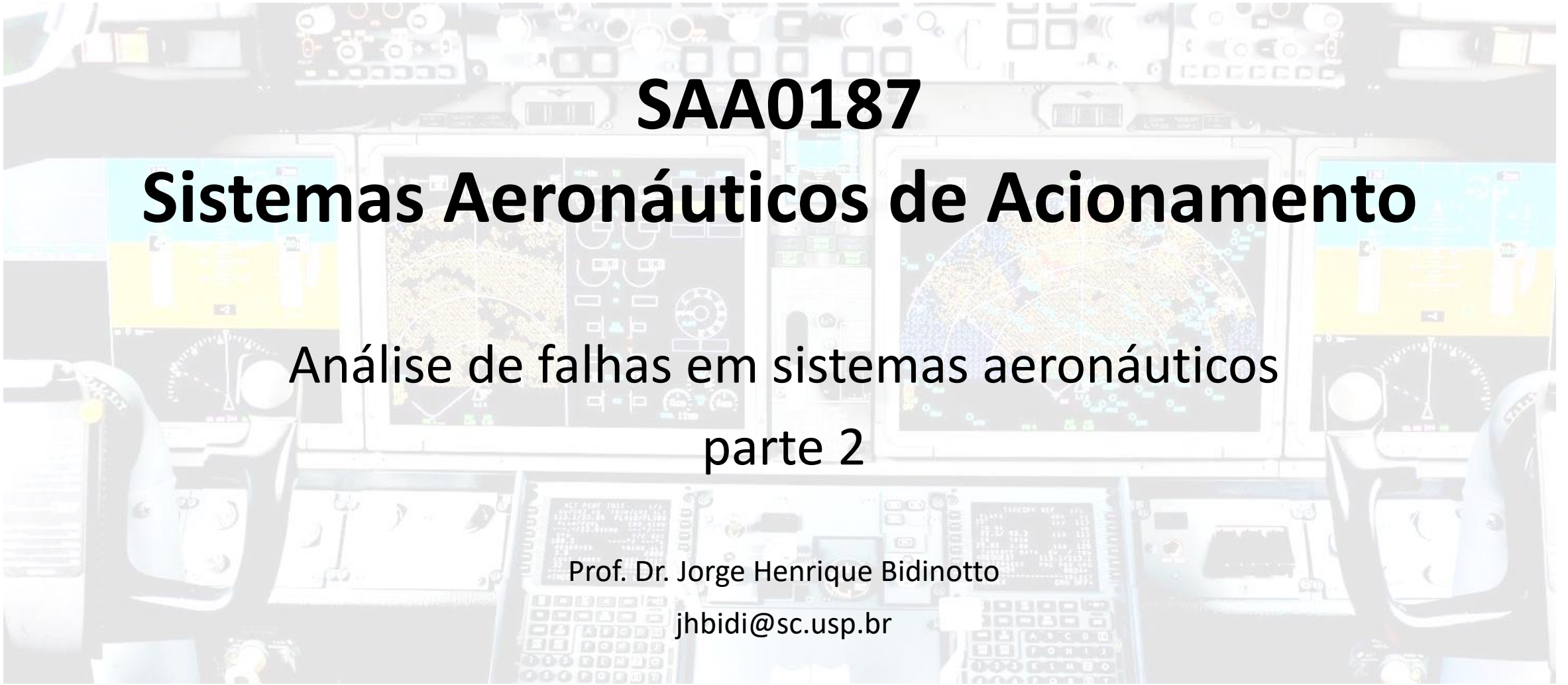


# SAA0187
# Sistemas Aeronáuticos de Acionamento

## Análise de falhas em sistemas aeronáuticos
## parte 2

Prof. Dr. Jorge Henrique Bidinotto

jhbidi@sc.usp.br

# O acidente aeronáutico

- Década de 1970
- Surge o requisito FAR 25.1309

**§25.1309 Equipment, systems, and installations.**

(a) The equipment, systems, and installations whose functioning is required by this subchapter, must be designed to ensure that they perform their intended functions under any foreseeable operating condition.

(b) The airplane systems and associated components, considered separately and in relation to other systems, must be designed so that—

(1) The occurrence of any failure condition which would prevent the continued safe flight and landing of the airplane is extremely improbable, and

(2) The occurrence of any other failure conditions which would reduce the capability of the airplane or the ability of the crew to cope with adverse operating conditions is improbable.

(c) Warning information must be provided to alert the crew to unsafe system operating conditions, and to enable them to take appropriate corrective action. Systems, controls, and associated monitoring and warning means must be designed to minimize crew errors which could create additional hazards.

(d) Compliance with the requirements of paragraph (b) of this section must be shown by analysis, and where necessary, by appropriate ground, flight, or simulator tests. The analysis must consider—

(1) Possible modes of failure, including malfunctions and damage from external sources.

(2) The probability of multiple failures and undetected failures.

(3) The resulting effects on the airplane and occupants, considering the stage of flight and operating conditions, and

(4) The crew warning cues, corrective action required, and the capability of detecting faults.

