

## Capítulo III

# Conceitos de confiabilidade – Componentes não reparáveis

Este capítulo trata resumidamente da teoria de confiabilidade, contemplando componentes não reparáveis.

### CONCEITOS INICIAIS

A confiabilidade de um objeto funcional (dispositivo, equipamento ou sistema) pode ser entendida como uma medida do grau de desempenho satisfatório deste objeto, sob condições especificadas de operação. Avaliar a confiabilidade representa uma tentativa de quantificar a qualidade do desempenho, com base na teoria das probabilidades. Dessa forma, confiabilidade pode ser definida como a probabilidade de um sistema executar a função pretendida durante um intervalo de tempo específico e sujeito a determinadas condições. Neste contexto, o objetivo da manutenção e da confiabilidade é garantir que esses equipamentos estarão disponíveis, quando requeridos.

Na definição sobre confiabilidade, quatro importantes fatores são considerados: a probabilidade, o desempenho, o tempo e as condições de operação. A teoria de probabilidade é necessária para tratar matematicamente o problema. O desempenho deve ser claramente definido. O tempo considerado pode ser contínuo, ou alguma ocasião específica de curta duração. Finalmente, as condições de operação (ambiente, severidade das solicitações, etc.) devem ser bem especificadas, pois possuem grande influência no desempenho do objeto funcional. Outra questão importante relacionada à confiabilidade é a definição de sistemas não reparáveis e sistemas reparáveis.

### COMPONENTES NÃO REPARÁVEIS

Sistema não reparável é um conjunto de elementos que formam

um todo que, por razões econômicas ou tecnológicas, não se reparam ou é um item formado por um único elemento (componente), cuja ocorrência de avaria significa o seu fim de vida.

Seja um componente não reparável colocado em operação no instante  $t=0$ . Chamando-se  $X$  a variável aleatória “instante de ocorrência da falha do componente”, a densidade de probabilidade  $f(t)$  da variável  $X$  é definida, em termos da probabilidade da falha ocorrer entre  $t$  e  $t + dt$ , por:

$$P(t < X \leq t + dt) = f(t) \cdot dt \quad (1)$$

A função distribuição de probabilidade de  $X$ ,  $F(t)$ , é definida por:

$$F(t) = P(X \leq t) = \int_0^t f(t) \cdot dt \quad (2)$$

Definindo-se a função confiabilidade,  $R(t)$ , como a probabilidade do equipamento estar operacional no instante  $t$ , resulta:

$$R(t) = P(X > t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(t) \cdot dt \quad (3)$$

Derivando-se a equação 3, resulta:

$$\frac{dR(t)}{dt} = -f(t) \quad (4)$$

Reescrevendo a equação 3:

$$R(t) = P(X > t) = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad (5)$$

Definindo-se a taxa de incidência de defeitos  $\beta(t)$  por:

$$\beta(t) \cdot dt = P(t < X \leq t + dt / X > t) \quad (6)$$

Isto é,  $\beta(t) \cdot dt$  é a probabilidade que o componente apresente defeito no intervalo  $(t, t + dt)$  dado que não apresentou defeito até o instante  $t$ .

Pela definição de probabilidade condicional, tem-se:

$$\begin{aligned} P(t < X \leq t + dt / X > t) &= \\ &= \frac{P(t < X \leq t + dt / X > t)}{P(X > t)} = \\ &= \frac{\int_t^{\infty} f(t) \cdot dt}{\int_t^{\infty} f(t) \cdot dt} = \end{aligned} \quad (7)$$

Das equações 6 e 7, obtém-se:

$$\beta(t) \cdot dt = \frac{\int_t^{\infty} f(t) \cdot dt}{\int_t^{\infty} f(t) \cdot dt} \quad (8)$$

A equação 9 relaciona a taxa de incidência de defeito e a função confiabilidade:

$$\beta(t) = -\frac{1}{R(t)} \cdot \frac{dR(t)}{dt} \quad (9)$$

Resolvendo-se a equação diferencial, resulta:

$$R(t) = e^{-\int_0^t \beta(x) dx} \quad (10)$$

Se a taxa de defeito for constante ao longo do tempo ( $\beta(t) = \lambda(t)$ ), resulta em:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (11)$$

