

# Confiabilidade de Sistemas Eletrônicos

Prof. Eduardo Gontijo Carrano

# Introdução

- A confiabilidade de sistemas eletrônicos foi um dos grandes motivadores da evolução da Engenharia de Confiabilidade.
- Envolvem o uso de muitos componentes.
- O engenheiro tem pouco controle no processo de produção desses componentes.
- Geralmente não permitem inspeções minuciosas (encapsulamento).

- Alguns dos defeitos não podem ser detectados facilmente pós-produção (mal contato, solda fria, degradação de um componente, etc).

# Confiabilidade de Componentes Eletrônicos

- Principais causas de falhas: fadiga, desgaste, corrosão, etc.
- Fadiga: soldas e junções (especialmente em dispositivos pesados).
- Desgaste: conexões e chaves.
- Corrosão: degradação das partes metálicas dos componentes.

- Estresses térmicos e elétricos também são causadores de falhas características de sistemas eletrônicos.
- Principais estresses elétricos: corrente, tensão e potência.
- Em geral estresses elétricos causam estresses térmicos:
  - maior corrente significa maior potência que conseqüentemente leva a mais calor.

- Boa parte dos componentes eletrônicos não sofrem degradação ou perda se:
- estão devidamente especificados e utilizados.
- não foram danificados quando colocados no circuito.
- não sofram sobre-estresses durante o uso.

# Efeitos de Estresse

# Corrente

- O aumento da corrente provoca um aumento na temperatura nos condutores.
  - A temperatura pode alcançar a temperatura de fusão do material (fusível).
- O aquecimento dos condutores é transferido aos componentes por condução e convecção.
- A variação da temperatura pode afetar as características dos componentes (ex. resistência).
- Correntes podem gerar campos magnéticos (ex. ruído).

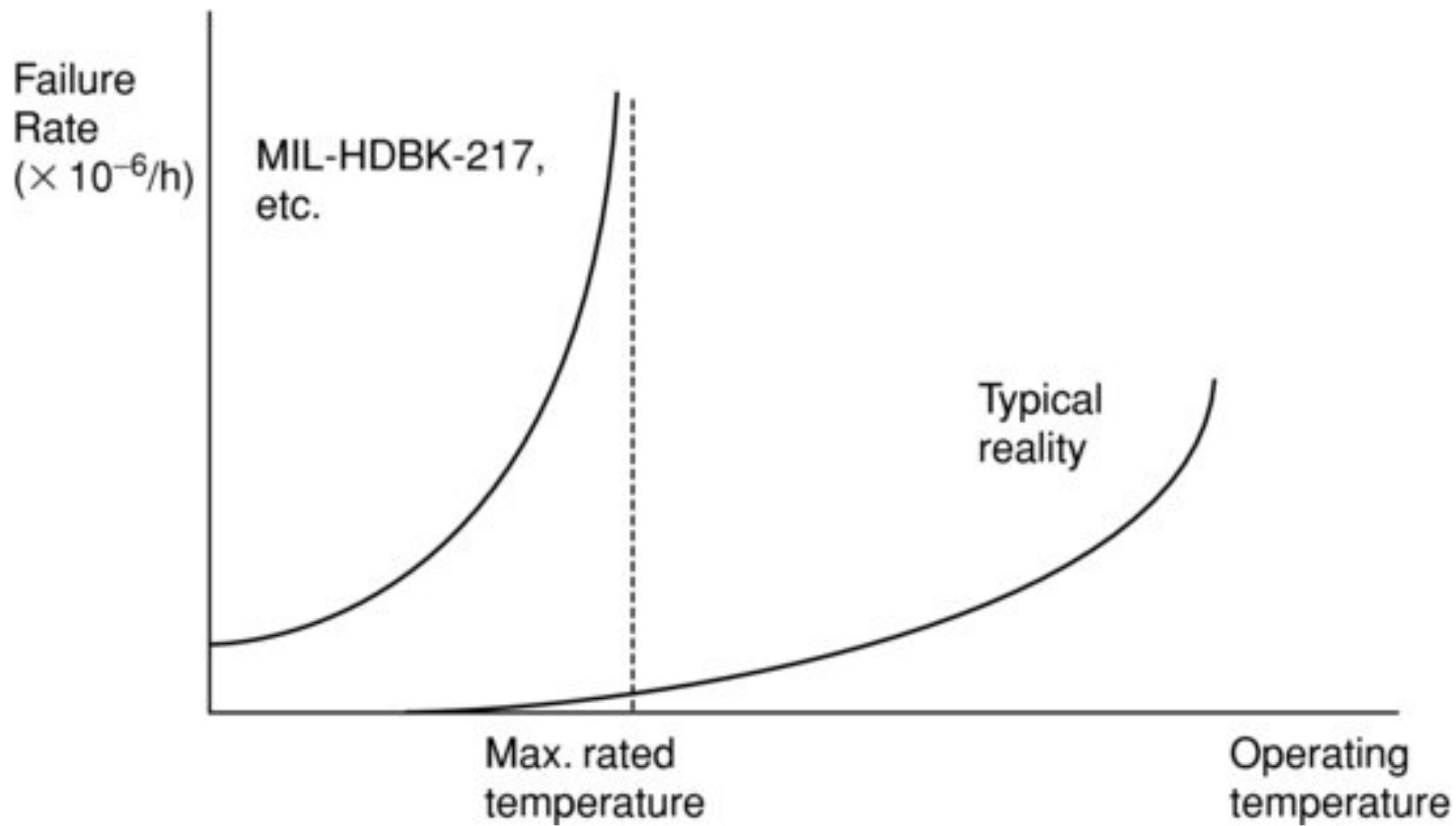


# Tensão

- Estresses de tensão são resistidos pela força do dielétrico do material isolante (capacitores, transformadores, etc).
- As diferenças de potencial podem causar sobre-correntes que vão levar o dispositivo a falha (ligar um dispositivo de 127V em 220V).
- Altos níveis de tensão podem ser causados por:
  - Descargas eletrostáticas, transitórios de tensão, fontes mal reguladas, ligações acidentais, etc.
- Arcos elétricos (abertura de chaves e relés).