(e) In showing compliance with paragraphs (a) and (b) of this section with regard to the electrical system and equipment design and installation, critical environmental conditions must be considered. For electrical generation, distribution, and utilization equipment required by or used in complying with this chapter, except equipment covered by Technical Standard Orders containing environmental test procedures, the ability to provide continuous, safe service under foreseeable environmental conditions may be shown by environmental tests, design analysis, or reference to previous comparable service experience on other aircraft.

(f) EWIS must be assessed in accordance with the requirements of §25.1709.

[Amdt. 25-23, 35 FR 5679, Apr. 8, 1970, as amended by Amdt. 25-38, 41 FR 55467, Dec. 20, 1976; Amdt. 25-41, 42 FR 36970, July 18, 1977; Amdt. 25-123, 72 FR 63405, Nov. 8, 2007]

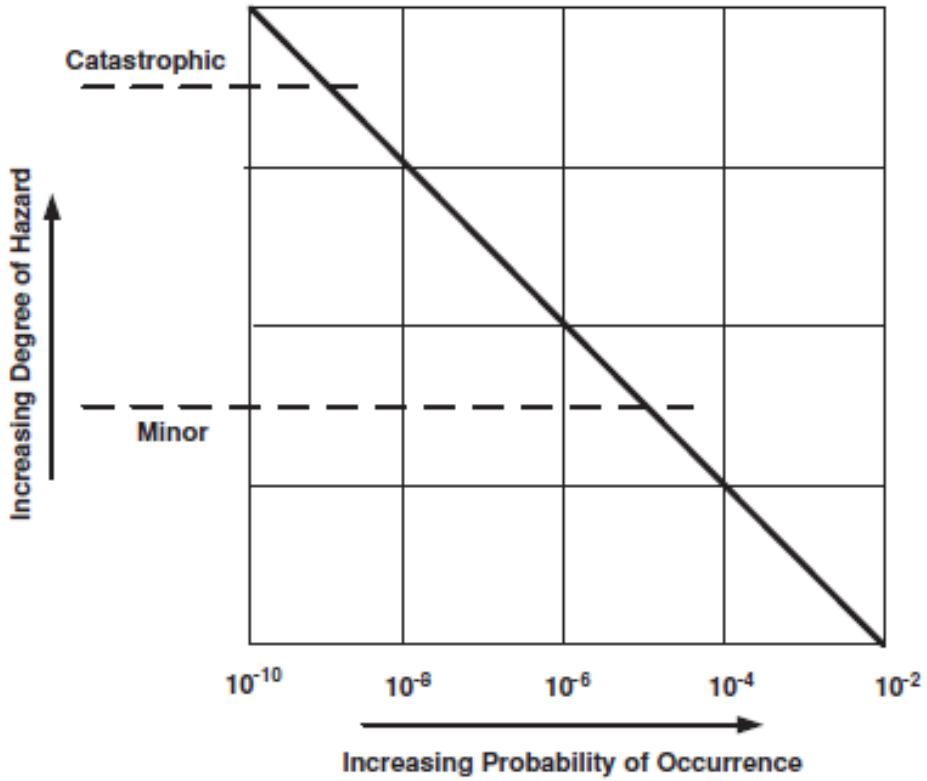
- **Classificação segundo órgãos certificadores**

| Tipo | Efeito sobre a aeronave | Efeito sobre a tripulação | Efeito sobre os ocupantes |
|---|---|---|---|
| **No safety effect** | - | - | - |
| **Minor (classe I)** | Pequeno prejuízo na capacidade | Leve aumento da carga de trabalho | Efeitos físicos, mas sem ferimentos |
| **Major (Classe II)** | Pequena limitação | Redução da habilidade | Ferimentos leves |
| **Hazardous (Classe III)** | Grande limitação | Aumento da carga de trabalho a ponto de a tripulação não ser capaz de efetuar suas tarefas eficazmente | Ferimentos graves e/ou morte de pequena parcela dos ocupantes |
| **Catastrophic (Classe IV)** | Perda total | | Morte de parcela considerável dos ocupantes |

# O acidente aeronáutico



- **Classificação segundo órgãos certificadores**



# O acidente aeronáutico

- **Classificação segundo órgãos certificadores**

| EFFECT ON AIRCRAFT AND OCCUPANTS | Normal | Nuisance | Operating limitations; emergency procedures | Significant reduction in safety margins: difficult for crew to cope with adverse conditions; passenger injuries | Large reduction in safety margins; crew extended because of workload or environmental conditions; serious injury or death of small number of occupants | Multiple deaths; usually with loss of aircraft | EFFECT ON AIRCRAFT AND OCCUPANTS |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| FAR 25 PROBABILITY | ← | PROBABLE | → | IMPROBABLE | → | EXTREMELY IMPROBABLE | FAR 25 PROBABILITY |
| JAR 25/CS PROBABILITY | FREQUENT | → | REASONABLY FREQUENT | REMOTE | EXTREMELY REMOTE | EXTREMELY IMPROBABL E | JAR 25/CS PROBABILITY |
| FAILURE RATE (per flight hour) | | $10^{-3}$ | | $10^{-5}$ | $10^{-7}$ | $10^{-9}$ | |
| CATEGORY OF EFFECT | ← | MINOR | → | MAJOR | HAZARDOUS | CATASTROPHIC | CATEGORY OF EFFECT |