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (12)$$

$$\lambda = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (13)$$

Uma representação muito utilizada na confiabilidade é a Curva de Banheira, representada na Figura 1, e cujo objetivo é descrever a variação da taxa de falhas durante a vida do sistema. A curva representa as fases da vida características de um sistema: mortalidade infantil, maturidade e mortalidade senil, sendo que essas fases estão associadas ao fator de forma  $\gamma$ . O fator de forma é relacionado à forma de distribuição e à inclinação das curvas, sendo que nem todas

as distribuições possuem esse fator. A distribuição exponencial, por exemplo, não possui um fator de forma porque o comportamento da função é constante. O fator de forma possui as seguintes características:

- $\gamma < 1$ : indica mortalidade infantil, com taxas de falha altas e decrescentes no início da vida do produto ou sistema;
- $\gamma = 1$ : indica falhas aleatórias, com taxas de falha constantes ao longo do tempo e geralmente baixas;
- $\gamma \gg 1$ : indica desgaste de fim de vida útil.

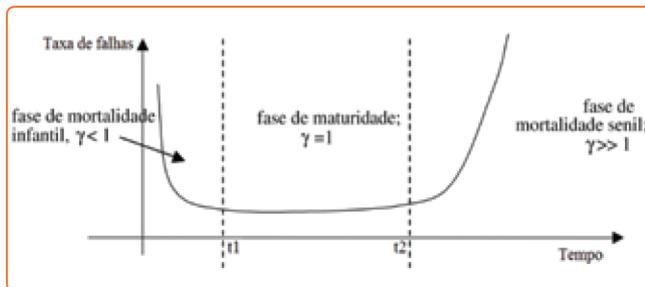


Figura 1 – Curva da banheira/ciclo de vida de equipamento.

No período de mortalidade infantil, a taxa de falhas é alta, porém, decrescente. As falhas preliminarmente são causadas por defeitos congênitos ou fraquezas, erros de projeto, peças defeituosas, processos de fabricação inadequados, mão de obra desqualificada, estocagem inadequada, instalação imprópria, partida deficiente, entre outras. A taxa de falhas diminui com o tempo, conforme os reparos de defeitos eliminam componentes frágeis ou à medida que são detectados e reparados erros de projeto ou de instalação. Neste período, a melhor estratégia de manutenção é a corretiva, ou seja, cabe à manutenção não apenas reparar o equipamento, mas corrigi-lo, para que a falha não se repita.

Entre  $t_1$  e  $t_2$  é a fase de maturidade ou período de vida útil. O valor médio da taxa de falha é constante. Nesta fase, as falhas ocorrem por causas aleatórias, tais como acidentes, liberações excessivas de energia, mau uso ou operação inadequada, e são de difícil controle. Falhas aleatórias podem assumir diversas naturezas, tais como: sobrecargas aleatórias, problemas externos de alimentação elétrica, vibração, impactos mecânicos, bruscas variações de temperatura, erros humanos de operação, entre outros. Falhas aleatórias podem ser reduzidas projetando equipamentos mais robustos do que exige o meio em que opera ou padronizando a operação. Neste período, a melhor estratégia de manutenção é a preditiva, ou seja, monitoramento para detectar o início da fase de desgaste.

Após  $t_2$ , há crescimento da taxa de falhas, a mortalidade senil, que representa o início do período final de vida do item. Esta fase é caracterizada pelo desgaste do componente, corrosão, fadiga, trincas, deterioração mecânica, elétrica ou química, manutenção insuficiente, entre outros. Para produzir produtos com vida útil mais prolongada, deve-se atentar para o projeto, utilizando materiais e componentes mais duráveis, um plano de inspeção e manutenção que detecte que iniciou a mortalidade senil e a previna,

por substituição preventiva de itens, e supressão dos agentes nocivos presentes no meio. Neste período, a melhor estratégia de manutenção é a preventiva, ou seja, já que o equipamento irá falhar, cabe à manutenção aproveitar a melhor oportunidade para substituir ou reformar o item.

