 horas.

Assinale a alternativa correta:

- (a) As propostas são indiferentes, já que o custo é o mesmo.
- (b) É vantajoso escolher o programa de manutenção preventiva.
- (c) É vantajoso escolher o serviço de reparos rápidos.
- (d) Não há como definir a melhor alternativa.

Resposta comentada

1. Alternativa d. Como a manutenibilidade é um parâmetro de projeto voltado a minimizar o tempo de reparo de um sistema (SALGADO, 2008), está associada ao tempo médio de reparo – MTTR.
2. Alternativa a. Conforme o enunciado, o MTBF é de 500 horas e o MTTR é de 10 horas. Consequentemente, sua disponibilidade é de $500 / (500 + 10) = 0,98 = 98\%$. Se calcularmos utilizando o MTTF, a resposta permanece a mesma.
3. Alternativa c. Com a 1ª alternativa, a disponibilidade será de $90 / (90 + 6) = 93,8\%$. Já a 2ª alternativa fará com que a disponibilidade seja de $70 / (70 + 4) = 94,6\%$, sendo vantajosa sobre a 1ª. Se calcularmos utilizando o MTTF, a resposta permanece a mesma: $84 / 90 = 93,3\%$ versus $66 / 70 = 94,3\%$.

Conclusão

O objetivo esta aula foi apresentar a você os índices de confiabilidade e manutenibilidade. Para efeito didático, nos exemplos apresentados, consideramos que as taxas de falhas seriam constantes ao longo do tempo, simplificando os cálculos. No entanto, na vida real, as taxas variam ao longo do ciclo de vida do sistema (SANTOS, 2012), conforme veremos na Aula 6.

Resumo

O MTTR, associado ao conceito da manutenibilidade, ou seja, a facilidade e a rapidez para executar reparos, permitindo que determinado componente ou máquina possa retomar rapidamente suas funções, complementa os índices MTBF e MTTF na análise de confiabilidade, permitindo que se calcule a disponibilidade de máquinas e equipamentos. A disponibilidade é um elemento útil para planejar a capacidade produtiva em instalações industriais e sistemas produtivos.

Outro índice relevante em confiabilidade é o da taxa de falhas, que é o inverso do MTBF, mensurando a quantidade de falhas que ocorrem por unidade de tempo em um componente, equipamento ou sistema.

Informações sobre a próxima aula

Na próxima aula, você verá como os índices de confiabilidade dos componentes afetam a confiabilidade de um conjunto ou sistema, dependendo do desempenho de cada componente, mas também da forma como são agrupados – em série, em paralelo ou em arranjos mistos.

Você estudará, também, como aumentar a confiabilidade de sistemas mediante o uso de redundância de componentes e funções.

Leituras recomendadas

CASCON, Nicesio Ronan. *Metodologia para análise e otimização da confiabilidade, da manutenibilidade e da disponibilidade de um processo contínuo de produção*. 1992, 237p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1992. Disponível em: <<http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/264821>>. Acesso em: 22 jan. 2017.

Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5462: Confiabilidade e manutenibilidade*. Rio de Janeiro, 1994, 37p.

BAXTER, Mike. *Projeto de produto: guia prático para o design de novos produtos*. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2003, 272p.

FOGLIATTO, Flávio Sanson; RIBEIRO, José Luis Duarte. *Confiabilidade e Manutenção Industrial*. São Paulo: Elsevier, 2009, 288p.

LAFRAIA, João Ricardo Barusso. *Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade*. 3. ed. Rio de Janeiro: QualityMark, 2001, 388p.

MOSCHETO, André Diogo. *Desenvolvimento de um conjunto de diretrizes e ferramenta computacional para endereçar o parâmetro de manutenibilidade no PDP*. 2009, 229p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Manufatura). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

ROZENFELD, Henrique et al. *Gestão de desenvolvimento de produtos: uma referência para a melhoria do processo*. São Paulo: Saraiva, 2006, 542p.

SALGADO, Marcia de Fatima Platilha. *Aplicação de Técnicas de Otimização na Engenharia de Confiabilidade*. 2008, 122f. Dissertação (Mes-

trado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

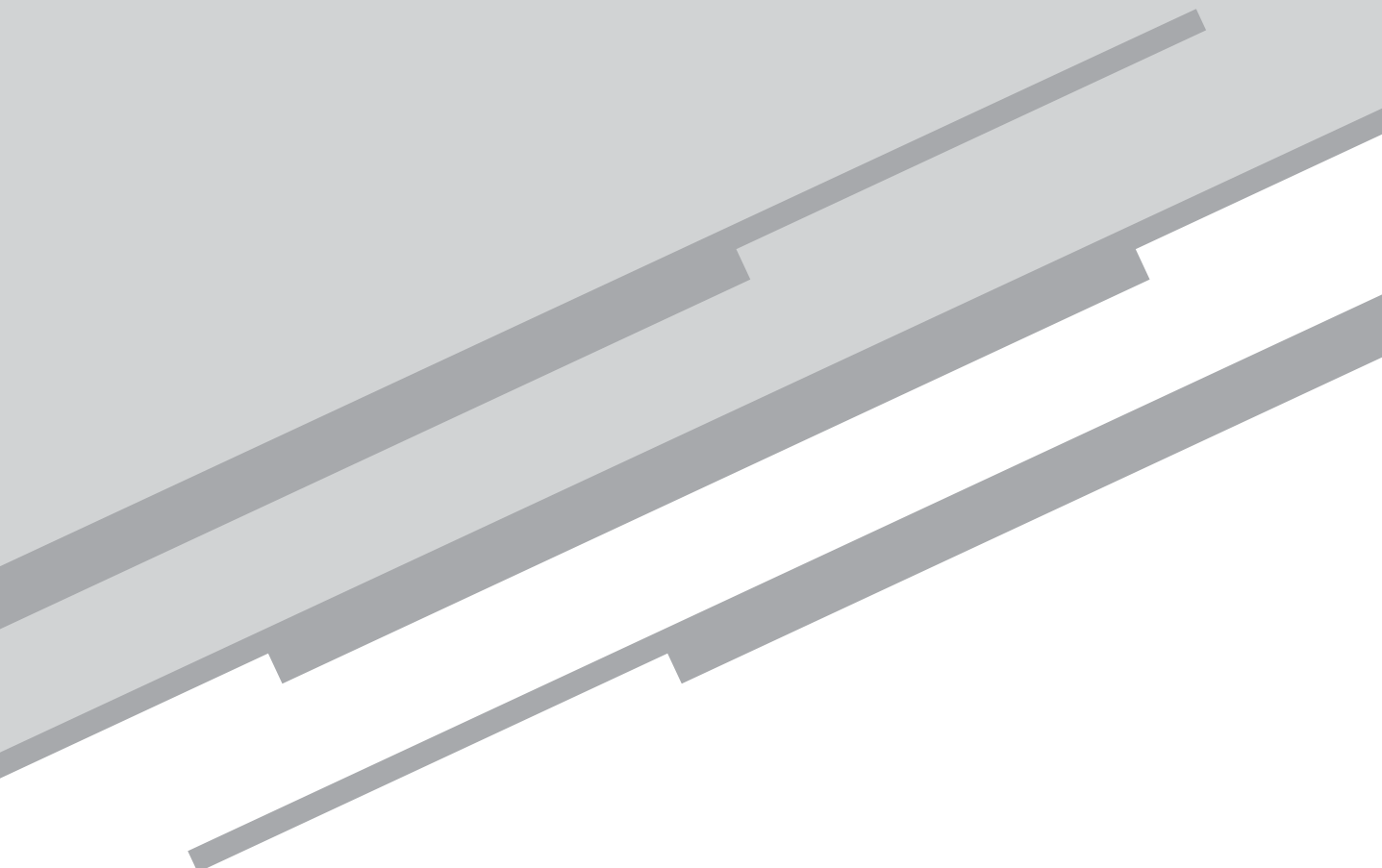
SANTOS, Alexandre Fernandes. *Confiabilidade aplicada à tomada de decisão para compressores herméticos e semi-herméticos de refrigeração comercial*. 2012, 120f. Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

SLACK, Nigel; CHAMBERS, Stuart; JOHNSTON, Robert. *Administração da produção*. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2002, 747p.

VAZ, José Carlos. Gestão da Manutenção. In: CONTADOR, J. C. (Org.). *Gestão de Operações*. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2004, p. 397-408.

Aula 4

Confiabilidade de componentes e sistemas



Henrique Martins Rocha

Meta

Apresentar os conceitos de componentes montados em série e paralelo e o modo como tais configurações influenciam a confiabilidade de conjuntos e sistemas.

Objetivos

Esperamos que, ao final desta aula, você seja capaz de:

1. diferenciar os conceitos de sistemas em série e em paralelo;
2. explicar a lógica das formas de criar redundância em sistemas;
3. calcular a probabilidade de falhas e a confiabilidade em sistemas.

Pré-requisitos

Ser capaz de efetuar cálculos de taxa de falhas em componentes e equipamentos (Aula 3).

Introdução

Até agora você estudou as falhas e os índices de confiabilidade e manutenibilidade de forma isolada. A partir desta aula, vamos estudar como a probabilidade de falhas dos componentes que interagem em um conjunto ou sistema influencia a probabilidade de falhas do conjunto.

As falhas são prejudiciais e podem trazer inúmeros problemas para as empresas: levam à perda de receita, ao aumento de custos, à insatisfação de clientes, à perda de parcela de mercado, abrem espaço para concorrentes etc.



Martin Litkey

Figura 4.1: Falha de sistema. Essa mensagem costuma assustar os usuários de computadores e sistemas, pois indica que, por alguma razão, as funções não serão executadas. Isso pode representar impactos significativos nas empresas em aspectos de produção, vendas, faturamento, etc.

Fonte: <http://pt.freeimages.com/photo/system-failure-1563862>

Podem, também, colocar em risco máquinas, instalações e pessoas, além de causar danos ao patrimônio.



Emiliano Spada

Figura 4.2: Carro incendiado. Falhas, mesmo que pequenas, podem causar danos substanciais. Por exemplo, um curto circuito em um componente elétrico ou eletrônico pode causar superaquecimento, fagulhamento e um princípio de incêndio que pode levar à destruição máquinas, equipamentos e instalações.

Fonte: <http://pt.freeimages.com/photo/burned-car-1622584>

Você já estudou sobre confiabilidade, taxa de falhas e manutenibilidade. Nesta aula, vamos ver como os índices de confiabilidade e a taxa de falha dos componentes afetam o desempenho de conjuntos e sistemas.

Além disso, você vai estudar um conceito muito relevante na definição dos sistemas, que é a *redundância*, ou seja, o que pode ser feito para que, caso existam falhas, o conjunto ou sistema não seja comprometido, pois outros componentes (redundantes) podem exercer as funções que são exercidas pelos componentes que falham.



Figura 4.3: Redundância. A imagem mostra grampos utilizados por alpinistas. Trata-se de uma atividade de alto risco, na qual a falha dos equipamentos e acessórios pode ocasionar acidentes severos e possibilidade de morte. Olhe com atenção que os grampos e suas travas são duplicados. Ou seja, uma falha no posicionamento de um dos grampos não traria problemas, pois há uma redundância no sistema.

Fonte: <https://pixabay.com/pt/carabina-corda-gancho-backup-7104/>

Crítérios de redundância

A redundância pode ser definida, de uma forma simples, como termos algo disponível para uso, mas que só é usado em caso de falha de alguma outra coisa.

Nos automóveis, por exemplo, temos um pneu de estepe. Ele não é usado para que o automóvel exerça sua função, ou seja, transportar pessoas e cargas. No entanto, quando há uma falha específica, isto é, quando um dos pneus em uso fura, você precisa “trocar o pneu”, ou seja, retirar o pneu furado e substituí-lo pelo estepe.



Figura 4.4: Troca de pneu. A existência de um estepe é um exemplo de redundância: há um pneu “sobrando”, além dos quatro necessários à movimentação do automóvel. Sem ele, um pneu furado seria um impeditivo para continuar uma viagem.

Fonte: <http://pt.freeimages.com/photo/changing-a-tire-at-night-1252520>

Observe que, quando você faz isso, a redundância deixa de existir: se outro pneu furar, você não terá como substituí-lo (por isso, é recomendado que leve o pneu furado a um borracheiro, para que ele seja reparado e você volte a ter um pneu “sobrando”, como redundância).

Outro exemplo é quando fazemos *backup* dos arquivos que temos no computador.

A redundância, entretanto, pode ocorrer de outra forma, quando o elemento redundante entra em uso sem a necessidade de uma intervenção. Por exemplo, quando instalamos um *no-break* no computador ou um gerador em uma instalação predial, não precisamos ligá-los ou acioná-los quando falta energia (até porque, de nada adiantaria, pois seria uma ação tardia e o computador já teria desligado): o *no-break* e o gerador entram imediatamente em funcionamento, fazendo que a função seja mantida.

A esse tipo de redundância dá-se o nome de *redundância stand-by*, pois os componentes “adicionais” (redundantes) são ativados quando os componentes em operação falham (LAFRAIA, 2014).

Outra forma de redundância é quando temos um componente ou sistema redundante em constante uso, o que chamamos de *redundância ativa* (LAFRAIA, 2014). Por exemplo, o duplo circuito de freio nos automóveis: como há dois sistemas independentes em uso, caso ocorra falha

em um deles, você ainda conseguirá frear o carro, pois o outro sistema continuará funcionando, caracterizado como *redundância total*, pois as funções continuam a ser executadas pelo outro circuito. Existe ainda a *redundância parcial*, em que o sistema admite uma determinada quantidade de falhas, como, por exemplo, um trem de pouso de um avião com quatro pneus que funcionem bem caso, no máximo, dois pneus estoureem durante o pouso.

A redundância é muito útil para sistemas que envolvem segurança. Por exemplo, na área aeronáutica, é comum o uso de sistemas triplos de redundância.

Vamos compreender a lógica existente na redundância e na capacidade de aumentar a confiabilidade de sistemas por meio de seu uso. Imagine uma lâmpada ligada por um fio paralelo a uma tomada e imagine que esse fio, por estar exposto à constante movimentação, pode se romper. Quando isso acontece, o sistema lâmpada-fios-tomada vai falhar, ou seja, a lâmpada não vai acender.

Pois bem, vamos supor que esse fio tem 10% de probabilidade de falhar ao longo de determinado tempo: sua confiabilidade é de 90%, certo? Assim, desconsiderando eventuais falhas na tomada e da própria lâmpada, teríamos uma confiabilidade de 90% de nosso sistema lâmpada-fios-tomada: a lâmpada tem a probabilidade de 90% de ficar acesa durante o tempo previsto.

Vamos tornar esse sistema mais confiável por meio da redundância: ao invés de um fio, vamos colocar três fios em paralelo, ou seja, todos os fios estariam constantemente em uso, transmitindo energia da tomada para a lâmpada, e cada fio apresenta 90% de confiabilidade.

A confiabilidade desse sistema é de 90%?

Para respondermos isso, vamos analisar o esquema da figura a seguir.



Figura 4.5

Temos diferentes possibilidades, como mostra a **Tabela 4.1**:

Tabela 4.1: Cenários possíveis no sistema

Fio 1	Fio 2	Fio 3	Lâmpada
OK	OK	OK	OK
OK	OK	Falha	OK
OK	Falha	OK	OK
OK	Falha	Falha	OK
Falha	OK	OK	OK
Falha	OK	Falha	OK
Falha	Falha	OK	OK
Falha	Falha	Falha	Falha

Observe que, por conta da redundância (isto é, três fios paralelos sendo usados simultaneamente para a mesma função), *o sistema só falhará quando os três fios falharem*. A probabilidade dos três fios falharem simultaneamente é dada pela equação 1:

$$P_s(t) = P_1(t) \times P_2(t) \times P_3(t),$$

sendo

$P_s(t) \rightarrow$ Probabilidade do sistema falhar no tempo t ;

$P_1(t) \rightarrow$ Probabilidade do fio 1 falhar no tempo t ;

$P_2(t) \rightarrow$ Probabilidade do fio 2 falhar no tempo t ;

$P_3(t) \rightarrow$ Probabilidade do fio 3 falhar no tempo t .

Dessa forma, temos:

$$P_s(t) = 0,1 \times 0,1 \times 0,1 = 0,001, \text{ ou } 0,1\%.$$

Isto é, enquanto a probabilidade de falha de cada fio paralelo é de 10% (confiabilidade de 90%), no sistema composto por três deles em paralelo é de somente 0,1% e, conseqüentemente, a confiabilidade do sistema é de 99,9%.

A princípio você pode estar se perguntado se não seria interessante, então, adotar componentes redundantes em tudo, de forma a aumentar a confiabilidade de produtos, máquinas, equipamentos e sistemas.

Há, no entanto, dois fatores para que isso não seja feito: o primeiro é a impossibilidade técnica.

Como ter redundância para os pneus de uma bicicleta, por exemplo? Andar com um estepe não parece ser algo viável. Como ter redundância para o sistema de suspensão de um automóvel?

O segundo fator é o custo. Observe que, no nosso exemplo do sistema lâmpada-fios-tomada, por utilizarmos três fios paralelos ao invés de somente um, o custo do conjunto aumentaria. Assim, de uma forma geral, só é comum adotarem-se medidas de redundância nas situações em que há risco envolvido, como, por exemplo, sistemas de distribuição de eletricidade, sistemas de freio em automóveis, aviões etc. A propósito, esse é um aspecto que traz grandes dificuldades nos projetos de aeronaves, pois neles buscam-se adotar diversas medidas para reduzir o peso, mas, por razões de segurança, há componentes e sistemas redundantes que adicionam mais peso à aeronave.

Sistemas em série, em paralelo e mistos

A forma como os componentes de um equipamento ou sistema são ligados uns aos outros influi diretamente na confiabilidade do sistema.

O arranjo denominado *em série* é aquele em que a função do conjunto ou sistema acontece pela atuação em sequência dos diversos componentes. Por exemplo, Slack, Chambers e Johnston (2002) citam o exemplo de uma máquina automática de produção de pizza em uma fábrica de alimentos, com cinco componentes principais:

1. misturador de massa;
2. rolo e cortador de massa;
3. aplicador de massa de tomate;
4. aplicador de queijo e
5. forno.

Obviamente, a falha de qualquer um desses componentes levaria à falha da máquina, ou seja, ela deixaria de ser capaz de produzir as pizzas.

A representação gráfica dos componentes em série é mostrada na figura a seguir. Observe que se trata de uma representação esquemática somente, isto é, não necessariamente os componentes são montados formando uma linha reta. Não nos referimos à posição em que os componentes estão montados, mas sim como suas funções estão interligadas quanto ao funcionamento do sistema.

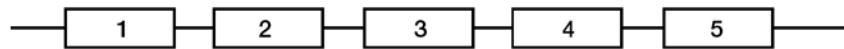


Figura 4.6: Componentes em série.

A lógica dessa representação gráfica é a de que, se um componente falhar, todo o conjunto ou sistema falhará. Dessa forma, para que uma falha do sistema ocorra, segundo a lógica booleana, basta que haja uma falha em um componente *ou* outro(s). Assim, supondo componentes com modos de falha independentes entre si, ou seja, supondo que a falha de um componente não afeta a probabilidade de falha dos demais (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009), a confiabilidade de um sistema em série pode ser calculada pela equação 2:

$$R_s(t) = R_1(t) \times R_2(t) \times \dots \times R_n(t),$$

sendo

$R_s(t) \rightarrow$ confiabilidade do sistema;

$R_n(t) \rightarrow$ confiabilidade do componente.

Vamos, então, calcular a confiabilidade da máquina automática de produção de pizzas apresentada por Slack, Chambers e Johnston (2002), considerando as seguintes confiabilidades dos seus componentes:

Componente		Confiabilidade
1	misturador de massa	0,95
2	rolo e cortador de massa	0,99
3	aplicador de massa de tomate	0,97
4	aplicador de queijo	0,90
5	forno	0,98

De acordo com a equação 1, a confiabilidade da máquina será de:

$$R_s(t) = R_1(t) \times R_2(t) \times R_3(t) \times R_4(t) \times R_n(t)$$

$$R_s(t) = 0,95 \times 0,99 \times 0,97 \times 0,90 \times 0,98 \approx 0,805.$$

Ou seja, a confiabilidade da máquina é de aproximadamente 80,5%. Observe que esse valor é menor do que o da confiabilidade de cada um dos componentes. Como a confiabilidade máxima que um componente pode atingir é de, hipoteticamente, 1 (100%), você já deve ter percebido que, em um sistema em série, quanto maior for a quantidade de componentes, menor será sua confiabilidade.

Já nos sistemas em paralelo, a falha do sistema só ocorre se todos os componentes envolvidos falharem, fazendo com que, de uma forma geral, sua confiabilidade seja elevada. A representação esquemática de um sistema em paralelo é mostrada na figura a seguir.

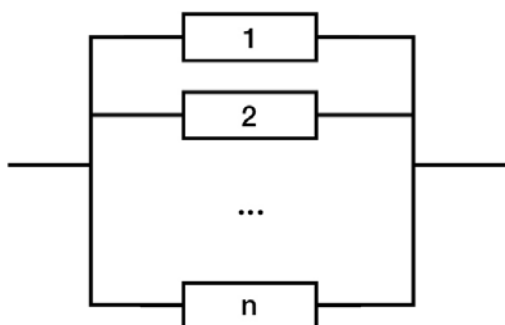


Figura 4.7: Sistema em paralelo

A confiabilidade de um sistema em paralelo pode ser calculada pela equação 3:

$$R_s(t) = 1 - [1 - R_1(t)] \times [1 - R_2(t)] \times \dots \times [1 - R_n(t)],$$

sendo

$R_s(t) \rightarrow$ confiabilidade do sistema;

$R_n(t) \rightarrow$ confiabilidade do componente.

Vamos, a título de exercício e curiosidade, calcular a confiabilidade da máquina automática de fazer pizzas de Slack, Chambers e Johnston (2002), caso os componentes funcionassem em paralelo (o que seria uma impossibilidade tecnológica):

$$R_s(t) = 1 - [1 - R_1(t)] \times [1 - R_2(t)] \times [1 - R_3(t)] \times [1 - R_4(t)] \times [1 - R_5(t)]$$

$$R_s(t) = 1 - [1 - 0,95] \times [1 - 0,99] \times [1 - 0,97] \times [1 - 0,90] \times [1 - 0,98] \\ = 99,999997\%$$

Caso todos os componentes tivessem a mesma confiabilidade, poderíamos transformar a equação 3 em uma forma mais simples, como mostrado na equação 4:

$$R_s(t) = 1 - [1 - R(t)]^n,$$

sendo

$R(t) \rightarrow$ confiabilidade do componente;

$n \rightarrow$ quantidade de componentes no sistema em paralelo.

As vantagens em termos de confiabilidade quando usamos sistemas em paralelo são enormes. Porém, como exposto anteriormente, impedimentos tecnológicos ou de custos tornam tal estratégia proibitiva na maioria das vezes.

No entanto, de forma seletiva, utilizam-se a redundância e alguns componentes. Vamos supor, por exemplo, que na máquina de pizza tivéssemos um 2º aplicador de queijo, visto que esse é o componente mais crítico (menor confiabilidade). Temos, nesse caso, um sistema que pode ser interpretado como *misto*, isto é, com parte em série e parte em paralelo. Podemos tratar a parte do sistema que contém os dois aplicadores de queijo como sendo *em paralelo*, pois, por conta da redundância existente, “a falha do sistema só ocorre se todos os componentes envolvidos falharem”, ou seja, se os dois aplicadores falharem.

Vamos ver como ficaria a representação gráfica do sistema com essa nova configuração:



Figura 4.8: Sistema misto

No caso dos sistemas mistos, precisamos decompor as partes *em série* e *em paralelo* para fazermos os cálculos de confiabilidade.

Por exemplo, o trecho em que há a redundância é *em paralelo* e, assim, vamos calcular separadamente sua confiabilidade.

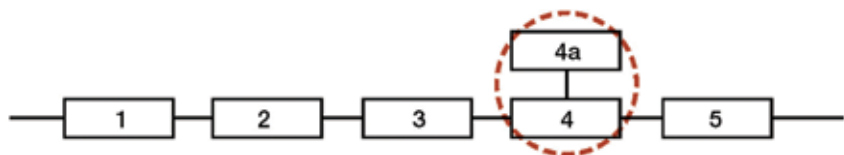


Figura 4.9

A confiabilidade do sistema 4-4a pode ser calculada:

$$R_s(t) = 1 - [1 - 0,90] \times [1 - 0,90] = 0,99$$

Calculada a confiabilidade do sistema 4-4a, podemos calcular a confiabilidade do sistema como um todo:

$$R_s(t) = 0,95 \times 0,99 \times 0,97 \times 0,99 \times 0,98 \approx 0,885$$

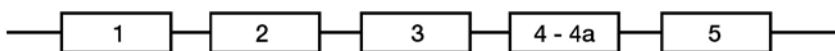


Figura 4.10

Ou seja, com a redundância do aplicador de queijo foi possível aumentar a confiabilidade da máquina de pizza de 80,5% para 88,5%.

===== **Atividade 1** =====

Atende aos objetivos 1, 2 e 3

Calcule a confiabilidade do sistema mostrado a seguir, considerando os valores de confiabilidade que são mostrados nos componentes.

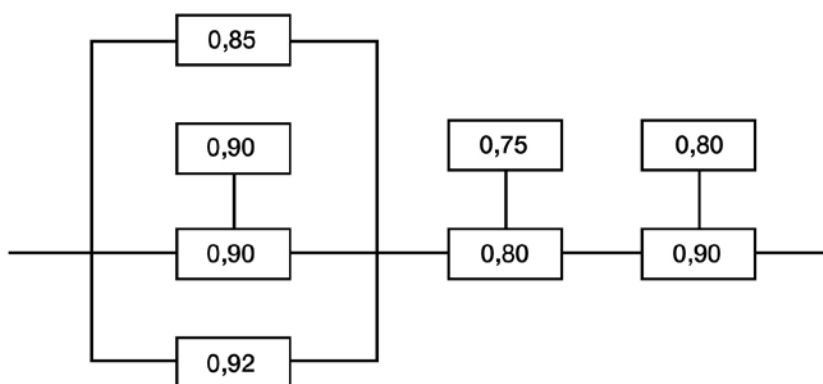


Figura 4.11

Resposta comentada

Para resolver esse problema, vamos calcular primeiramente as redundâncias:

1. Os dois primeiros componentes, com confiabilidade de 0,90 e 0,90, têm uma confiabilidade de:

$$R_s(t) = 1 - [1 - 0,90] \times [1 - 0,90] = 0,99.$$

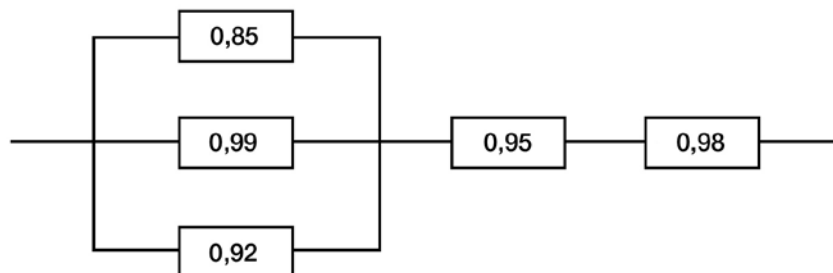
2. Os componentes seguintes, com confiabilidade de 0,75 e 0,80, têm uma confiabilidade de:

$$R_s(t) = 1 - [1 - 0,75] \times [1 - 0,80] = 0,95.$$

3. Em seguida, calculamos a confiabilidade dos componentes seguintes, com confiabilidade de 0,80 e 0,90:

$$R_s(t) = 1 - [1 - 0,80] \times [1 - 0,90] = 0,98.$$

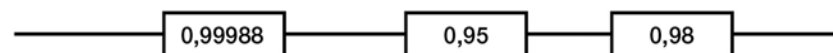
4. Podemos analisar agora o sistema de uma forma mais simplificada, como mostrado na figura a seguir.



5. Calculamos, então, a parte dos componentes em paralelo:

$$R_s(t) = 1 - [1 - 0,85] \times [1 - 0,99] \times [1 - 0,92] = 0,99988.$$

6. Temos, agora, a análise final, com componentes em paralelo:



$$R_s(t) = 0,99988 \times 0,95 \times 0,98 \approx 0,93.$$

Conclusão

Ainda que a escolha de onde e como prover redundância, bem como definir a configuração ideal de um sistema em termos de ser em série, em paralelo, ou misto, possa parecer arbitrária, devemos efetuar os cálculos de confiabilidade resultante e custo envolvido para definir a configuração ideal.

A título de exemplo do que foi concluído, apresentamos um estudo realizado por Fogliato e Ribeiro (2009) em que foram comparados dois sistemas com a mesma função e com a mesma quantidade de componentes, arranjando-os de forma distinta, como mostrado nas figuras a seguir.

Na primeira figura, temos m subsistemas em série, cada um deles com n componentes, estando os m subsistemas ligados em paralelo.

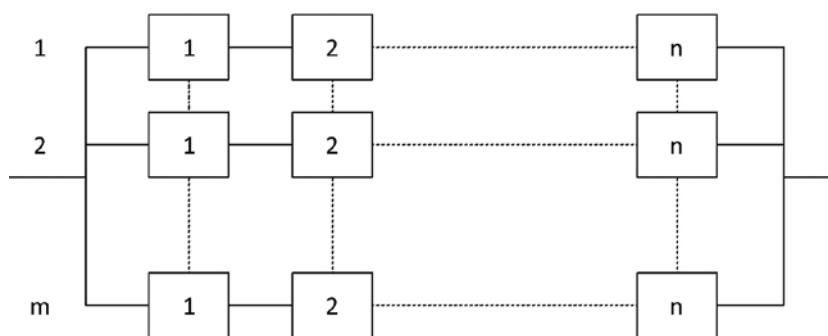


Figura 4.12

A confiabilidade desse sistema, supondo que todos os componentes (em um total de $m \times n$) tenham a mesma confiabilidade, é dada pela equação 5:

$$R_s(t) = 1 - \{[1 - R(t)]^n\}^m$$

Já a segunda figura mostra n subsistemas ligados em série, cada um deles composto de m componentes ligados em série.

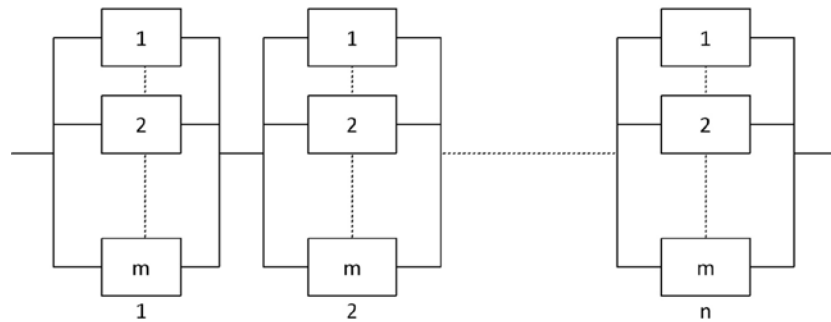


Figura 4.13

Nesse caso, a confiabilidade desse sistema, supondo que todos os componentes (o mesmo total de $m \times n$ componentes) tenham a mesma confiabilidade, é dada pela equação 6:

$$R_s(t) = 1 - \{[1 - R(t)]^m\}^n$$

De acordo com os autores, a segunda configuração (n subsistemas ligados em série, cada um deles composto de m componentes ligados em série) resulta em níveis de confiabilidade superiores aos da primeira configuração (m subsistemas em série, cada um deles com n componentes, estando os m subsistemas ligados em paralelo).

Dessa forma, segundo os autores, o engenheiro deve optar por utilizar “componentes sobressalentes”, ao invés de “sistemas sobressalentes”, por se obter maior confiabilidade a custo idêntico (devido à mesma quantidade de componentes com o mesmo nível de confiabilidade).

Resumo

A forma como os componentes de uma máquina, equipamento ou sistema são configurados para exercer sua função afeta diretamente a confiabilidade deste com junto. Caso a falha de um dos componentes cause a falha do sistema, dizemos tratar-se de um sistema com componentes “em série”.

Se, por outro lado, o sistema falhar somente se todos os componentes falharem, temos um sistema com componentes “em paralelo”, o qual serve de base para definir as aplicações de redundância, ou seja, componentes que normalmente estão “sobrando” (isto é, redundantes), mas com conseguem manter o sistema em funcionamento quando há a falha de componentes.

A combinação de arranjos em série e em paralelo no mesmo sistema é chamado de “sistema misto”.

Conhecendo-se a confiabilidade dos componentes em qualquer forma de arranjo, é possível calcular a confiabilidade do sistema.

Informações sobre a próxima aula

Nesta aula, você viu como calcular a confiabilidade de sistemas tendo por base a confiabilidade de seus componentes e a forma com que são arranjos. Estudou, também, o conceito de redundância para aumento da confiabilidade.

No entanto, até agora trabalhamos com as taxas de falha como se elas fossem constantes ao longo do tempo, o que normalmente não acontece. Veremos, então, na próxima aula, como a taxa de falhas varia a longo do tempo, ou seja, quais as funções que regem a variação de λ (*lambda*) em função do tempo.

Leituras recomendadas

G1. *Redundância é principal fator de segurança dos aviões*. Disponível em: <<http://g1.globo.com/Noticias/Brasil/0,,AA1603604-5598,00-REDUNDANCIA+E+PRINCIPAL+FATOR+DE+SEGURANCA+DOS+AVIOES.html>>. Acesso em: 01 fev. 2017.

Referências Bibliográficas

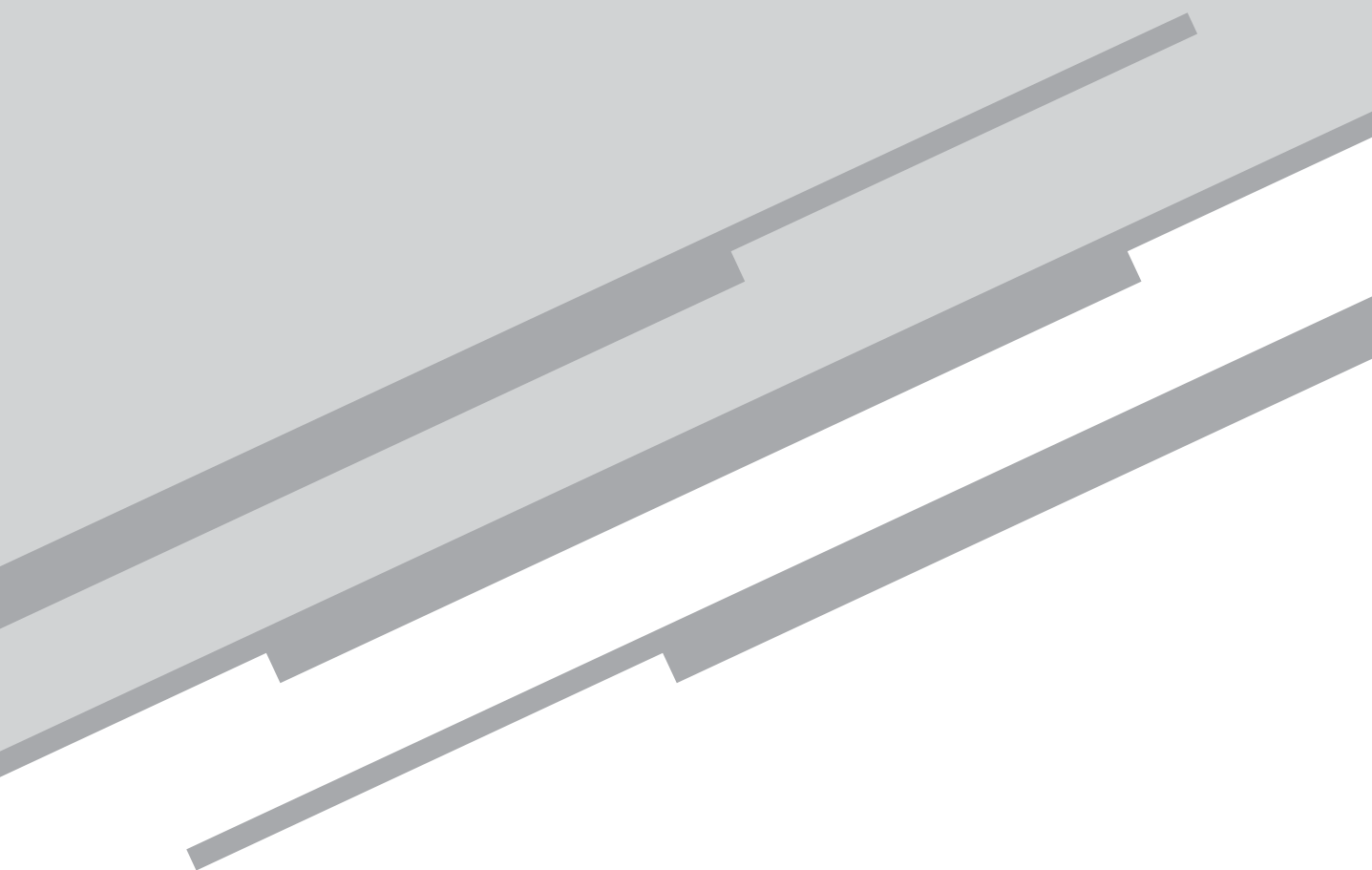
FOGLIATTO, Flávio Sanson; RIBEIRO, José Luis Duarte. *Confiabilidade e manutenção industrial*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009, 265p.

FAFRAIA, João Ricardo Barusso. *Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade*. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2014, 388p.

SLACK, Nigel; CHAMBERS, Stuart; JOHNSTON, Robert. *Administração da produção*. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2002, 747p.

Aula 5

Função densidade de
confiabilidade – parte 1



Henrique Martins Rocha

Meta

Apresentar os conceitos relacionados à variação da taxa de falhas em componentes e sistemas ao longo de tempo.

Objetivos

Esperamos que, ao final desta aula, você seja capaz de:

1. expressar o conceito de modelos confiabilísticos;
2. discutir a aplicação de distribuições estatísticas em Confiabilidade;
3. definir o conceito de curva de banheira.

Pré-requisitos

1. Ter conhecimento sobre limites, derivadas e integral.
2. Conhecer o conceito de *função densidade* em Probabilidade e Estatística.
3. Ser capaz de efetuar cálculos de taxa de falhas em componentes e equipamentos (Aula 3).

Introdução

Você aprendeu sobre taxa de falhas nas aulas anteriores e a calculá-la em componentes e sistemas. No entanto, as análises feitas até o momento tratavam a taxa de falhas como algo imutável, ou seja, que não variava em função do tempo.

Porém, isso não representa adequadamente a realidade: fatores diversos fazem com que λ (*lambda*) varie ao longo do tempo. E é isso que veremos nessa aula.

Bons estudos!

Sabermos que a taxa de falha de um componente é de, por exemplo, 0,1% ou de 1 falha a cada 1.000 horas de funcionamento, tem pouca utilidade prática, afinal, um λ de 1 falha a cada 1.000 horas não significa que funcionará adequadamente durante 1.000 horas e que, exatamente na milésima hora, apresentará uma falha.



Figura 5.1: Falha em equipamento. As falhas representam o não cumprimento do que é esperado do equipamento. Por exemplo, uma impressora que, por qualquer razão, deixa de imprimir os documentos. As causas podem variar desde algo simples, como um mau-contato de um componente elétrico, a aspectos mais complexos e perigosos, que podem, por exemplo, causar incêndios por curtos-circuitos.

Fonte: <https://pixabay.com/pt/erro-de-dispositivo-154484/>

Por se tratarem de valores médios de uma amostra ou população que tem dispersão de valores, o que nos importa é saber a probabilidade de falha ao longo do tempo.



Figura 5.2: Alvos e dispersão. Ao serem lançadas flechas contra alvos, acertando ou não no centro, haverá sempre dispersão de localização das flechas. Se não fosse assim, uma flecha sempre atingiria a parte de trás da flecha lançada anteriormente. Tais variações são normais e esperadas.

Fonte: <https://pixabay.com/pt/objetivos-discos-de-destino-462555/>

E essa probabilidade não é um valor fixo, pois falhas iniciais por problemas de manufatura, desgaste pelo uso etc. influenciam a probabilidade de falha, além do fato de que todo componente e equipamento falharão em algum momento. Quanto maior for o tempo de uso, mais nos aproximamos do momento em que a falha ocorrerá, mesmo que não saibamos exatamente quando será.



Figura 5.3: Passagem do tempo. A informação da ocorrência de uma falha sem informações sobre o tempo não tem muito significado. Por exemplo, a informação de falha em um equipamento depois de cinco anos de uso é totalmente diferente de uma falha após cinco horas de uso.