# O acidente aeronáutico

- **Aspectos quantitativos**
- Para se quantificar o índice aceitável de acidentes, criaram-se métricas correspondentes
- Criou-se a “entidade” $10^{-9}$
- Sua origem:
  - 1. Eventos catastróficos poderiam surgir a cada 1 milhão de horas de voo ($10^{-6}$)
  - 2. Falhas em sistemas eram consideradas 1/10 das causas desses eventos em aeronaves
  - 3. Considerou-se que as aeronaves possuíam 10 sistemas
  - 4. Cada sistema era suscetível a 10 falhas diferentes

# O acidente aeronáutico

- **Aspectos quantitativos**
- Na prática:
- Considere que uma aeronave voa 10h/dia; 300 dias/ano
  - 3000 horas/ano
- Considere que a vida de uma aeronave é de 20 anos
  - 60.000 horas em sua vida
- Uma frota de 200 aeronaves deve acumular 12.000.000 de horas
  - Ou seja: $1{,}2 \times 10^{7}$ horas
- Hoje em dia os sistemas já trabalham com a meta de probabilidade de falhas catastróficas em $10^{-12}$

# Falhas

- **Definições**
- **Falha** – quando um item é incapaz de desempenhar sua função dentro dos limites especificados
- **Mau-funcionamento (malfunction)** – quando o item opera fora dos seus limites pré-estabelecidos
- **Fault** – Mudança de estado que, se não houver ação corretiva, pode levar a um mau-funcionamento
- **Evento** – ocorrência com origem fora da aeronave, não causado por um componente interno (ex.: impacto com pássaros, turbulência, etc.)
- **Erro** – Ocorrência causada por uma ação ou decisão incorreta da tripulação, manutenção, etc.

# Falhas

- **Classificação das falhas**
- **Falhas simples ou ativas (single active failures)** – produzem efeitos imediatos e perceptíveis (ex.: queima de lâmpada)
- **Falhas passivas ou dormentes (passive, hidden ou dormant failures)** – falhas que não produzem efeito perceptível e imediato, mas ficarão evidentes quando ocorrer uma segunda falha (ex.: falha de sensores ou alarmes)
- **Falhas de modo comum ou de causa comum (commom-mode/commom-cause failures)** – Falhas que invalidam redundâncias, provocando falhas simultâneas e que teoricamente seriam independentes (ex.: Porta do trem-de-pouso não abrir)

# Falhas

- **Classificação das falhas**
- **Falhas em cascata (cascade failures)** – uma variação das falhas simples, onde não há contenção e se propaga, gerando novas falhas
- **Falhas ambientais (environmental failures)** – causadas pela sensibilidade de certos equipamentos a fatores ambientais, como vibração, umidade, temperatura, etc.
- **Falhas de performance** – o item desempenha sua função, mas fora dos limites especificados
- **Runaways** – Quando não há proporcionalidade entre o comando e a resposta (ex.: comando de profundor respondendo mais que o solicitado
- **Hardover** – disparo inadvertido de algum comando

# Falhas

- **Conceitos importantes:**
- Confiabilidade
- Disponibilidade
- Integridade
- Redundância
- Dissimilaridade
- Segregação

} Independência

# Falhas

- **Medidas de Confiabilidade**
- MTBF – Mean Time Between Failure:
- (Tempo Médio Entre Falhas)
- Em algumas literaturas, chamado de Tm
- Deve ser medido em grande amostragem de aeronaves, em grande espaço de tempo
- Pode variar para diferentes regiões, temperaturas, tipos de operação, etc.
- Exemplo: um determinado componente falhou 10 vezes em 10.000 horas, logo:

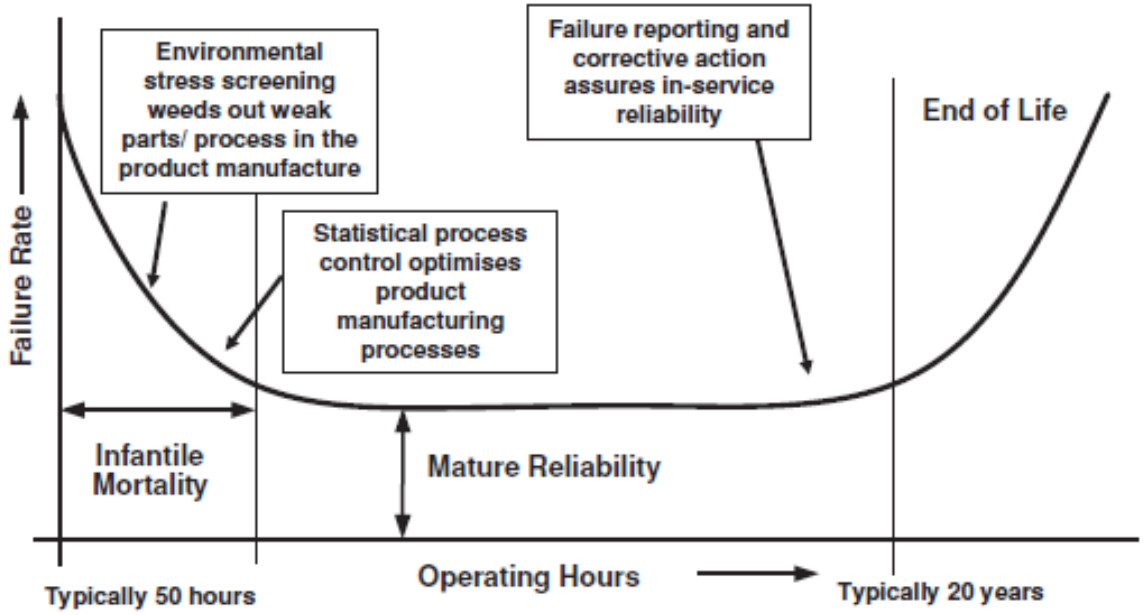
$$MTBF = \frac{10.000}{10} = 1.000 \text{ horas}$$