Smith introduziu uma forma de representação contendo uma perspectiva um pouco mais detalhada da curva da banheira, na qual estão presentes as três distribuições, o que permite entender melhor a curva resultante e quais os fatores predominantes para o seu comportamento, conforme ilustra a Figura 2.

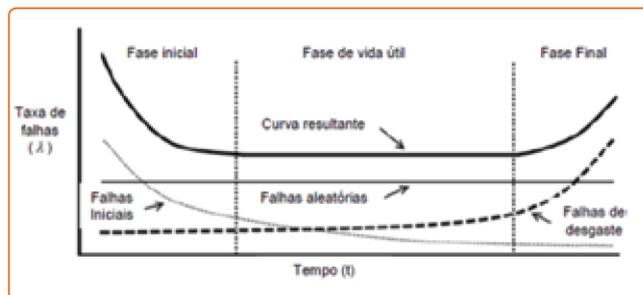


Figura 2 – Curva da banheira detalhada.

Smith também representou as características das distribuições de probabilidades da seguinte forma:

TABELA 1 – CARACTERÍSTICAS DAS DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADES

Fase (nomes pelo qual é conhecida)	Comportamento	Causas
Arranque Inicial Mortalidade Infantil	Taxa de falhas decrece	Essencialmente defeitos de projeto, fabricação e montagem
Falhas aleatórias Falhas estocásticas Vida útil	Taxa de falhas constante	Submissão do componente a cargas de trabalho superiores à planejada, causas desconhecidas ou utilização inadequada
Desgaste Fadiga	Taxa de falhas cresce	Ocorrência de corrosão, oxidação, perda de isolamento, desgaste por fricção, etc.

A curva da banheira é um modelo teórico e bastante aplicável a componentes mecânicos que, por algum motivo, não puderam ser exaustivamente testados após a montagem do sistema e apresentam um modo de falha predominante. Contudo, este modelo não é universal e aplicável a qualquer equipamento ou sistema.

Sistemas industriais evoluem na curva da banheira segundo várias características. Pode não existir alguma fase, passando-se, por exemplo, da mortalidade infantil para a senil, diretamente. Sistemas eletrônicos geralmente apresentam mortalidade infantil

e depois apenas falhas aleatórias, estacionando na parte baixa da curva. Tal região é dita sem memória de falha (failure memoryless), pois a incidência de uma falha no tempo  $t$  não tem correlação com o tempo até a próxima falha. Em software, as falhas de programação geralmente têm apenas mortalidade infantil, pois uma vez corrigidas, é impossível a reincidência, visto que não se originam de processos dissipativos de energia.

A evolução do conceito de falha com base na curva da banheira foi decorrente de trabalhos desenvolvidos pela indústria da aviação norte-americana que, a partir da Segunda Guerra Mundial, adotou a estratégia de manutenção preventiva alicerçada na curva banheira. Esta concepção foi levada ao extremo pela indústria de aviação civil. Entretanto, a visão de controlar a confiabilidade de aeronaves através do uso de manutenções preventivas confiáveis mostrou-se inadequada.

Na época, um grupo de engenheiros da United Airlines dedicou-se a estudar o assunto, o que resultou nas curvas padrões de idade-confiabilidade, conforme ilustra a Figura 3.

A Figura 3 sintetiza a pesquisa dos padrões de falha da 3ª geração de manutenção. Esta investigação revelou que existem seis padrões de falha, e não mais um ou dois, como utilizado anteriormente.

Moubray, ao apresentar os novos paradigmas no gerenciamento da manutenção, utilizou a descrição disposta na Figura 4.

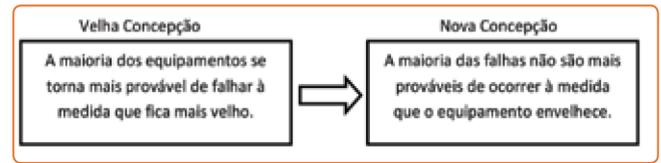


Figura 4 – Concepções de manutenção.