# Temperatura

- Em geral o modelo de Arrhenius é utilizado para relacionar temperatura e tempo esperado até falha.
- Atualmente aceita-se que essa relação não é muito precisa pois, na maioria dos componentes modernos, os mecanismos de falha não são afetados pelo aumento da temperatura dentro dos limites do fabricante.



- A maior parte dos dispositivos trabalha bem em temperaturas maiores que as previstas nos databooks.
  - Nos databooks, os CI's com encapsulamento plástico podem trabalhar até 85°C. (convenção da indústria).
- Temperatura muito baixas podem levar os componentes a falhas, devido a alterações na característica elétrica dos componentes.
  - Em geral as temperaturas mínimas variam de -20°C a -60°C.
  - Em geral essas falhas são temporárias.
- A variação brusca contínua da temperatura pode levar o dispositivo a falha (deformações das soldas ou superfícies de montagem).

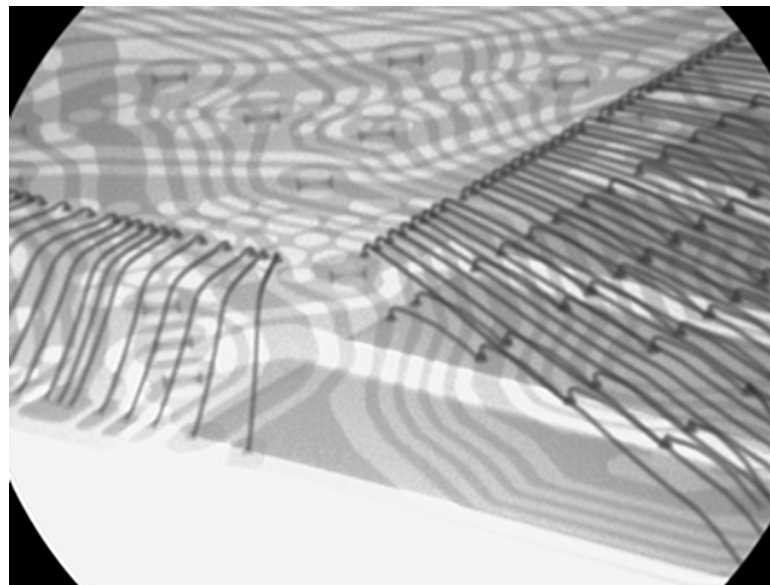
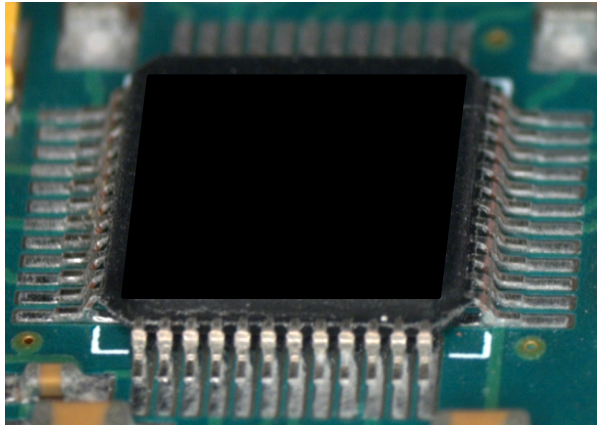
# Potência

- $P = R \times I^2$
- O aumento da potência causa o aumento da corrente e por sua vez aumenta a dissipação de calor.
- A temperatura em regime permanente do sistema é igual a temperatura ambiente mais o aquecimento interno.
- Podem ser utilizados mecanismos (ativos ou passivos) para otimizar a dissipação de calor.
- Estresses de potência geralmente causam falhas devido ao aumento do calor dissipado pelos componentes.

# Tipos de Componentes e Mecanismos de Falha

# Circuitos Integrados

- Subsistemas compostos de transistores, capacitores, etc.
- Podem ser classificados em:
  - Integração de baixa escala (SSI): até 100 portas lógicas.
  - Integração de média escala (MSI): até 1000 portas lógicas.
  - Integração em larga escala (LSI): até 10000 portas lógicas.
  - Integração em extra larga escala (VLSI): mais de 10000 portas lógicas.
- Processadores atuais podem conter bilhões de transistores.





- Mecanismos de falha mais comuns:
- Sobre-estresse elétrico / dano eletrostático:
- Danos causado por altos níveis de tensão. Esses níveis de tensão são geralmente oriundos de eventos transitórios, como chaveamentos e descargas eletrostáticas. A maior parte dos circuitos integrados atuais contém circuitos de proteção que suportam situações de sobre-estresse por curtos períodos de tempo (geralmente até 1000V e 500μJ).

- *Latchup*:
- Criação de um caminho de baixa resistência entre a entrada de alimentação e o terra do CI. Leva à falha permanente do dispositivo. Comum em dispositivos CMOS, é geralmente causadas por sobre-estresses de tensão.