# Falhas

- **Medidas de Confiabilidade**
- <u>Failure Rate (λ):</u>
- Inverso do MTBF

$$\lambda = \frac{1}{MTBF}$$

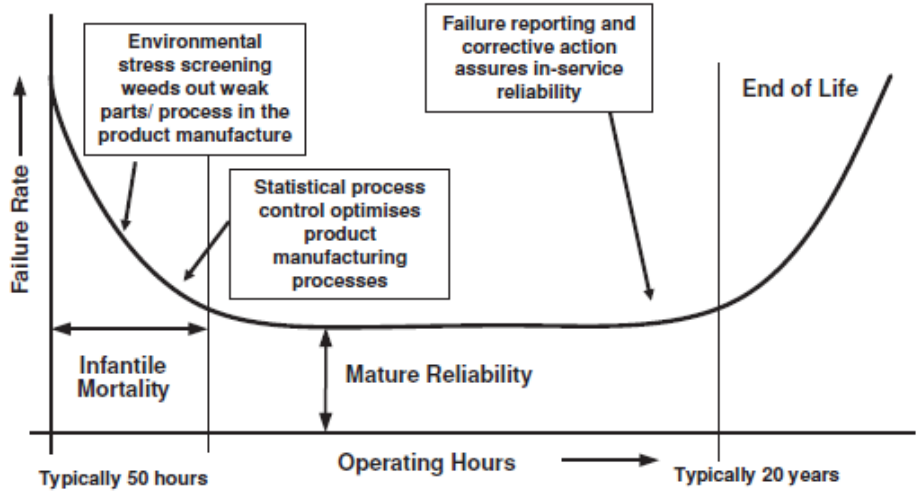
- Varia ao longo da vida operacional de um item



# Falhas

- **Medidas de Confiabilidade**
- <u>Failure Rate (λ):</u>
- A “curva da banheira” é medida com o item em bancada, sendo estressado ao extremo de seu funcionamento

- Itens sujeitos a sobrecarga em algum momento de sua vida, tendem a reduzir a curva, diminuindo a fase de maturidade



# Falhas

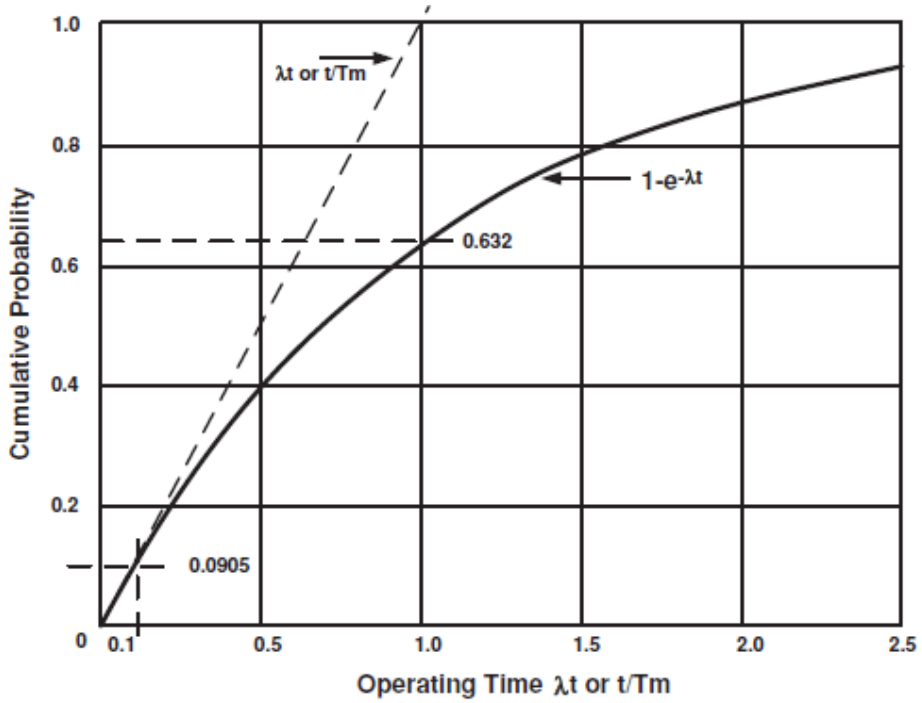


- **Medidas de Confiabilidade**
- <u>Probabilidade de falha:</u>
- A probabilidade de um item falhar depende do seu tempo de exposição *t*, e é dada por