Os estudos realizados com várias centenas de componentes mecânicos, elétricos e estruturais de aeronaves civis e materializados na forma de falhas da Figura 3 demonstraram que:

- Somente um pequeno percentual (4%) atualmente corresponde à curva banheira (curva A);
- Mais significativo, somente 6% dos componentes experimentam uma região de desgaste durante o tempo de vida útil da aeronave (curvas A e B). Especificamente, o padrão B caracteriza aeronaves com troca de motore. Acrescentando o padrão C, característica de turbina de aeronaves, tem-se que 11% dos componentes experimentam sintomas de envelhecimento;

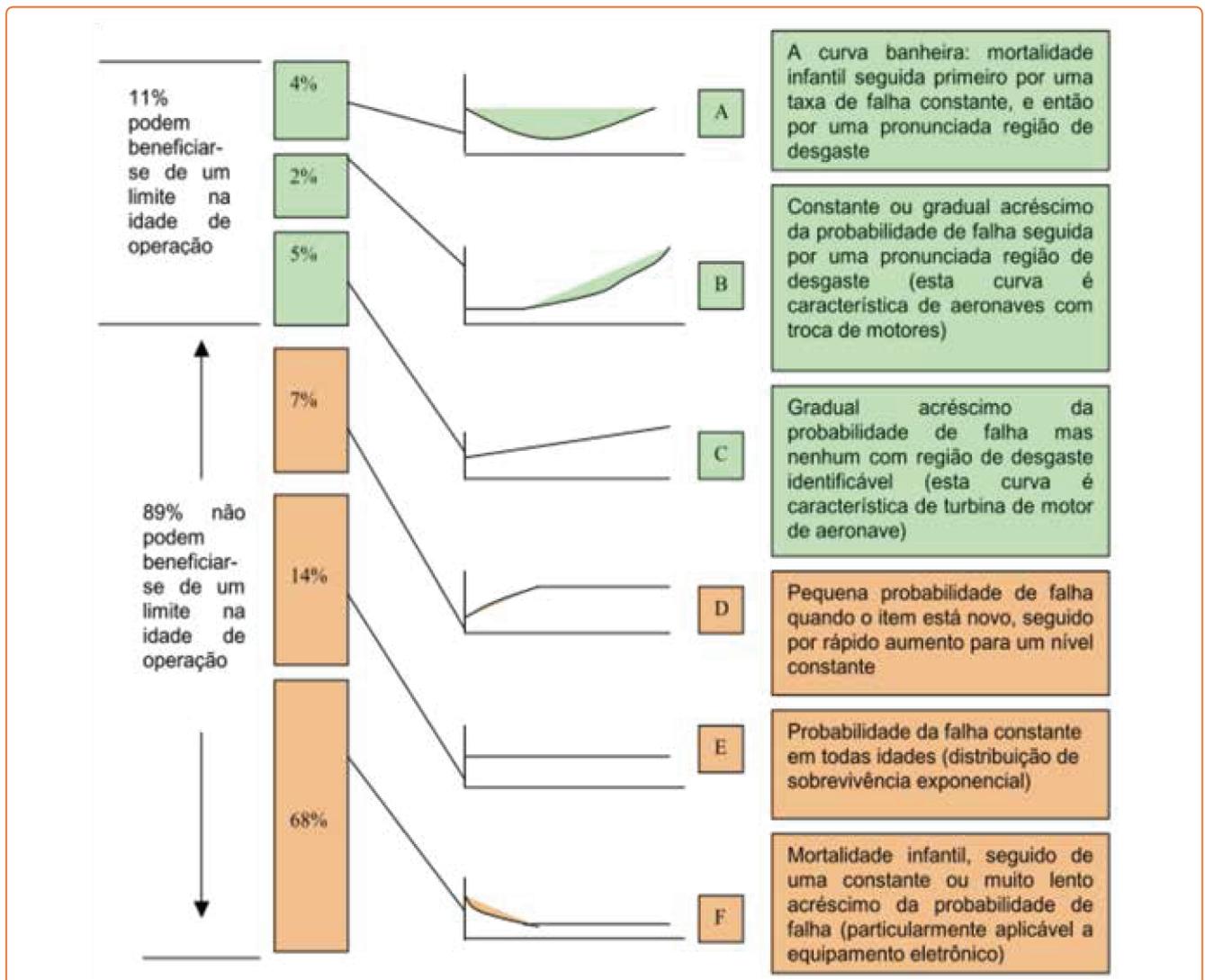


Figura 3 – Padrões de idade-confiabilidade para equipamentos não estruturais de aeronaves.

- 89% dos componentes nunca apresentaram qualquer envelhecimento ou desgaste durante o tempo de vida útil das aeronaves (padrões D, E e F). Especificamente, os rolamentos se enquadram no padrão E e os componentes eletrônicos no padrão F;
- 72% dos componentes experimentam o fenômeno de mortalidade infantil (padrões A e F);
- O grupo de maior percentual (68%) começa como curva banheira e nunca atinge a região de envelhecimento (padrão F).

Estas descobertas contradizem a crença de que sempre há uma conexão entre confiabilidade e idade de operações. Efetivamente, a partir de 1968, as empresas aéreas americanas passaram a adotar uma nova técnica de manutenção preventiva com base nestes estudos. Em 1975, o Departamento de Defesa dos Estados Unidos sugeriu que o conceito que estava sendo aplicado desde 1968 fosse intitulado de “Reliability-Centered Maintenance” (Manutenção Centrada em Confiabilidade) e aplicado na maioria dos sistemas militares. Em 1978, a United Airlines produziu o documento referência inicial de MCC, sob contrato com o Departamento de Defesa americano.