Fonte: <https://pixabay.com/pt/tempo-rel%C3%B3gio-tarde-rel%C3%B3gios-hora-1192437/>

Modelos confiabilísticos

Fogliatto e Ribeiro (2009, p.23) destacam a importância do estudo da distribuição de probabilidade em confiabilidade ao citar que:

A definição mais usual de confiabilidade de uma unidade (componente ou sistema) é dada em termos de sua probabilidade de sobrevivência até um tempo t de interesse. A determinação de tal probabilidade é possível através da modelagem dos tempos até falha da unidade em estudo. Conhecendo-se a distribuição de probabilidade que melhor se ajusta a esses termos, é possível estimar a probabilidade de sobrevivência de uma unidade para qualquer tempo t , bem como outras medidas de confiabilidade [...], como o seu tempo médio até falha e função de risco. A modelagem dos tempos até falha é, portanto, central em estudos de confiabilidade.

Entendemos *função de risco* como sendo “a quantidade de risco associada a uma unidade no tempo t ”, utilizada para analisar o risco a que componentes e sistemas estão expostos ao longo do tempo (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009, p.10), associada, portanto, à noção de confiabilidade.

Vamos ver algumas definições que nos ajudarão a trabalhar com as funções de confiabilidade e risco, tomando por base os conceitos expressos por Lafraia (2014, p. 19-20):

Função densidade de falhas: representa a variação da probabilidade de falhas por unidade de tempo, sendo uma função de distribuição de probabilidade expressa matematicamente pela equação 1:

$$(1) f(t) = dF(t)/dt,$$

sendo:

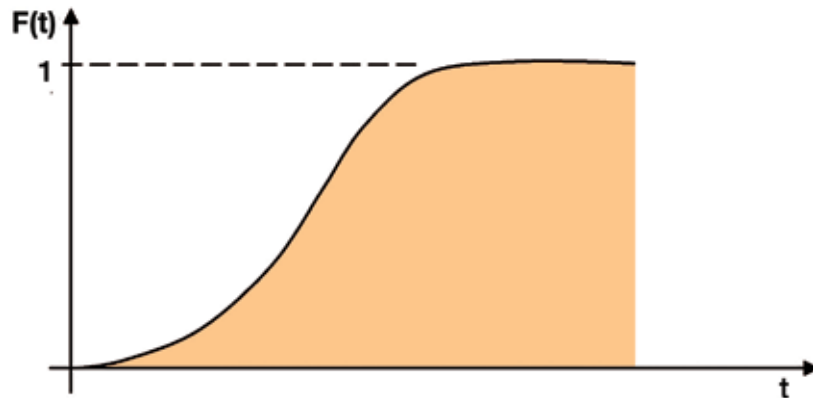
$F(t) \rightarrow$ função acumulada de falhas

Função acumulada de falhas: mostra a probabilidade de falhas entre um período de tempo t_1 e t_2 , sendo uma função de distribuição de densidade acumulada, expressa matematicamente pela equação 2:

$$(2) F(t_1) - F(t_2) = \int_{t_1}^{t_2} f(t).dt$$

De acordo com Natacci, Souza e Martins (2007), a função $F(t)$ é crescente com o tempo, atingindo o valor unitário (100%) quando o intervalo de tempo t tende a ∞ , como pode ser visto no **Gráfico 5.1**.

Gráfico 5.1: Função de Probabilidade Acumulada $F(t)$



Fonte: Adaptado de Natacci, Souza e Martins (2007)

No instante inicial ($t = 0$) não há falhas: elas ocorrem com o avanço do tempo. Como sabemos que as falhas vão ocorrer em determinado momento, avançando no tempo, chega-se a 100% (1), como mostrado no gráfico.

Função de confiabilidade: probabilidade de um item sobreviver a um dado intervalo estabelecido (de tempo, ciclos, distância etc.) entre zero e x , expressa matematicamente pela equação 3:

$$(3) R(t) = \int_t^{\infty} f(t).dt$$

A partir dessa definição, infere-se que:

$$(4) R(t) = 1 - \int_{-\infty}^t f(t).dt$$

Consequentemente, temos que:

$$(5) R(t) = 1 - F(t)$$

E, ainda:

$$(6) F(t) = 1 - R(t)$$

Função de risco (harzard function ou harzard rate): também conhecida como taxa condicional de falha, representa a probabilidade condicional de falha no intervalo de t a $t + dt$, dado que não houve falha em t , expressa matematicamente pela equação 7:

$$(7) \lambda(t) = f(t)/R(t)$$

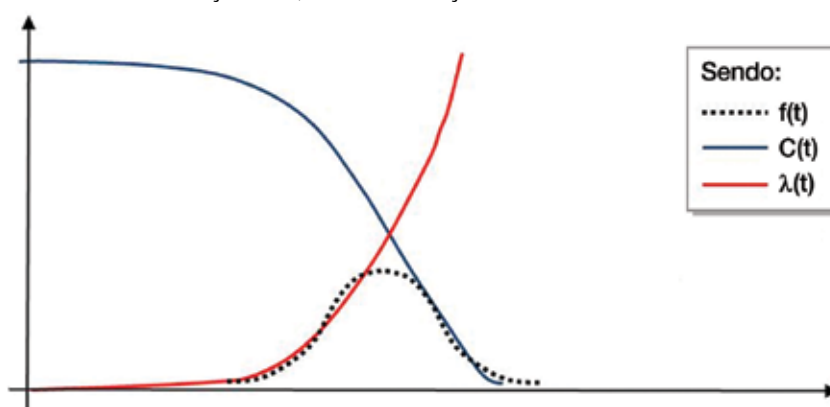
Ou ainda, pela equação 8:

$$(8) \lambda(t) = f(t)/[1 - F(t)]$$

IMPORTANTE: Repare que, agora, não estamos mais falando de um valor de λ fixo, mas sim de uma taxa medida em uma situação em que cada vez é mais provável que ocorra uma falha (lembre-se de que todo componente ou sistema vai falhar em algum momento e, assim, quanto mais tempo se passa sem que a falha ocorra, mais próximo estamos de sua ocorrência).

A relação entre as funções citadas pode ser observada no **Gráfico 5.2**.

Gráfico 5.2: Variação de f , R e λ em função de t



Fonte: Adaptado de Lafraia (2009)

Na maioria das vezes, a função densidade de falhas $f(t)$ apresenta uma concentração em determinada faixa de tempo. Ou seja, é mais comum que as falhas ocorram após determinado tempo de uso (raramente muito “cedo” e raramente “funciona muito tempo sem falhar”). Por conta disso, a confiabilidade $C(t)$ ou $R(t)$ é inicialmente alta, caindo rapidamente quando o tempo se aproxima da faixa de tempo em que há maior probabilidade de falhas e, conseqüentemente, a função de risco $\lambda(t)$ é crescente.

Vamos ver uma aplicação prática dos conceitos apresentados, utilizando um exercício apresentado por Lafraia (2009, p.21-23), no qual 1.000 componentes não reparáveis foram testados até que o último falhasse após 100 meses de teste, apresentando os seguintes resultados:

t (mês)	Quantidade de falhas
0	0
2	6
4	8
10	15
20	20
30	27
40	41
50	73
60	133
70	223
80	273
90	160
100	21

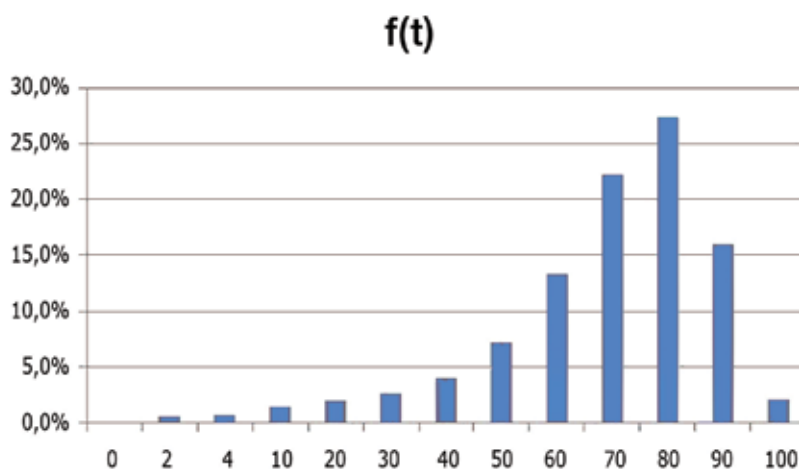
A partir dos dados, podemos calcular $f(t)$, $F(t)$, $R(t)$ e $\lambda(t)$, como você pode ver na **Tabela 5.1** a seguir, já completa.

Tabela 5.1:

t (mês)	Quantidade de falhas	f(t)	Falhas (cumulativo)	F(t)	R(t)	Quantidade em teste	$\lambda(t)$
0	0	0,0%	0	0,0%	100,0%	1000	0,00
2	6	0,6%	6	0,6%	99,4%	994	0,01
4	8	0,8%	14	1,4%	98,6%	986	0,01
10	15	1,5%	29	2,9%	97,1%	971	0,02
20	20	2,0%	49	4,9%	95,1%	951	0,02
30	27	2,7%	76	7,6%	92,4%	924	0,03
40	41	4,1%	117	11,7%	88,3%	883	0,05
50	73	7,3%	190	19,0%	81,0%	810	0,09
60	133	13,3%	323	32,3%	67,7%	677	0,20
70	223	22,3%	546	54,6%	45,4%	454	0,49
80	273	27,3%	819	81,9%	18,1%	181	1,51
90	160	16,0%	979	97,9%	2,1%	21	7,62
100	21	2,1%	1000	100,0%	0,0%	0	

Houve um total de 1.000 falhas e, dessa forma, para calcularmos $f(t)$, dividimos a quantidade de falhas em cada mês pelo total (1.000). Observe, por exemplo, que no mês $t=2$, tivemos seis falhas. Assim, $6/1.000 = 0,006$ ou 0,6% (utilizamos o percentual para facilitar a interpretação dos dados).

Podemos, assim, traçar o **Gráfico 5.3**, de $f(t)$:

Gráfico 5.3:

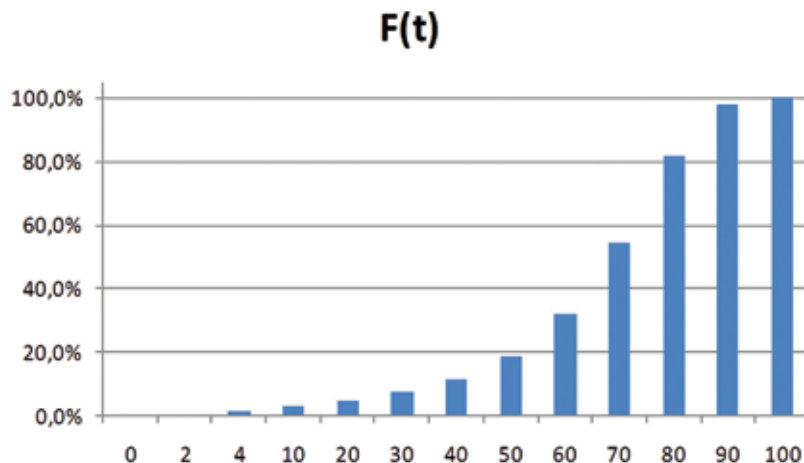
Compare o **Gráfico 5.3** com a representação gráfica de $f(t)$ no **Gráfico 5.2**. Você percebe alguma semelhança?

Repare que há um crescimento de $f(t)$ e, chegando a um pico, a partir de onde há uma inflexão, com redução nos meses seguintes. Isso acontece porque os diversos componentes não falharam ao mesmo tempo, havendo uma variabilidade do tempo até a falha, conforme já havíamos discutido no início desta aula. A variação ocorre ao redor de um valor central, isto é, um valor médio do tempo até falhar (MTTF).

Para calcularmos $F(t)$, calculamos inicialmente o total de falhas acumulado a cada mês. Por exemplo, até o mês $t=3$, tivemos um total de $6 + 8 = 14$ falhas. Calculamos, então, o $F(t)$, dividindo esse valor por 1.000, ou seja, 0,014. Obviamente, ao chegarmos ao 100º mês, totalizamos 100% das falhas.

Vamos ver como fica o **Gráfico 5.4**, de $F(t)$:

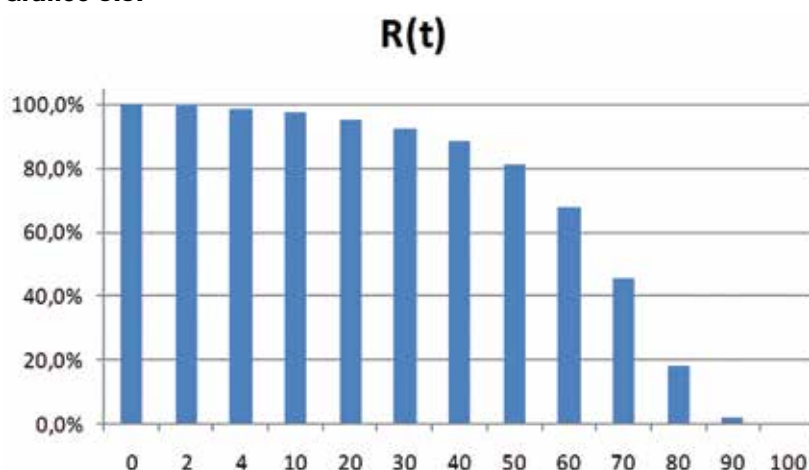
Gráfico 5.4:



Ao compararmos esse gráfico com a variação $F(t)$ mostrada no **Gráfico 5.1**, podemos dizer que são parecidos?

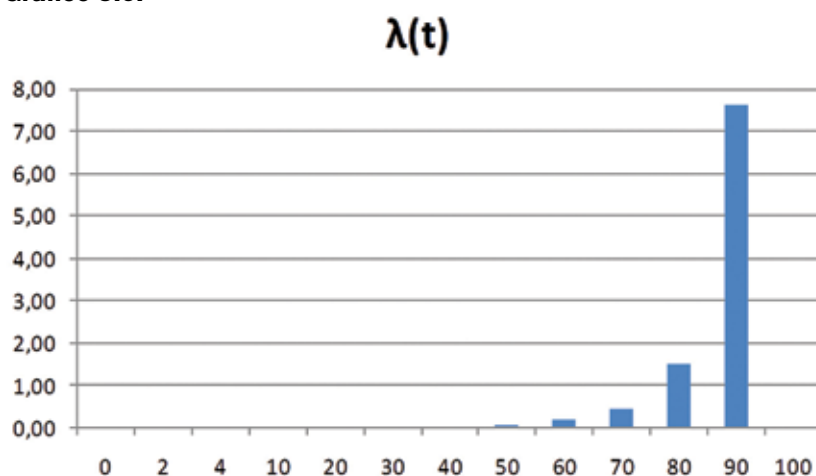
Obviamente sim, pois ambos mostram a variação das falhas acumuladas, de zero até 100%.

Para calcularmos $R(t)$, é só recorrermos à equação 6, subtraindo $F(t)$ de 1. E o gráfico de $R(t)$ pode ser visto a seguir (**Gráfico 5.5**)

Gráfico 5.5:

Ao comparar o **Gráfico 5.5** com o $R(t)$ do **Gráfico 5.2**, você deve perceber, novamente, a semelhança: iniciamos com 100%, por não haver (ainda) nenhuma falha, chegando a 0% ao final do teste.

Por último, para calcularmos $\lambda(t)$, recorreremos à equação 7: dividimos $f(t)$ por $R(t)$ e montamos o **Gráfico 5.6** a seguir:

Gráfico 5.6:

Como o $\lambda(t)$, nesse caso, representa a probabilidade condicional de falha, dado que ela não ocorreu ainda, percebe-se que o gráfico é crescente, ou seja, quanto mais tempo se passar sem que ocorra a falha, maior a probabilidade de sua ocorrência.

Mas, por que não calculamos o $\lambda(t)$ e nem o colocamos no gráfico para o 100º mês?

A razão é que, como estamos medindo t em meses, o 100º mês é a nossa última unidade de tempo e, em não tendo ocorrido falha até ele, a probabilidade de ocorrência é enorme (na realidade, é certa), o que se confirma pelo valor de $R(t)$ chegando a zero. Repare, observando a coluna “Quantidade em teste” que, dos 1.000 componentes que iniciaram o teste, somente 21 chegaram ao 100º mês.

Matematicamente, como estamos dividindo $f(t)$ por $R(t)$, uma vez que $R(t)$ à zero (tende a zero), $\lambda(t)$ à ∞ .

Distribuições estatísticas

Encontramos diversas distribuições estatísticas utilizadas em confiabilidade, dentre elas:

- exponencial;
- weibull;
- gama;
- lognormal;
- normal.

Obs.: Tais distribuições serão discutidas mais adiante, na Aula 6.

No entanto, a dúvida que pode surgir é: qual delas utilizar para fazer os estudos de confiabilidade e estimar o prazo de falha para determinado componente ou equipamento?

Fogliatto e Ribeiro (2009) recomendam que seja tomada uma amostra para que sejam coletados os parâmetros de distribuição dela e, dessa forma, possam-se inferir o tipo e os parâmetros de distribuição da população. Os autores recomendam que sejam utilizados métodos para estimativa dos parâmetros populacionais que não sejam tendenciosos (não subestimem nem superestimem os parâmetros), consistentes (convergindo rapidamente para o valor do parâmetro, com o aumento da amostra), eficiente (baixa variância na estimativa dos parâmetros populacionais) e suficiente (utilize toda a informação acerca do parâmetro que a amostra possui).

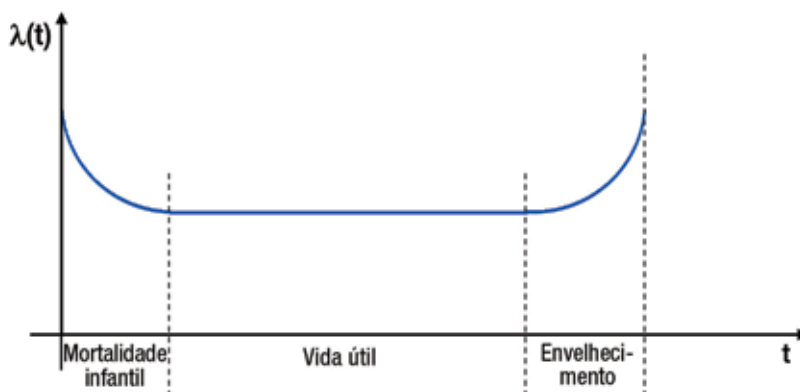
Dentre os métodos recomendados pelos autores, estão o dos momentos, dos mínimos quadrados e da máxima verossimilhança.

Curva de banheira

A variação da λ ao longo do tempo cria um curioso fenômeno comum a diversos componentes e equipamentos:

- Processos de produção inadequados e/ou falhas no Sistema de Qualidade levam a falhas precoces, ou seja, há um alto λ inicial, chamada *mortalidade infantil*. Problemas em alguns componentes fazem com que eles falhem assim que colocados em uso ou com poucos ciclos;
- No entanto, uma vez que tais componentes falhem, os que restam em uso costumam ter uma duração (vida de uso) bastante razoável. Ou seja, passada a fase de mortalidade infantil, há uma redução na λ , que se mantém em um patamar razoavelmente constante. Isso ocorre porque, ao contrário das falhas na mortalidade infantil, que tinham causas específicas, a fase que a segue é caracterizada por falhas de natureza aleatória, razão pela qual não há muitas variações ao longo do tempo.
- Porém, o uso e o consequente desgaste vão fazer com que, após algum tempo, a λ volte a aumentar, iniciando a fase denominada envelhecimento, levando ao fim da vida útil do componente ou equipamento.

Gráfico 5.7: Curva de banheira.



Fonte: adaptado de Lafraia (2009)

A variação de λ ao longo do tempo, iniciando com valores altos, que se reduzem e permanecem relativamente estáveis, até que voltam a crescer, apresenta uma curva característica, denominada *curva de banheira*.

Lafraia (2009, p.17) listou algumas características e exemplos das falhas em cada uma das fases:

Falhas prematuras:

- processos de fabricação deficientes;
- controle de qualidade deficiente;
- mão de obra desqualificada;
- amaciamento insuficiente;
- pré-teste insuficiente;
- *debugging* insuficiente;
- materiais fora da especificação;
- componentes não especificados;
- componentes não testados;
- componentes que falharam devido à estocagem/transporte indevido;
- sobrecarga no 1º teste;
- erro humano.

Falhas casuais:

- interferência indevida, tensão/resistência;
- fator de segurança insuficiente;
- cargas aleatórias maiores que as esperadas;
- resistência menor que a esperada;
- defeitos abaixo do limite de sensibilidade dos ensaios;
- erros humanos durante uso;
- aplicação indevida;
- abusos;
- falhas não detectáveis pelo programa de manutenção preventiva;
- falhas não detectáveis pelo *debugging*;
- causas inexplicáveis;
- fenômenos naturais imprevisíveis.

Falhas por desgaste:

- envelhecimento;
- desgaste/abrasão;
- degradação de resistência;
- fadiga;
- fluência;
- corrosão;
- deterioração mecânica, elétrica, química ou hidráulica;
- manutenção insuficiente ou deficiente;
- vida de projeto muito curta.

Atividade 1
Atende aos objetivos 1 e 2

3.000 componentes não reparáveis foram testados até que o último falhasse, após 100 dias de teste, apresentando os seguintes resultados:

Tabela 5.2:

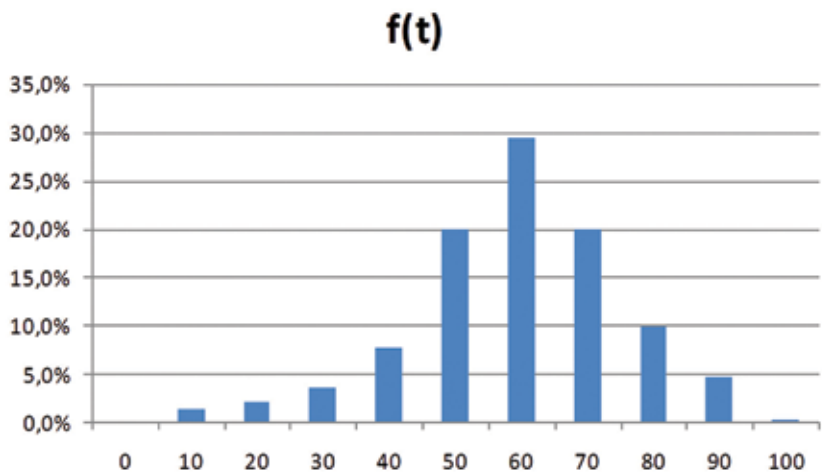
t (mês)	Quantidade de falhas
0	0
10	45
20	68
30	112
40	231
50	602
60	883
70	598
80	302
90	147
100	12

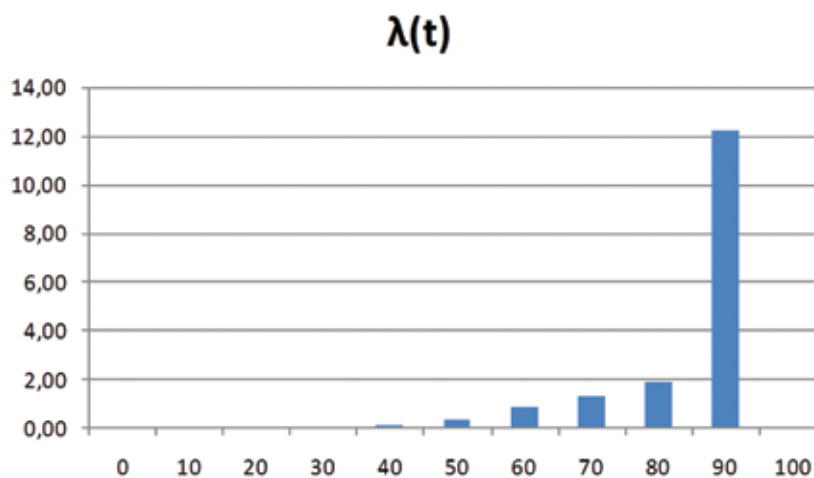
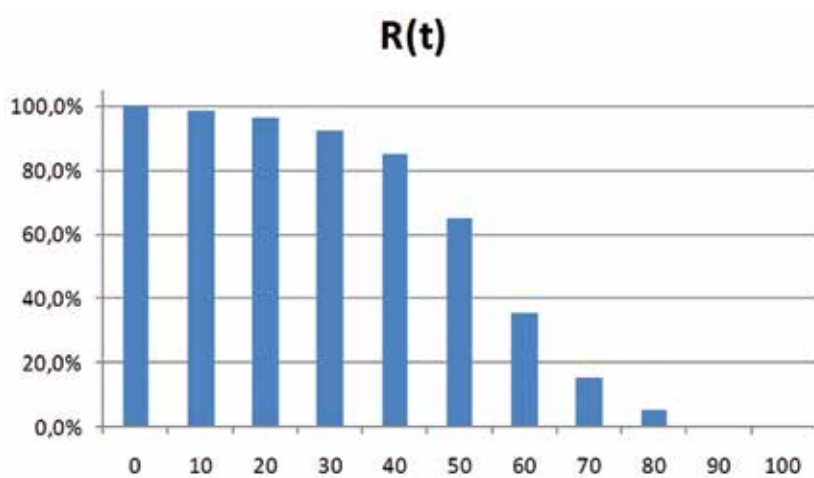
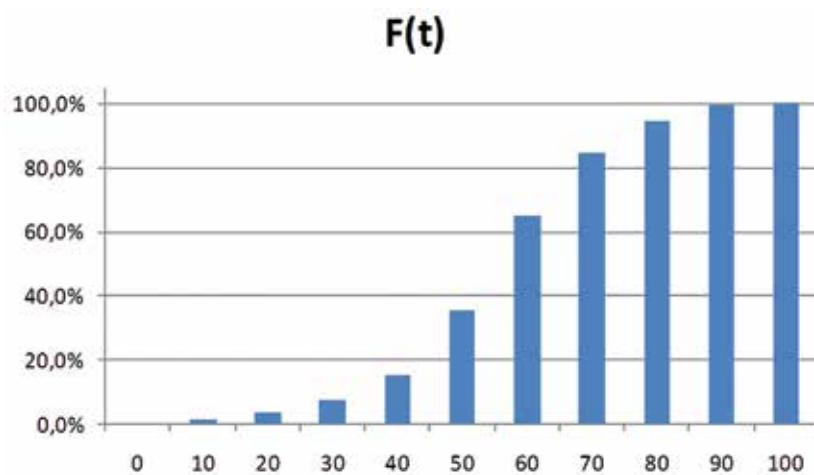
Com base nos dados apresentados, calcule $f(t)$, $F(t)$, $R(t)$ e $\lambda(t)$ e trace os respectivos gráficos. Eles se assemelham aos **Gráficos 5.1** e **5.2**?

Resposta comentada

A tabela completa é mostrada a seguir, juntamente com os gráficos, que se assemelham aos citados.

t (dias)	Quantidade de falhas	f(t)	Falhas (cumulativo)	F(t)	R(t)	Quantidade em teste	$\lambda(t)$
0	0	0,0%	0	0,0%	100,0%	3000	0,00
10	45	1,5%	45	1,5%	98,5%	2955	0,02
20	68	2,3%	113	3,8%	96,2%	2887	0,02
30	112	3,7%	225	7,5%	92,5%	2775	0,04
40	231	7,7%	456	15,2%	84,8%	2544	0,09
50	602	20,1%	1058	35,3%	64,7%	1942	0,31
60	883	29,4%	1941	64,7%	35,3%	1059	0,83
70	598	19,9%	2539	84,6%	15,4%	461	1,30
80	302	10,1%	2841	94,7%	5,3%	159	1,90
90	147	4,9%	2988	99,6%	0,4%	12	12,25
100	12	0,4%	3000	100,0%	0,0%	0	





Conclusão

No estudo de confiabilidade, lidamos sempre com probabilidades. Dessa forma, é praticamente impossível saber quando uma falha ocorrerá em determinado componente. No entanto, dados históricos de testes e/ou componentes semelhantes podem servir de base para identificação das funções probabilísticas e parâmetros de determinada população, estabelecendo probabilidades de falhas ao longo do tempo de uso.

Resumo

Componentes e equipamentos não são integralmente homogêneos nem estão submetidos sempre às mesmas condições. Por conta disso, suas taxas de falhas, bem como outros elementos, como MTTF, MTBF e confiabilidade variam ao longo do tempo.

Um exemplo dessa variação é o da curva de banheira, que se inicia com taxas de falhas mais altas, por mortalidade infantil de componentes, seguida de um período de estabilidade, que vai voltar a aumentar pelo desgaste e envelhecimento.

Funções diversas regem o funcionamento dos componentes e equipamentos de tal forma que os diversos fatores e suas probabilidades de ocorrência podem ser estimados.

Informações sobre a próxima aula

Na próxima aula, daremos continuidade ao estudo das funções de confiabilidade. Veremos as principais distribuições estatísticas e suas aplicações em Confiabilidade.

Leituras recomendadas

WUTTKE, Régis André. Cálculo da disponibilidade e da posição na curva da banheira de uma válvula de processo petroquímico. *Revista Produção Online*, v. VIII, n. IV, 2008.

Referências Bibliográficas

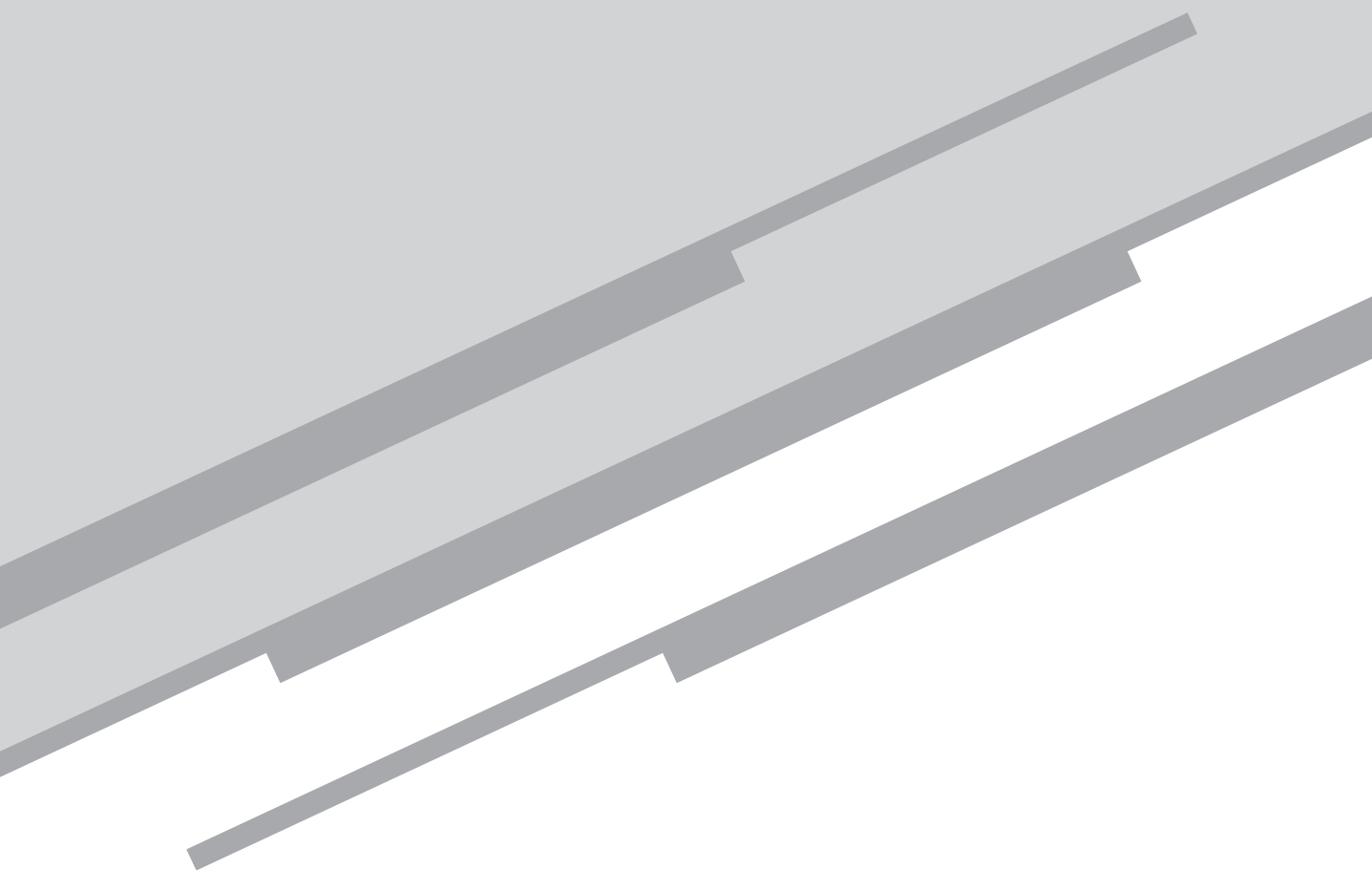
FOGLIATTO, Flávio Sanson; RIBEIRO, José Luis Duarte. *Confiabilidade e manutenção industrial*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009, 265p.

LAFRAIA, João Ricardo Barusso. *Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade*. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2014, 388p.

NATACCI, Faustina B.; SOUZA, Gilberto F. M.; MARTINS, Marcelo R. Proposta de método de análise de confiabilidade de navios. In: 20º Congresso Pan-Americano de Engenharia Naval, São Paulo, Instituto Pan-Americano de Engenharia Naval, 22 e 26 de outubro de 2007. *Anais...*

Aula 6

Função densidade de
confiabilidade – parte 2



Henrique Martins Rocha

Meta

Apresentar as principais funções de distribuição em confiabilidade, suas limitações e aplicações.

Objetivos

Esperamos que, ao final desta aula, você seja capaz de:

1. identificar as principais funções de distribuição utilizadas em Confiabilidade;
2. calcular a taxa de falhas em função do tempo, tendo por base as principais distribuições em Confiabilidade;
3. relacionar as principais distribuições em Confiabilidade com suas aplicações.

Pré-requisitos

Conhecer limites, derivadas e integrais, além do conceito de *função densidade* em Probabilidade e Estatística. Ser capaz de efetuar cálculos de taxa de falhas em componentes e equipamentos (Aula 3) e funções de confiabilidade e risco (Aula 5).

Introdução

Na aula anterior, você aprendeu sobre a variação da taxa de falhas ao longo do tempo, ou seja, a noção de que λ não é um valor fixo, constante. Nesta aula, você verá quais são as principais funções que regem a variação de λ ao longo do tempo.

Como você estudou na Aula 5, encontramos diversas distribuições estatísticas utilizadas em confiabilidade, dentre elas: exponencial; Weibull; gamma; log-normal e normal. A dúvida é qual delas utilizar para fazer os estudos de confiabilidade e estimar o prazo de falha para determinado componente ou equipamento.



Figura 6.1: Gráfico de função. As funções de Confiabilidade, a exemplo de outras funções, como por exemplo, demanda em função do preço, quantidade de defeitos em função do tempo etc., devem ser identificadas e, a partir daí, devem-se fazer análises de comportamento e previsões de valores.

Fonte: <https://pixabay.com/pt/discuss%C3%A3o-sess%C3%A3o-homem-branco-1874791/>

É isto que vamos estudar nesta aula: veremos a composição e as características das principais funções em Confiabilidade, bem como as aplicações específicas para elas.

Bons estudos!

Principais distribuições estatísticas

As funções de distribuição são modelos probabilísticos que nos permitem descrever e prever o comportamento da Confiabilidade de um produto (VACCARO, 1997). São, portanto, de grande utilidade no projeto de novos produtos e sistemas, no estabelecimento de estratégias e rotinas de manutenção de equipamentos, decisões e planejamento de garantia e assistência técnica etc., podendo ser classificadas como distribuições discretas e contínuas (LAFRAIA, 2014).

Vamos ver quais são essas distribuições aplicadas à Confiabilidade.

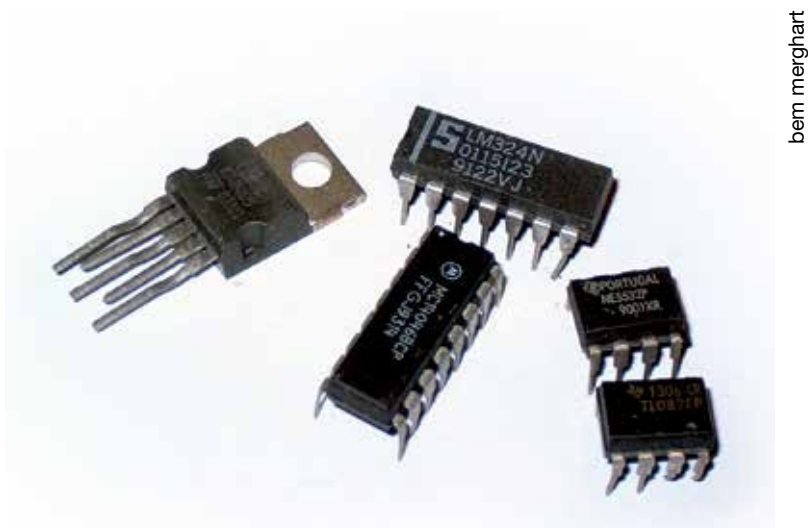
Distribuição exponencial

Alguns tipos de componentes têm como característica apresentarem uma taxa de risco constante ao longo da vida útil, ou seja, a probabilidade de um componente que ainda não falhou falhar após certo período de tempo é a mesma que em qualquer período de tempo anterior, como representado no gráfico a seguir.

Gráfico 6.1



De acordo com Barbosa (2008, p.31), “o modelo de taxa de falha constante ($\lambda(t) = \lambda = \text{constante}$) para sistemas operando continuamente leva a uma distribuição exponencial”. Esse comportamento pode ser exemplificado pela fase intermediária da curva de banheira, após a fase de mortalidade infantil (vide Aula 5) e, em especial, em diversos tipos de componentes eletrônicos, como capacitores, transistores, resistores e circuitos integrados (VACCARO, 1997; RAPOSO, 2004).



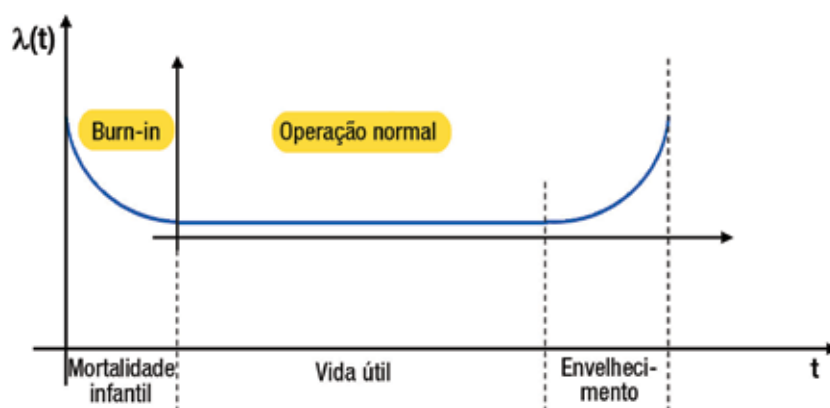
bem merghart

Figura 6.2: Componentes eletrônicos. Por não terem elementos móveis nem sofrerem esforços mecânicos, os componentes eletrônicos não sofrem abrasão nem estão sujeitos a danos por qualquer tipo de força ou impacto em seu uso normal.

Fonte: <http://pt.freeimages.com/photo/electronic-components-ic-s-1546237>

Obs.: Segundo o autor, o período de mortalidade infantil pode ser atenuado por meio da execução de testes de *burn-in*: os componentes são estressados para que aqueles que tiverem características que os levem a falhar assim que colocados em uso ou com poucos ciclos apresentem tais falhas ainda nessa fase de teste, impedindo, assim, que venham a falhar quando em uso em condições reais, como pode ser observado no gráfico a seguir.

Gráfico 6.2: Curva de banheira



Trata-se de um modelo de confiabilidade em que a taxa de falha é inicialmente alta (por conta das falhas de material ou do processo produtivo), cai ao longo do tempo (quando tais tipos de falhas não mais ocorrem), permanecendo razoavelmente estável até o desgaste fazer a taxa de falha voltar a se elevar conforme se aproxima o final da vida do componente.



É recomendável que você leia o artigo abaixo:

CARNAÚBA, Ederson Rodrigues; SELLITO, Miguel Afonso. Análise de confiabilidade e evolução de uma máquina de envase de leite UHT ao longo da curva da banheira. **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, v. 14, n. 22, p. 113-238 jul./dez. 2013. Disponível em: <[http://www.liberato.com.br/sites/default/files/arquivos/Revista_SIER/v.%2014,%20n.%2022%20\(2013\)/06.maquina_leite.pdf](http://www.liberato.com.br/sites/default/files/arquivos/Revista_SIER/v.%2014,%20n.%2022%20(2013)/06.maquina_leite.pdf)>. Acesso em: 26 fev. 2017.