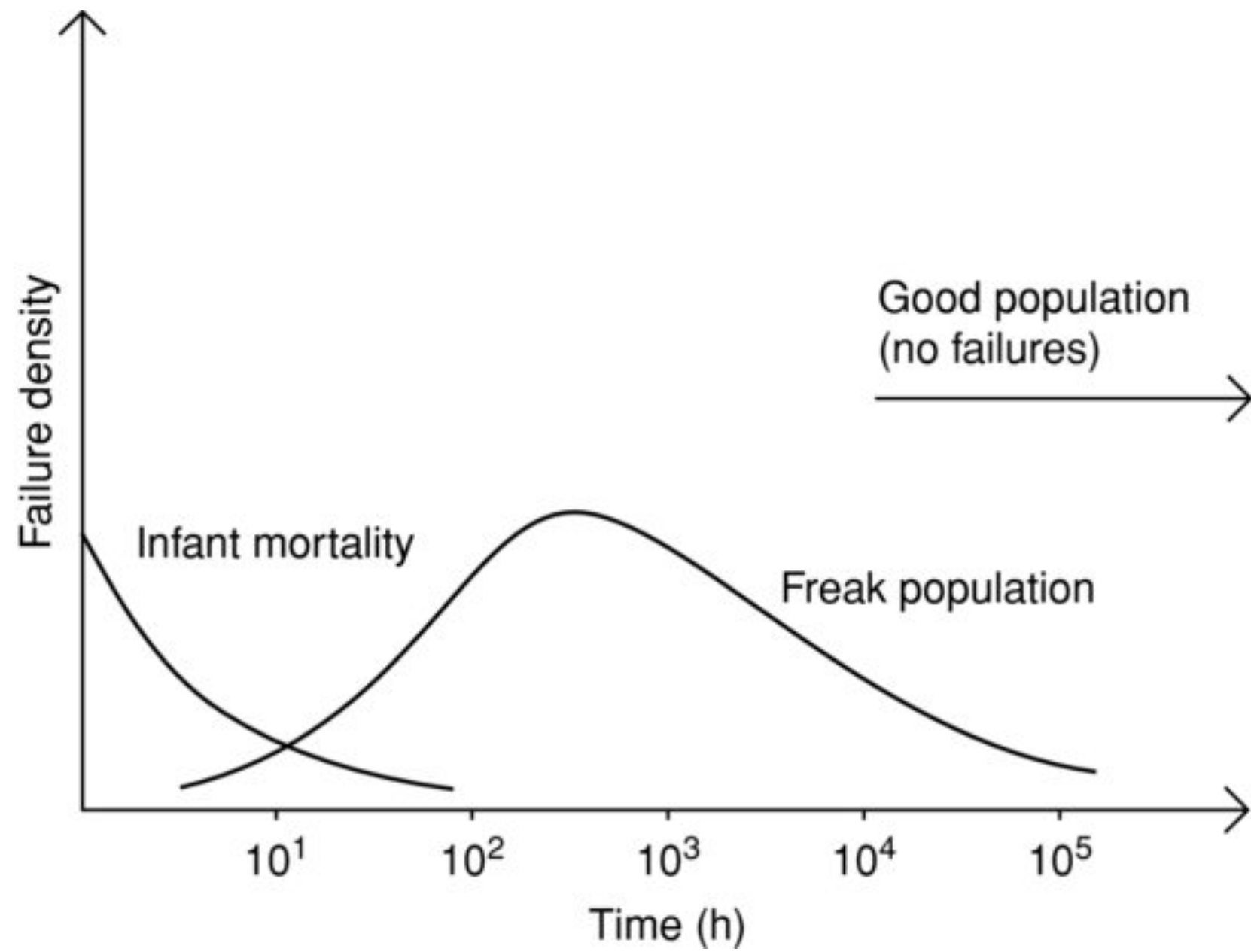
- Eletromigração:
  - Mecanismo de falha comum nos dispositivos mais novos, devido ao aumento do nível de integração. Os níveis de corrente internos do CI, apesar de pequenos, podem ser altos para a dimensão dos interconectores internos, devido a troca de momento dos elétrons portadores da corrente. Geralmente leva a curto-circuito das trilhas vizinhas.
  - Especialmente importante em sistemas que vão operar por longos períodos de tempo e em altas temperaturas.

- Rompimento do dielétrico no tempo:
- Rompimento do dielétrico de isolamento dos capacitores internos do CI, o que pode causar curto-circuitos.
- Em geral, o efeito é acelerado por estresses de tensão e temperatura.
- Sua relevância aumenta com a redução dos circuitos.

- Chaveamento lento:
- A retenção de elétrons nas camadas dos CI podem levar a níveis lógicos incorretos em portas lógicas ou memórias.
- O efeito também se torna mais relevante com a miniaturização dos circuitos.

# Teste de Sobrevivência de Dispositivos Microeletrônicos

- Baseados em testes de sobrevivência, i.e. que não forçam a falha de “ítems bons”.
- Três categorias de dispositivos:
  - falham em teste.
  - falham em uso.
  - não falham.



# Outros Componentes Eletrônicos



# Resistores, Capacitores, Indutores, etc.

- Podem falhar por problemas de fabricação, danos no momento da montagem dos circuitos, estresses de tensão e corrente, etc. Após falha, esses dispositivos se comportam normalmente como curto ou circuito aberto.
- Os parâmetros do dispositivo podem variar com o tempo devido à estresses.

# Componente Eletro- óticos

- Podem suportar altas taxas de transferências são imunes a interferências eletromagnéticas.
- Os principais mecanismos de falha são a quebra das fibras óticas, desalinhamento das fibras e degradação dos emissores de luz (LEDs).

# Cabos e Conectores

- Estão entre os principais responsáveis dos problemas de confiabilidade em dispositivos eletrônicos.
- Os principais mecanismos de falta são problemas de fabricação, dano durante montagem/uso/manutenção e fadiga causada por vibração ou movimento.