$$P = 1 - e^{-\lambda t}$$

- Para $\lambda t$ pequenos:

$$P = \lambda t$$



# Falhas

- **Medidas de Disponibilidade**
- <u>Estatística em Probabilidade de falha:</u>
- evento1 **E** evento2 : produto
- evento1 **OU** evento2 : soma
- Exemplo: a probabilidade de eventos em lançamentos de moeda

| Evento | Moeda 1 | Moeda 2 | Probabilidade |
|---|---|---|---|
| 1 | CARA | CARA | 0,5 x 0,5 = 0,25 |
| 2 | CARA | COROA | 0,5 x 0,5 = 0,25 |
| 3 | COROA | CARA | 0,5 x 0,5 = 0,25 |
| 4 | COROA | COROA | 0,5 x 0,5 = 0,25 |

| **Em 3 lançamentos: Ocorrência de evento 1 OU 2 OU 3** |
|---|
| 0,25 + 0,25 + 0,25 = 0,75 = 75% |

| **Em 3 lançamentos: Ocorrência de evento 1 E 2 E 3** |
|---|
| 0,25 x 0,25 x 0,25 = 0,015 = 1,5% |

# Falhas

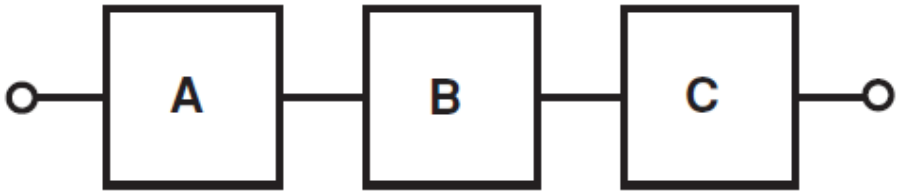


- **Medidas de Disponibilidade**
- Estatística em Probabilidade de falha:
- Aplicação para o caso aeronáutico (duas LRUs em operação)

| LRU A | LRU B | Probability |
|---|---|---|
| Operational | Operational | $\lambda = (1 - \lambda_A) \times (1 - \lambda_B)$ |
| Operational | Failed | $\lambda = (1 - \lambda_A) \times \lambda_B$ |
| Failed | Operational | $\lambda = \lambda_A \times (1 - \lambda_B)$ |
| Failed | Failed | $\lambda = \lambda_A \times \lambda_B$ |

# Falhas

- **Medidas de Disponibilidade**
- <u>Estatística em Probabilidade de falha:</u>
- Três sistemas operando em série

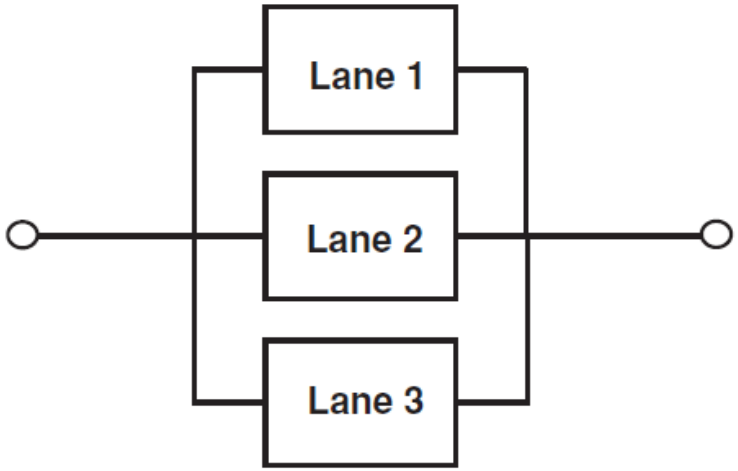



- Probabilidade de falha do sistema (OU):

If $\lambda_A = 3.0 \times 10^{-4}$/hr (MTBF = 3333 hrs)
$\lambda_B = 5.0 \times 10^{-4}$/hr (MTBF = 2000 hrs)
$\lambda_C = 2.0 \times 10^{-4}$/hr (MTBF = 5000 hrs)
Then $\lambda = (3.0 + 5.0 + 2.0) \times 10^{-4}/\text{hr} = 1 \times 10^{-3}/\text{hr}$