A função densidade de falhas (ou seja, a variação da probabilidade de falhas por unidade de tempo, como vimos na Aula 5) em uma distribuição exponencial é expressa matematicamente pela equação 1:

$$(1) \quad f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t}$$

Utilizando o MS Excel, podemos calcular $f(t)$ para um dado t e λ , utilizando a fórmula DISTEXPON, cujos argumentos são DISTEXPON(t ; λ ; falso), como mostrado na imagem a seguir.

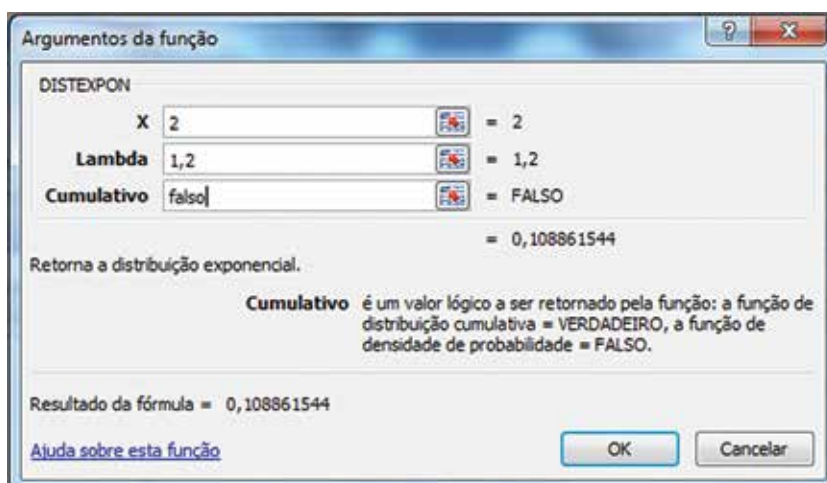
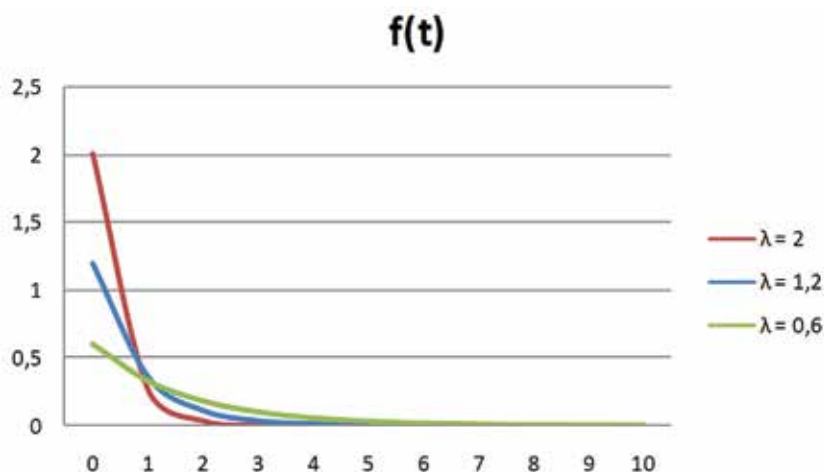


Figura 6.3: Exemplo da tela de argumentos da função de distribuição exponencial do Excel.

Como a função exponencial tem como variáveis λ e t , basta entrar com os valores de tais argumentos para que seja calculada a função de distribuição cumulativa e/ou a função de densidade de probabilidade (como mostrado na imagem).

A representação gráfica da é mostrada no gráfico a seguir.

Gráfico 6.3: Representação da função densidade de falhas em uma distribuição exponencial



Vamos interpretar esse gráfico: para uma λ constante (por exemplo, $\lambda = 2$), a probabilidade de falhas por unidade de tempo reduz com o tempo.

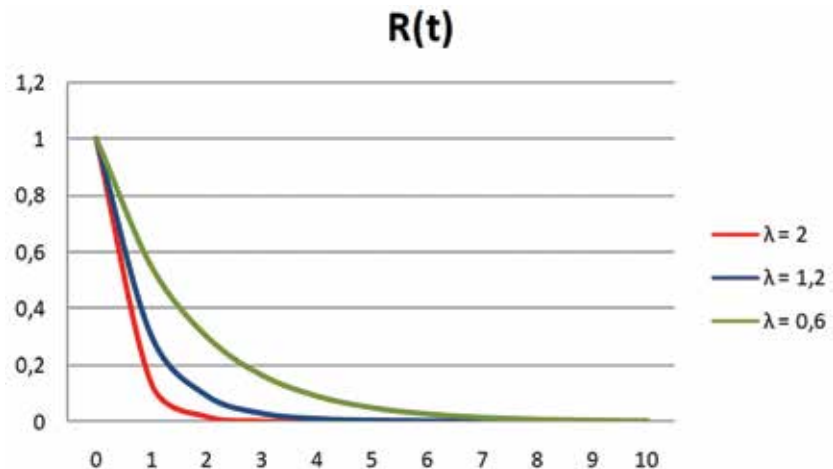
Como você explicaria isso?

Bem, podemos explicar isso pela análise da função confiabilidade na distribuição exponencial. A função de confiabilidade (ou seja, a probabilidade de um item sobreviver a um dado intervalo estabelecido de tempo, ciclos, distância etc., entre zero e x) é expressa matematicamente pela equação 2:

$$(2) \quad R(t) = e^{-\lambda t}$$

A representação gráfica da função confiabilidade em uma distribuição exponencial é mostrada no gráfico a seguir.

Gráfico 6.5: Representação da função confiabilidade em uma distribuição exponencial



Repare que, como esperado, R diminui com o passar do tempo, ou seja, a confiabilidade tende a 100% quando t à zero, ao passo que ela tende a zero quando t à ∞ .

Pois bem, vamos rever a equação 7 da Aula 5 (representada aqui como equação 3, para mantermos a sequência desta aula):

$$(3) \quad \lambda(t) = f(t)/R(t)$$

Como definido anteriormente, a distribuição exponencial refere-se ao modelo de taxa de falha constante, isto é, $\lambda(t) = \lambda = \text{constante}$. Dessa forma, podemos afirmar que:

$$(4) \quad f(t)/R(t) = \text{constante}$$

Assim, já que R diminui com o passar do tempo, ou seja, quanto mais tempo se passa sem falhar, mais provável que uma falha ocorra. Para que a igualdade mostrada na equação 4 permaneça válida, f precisará, também, diminuir com o passar do tempo, tendendo a zero quando $t \rightarrow \infty$, o que explica o comportamento de $f(t)$ na distribuição exponencial mostrado no gráfico anterior.

A fórmula DISTEXPON do MS Excel permite-nos também calcular diretamente $F(t)$ para um dado t e λ . Para isso, os argumentos são DISTEXPON(t ; λ ; verdadeiro), como mostrado na imagem a seguir.

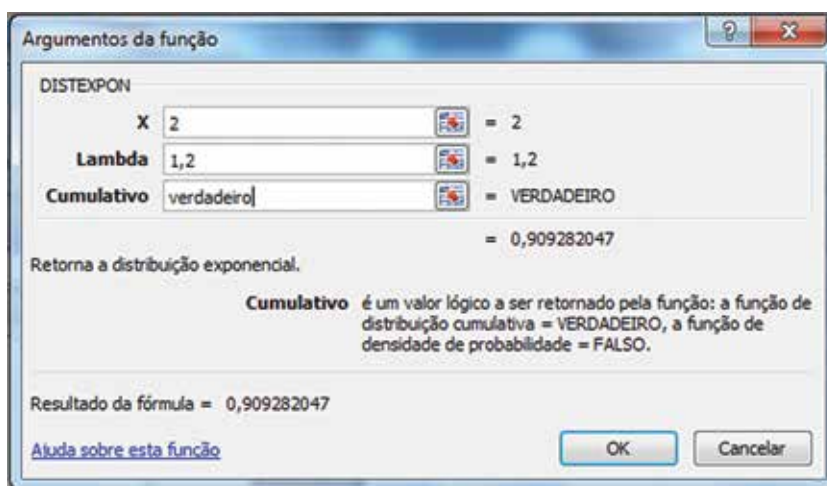


Figura 6.4: Exemplo da tela de argumentos da função de distribuição exponencial do Excel (função de distribuição cumulativa).

Calculado $F(t)$, podemos calcular $R(t)$, tomando por base a equação 5 da Aula 5:

$$(5) \quad R(t) = 1 - F(t)$$

Barbosa (2008) indica, ainda, o cálculo da média e variância da distribuição exponencial, expressas aqui pelas equações 6 e 7:

$$(6) \quad \mu = 1 / \lambda$$

$$(7) \quad \sigma^2 = 1 / \lambda^2$$

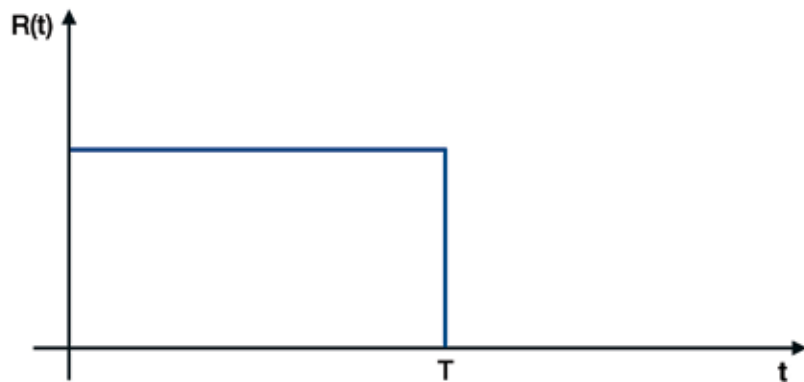
Atenção: Ainda que a distribuição exponencial seja adequada para modelar falhas aleatórias, independentemente do tempo, Fogliatto e Ribeiro (2009) alertam que a simplicidade matemática das expressões da

função difundiu seu uso, porém, muitas vezes, de forma inadequada: os autores lembram que a premissa da taxa de falha constante restringe o seu uso a alguns componentes elétricos. Componentes sujeitos à fadiga ou desgaste só podem ser modelados pela função exponencial apenas na fase intermediária da curva de banheira.

Distribuição retangular

Trata-se de uma distribuição muito específica, na qual $f(t)$ é constante em um intervalo de tempo e , após esse tempo (T), há a falha, como mostrado no gráfico a seguir.

Gráfico 6.6: Representação da função confiabilidade em uma distribuição retangular



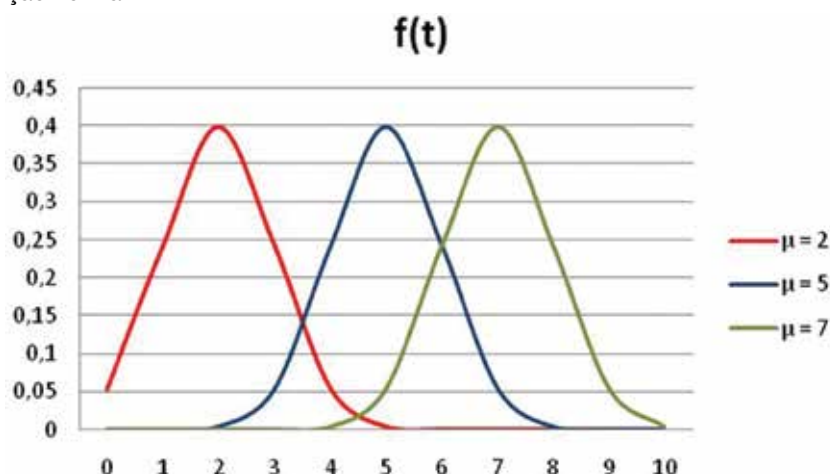
A causa de falha é geralmente pelo esgotamento de um elemento essencial ao funcionamento, como por exemplo, o combustível em um motor de combustão interna.

Distribuição normal

Também conhecida como distribuição de Gauss, é a distribuição mais antiga e mais utilizada em Estatística (BARBOSA, 2008), representando “diversos comportamentos físicos, econômicos e biológicos”, recomendada para a “descrição de componentes mecânicos submetidos a cargas cíclicas, tais como em testes de fadiga” (VACCARO, 1997, p.31).

“Uma população que se ajuste à distribuição normal tem variações simetricamente dispostas ao redor da média” (LAFRAIA, 2014, p.30), como pode ser visto no gráfico a seguir, no qual as três distribuições têm o mesmo desvio-padrão (“1”), porém médias diferentes.

Gráfico 6.7: Representação da função densidade de falha em uma distribuição normal

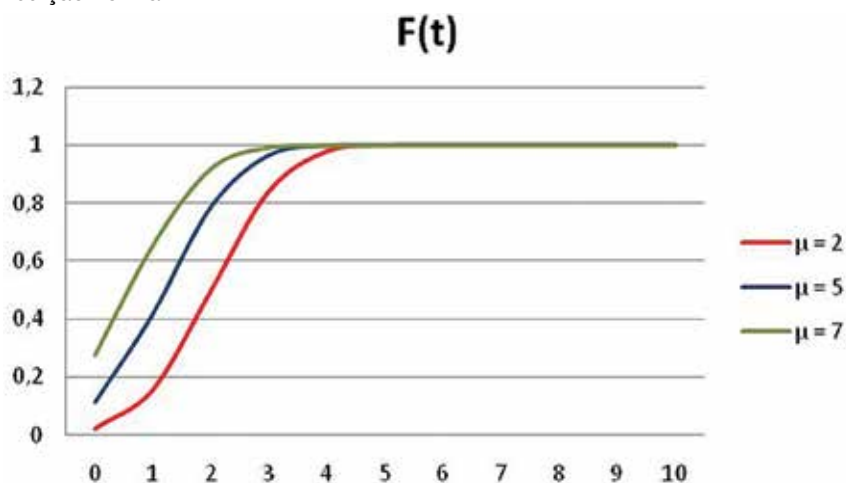


Observa-se uma concentração de valores ao redor do valor médio da função, reduzindo-se conforme há o afastamento de tal valor.

As equações da distribuição normal são relativamente complexas. Porém, você pode usar as fórmulas do MS Excel para efetuar os cálculos. Por exemplo, no Gráfico $f(t)$ que acabamos de mostrar, foi utilizada a fórmula DISTNORM, com os seguintes argumentos: DISTNORM (valor para o qual se deseja calcular a distribuição; média da distribuição; desvio padrão da distribuição; falso).

Ao substituírmos no argumento da fórmula o “falso” por “verdadeiro”, calculamos o $F(t)$, como pode ser visto no gráfico a seguir.

Gráfico 6.8: Representação da função cumulativa de falhas em uma distribuição normal



Ao contrário da função densidade, que indica o valor em cada ponto, a função acumulada, como o próprio nome indica, acumula os incrementos até o ponto estudado.

Para a distribuição normal, a exemplo das demais distribuições, conhecidos $f(t)$ e $F(t)$, podemos calcular $R(t)$ e $\lambda(t)$.

Distribuição log-normal

Trata-se de uma distribuição limitada à esquerda (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009), mas que não trabalha com valores negativos. De acordo com Barbosa (2008, p.31),

É a que melhor descreve o tempo de vida de componentes semicondutores cujos mecanismos de falha envolvem interações químicas, como as encontradas em processos de corrosão, acúmulo superficial de cargas elétricas, degradação de contatos, sendo também adequada para mecanismos de fadiga em materiais.

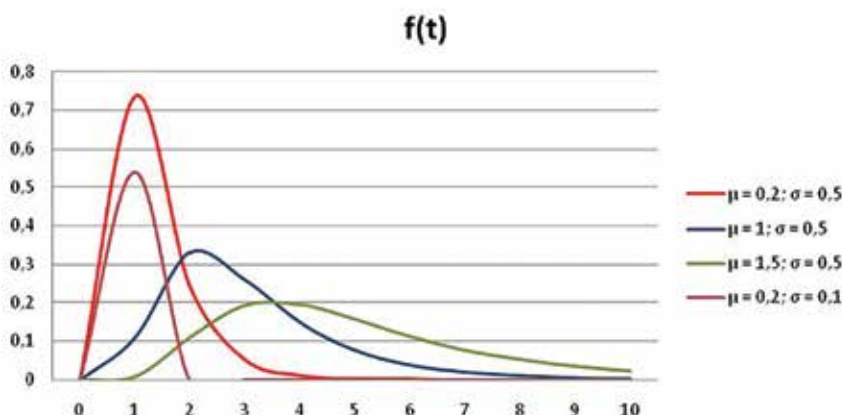
A distribuição log-normal assume diversos formatos de acordo com seus parâmetros, sendo, por isso, amplamente utilizada, mesmo quando os dados englobam várias ordens de grandeza (VACCARO, 1997). Pode ser usada, também, na modelagem de tempos de reparo, com o aumento da probabilidade de completar o reparo com o aumento do tempo (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009).

A função densidade de falhas em uma distribuição log-normal é expressa matematicamente pela equação 8.

$$(8) \quad f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma \cdot t} e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{\ln(t) - \mu}{\sigma} \right]^2}$$

A representação gráfica da função densidade de falhas em uma distribuição log-normal é mostrada no gráfico a seguir.

Gráfico 6.9: Representação da função densidade de falhas em uma distribuição log-normal

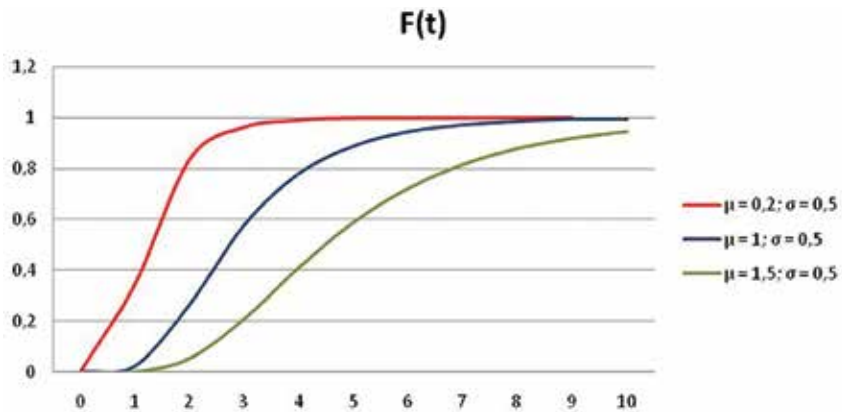


Vamos analisar o gráfico:

Repare na curva com $\mu = 2$ e $\sigma = 0,5$. Sendo uma distribuição limitada à esquerda, ela tem um “achatamento” nesse lado, ou seja, diferentemente da curva normal, a curva da função log-normal não é simétrica ao redor do ponto médio. Esse achatamento pode ser percebido quando comparamos essa curva com a curva com $\mu = 2$ e $\sigma = 0,1$. Apesar do mesmo μ , a redução da dispersão por um σ menor faz com que a curva se desloque para a esquerda, aproximando-se mais do zero.

Da mesma forma, quando comparamos a curva com $\mu = 2$ e $\sigma = 0,5$ com as outras curvas que têm o mesmo σ (0,5), mas diferentes μ , não ocorre o fenômeno que ocorreria com curvas normais, em que elas teriam o mesmo perfil, mas simplesmente deslocadas por conta dos diferentes μ . Aqui, com a curva sendo limitada à esquerda, maiores valores de μ fazem com que haja um “espalhamento” dela.

A fórmula `DIST.LOGNORMAL` do MS Excel nos permite, também, calcular diretamente $F(t)$ para um dado μ e σ . Para isso, os argumentos são `DIST.LOGNORMAL(tempo para o qual se deseja calcular a distribuição; média da distribuição; desvio padrão da distribuição)`, como você pode ver na representação gráfica a seguir.

Gráfico 6.10: Representação da função cumulativa de falhas em uma distribuição log-normal

Distribuição de Weibull

Conforme Fogliatto e Ribeiro (2009, p.29), a distribuição de Weibull é “uma das distribuições mais importantes na modelagem de confiabilidade devido à sua flexibilidade e capacidade de representação de amostras de tempos até falha com comportamentos distintos”. Isso acontece porque com ela podemos modelar funções de risco crescente, constante e decrescente (por exemplo, na curva de banheira).

Considerada uma extensão da distribuição exponencial, foi introduzida pelo sueco Wallodi Weibull como um método de análise de fadiga mecânica (WEIBULL, 1951).

A distribuição de Weibull é baseada em três parâmetros:

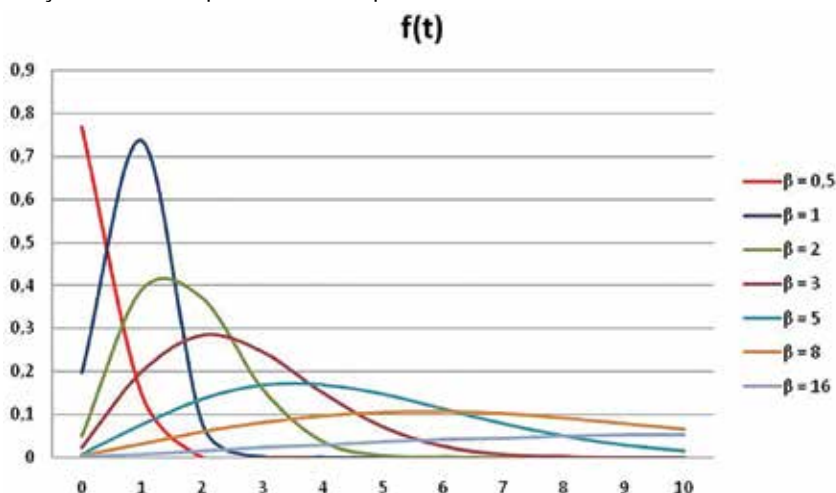
Parâmetro de forma (β): conhecido também como *inclinação da distribuição* e define a forma da curva $f(t)$. De acordo com Simonetti et al. (2009), com $0 < \beta < 1$, $f(t)$ apresenta frequências elevadas na parte inicial da vida, associadas a defeitos originados no projeto, na produção ou na operação (representando, portanto, o que você estudou como sendo a fase de mortalidade infantil na curva de banheira).

Com $\beta=1$, $f(t)$ equivale à função de distribuição exponencial, isto é, a taxa de falhas é constante, como na fase intermediária da curva de banheira, e as falhas ocorrem de forma aleatória, ao passo que $\beta>1$ indica que há um processo de deterioração do componente ou sistema.

Com o crescimento de β , a forma se aproxima de uma curva log-normal (com β próximo a 2 ou 3), passando a uma curva normal com valores acima dessa faixa. Valores de $\beta>10$ apresentam um crescimento muito rápido da taxa de falhas.

Veja as mudanças na forma de $f(t)$ para diferentes valores de β no gráfico a seguir.

Gráfico 6.11: Representação da função densidade de falhas em uma distribuição de Weibull para diferentes parâmetros de forma



Parâmetro de escala (α ou η): Simonetti et al. (2009) explicam que este parâmetro está associado à vida característica de um determinado componente, ou seja, o tempo, quantidade de ciclos etc. transcorridos desde o início da atividade até o momento da falha. De acordo com Barbosa (2008, p. 33), o parâmetro de escala corresponde “ao valor de t no qual existem aproximadamente 63,2% de probabilidade do que o componente venha a falhar”.

Assim, mantendo-se β constante, com o aumento de α , a curva é “esticada para a direita, enquanto sua altura é reduzida, mantendo sua posição e, de forma geral, sua forma. Consequentemente, a diminuição de α “espreme” a curva para a esquerda, aumentando sua altura (SIMONETTI et al., 2009).

Parâmetro de posição ou de localização (γ): indica a localização em que a $f(t)$ se origina. Na maioria das aplicações, $\gamma = 0$, porém, há situações específicas em que $\gamma > 0$, em que a distribuição começa à direita da origem, ou seja, só poderão ocorrer falhas depois de certo tempo em que o equipamento ou componente foi colocado em operação. Por outro lado, se $\gamma < 0$, as falhas podem acontecer antes do uso, ou seja, antes de entrar em funcionamento. Adesivos, colas e materiais perecíveis de uma forma geral, bem como baterias e similares, são exemplos deste último caso.

A função densidade de probabilidade $f(t)$ e a função acumulada de falhas da distribuição de Weibull são dadas pelas equações 9 e 10.

$$(9) f(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t-\gamma}{\alpha} \right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\alpha} \right)^{\beta}}$$

$$(10) F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\alpha} \right)^{\beta}}$$

Ambas podem ser calculadas pela função Weibull do MS Excel: no caso de $f(t)$, os argumentos são WEIBULL(t ; α ; β ; falso), enquanto para $F(t)$, substitui-se o falso por verdadeiro. Em ambos, γ é considerado zero.

$R(t)$ e $\lambda(t)$ da distribuição de Weibull são dadas pelas equações 11 e 12.

$$(11) R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\alpha} \right)^{\beta}}$$

$$(12) \lambda(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t-\gamma}{\alpha} \right)^{\beta-1}$$

Distribuição gamma

A distribuição gamma (ou gama) é, a exemplo da distribuição de Weibull, uma generalização da distribuição exponencial com parâmetros de forma (β ou γ) e de escala (λ ou α), sendo adequada para descrição de tempos de falha causada por sub-falhas diversas em testes de vida (VACCARO, 1997; RAPOSO, 2004; FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009).

A função densidade de probabilidade $f(t)$ da distribuição gamma é expressa matematicamente pela equação 13.

$$(13) f(t) = \frac{\alpha \cdot (\alpha t)^{\beta-1} \cdot e^{-\alpha t}}{\Gamma(\beta)}$$

$\Gamma(x)$ representa a função gamma de x , na qual

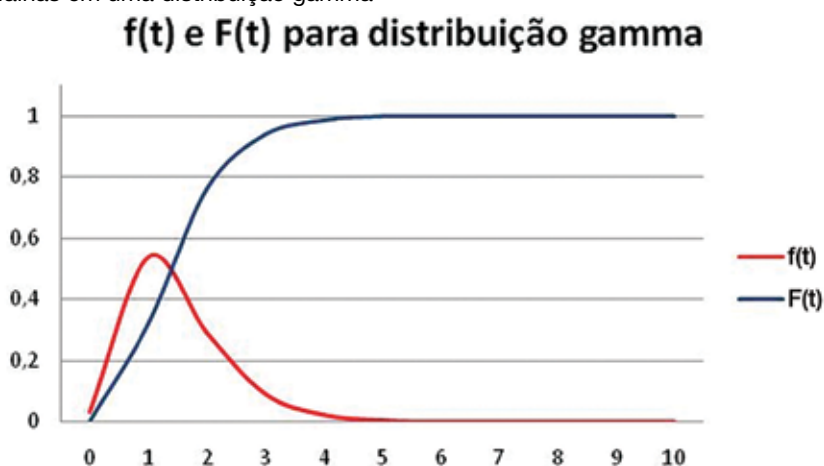
$$\Gamma(n) = (n - 1)!$$

De acordo com Vaccaro (1997), quando $0 < \beta < 1$, a taxa de falhas decresce de $+\infty$ até α . Se $\beta = 1$, a taxa de falhas se mantém constante (caracterizando, portanto, uma distribuição exponencial) e igual a α ; e se $\beta > 1$, a taxa cresce de α até $+\infty$.

Os cálculos dos valores da distribuição gamma podem ser efetuados no MS Excel por meio da fórmula DISTGAMA, com os seguintes argumentos: DISTGAMA(t; α ; β ; falso) para $f(t)$ e DISTGAMA(t; α ; β ; verdadeiro) para $F(t)$.

O gráfico a seguir mostra $f(t)$ e $F(t)$ e uma distribuição gamma com $\alpha = 3$ e $\beta = 0,5$.

Gráfico 6.12: Representação da função densidade e função acumulada de falhas em uma distribuição gamma



ATENÇÃO: você pode encontrar autores que invertem a simbologia na distribuição gamma, ou seja, utilizam α como parâmetro de forma e β como parâmetro de escala. Verifique sempre a descrição dada antes de utilizar equações e efetuar cálculos.

Distribuição qui-quadrado

Também chamada de distribuição qui-quadrática ou, simplesmente, χ^2 . Trata-se de um caso especial da distribuição gamma com n graus de liberdade, em que $\alpha = 0,5$ e $\beta = n/2$.

Seus valores podem ser calculados pela fórmula DIST.QUI do MS Excel, com os seguintes argumentos: DIST.QUI(t; graus de liberdade).

Distribuição de Rayleigh

De acordo com Raposo (2004) e Minitab, trata-se de um caso especial da distribuição de Weibull, em que $\beta = 2$, muito utilizada na teoria do

som, engenharia de comunicações e estudos sobre ventos (ex: fabricantes de aerogeradores). O $\beta = 2$ indica que há um processo de deterioração do componente ou sistema, sendo a distribuição de Rayleigh utilizada para modelar as falhas de desgaste na última fase da curva da banheira.

Distribuição beta

A distribuição beta é outra distribuição de dois parâmetros (α e β) utilizada em Engenharia de Confiabilidade (RAPOSO, 2004) para modelagem de objetos que pertençam ao intervalo (0,1), com “inúmeras aplicações para representar quantidades físicas cujos valores estejam restritos a um intervalo identificável” (PORTAL ACTION).

Seus valores podem ser calculados por meio da fórmula DISTBETA do MS Excel, com os seguintes argumentos: DISTBETA(t; α ; β).

Outras distribuições

Além das distribuições apresentadas, há ainda outras na área de Confiabilidade:

- distribuição uniforme;
- distribuição de valores extremos;
- distribuição de taxa de falha modelo I e II;
- distribuição de vida-fadiga;
- distribuição de Poisson;
- distribuição binomial.

Você pode ler sobre elas nas obras constantes nas referências bibliográficas, em especial na dissertação de Raposo (2004).

Aplicações das distribuições estatísticas

Vaccaro (1997), Raposo (2004), Fogliatto e Ribeiro (2009) e La-fraia (2014) enumeraram as aplicações de algumas das distribuições que você estudou, que podem servir para você fazer uma escolha inicial das distribuições a serem testadas para verificar se são adequadas para explicar e prever determinado fenômeno em termos de falhas em componentes ou sistemas.

Aplicações da distribuição log-normal (LAFRAIA, 2014, p. 32-33)

- Determinação dos ciclos para a falha à fadiga de metais e componentes metálicos, quando submetidos a tensões alternadas em nível significativamente menores que o limite de resistência do metal.
- Determinação da distribuição de tempo para a falha de componentes mecânicos sujeitos a desgaste [...].
- Determinação de vida de rolamentos e
- Determinação do tempo médio para manutenção e componentes mecânicos.

Aplicações da distribuição exponencial (LAFRAIA, 2014, p. 35)

- Falhas de equipamentos com mais de 200 componentes sujeitos a mais de três manutenções corretivas/preventivas;
- Sistemas complexos não redundantes;
- Sistemas complexos com componentes com taxas de falhas independentes;
- Sistemas com dados de falhas mostrando causas muito heterogêneas;
- Sistemas de vários componentes com substituições antes das falhas devido à manutenção preventiva.

Aplicações da distribuição normal

- Confiabilidade durante a fase de envelhecimento do produto, modelando falhas por fadiga ou desgaste;
- Análise de produtos durante o início da vida (curva de banheira).

Aplicações da distribuição de Weibull

- Análise da fadiga de materiais e desgaste.

Aplicações da distribuição qui-quadrado (VACCARO, 1997)

- Variabilidade de estimativas de parâmetros, tais como MTBF.

Atividade 1

Atende aos objetivos 1 e 2

1. “A curva da banheira apresenta, de forma geral, as fases de vida de um componente” (LAFRAIA, 2014, p.15).

Nela, tomando por base o material da disciplina, podemos encontrar as seguintes distribuições de confiabilidade:

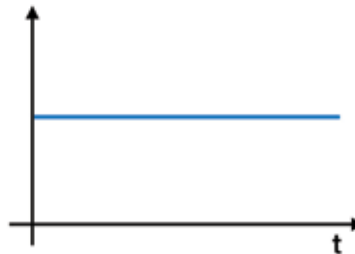
- I. exponencial
- II. retangular
- III. normal
- IV. Rayleigh
- V. Weibull

É correto o que se afirma em:

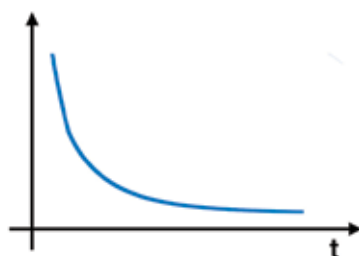
- a) I, III e V
- b) I, II, III e V
- c) I, III, IV e V
- d) I, II, III, IV e V

2. Qual dos gráficos mostrados a seguir pode representar a densidade de falhas em uma distribuição exponencial?

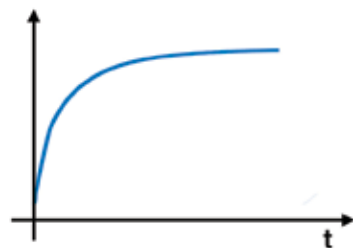
a)



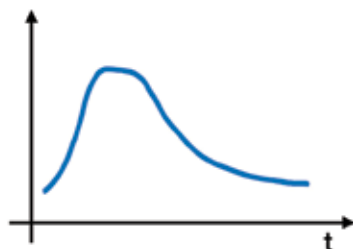
b)



c)



d)



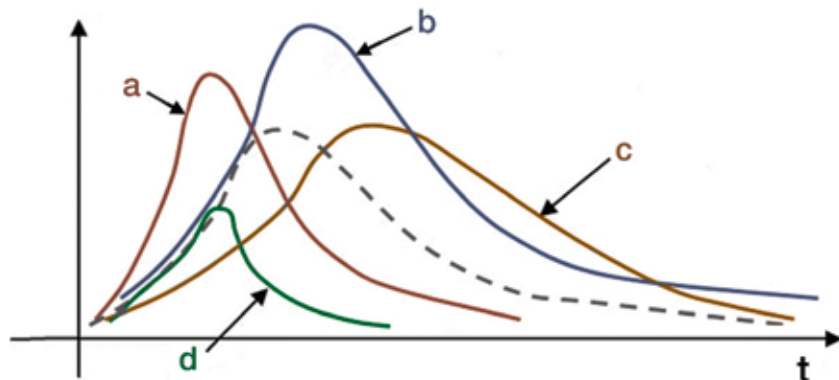
3. Calcule a função densidade de falhas em $t = 8$ para componentes com distribuição exponencial, com um λ de 0,07. Assinale a alternativa que indica corretamente o valor aproximado.

- a) 0,04
- b) 0,43
- c) 0,57
- d) 0,96

4. Calcule a função confiabilidade em $t = 16$ para componentes com distribuição normal, com um MTTF de 15 e desvio padrão de 1,2. Assinale a alternativa que indica corretamente o valor aproximado.

- a) 20%
- b) 23%
- c) 77%
- d) 80%

5. Um conjunto de componentes que obedecem a uma distribuição log-normal tem uma curva $f(t)$ identificada pelo tracejado no gráfico que segue. Caso houvesse uma piora nos processos produtivos dos componentes, de tal forma que seu MTTF se reduzisse, qual das outras curvas poderia representar a nova $f(t)$ dos componentes?



- a) curva a
- b) curva b
- c) curva c
- d) curva d

Resposta comentada

1. Letra C. Podemos ter uma distribuição normal ou de Rayleigh nas fases inicial e final da curva de banheira. A distribuição de Weibull pode expressar qualquer uma das fases, enquanto a exponencial, somente na fase intermediária. A distribuição retangular não se aplica à curva de banheira.

2. Letra B. A alternativa “a” representa a função $\lambda(t)$; a alternativa “c” representa $F(t)$; e a alternativa “d” representa uma distribuição log-normal.

3. Letra A. Calculando com a função e argumentos no MS Excel DISTEXPON(8;0,07;FALSO), encontramos aproximadamente 0,04. Encontraríamos aproximadamente 0,43 se, no argumento, utilizássemos “VERDADEIRO”, mas esse seria o valor da função acumulada, $F(t)$ e, conseqüentemente, $R(t)$ seria $1 - F(T) = 0,57$.

4. Letra A. Devemos calcular $F(t)$, o que, para o exercício, poderia ser feito com a função e argumentos no MS Excel =DIST. NORM(16;15;1,2;VERDADEIRO), para o que achamos, aproxima-

mente, 0,80. Para calcularmos $R(t)$, precisamos subtrair tal valor de 1, ou seja, $1 - 0,80 = 0,20 = 20\%$

5. Letra A. Sendo uma função limitada à esquerda, a redução do MTTF causa um estreitamento da curva, porém não de forma simétrica (como na curva normal), mas sim, um estreitamente deslocado para a esquerda.

Conclusão

O conhecimento das diferentes funções de confiabilidade permite identificar possíveis padrões de comportamento para componentes, equipamentos e sistemas, a partir dos quais é possível fazer inferências e previsões sobre confiabilidade e probabilidade de falhas dos mesmos.

Resumo

Esta aula complementou a Aula 5, descrevendo e detalhando diversas funções de Confiabilidade, suas características, fatores, equações, funções para cálculo no MS Excel e aplicações. Dentre elas, as distribuições exponencial, normal, log-normal e de Weibull, bastante utilizadas em projetos de produtos, equipamentos, instalações e estratégias de manutenção.

Nas análises em Engenharia de Confiabilidade, ainda que tais informações sejam úteis para você escolher qual(is) função(ões) utilizar para prever comportamentos, é necessário que, antes de utilizar qualquer função para tomar decisões sobre projetos e operações que envolvam confiabilidade, seja testada uma amostra para apurar a escolha da função, bem como seus parâmetros.

Métodos dos momentos, dos mínimos quadrados e da máxima verossimilhança são alguns dos métodos que podem ser usados para essa validação, em especial o último, que é o mais utilizado (VACCARO, 1997; BARBOSA, 2008; FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009).

Informações sobre a próxima aula

Até agora, trabalhamos com as análises quantitativas em Confiabilidade, ou seja, os cálculos de taxas de falhas, confiabilidade etc. Na próxima

aula, você verá a 1ª parte da análise qualitativa, estudando os modos de falhas e os efeitos, aprendendo sobre uma ferramenta muito utilizada na área de Confiabilidade: o FMEA.

Referências Bibliográficas

BARBOSA, João Paulo. *Modelagem da confiabilidade de equipamentos por combinações ou extensões de distribuições de Weibull*. Vitória, 2008. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2008.

FOGLIATTO, Flávio Sanson; RIBEIRO, José Luis Duarte. *Confiabilidade e manutenção industrial*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009, 265p.

LAFRAIA, João Ricardo Barusso. *Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade*. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2014, 388p.

MINITAB. *Distribuição de Weibull em análise de confiabilidade*. Suporte ao Minitab 17. Disponível em: <<http://support.minitab.com/pt-br/minitab/17/topic-library/modeling-statistics/reliability/distributions-in-reliability-analysis/weibull-distribution/>>. Acesso em: 24 fev. 2017.

PORTAL ACTION. 6.10 - *Distribuição Beta*. Portal Action. Disponível em: <<http://www.portalaction.com.br/probabilidades/610-distribui-cao-beta>>. Acesso em: 25 fev. 2017.

RAPOSO, José Luis Oliveira. *Manutenção centrada em confiabilidade aplicada a sistemas elétricos: uma proposta para uso de análise de risco no diagrama de decisão*. Salvador, 2004. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2004.