# Confiabilidade no Projeto de Sistemas Eletrônicos

# Introdução

- O projetista deve levar em conta na construção do projeto:
  - Estresses elétricos e térmicos a que os componentes estarão submetidos.
  - Variações e tolerâncias nos valores dos componentes.
  - Efeitos de fatores de não-estresse (interferência, temporização, etc).
  - Facilidade de construção, manutenção e teste.

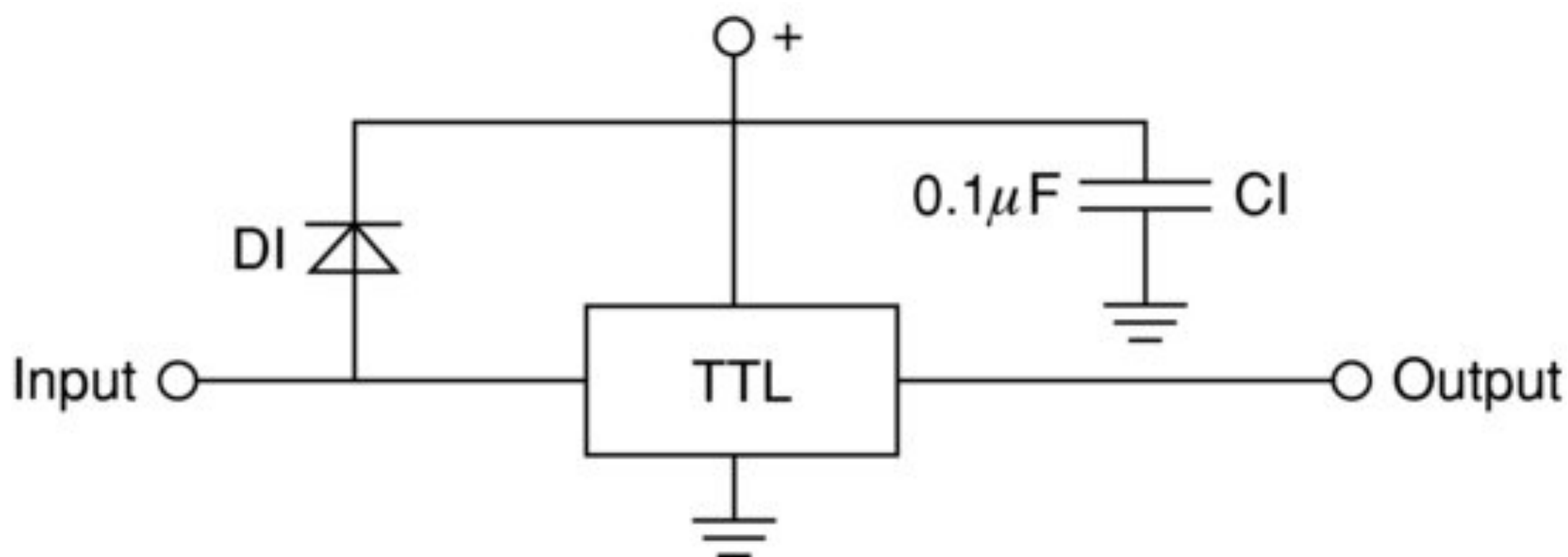
- Aspectos que também devem ser levados em conta para melhoria da confiabilidade:
  - Reduzir o número de partes distintas.
  - Instalação de circuitos de proteção.
  - Instalação de redundância.
  - Evitar a necessidade de mecanismos de ajuste fino.