# Falhas

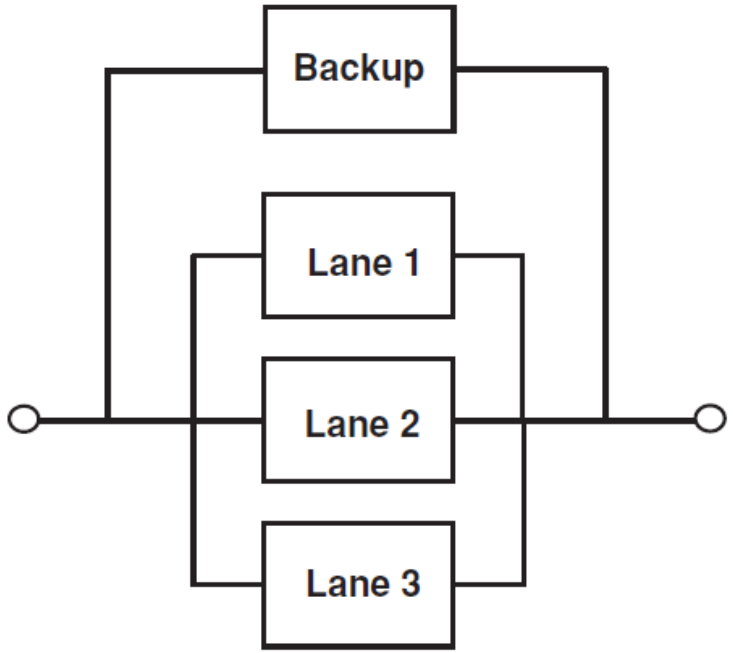
- **Medidas de Disponibilidade**
- <u>Estatística em Probabilidade de falha:</u>
- Arquitetura triplex




If $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 1.0 \times 10^{-3}$/hr ;
Then $\lambda = (1.0 \times 10^{-3})^3 = 10^{-9}$/hr
$= (5.0 \times 10^{-3})^3 = 1.25 \times 10^{-7}$ for a 5-hour flight

# Falhas

- **Medidas de Disponibilidade**
- Estatística em Probabilidade de falha:
- Arquitetura tríplex com backup




If $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 1.0 \times 10^{-3}$/hr ; and $\lambda_B = 1.0 \times 10^{-2}$/hr
then $\lambda = (5.0 \times 10^{-3})^3 \times (1.0 \times 10^{-2}) = 1.25 \times 10^{-9}$ for a 5-hour flight with 1-hour emergency

# Falhas

- **Medidas de Disponibilidade**
- <u>Estatística em Probabilidade de falha:</u>
- Em geral...

- **Minor** – a simplex architecture will probably meet the safety objectives.
- **Major** – a duplex architecture is likely to meet the safety objectives.
- **Hazardous** – a triplex architecture is almost certainly required.
- **Catastrophic** – a quadruplex or triplex plus backup architecture will be necessary.

# Falhas

- **Integridade**
- Definição: ter o sistema disponível e trabalhando corretamente

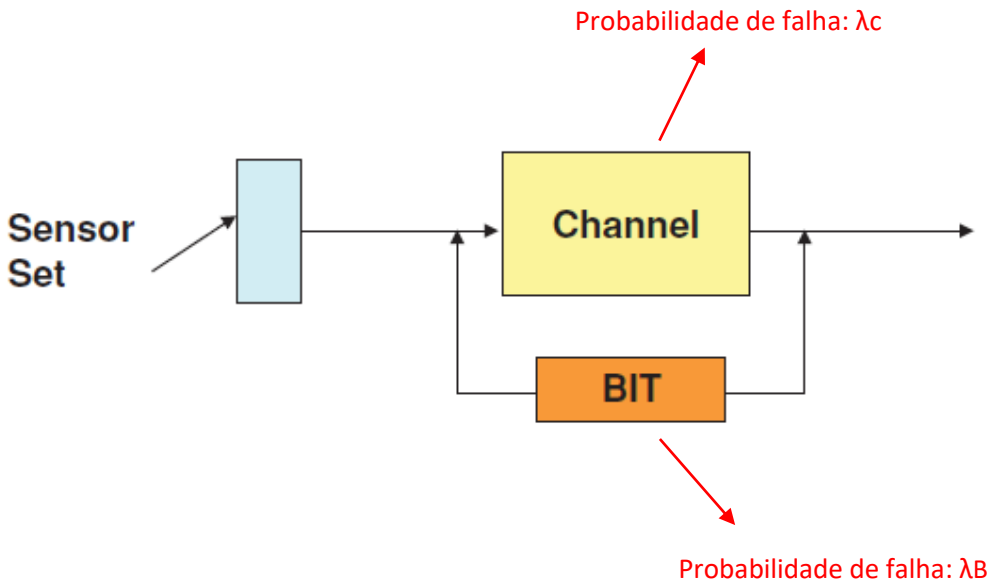
- Pode afetar a análise de risco de diferentes formas, conforme o tipo de perda de integridade. Exemplo:
  - Perda de informações primárias (altitude, velocidade, atitude e proa) é considerado “hazardous”
  - Informações primárias erradas é considerado “catastrophic”

- Existem duas formas principais de se garantir integridade em sistemas aeronáuticos
  - Built-in-Test (BIT)
  - Cross-Monitoring (XMON)

# Falhas



- **Integridade**
- Built-in-Test (BIT):
- Pode ser dos seguintes tipos:
  - Power-up ou Statup BIT
  - Interruptive BIT
  - Continuous BIT