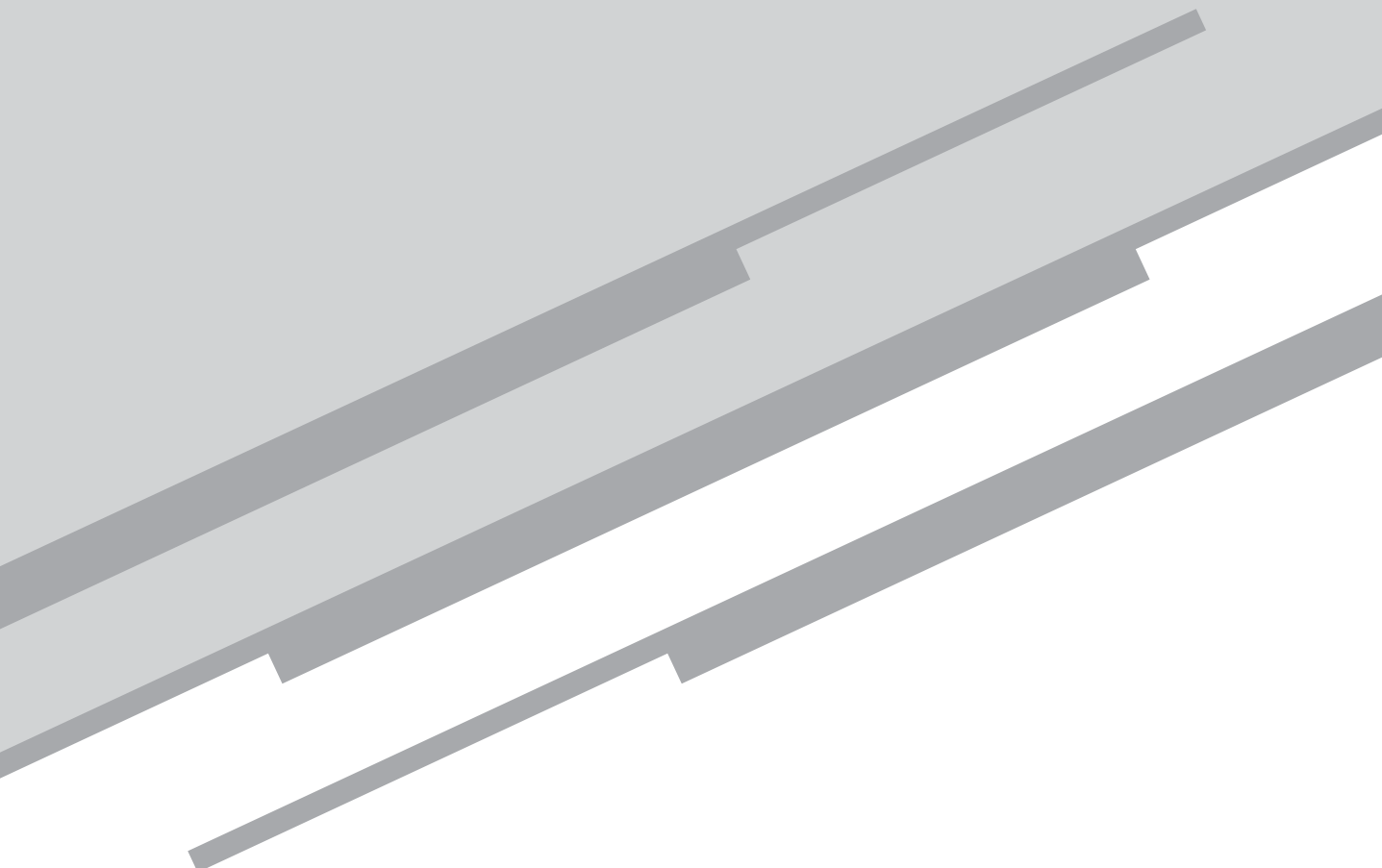
SIMONETTI, Marcelo, José; SOUZA, Anderson L.; SIVEIRA, Luiz F. S.; ARRUDA, João P. S. A importância da engenharia da confiabilidade e os conceitos básicos de distribuição de Weibull. *Revista Sapere*, Fatec Tatui, 21 dez. 2009.

VACCARO, Guilherme Luis Roêhe. *Modelagem a análise da confiabilidade de sistemas*. Porto Alegre, 1997. 222 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

WEIBULL, Waloddi. A Statistical Distribution Function of Wide Applicability. *ASME Journal of Applied Mechanics, Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, September 1951, p. 293-297.

Aula 7

Análise dos modos de falha,
efeitos e criticidade – parte 1



Henrique Martins Rocha

Meta

Apresentar a estrutura lógica dos estudos de FMEA (Failure Mode & Effect Analysis) e suas aplicações em produtos, processos e na área administrativa.

Objetivos

Esperamos que, ao final desta aula, você seja capaz de:

1. descrever os elementos de análise dos modos de falha e efeitos;
2. construir um modelo FMEA para aplicação em análise de riscos;
3. identificar as aplicações do FMEA para produtos, processos e rotinas administrativas.

Pré-requisitos

Noções gerais de análise de Confiabilidade (Aula 1), classificação quantitativa e qualitativa, índices de confiabilidade e manutenabilidade (Aulas 2 e 3) e redundância (Aula 4).

Introdução

Nesta aula, vamos iniciar a parte das análises qualitativas da Engenharia da Confiabilidade. O foco deixará de ser o das medições e projeções numéricas e passará a ser a forma como as falhas podem ocorrer e suas implicações.

A junção das análises quantitativas com as qualitativas permite a compreensão, a análise e as tomadas de decisão sobre confiabilidade de componentes, máquinas, equipamentos e instalações, tão relevantes na área de projetos de produtos, processos, qualidade, manutenção e garantia de produtos e processos.

Bons estudos!

Como você já estudou no começo de nossa disciplina, todo componente, máquina ou equipamento vai falhar em algum momento. Esse é o próprio conceito da confiabilidade, ou seja, a probabilidade de manter o funcionamento esperado durante determinado período de tempo.



Figura 7.1: Falha em automóvel. Ainda que a confiabilidade dos automóveis tenha aumentado substancialmente ao longo das últimas décadas por conta da melhoria dos processos produtivos, materiais e sistemas de qualidade, isso não significa que eles funcionarão sem qualquer tipo de falha para sempre. Em algum momento, algum tipo de falha vai ocorrer, nem que seja causada por desgaste de componentes pelo uso.

Fonte: http://www.freepik.com/free-photo/warning-triangle-in-a-car-breakdown_960675.htm#term=falha&page=1&position=4

No entanto, ainda que se saiba que as falhas acontecerão, não significa que não possamos exercer qualquer tipo de influência. Bons processos de trabalho no uso de equipamentos e máquinas, manutenções e verificações periódicas e projeto prevendo redundâncias são alguns exemplos de como tornar máquinas e equipamentos mais confiáveis.

Mas que tal nos anteciparmos às falhas, ou seja, identificarmos o que pode falhar e desenvolvermos ações para minimizá-las (ou até mesmo eliminar algumas), aumentando, assim, a confiabilidade?

É isso que vamos ver nesta aula: um método que surgiu após a 2ª Guerra Mundial e que foi desenvolvido pela NASA nos anos 1960 no programa Apollo (DE AGUIAR, 2016).



Figura 7.2: Programa Apollo - pouso na Lua. Diversas tecnologias. Ferramentas e métodos foram desenvolvidos durante a denominada corrida espacial. A NASA (forma abreviada, em inglês, de Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço), uma agência do Governo Americano voltada à pesquisa e desenvolvimento de tecnologias e programas de exploração espacial, foi e continua sendo um celeiro de inovações.

Fonte: <https://pixabay.com/pt/esta%C3%A7%C3%A3o-espacial-pouso-na-lua-60615/>

Estamos falando do FMEA (Failure Mode and Effect Analysis – Análise do Modo de Falha e Efeitos). Você vai aprender como ele é feito e suas aplicações.

Conceitos básicos

Você já ouviu falar na lei de Murphy? A versão mais simples dela diz que “Se algo de errado tiver de acontecer, acontecerá”. E há, ainda, uma versão expandida (e mais dramática): “Se algo de errado tiver de acontecer, acontecerá, no pior momento possível” (MAXIMIANO, 2002).

Em confiabilidade, o “algo errado” é sempre a falha: ainda que saibamos que ela vai acontecer, desejamos que não aconteça. Aliás, essa é a lógica dos estudos de Engenharia de Confiabilidade: sabemos que a falha vai acontecer (como na lei de Murphy); o que precisamos fazer é diminuir as possibilidades (aumentando, consequentemente, a confiabilidade) e nos preparar para ela, seja por meio de redundâncias ou reparos (que nos dão a medida de MTTR).

Nesse sentido, o que podemos fazer é nos anteciparmos à falha. Se já sabemos que ela vai ocorrer, podemos começar a imaginar de que forma ela ocorreria, ou seja, quais as causas e condições que levariam determinado tipo de falha surgir.

Pode parecer um exercício de adivinhação, mas não é. Neste momento, por exemplo, é provável que você tenha uma caneta esferográfica por perto, e você a tem para que ela possa executar a sua função, ou seja, escrever.



Figura 7.3: Caneta cumprindo a função de escrever. Os produtos atendem as nossas necessidades, sendo utilizados para executar funções específicas. Uma falha em uma caneta, por exemplo, representa a sua incapacidade de executar bem o que é esperado dela, isto é, escrever.

Fonte: <https://pixabay.com/pt/desenhar-desenho-fonte-tinta-1293329/>

Mas pode ser que ela não consiga executar essa função, ou seja, que alguma falha ocorra.

- Que exemplos de falhas poderiam ocorrer de tal forma que sua caneta não pudesse ser usada para escrever?
- A tinta pode acabar;
- A tinta pode secar;
- A ponta da esferográfica pode “emperrar”, não deixando passar a tinta;
- A esfera na ponta da caneta pode se soltar e a tinta começar a vaziar;
- O corpo da caneta pode trincar e quebrar, não permitindo que você consiga segurar a caneta da forma correta para escrever;
- A ponta da caneta pode ficar molhada (por exemplo, se caiu na água) e dissolver a tinta;
- A carga da caneta pode ter caído sem que você percebesse etc.

Observe que uma série de eventos pode acontecer, levando à falha da caneta, ou seja, fazendo com que ela não consiga executar a função que lhe é esperada. Bem, e como vimos na lei de Murphy, se pode acontecer, acontecerá.

Uma vez que já tenhamos listado o que e como pode falhar, precisaremos, agora, decidir o que fazer quanto a isso. Por exemplo, você pode decidir não fazer nada, ou seja, se a caneta não tiver condição de uso por conta de alguma falha, isso pode não ser um grande problema. Você pode imaginar ir rapidamente a uma papelaria e comprar outra (conceito de substituição ou reparo no sistema) ou, ainda, pedir uma caneta emprestada (que não deixa de ser uma forma de redundância).

Mas você pode ter uma preocupação muito grande em não ficar sem caneta (por exemplo, se estiver participando de uma prova de um concurso público): nesse caso, ao se antecipar às possíveis falhas, você tem a opção de se proteger via redundância, levando diversas canetas para a prova. Ao nos preocuparmos em termos disponíveis diversas canetas, estamos nos prevenindo contra eventuais problemas caso a que estamos usando apresentar alguma falha: temos redundância pela disponibilidade de diversas delas, ainda que só utilizemos uma para escrever.



Figura 7.4: Redundância: diversas canetas.

Fonte: <https://pixabay.com/pt/caneta-escrevendo-implementar-deixar-1743876/>

Seja qual for a situação ou a decisão que tome, é importante destacar que você está adotando uma postura pró-ativa quanto às falhas: não está ignorando o risco de elas acontecerem. Ao contrário, está pensando em quais falhas e como elas podem ocorrer e, a partir de tal análise, decidir o que fazer.

Essa é a base fundamental do FMEA (Failure Mode and Effect Analysis), que é justamente a Análise do Modo de Falha e Efeitos: listam-se e analisam-se qualitativa e quantitativamente as potenciais falhas, elas são analisadas e, a partir daí, decide-se o que fazer para cada uma delas.

Observe, porém, que o “decidir o que fazer” não diz respeito a uma falha que já ocorreu (algo como “o que faço agora?”); ao contrário, você está se antecipando a elas (mesmo que não ocorram) e tomando decisões sobre o que fazer.

Essas ações podem se caracterizar pelas seguintes possibilidades:

- Fazer algo para impedir que a falha ocorra: por exemplo, os conectores de monitor, mouse, teclado etc. são diferentes no computador para que só seja possível conectá-los na posição correta;



seagui

Figura 7.5: Portas de computador. Repare como as diferentes configurações das portas impedem que seja cometido algum erro ao conectar acessórios ao computador: por exemplo, não há como conectar o cabo da Internet no conector a ser usado para ligar um datashow etc.

Fonte: <https://pixabay.com/pt/computador-laptop-porto-hdmi-usb-829336/>

- Fazer algo para reduzir a probabilidade de ocorrência da falha (quando não é possível evitá-la totalmente); ao retreinarmos os empregados na execução de seus trabalhos, estamos reduzindo a probabilidade de eles cometerem erros, por exemplo;

Fazer algo para facilitar a detecção das falhas e minimizar o impacto delas: nos mostradores dos automóveis, por exemplo, há luzes de alerta sobre temperatura do motor, falta de óleo etc. Ao acender uma delas, é conveniente pararmos o veículo antes que algo mais sério aconteça (por exemplo, fundir o motor por temperatura excessiva ou falta de óleo). Outro exemplo são os alertas de estacionamento, comuns em automóveis mais sofisticados, em que um som emitido indica que nos aproximamos de obstáculos.



welshandproud

Figura 7.6: Painel de automóvel com luzes indicadoras.

Fonte: <https://pixabay.com/pt/carro-discagem-velocidade-indicador-1709537/>

Por último, diminuir a severidade dos impactos com a ocorrência das falhas: os para-choques dos automóveis, por exemplo, têm essa finalidade: ocorrendo um impacto a baixa velocidade, ele é minimizado, evitando danos à pintura, lanternas etc.

Análise dos modos de falha e efeitos - FMEA

O formato do FMEA pode variar de empresa para empresa e de autor para autor. No entanto, alguns elementos são mandatórios. É necessário, por exemplo, indicarmos cada componente, conjunto ou sistema que pode falhar. É preciso, também, listar as potenciais falhas que podem ocorrer (cada componente, conjunto ou sistema pode ter diferentes tipos de falhas) e, para isso, é recomendável que seja feito um *brainstorming*.

Em alguns modelos de FMEA, além das falhas, é listado o desdobramento delas, na forma de efeito e causa. Por exemplo, no FMEA de um chicote elétrico de um veículo, podemos ter uma falha descrita como *curto-circuito*, que é o modo de falha. Seu efeito, isto é, o sintoma percebido, pode ser *pane nos instrumentos do painel*, enquanto sua causa pode ser *exposição de fios desencapados às partes metálicas da carroceria* (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009).

Além disso, é necessário ter uma graduação quanto à ocorrência (O), isto é, a possibilidade de a falha ocorrer. Para isso, estabelece-se uma escala de 1 a 5 ou, mais comumente, de 1 a 10, sendo que o “1” representaria algum evento que seria muito difícil de acontecer, ao passo que, o outro extremo (5 ou 10, dependendo da escala estabelecida), indicaria um evento cuja ocorrência é praticamente certa.

Atenção: essa escala não se aplica à frequência de ocorrência, ou seja, não avaliamos se deve acontecer muitas ou poucas vezes, mas sim a possibilidade de ocorrer.

Cada falha listada deve receber uma pontuação estabelecida no *brainstorming* após todas as falhas potenciais terem sido listadas.

Em seguida, deve ser estabelecida uma graduação quanto à detecção, utilizando a mesma escala estabelecida para ocorrência (1 a 5 ou 1 a 10). Nela se identificará, também pelo *brainstorming*, o quão fácil ou provável é a falha ser detectada e, conseqüentemente, impedida de avançar e/ou causar efeitos danosos.

Importante: nesse caso, a escala funciona “ao contrário”. Quanto mais fácil ou mais provável de ser detectada, menor a numeração, ao passo que, quanto mais improvável sua detecção, maior a numeração.

Depois disso, há mais uma graduação a ser estabelecida: a severidade (S), que representa o quão severo será o impacto para o componente, equipamento, sistema, instalações e/ou pessoas envolvidas, caso a falha ocorra (O) e não seja detectada (D). Novamente, utiliza-se a mesma escala, discutindo os valores a serem atribuídos a cada falha em um *brainstorming*.

Chegamos, assim, ao último elemento do FMEA, que é a criticidade (C): como temos uma combinação de O, D e S, podemos inferir que o melhor cenário possível para uma falha potencial é a de que ela tenha baixa “O” (pouco provável que aconteça), baixa “D” (caso ocorra, é fácil de ser detectada e, conseqüentemente, estancada) e baixa “S” (caso ocorra e não seja detectada, não causará muitos estragos).

Já o pior cenário possível é o de alta “O”, “D” e “S” (provável que aconteça, difícil de ser detectada e causa problemas). Além disso, podem ocorrer combinações diversas, como alta “O”, média “D” e média “S”, como por exemplo, acidentes de automóvel nas rodovias; ou baixa “O”, baixa “D” e alta “S”, como em acidentes de avião. Isso explica, por exemplo, a afirmação de que viajar de avião é mais seguro do que viajar de automóvel (LAFRAIA, 2014).

Assim, a criticidade (C) é calculada pela multiplicação de $O \times D \times S$. Veja um exemplo de formulário para FMEA:

Item	Componente	Modo de falha	O	D	S	C	Contramedidas

Observe que há, ainda, uma última coluna, “Contramedidas”, considerada uma atividade de análise a ser executada (também, preferencialmente, por *brainstorming*) após o FMEA em si. Levando-se em consideração as informações sobre cada falha, bem como seus fatores O, D e S, que culminaram no C, devem ser estabelecidas as ações a serem tomadas (ou, como falamos anteriormente, “decidir o que fazer”).

De uma forma geral, nem todas as falhas potenciais que foram listadas exigirão alguma(s) contramedida(s): por exemplo, para valores muito baixos de “C”, é provável que se assuma o risco e nada seja feito (devido à baixa possibilidade de ocorrência, fácil ou provável detecção e baixa severidade). Mas essa é uma decisão da empresa, que normalmente estabelece valores limites para “C” ou composições de “C” com “S”. Por exemplo, De Aguiar (2016) apresentou estudo sobre componentes automotivos em que era exigida ação (contramedida) sempre que $S > 8$.

Caso não haja nenhuma regra estabelecida, como regra geral adota-se, como valor limite de C, o quadrado da escala, ou seja, 25 (quando usamos a escala de 1 a 5) ou 100 (quando usamos a escala de 1 a 10). Toda falha que tenha “C” acima desses valores exigirá a definição de contramedidas.

As contramedidas podem ser, como citado anteriormente, para:

- impedir a ocorrência da falha;
- reduzir “O”;
- reduzir “D” e
- reduzir “S”.

Observação: a numeração indica a prioridade e preferência. Sempre que for possível, devemos estabelecer contramedidas que impeçam a ocorrência da falha. Caso não seja possível, ao menos buscar reduzir a possibilidade de sua ocorrência (“O”) e assim sucessivamente.

As contramedidas, no entanto, não são excludentes. Podemos, por exemplo, estabelecer simultaneamente contramedidas que reduzam “O” e “D” etc.

Vamos acompanhar um exemplo: imagine que há uma fábrica imaginária em que são montadas manualmente canetas esferográficas. Os operadores de produção devem montar a carga no corpo, colocar a tampinha na parte de cima do corpo, virar a caneta e colocar a tampa e, depois disso, colocar a caneta montada em um recipiente.



Eduardo Saint Jean

Figura 7.7: Esferográfica desmontada. A maioria dos produtos que utilizamos passa por um processo de montagem, no qual componentes diversos são integrados, de forma a constituir um conjunto que exerça funções específicas.
Fonte: <https://pixabay.com/pt/caneta-esferogr%C3%A1fica-caneta-azul-1167220/>

Não vamos nos preocupar nesse exemplo com qualquer falha de componente: nosso foco será nas possíveis falhas na montagem, ou seja, o que pode acontecer de errado. O operador pode...

1. não colocar a carga;
2. colocar a carga do lado errado do corpo;
3. não colocar a tampinha;
4. não colocar a tampa;
5. colocar a tampa no lado errado (ou seja, colocar sobre a tampinha, como se faz quando escrevemos);
6. colocar 2 tampas.

Vamos colocar essa lista em um formulário de FMEA e começar a preencher os valores (a coluna “Componente” foi omitida, pois tudo se refere ao conjunto caneta). Por uma questão de simplificação, vamos adotar uma escala de 1 a 5.

Item	Modo de falha	O	D	S	C	Contramedidas
1	Não colocar a carga					
2	Colocar a carga do lado errado do corpo					
3	Não colocar a tampinha					
4	Não colocar a tampa					
5	Colocar a tampa no lado errado					
6	Colocar 2 tampas					

Podemos imaginar que “não colocar a carga” é algo com relativa possibilidade de ocorrência. Observe que poderia haver o questionamento de que essa falha não aconteceria porque seria fácil perceber a falta da carga, mas essa afirmação não faz sentido, pois “perceber” faz parte da análise de “D”. Assim, a análise deve ser apenas se é possível acontecer: digamos que, em uma escala de 1 a 5, “O” fosse 3.

Se essa falha acontecesse, a detecção seria razoavelmente fácil: digamos “2”. E, por último, analisamos “S”: se a carga não fosse colocada e se isso não fosse detectado, seria um problema grave, pois a caneta deixaria de executar sua função (escrever). Assim, digamos que $S = 5$.

Fazemos, então, o cálculo de $C = O \times D \times S = 3 \times 2 \times 5 = 30$.

Passamos, então, para o item 2: colocar a carga do lado errado do corpo. Como a diferença entre os dois lados do corpo é relativamente pequena, é possível que essa falha ocorra (digamos que $O = 4$), mas isso seria fácil de ser detectado, pois a carga ficaria “solta”. Assim, podemos considerar $D = 1$.

Por último, supondo que, de alguma forma, a falha não fosse percebida e a caneta seguisse com a carga montada ao contrário, ainda que não conveniente, seria possível usá-la para escrever, afinal, apesar de não estar firme, a carga está lá e a caneta poderia ser usada para escrever de forma precária. Assim, S poderia ser 3.

Calculando a criticidade, temos $4 \times 1 \times 3 = 12$. Vamos preencher o formulário.

Item	Modo de falha	O	D	S	C	Contramedidas
1	Não colocar a carga	3	2	5	30	
2	Colocar a carga do lado errado do corpo	4	1	3	12	
3	Não colocar a tampinha					
4	Não colocar a tampa					
5	Colocar a tampa no lado errado					
6	Colocar 2 tampas					

Repare como o item “1”, apesar de ter um “O” menor que o item “2”, tem um “C” maior que ele, devido à composição com “D” e “S”. Essa é a lógica do FMEA. A possibilidade de ocorrência, a facilidade ou dificuldade de detecção e a severidade são avaliadas conjuntamente por meio do cálculo da criticidade.

E, nesse sentido, como não há nenhuma informação adicional, vamos usar a regra geral: como o “C” do item 1 é superior a 25 (ou seja, o quadrado do máximo da escala utilizada), enquanto o do item 2 está abaixo disso, deveríamos obrigatoriamente estabelecer contramedidas para o 1º.

Poderíamos, por exemplo, pensar em automatizar o abastecimento dos componentes no posto de trabalho, de tal forma que só fosse disponibilizado um componente de cada por vez (ou seja, uma carga, um corpo, uma tampinha e uma tampa da caneta) e que os próximos componentes só fossem disponibilizados se todos fossem coletados pelo operador. Assim, ele sempre seria obrigado a pegar a carga para montar a caneta (reduzimos “O”).

Além disso, como ainda seria possível ele pegar a carga, mas não colocá-la na caneta, poderíamos colocar uma célula de carga no recipiente em que ele coloca a caneta pronta, de tal forma que, se o peso da caneta ficasse abaixo do especificado (por exemplo, pela falta da carga), fosse disparado um sinal sonoro ou luminoso, indicando a falha (reduzimos “D”).

Observação: o fato da “C” de uma falha ficar abaixo do valor estabelecido não significa que não possamos estabelecer contramedidas. A regra serve para criar a obrigatoriedade de contramedidas para valores altos de “C”, mas não de impedir que façamos isso, também, para valores baixos.

Outro aspecto a ser destacado é que, além de ser possível termos mais de uma contramedida para cada falha (como no exemplo acima), a mesma contramedida pode servir a diferentes falhas. Por exemplo, a célula de carga serviria para a falta de qualquer componente, atendendo aos itens 1, 3 e 4, e serviria, também, para o item 6 (excesso e componentes = excesso de peso).

Bem, agora que você já compreendeu como funciona o FMEA, complete o formulário para os demais itens. Não há um “gabarito” para os valores, pois, como falamos anteriormente, isso seria discutido em grupo, em um *brainstorming*. Mas é importante que você o faça para se familiarizar com a dinâmica. Para os itens com $C > 25$, procure estabelecer contramedidas, também para praticar, ok?

FMEA de produto, de processo e administrativo

O exemplo com que acabamos de trabalhar, referente ao processo de montagem das canetas esferográficas, é denominado FMEA de processo. Fogliatto e Ribeiro (2009, p. 187) listam as vantagens do FMEA de processo:

- Auxilia na identificação dos parâmetros do processo a serem controlados para reduzir ou detectar a condição de falha do processo;
- Ajuda a priorizar os modos potenciais de falha, estabelecendo uma ordem para as ações de melhoria no processo;
- Auxilia na avaliação objetiva de alternativas para a manufatura ou montagem;
- Documenta os resultados do estudo, facilitando análises futuras do processo de manufatura ou montagem;
- Aumenta o conhecimento de todos os engenheiros em relação aos aspectos importantes do processo, associados com a qualidade/confiabilidade do produto e
- Estabelece um referencial que auxilia na análise e melhoria de processos similares.

O denominado FMEA administrativo nada mais é que um FMEA de processo voltado exclusivamente aos processos administrativos, ou seja, rotinas envolvendo documentação, registro, autorizações etc., e falhas que podem acontecer. Ainda que seja tratado como menos relevante que os demais tipos de FMEA, os impactos que as falhas administrativas causam no desempenho das empresas são significativos (NASCIMENTO, 2016), merecendo, portanto, atenção.

Já no FMEA de produto, também conhecido como FMEA de projeto, analisam-se o funcionamento do produto final, seus subsistemas e componentes e, conseqüentemente, o que pode falhar neles e como.

No caso da caneta esferográfica, por exemplo, considerando sua função “escrever” e expandindo-a para “escrever sobre superfícies horizontais (ou com pequena inclinação) com baixa rugosidade e secas, com nitidez, sem manchar e mantendo a escrita por longo tempo, além de poder ser armazenada e transportada sem vazamento de tinta”, segue-se o mesmo processo do FMEA de processo para listar falhas potenciais, o que pode incluir uma enormidade de situações envolvendo as características físico-químicas da tinta, a geometria e dimensões dos com-

ponentes da ponta esferográfica, a qualidade estrutural da carga e do corpo, bem como tampas etc.

O FMEA de produto é sempre mais complexo e abrangente do que o de processo, devido a diversidades de formas de falhas. As vantagens do FMEA de produto listadas por Fogliatto e Ribeiro (2009, p. 175) são:

- Ajuda na avaliação objetiva das alternativas de projeto;
- Aumenta o conhecimento de todos os engenheiros em relação aos aspectos importantes da qualidade/confiabilidade do produto;
- Prioriza os aspectos relativos à qualidade/confiabilidade do produto, estabelecendo uma ordem para as ações de melhoria;
- Promove alterações no projeto que facilitam a manufatura e montagem;
- Fornece um formato aberto de análise, que permite rastrear as recomendações e ações associadas com a redução de risco e
- Fornece um referencial que auxilia na avaliação e implementação de futuras alterações ou desenvolvimento em cima do projeto base.

===== **Atividade 1** =====

Atende aos objetivos 1 e 3

1. De forma a auxiliar na fixação dos conceitos apresentados, responda às três questões a seguir:

A elaboração do FMEA prevê 3 passos principais...

I. analisar ocorrência, detecção e severidade.

II. calcular criticidade.

III. listar as potenciais falhas.

Assinale a alternativa que indica a sequência correta dos passos.

- a) I, II, III.
- b) I, III, II.
- c) II, III, I.
- d) III, I, II.

2. Assinale a alternativa que indica a ferramenta da Qualidade que é recomendada para ser utilizada para listar as falhas potenciais no FMEA.
- a) brainstorming
 - b) Diagrama de Pareto
 - c) folha de verificação
 - d) histograma
3. Em um FMEA em que foi utilizada a escala de 1 a 10, a partir de que valor de C é mandatório que sejam estabelecidas contramedidas? Assinale a alternativa correta.
- a) 5
 - b) 30
 - c) 50
 - d) 100

Resposta comentada

1. Letra d. Inicialmente devem ser listadas as potenciais falhas e, para cada uma delas, são estabelecidas O, D e S, a partir dos quais se calcula C.
2. Letra a. É recomendado que se utilize o *brainstorming* para que possam ser geradas muitas ideias, com o envolvimento de engenheiros, técnicos etc.
3. Letra d. Não havendo orientações específicas, consideram-se críticos valores equivalentes ao quadrado do limite da escala, exigindo-se, então, contramedidas. No caso, $10^2 = 100$.

===== **Atividade 2** =====

Atende aos objetivos 2 e 3

Caso: Fábrica Aponto

Imagine uma fábrica em que os operários montam manualmente o produto mostrado a seguir.



Fonte: <https://pixabay.com/pt/apontador-de-l%C3%A1pis-apontador-159427/>

Como engenheiro, você é chamado para analisar o processo produtivo e estabelecer ações para a qualidade dele. Desenvolva um FMEA de processo para essa montagem e identifique quais falhas obrigatoriamente precisarão de contramedidas.

Resposta comentada

Ainda que possa haver diferenças nas respostas, ela deve ter certa semelhança com o FMEA a seguir:

Item	Modo de falha	O	D	S	C	Contramedidas
1	Não colocar lâmina	2	1	5	10	
2	Não colocar parafuso	3	3	4	36	xxxxxxxx
3	Parafuso frouxo	4	4	3	48	xxxxxxxx
4	Colocar lâmina na posição errada	2	4	3	24	
5	...					
6	...					

Devem ser estabelecidas contramedidas para as falhas em que $C > 25$ (ou, caso o aluno use uma escala de 1 a 10, $C > 100$).

Conclusão

O FMEA é uma ferramenta simples de ser usada, porém muito potente, pois ela provoca a antecipação aos riscos e às falhas. Ou seja, em vez de ignorar a possibilidade de falhas, o uso do FMEA traz a reflexão de quais falhas podem ocorrer, sua dinâmica e seu impacto.

A partir dessas análises, os engenheiros e demais envolvidos no processo decidem o que deve ser feito para eliminar ou minimizar a possibilidade de ocorrência das falhas, aumentar a chance de detectá-la e/ou reduzir o impacto que elas causam em máquinas, equipamentos e instalações.

Resumo

O FMEA (Failure Mode and Effect Analysis – Análise do Modo de Falha e Efeitos) é uma ferramenta estruturada utilizada para estabelecer antecipadamente as falhas que podem ocorrer e seus modos, permitindo que elas sejam avaliadas quanto à possibilidade de ocorrência (O), facilidade de detecção (D) e severidade (S), gerando pelo produto delas a criticidade (C) da falha.

Altos valores de C trazem a exigência de serem estabelecidas contramedidas, visando reduzir O, D e/ou S (e, consequentemente, reduzindo C). Há FMEA de processo, de produto e administrativo.

Informações sobre a próxima aula

Na próxima aula, você vai continuar estudando a análise de modos de falha e efeitos, porém uma ferramenta que busca dar uma abordagem mais quantitativa ao FMEA, mensurando os aspectos de criticidade: trata-se do FMECA.

Leitura recomendada

YOSHIKAWA, Henrique. *Implementação de FMEA em uma linha de produção de caminhonetes*. 2011, 72f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica). Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2011.

Referências Bibliográficas

DE AGUIAR, Dimas Campos. *Modelo conceitual para a aplicação de FMEA de processo na Indústria automotiva*. 2016, 135f. Tese (doutorado). Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2016.

FOGLIATTO, Flávio Sanson; RIBEIRO, José Luis Duarte. *Confiabilidade e manutenção industrial*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009, 265p.

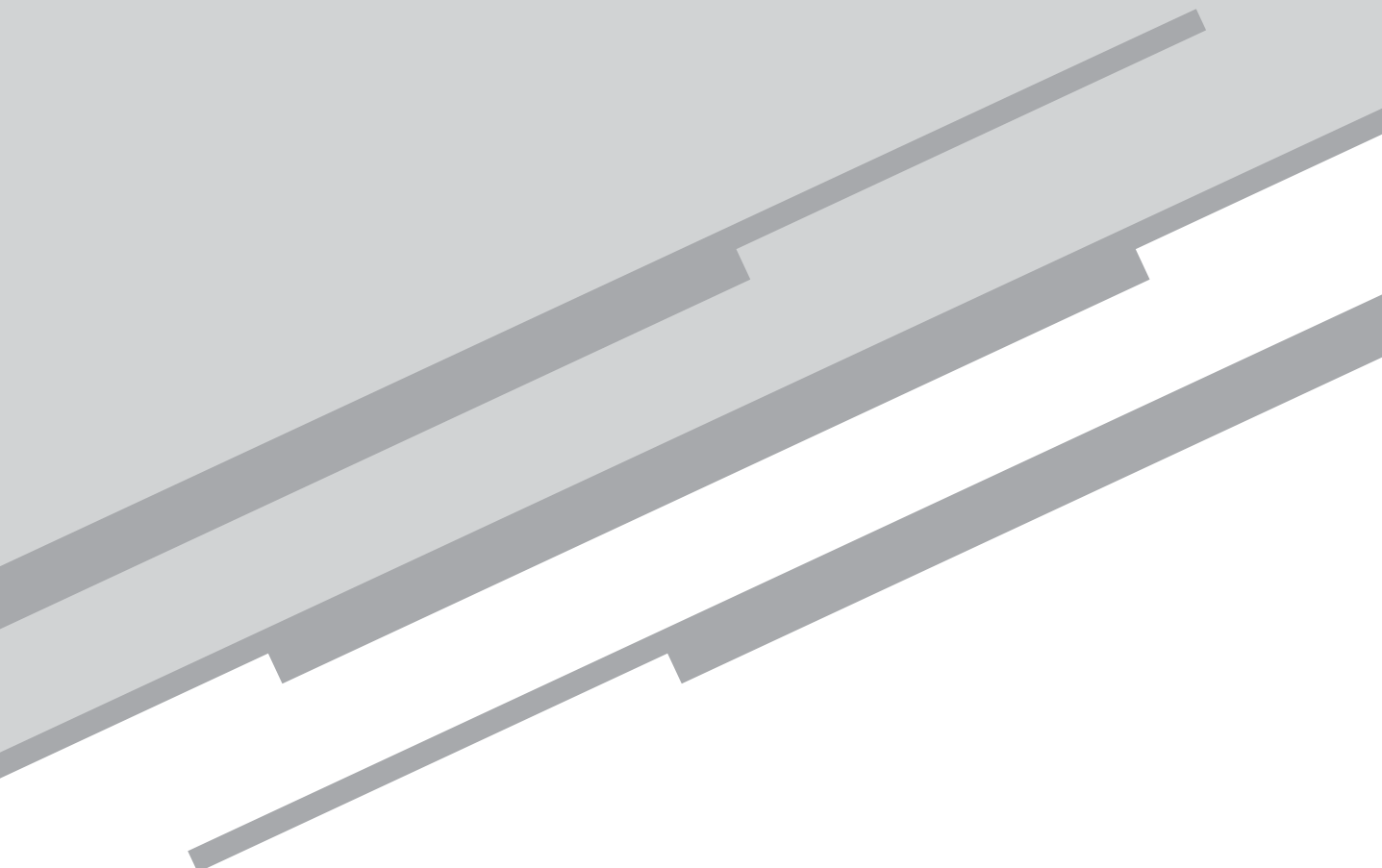
LAFRAIA, João Ricardo Barusso. *Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade*. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2014, 388p.

MAXIMIANO, Antônio Cesar Amaru. *Administração de projetos: como transformar ideias em resultados*. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2002, 281p.

NASCIMENTO, Luis de Oliveira. *A aplicação do lean thinking como estratégia para flexibilizar a produção de veículos comerciais*. 2016, 116p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, 2016.

Aula 8

Análise dos modos de falha,
efeitos e criticidade – parte 2



Henrique Martins Rocha

Meta

Apresentar a estrutura lógica dos estudos de Failure Mode Effects and Criticality Analysis (FMECA) e suas aplicações em produtos e sistemas.

Objetivos

Esperamos que, ao final desta aula, você seja capaz de:

1. apontar as diferenças conceituais entre FMEA e FMECA;
2. aplicar FMECA em análises de confiabilidade.

Pré-requisitos

Ter domínio sobre todos os conceitos envolvidos e forma de utilização do FMEA (Aula 7).

Introdução

Como você já estudou na aula anterior, já que todo componente, máquina ou equipamento vai falhar em algum momento, é importante identificarmos antecipadamente o que pode falhar e de que forma isso acontece, para que, agindo proativamente, possamos desenvolver ações para minimizar (ou até mesmo eliminar) a possibilidade de ocorrência de falhas, aumentando a confiabilidade dos sistemas, isto, a probabilidade de manter o funcionamento esperado de componentes, máquinas e equipamentos durante determinado período de tempo.



Figura 8.1: Confiabilidade.

Fonte: <https://pixabay.com/pt/rapel-corda-seguran%C3%A7a-escalada-755399/>

Em nossas atividades diárias, sejam elas profissionais ou pessoais, dependemos do bom funcionamento de máquinas, equipamentos, acessórios, sistemas, estruturas etc., não somente para permitir a produção de bens e prestação de serviços, mas também para garantir que as pessoas (usuários, clientes, empregados, parceiros etc.) não sejam expostas a riscos desnecessários.

Pois bem, no FMEA, você aprendeu como identificar as potenciais falhas e, a partir da análise delas, mensurar a possibilidade de ocorrência, a facilidade de detecção e a severidade delas, estabelecendo uma medida de criticidade.

No entanto, as pontuações atribuídas tinham um alto grau de subjetividade, baseado na percepção dos envolvidos na análise.

Nesta aula, daremos continuidade às análises qualitativas da Engenharia da Confiabilidade. No entanto, procuraremos enriquecer as análises do Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) por meio da quantificação, ou seja, complementaremos as análises qualitativas com a quantificação da criticidade das falhas potenciais.

Fazemos isso em uma ferramenta denominada Failure Mode Effects and Criticality Analysis – Análise de Criticidade, Modos e Efeitos de Falhas (FMECA), um aprofundamento do modelo FMEA, que, além de avaliar os modos de falhas e seus efeitos sobre máquinas, equipamentos e sistemas, estabelece parâmetros numéricos para estabelecer a pontuação de cada fator de análise.

Bons estudos!

Análise crítica

O FMEA e o FMECA são utilizados para analisar potenciais falhas e seus modos de ocorrência. No entanto, enquanto o primeiro se baseia em percepções e conhecimento empírico para estabelecer a criticidade de determinada falha potencial, o outro se apoia em dados estatísticos. Assim, em vez de ponderar a possibilidade de ocorrência de determinada falha, o FMECA mensura a probabilidade de tal ocorrência.

De acordo com Kelly (2006), havendo dados históricos de falhas, é possível determinar as distribuições de probabilidade de falhas e, a partir daí, os diversos indicadores de desempenho de confiabilidade, o que é adequado para uma melhor análise, pois o FMECA inclui a Análise Crítica (CA – Criticality Analysis), um método quantitativo para classificar os modos e efeitos de falhas críticas, levando em consideração suas probabilidades de ocorrência.

Não há, de fato, uma clara separação entre o FMEA e o FMECA, pois o primeiro não exclui a utilização de dados históricos e análises quantitativas. Na realidade, é mais comum a referência, por diferentes autores, às duas ferramentas como se elas fossem quase sinônimos. Lafraia (2014), por exemplo, cita que o FMECA define o nível de criticidade pelo cálculo do RPN (Risk Priority Number – número de prioridade do risco), que nada mais é que o produto de O (ocorrência), D (detecção) e S (severidade), que você já aprendeu na aula 7 como sendo C (criticidade).



Figura 8.2: Hierarquia de dados e análises. O Departamento do Exército dos Estados Unidos mostrou, de forma gráfica, como seria a sobreposição das análises qualitativas e quantitativas.

Fonte: adaptado de Department of Army (2006)

De acordo com Herpich e Fogliatto (2013, p.73):

A principal diferença entre FMEA e FMECA reside no fato de que a primeira é uma técnica mais ligada ao aspecto qualitativo, sendo muito utilizada na avaliação de projetos, enquanto a segunda inclui o que se denomina Análise Crítica (CA – Criticality Analysis). A Análise Crítica é um método quantitativo utilizado para classificar os modos e efeitos de falhas críticas levando em consideração suas probabilidades de ocorrência.

A análise crítica pode conter, em um contexto mais sofisticado, o desdobramento quantitativo de a probabilidade condicional do efeito (relacionado à severidade) ocorrer a partir do modo de falha. Ou seja, além da probabilidade de ocorrência da falha, analisa-se a probabilidade de que, em havendo tal falha, seja percebido algum efeito sobre a função. Vamos a um exemplo:

Digamos que existem 10% de probabilidade de uma bucha trincar por esforço excessivo ou superaquecimento. A trinca da bucha é um dos modos de falha possíveis da falha “travar o eixo”, mas isso não significa que, toda vez que houver uma trinca na bucha, o eixo travará, compreende?

Assim, supondo que existe uma probabilidade de 50% de o eixo travar quando ocorre o modo de falha “trinca na bucha”, analisando so-

mente esta falha e este modo de falha, podemos dizer que a probabilidade de ocorrência da falha é de $10\% \times 50\% = 5\%$.