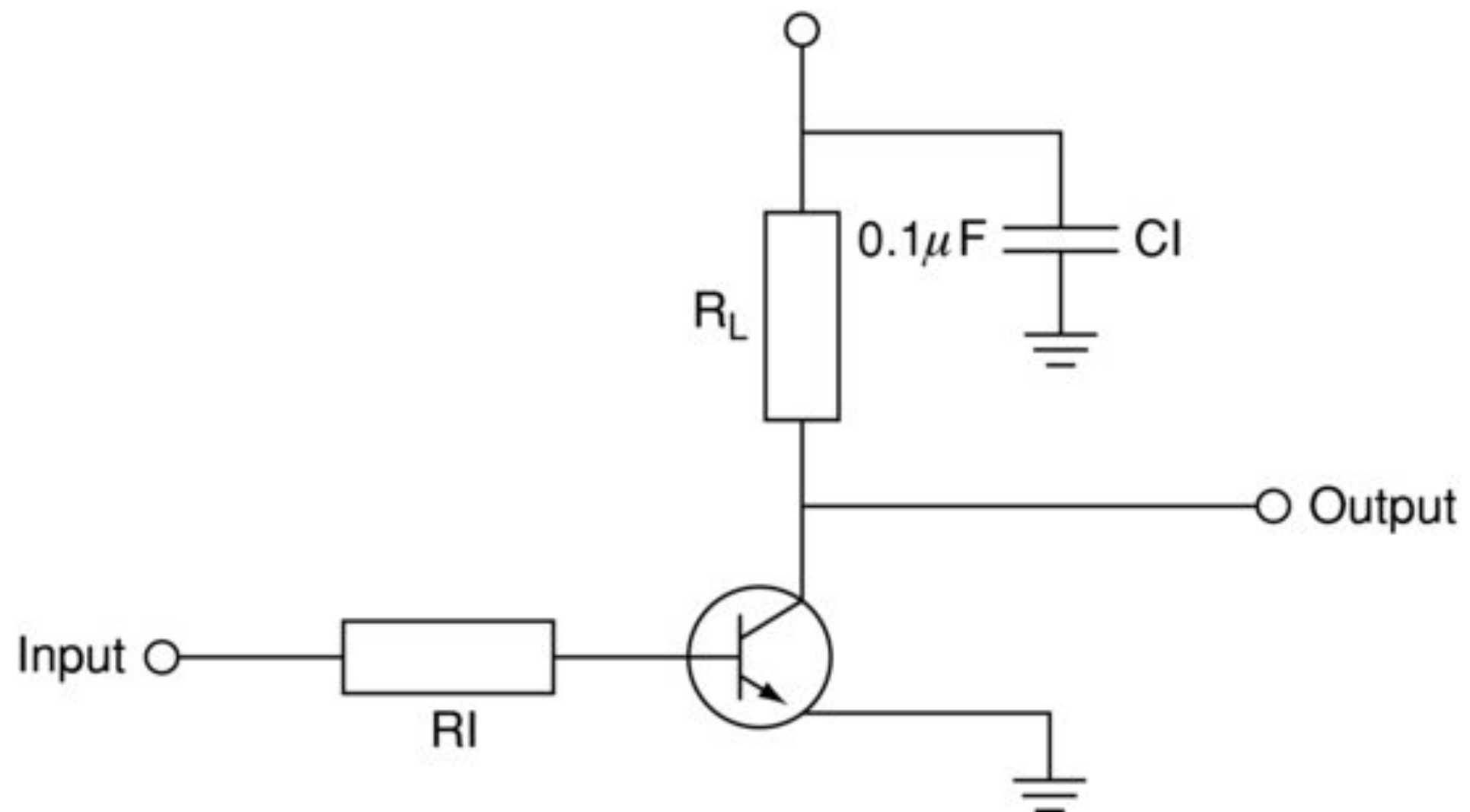
# Boas Práticas de Projeto

# Proteção de Transitórios de Tensão

- Circuitos de proteção contra danos causados por transitórios de alta tensão de curta duração.
- Esses transitórios podem ser causados por alterações de carga, efeitos capacitivos ou indutivos, descargas eletrostáticas, erros de teste, etc.
- Especialmente importante em dispositivos semicondutores, que são muito suscetíveis a estes transitórios.







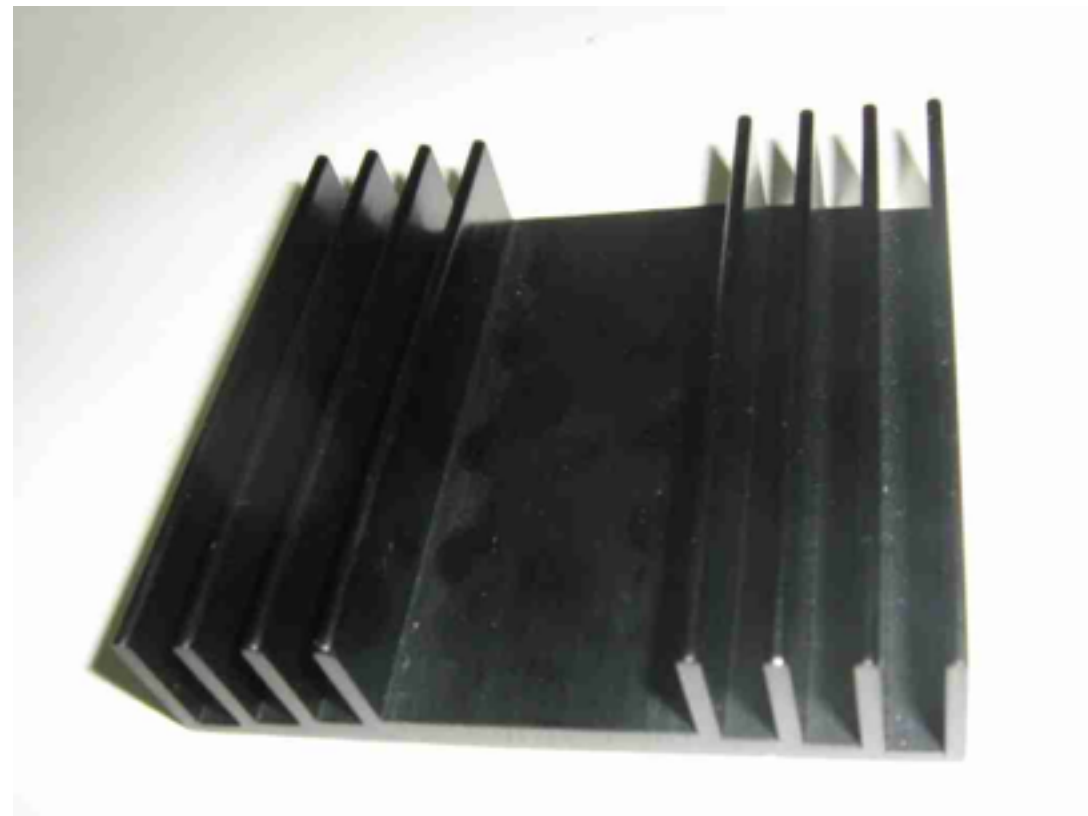
# Projeto Térmico

- O aumento de temperatura pode acelerar a degradação de componentes desgastados.
- A variação de temperatura pode causa fadiga nas conexões e na estrutura dos componentes.