Se os componentes de um equipamento ou sistema são sujeitos a manutenção, de modo que venham a ser substituídos antes que atinjam a região de envelhecimento, pode-se

considerar que esse equipamento ou sistema tem sempre seus componentes na região  $\beta$  constante, sendo a distribuição de defeitos exponencial. A consequência prática disto é que, para componentes que trabalham na região de  $\beta$  constante, a confiabilidade não depende da idade dos componentes.

O tempo que o componente leva, em média, para apresentar defeito é dado pela variável  $\bar{X}$ .

$$\bar{X} = \int_{-\infty}^{\infty} t \cdot f(t) dt \quad (14)$$

Como o componente é colocado em funcionamento em  $t=0$ , necessariamente  $f(t) = 0$  para  $t < 0$ , logo

$$\bar{X} = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt \quad (15)$$

Da equação 4, resulta:

$$\bar{X} = - \int_0^{\infty} t \cdot dR = -[tR - \int R dt]_0^{\infty} \quad (16)$$

Supondo que  $R(t)$  decresça com suficiente rapidez quando  $t \rightarrow \infty$  (o que ocorre no caso de distribuição exponencial), resulta:

$$\bar{X} = \int_0^{\infty} R(t) \cdot dt \quad (17)$$

Em que  $\bar{X}$  representa o tempo médio para falhar. Costuma-se indicar o tempo  $\bar{X}$  pelo indicador MTTF:

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) \cdot dt \quad (18)$$

No caso de distribuição exponencial, em que  $R(t)=e^{-\lambda t}$ , resulta:

$$MTTF = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} \cdot dt \quad (19)$$

$$MTTF = \frac{1}{\lambda_0} \quad (20)$$

Assim, um componente que falha, em média, a cada dois anos (MTTF = 2 anos) tem uma taxa de falha de  $\lambda = 0,5$  falhas/ano, considerando a hipótese de distribuição exponencial.