Vamos a um exemplo apresentado pelo Department of Army (2006), referente a uma bomba centrífuga de circulação de um condensador, que tem dois possíveis modos de falha:

- parada: a bomba para de funcionar, não gerando qualquer fluxo no sistema, e
- degradação: a bomba não para, mas o fluxo gerado é insuficiente/inadequado para o perfeito funcionamento do condensador.



Figura 8.3: Bomba centrífuga. Componente eletromecânico utilizado para transporte de fluidos em instalações industriais em geral. A falha em tal tipo de equipamento pode comprometer o funcionamento de plantas químicas, de petróleo, ou o abastecimento de água.

Fonte: <https://pixabay.com/pt/bombas-centr%C3%ADfugas-equipamentos-1705456/>

Digamos que as probabilidades relacionadas ao item “falhar de determinado modo” são respectivamente 29% e 71% (totalizando, obviamente, 100%, pois são somente estes os modos de falha). Vamos chamar tais modos de falha de P e D. Assim, temos que:

$$CmP = 0,29 \text{ e}$$

$$CmD = 0,71,$$

sendo Cm a criticidade (ou criticalidade, termo também utilizado) do modo de falha.

A criticidade do item (Cr) é dada pela equação 1:

$$Cr = \Sigma Cm$$

E a criticidade do modo de falha pode ser calculada pela equação 2:

$$Cm = \beta \times \alpha \times \lambda_p \times t,$$

sendo

β : probabilidade do modo de falha (probabilidade condicional de o efeito ocorrer a partir do modo de falha);

α : taxa do modo de falha (probabilidade de o item falhar de determinado modo);

λ_p : taxa de falha do item (qde falhas / 10^6 h operação);

t: tempo de aplicação (em horas ou ciclos de operação).

Assim, supondo os seguintes dados (DEPARTMENT OF ARMY, 2006):

$\lambda_p = 12,058$ falhas/milhão de horas

α = parada (0,29) & degradação (0,71)

t = 1 hora

$\beta = 1$ (parada) & 0,6 (degradação),

temos :

$$Cr = (1 \times 0,29 \times 12,058 \times 1) + (0,6 \times 0,71 \times 12,058 \times 1)$$

$$Cr = 3,50 \times 10^{-6} + 5,14 \times 10^{-6}$$

$$Cr = 8,64$$

Análise dos modos de falha, efeitos e criticidade - FMECA

A maioria dos autores que estabeleceu padrões numéricos para a análise crítica (BAXTER, 2003; DE AGUIAR, 2007; 2016; HERPICK; FOGLIATTO, 2013; SMITH; MOBLEY, 2008) utiliza a escala 1-10 para ocorrência, detecção e severidade. Consequentemente, a escala de criticidade/RPN, por ser o produto desses três fatores, é de 1-1000.

Com valores previamente estabelecidos e mensuráveis, há uma menor dependência do FMECA ao *brainstroming* (discutido na aula anterior, sobre o FMEA), por depender-se menos da subjetividade. No entanto, sempre que possível, é interessante aplicar o *brainstorming* também no FMECA, visto que ele pode auxiliar na identificação de diferentes modos de falha.

As tabelas de Smith e Mobley (2008) sobre fatores de ocorrência, detecção e severidade, adaptados da norma IEC 60518:2006 e usualmente citadas por diversos autores, são mostradas a seguir.

Para ocorrência, a tabela se baseia na frequência de falhas, ou seja, no tempo entre ocorrências.

Observação: Repare que não há uma escala contínua de valores.

Tabela 8.1: Matriz de ocorrência

O	t (MTTF)
10	$t \leq 1$ mês
9	$t \leq 6$ meses
8	$t \leq 1$ ano
7	$1 \text{ ano} < t \leq 2 \text{ anos}$
6	$2 \text{ anos} < t \leq 4 \text{ anos}$
4	$4 \text{ anos} < t \leq 6 \text{ anos}$
2	$6 \text{ anos} < t \leq 8 \text{ anos}$
1	$t > 8 \text{ anos}$

Fonte: Adaptado de Smith e Mobley (2008)

Para detecção, os autores apresentaram os seguintes valores (repare que também não há uma escala contínua de valores):

Tabela 8.2: Matriz de detecção

D	Detecção
10	improvável
9	probabilidade remota
8	probabilidade muito pequena
6	probabilidade baixa
4	probabilidade moderada de detecção
2	probabilidade alta de detecção
1	probabilidade muito alta de detecção

Fonte: Adaptado de Smith e Mobley (2008)

Para severidade, os autores estabeleceram, também na escala 1-10, descrições relativas aos efeitos em diferentes contextos, como pode ser visto na **Tabela 8.3**. De acordo com Herpich e Fogliatto (2013, p. 76), “Após a atribuição dos valores, se determina o grau de severidade do modo de falha pelo cálculo da média aritmética dos valores” nos diferentes contextos.

Tabela 8.3: Matriz de severidade

S	Contextos / Efeitos			
	Saúde/ Segurança	Meio ambiente	Produção	Custo de reparo
10	mais que 10 mortes	de grande magnitude e extensão, com danos irreversíveis	impactos > US\$1M	> US\$500.000
8	de 1 a 10 mortes ou acidentes incapacitantes permanentes	de alta magnitude e de difícil reversão, com risco de danos irreversíveis	impactos entre US\$0,5 MM e US\$1 MM	entre US\$100.000 e US\$500.000
6	uma morte ou acidente incapacitante permanente	de magnitude considerável e de difícil reversão	impactos entre US\$0,2 MM e US\$0,5 MM	entre US\$50.000 e US\$100.000
4	acidente com afastamento	considerável, mas reversíveis com ações mitigadoras	impactos entre US\$0,05 MM e US\$0,2 MM	entre US\$10.000 e US\$50.000
2	acidente sem afastamento	de pequena magnitude e reversíveis com ações imediatas	impactos até US\$ 0,05 MM	< US\$10.000
1	sem danos pessoais	sem danos ambientais	Sem impactos financeiros	Sem custo de reparo

Fonte: Adaptado de Smith e Mobley (2008).

Estabelecidos os valores de O, D e S, faz-se o cálculo como você viu na aula anterior: multiplicam-se os valores para obter C (ou RPN). Não há diferença na matriz utilizada para o FMEA e FMECA, ou seja, o padrão é o mesmo, como mostrado a seguir.

Item	Componente	Modo de falha	O	D	S	C	Contramedidas

Smith e Mobley (2008) estabeleceram faixas de classificação de criticidade na escala 1-1000, sendo:

- $C > 500$: alto;
- $101 \leq C \leq 500$: médio;
- $51 \leq C \leq 100$: baixo e
- $1 \leq C \leq 50$: muito baixo.

A exemplo do FMEA, a numeração C/RPN no FMECA indica a prioridade de ação e, da mesma forma, sempre que possível, devemos estabelecer contramedidas que impeçam a ocorrência da falha. Caso não seja possível, devemos, ao menos, buscar reduzir a possibilidade de sua ocorrência (O) e, por último, reduzir a severidade.

No entanto, as contramedidas não são excludentes. Podemos estabelecer, por exemplo, simultaneamente contramedidas que reduzam O e D etc. Tais critérios podem ser utilizados como base para avaliações em diferentes indústrias e contextos.

Vamos utilizar o exemplo visto na aula anterior, referente ao FMEA, de uma fábrica imaginária em que são montadas manualmente canetas esferográficas. Os operadores de produção devem montar a carga no corpo, colocar a tampinha na parte de cima do corpo, virar a caneta e colocar a tampa e, depois disso, colocar a caneta montada em um recipiente.



Figura 8.4: Esferográfica desmontada.

Fonte: <https://pixabay.com/pt/caneta-esferogr%C3%A1fica-caneta-azul-1167220/>

Ainda que pelo alto volume de produção, o usual é que a montagem das esferográficas ocorra por meio de processo automatizado. Vamos utilizar tal produto como exemplo sobre possíveis erros de montagem devido à sua simplicidade.

Utilizamos o mesmo formulário do FMEA, mas agora trabalhando com a escala 1-10 e com as tabelas anteriormente mostradas.

Item	Modo de falha	O	D	S	C	Contramedidas
1	Não colocar a carga					
2	Colocar a carga do lado errado do corpo					
3	Não colocar a tampinha					
4	Não colocar a tampa					
5	Colocar a tampa no lado errado					
6	Colocar 2 tampas					

Digamos que “não colocar a carga” é algo que ocorra a cada quatro meses: consultando a **Tabela 8.1**, vemos que isso representa um O de 9.

Sobre a detecção, ela seria razoavelmente fácil: consultando a **Tabela 8.2**, identificamos um D de 2.

E, por último, para severidade, vamos analisar separadamente cada contexto:

Quanto à saúde/segurança, consultando a **Tabela 8.3**, identificamos que não haveria danos pessoais (1), o mesmo se aplicando ao meio ambiente, ou seja, sem danos ambientais (1).

Quanto à produção, a perda seria equivalente a somente uma (ou poucas) unidade(s) da caneta, muito baixo, portanto. Podemos, assim, considerar um valor de S=1. O mesmo se aplica ao custo do reparo, que seria mediante a utilização de poucos segundos da mão de obra direta, não sendo, portanto, representativo (vamos considerá-lo, também, igual a 1).

Dessa forma, como todos os elementos analisados na **Tabela 8.3** indicaram o valor de severidade igual a 1, a média seria, obviamente 1. Podemos, então, efetuar o cálculo de $C = O \times D \times S = 9 \times 2 \times 1 = 18$, o que caracterizaria tal falha como sendo de criticidade muito baixa ($C < 50$).

Passamos, então, para o item 2: colocar a carga do lado errado do corpo. Imagine que isso ocorre uma vez por ano ($O = 7$). Quanto à detecção, seria, também igual a 1, e, também, severidade.

Calculando a criticidade, temos $7 \times 1 \times 1 = 7$. Vamos preencher o formulário.

Item	Modo de falha	O	D	S	C	Contramedidas
1	Não colocar a carga	9	2	1	18	
2	Colocar a carga do lado errado do corpo	7	1	1	7	
3	Não colocar a tampinha					
4	Não colocar a tampa					
5	Colocar a tampa no lado errado					
6	Colocar 2 tampas					

Bem, agora que você já compreendeu como funciona o FMECA, complete o formulário para os demais itens, considerando os seguintes MTTF:

Item	Frequência
3	toda semana
4	todo mês
5	a cada 5 anos
6	a cada 3 anos

É importante que você o faça para se familiarizar com a dinâmica do FMECA. Vamos praticar?

===== **Atividade 1** =====

Atende aos objetivos 1 e 2

De forma a auxiliar na fixação dos conceitos apresentados, responda às três questões a seguir:

1. A elaboração do FMECA prevê 3 passos principais:

I. analisar ocorrência, detecção e severidade.

II. calcular criticidade.

III. listar as potenciais falhas.

Assinale a alternativa que indica a sequência correta dos passos.

a) I, II, III.

b) I, III, II.

c) II, III, I.

d) III, I, II.

2. Não é recomendado que se faça o *brainstorming* no processo do FMECA, porque, ao contrário do FMEA, ele trabalha com dados históricos.

A respeito dessas asserções, assinale a opção correta:

a) As duas asserções são proposições verdadeiras, e a segunda é uma justificativa correta para a primeira.

b) As duas asserções são proposições verdadeiras, mas a segunda não é uma justificativa correta para a primeira.

c) A primeira asserção é uma proposição verdadeira, e a segunda, uma proposição falsa.

d) A primeira asserção é uma proposição falsa, e a segunda, uma proposição verdadeira.

3. Um equipamento pode ter três diferentes modos de falha: vazamento (50%), quebra do corpo (25%) e trava do acionamento (25%). Sabendo-se que a taxa de falha é de 10 falhas por milhão de horas, qual a criticidade do equipamento, sabendo-se que as taxas do modo de falha são, respectivamente, 50%, 100% e 80%? Considere o tempo de uma hora.

a) 1.

b) 2,5.

c) 7.

d) 10.

Resposta comentada

1. Letra d. A dinâmica do FMECA é idêntica à do FMEA, ou seja, inicialmente devem ser listadas as potenciais falhas e, para cada uma delas, são estabelecidas O, D e S, a partir das quais calcula-se o C/RPN. A diferença está no uso de valores padronizados para estabelecer a criticidade, não dependendo exclusivamente de análises subjetivas.
2. Letra d. Apesar de o FMECA trabalhar com dados quantitativos, o *brainstorming* sempre pode trazer novas possibilidades sobre modos de falha, sendo recomendado que seja também usado para que possam ser geradas muitas ideias, com o envolvimento de engenheiros, técnicos etc.
3. Letra c.

Falha	Vazamento	Quebra	Trava
α	0,5	0,25	0,25
β	0,5	1	0,8
λ_p	10	10	10
t	1	1	1
Cm	2,5	2,5	2

Desta forma, o Cr será $2,5 + 2,5 + 2 = 7$.

Conclusão

O FMECA é uma ferramenta que busca reduzir a subjetividade existente no FMEA, pois, ao invés de trabalhar com percepções e opiniões, utiliza dados para suportar as análises.

No entanto, isso não a faz uma ferramenta melhor que o FMEA, pois ela depende da existência de dados de campo, ou seja, dados reais sobre as falhas. No caso de um novo produto, obviamente, tais dados não existem e, além disso, mesmo no caso de produtos já existentes, só existirão dados referentes às falhas que já ocorreram em algum momento. Falhas potenciais que nunca ocorreram não trarão qualquer dado para uso no FMECA.

Dessa forma, o ideal é que o FMEA e o FMECA não sejam excluídos, mas sim combinados em uma única análise, no mesmo formulário. Para os itens em que há informações históricas, utilizar o conceito do FMECA, ao passo que, quando eles não existirem, basear-se em opiniões e percepções dos envolvidos, sempre em um *brainstorming*.

Resumo

O FMECA (Failure Mode Effect and Criticality Analysis) expande a potencialidade do FMEA ao trabalhar com dados quantitativos sobre cada um dos fatores, ou seja, ocorrência (O), facilidade de detecção (D) e severidade (S), gerando pelo produto delas a criticidade (C ou RPN) da falha. Em especial, há ênfase nos dados da ocorrência, não se avaliando a possibilidade de ocorrência, mas sim a probabilidade dela.

Ao trabalhar com dados quantitativos, reduz-se a subjetividade do processo, tornando as análises mais robustas, desde que existam dados históricos para tal. A exemplo do FMEA, é possível priorizar as ações com base nos valores de C/RPN: altos valores de C trazem a exigência de serem estabelecidas contramedidas, visando reduzir O, D e/ou S (e, consequentemente, reduzindo C).

Leituras recomenda

ALENCAR, Marcelo Hazin; ALMEIDA FILHO, Adiel Teixeira; ALMEIDA, Adiel Teixeira. FMECA: Modelagem multicritério para priorização de causas de falhas potenciais em uma termoeletrônica. In: Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional – SPBO, 24-28 Set. 2012. **Anais...**

Informações sobre a próxima aula

Na próxima aula, você vai continuar estudando a análise de modos de falha e efeitos, porém, agora, em uma ferramenta que busca identificar como a falha de determinado componente (com ou sem redundância) afeta os conjuntos e sistemas. Trata-se da análise da árvore de falhas, que, quando utilizada em conjunto com o FMEA/FMECA, amplia a capacidade de análise sobre as falhas e, consequentemente, das ações de melhoria de confiabilidade.

Referências Bibliográficas

BAXTER, Mike. *Projeto de produto: guia prático para o design de novos produtos*. 2. Ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2003.

DE AGUIAR, Dimas Campos. *Avaliação de sistemas de prevenção de falhas em processos de manufatura na indústria automotiva com metodologia de auxílio à decisão*. Dissertação (mestrado em Engenharia), 2007, 135p. Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, 2007.

DE AGUIAR, Dimas Campos. *Modelo conceitual para a aplicação de FMEA de processo na Indústria automotiva*. 2016, 135f. Tese (doutorado). Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2016.

DEPARTMENT OF THE ARMY. *Failure Modes, Effects and Criticality Analyses (FMECA) for Command, Control, Communications, Computer, Intelligence, Surveillance, and Reconnaissance (C4ISR) Facilities*, TM 5-698-4, 29 September 2006.

HERPICH, Cristiano; FOGLIATTO, Flávio Sanson. Aplicação de FMECA para definição de estratégias de manutenção em um sistema de controle e instrumentação de turbogeradores. *Iberoamerican Journal of Industrial Engineering*, Florianópolis, SC, Brasil, v. 5, n. 9, p. 70-88, 2013.

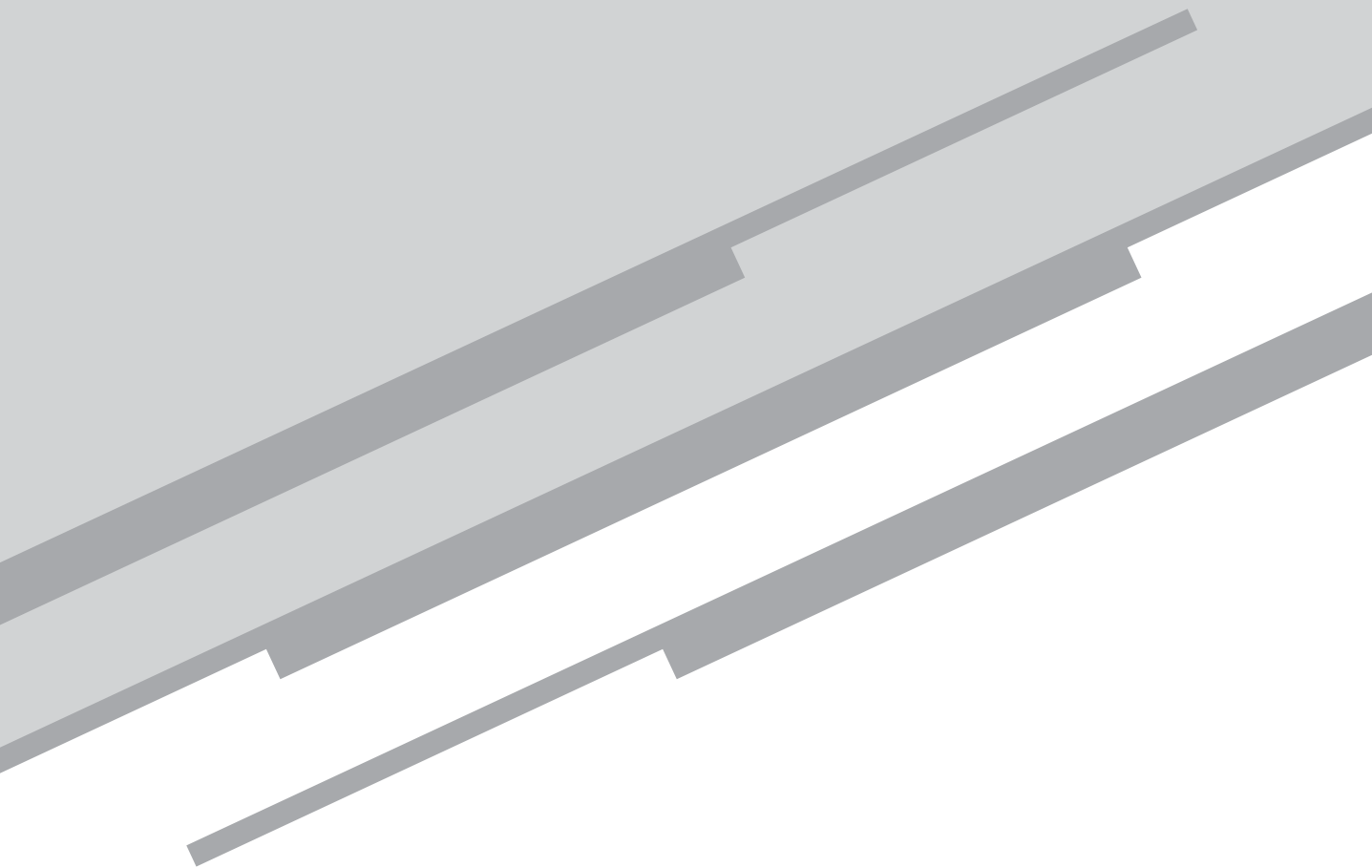
KELLY, Luis Henrique Farias. *Análise da implementação da Manutenção Produtiva Total – um estudo de caso*. 2006. 158f. Dissertação (Mestrado em Gestão e Desenvolvimento Regional). Universidade de Taubaté, Taubaté, 2006.

LAFRAIA, João Ricardo Barusso. *Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade*. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2014.

SMITH, Ricky; MOBLEY, R. Keith. *Rules of thumb for maintenance and reliability engineers*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2008.

Aula 9

Análise de árvore de falhas



Henrique Martins Rocha

Meta

Apresentar a estrutura lógica de utilização do FTA (Fault Tree Analysis) e suas aplicações em produtos e sistemas.

Objetivos

Esperamos que, ao final desta aula, você seja capaz de:

1. descrever a lógica construtiva de uma árvore de falhas;
2. aplicar a árvore de falhas em análises de Confiabilidade

Pré-requisitos

Cálculos de taxa de falhas em componentes e equipamentos (Aula 3), redundância (Aula 4), funções de confiabilidade e risco (Aula 5) e FMEA (Aula 7).

Introdução

Nesta aula, daremos continuidade às análises qualitativas da Engenharia da Confiabilidade, mas o foco agora é a compreensão de como a falha de componentes pode afetar o desempenho de um conjunto ou sistema, considerando não somente os modos de falha, mas também a existência ou não de redundância.

Fazemos isso em uma ferramenta denominada FTA, que provê uma análise lógica da influência das falhas no funcionamento de conjuntos.

Como você já estudou em aulas anteriores, todo componente, máquina ou equipamento vai falhar em algum momento. No entanto, a falha de máquinas e equipamentos acontece como consequência de falhas em componentes. Por exemplo, um computador vai falhar se sua fonte falhar.



Figura 9.1: Fonte de computador. A falha do componente fonte faz com que não haja corrente para alimentar o computador e, conseqüentemente, ele não funcionará. Dessa forma, a análise da confiabilidade e do modo de falha dos componentes é um processo necessário à compreensão das possíveis falhas em máquinas ou equipamentos.

Fonte: [http://www.freepik.com/free-photo/computer-power-supply_352393.htm#term=power supply&page=3&position=26](http://www.freepik.com/free-photo/computer-power-supply_352393.htm#term=power%20supply&page=3&position=26)

Nesta aula você vai aprender sobre uma ferramenta que nos ajuda a identificar e compreender como as falhas ocorrem, mediante um desdobramento lógico delas. Trata-se da Fault Tree Analysis - Árvore da Análise de Falhas (FTA), ferramenta criada em 1961 por H. A. Watson

Álgebra Booleana

Lógica simbólica que trabalha com três operadores: *e*, *ou* e *não* (*and*, *or*, *not*) para processar comparações e/ou operações aritméticas. Muito utilizada em informática, Engenharia Eletrônica e Engenharia da Confiabilidade (DEL PICCHIA, 1993).

na *Bell Laboratories*, durante o desenvolvimento do sistema de controle de lançamento do míssil balístico intercontinental Minuteman I, que utiliza conceitos de teoria da confiabilidade, **álgebra booleana** e teoria das probabilidades (ERICSON II, 1999).

A FTA permite que a análise das falhas possa ser desdobrada até que sejam encontradas as causas-raiz do problema, no método denominado *Root Cause Analysis* (RCA), gerando a *árvore de eventos* (SCHMITT, 2013).

Árvore de eventos (Event Tree - ET)

Schmitt (2013) explica que o RCA é utilizado para identificar o que causou a ocorrência de um evento, para que, desta forma, possam ser estabelecidas as contramedidas adequadas.

Por exemplo, se uma pessoa vai ao médico e se queixa de uma dor no braço, não é adequado que o profissional prescreva simplesmente um analgésico, pois, ainda que o medicamento atue sobre a dor, sua causa não foi combatida e o incômodo pode retornar mais forte e causar danos maiores.

Assim, o médico faz perguntas ao paciente e, eventualmente, pede alguns exames para, a partir das constatações, poder traçar um diagnóstico e, somente a partir daí, estabelecer que medidas devem ser tomadas.



Figura 9.2: Consulta médica. Na consulta, o médico desenvolve um processo investigativo por meio de perguntas, exames diversos etc., de tal forma que ele possa identificar a causa do problema e estabelecer as ações que devem ser tomadas.

Fonte: [http://www.freepik.com/free-photo/patient-consulting-a-doctor_1006274.htm#term=consulta medica&page=1&position=12](http://www.freepik.com/free-photo/patient-consulting-a-doctor_1006274.htm#term=consulta%20medica&page=1&position=12)

Perceba, porém, que, no caso do médico, já havia um problema: a dor. Em Confiabilidade, buscamos, sempre que possível, nos anteciparmos aos problemas, ou seja, às falhas. Assim, a exemplo do FMEA, que você estudou na Aula 7, e do FMECA (Aula 8), procuramos identificar os problemas antecipadamente, ou seja, identificar as falhas potenciais para traçar ações de contenção e/ou redução da severidade.



Figura 9.3: Busca por falhas potenciais.

Fonte: <https://pixabay.com/pt/m%C3%A3o-lupa-descoberta-dedo-prego-1701969/>

O FMEA/FMECA prevê que sejam listadas as potenciais falhas, ou seja, não nos limitamos a analisar falhas já ocorridas. Ao contrário, visando estabelecer medidas preventivas, buscam-se listar mesmo falhas que ainda não ocorreram, mas que podem ocorrer.

Uma das formas de se fazer tal análise é por meio da ferramenta denominada *5 porquês* (ou *5 whys*, em inglês), que consiste em perguntarmos sucessivamente a razão da ocorrência de um evento, para que possamos chegar a sua real causa. A cada etapa (ou seja, a cada pergunta e resposta), nos aprofundamos na pesquisa sobre o problema e temos melhor compreensão de sua dinâmica de ocorrência.



Figura 9.4: Perguntas sucessivas (por quê?). A lógica dos 5 porquês é a de que podemos identificar as causas-raiz de determinado problema (ou falha) em um processo investigativo de perguntas sucessivas sobre causas: as primeiras respostas usualmente são superficiais, mas o aprofundamento leva às causas que originaram as falhas.

Ballé (2012) apresenta um exemplo retirado do livro de Taiichi Ohno sobre o Sistema Toyota de Produção, com as perguntas e respostas sucessivas, até que fosse identificada a causa raiz do problema:

1. Por que a máquina parou? → Porque aconteceu uma sobrecarga e o fusível estourou.
2. Por que aconteceu uma sobrecarga? → Porque o rolamento não estava suficientemente lubrificado.
3. Por que ele não estava suficientemente lubrificado? → Porque a bomba de lubrificação não estava bombeando suficientemente.
4. Por que ela não estava bombeando suficientemente? → Porque a haste da bomba de lubrificação estava gasta e causando ruídos.
5. Por que a haste estava gasta? → Porque não havia um filtro e os restos de metais entravam na bomba.

Você pode perceber que a falta de filtro permitiu a contaminação do óleo com restos de metal, os quais desgastaram a haste da bomba, que, não funcionando direito, não permitiu a adequada lubrificação do rolamento, sobrecarregando o motor da máquina e levando ao estouro do fusível.



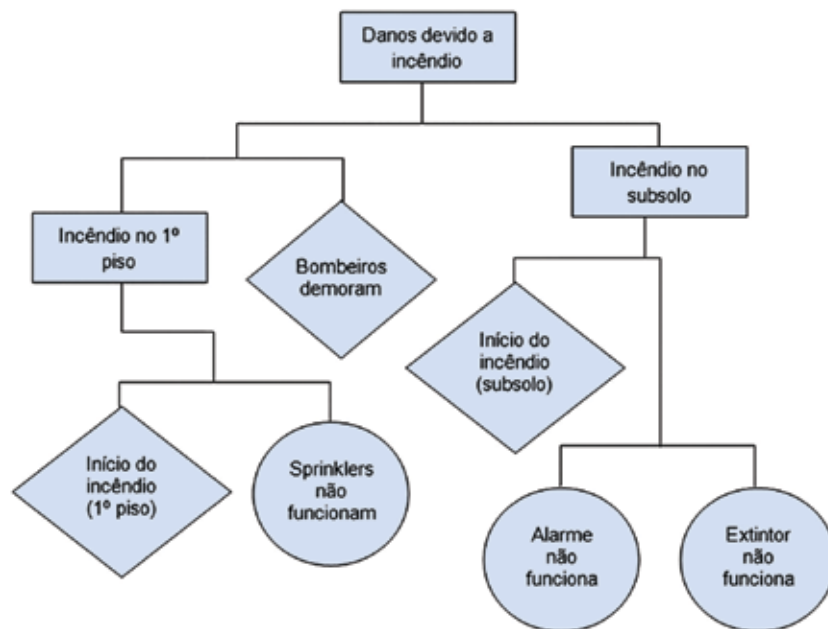
Apesar de o nome da ferramenta citar 5 porquês, isso não é uma regra, variando de problema para problema que é analisado: algumas vezes, a causa raiz do problema pode surgir com menos perguntas (por exemplo, 2 ou 3 perguntas) ou mais

No exemplo da bomba, poderia surgir uma sexta pergunta: “Por que não havia filtro?” e, se a resposta fosse “Porque o mecânico não o colocou”, nos levaria a uma sétima pergunta: “Por que o mecânico não colocou o filtro?”. Uma resposta como “Porque ele não sabia que precisava colocar”, por exemplo, nos indicaria a falta de conhecimento técnico do mecânico como a causa-raiz. Ou ainda, se ele não tivesse colocado porque não tinha em estoque, as perguntas continuariam até se chegar uma causa-raiz que indicasse a falha de alguém do almoxarifado ou da área de compras.

Vale ressaltar um aspecto muito importante: a ferramenta 5 porquês não deve ser usada para “procurar culpados”: ela serve para identificar as causas-raiz e, dessa forma, poder agir sobre elas. Por exemplo, se a falta do filtro foi causada pelo desconhecimento técnico do mecânico, seria necessário providenciar treinamento para ele; se fosse por uma falha na área de compras, deveria ser estabelecido um processo de trabalho que evitasse que situações como essa se repetissem.

A árvore de eventos (ET) nada mais é do que a representação gráfica dos desdobramentos que podem levar a um problema. Normalmente relacionada à área de segurança e prevenção de acidentes, pode ser aplicada à área de Confiabilidade, visto que o intuito é o mesmo, ou seja, antecipar-se às falhas por meio da identificação de eventos que podem ocorrer e que, combinados, levam ao acidente ou à falha.

Vamos ver um exemplo adaptado de Fogliatto e Ribeiro (2009) sobre danos a uma central de comunicações causados por incêndio não detectado.

**Figura 9.5:** Árvore de eventos.

Fonte: adaptado de Fogliatto e Ribeiro (2009)

Vamos analisar a ET mostrado:

No topo dele encontramos o denominado *evento-falha* (também chamado *evento resultante*), que é sempre representado por um *retângulo*.

Em se tratando de uma falha, ela pode ser mais desenvolvida, ou seja, desdobrada em “sub-falhas”, ou causas intermediárias (eventos com dualidade, pois são simultaneamente falha e causa). Por exemplo, os danos à central poderiam ocorrer devido ao incêndio no 1º piso ou no subsolo (por isso, esses eventos são representados, também, por retângulos).

Sprinklers

Dispositivos utilizados para combater incêndios. Ligados a um sistema de abastecimento de água pressurizada, permanecem fechados em condições normais. Quando há um incêndio, o aumento da temperatura no ambiente faz com que o líquido em seu bulbo se expanda, rompendo, assim, o bulbo e liberando água sobre pressão no ambiente, extinguindo, enfim, o incêndio.

Quando não podemos (ou não desejamos) desdobrar um evento, o chamamos de *evento não desenvolvido*, sendo representado por um *losango*. Observe, por exemplo, que na ET não queremos analisar o início do incêndio, pois o foco é o dano na central causado por incêndio não detectado. Assim, a busca pela identificação da causa-raiz do início do incêndio seria, provavelmente, em uma análise separada da que estamos vendo.

Os desdobramentos dos eventos nos leva às causas-raiz, denominadas *eventos básicos* (ou falhas básicas), que são representadas por *círculos*. Como exemplo, temos as falhas dos **sprinklers**.



Figura 9.6: Sprinkler.

Fonte: http://www.freepik.com/free-photo/sprinkler_366437.htm#term=sprinkler&page=1&position=28



Os retângulos, losangos e círculos são os principais símbolos adotados na elaboração das ET (e, também, na FTA). Porém há outros para análises mais complexas, como retângulos tracejados (que representam hipóteses de eventos), triângulos (usados para dar continuidade ao desenvolvimento da ET em outro local ou página – transferência), elipses (eventos condicionais) e “casa” (\triangle), que representa um evento básico esperado, ou seja, normal, não sendo uma falha.

Análise da árvore de falha (FTA – Fault Tree Analysis)

A análise da árvore de falha (FTA) é uma expansão da ET, ou seja, contém todas as informações e a estrutura básica construtiva, com os desdobramentos dos eventos-falha até chegarmos aos eventos básicos.

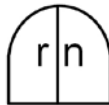
No entanto, a FTA incorpora operadores lógicos (também chamados *portas lógicas*), como mostrados na **Figura 9.6** (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009; SCHMITT, 2013; LAFRAIA, 2014).



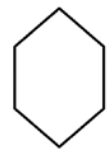
Operador lógico *e* (and): todos os eventos diretamente abaixo devem acontecer ao mesmo tempo para que o evento precedente aconteça.



Operador lógico *ou* (or): basta um evento diretamente abaixo acontecer para que o evento precedente aconteça.



Operador lógico *e r/n*: *r* dos *n* eventos diretamente abaixo devem acontecer ao mesmo tempo para que o evento precedente aconteça.



Operador lógico *se* (if): basta o evento diretamente abaixo acontecer e determinada condição estar presente para que o evento precedente aconteça.

Vamos aplicar os operadores lógicos no exemplo dos danos da central de comunicações por incêndio não detectado, transformando a ET em FTA. Só precisaremos utilizar os dois primeiros (*e* e *ou*). Os outros dois operadores lógicos, menos comuns, são utilizados em situações mais complexas e específicas. Temos, então, que os danos podem ocorrer por incêndio no 1º piso *OU* incêndio no subsolo. Mas o incêndio no 1º piso só causará danos se ele ocorrer *E* os bombeiros demorarem.

Além disso, só haverá incêndio no 1º piso *SE* ele se iniciar *E* os sprinklers não funcionarem. E o incêndio no subsolo só ocorrerá se ele iniciar *E* o alarme *OU* o extintor não funcionarem. Você pode ver, então, como fica a FTA após a inclusão dos operadores lógicos.

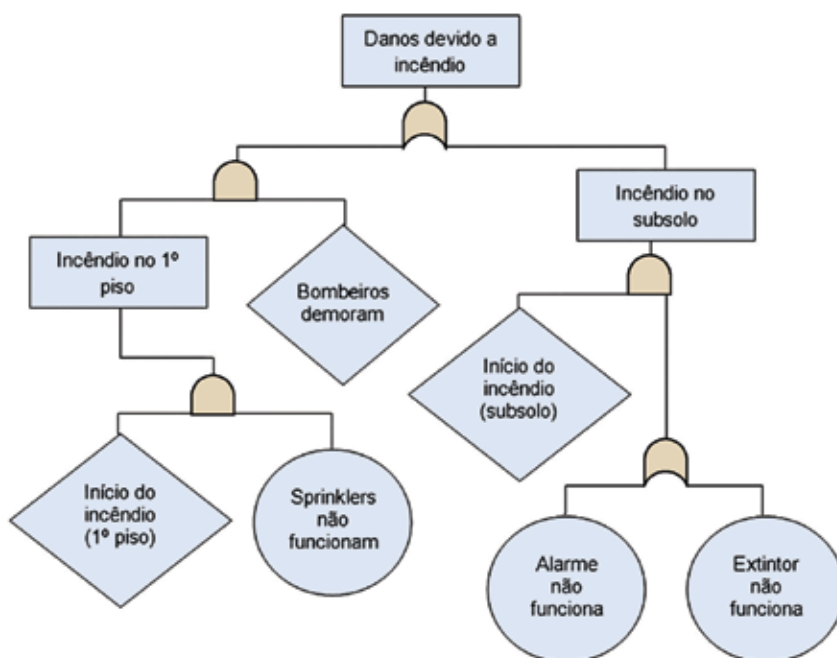


Figura 9.6: FTA.

Fonte: adaptado de Fogliatto e Ribeiro (2009)

A vantagem da FTA sobre a ET é que os operadores lógicos nos permitem calcular a probabilidade de falhas do sistema (ou sua confiabilidade), com base nas informações sobre confiabilidade de cada um dos componentes.

Repare que o operador lógico *E* seria o equivalente aos sistemas em paralelo que você estudou na Aula 4, pois a falha só ocorre se todos os componentes envolvidos falharem. E, obviamente, o operador lógico *OU* seria equivalente aos sistemas em série, pois a falha ocorre quando há falha de qualquer um dos componentes.

Vamos supor que o sprinkler tenha 90% de confiabilidade, que o alarme tenha 80% e que o extintor tenha 95%.

Caso o incêndio inicie no 1º piso, há 10% de probabilidade de ele avançar e causar danos à central (como a confiabilidade é de 90%, a probabilidade de falha é $1 - 0,9 = 0,1$).

Já no caso do alarme e do extintor, a falha de qualquer um dos dois impedirá a ação contra um incêndio que se inicie. Assim, a confiabilidade do sistema alarme-extintor é $0,8 \times 0,95 = 0,76$ (76%), ou seja, caso haja um início de incêndio no subsolo, há 24% de probabilidade de ele gerar danos na central ($1 - 0,76$).

Por último, como os danos podem ser causados pelo incêndio no 1º piso *OU* no subsolo, podemos calcular a probabilidade de danos à central: a confiabilidade de 90% no ramo do incêndio no 1º andar (protegido pelo sprinkler, que tem 90% de confiabilidade) e os 76% do sistema alarme-extintor representa uma confiabilidade total de $0,9 \times 0,76 = 0,684$ (68,4%), o que significa que a probabilidade de haver danos é de $1 - 0,684 = 0,316 = 31,6\%$.

Atividade 1

Atende ao objetivo 1

A elaboração da ET prevê os seguintes passos:

- I. identificar as potenciais falhas;
- II. representar como as falhas de componentes podem afetar o conjunto;
- III. identificar a correlação lógica entre componentes e conjunto, por meio dos operadores lógicos;
- IV. calcular a confiabilidade do conjunto/sistema.

É correto o que se afirma em:

- I e II somente.
- I e III somente.
- I, II e III somente.
- I, II, III e IV.

Resposta comentada

Alternativa A. Os passos da identificação lógica e o cálculo de confiabilidade são feitos na FTA e não na ET.

Atividade 2

Atende aos objetivos 1 e 2

Assertiva 1: A FTA é mais completa que a ET

PORQUE

Assertiva 2: A exemplo do FMEA, permite calcular a severidade das falhas.

A respeito dessas asserções, assinale a opção correta:

- a) As duas asserções são proposições verdadeiras, e a segunda é uma justificativa correta para a primeira.
- b) As duas asserções são proposições verdadeiras, mas a segunda não é uma justificativa correta para a primeira.
- c) A primeira asserção é uma proposição verdadeira, e a segunda, uma proposição falsa.
- d) A primeira asserção é uma proposição falsa, e a segunda, uma proposição verdadeira.

Resposta comentada

Alternativa C. Apesar de ser possível calcular o efeito da falha de determinado componente sobre o conjunto ou sistema, a FTA não nos permite avaliar a severidade das falhas.

Atividade 3

Atende ao objetivo 1

Um equipamento pode parar de funcionar por três diferentes modos de falha: vazamento, quebra do corpo ou trava do acionamento.