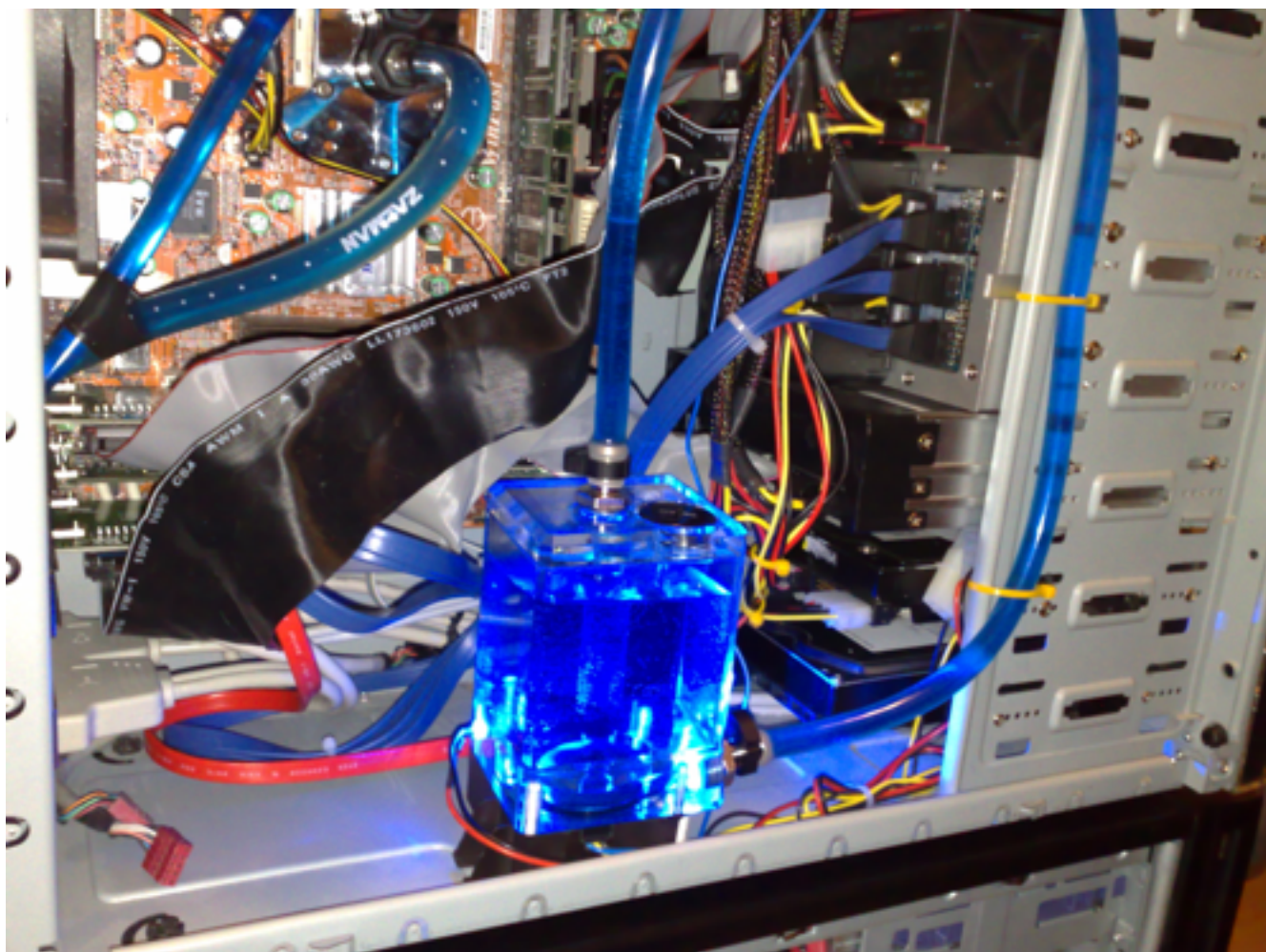
$$T_J = T_A + \theta W$$

- $T_J$ : temperatura local da junção.
- $T_A$ : temperatura do ambiente.
- $W$ : dissipação de potência.
- $\theta$ : resistência térmica entre a região ativa e o ambiente.

- Em casos em que o consumo de potência é significativamente maior que a capacidade de dissipação de calor, se torna necessário instalar dispositivos de proteção térmica:
- Dissipadores, ventiladores, resfriamento a água, etc.
- Alguns dispositivos eletrônicos já trazem dissipadores no encapsulamento.
- Em muitos casos se torna necessário construir caminhos para “retirada” do calor do sistema.







- O layout das placas e orientação dos componentes afeta a eficiência térmica do sistema:
- Dispositivos quentes devem ser colocados no fim do fluxo de ar do sistema.
- As placas PCB devem ser alinhadas verticalmente para permitir fluxo de ar convectivo.