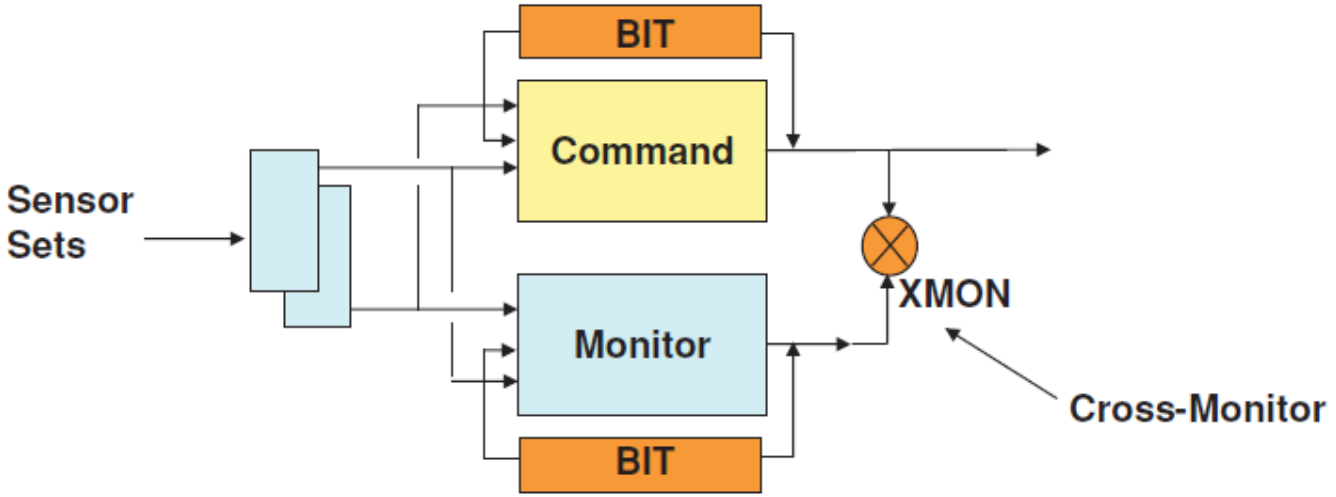



- Em termos de probabilidade de falha
  - Probabilidade de perda da função (disponibilidade): $\lambda_C$
  - Probabilidade de perda não-anunciada da função (integridade): $\lambda_C \times \lambda_B$

# Falhas

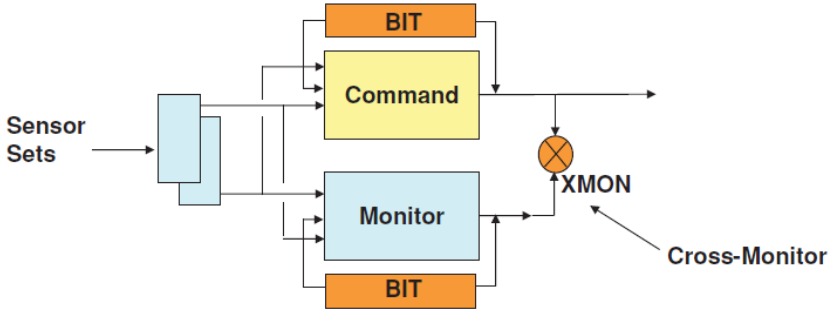


- **Integridade**
- Cross-Monitoring (XMON):
- Sistemas de canais independentes monitoram o funcionamento do comando e a confiabilidade de seu sinal
- Ambos sinais são computados no XMON



# Falhas

- **Integridade**
- <u>Cross-Monitoring (XMON):</u>
- Início do conceito de dissimilaridade
- Em termos de probabilidade de falha
  - Probabilidade de perda do canal de comando: $\lambda_C$
  - Probabilidade de falha do BIT: $\lambda_B$
  - Probabilidade de falha do XMON: $\lambda_{XMON}$
  - Probabilidade de falha do canal de monitoramento: $\lambda_M$
  - Probabilidade de um alarme falso: $\lambda_C + \lambda_M + \lambda_{XMON}$
  - Probabilidade falha não-anunciada do canal de comando: $\{\lambda_C(1-\lambda_B) + \lambda_M(1-\lambda_B)\} \times \lambda_{XMON}$