O vazamento ocorre quando há falha nas gaxetas (probabilidade de ocorrência de 20%); a quebra do corpo pode ocorrer por choque térmico (10% de probabilidade) ou choque mecânico (30% de probabilidade);

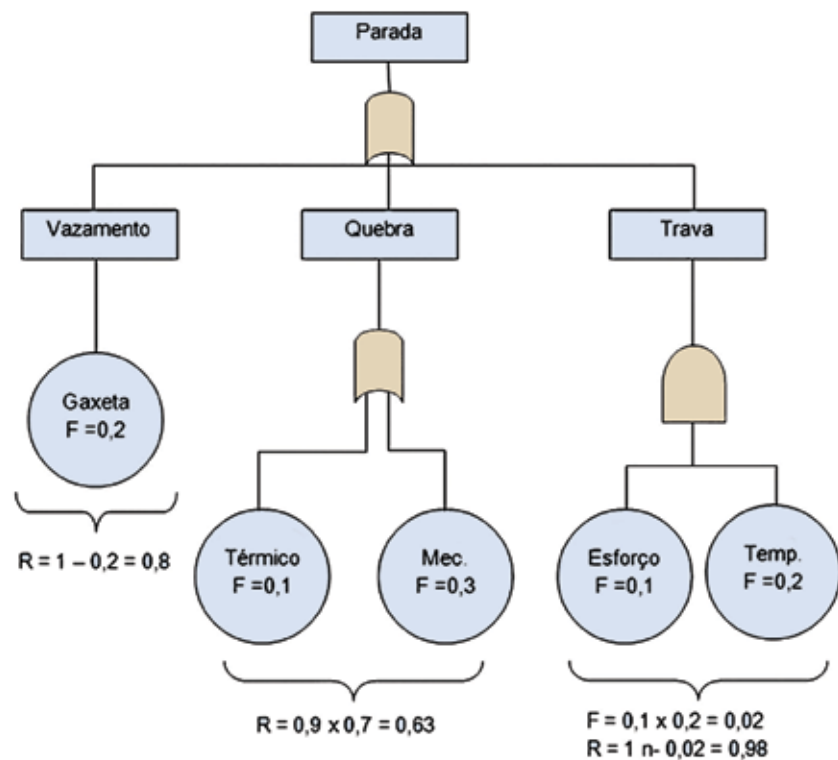
e a trava do acionamento ocorre quando simultaneamente há grande esforço (10% de probabilidade) e alta temperatura (20% de probabilidade).

O valor aproximado da confiabilidade do equipamento é:

- a) 10%.
- b) 45%.
- c) 49%.
- d) 76%.

Resposta comentada

Alternativa C.



Conclusão

Criada há mais de 50 anos, a FTA é ainda uma das ferramentas de análise de Confiabilidade mais utilizadas, servindo aos propósitos tanto para a confiabilidade de máquinas, equipamentos e instalação como um todo, análises de segurança de instalações e equipamentos, bem como prevenção de acidentes, desenvolvimento de novos produtos, análise de garantia de produtos, planejamento de manutenção etc.

Combinada com o FMEA (ou FMECA), mostra-se um conjunto poderoso para análises de Confiabilidade e prevenção de falhas mediante a identificação dos potenciais problemas e estabelecimento de contramedidas.

Resumo

A análise da árvore de falhas é um instrumento poderoso, utilizada para prever falhas e calcular confiabilidade de sistemas com base na confiabilidade dos componentes. Isso é feito mediante a análise dos modos de falha dos componentes e da configuração deles, por exemplo, se há redundância, se a falha ocorre a partir da falha de um único componente ou somente mediante a falha de diversos.

A FTA representa graficamente a interligação lógica de componentes e a potencial evolução das falhas até conjuntos de maior nível ou sistemas completos. Se conhecidas as confiabilidades, podem ser efetuados cálculos com base nos operadores lógicos *e* e *ou*.

Leituras Recomendadas

LIMA, Priscila Ferreira de Araujo; FRANZ, Luis Antonio dos Santos; AMARAL, Fernando Gonçalves. Proposta de utilização do FTA como ferramenta de apoio ao FMEA em uma empresa do ramo automotivo. In: XIII SIMPEP - Bauru, SP, Brasil, 06 a 08 de novembro de 2006. *Anais...*

Informações sobre a próxima aula

Na próxima aula você vai estudar a aplicação dos conceitos de Confiabilidade na Manutenção, por meio da denominada *Manutenção Centrada na Confiabilidade* (MCC). A MCC procura maximizar a utilização das

máquinas e equipamentos, buscando analisar a vida dos componentes. Dessa forma, busca evitar a quebra inesperada, mas também procura evitar intervenções que não sejam necessárias, reduzindo custos e aumentando a produtividade das empresas.

Referências Bibliográficas

BALLÉ, Michael. *Cinco porquês*. Lean Institute Brasil, 27 jul. 2012. Disponível em: <http://www.lean.org.br/comunidade/artigos/pdf/artigo_195.pdf>. Acesso em: 06 abr. 2017.

DEL PICCHIA, Walter. Resolução de equações booleanas: aplicação a um problema de decisão empresarial qualitativa. *Rev. adm. empres.*, São Paulo, v. 33, n. 4, p. 54-65, Aug. 1993. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-75901993000400006&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 10 set. 2018.

ERICSON II, Clifton A. Fault Tree Analysis - A History. In: *Proceedings of the 17th International Systems Safety Conference*. 1999. Disponível em: <<https://web.archive.org/web/20110723124816/http://www.fault-tree.net/papers/ericson-fta-history.pdf>>. Acesso em: 06 abr. 2017.

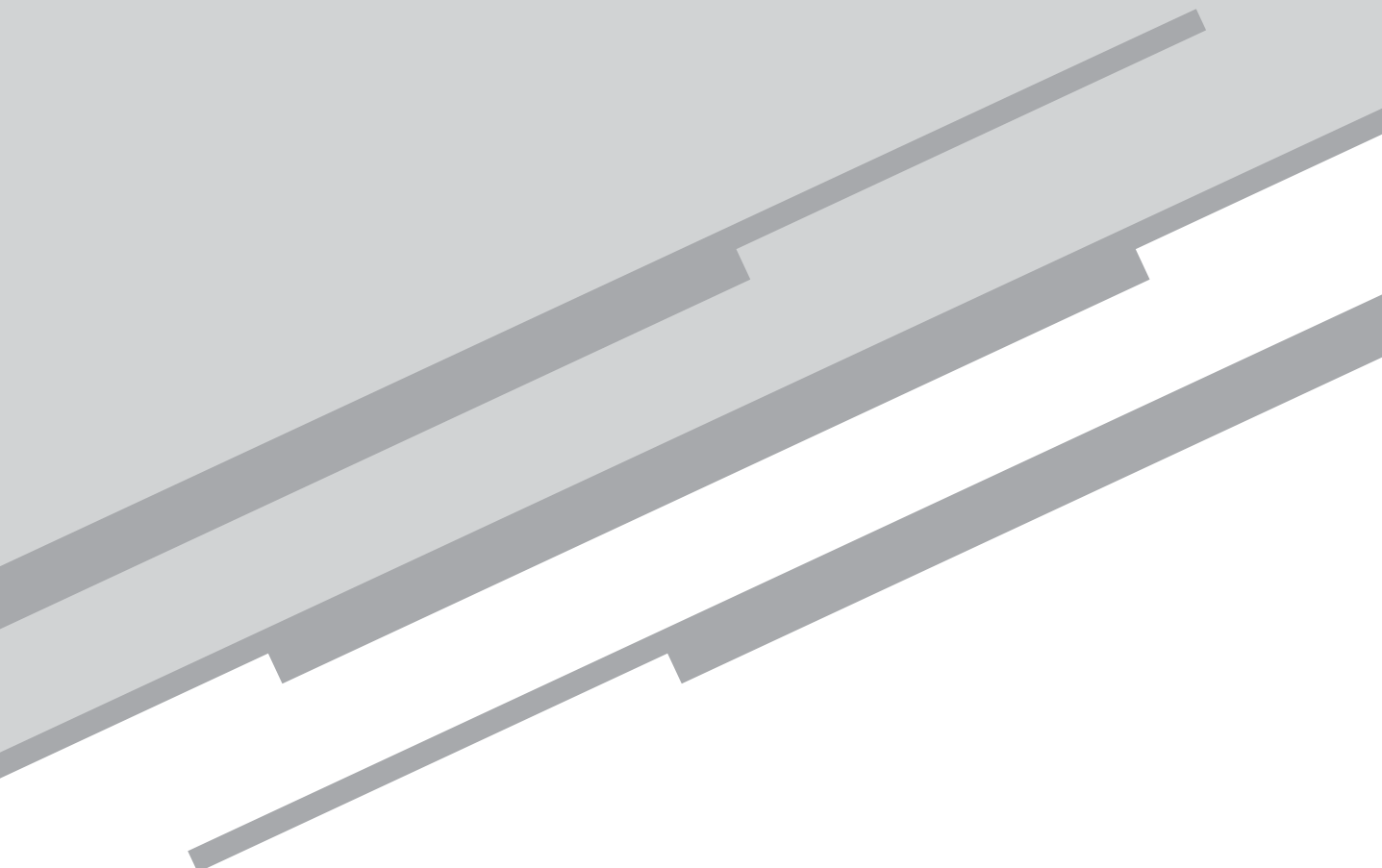
FOGLIATTO, Flávio Sanson; RIBEIRO, José Luis Duarte. *Confiabilidade e manutenção industrial*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.

LAFFRAIA, João Ricardo Barusso. *Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade*. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2014.

SCHMITT, José Claudemir. *Método de análise de falha utilizando a integração das ferramentas DMAIC, RCA, FTA E FMEA*. 2013. 110f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Metodista de Piracicaba – UNIMEP, Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo, 2013.

Aula 10

Manutenção centrada em confiabilidade



Henrique Martins Rocha

Meta

Apresentar os conceitos da Manutenção Centrada em Confiabilidade e suas aplicações em produtos e sistemas.

Objetivos

Esperamos que, ao final desta aula, você seja capaz de:

1. descrever os conceitos de Manutenção Centrada em Confiabilidade;
2. identificar as aplicações da MCC em instalações industriais.

Pré-requisitos

Cálculos de índices de confiabilidade e manutenibilidade (Aulas 2 e 3), funções de confiabilidade e risco (Aulas 5 e 6), FMEA/FMECA (Aulas 7 e 8) e FTA (Aula 9).

Introdução

Nesta aula trataremos da Manutenção Centrada em Confiabilidade – MCC, também conhecida como RCM (do inglês *Reliability-centered Maintenance*), que é uma metodologia relacionada a estabelecer as ferramentas, técnicas e procedimentos de manutenção tomando por base as análises de confiabilidade das máquinas, equipamentos e instalações.

Bons estudos!

É comum associarmos a palavra *manutenção* a reparo, conserto, ou seja, algo que não está funcionando bem deve passar por manutenção para reverter tal situação.



Figura 10.1: Reparo de um automóvel.

Fonte: [http://www.freepik.com/free-photo/mechanic-fixing-car-brake_1005719.htm#term=em manutencao&page=2&position=6](http://www.freepik.com/free-photo/mechanic-fixing-car-brake_1005719.htm#term=em%20manutencao&page=2&position=6)

Muitas vezes, as intervenções feitas em uma máquina, equipamento ou veículo ocorrem de forma reativa, isto é, a partir da identificação de um problema ou da ocorrência de uma falha. Mas essa não é a única forma de propiciar o funcionamento adequado. Por exemplo, intervenções de verificação rotineiras, ajustes etc. auxiliam a prolongar o uso e aumentar a segurança.

A propósito, você já deve ter visto uma placa como a que é mostrada a seguir em algum equipamento que não esteja funcionando, não é mesmo?



Figura 10.2: Em manutenção.

Fonte: adaptado de <https://pixabay.com/pt/manuten%C3%A7%C3%A3o-em-constru%C3%A7%C3%A3o-web-site-1151312/>

Um equipamento que esteja “em manutenção” poder ter cessado o seu funcionamento por conta de uma falha ou quebra, por conta de alguma ocorrência não usual (por exemplo, um ruído diferente do normal da operação), pela detecção de alguma situação inapropriada (por exemplo, observação de vazamento), ou ainda para ações relacionadas a verificações programadas.

No entanto, a manutenção não se limita a tais reparos em equipamentos que não estão funcionando adequadamente. Ao contrário, ela tem como meta garantir a máxima disponibilidade de máquinas, equipamentos e instalações, de forma a permitir que eles possam ser utilizados sempre que necessário, executando adequadamente as funções esperadas.



Figura 10.3: Funcionando perfeitamente.

Fonte: <https://pixabay.com/pt/gear-engrenagens-homem-pessoa-403501/>

Toda máquina, equipamento ou sistema é uma conjugação complexa de materiais diversos, na forma de peças e componentes. O bom funcionamento depende, assim, da adequação e de boas condições de cada um desses elementos. A falha/mau funcionamento de algum deles pode comprometer o funcionamento do conjunto completo. A mera quebra de um parafuso, por exemplo, pode ser a causa de quebra de uma máquina.

Nesta aula, você vai aprender sobre manutenção, em especial, sobre a Manutenção Centrada em Confiabilidade, na qual as ferramentas e técnicas da Engenharia de Confiabilidade são utilizadas para garantir a máxima disponibilidade de máquinas e equipamentos ao menor custo possível.

Conceitos básicos sobre manutenção

Manutenção é definida por Kardec e Nascif (2001, p.22) como “garantir a disponibilidade da função dos equipamentos e instalações de modo a atender a um processo de produção e preservação do meio ambiente, com confiabilidade, segurança e custos adequados”.

De acordo com a norma NBR 5462, manutenção seria a “combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de super-

visão, destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida” (ABNT, 1994, p.6).

A mesma norma apresenta outras definições relevantes:

Manutenção corretiva: “efetuada após a ocorrência de uma pane destinada a recolocar um item em condições de executar uma função requerida” (ABNT, 1994, p. 7). Essa atividade consiste na reparação, restauro ou substituição de componentes para recolocar a máquina em funcionamento.

Esse tipo de manutenção é a que nos referimos anteriormente; reparar alguma coisa que não esteja funcionando bem, ou seja, trata-se de ação reativa a uma falha, pois é realizada somente após a ocorrência dela (SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2002).



Figura 10.4: Como exemplo de manutenção corretiva, temos as lâmpadas em um automóvel: simplesmente as trocamos quando se queimam.

Fonte: <http://pt.freeimages.com/photo/headlight-1165739>

Manutenção preventiva: “Manutenção efetuada em intervalos predefinidos ou de acordo com critérios prescritos, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de um item” (ABNT, 1994, p.7).

Trata-se de um tipo de manutenção programada, conforme critérios prescritos e planejados (normalmente após determinado tempo de uso,

ou qualquer outra medida de utilização, como por exemplo, quilômetros rodados), na qual são executadas ações que visam reduzir ou eliminar a probabilidade de falhas, por meio de verificações, troca de peças, limpezas, calibrações etc. (LAFRAIA, 2014). Por considerar intervalos fixos, há o risco de trocar peças boas que ainda poderiam funcionar por mais algum tempo.



peoplecreations

Figura 10.5: Um exemplo típico de manutenção preventiva é a troca de óleo do motor ou caixa de transmissão dos automóveis.

Fonte: [http://www.freepik.com/free-photo/mechanic-servicing-a-car_1005653.htm#term=oil change&page=1&position=1](http://www.freepik.com/free-photo/mechanic-servicing-a-car_1005653.htm#term=oil%20change&page=1&position=1)

Manutenção preditiva: “Manutenção que permite garantir uma qualidade de serviço desejada, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se de meios de supervisão centralizados ou de amostragem, para reduzir ao mínimo a manutenção preventiva e diminuir a manutenção corretiva” (ABNT, 1994, p. 7).

A manutenção preditiva diferencia-se dos demais tipos de manutenção (corretiva e preventiva) por buscar diagnosticar, por meio do monitoramento de sinais diversos do equipamento em uso, quando intervenções são necessárias: não antes do momento necessário (na situação em que o equipamento poderia permanecer em uso por mais tempo sem falhar) e não após o ponto em que a intervenção teria sido necessária, o que causaria uma falha.

Por meio do monitoramento e do uso de alarmes, pode-se efetuar a manutenção e antecipar a ocorrência da falha, evitando a sua ocorrência. Aumento de temperatura, vibração, ruído etc., são alguns dos sinais que podem indicar o início de algum tipo de deterioração. Por exemplo, ao medirmos a profundidade do sulco nos pneus de um automóvel, temos uma forma de avaliar a possibilidade de eles continuarem em uso.



FreeD

Figura 10.6: Sulcos em pneu. A razão de os pneus terem sulcos em sua banda é a de garantir uma melhor aderência com o piso. Dessa forma, se os sulcos ficam rasos demais (ou mesmo somem), devido ao desgaste da superfície da banda, essa função fica comprometida e, conseqüentemente, os pneus se tornam inapropriados para o uso, devendo ser substituídos.

Fonte: <http://pt.freeimages.com/photo/tire-1553286>

Para avaliar as condições e diagnosticar a situação de determinado componente, é necessário conhecer o equipamento e saber qual é a dinâmica de deterioração que leva à geração de falhas, bem como inferir como uma falha afeta os demais componentes e o conjunto como um todo.

Todas essas formas de manutenção podem ser utilizadas pelas empresas que adotam a Manutenção Centrada na Confiabilidade.

RCM – Manutenção Centrada na Confiabilidade

A Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC ou RCM) surgiu, de acordo com Siqueira (2014), após a Segunda Guerra Mundial, calcada no desenvolvimento tecnológico da indústria bélica americana, alavancada posteriormente pela automação industrial, informática e telecomunicações.

Lucatelli (2002) e Siqueira (2014) destacam que a RCM ganhou impulso pela necessidade de certificação da linha de aeronaves Boeing 747 pela *Federal Aviation Authority*, nos EUA, visto que “o uso de metodologias tradicionais de manutenção [...] em máquinas dessa complexidade [...] iria inviabilizar o atendimento das exigências, [...] tornando-se [...] metodologia obrigatória para uso em novas aeronaves” (SIQUEIRA, 2014, p. 6-7).

A RCM é a aplicação de um método sistematizado para estabelecer a melhor estratégia de manutenção, seja ela corretiva, preventiva, ou uma combinação delas, tendo por base as condições de determinada máquina ou equipamento.

Isso acontece, pois, de acordo com Ferro e Brick (2005), a utilização da RCM possibilita as seguintes alternativas para manutenção:

- realização em intervalos preestabelecidos (preventiva);
- realização de acordo com as condições do sistema (preditiva);
- não realização de qualquer ação e reparação após a falha (corretiva); ou
- determinação de que nenhuma ação de manutenção seja realizada para reduzir a probabilidade de falha e optar por redundância ou reprojeção.

Para tanto, a RCM lida com a compreensão das funções dos componentes, bem como seus modos de falha, de tal forma que haja ações proativas de antecipação na eminência da ocorrência das falhas. Assim, devem-se estabelecer as ações necessárias a garantir a máxima disponibilidade do equipamento, ou seja, tomar decisões para que o equipamento deixe de produzir pelo menor período de tempo possível, o que inclui:

- só parar quando for necessário e conveniente;
- parar a menor quantidade de vezes possível, até porque cada parada pode introduzir novas falhas (SILVA, 2012); e
- parar o menor tempo possível (ou seja, buscar intervenções que sejam as mais simples, rápidas e eficientes possíveis).

Conforme Alcoforado, Lima e Ávila Filho (2016), a RCM utiliza perguntas referentes às funções e padrões de desempenho do processo: de que forma ele falha em cumprir sua função e a causa de cada falha; o que acontece quando ocorre cada falha e o modo; o que pode ser feito para prevenir cada falha sobre cada item em análise para que possa ser sugerido e/ou direcionado o planejamento do programa de manutenção.

As perguntas, por meio das quais se estudam e se classificam os modos de falha, suas severidades, seus efeitos e possibilidades de ocorrência e, com apoio de modelos probabilísticos, determina-se o risco da operação sob certas circunstâncias (SELLITTO; BORCHARDT; ARAÚJO, 2002; MENDES, 2011) são (SOUZA; LIMA, 2003; FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009):

1. quais são as funções e padrões de desempenho do ativo no seu contexto atual de operação? Deve-se compreender o que é esperado de cada equipamento, as funções que ele deve cumprir e o padrão de desempenho que deve ser mantido ao longo de sua vida útil.
2. de que forma ele falha em cumprir sua função? Trata-se da identificação dos modos de falha, como visto na Aula 7 (FMEA).
3. o que causa cada falha funcional? É preciso identificar as causas-raiz e/ou eventos básicos referentes às falhas. Para tanto, podem ser utilizada as ferramentas FTA e 5 porquês (Aula 9).
4. o que acontece quando ocorre cada falha? Devem ser analisados: (i) o que pode ser observado quando a falha ocorre; (ii) o tempo que o equipamento permanecerá parado na eventualidade da ocorrência da falha; (iii) os danos que a falha pode acarretar, sejam materiais, humanos ou ambientais; e (iv) o que pode ser feito para reparar a falha.
5. de que modo cada falha impacta a empresa? Trata-se de uma análise qualitativa e quantitativa das falhas, podendo ser utilizado o FMECA para isso (Aula 8). As consequências das falhas podem englobar: (i) nenhum impacto imediato; (ii) consequências de segurança das pessoas; (iii) consequências ambientais, podendo violar normas regionais, nacionais ou internacionais; (iv) falhas que podem interromper a produção e/ou afetar a qualidade ou produtividade; ou (v) outras.
6. o que pode ser feito para prever ou prevenir cada falha? Trata-se de ações que possam ser adotadas para evitar ou minimizar a probabilidade de ocorrência das falhas, aumentar a capacidade de detecção das mesmas, preferencialmente por meio da predição delas, com base em funções de confiabilidade (Aulas 5 e 6).
7. o que deve ser feito se não for encontrada uma tarefa proativa apropriada? Falhas graves e que não podem ser evitadas ou previstas precisam de contramedidas que diminuam sua severidade (Aula 7).

A evolução dos conceitos e técnicas da RCA “são aplicáveis, atualmente, a qualquer sistema, independente da tecnologia, onde seja necessário manter a funcionalidade de processos ou ativos físicos” (SIQUEIRA, 2014, p. 9). De acordo com Souza e Lima (2003) e Lafraia (2014), os benefícios da utilização da RCM são:

- maior Segurança e Proteção Ambiental: como resultado das informações geradas, para identificar todos os possíveis riscos de falha nos equipamentos.
- desempenho operacional melhorado: devido ao fato de que os gestores do programa têm informações técnicas para escolher melhores práticas de manutenção para garantir uma maior disponibilidade dos equipamentos no sistema produtivo.
- eficiência maior de manutenção (custo-efetivo): com as informações obtidas, os gestores podem adotar as melhores práticas de manutenção para garantir que o capital investido na manutenção tenha o melhor retorno, com redução de 40 a 70% dos trabalhos de rotina, 30 a 40% dos custos de material e mão de obra, e 10 a 30% dos trabalhos de emergência.
- aumento da vida útil dos equipamentos: garante que cada componente do equipamento receba a manutenção necessária para cumprir a sua função e garantir uma vida mais longa do equipamento.
- banco de dados de manutenção melhorado: os registros gerados proporcionam a obtenção de um banco de dados para uso tanto pela manutenção como pela operação, inspeção e projeto, para identificar as necessidades de habilidades dos manutentores, decidir qual a melhor política de estoques de peças sobressalentes e manter os desenhos e manuais atualizados.
- motivação: as pessoas ficam mais motivadas para o trabalho quando participam da análise e soluções dos problemas do dia a dia. A RCM promove essa integração quando reúne equipes multifuncionais para a análise e solução dos problemas, aumentando o grau de comprometimento e compartilhamento de toda a organização da empresa na solução dos problemas.
- social: quando se eliminam ou reduzem ao máximo as probabilidades das falhas funcionais e criam-se procedimentos adequados para minimizar os efeitos e consequências das falhas, reduzindo o uso de recursos naturais, sem desperdício, e possíveis acidentes com agressão ao meio ambiente.

Conclusão

A Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC ou RCM – Reliability-centered Maintenance) combina não somente múltiplas estratégias de manutenção, estabelecidas para cada equipamento individualmente analisado, mas também ferramentas de Confiabilidade, como análise de modos de falha, análise de causa-raiz, análises qualitativas e quantitativas de probabilidade de ocorrência, detecção e severidade, bem como funções de confiabilidade, para estabelecer métodos e processos específicos de manutenção a serem utilizados, visando maximizar o retorno sobre os investimentos de manutenção.

Atividade final

Atende aos objetivos 1 e 2

1. A aplicação da RCM prevê os seguintes passos...

- I. identificar das potenciais falhas;
- II. análise dos modos de falha e causas-raiz;
- III. análise qualitativa e quantitativa das falhas potenciais;
- IV. estabelecimento de contramedidas para as falhas;

É correto o que se afirma em:

- a) I e II somente.
- b) I e III somente.
- c) I, II e III somente.
- d) I, II, III e IV.

2. Pensando na RCM aplicada ao computador que você está usando, que exemplos podem ser dados quanto às possíveis formas de manutenção aplicados a ele?

3. A aplicação da RCM traz benefícios nas seguintes esferas...

- I. operacional;
- II. econômico-financeira;
- III. legal;
- IV. socioambiental.

É correto o que se afirma em:

- a) I e II somente.
- b) I e III somente.
- c) I, II e III somente.
- d) I, II, III e IV.

Resposta comentada:

1. Alternativa D. Todos os passos são previstos na RCM, englobando o uso de ferramentas como FMEA/FMECA, FTA e cálculo de funções de confiabilidade.

2. Como manutenção corretiva, você pode pensar na substituição de algum componente eletrônico, que falha sem qualquer aviso prévio, ou seja, a intervenção ocorreria somente quando alguma falha ocorresse. Entretanto, você poderia, também, executar a limpeza periódica do computador, evitando o acúmulo de poeira, por exemplo, sobre o teclado e nas saídas de ventilação, visto que poderia causar mau contato e superaquecimento. Também, como ação de manutenção preventiva, verificar o estado dos cabos e conectores externos, para se certificar de que não há nenhum deles solto, desencapado etc. Além disso, há as rotinas de manutenção automática, em que o próprio sistema faz uma autoverificação lógica de seu funcionamento. Além disso, podemos pensar em uma manutenção preditiva quando rodamos rotinas de medida de desempenho de funcionamento do sistema (ex: velocidade etc.). Nesse caso, uma alteração nos valores usualmente encontrados pode ser um sinal de que algum tipo de problema começa a afetar o computador, mesmo que nenhum sintoma tenha se tornado perceptível ainda. Assim, é possível iniciar uma investigação e verificação mais profunda antes que um dano maior aconteça.

3. Alternativa D. Os ganhos de produtividade e disponibilidade melhoram os resultados operacionais e, conseqüentemente, econômico-

-financeiros. Ao reduzir a possibilidade de acidentes envolvendo pessoas, equipamentos e meio ambiente, reduz a exposição da empresa a riscos normativos e legais, e há benefícios sociais e motivacionais por sua aplicação.

Resumo

Há diferentes formas de manutenção: corretiva (consertar o que não está funcionando adequadamente), preventiva (executar periodicamente análises e troca de componentes, de forma a minimizar a probabilidade de falhas) e preditiva (monitorar sinais dos componentes e equipamentos, de tal forma que seja possível prever a proximidade do surgimento de falhas).

A Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC ou RCM – Reliability-centered Maintenance) utiliza as diferentes formas de manutenção, selecionando-as e aplicando o que for mais adequado, com base em análises das falhas que podem ocorrer, seus modos, probabilidade de ocorrência, possibilidade de previsão e severidade, estabelecendo, assim, um processo sistemático para definição das ações de manutenção que apresentem as relações custo-benefício mais vantajosas para cada tipo de máquina ou equipamento.

Leituras Recomendadas

SOUZA, Rafael Doro. *Análise da gestão da manutenção focando a manutenção centrada na confiabilidade: estudo de caso MRS Logística*. 2008, 54p. Monografia (Graduação em Engenharia de Produção), Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora, 2008.

Informações sobre a próxima aula

Na próxima aula, você vai estudar a denominada *confiabilidade humana*, que entende o ser humano como parte do processo produtivo e, consequentemente, podendo ser um causador de falhas nos sistemas. E estudará, também, aplicações diversas da Confiabilidade em Engenharia, com foco em sistemas mecânicos.

Referências Bibliográficas

ALCOFORADO, Ana Caroline; LIMA, Luiz Rogério de Andrade; ÁVILA FILHO, Salvador. Manutenção centrada em confiabilidade como ferramenta de estratégia no processo de britagem na usina de beneficiamento de urânio: aplicação do FMEA. In: VI Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção – CONBREPRO. Ponta Grossa, 30 novembro a 02 de dezembro de 2016. *Anais...*

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. *NBR 5462. Confiabilidade e manutenibilidade*. Rio de Janeiro, Nov. 1994.

FERRO, Newton José; BRICK, Eduardo Siqueira. Uma aplicação de manutenção baseada em confiabilidade. In: Simpósio de Pesquisa Operacional e Logística da Marinha – SPOLM. Rio de Janeiro, 16 e 17 de agosto de 2005. *Anais...*

FOGLIATTO, Flávio Sanson; RIBEIRO, José Luis Duarte. *Confiabilidade e manutenção industrial*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.

KARDEC, Alan; NASCIE, Julio. *Manutenção – Função Estratégica*. 3. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2009, 384p.

LAFRAIA, João Ricardo Barusso. *Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade*. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2014, 388p.

LUCATELLI, Marcos Vinícius. *Proposta de aplicação da manutenção centrada em confiabilidade em equipamentos médico-hospitalares*. 2002. 285f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

MENDES, Angélica Alebrant. *Manutenção centrada em confiabilidade: uma abordagem quantitativa*. 2011, 85f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2011.

SELLITTO, Miguel Afonso; BORCHARDT, Miriam; ARAÚJO, Daniel Ribeiro Campos. Manutenção centrada em confiabilidade: aplicando uma abordagem quantitativa. In: XXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção ENEGEP, Curitiba, 23 a 25 de outubro de 2002. *Anais...*

SILVA, Michel Philipe da Trindade. *Aplicação de técnicas de manutenção preditiva para o aumento da confiabilidade de locomotivas diesel-elétricas*. 2012, 71f. Monografia (Especialização em Transporte Ferroviário de Carga). Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2012.

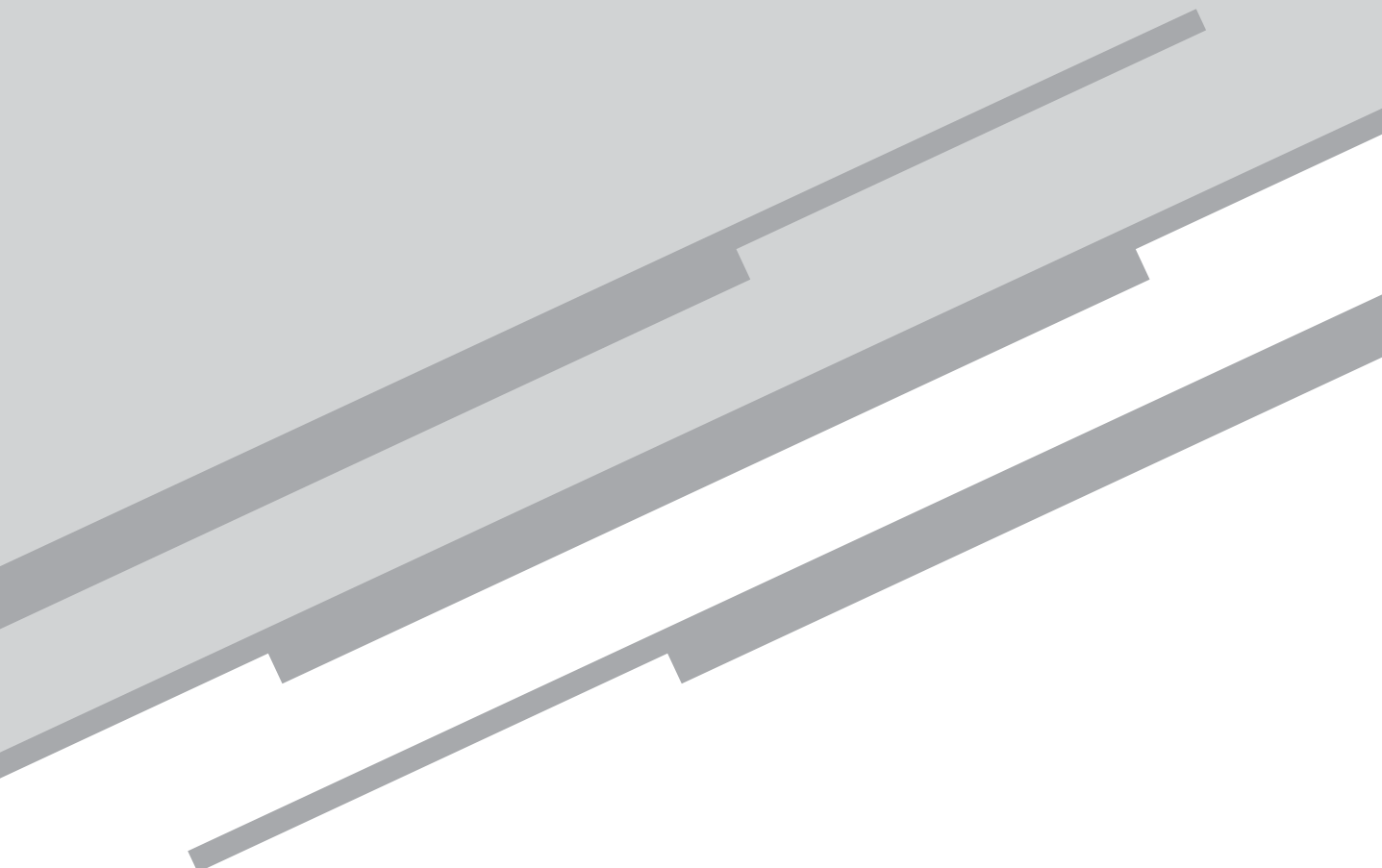
SIQUEIRA, Iony Patriota. *Manutenção centrada em confiabilidade: Manual de implementação*. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2014, 408p.

SLACK, Nigel; CHAMBERS, Stuart; JOHNSTON, Robert. *Administração da produção*. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

SOUZA, Strauss Sydio; LIMA, Carlos Roberto Camello. Manutenção centrada em confiabilidade como ferramenta estratégica. In: XXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção – ENEGEP, Ouro Preto, 21 a 24 de out de 2003. *Anais...*

Aula 11

Aplicações de confiabilidade
em engenharia – parte 1



Henrique Martins Rocha

Meta

Apresentar os conceitos da confiabilidade humana, bem como aplicações da Confiabilidade em Engenharia.

Objetivos

Esperamos que, ao final desta aula, você seja capaz de:

1. expressar os conceitos envolvidos na confiabilidade humana;
2. formular ações para aumento da confiabilidade humana em sistemas produtivos;
3. explicar como as diferentes ferramentas e técnicas estudadas nas aulas anteriores são aplicadas em problemas reais de engenharia.

Pré-requisitos

Conhecer os conceitos das características da Qualidade (Aula 1), conhecer e ser capaz de aplicar os fundamentos de redundância (Aula 4), conhecer e ser capaz de aplicar os modelos de FMEA e FMECA (aulas 7 e 8), bem como FTA (Aula 9).

Introdução

Nesta aula começaremos a estudar alguns exemplos de aplicações da Confiabilidade em Engenharia: iniciaremos por um aspecto muito importante, que é a influência do fator humano nos sistemas, ou seja, além das falhas que podem ocorrer em componentes, máquinas, equipamentos e instalações, estudaremos como o ser humano pode ser a causa de alguns problemas e como tratar tais possibilidades. Em seguida, veremos alguns exemplos de aplicações.

É usual associarmos a noção de confiabilidade e, conseqüentemente, da possibilidade de falhas, a componentes, máquinas, equipamentos e instalações. No entanto, nem toda falha ocorre somente por conta de elementos inanimados: o ser humano também comete falhas e, por conta delas, os sistemas com os quais ele interage estão vulneráveis a falhar.



Figura 11.1: Errei...

Fonte: http://www.freepik.com/free-photo/hand-ripping-a-notebook-sheet_969371.htm#term=mistake&page=2&position=38

As falhas ocorrem por causas diversas: desde deterioração de máquinas, equipamentos ou sistemas, ao mau uso ou mesmo dano causado pelos usuários e operadores. Na verdade, o comportamento humano é menos previsível do que o das máquinas, pois suas respostas a determinados estímulos varia não somente de pessoa para pessoa, mas também pelo humor, atenção ou percepção das pessoas. Dessa forma, o conceito e implicações da confiabilidade humana precisam ser levados em consideração junto ao da confiabilidade das máquinas.

Estudaremos, então, a dinâmica e os elementos que integram tais tipos de falha e o que pode ser feito para reduzi-las, ou seja, aumentar a confiabilidade humana.

Nesta aula, veremos, também, algumas aplicações reais da Confiabilidade em Engenharia, em especial, sistemas mecânicos.



MemoryCatcher

Figura 11.2: Conjunto mecânico. Entende-se por conjunto mecânico qualquer agrupamento de peças com funções específicas, usualmente de fixação, movimentação, aplicação de força ou pressão, bombeamento etc. Máquinas e equipamentos são conjuntos compostos por conjuntos menores (subconjuntos), integrando sistemas junto a outras máquinas e equipamentos.

Fonte: <https://pixabay.com/pt/motor-metal-poder-m%C3%A1quina-2099427/>

Confiabilidade humana

Na nossa primeira aula, você viu o conceito apresentado por Fogliatto e Ribeiro (2009, p. 2) sobre Confiabilidade dado por Lawrence M. Leemis, em seu livro *Reliability: Probabilistic Models and Statistical Methods*, de 2009: “A confiabilidade de um item corresponde à sua probabilidade de desempenhar adequadamente o seu propósito especificado, por um determinado período de tempo e sob condições ambientais predeterminadas”.

Pois bem, vamos fazer uma pequena adaptação nele para conceituarmos o que seria a confiabilidade humana.

A confiabilidade humana corresponde à probabilidade de uma pessoa ou grupo desempenhar adequadamente o seu propósito especificado, por um determinado período de tempo e sob condições ambientais predeterminadas.

Lembre-se, ainda, de que, na mesma aula, nós discutimos e detalhamos alguns trechos da definição de confiabilidade. Vamos fazer o mesmo com a definição criada sobre confiabilidade humana;

Observem que o denominado *propósito especificado* está relacionado a executar determinadas ações. Por exemplo, ao colocar seu carro em movimento, o motorista deve verificar se não irá causar um acidente, colidindo com outros veículos.



Figura 11.3: Colisão de veículos. A maioria das ocorrências de acidentes automobilísticos não tem como causa falhas mecânicas, mas sim a imprudência dos motoristas. Não respeitar limites e regras, desatenção, imperícia etc. são causas de danos materiais e até mesmo ferimentos e mortes.

Fonte: <https://pixabay.com/pt/acidente-colis%C3%A3o-autom%C3%B3veis-152075/>

Já quanto ao *período de tempo*, em confiabilidade humana, referimo-nos ao tempo ao longo do qual o ser humano estaria executando adequadamente as funções esperadas. Por exemplo, voltando à colisão que falamos anteriormente, quanto mais tempo o motorista estiver dirigindo, obviamente, maior será a probabilidade de se envolver em algum acidente.



Figura 11.4: Cansaço ao volante: horas excessivas sem repouso, por exemplo, vão aumentar substancialmente a probabilidade de falhas e acidentes, devido ao cansaço, sono e fadiga.

Fonte: <https://pixabay.com/pt/menino-masculino-homem-jovem-828850/>

Na realidade, quando abordamos a confiabilidade humana, podemos traçar um paralelo com o conceito da curva de banheira, que você aprendeu na Aula 5. O conceito usualmente aplicado à confiabilidade de componentes e máquinas pode ser aplicado, também, à confiabilidade humana: no início de qualquer atividade, a falta de prática e destreza, a desatenção, ou mesmo o excesso de confiança podem ser causas de elevada taxa de falhas. Após estabilizado o processo, seja em termos de aprendizado e/ou concentração, há uma tendência à redução de tal taxa, que volta a subir por conta do cansaço, perda de concentração e outros fatores. Podemos imaginar que, ao iniciar alguma atividade (por exemplo, dirigir), a pessoa pode não estar totalmente alerta, o que faria com que a taxa de falhas (λ) fosse mais alta no início, reduzindo-se logo após e permanecendo relativamente estável até que volte a crescer pelos fatores que falamos anteriormente, como pode ser visto na **Figura 11.5**.

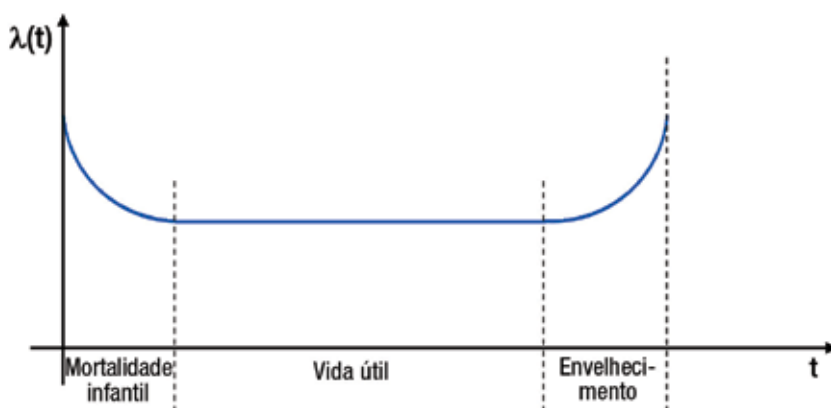


Figura 11.5: Curva de banheira

Fonte: adaptado de Lafraia (2014)

Isso explica a recomendação de que motoristas façam paradas regulares para descanso e relaxamento quando estão fazendo uma viagem longa.