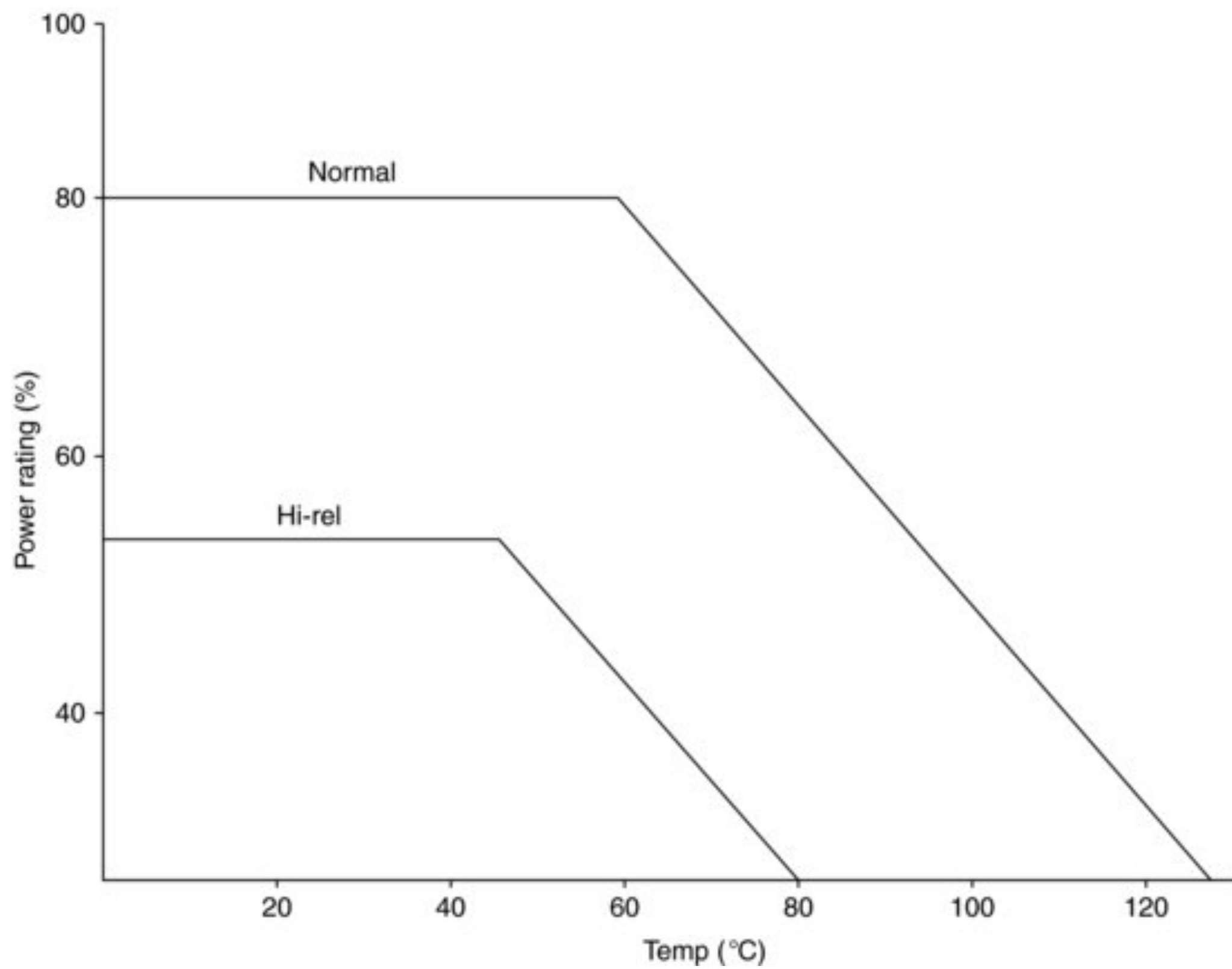
- Quando dispositivos de controle de temperatura são utilizados, estes devem ser considerados no cálculo da temperatura de operação do sistema.
- Neste caso as resistências térmicas entre o dispositivo e o ambiente são alteradas.
- Softwares de modelagem térmica, baseados em elementos finitos, podem ser utilizados para auxiliar nesta análise.



# Derating

- Derating: consiste do uso de um componente super-dimensionado para as condições de estresse a que o sistema vai ser submetido.
- Podem ser adotadas práticas que amenizam o efeito do estresse a que o sistema é submetido durante seu funcionamento, com o intuito de aumentar a confiabilidade.

- Possíveis práticas:
  - Reduzir a probabilidade de falhas de componentes individuais.
  - Reduzir os efeitos das variações de parâmetros instantâneas e de longo prazo.
  - Considerar algum nível de incerteza nos cálculos dos estresses.
  - Proteger contra estresses transitórios.



# Uprating

- Uprating: consiste do uso de um componente subdimensionado para as condições de estresse a que o sistema vai ser submetido.
- Possíveis aplicações:
  - Um componente que supera as especificações não esta disponível.
  - Redução de custo.

- Envolve testes do componente para condições acima de sua especificação nominal.
- Práticas:
  - Conformação de parâmetros.
  - Recaracterização de parâmetros.
  - Balanço de estresses.

# Redundância

- Componentes redundantes podem ser utilizados para aumentar a confiabilidade do sistema.
- A escolha entre a instalação ou não da redundância deve ser um balanço entre:
  - criticalidade do sistema.
  - necessidade de minimização da complexidade.
  - necessidade de minimização do custo.

# Simplicidade de Projeto

- Todo sistema eletrônico deveria ser tão simples quanto possível.
- Em geral um número menor de componentes aumenta a confiabilidade e reduz o custo.
- No entanto, a instalação de dispositivos de proteção e redundância, quando necessário, deve ser prioritária a necessidade de simplicidade.