O próximo capítulo abordará os principais conceitos de confiabilidade para componentes reparáveis e modelos combinatórios. Apresentará também as informações básicas acerca do software utilizado nas simulações realizadas neste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- Alkaim, J. L. "Metodologia para incorporar conhecimento intensivo às tarefas de manutenção centrada na confiabilidade aplicada em ativos de sistemas elétricos". Tese (Doutorado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2003.
- Duek, C. "Análise de confiabilidade na manutenção de componente mecânico de aviação". Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Santa Maria, 2005.
- Gambirasio, G. "Confiabilidade de sistemas elétricos". Universidade de São Paulo, 1980.
- Geraghty, T. "Obtendo efetividade do custo de manutenção através da integração das técnicas de monitoramento de condição, RCM e TPM". Disponível em: [http://www.sqlbrasil.com.br/sql-RCM2-ttec\\_integracaombrcmtpm.html](http://www.sqlbrasil.com.br/sql-RCM2-ttec_integracaombrcmtpm.html).
- Gulati, R. "Maintenance and Reliability Best Practices". 2ª Edição. Editora Industrial Press, 2009. 416p.
- Kececioglu, D. B. "Reliability Engineering Handbook". 1ª Edição. Destech Publications, 2002. 720p.

- Lafraia, J. R. B. "Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade". 1ª Edição. Editora Qualitymark, Rio de Janeiro, 2001. 388p.
- Lemos, B. J. A. "Análise RAMS na componente Manutenibilidade". Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Técnica de Lisboa, 2010.
- Moubray, J. "RCM II Reliability-Centered Maintenance". 2ª Edição, Editora Industrial Press Inc, Nova York, 1997.
- Nowlan, F. S.; Heap, H. F. "Reliability-Centered Maintenance". Department of Defense. Report Number AD-AO66579. Washington D.C. 1978.
- Pereira, F. J. D.; Sena, F. M. V. "Fiabilidade e sua Aplicação à Manutenção". Editora Publindústria, 2012. 200p.
- Queiroz, A. R. S. "Estratégia de manutenção de equipamentos elétricos em unidades offshore de produção de petróleo e gás baseada na filosofia de operações integradas. Tese (Doutorado em Ciências - Engenharia Elétrica). Universidade de São Paulo, 2016.
- Sellitto, M. A. "Formulação estratégica da manutenção industrial com base na confiabilidade dos equipamentos". Revista Produção, v.15, p.44-59, 2005.
- Sellitto, M. A.; Borchadt, M.; Araújo, D. R. C. "Manutenção centrada em confiabilidade: uma abordagem quantitativa" Anais do XXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP). Curitiba, 2002.
- Siqueira, I. P. "Manutenção centrada em confiabilidade". Editora Qualitymark. Rio de Janeiro, 2005. 408p.
- Smith, A. M. "Reliability-Centered Maintenance". 1ª Edição. Editora McGraw-Hill. EUA, 1993. 216p.
- Smith, D. J. "Reliability, Maintainability and Risk". 7ª Edição. Editora Elsevier, 2005. 368p.
- Wuttke, R. A.; Sellitto, M. A. "Cálculo da disponibilidade e da posição na curva da banheira de uma válvula de processo petroquímico". Revista Produção. v. 8, 2008.

\*Alan Rômulo Silva Queiroz é engenheiro eletrícista graduado pela Universidade Santa Cecília (Santos – SP), mestre e doutor em Engenharia Elétrica pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Eduardo César Senger é engenheiro eletrícista e doutor pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. É professor livre-docente na área de Proteção de Sistemas Elétricos pela Universidade de São Paulo e coordenador do Laboratório de Pesquisa em Proteção de Sistemas Elétricos (Lprot).

Luciene Coelho Lopez Queiroz é bacharel em Ciências da Computação graduada pela Universidade Católica de Santos e mestre em Engenharia da Computação pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

### CONTINUA NA PRÓXIMA EDIÇÃO

Acompanhe todos os artigos deste fascículo em [www.osetoreletrico.com.br](http://www.osetoreletrico.com.br). Dúvidas, sugestões e outros comentários podem ser encaminhados para [redacao@atituedeeditorial.com.br](mailto:redacao@atituedeeditorial.com.br)