Ainda considerando o conceito da curva de banheira em confiabilidade humana, se analisarmos em um horizonte mais longo de tempo, podemos imaginar que um profissional que iniciasse suas atividades teria uma taxa de falhas mais alta por desconhecimento, falta de prática etc., o que pode ser minimizado ao longo do tempo mediante treinamentos e qualificação, bem como autoinspeção, o que levaria, ao longo do tempo de atuação desse profissional, a uma redução e estabilização nas falhas, motivadas por fatores diversos inerentes à atividade ou à pessoa. Com o passar do tempo, no entanto, por excesso de confiança, acomodação, desatenção, vícios ou mesmo senilidade, há o aumento das falhas.

Quanto às *condições ambientais predeterminadas*, também presentes na definição de confiabilidade, podemos exemplificar, ainda pensando no motorista, que as condições ambientais afetam seus sentidos, como por exemplo, a visão prejudicada em uma estrada com neblina.



Helmut Gevert

Figura 11.6: Estrada com neblina

Fonte: <http://pt.freeimages.com/photo/road-to-1408091>

A interação homem-máquina, como por exemplo, quando o ser humano dirige um automóvel, ocorre por meio dos sentidos. Perceber o que ocorre ao redor por meio da visão, ouvir ruídos, buzinas, sirenes, perceber vibrações etc. compõem as informações que o motorista precisa receber e responder com comandos (por exemplo, virar o volante, frear etc.). O comprometimento dos sentidos, como no caso de neblina ou do desvio de olhar da estrada para ver o celular, a música alta que impeça de perceber sons diversos e outros fatores que possam causar distração são perigosos.

Carvalho Neto (2006, p. 16) define erro humano como “qualquer ação humana (ou a falta dessa ação) que exceda algum limite de aceitabilidade (por exemplo, uma ação fora de tolerância), onde os limites do desempenho humano são definidos pelo sistema”.

Há ainda um aspecto relevante quando comparamos a confiabilidade de componentes e equipamentos e a confiabilidade humana: o livre arbítrio. Componentes, máquinas, equipamentos e instalações não optam por falhar: suas falhas são consequências de fatores diversos que as causam, ao passo que o ser humano é livre para fazer suas escolhas e tomar decisões.

Nesse sentido, além de poder falhar inadvertidamente, por distração, cansaço, falta de preparo etc., existe a possibilidade de o ser humano “errar de propósito”, causando prejuízos de forma intencional, o que torna o gerenciamento mais complexo e menos previsível.

Além disso, Carvalho Neto (2006, p. 26-28) cita que, com o avanço tecnológico “o equipamento é cada vez mais confiável, mas o erro humano, de difícil predição, é uma fonte potencial de acidentes significativos”, sendo, “provavelmente o maior fator de contribuição para perdas de vidas humanas, lesões nas pessoas e danos à propriedade em indústrias químicas e petroquímicas”, o que é corroborado por Evagelista, Grossi e Carvalho (2011) na área automobilística.

Enquanto Souza, Pereira-Guizzo e Santos (2014) indicam que de 20 a 50% de perdas ou mau funcionamento em sistema são consequências de erros humanos, Barbosa e Haguenauer (2009) citam que 22% dos acidentes em refinarias de petróleo têm como causa a falha humana. Lafraia (2014) comenta que entre 50 e 75% das falhas em sistemas aeroespaciais são creditadas ao erro humano. Ou ainda, em sistemas com alto grau de redundância (vide Aula 4) de hardware, “os erros humanos poderiam compreender cerca de 90% da probabilidade de falha do sistema” (SILVA, 2008, p. 46).

Lafraia (2014) cita que a abordagem tradicional do erro humano é a de que, uma vez que o trabalhador sabe o que se espera dele, tem como aferir se está fazendo o que é esperado e pode fazer os ajustes necessários no processo. Os erros só aconteceriam por negligência, falta de compromisso ou pela não observação de regras e procedimentos.

O autor cita Joseph Moses Juran (1904-2008) ao classificar os erros em:

- *Erros humanos por descuido ou por inadvertência*: falha na execução das ações necessárias para atingir um objetivo, por conta da fragilidade humana em manter a atenção, como por exemplo, na leitura errada de um instrumento ou na escolha de uma ferramenta.
- *Erros técnicos inevitáveis*: falha no atingimento de um objetivo devido a um planejamento incorreto, como por exemplo, solicitar-se às pessoas fazer o que é fisicamente difícil ou até impossível, ou algo que é mentalmente muito difícil ou até impossível. Também, esquecer-se de que cada pessoa tem a sua característica e a própria tendência ao acidente, além da existência de bloqueios mentais e limitações.
- *Erros premeditados ou violações*: falha quando o trabalhador conhece as ações corretas e conscientemente executa ações alternativas.

Nesse sentido, mostram-se valiosas as teorias X e Y de Douglas McGregor, segundo as quais o esforço, a atenção e o esmero para atividades laborais são naturais, exatamente como acontece em participações de

jogos e torneios: se motivado, o ser humano vai se esforçar e superar as eventuais dificuldades para obter os melhores resultados. Você não se sente motivado a fazer um esforço adicional quando há uma disputa, uma gincana ou alguma forma de desafio?

Isso explica a razão de as empresas implementarem campanhas de motivação e conscientização individual, premiação, mas também, medidas disciplinares no caso de violações, como cita Lafraia (2014). No entanto, o próprio autor reconhece que os apelos motivacionais têm efeito temporário, devido ao hábito e costumes do ser humano, razão pela qual não garantiria a não ocorrência de falhas. Sabe aquela sensação de descoberta quando você está aprendendo alguma coisa nova, mas que, depois de certo tempo, vira rotina e deixa de ser atrativo? É esse mecanismo do hábito que se pode chegar à monotonia: pior ainda, pode levar à distração, apatia e, conseqüentemente, ao risco maior de se cometerem erros.

A atividade final do operador sofre impacto de diversos fatores, como apontado por Drogue e Menezes (2007). Por conta disso, as medidas para evitarem-se falhas precisam ser mais abrangentes, não ficando limitadas ao trabalhador e sua motivação: ao contrário, há a necessidade de uma abordagem sistêmica, englobando, além da natureza e características do trabalhador, aspectos relacionados ao ambiente do trabalho, como elemento indutor do erro e/ou sua capacidade de controlá-lo ou absorvê-lo, não permitindo que se propague na forma de defeitos e subseqüentes falhas.

Perceba que, por exemplo, ao utilizar ou operar um equipamento (como ao utilizar uma furadeira ou dirigir um automóvel), se você não estiver capacitado/qualificado para fazê-lo, podem ocorrer problemas diversos, eventualmente causando danos materiais ou mesmo pessoais. Mas, mesmo que plenamente capacitado, se você não estiver concentrado e atento, ou se estiver muito cansado ou com sono, há também riscos na atividade. Da mesma forma, se o ambiente não for propício (por exemplo, muito escuro para utilizar a furadeira, ou sob forte chuva ou neblina que dificulte a visão para dirigir), isso pode ser, também, motivo de preocupação, principalmente se as implicações de qualquer erro seu não tiverem formas de atenuação. Um exemplo disso é você furar um cano ao utilizar a furadeira ou o automóvel que você dirige não tiver sensores de proximidade que o alertem sobre perigos diversos.

Um aspecto importante, se trouxermos ao ambiente empresarial, é o de que a função gerencial tem peso importante nesse contexto, como destacado por William Edwards Deming (1900-1993) que destacou que o gerenciamento é responsável por 94% dos problemas de qualidade (ARAUJO, 2010).



Pressfoto

Figura 11.7: Gerenciamento.

Fonte: http://www.freepik.com/free-photo/top-view-of-co-workers-planning-a-strategy_864127.htm#term=management&page=1&position=14

O conceito de qualidade total trouxe à tona a importância da ação da alta administração no ambiente e nos resultados nas operações das organizações: as falhas cometidas nas atividades não devem ser exclusivas a falhas pessoais dos operadores e trabalhadores em geral. Eles são parte de um sistema, que engloba máquinas, equipamentos, materiais, infraestrutura, pessoas, políticas e recursos, cuja arquitetura é estabelecida e mantida pelos gestores. Dessa forma, vulnerabilidades na configuração de tal sistema são causas das falhas.

Como podemos conciliar todos esses aspectos, no que diz respeito à confiabilidade humana? Lafraia (2014) apresenta um modelo conceitual da abordagem sistêmica dos erros, em que os erros com efeitos significativos, ou seja, que impactem o desempenho, estariam na interseção entre a atuação do trabalhador e as características do meio, como pode ser visto na **Figura 11.8**.

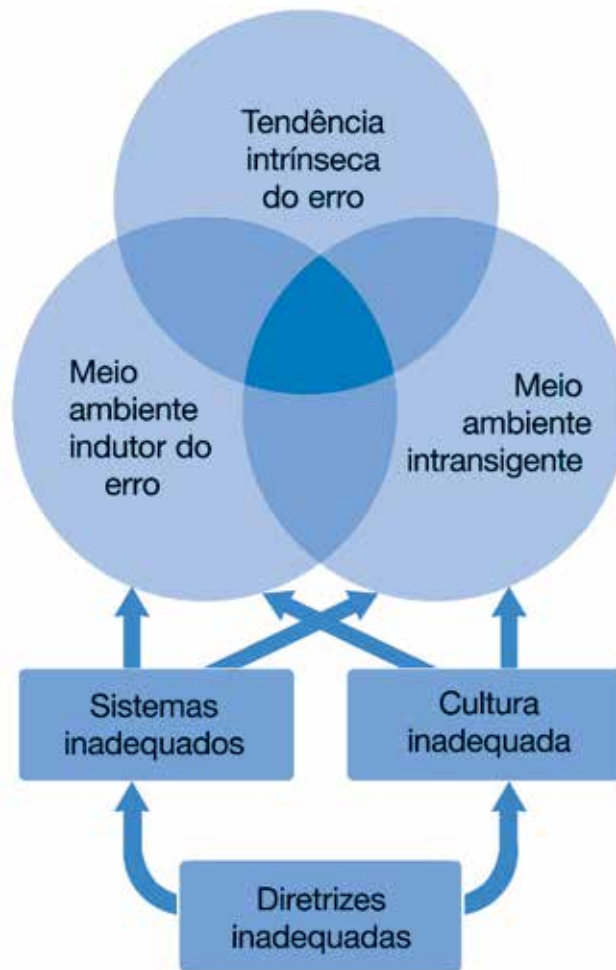


Figura 11.8: Fatores que influenciam no erro.

Fonte: Lafraia (2014, p. 138)

O ser humano, seja por distração, cansaço, excesso de confiança, dificuldade de concentração etc., pode cometer erros. Mas, além disso, o próprio ambiente pode levá-lo ao erro: por exemplo, comandos ou instruções confusas, de difícil interpretação ou dúbias etc. Se, em tal cenário, houver também condições que não amenizem ou impeçam a evolução do erro (como por exemplo, uma máquina que não detecta um erro de operação e permita colisão de seus próprios componentes), há uma composição de fatores que levam ao pior cenário possível de falhas e suas implicações.

De acordo com o autor, a tendência inevitável ao erro origina-se da limitação humana na capacidade de memória, no processamento de informações e/ou na dependência de regras específicas para execução

da tarefa, envolvendo fatores físicos, fisiológicos e psicológicos (SILVA, 2008), razão pela qual Evagelista, Grossi e Carvalho (2011) chamam de *falhas psicológicas*. Por exemplo, você já errou uma questão de prova por ter esquecido um conceito ou uma fórmula?

Já o ambiente indutor ao erro engloba sobrecarga de trabalho, informações, procedimentos ou instruções inadequadas, treinamento inadequado ou baixa motivação (LAFRAIA, 2014). Por exemplo, você já teve dificuldades com um exercício porque a fórmula necessária para resolvê-lo estava com um sinal invertido?

Perceba como tais elementos dizem respeito às possíveis causas-raiz das falhas, que surgem a partir dos erros e seus fatos geradores, em um desdobramento semelhante ao que ocorre na FTA (Aula 9). Tais causas seriam os eventos básicos das falhas e, por esta razão, seriam elementos que influenciariam a ocorrência dos erros, como visto no FMEA/FMECA (Aulas 7 e 8).

Como causas para tais falhas estariam, de acordo com Lafraia (2014), procedimentos inadequados ou incorretos, não observação dos procedimentos, treinamento insuficiente/inadequado, falta de motivação e cognição, aspectos ergonômicos, que não permitiriam equilibrar a eficiência do trabalho com conforto e segurança do trabalhador (ROCHA, 2016), com condições de trabalho deficientes, incluindo escalas e turnos inapropriados, ou ainda, o próprio processo não ser capaz de atender os padrões esperados e estabelecidos.

Por outro lado, o ambiente intolerante ao erro diz respeito a “não permitir ao operador receber *feedback* em tempo hábil para que ele tome ações que evitem a transformação do erro em falha ou defeito. Muitas vezes, nem mesmo permitem a percepção imediata do erro” (LAFRAIA, 2014, p. 138), o que podemos relacionar à facilidade de detecção, estudada no FMEA e FMECA (Aulas 7 e 8). Tarefas não especificadas ou critérios ambíguos de desempenho poderiam contribuir para tal dificuldade. Pense, por exemplo, na seguinte situação: quem nunca cometeu um erro ao manobrar o carro e raspou a lateral ou a roda em um obstáculo? Não seria bom que houvesse um alerta que nos avisasse quando estivéssemos muito próximos do obstáculo, de tal forma que parássemos a manobra antes de haver o dano?

A severidade do FMEA/FMECA estaria nas consequências de tais erros e falhas, que poderiam ser reduzidas por meio da redundância (Aula 4), onde aplicável.

Dessa forma, como descrito por Lafraia (2014, p. 139), haveria um *continuum* em que

Diretrizes inadequadas dos executivos da empresa induzem os gerentes de linha a atuarem de modo inadequado. O ambiente indutor do erro oriundo destas diretrizes somado ao erro do operador (falha ativa ou ato inseguro), na presença de defesas inadequadas (ambiente intolerante ao erro), abrem uma janela de oportunidade para o defeito ou falha transformar-se em um acidente, defeito ou falha.

As contramedidas para erros e falhas oriundas da confiabilidade humana seguem a mesma lógica adotada no FMEA (Aula 7) :

- *Fazer algo para impedir que a falha ocorra*: Conceito do *poka-yoke*, ou seja, conjunto de procedimentos e/ou dispositivos cujo objetivo é prevenir/detectar falhas humanas ou eventuais erros em processos industriais, antes que eles se transformem em defeitos ou falhas mais sérias (ENDEAVOR BRASIL, 2015). Por exemplo, os conectores de monitor, mouse, teclado etc., no computador, são diferentes, para que só seja possível conectá-los na posição correta.



Seagul

Figura 11.9: Portas de computador. Repare que não é possível plugar o conector do monitor do computador na porta do mouse, ou o teclado na porta de conexão com a Internet. Isso é proposital, para impedir danos por falha humana.

Fonte: <https://pixabay.com/pt/computador-laptop-porto-hdmi-usb-829336/>

- *Fazer algo para reduzir a probabilidade de ocorrência da falha* (quando não é possível evitá-la totalmente): por exemplo, ao retrainarmos os empregados na execução de seus trabalhos, estamos reduzindo a probabilidade de eles cometerem erros. Ou ainda, instruções que são fáceis de ler, adequadamente explicadas e mantidas em bom estado (LAFRAIA, 2014).
- *Fazer algo para facilitar a detecção das falhas, para que se possam tomar ações que as minimizem*: por exemplo, o sinal luminoso ou sonoro dos automóveis quando a chave de ignição é deixada no contato (LAFRAIA, 2014). *Diminuir a severidade dos impactos com a ocorrência das falhas*: por exemplo, os para-choques dos automóveis têm essa finalidade: ocorrendo um impacto à baixa velocidade, ele é minimizado, evitando danos à pintura, lanternas etc.

Sistemas Mecânicos

Listaremos agora alguns exemplos de aplicações de Confiabilidade em Engenharia, em especial, sistemas e equipamentos mecânicos. Nelas, você poderá identificar situações práticas, ambientadas no dia a dia de um engenheiro de produção – uma antecipação do que você verá na sua realidade profissional.

Por limitações de espaço, são apresentados os resumos e palavras-chave somente dos trabalhos, de forma a permitir uma visão geral dos estudos.

Confiabilidade no pós-venda de equipamento utilizado na mineração

Trabalho de Silva, Reis e Fernandes (2013).

Resumo: A aplicação da engenharia de confiabilidade pós-venda na indústria para estimar a probabilidade de falhas em equipamentos e sistemas demanda profissionais capacitados e o uso de *softwares* estatísticos para garantir resultados mais precisos. Nesse contexto, o presente artigo tem como problema de pesquisa a dificuldade em compreender a probabilidade de retorno do equipamento caçamba Meia-Cana, modelo 8x4, no período pós-venda e com isso planejar as intervenções de manutenção, bem como os custos de garantia. Assim, o objetivo principal é analisar quantitativamente a ocorrência de falhas no período de

garantia do equipamento, a fim de contribuir para o planejamento das intervenções de manutenção, incluindo o volume de peças de reposição e demais recursos envolvidos. Para tanto, será realizada a análise de confiabilidade pós-venda de um lote de equipamentos do referido modelo utilizado no transporte de minério de ferro. A metodologia utilizada é classificada como estudo de caso para demonstrar a confiabilidade do equipamento no período de garantia. Os métodos utilizados foram visita técnica às instalações do fabricante, coleta de dados provenientes de OS (Ordens de Serviço) e o *software* Weibull++7® para a análise de dados. Os resultados mais importantes foram a previsão da confiabilidade, da desconfiabilidade, bem como de falhas por período deste equipamento. Com este estudo, a empresa, conhecendo a previsão de retorno de equipamentos em garantia, conseguiu estimar tecnicamente o estoque de peças de reposição e recursos para reparo, facilitando o atendimento ao cliente e reduzindo custos adicionais não previstos.

Palavras-chave: Confiabilidade. Pós-Venda. Garantia. Caçamba Meia-Cana.

Análise de confiabilidade e evolução de uma máquina de envase de leite UHT ao longo da curva da banheira

Trabalho de Carnáuba e Sellitto (2013)

Resumo: O objetivo deste artigo é fazer a análise de confiabilidade e observar a evolução da posição de uma máquina de envase de leite UHT ao longo da curva da banheira. O método de pesquisa foi a modelagem quantitativa. Foram revisados conceitos, como a manutenção industrial, a relevância da confiabilidade dentro da manutenção industrial, a metodologia RCM (Reliability Centered Maintenance – Manutenção Centrada em Confiabilidade) e a curva da banheira e sua interpretação ao longo do ciclo de vida de um equipamento, componente ou subsistema. Para essa modelagem, modelos de distribuição de probabilidade para os tempos entre falhas foram usados. Os testes de probabilidade, utilizando o modelo de Weibull, realizados sobre dados obtidos em campo, mostraram que a máquina analisada aproxima-se da fase senil na curva da banheira após cerca de 8.000 horas de trabalho. O estudo também demonstrou a necessidade de revisão do plano de manutenção recomendado pelo fabricante, para que se prolongue a fase de maturidade da máquina.

Palavras-chave: Gestão da manutenção. Confiabilidade. Análise de Weibull.

Proposta de método de análise de confiabilidade de navios

Trabalho de Natacci, Souza e Martins (2007).

Resumo: Um navio pode ser considerado um sistema composto por uma série de subsistemas, tais como estrutural, de propulsão, de movimentação de carga, entre outros, os quais devem operar apresentando um desempenho específico a fim de manter a condição operacional da embarcação em conformidade com os requisitos de projeto. Sob o ponto de vista de confiabilidade, deve-se definir o período de tempo em que se deseja essa condição operacional, bem como em que fase da operação do navio, tal como navegação, operação de atracamento ou carga/descarga. A confiabilidade de um sistema está relacionada com a confiabilidade dos seus componentes e com as políticas de manutenção associadas aos mesmos, que não só influenciam no tempo de retorno à operação, como também na degradação da confiabilidade do sistema. Este trabalho apresenta um método para a análise de confiabilidade de navios e de seus subsistemas baseado na aplicação dos tradicionais métodos de análise de confiabilidade, tais como análise de modos e efeitos de falhas, árvores de falhas e diagrama de blocos. Por meio desses métodos, identificam-se componentes críticos de um dado subsistema, ou seja, aqueles cujas falhas implicam grave degradação do desempenho do subsistema em análise. De posse desses componentes críticos, podem-se sugerir alterações na configuração do subsistema, com a adição de elementos redundantes, com o objetivo de aumentar a sua confiabilidade. No caso do subsistema já estar em operação, com a aplicação dos conceitos da Manutenção Centrada em Confiabilidade (RCM), podem-se sugerir políticas de manutenção preventivas ou preditivas para os componentes críticos de forma a reduzir a degradação da sua disponibilidade.

Cálculo da disponibilidade e da posição na curva da banheira de uma válvula de processo petroquímico

Trabalho de Wuttke e Sellitto (2008)

Resumo: O objetivo do artigo foi apresentar um método para calcular a disponibilidade e posicionar, ao longo de seu ciclo de vida, na curva da banheira, um sistema tecnológico complexo sujeito a desgaste

e a intervenções incompletas de manutenção. O método de pesquisa foi o estudo de caso exploratório em planta petroquímica, aplicado em uma válvula de processo, um sistema complexo, composto por subsistemas que interagem e afetam o resultado. O método proposto é uma técnica quantitativa que pode servir como alternativa para etapas de um modelo estratégico já proposto para a gestão da manutenção industrial, a RCM. O artigo revisa conceitos e teoria da confiabilidade aplicada à manutenção de sistemas complexos industriais. Na pesquisa, foram levantados, no sistema de informações da empresa, os tempos entre falhas e para o reparo do sistema, e modelaram-se distribuições para esses tempos. Com base nos resultados, foram calculadas as funções Confiabilidade $R(t)$ e Manutenibilidade $M(t)$ e, pela combinação de seus valores esperados, a disponibilidade, que ficou acima de 99%. Também foi calculada a função taxa de falhas $h(t)$. Como seu comportamento foi crescente, admitiu-se que o sistema está em fase de mortalidade senil. Pelo referencial teórico da RCM, a estratégia de manutenção indicada é a prevenção e a preparação para eventual reforma.

Palavras-chave: Disponibilidade. Confiabilidade. Manutenibilidade. Manutenção em indústria petroquímica. RCM.

Sistematização do processo de projeto para confiabilidade e manutenibilidade aplicado a sistemas hidráulicos e implementação de um sistema especialista

Trabalho de Vinadé (2003)

Resumo: O objetivo desta tese é apresentar o desenvolvimento de um sistema especialista para sistematização do conhecimento relativo ao projeto de sistemas hidráulicos que facilite o processo de projeto para a confiabilidade e manutenibilidade desses sistemas. O conhecimento sistematizado para confiabilidade e manutenibilidade envolve modelagem confiabilística, análise dos modos de falha e seus efeitos que irão auxiliar no estabelecimento de tarefas de manutenção eficientes e baixo custo para cada componente, conforme a estratégia Manutenção Centrada na Confiabilidade. A sistematização desse conhecimento é baseada no processo de desenvolvimento de um sistema especialista, focando as quatro primeiras etapas: estudo de viabilidade, aquisição do conhecimento, re-

apresentação do conhecimento e projeto. Este trabalho de tese apresenta, entre outras contribuições, uma ferramenta computacional desenvolvida para inferir manutenções controladas (preditivas), preventivas e corretivas para cada componente nas fases iniciais de projeto de sistemas hidráulicos (mais precisamente para reguladores de velocidade de turbinas hidrelétricas), no processo de aquisição do conhecimento para modelagem confiabilística, visando à indicação dos principais componentes para execução da função principal do sistema hidráulico e no uso da análise de modos de falha e seus efeitos para indicação de manutenções em componentes com modos de falha críticos que comprometem a função principal, segurança pessoal e ambiental. A tese também apresenta algumas observações referentes à avaliação dos especialistas durante processo de validação do sistema especialista protótipo. Além de avaliar a aplicação do protótipo, essas opiniões contribuem também para sugerir novas perspectivas de estudos na área de manutenibilidade e confiabilidade.

Modelagem de usinas eólicas para estudos de confiabilidade

Trabalho de Leite, Borges e Falcão (2006)

Resumo: Este trabalho desenvolve um modelo computacional de representação probabilística da geração de usinas eólicas para estudos de confiabilidade. O modelo pode fornecer a estimativa anual da energia produzida e calcular indicadores de desempenho, que podem ser usados na análise de viabilidade de implantação das usinas. O modelo combina as características aleatórias da velocidade do vento às informações operativas das turbinas, tais como as taxas de falha e de reparo, representando o comportamento da usina eólica por um processo de Markov. Foram feitas simulações com séries reais de velocidade de vento de regiões do Brasil e os resultados reproduziram com sucesso o comportamento de todos os componentes presentes no modelo.

Palavras-chave: Confiabilidade de Sistemas de Potência. Geração Eólica. Modelo de Usinas Eólicas.

Análise de falhas e da posição na curva da banheira de moldes empregados em equipamentos de injeção

Trabalho de Reis e Andrade (2009)

Resumo: Este trabalho apresenta uma aplicação da confiabilidade aplicada ao estudo de falhas em moldes de injeção em uma empresa do setor elétrico localizada no Estado do Rio Grande do Sul. Durante um período de um ano, foram coletados dados de falha em moldes de injeção e inseridos em dois programas estatísticos para verificar a aderência à distribuição de Weibull. Logo após, considerações foram realizadas a respeito da fase da curva da banheira na qual os moldes de injeção estão inseridos, correlacionando os resultados oriundos do modelo com informações obtidas do dia a dia da operação do equipamento. Verificou-se que os dados obtidos através da análise de confiabilidade são aderentes com o comportamento do equipamento na produção, evidenciando pontos que devem ser objeto de melhoria dentro do processo, a fim de promover um aumento da produtividade e da confiabilidade do equipamento estudado.

Palavras-chaves: Confiabilidade. Moldes de injeção. Análise de falhas. Curva da banheira. Distribuição de Weibull.

A confiabilidade como fator de valor na melhoria de produtos. Estudo de caso: sistema de embreagem automotiva

Trabalho de Teixeira (2004)

Resumo: No cenário atual, para serem competitivas, as empresas enfrentam o desafio de desenvolverem novos produtos em um espaço curto de tempo, com tecnologia superior à anterior e com custos reduzidos para garantir a sobrevivência do negócio. E o sucesso está diretamente atrelado aos requisitos exigidos pelos clientes, onde *qualidade, confiabilidade, entrega e preço* são o mínimo que se espera. Neste trabalho, são abordadas metodologias utilizadas para o Planejamento e a Garantia da Qualidade, as quais devem ser utilizadas já na fase de concepção do projeto do produto, pois é aqui que nasce em grande parte a qualidade, a confiabilidade e o preço final do produto. O produto escolhido para

análise se trata da Embreagem Automotiva e, como método proposto, fez-se primeiramente uma interação entre o Modelo de Kano juntamente com o QFD, Custeio Alvo e Análise de Valor, a fim de se avaliar o grau de atendimento aos requisitos do cliente e determinar quais as funções cujos custos relativos estão acima das necessidades relativas, oferecendo, portanto, potencial para otimização ou mesmo eliminação. Tem-se, em seguida, a construção da Árvore de Falhas (FTA) para identificação dos componentes críticos que oferecem maior risco de falha no sistema. O trabalho tem por objetivo final a análise de Confiabilidade e Regressão dos resultados obtidos nos ensaios para determinação da confiabilidade da embreagem em estudo, componentes a serem melhorados ou otimizados, bem como criar uma metodologia para desenvolvimento de produtos otimizados.

Palavras-chave: Confiabilidade. Fta. Ensaios Acelerados. Embreagem Automotiva. Análise de Valor. Modelo de kano. Qfd. Custeio alvo. Desenvolvimento de produto.

Análise de disponibilidade aplicada a processo de extrusão - estudo de caso em uma indústria de embalagens plásticas

Trabalho de Souza, Rosa e Carvalho (2015)

Resumo: As organizações buscam cada vez mais diminuir a variabilidade de seus processos através de medidas que contemplem a elevação da confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade dos equipamentos. No cenário de mercado atual, caracterizado pela grande competitividade entre as empresas em nível mundial, é sempre importante buscar formas otimizadas de gestão. Este estudo propõe uma análise de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade a partir de um banco de dados cedido pela indústria Plastibom Embalagens Plásticas Bom Despacho LTDA. O estudo foi realizado no setor de extrusão, considerado o mais crítico de todo o processo, o qual é composto por quatro extrusoras independentes. Os resultados obtidos demonstram alta disponibilidade operacional apesar da elevada probabilidade de falha, tornando evidente a importância das atividades de manutenção.

Palavras-chave: Confiabilidade. Disponibilidade. Manutenção. Manutenibilidade.

Perceba como a confiabilidade abrange diversas áreas de atuação e suporta a manutenção das operações e desempenho empresarial: você viu exemplos de aplicação da teoria, com seus modelos estatísticos, ferramentas diversas da Engenharia de Confiabilidade para resolver problemas e gerar soluções na área de assistência técnica, gestão de suprimentos, planejamento de operações e manutenção, gestão do conhecimento, modelagem computacional e simulação, medição de desempenho, fabricação de ferramentas de produção, desenvolvimento de novos produtos e processos de produção, ou seja, diversas áreas de atuação do engenheiro de produção são altamente dependentes do uso dos conceitos, ferramentas e modelos de confiabilidade.

===== **Atividade final** =====

Atende aos objetivos 1, 2 e 3

1. Uma pessoa está distraída com seu celular e atravessa a rua sem prestar atenção nos veículos, sendo atropelada. Que tipo de erro ela cometeu?
 - a) técnico.
 - b) premeditado.
 - c) por descuido.
 - d) intrínseco.

2. O gerente de uma pizzaria pede ao seu entregador que faça uma entrega em uma localidade que fica 10 Km de distância da pizzaria. Mas a entrega deve ser feita em, no máximo 10 minutos e diz ao entregador que, se ele atrasar, terá de pagar pela pizza. No caminho, o entregador sofre um acidente. Que tipo de erro ocorreu?
 - a) Erro técnico;
 - b) Erro premeditado;
 - c) Erro por descuido;
 - d) Erro intrínseco.

3. O gerente de outra pizzeria instrui a seus entregadores que eles devem zelar pela segurança: que não devem fazer ultrapassagens perigosas, devem respeitar a sinalização, não devem exceder os limites de velocidade etc. Ele pede a um entregador para entregar uma pizza em um local distante e o funcionário, não querendo perder muito tempo para poder fazer outras entregas e ganhar mais dinheiro, não seguiu as orientações do gerente e acabou se acidentando. Que tipo de erro ocorreu?

- a) técnico;
- b) premeditado;
- c) por descuido;
- d) intrínseco.

4. Um dispositivo *poka-yoke* serviria para...

- I. reduzir a probabilidade de ocorrência de um erro.
- II. reduzir a probabilidade de detecção de um problema.
- III. reduzir a severidade de um problema.
- IV. reduzir a criticidade de um problema.

É correto o que se afirma em:

- a) I e II somente.
- b) I e IV somente.
- c) I, II e III somente.
- d) I, II, III e IV.

5. Leia os resumos apresentados em **1.2 Sistemas mecânicos** e explique como as ferramentas e métodos que você já estudou na disciplina Confiabilidade são aplicadas em problemas reais de Engenharia.

Resposta comentada

1. Letra C. Falha na execução das ações necessárias para atingir um objetivo, por conta da fragilidade humana em manter a atenção.

2. Letra A. Como a entrega teria de ser feita a uma distância de 10Km, em um tempo de até 10 minutos, o entregador precisaria desenvolver uma velocidade média de 1Km por minuto, o equivalente a 60Km/h. Considerando curvas, cruzamentos e paradas obrigatórias, que levariam à redução de velocidade, seria necessário o entregador desenvolver velocidades altas para conseguir fazer a entrega no prazo, o que é inadequado. Trata-se, portanto, de um erro técnico, caracterizado pela falha no atingimento de um objetivo devido a um planejamento incorreto, como por exemplo, solicitar-se às pessoas fazer o que é fisicamente difícil ou até impossível.

3. Letra B. Erro premeditado ou violação, que é a falha quando o trabalhador conhece as ações corretas e conscientemente executa ações alternativas.

4. Letra B. Na realidade, aumentaria a probabilidade de detecção. Não tem efeito sobre a severidade, mas, ao reduzir a probabilidade de ocorrência e/ou aumentar a probabilidade de detecção, reduziria a criticidade.

5. Nos estudos apresentados, vimos a aplicação dos índices de confiabilidade e manutenibilidade (Aulas 2 e 3) nos trabalhos de Wuttke e Sellitto (2008), Vinadé (2003) e Souza, Rosa e Carvalho (2015).

Quanto à confiabilidade de componentes e sistemas (Aula 4), isso foi abordado por Natacci, Souza e Martins (2007), ao passo que as funções estatísticas da confiabilidade (Aulas 5 e 6) foram aplicadas por Silva, Reis e Fernandes (2013), Carnaúba e Sellitto (2013), Wuttke e Sellitto (2008), Vinadé (2003), Leite, Borges e Falcão (2006) e Reis e Andrade (2009).

A análise dos modos de falha (Aulas 7 e 8) foi foco do estudo de Natacci, Souza e Martins (2007), enquanto a Árvore de Falha (Aula 9) foi vista também por Natacci, Souza e Martins (2007) e Teixeira (2004).

E, finalmente, a Manutenção Centrada na Confiabilidade (Aula 10) teve a atenção de Carnaúba e Sellitto (2013), Natacci, Souza e Martins (2007) e Wuttke e Sellitto (2008).

Conclusão

O ser humano, diferentemente dos componentes, máquinas, equipamentos e instalações, é pouco previsível, além de não ser um recurso apropriado para atuar por longos períodos em atividades que exijam atenção. Lafraia (2014) cita, por exemplo, que estudos na Segunda Guerra Mundial indicaram que o tempo máximo que um vigia de bordo deveria atuar era de meia hora, pois períodos mais longos colocavam em risco a vida de todos os envolvidos, pois a probabilidade de o vigia perceber uma aproximação era extremamente reduzida.

Além disso, aspectos motivacionais, psicológicos, culturais, traços de personalidade, estresse, condições mentais etc. são sempre um risco às violações.

A confiabilidade humana, junto a outras ferramentas e modelos, tem sido utilizada em diversas áreas de Engenharia.

Resumo

A confiabilidade humana é uma área de estudo de grande importância, visto que, em diversas áreas, as falhas humanas são muito superiores às falhas de componentes, máquinas e equipamentos. Tais falhas ocorrem por conta da fragilidade humana em manter a atenção (erros por descuido), pela falha no atingimento de um objetivo devido a um planejamento incorreto, como por exemplo, solicitar-se às pessoas fazer o que é fisicamente difícil ou até impossível (erros técnicos) ou quando o trabalhador conhece as ações corretas e conscientemente executa ações alternativas (erros premeditados ou violações).

Os erros com efeitos significativos, ou seja, que impactam o desempenho estão na interseção entre a atuação do trabalhador (tendência intrínseca ao erro) e as características do meio (ambiente indutor ao erro e ambiente intolerante ao erro). As contramedidas incluem ações para reduzir a ocorrência e aumentar a detecção (ações de motivação, treinamento, *poka-yoke* etc.).

Há inúmeros exemplos de aplicação de ferramentas e técnicas de Confiabilidade em Engenharia, tendo sido apresentados nove casos para estudo e análise.

Leituras Recomendadas

FERREIRA, Rita Cristina Renó. *Influência do fator humano em ensaios não destrutivos por correntes parasitas na manutenção de estruturas aeronáuticas*. 2008, 85p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção), Itajubá: Universidade Federal de Itajubá, 2008.

Informações sobre a próxima aula

Na próxima aula, você vai continuar a estudar aplicações da Confiabilidade em Engenharia, com foco agora em instalações industriais, equipamentos e sistemas eletro-eletrônicos.

Referências Bibliográficas

ARAUJO, Giovanni Moraes de. *Elementos do Sistema de Gestão de SMS-QRS : Teoria da Vulnerabilidade*. v1. 2. ed. Rio de Janeiro: GVC, 2010.

BARBOSA, Darlene Paulo; HAGUENAUER, Denise Faertes. A influência do fator humano nos cenários acidentais de uma refinaria de petróleo. In: V Congresso Brasileiro de Excelência em Gestão, 2009. Niterói, 02-04 jul 2009. *Anais...*

CARNAÚBA, Ederson Rodrigues; SELKITTO, Miguel Afonso. Análise de confiabilidade e evolução de uma máquina de envase de leite UHT ao longo da curva da banheira. *Revista Liberato*, Novo Hamburgo, v. 14, n. 22, p. 113-238 jul./dez. 2013.

CARVALHO NETO, Américo Diniz. *A ocorrência de acidentes no trabalho e sua correlação com os fatores humanos: estudo de caso: Braskem – Unidade de Insumos Básicos – Bahia*. 2006, 148f. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Bahia, Escola de Administração, 2006.

CORRÊA, Henrique Luiz. *Teoria geral da Administração: Abordagem Histórica da Gestão de Produção e Operações*. São Paulo: Atlas, 2003.

DROGUETT, Enrique López; MENEZES, Regilda da Costa Silva. Análise da confiabilidade humana via redes Bayesianas: uma aplicação à manutenção de linhas de transmissão. *Produção*, v. 17, n. 1, p. 162-185, jan./abr. 2007.

ENDEAVOR BRASIL. *Poka Yoke: como ter uma empresa à prova de erros*. Endeavor Brasil. Disponível em: <<https://endeavor.org.br/poka-yoke/>>. Acesso em: 22 abr. 2017.

EVAGELISTA, Clésia de Souza; GROSSI, Fernanda Machado; CARVALHO, Alessandra Lopes. Abordagem quantitativa para cálculo da confiabilidade humana: um estudo de caso aplicado à indústria automobilística. In: XXXI Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Belo Horizonte, 04 a 07 de outubro de 2011. *Anais...*

FOGLIATTO, Flávio Sanson; RIBEIRO, José Luis Duarte. *Confiabilidade e Manutenção Industrial*. São Paulo: Elsevier, 2009.

LAFFRAIA, João Ricardo Barusso. *Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade*. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2014.

LEEMIS, Lawrence Mark. *Reliability: Probabilistic Models and Statistical Methods* 2nd ed. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 2009.

LEITE, Andéa P.; BORGES, Carmem L. T.; FALCÃO, Djalma M. Modelagem de usinas eólicas para estudos de confiabilidade. *Revista Controle & Automação*, v.17, n.2, p. 177-188, abr., maio e jun. 2006,.

NATACCI, Faustina Beatriz; SOUZA, Gilberto Francisco Martha de; MARTINS, Marcelo Ramos. Proposta de método de análise de confiabilidade de navios. *Anais...* São Paulo: IPIN, 2007.

REIS, Luiz Otavio Rosa; ANDRADE, Jairo José de Oliveira. Análise de falhas e da posição na curva da banheira de moldes empregados em equipamentos de injeção. In: XXIX Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Salvador, 06 a 09 de outubro de 2009, *Anais...*

ROCHA, Henrique Martins. Projeto Ergonômico. In: ROCHA, H. M.; NONOHAY, R. G. (Org.). *Administração da Produção*. Porto Alegre: SAGAH, 2016, p. 155-168.

SILVA, Candido Luis Queiroz. *Estudo da aplicação de ferramentas de engenharia de confiabilidade na gestão de segurança de uma usina termelétrica*. 2008. 138f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Gestão). Niterói: Universidade Federal Fluminense, 2008.

SILVA, Edillon Pinheiro; REIS, Luciana Paula; FERNANDES, June Marques. Confiabilidade no pós-venda de equipamento utilizado na mineração. *P&D em Engenharia de Produção*, Itajubá, v. 11, n. 1, p. 29-42, 2013.

SOUZA, Marinilda Lima; PEREIRA-GUIZZO, Camila de Sousa; SANTOS, Alex Álisson Bandeira. Fatores humanos aplicados aos processos produtivos e à prevenção de acidentes: uma revisão da literatura. *Revista LEVS/UNESP*, Marília, ano 2014, edição 14, p. 203-217, nov. 2014,.