# Variação de Parâmetros e Tolerâncias

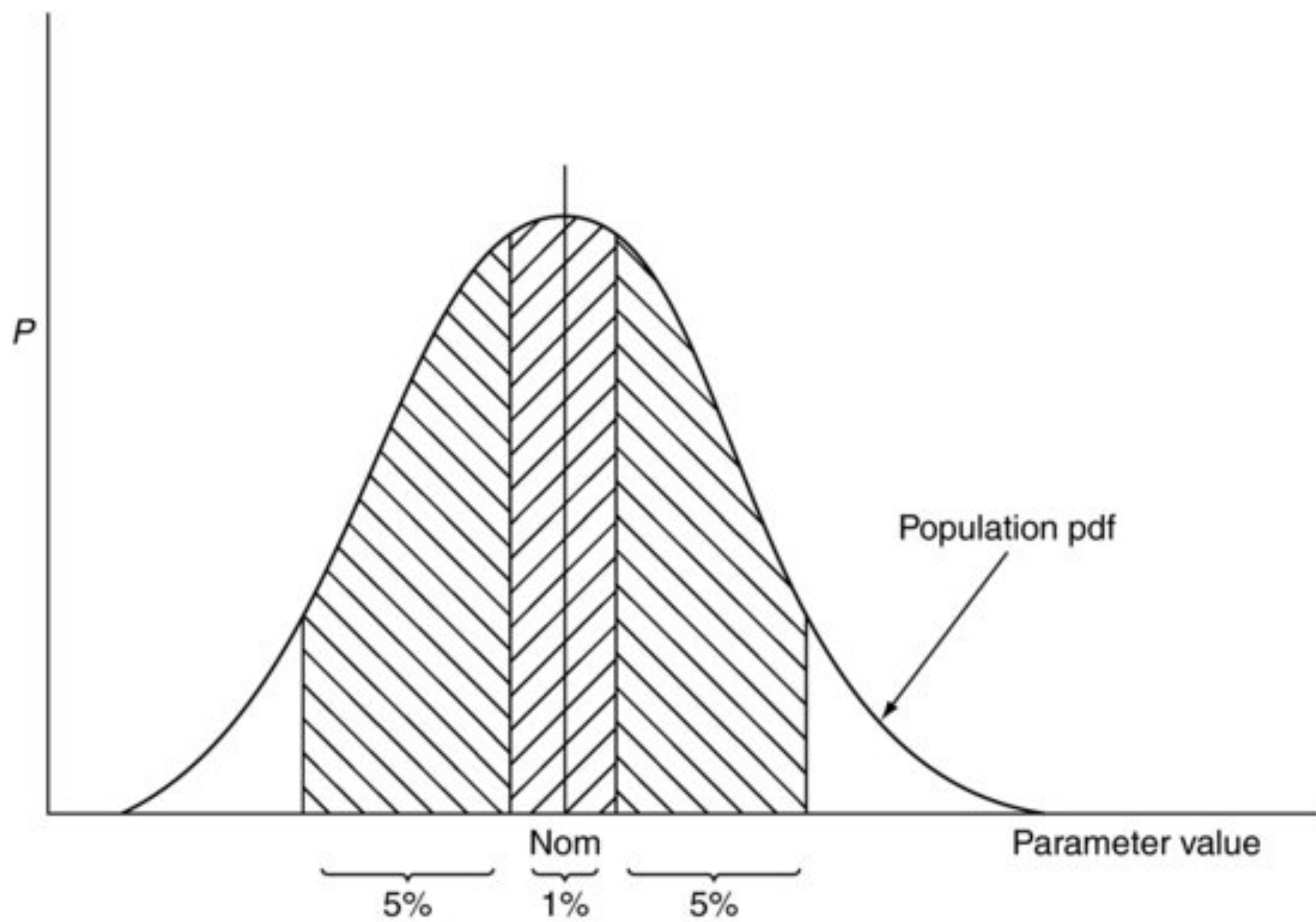


# Introdução

- Componentes podem apresentar variações nos seus parâmetros:
  - Variação construtiva (tolerância).
  - Variação temporária (fator externo).
  - Variação ao longo da vida (fadiga).

- O impacto da variação do parâmetro pode ser diferente dependendo do sistema:
- Suponha um resistor:
  - Em um amplificador de alto ganho e alta precisão.
  - Como limitador de corrente.

- A variação construtiva não pode ser controlada e depende do processo de fabricação.
- Em geral são associadas faixas de tolerância aos dispositivos: 1%, 2%, 5%, 10%, 20%, etc.



- Os parâmetros de diversos componentes variam temporariamente devido ao efeito de fatores externos, principalmente temperatura.
- Resistência de resistores, ganhos de amplificadores operacionais, tempo de chaveamento de transistores, etc.

- Variação dos parâmetros com o tempo de uso geralmente está associada à integridade do dielétrico.
- Por exemplo, capacitores e resistores estão sujeitos à variações nos parâmetros com o tempo de uso.
- A taxa de variação no tempo depende do tipo de material, temperatura de operação, condição de uso e tempo.

- A variação dos parâmetros pode afetar o sistema de duas formas:
- Para produção em larga escala, a variação pode levar a alguns equipamentos que não atendem os requisitos de projeto e serão rejeitados. O custo de correção/descarte desses equipamentos deve ser considerado.
- Alterações nos parâmetros podem fazer com que um sistema falhe durante sua vida útil, ou até no período de garantia.

# Tolerância de Projeto



- Os equipamentos eletrônicos devem ser projetados com base nos parâmetros nominais de seus componentes (*parameter design*).
- Uma vez desenvolvido o projeto, se torna necessário avaliar os efeitos da variação de parâmetros no funcionamento, estabilidade e confiabilidade do sistema (*tolerance design*).

- Inicialmente deve-se levantar quais parâmetros são aparentemente mais sensíveis para o sistema. Essa identificação pode ser feita com base na experiência no sistema ou por meio de testes.
- Depois deve-se estabelecer quais as faixas possíveis para variação desses parâmetros.
- É possível acrescentar dispositivos para compensação de variações, como termistores ou resistores variáveis.
- No entanto esses dispositivos geralmente reduzem a confiabilidade, uma vez que eles estão suscetíveis a variações de parâmetros, desgaste e fadiga.

# Análise de Pior Caso

- Envolve analisar o comportamento do circuito quando seus componentes mais críticos estão com seus valores mais baixos ou mais altos.
- São estimativas geralmente pessimistas e só são possíveis em circuitos simples.

# Simulação

- Técnicas computacionais (Simulações de Monte Carlo, Bootstrapping) podem ser utilizadas para se estimar o efeito da variação de parâmetros no circuito.
- Depende que as distribuições dos parâmetros que podem sofrer variação sejam conhecidas ou ao menos estimadas.
- Vários softwares de simulação de circuitos permitem a avaliação do circuito sujeita a variação de parâmetros utilizando Simulações de Monte Carlo.