SOUZA, Juliana Rodrigues de; ROSA, Bruna Emanuelle de Avelar;

CARVALHO, Alessandra Lopes. Análise de disponibilidade aplicada a processo de extrusão - estudo de caso em uma indústria de embalagens plásticas. In: XXXV Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Fortaleza, 13 a 16 de outubro de 2015. *Anais...*

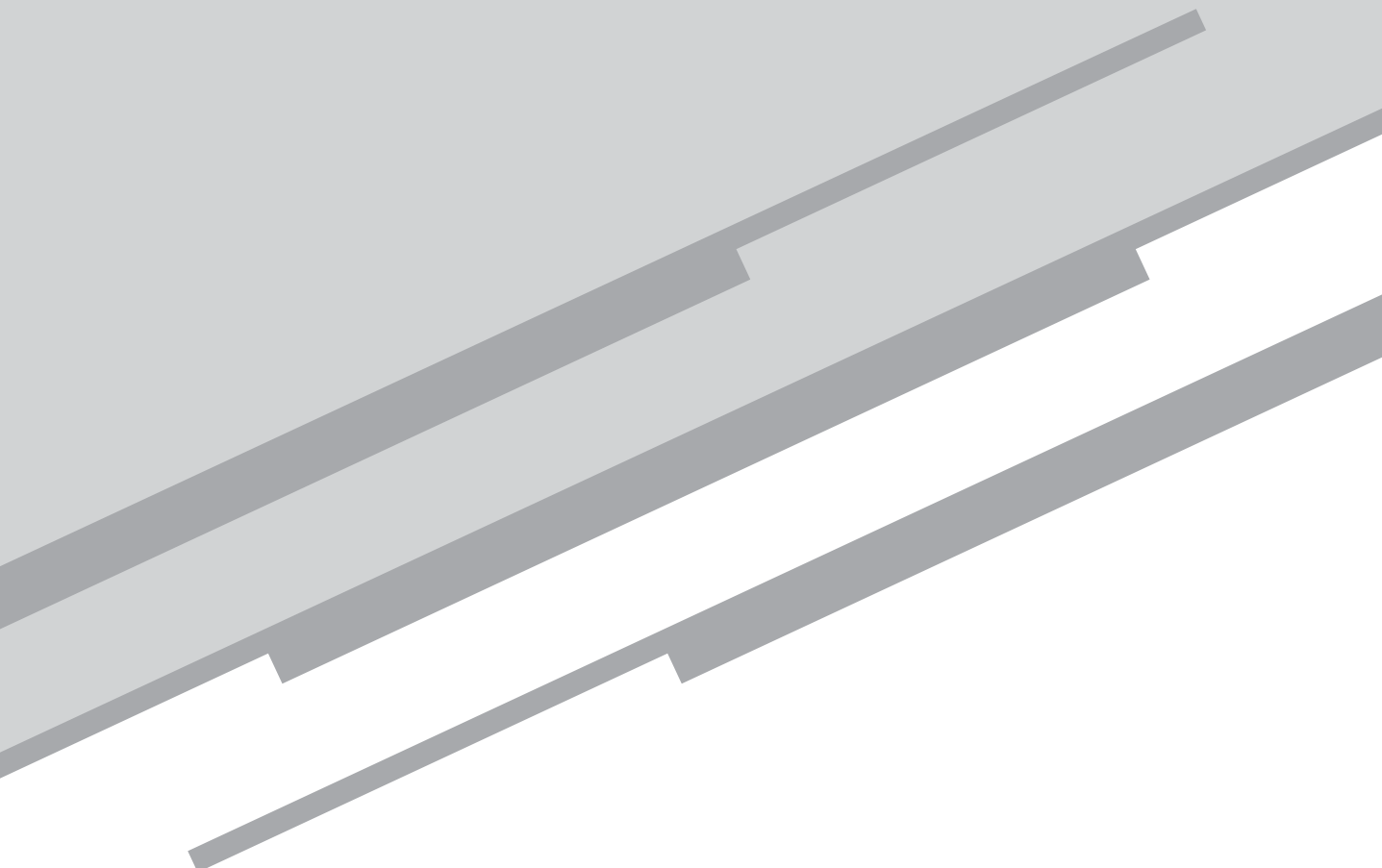
TEIXEIRA, Carlos Adriano Rigo. *A confiabilidade como fator de valor na melhoria de produtos*. Estudo de caso: sistema de embreagem automotiva. 2004, 129f. Dissertação (Mestrado profissional). Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, 2004.

VINADÉ, Cesar Augusto do Canto. *Sistematização do processo de projeto para confiabilidade e manutenibilidade aplicado a sistemas hidráulicos e implementação de um sistema especialista*. 2003. 233f. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

WUTTKE, Régis André; SELLITTO, Miguel Afonso. Cálculo da disponibilidade e da posição na curva da banheira de uma válvula de processo petroquímico. *Revista Produção Online*, v. VIII, n. IV, 2008.

Aula 12

Aplicações de confiabilidade
em engenharia – parte 2



Henrique Martins Rocha

Meta

Apresentar exemplos de aplicações da Confiabilidade em Engenharia.

Objetivos

Esperamos que, ao final desta aula, você seja capaz de:

1. relatar aplicações da Confiabilidade em Engenharia;
2. explicar como as diferentes ferramentas e técnicas estudadas nas aulas anteriores são aplicadas em problemas reais de Engenharia.

Pré-requisitos

Conhecer os conceitos das características da Qualidade (Aula 1), conhecer e ser capaz de aplicar os fundamentos de redundância (Aula 4), conhecer e ser capaz de aplicar os modelos de FMEA e FMECA (aulas 7 e 8), bem como FTA (Aula 9).

Introdução

Como você viu nas aulas anteriores, a Confiabilidade concilia conceitos de Qualidade, Estatística, Manutenção, Segurança, Ergonomia e Psicologia para analisar e buscar formas de reduzir as falhas, aumentando a disponibilidade de máquinas, equipamentos, conjuntos, sistemas e instalações e, conseqüentemente, a eficiência dos sistemas produtivos.

Nesta aula, continuamos a ver e estudar alguns exemplos de aplicações da Confiabilidade em Engenharia, instalações em geral, bem como aplicações na área de eletricidade e eletrônica.

Bons estudos!

Veremos, inicialmente, alguns exemplos voltados a instalações industriais.



Figura 12.1: Instalações industriais.

Fonte: <https://pixabay.com/pt/ind%C3%BAria-p%C3%B4r-do-sol-438428/>

A Engenharia da Confiabilidade como conhecemos hoje surgiu a partir dos ambientes industriais: a preocupação com a disponibilidade de equipamentos, máquinas e instalações, bem como o funcionamento dos produtos lá produzidos.

Nelas, máquinas, equipamentos, instrumentos e pessoas interagem entre si e com o meio, havendo diversas possibilidades de falhas por conta de tais interações.



skeeze

Figura 12.2: Interação homem-máquina.

Fonte: <https://pixabay.com/pt/sala-de-control-e-usina-energia-1782196/>

Máquinas e equipamentos são comandados pelo homem. Os comandos por ele executados dependem, dentre outras coisas, das respostas das máquinas (por exemplo, a leitura de medidores). Desta forma, há um ciclo de comando pelo homem, a ação da máquina a partir do comando e as informações que ela gera para o próprio homem.

Abordaremos, também, exemplos de aplicações nas áreas de Engenharia Elétrica (instalações e equipamentos), e, junto a isso, exemplos relacionados a equipamentos e componentes eletrônicos.

Instalações industriais

Listamos agora alguns exemplos de aplicações de Confiabilidade em Engenharia, em especial, instalações industriais. Por limitações de espaço, são apresentados os resumos e palavras-chave somente dos trabalhos, de forma a permitir uma visão geral dos estudos.

Mas você não deve se limitar aos resumos: busque esses e outros materiais para aprofundar o seu conhecimento sobre Confiabilidade. Esse é um tema ainda em evolução e muitos estudos são constantemente publicados.



Fontes recomendadas de consulta sobre Confiabilidade:

- Banco de teses e Dissertações da UNICAMP: <http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/list.php?tid=7>
- Banco de Teses e Dissertações da USP: <http://www.teses.usp.br/>
- Biblioteca Digital de Domínio Público: <http://www.dominio-publico.gov.br/pesquisa/PesquisaObraForm.jsp>
- Biblioteca Digital Scielo: <http://www.scielo.org/php/index.php>
- Google Acadêmico: <https://scholar.google.com.br/>
- Portal da Associação Brasileira de Engenharia de Produção - ABEPRO: <http://portalabepro.educacao.ws/> (a partir do Portal da ABEPRO, você pode acessar, também, o site do Encontro Nacional de Engenharia de Produção – ENEGEP).
- Portal de Periódicos da Capes: <http://www.periodicos.capes.gov.br/>
- Revista GEPROS: <https://revista.feb.unesp.br/index.php/gepros>
- Revista Produção Online: <https://www.producaoonline.org.br/rpo>

Cálculo da disponibilidade e posição no ciclo de vida de três linhas de produção de uma empresa da indústria química

Trabalho de Silva Filho e Sellitto (2014)

Resumo: O objetivo deste artigo é calcular a disponibilidade $Av(t)$ e identificar a posição no ciclo de vida de três linhas de produção de BOPP (Biaxially Oriented Polypropylene - Polipropileno Biorientado). Por software, foram modelados os tempos até a falha e os tempos até o reparo de vinte eventos de falha para cada linha, ocorridos em abril de 2012. As distribuições exponenciais e de Weibull modelaram os TBF, e as distribuições normal e lognormal modelaram os TTR. Pelos valores esperados das distribuições, calcularam-se as disponibilidades $Av(t)$, que ficaram entre 92% e 95%. Pelos fatores de forma das distribuições

dos TBF, concluiu-se que as linhas 1 e 3 encontram-se no período de desgaste, e a linha 2 no período de vida útil.

Palavras-chave: Confiabilidade. Manutenibilidade. Disponibilidade. RCM.



Olafpictures

Figura 12.3: Indústria química. Plantas químicas têm como característica geral o elevando investimento em equipamentos e instalações, produção contínua em alto volume extremamente alto, grande número de pessoas envolvidas e alto risco de incêndio, explosões e acidentes em geral.

Fonte: <https://pixabay.com/pt/bulg%C3%A1ria-vratsa-abandonados-1351947/>

A Adoção do Conceito de Manutenibilidade como estratégia para a inovação da gestão da manutenção civil da FIOCRUZ

Trabalho de Vieira (2007)

Resumo: Organizações privadas e públicas convivem com diferentes níveis de exigências demandadas por seu meio ambiente, em que as primeiras são constantemente pressionadas em um contexto de extrema concorrência e competitividade, enquanto, nas organizações públicas, elevam-se as cobranças pelo incremento da eficiência no atendimento às demandas da sociedade. Portanto, as transformações no ambiente no qual essas organizações se inserem proporcionam a oportunidade para a implementação de formatos inovadores de gestão, a fim de responderem aos desafios e questionamentos que lhes são impostos. Impõe-se, deste modo, a adoção de formas de gestão que valorizem a perspectiva

sistêmica e, ao articular o todo organizacional, buscam promover o processo inovativo e reforçar as vantagens competitivas organizacionais. Dessa forma, a modernização da gestão das atividades de manutenção vem se destacando nos processos de inovação gerencial, indo, portanto, ao encontro das necessidades de aumento de produtividade e redução dos custos operacionais, que podem ser alcançados pelo incremento da disponibilidade, da confiabilidade e da manutenibilidade de seus sistemas produtivos. A eficácia das atividades de manutenção civil está diretamente ligada a diversos fatores, em especial aos aspectos físicos e operacionais de uma edificação ou infraestrutura, previamente projetada para facilitar e otimizar as ações de manutenção. A esses aspectos dá-se o nome de *Manutenibilidade*. A moderna gestão de manutenção deve, portanto, buscar a inovação de seus serviços e processos como forma de contribuir efetivamente para o cumprimento da missão, da visão e dos objetivos das organizações garantindo, assim, a sua plena inserção no contexto produtivo. O presente estudo teve por finalidade propor a inovação da gestão da manutenção civil da FIOCRUZ através da adoção do conceito de manutenibilidade.

Palavras-chave: Inovação. Estratégia. Gestão de manutenção. Manutenibilidade.



Joffi

Figura 12.4: Construção civil.

Fonte: <https://pixabay.com/pt/canteiro-de-obras-1477687/>

A construção civil é um trabalho complexo, que envolve inúmeras pessoas com diferentes habilidades, bem como grande volume de materiais e equipamentos diversos. Os estudos de confiabilidade têm grande potencial de aprimorar os resultados e garantir a segurança de todos os envolvidos.

Análise de falhas aplicada ao planejamento estratégico da manutenção

Trabalho de Takayama (2008)

Resumo: O presente trabalho apresenta um estudo com o objetivo de identificar a aplicação de resultados de análises de falhas no planejamento estratégico da manutenção. A escolha do tema foi baseada no envolvimento profissional da autora com a área de engenharia de manutenção bem como no seu interesse em aprofundar seus conhecimentos em assuntos como planejamento estratégico e qualidade. Foi realizado um estudo bibliográfico de assuntos relacionados ao tema para contextualizar o assunto. O desenvolvimento da área de manutenção ocorreu ao longo dos últimos 30 anos e modificou os objetivos da atividade, passando do conceito de consertar a falha para prevenir sua ocorrência. Nesse contexto, vários sistemas foram criados para atingir o objetivo de melhorar a confiabilidade dos equipamentos de uma planta. Este trabalho demonstra como ocorre o desenvolvimento de um processo de análise de falhas de equipamentos, identificando quais resultados são obtidos e aplicando esses resultados na melhoria do processo de planejamento da produção.

Palavras-chave: Manutenção. Confiabilidade. Análise de falha. Planejamento da manutenção.

Método para análise de características de projeto para manutenabilidade - determinação de um índice de manutenabilidade em projeto de produtos/ sistemas

Trabalho de Alvarez (2001)

Resumo: O projeto de produtos/sistemas hoje exige a inclusão de características de manutenabilidade para facilitar as atividades de manutenção e, com isso, reduzir o tempo de intervenção para reparo, custo do

ciclo de vida e melhoramento da disponibilidade e regularidade operacional. Este trabalho desenvolve um modelo de avaliação escalar dos indicadores de manutenibilidade, utilizando funções de valor obtidas com a aplicação do MCDA (Multicritério de Apoio à Decisão). Os valores dos indicadores obtidos são correlacionados à frequência de intervenção de manutenção de cada componente/conjunto, para determinar o índice de manutenibilidade global de produtos/ sistemas. Com esta pesquisa direcionada à manutenibilidade, pretende-se facilitar: (i) a especificação de produtos/sistemas adaptados às necessidades de manutenção, (ii) a comparação entre diferentes opções de um mesmo produto, (iii) a correlação do índice de manutenibilidade com outros parâmetros de interesse no desempenho das atividades de manutenção, entre outras questões, no tratamento de características de manutenibilidade por parte do projetista, produtor e consumidor.

Palavras-chave: Índice de manutenibilidade. Manutenibilidade. Manutenção.

Estudo da confiabilidade de máquinas CNC como fator determinante para a escolha da política de manutenção: um estudo de caso

Trabalho de Marcorin (2005)

Resumo: Muitas são as políticas, técnicas e ferramentas que são apresentadas como soluções para os problemas de manutenção. Programas complexos para o gerenciamento da manutenção, como TPM e RCM, e mesmo outros mais simples, como o 5S, são aplicados em grande parte das empresas que buscam excelência nesta área. A aplicação dessas políticas, técnicas, ferramentas e programas requer uma análise das possibilidades de cada um deles e sua aplicabilidade em cada sistema, linha de produção ou máquina-alvo. Requer, ainda, uma análise do comportamento das falhas apresentadas por esses elementos, de modo a direcionar as melhores ações de manutenção para cada modo de falha. Este trabalho apresenta uma revisão das diversas políticas, técnicas e ferramentas de manutenção sob uma óptica gerencial. Apresenta, também, uma discussão sobre os custos de manutenção e os custos da não manutenção, além da sua influência na escolha e gestão das políticas de manutenção. Apresenta, principalmente, uma discussão sobre a aplicação de conceitos de confiabilidade como fator norteador da escolha da melhor política de manutenção para cada caso. Finalmente, o trabalho

apresenta um estudo de caso em que foram aplicados os conceitos de confiabilidade na escolha da política de manutenção para um novo projeto de máquinas-ferramenta CNC. O resultado deste caso mostra que o estudo de confiabilidade pode efetivamente direcionar a escolha das ações de manutenção de equipamentos, constituindo-se em ferramenta importante no planejamento da manutenção.

Palavras-chave: Manutenção. Confiabilidade. MTBF. RCM. CNC.



Se você tiver interesse em conhecer uma máquina CNC, acesse o link https://www.istockphoto.com/br/foto/metal-machining-industry-worker-operating-cnc-milling-machine-gm611888690-105333605?irgwc=1&resource=AFF_IS_IR_SP_FreeImages_246195&asid=FreeImages&cid=IS&utm_medium=affiliate&utm_source=FreeImages&utm_content=246195&clickid=TIzSokVj0XDizivTD6VYmSwAUkgw7bzX70S5x00.

As máquinas de Comando Numérico Computadorizado (CNC) funcionam de forma quase autônoma: a partir de programas de computador previamente desenvolvidos, elas executam os diversos passos do processo produtivo, cabendo ao operador somente fazer a alimentação e acompanhamento das rotinas produtivas.

Metodologia para análise da confiabilidade de um conjunto de alta criticidade de uma planta siderúrgica integrada

Trabalho de Almeida (2007)

Resumo: O conhecimento da Confiabilidade de componentes de alta criticidade influencia diretamente o desempenho dos ativos produtivos das empresas. Seu estudo envolve um tratamento sistematizado de uma grande massa de dados e informações, sendo necessário simplificar a base de informações sem, contudo, perder qualidade e precisão dos dados. Isso ocorre por meio da redução de dimensionalidade da base original de dados. Esta dissertação tem por objetivo propor uma metodologia para analisar a confiabilidade de um conjunto de alta criticidade, utilizando técnicas estatísticas multivariadas mediante estudo de seu tempo de vida. A metodologia utilizada envolveu a pesquisa de campo e documentos operacionais. Foram consideradas na pesquisa 10 amostras com 38 variáveis cada uma. Foi utilizada a Análise de Componentes Principais como ferramenta estatística de redução de dimensionalidade que simplificou a análise a apenas 9 Componentes Principais. A Análise de Confiabilidade envolveu a determinação da função Confiabilidade, a Taxa de Falhas e o Tempo Médio entre Falhas do componente crítico. Nessas análises, foi necessário utilizar os tempos de vida apenas do primeiro componente (CP1), pois ele absorveu 40% da variabilidade dos dados, o que se tornou suficiente devido à pouca variabilidade dos demais componentes. A análise envolveu avaliação do primeiro componente (CP1) em cinco distribuições de probabilidade: Normal, Log-normal, Exponencial, Gamma e Weibull. Os testes de ajustes de distribuição e de aderência apontaram a distribuição Log-normal como a mais adequada. Os resultados obtidos pela análise da função Confiabilidade mostraram probabilidades de não ocorrências de falhas de 82,17%, 60,47% e 9,00% para os percentis 10, 50 e 90 respectivamente. A Taxa de Falhas mostrou um pico em 542 dias de operação, ponto de extremo risco operacional por se tratar de um componente altamente crítico. Por fim, o Tempo Médio entre Falhas atingiu 230 dias, confirmando a ocorrência de duas falhas no ano do componente crítico. Os resultados advindos da aplicação da metodologia proposta mostraram-se consistentes e coerentes com os dados históricos do componente crítico. A previsibilidade do tempo ótimo de vida do componente crítico possibilitou a sua substituição no momento certo, reduzindo o risco de paradas não programadas, aumentando a estabilidade operacional e consequen-

temente reduzindo o risco de interrupções no processo produtivo da unidade industrial estudada.

Palavras-chave: Confiabilidade. Métodos estatísticos multivariados. Componentes de alta criticidade.

Análise da manutenção em uma empresa do setor salineiro do Rio Grande do Norte

Trabalho de Sampaio e Fernandes Neto (2013)

Resumo: O presente trabalho apresenta um estudo sobre a área de manutenção de uma indústria salineira. A escolha do tema ocorreu pela sua importância em um segmento tão específico, como o setor salineiro, que age de forma tão severa sobre seus equipamentos e maquinários. A manutenção dos equipamentos é essencial na garantia da confiabilidade deles e do funcionamento do sistema, pois a não realização da manutenção ou até mesmo a realização de forma incorreta coloca em risco a integridade do equipamento e das pessoas envolvidas, bem como o aumento dos custos com manutenção e do tempo que o equipamento fica parado. Com isso, este trabalho visa analisar e propor melhorias nesta área, a fim de antever problemas, minimizar o número de paradas decorrentes de falhas nos equipamentos e consequentemente reduzir custos com manutenção, aumentar a produção e o faturamento da empresa. Para tanto, é realizado um estudo bibliográfico de assuntos relacionados ao tema para contextualizar o assunto. Com o intuito de alcançar os propósitos da manutenção já que as mesmas são fundamentais no processo produtivo das empresas que desejam se destacar por excelência e se manter competitivas no mercado, neste trabalho também é sugerido um Plano de Manutenção, bem como são aplicadas algumas ferramentas, como o cálculo do Tempo Médio entre Falhas e do Tempo Médio de Reparo, bem como a Análise de Modos e Efeitos de Falha e a Árvore de Análise de Falha.

Palavras-chave: Plano de manutenção. Tempo Médio entre Falhas. Tempo Médio de Reparo. Análise de Modos e Efeitos de Falha. Árvore de Análise de Falha.

Disponibilidade e confiabilidade: aplicação da gestão da manutenção na busca de maior competitividade

Trabalho de Paschoal et al. (2009)

Resumo: O presente artigo tem por objetivo aplicar e apresentar uma revisão bibliográfica que fundamente a relação existente entre Disponibilidade e Confiabilidade na gestão da manutenção, como um elemento único, e a competitividade empresarial. Inicia-se revisando conceitos ligados à definição de manutenção, às estratégias e às metodologias de gestão da manutenção mais utilizadas. A seguir, descrevem-se os conceitos de manutenção estratégica e algumas ferramentas, explica-se o que é Disponibilidade e Confiabilidade e sua relação com a gestão da manutenção. Por fim, com base no exposto, relaciona-se a competitividade de uma organização, sua função manutenção e o paradigma moderno da manutenção.

Palavras-chave: Manutenção industrial. Confiabilidade. Disponibilidade. Competitividade. Indicadores. Paradigma moderno.

Instalações, componentes e equipamentos eletroeletrônicos

Listamos agora alguns exemplos de aplicações de Confiabilidade em Engenharia, em especial, na área eletroeletrônica. Por limitações de espaço, são apresentados os resumos e palavras-chave somente dos trabalhos, de forma a permitir uma visão geral dos estudos.

Confiabilidade e exatidão de processos de calibração: uma proposta de metodologia

Trabalho de Oliveira e Santos (2004)

Resumo: O objetivo deste trabalho é apresentar uma metodologia genérica que possa permitir a análise de processos de medição e verificar se eles apresentam a confiabilidade e a exatidão necessárias para a execução das atividades de calibração. A motivação para o desenvolvimento da metodologia proposta surgiu devido à dificuldade que se nota no atendimento a alguns requisitos técnicos da norma NBR ISO/IEC 17025 [1], em especial o 5.9, que fala sobre a “Garantia da Qualidade de Resultados de Ensaio e Calibração”. É aqui apresentada a rotina a ser

seguida quando se avalia um processo de medição. A metodologia proposta foi testada em um processo do Laboratório de Metrologia Dimensional (LAMIN) do INMETRO na área de Ângulo Plano, mostrando-se válida. A qualidade contínua das medições realizadas em um laboratório metrológico é assegurada quando a metodologia é aplicada periodicamente e de acordo com alguns critérios estabelecidos.

Palavras-chave: Confiabilidade. Exatidão. Qualidade de resultados.

Arquitetura de hardware do computador de bordo para o satélite universitário ITASAT e confiabilidade

Trabalho de Vinci e Saotome (2009)

Resumo: Este artigo apresenta um estudo de caso que visa ao desenvolvimento de uma arquitetura de *hardware* para o computador de bordo do satélite universitário ITASAT, baseado em arquitetura tolerante à falha e em resultados de cálculos de Confiabilidade. O computador de bordo de um satélite inserido no subsistema de supervisão de bordo tem funções de recepção, processamento e distribuição de comandos para os subsistemas e carga útil do satélite; e de aquisição, formatação, armazenamento e transmissão de telemetrias para os subsistemas e carga útil. Os principais requisitos de um computador de bordo é a alta confiabilidade, a capacidade de processamento em tempo real, a resistência à radiação, minimização de potência, volume e massa. O aumento de confiabilidade pode ser alcançado pela técnica de tolerância a falhas, que tem como base a adição de redundâncias ao sistema. Estas podem estar presentes no *hardware*, *software*, tempo ou informação. Neste estudo de caso, são consideradas técnicas de implementação de redundância em *hardware*. Uma arquitetura sem redundância, na sua concepção simplificada, foi projetada, e sua confiabilidade calculada para uma missão de 24 meses. A partir dos resultados, são propostas mais duas arquiteturas redundantes, tolerantes à falha, com suas respectivas confiabilidades calculadas para o mesmo período de missão. Os resultados finais demonstram a evolução positiva da confiabilidade por intermédio das arquiteturas tolerantes à falha. Isso traz sustentação na escolha mais eficaz da arquitetura do computador de bordo para o satélite universitário ITASAT, podendo estender as redundâncias a outras aplicações espaciais.

Palavras-chave: Satélite. Computador de bordo. Tolerância à falha. Redundância de *hardware*. Confiabilidade.



Figura 12.5: Circuito eletrônico. O surgimento e a evolução de eletrônica foi um dos grandes alavancadores dos estudos sobre Confiabilidade. A capacidade de integrar funções e de comandar automaticamente máquinas e equipamentos fez com que a preocupação sobre o funcionamento adequado de componentes e circuitos ganhasse peso na indústria.

Fonte: <http://pt.freeimages.com/photo/circuit-board-1539679>

Análise de confiabilidade de torres de transmissão de energia elétrica quando sujeitas a ventos fortes via método analítico FORM

Trabalho de Hatashita, Justino Filho e Abdalla Filho (2008)

Resumo: Este trabalho tem como objetivo apresentar uma metodologia para análise de confiabilidade de torres de transmissão de energia elétrica - TTEE, quando elas estão sujeitas às solicitações de natureza aleatória, como a intensidade da velocidade dos ventos sobre a estrutura. O método FORM foi implementado a fim de obter-se a confiabilidade de uma estrutura, considerando-se que há uma variabilidade de natureza probabilística dos efeitos das solicitações, bem como da resistência dos perfis tipo cantoneiras que compõem a torre. Selecionou-se um tipo de torre e, seguindo-se as orientações das normas de projeto, definiram-se as cargas impostas sobre a mesma (peso próprio, peso dos cabos e cargas de vento). Com o software SAP 2000, foi realizada a análise do dimensionamento da estrutura. Esses resultados serviram como dados de entrada para a rotina computacional desenvolvida no *software* Matlab para o cálculo da confiabilidade para todas as barras da torre. Os

resultados da análise de confiabilidade das barras foram confrontados com o estudo do dimensionamento da estrutura. A barra que apresentou o menor nível de confiabilidade também se apresentou como a mais crítica no dimensionamento. Desse modo, manteve-se coerência entre os resultados da análise do dimensionamento com a análise da confiabilidade da estrutura.

Palavras-chave: Confiabilidade. Método FORM. Ventos fortes.

Substituição de disjuntores de alta tensão: aumento de confiabilidade e de patrimônio em empresas concessionárias de Energia Elétrica

Trabalho de Silva (2013)

Resumo: Esta monografia apresenta o tema de retorno de investimentos e do aumento de confiabilidade do sistema elétrico brasileiro, das empresas distribuidoras de energia elétrica ao se trocarem os equipamentos depreciados por outros novos. Especificamente tratará da troca de equipamentos essenciais no contexto de uma subestação e com um alto valor econômico agregado – que são os disjuntores de alta tensão instalados em subestações de energia elétrica responsáveis pela transmissão e distribuição de energia elétrica – baseada nas regras atuais do responsável pela regulação desse ramo de mercado, a Agência Nacional de Energia Elétrica. Este trabalho é classificado como uma pesquisa científica aplicada com propósito explicativo e tem por objetivo propor a renovação dos equipamentos instalados dando como exemplo o retorno obtido ao se trocar um equipamento. Os resultados foram: validação da metodologia contábil, demonstração do aumento de confiabilidade do sistema após as substituições, demonstração do retorno de investimento e melhoria na gestão financeira destinada a verbas de custeio da empresa.

Palavras-chave: Disjuntores de Alta Tensão. Confiabilidade. Retorno de Investimento. Gestão de Ativos.



Andrea Kratzenberg

Figura 12.6: Instalações de geração de energia. A geração e distribuição de energia estão relacionadas a pesados investimentos, alta complexidade de equipamentos e instalações, risco para as pessoas envolvidas e uma constante preocupação quanto à disponibilidade, de forma a garantir o abastecimento de energia para as pessoas e empresas.

Fonte: <http://pt.freeimages.com/photo/power-station-1237318>

Elaboração de critérios e metodologias para dimensionamento ideal da quantidade de equipamentos da reserva técnica imobilizada de subestações

Trabalho de Gomes et al. (2012)

Resumo: O dimensionamento de equipamentos para uma reserva técnica estratégica (Reserva Imobilizada) foi mitigado com a utilização de índices de desempenho e de ferramentas estatísticas de probabilidade e confiabilidade para obter a otimização para a Reserva Imobilizada de ativos de subestações da CEMIG DISTRIBUIÇÃO S.A. Para se conseguir a equalização dos custos com equipamentos sobressalentes, a garantia da integridade e segurança do sistema elétrico de alta tensão, e a melhora da execução orçamentária de investimentos, o trabalho define uma ferramenta de orientação no processo de tomada de decisão so-

bre onde e quanto investir em equipamentos para manter a integridade do sistema.

Palavras-chave: Distribuição Estatística. Equipamentos de Subestações. Execução Orçamentária de Investimentos. Reserva Imobilizada.

Aumento de confiabilidade de sistemas embutidos usando redundância e algoritmos de decisões baseados em reconhecimento de padrões

Trabalho de Alves (2015)

Resumo: Com o avanço tecnológico, cada vez mais os sistemas embutidos estão presentes em nosso dia a dia. A Confiabilidade é um tópico importante, pois os sistemas críticos são controlados pelos sistemas embutidos cada vez mais. Esses sistemas interagem com o mundo que nos rodeia, por meio de informações oriundas da aquisição de dados através de sensores. A correta tomada de decisão desses sistemas depende de uma aquisição confiável de dados. Falhas podem ocorrer em qualquer sistema, entretanto é possível criar mecanismos que impeçam que essas falhas possam trazer danos ou até gerar catástrofes. Este trabalho aborda a melhoria da Confiabilidade dos sistemas embutidos através não só de técnicas de redundância, mas também de técnicas de detecção de anormalidades utilizando reconhecimento de padrões. A proposta é unir duas metodologias distintas – redundância e inteligência artificial – que se conectam para contribuir no desenvolvimento de sistemas embutidos mais confiáveis. Desenvolveu-se uma planta-piloto de aquecimento para a geração dos dados para os experimentos, que foram realizados com dados *on-line* para as técnicas de redundância e *off-line* para as técnicas de reconhecimento de padrões. Os resultados foram satisfatórios e demonstraram que a proposta abordada nesta pesquisa contribui para o aumento de confiabilidade de sistemas embutidos.

Palavras-chave: Sistemas Embutidos. Confiabilidade. Redundância. Reconhecimento de Padrões.

Análise da confiabilidade: um estudo de caso

Trabalho de Silva et al. (2015)

Resumo: A confiabilidade possui um papel fundamental no estudo de equipamentos, levando em conta que há uma grande dificuldade de se obterem com exatidão seus tempos de vida. Para a realização da aplicação da Confiabilidade, é necessário um conhecimento do produto ou equipamento, pois é através deste conhecimento que será possível determinar os modos e as causas de falhas. Além disso, a Confiabilidade tem como característica a versatilidade, pois, através de determinado número de dados, é possível fazer uma abrangência para outros equipamentos. O objetivo desse trabalho é determinar, a partir da Confiabilidade, com análises quantitativas, uma elaboração de garantia do tempo de vida de um equipamento eletrônico. Foi necessária a utilização de um *software* voltado para o cálculo da Confiabilidade, no caso o Minitab versão 17.1.0, para a análise da garantia. Foi feito então o teste de aderência com base na estatística de Anderson-Darling, mostrando que a distribuição que melhor modelava os dados era a distribuição Lognormal, e assim foi possível obter as principais medidas de Confiabilidade: tempo médio até a falha, tempo mediano de vida e percentual de falhas, mostrando a eficiência na obtenção dos resultados.

Palavras-chave: Confiabilidade. Tempo de vida. Equipamento.

Como você pode ver, há uma vasta gama de aplicações para a Engenharia da Confiabilidade, mas o que foi apresentado aqui é somente uma amostra do que existe e do que está em desenvolvimento. Você consegue pensar em situações rotineiras em que a Confiabilidade é aplicada?

Por exemplo, quando você acessa o ambiente virtual de ensino, você só consegue fazer porque o seu computador está funcionando adequadamente, ou seja, ele está disponível. Funcionam também os equipamentos que o permitem acessar a Internet, bem como o abastecimento de energia elétrica, tanto para o seu acesso ao material de estudo, quanto em toda a cadeia que permite que ele seja disponibilizado para você.

E, quando você se desloca para fazer uma prova, o que temos? O seu carro ou o transporte público utilizado deve estar disponível, bem como toda a rede que permite o fornecimento de combustível e abastecimento. Também, toda a rede envolvida no funcionamento adequado dos sinais de trânsito, iluminação pública etc.

Resposta comentada:

A leitura dos resumos nos mostra diversos conceitos, ferramentas e técnicas que foram estudadas nas aulas de nossa disciplina. Vamos ver um resumo a seguir.

Item	Conceitos e ferramentas	Aulas
Cálculo da disponibilidade e posição no ciclo de vida de três linhas de produção de uma empresa da indústria química	MTTF MTTR Disponibilidade Distribuições exponencial, Weibull, normal e lognormal	2 3 5 6
1.1.2 A Adoção do Conceito de Manutenibilidade como Estratégia para a Inovação da Gestão da Manutenção Civil da FIOCRUZ	Manutenibilidade	3
Análise de falhas aplicada ao planejamento estratégico da manutenção	Confiabilidade Análise de falhas	1 7 8
Método para análise de características de projeto para manutenibilidade - determinação de um índice de manutenibilidade em projeto de produtos/ sistemas	Manutenibilidade MTTR	3
Estudo da confiabilidade de máquinas CNC como fator determinante para a escolha da política de manutenção: um estudo de caso	RCA Análise de falhas MTBF	2 7 8 10
Metodologia para análise da confiabilidade de um conjunto de alta criticidade de uma planta siderúrgica integrada	Funções de Confiabilidade Taxa de falhas MTBF	3 5 6
Análise da manutenção numa empresa do setor salineiro do Rio Grande do Norte	MTBF MTTR FMEA FTA	2 3 7 8 9
Disponibilidade e confiabilidade: aplicação da gestão da manutenção na busca de maior competitividade	Confiabilidade Disponibilidade	1 3
Confiabilidade e exatidão de processos de calibração: uma proposta de metodologia	Confiabilidade	1

Arquitetura de hardware do computador de bordo para o satélite universitário ITASAT e confiabilidade	Confiabilidade Redundância Análise de falhas	1 4 7 8
Análise de confiabilidade de torres de transmissão de energia elétrica quando sujeitas a ventos fortes via método analítico FORM	Funções de confiabilidade	5 6
Substituição de disjuntores de alta tensão: aumento de confiabilidade e de patrimônio em empresas concessionárias de Energia Elétrica	Confiabilidade Gestão de Ativos	1 10
Elaboração de critérios e metodologias para dimensionamento ideal da quantidade de equipamentos da reserva técnica imobilizada de subestações	Funções de confiabilidade	5 6
Aumento de confiabilidade de sistemas embutidos usando redundância e algoritmos de decisões baseados em reconhecimento de padrões	Confiabilidade Redundância RCA	1 4 10
Análise da confiabilidade: um estudo de caso	Funções de confiabilidade	5 6

Conclusão

Os estudos de Confiabilidade, inicialmente voltados à área da aviação, ganharam corpo com a incorporação dos cálculos estatísticos e da redundância. Isso propiciou a expansão de seu uso em diversas outras áreas: componentes e sistemas mecânicos passaram a ter a companhia de equipamentos elétricos, eletrônicos, de informática etc.

A visão integrada dos equipamentos produtivos e das instalações passou, então, a ser foco de estudos da Engenharia de Confiabilidade, ampliando os benefícios para as organizações que investem nesta área.

Resumo

A expansão dos estudos de Confiabilidade é evidenciada pela aplicação dela em áreas diversas, como siderurgia, química, setor salineiro,

instrumentação, máquinas de comando numérico, laboratórios e centros de pesquisa, computadores, torres de transmissão, disjuntores, subestações e eletrônicos.

Há inúmeros exemplos de aplicação de ferramentas e técnicas de Confiabilidade em Engenharia, tendo sido apresentado, nesta aula, um total de 15 casos para estudo e análise.

Referências Bibliográficas

ALMEIDA, José Renato Monteiro Nascimento de. *Metodologia para análise da confiabilidade de um conjunto de alta criticidade de uma planta siderúrgica integrada*. 2008. 178f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Federal da Paraíba – UFPB. João Pessoa, 2008.

ALVAREZ, Omar Emir. *Método para análise de características de projeto para manutenibilidade: determinação de um índice de manutenibilidade em projeto de produtos/ sistemas*. 2001. 241f. Tese (Doutorado em Engenharia), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

ALVES, Emerson Maurício de Almeida. *Aumento de confiabilidade de sistemas embutidos usando redundância e algoritmos de decisões baseados em reconhecimento de padrões*. 2015. 104f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

HATASHITA, Luiz Seiti; JUSTINO FILHO, Manoel R.; ABDALLA FILHO, João Elias. Análise de confiabilidade de torres de transmissão de energia elétrica quando sujeitas a ventos fortes via método analítico FORM. XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica - SENDI 2008 - 06 a 10 de outubro, Olinda. *Anais...*

MARCORIN, Wilson Roberto. *Estudo da confiabilidade de máquinas CNC como fator determinante para a escolha da política de manutenção: um estudo de caso*. 2005. 100 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste, 2005.

OLIVEIRA, José Carlos Valente de; SANTOS, João Alberto Neves dos. Confiabilidade e exatidão de processos de calibração: uma proposta de metodologia. In: METROSUL IV – IV Congresso Latino-Americano de Metrologia, 09 a 12 de Novembro, 2004, Foz do Iguaçu. *Anais...*

PASCHOAL, Débora Rodrigues de Souza et al. Disponibilidade e confiabilidade: aplicação da gestão da manutenção na busca de maior competitividade. *Revista da Engenharia de Instalações no mar da FSMA*, nº. 03 Jan./Jun. 2009.

SAMPAIO, Priscila Gonçalves Vasconcelos; FERNANDES NETO, Andre Pedro. Análise da manutenção numa empresa do setor salineiro do Rio Grande do Norte. In: XXXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Salvador, 08 a 11 de outubro de 2013. *Anais...*

SILVA, Clailton Leopoldo da. *Substituição de Disjuntores de Alta Tensão: Retorno de Investimento e aumento de Confiabilidade*. 2013. 61 folhas. Monografia (Especialização em Engenharia de Confiabilidade) – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2013.

SILVA, Josiane Roberta dos Santos et al. Análise da confiabilidade: um estudo de caso. In: XXXV Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Fortaleza, 13 a 16 de outubro de 2015. *Anais...*

SILVA FILHO, Olívio; SELLITTO, Miguel Afonso. Cálculo da disponibilidade e posição no ciclo de vida de três linhas de produção de uma empresa da indústria química. *ENGEVISTA*, V. 16, n. 4, p. 414-430, Dezembro 2014, p.414-430.

TAKAYAMA, Mariana Amorim Silva. *Análise de falhas aplicada ao planejamento estratégico da manutenção*. 2008. 57f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Produção), Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2008.

VIEIRA, Sérgio José Rocha. *A adoção do conceito de mantenabilidade como estratégia para a inovação da gestão da manutenção civil da FIOCRUZ*. 2007. 147f. Dissertação (Mestrado em Saúde Pública). Fundação Oswaldo Cruz - Escola Nacional de Saúde Pública Sérgio Arouca, Rio de Janeiro, 2007.

VINCI, Edson; SAOTOME, Osamu. Arquitetura de hardware do computador de bordo para o satélite universitário ITASAT e confiabilidade. 3rd CTA-DLR Workshop on Data Analysis & Flight Control, September 14-16, 2009, S. J. Campos. *Anais...*