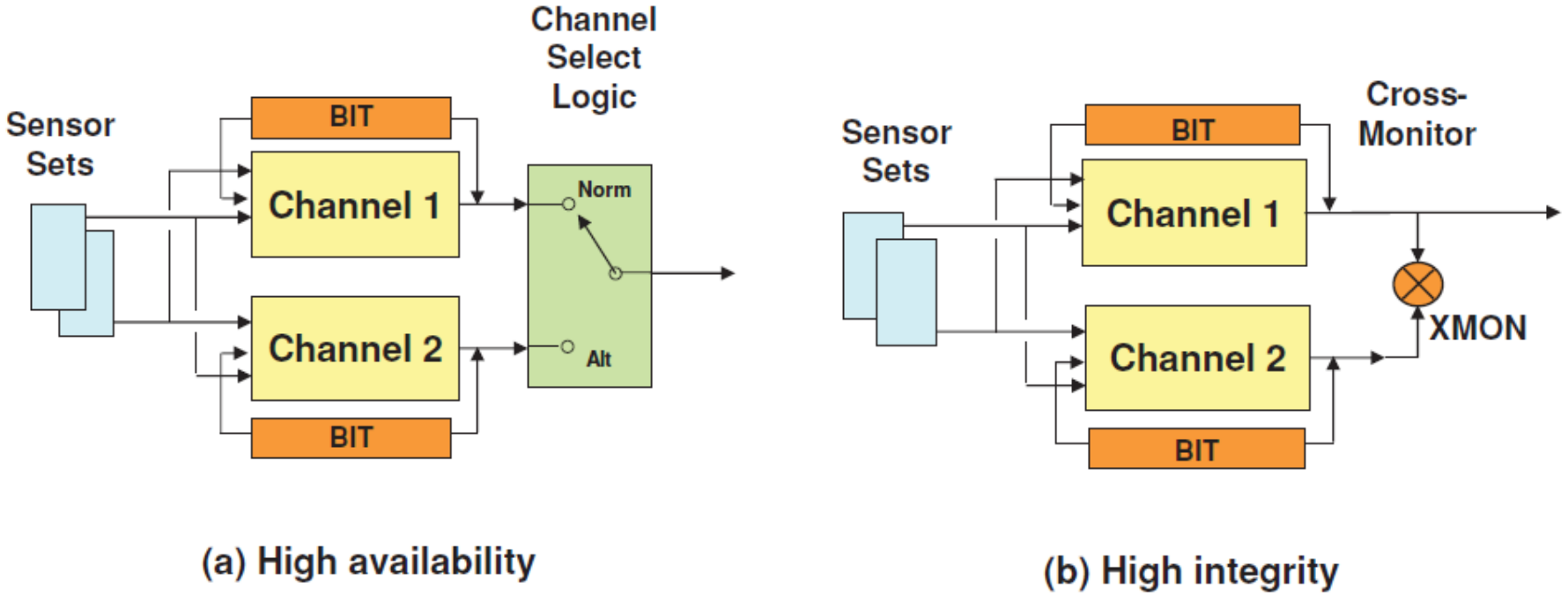
# Falhas

- **Redundância**
- Tipos de arquitetura:
  - Simplex
  - Redundância Duplex
  - Redundância Dual
  - Redundância Triplex
  - Redundância Quadruplex

# Falhas

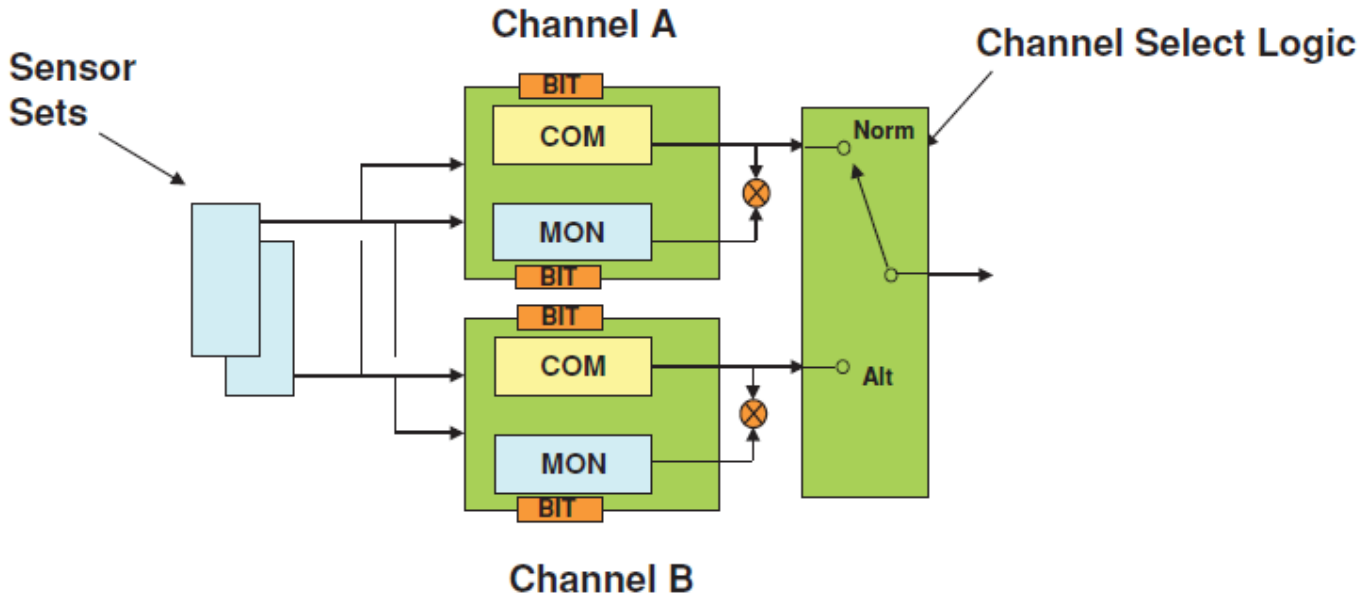


- **Redundância**
- Arquitetura Duplex



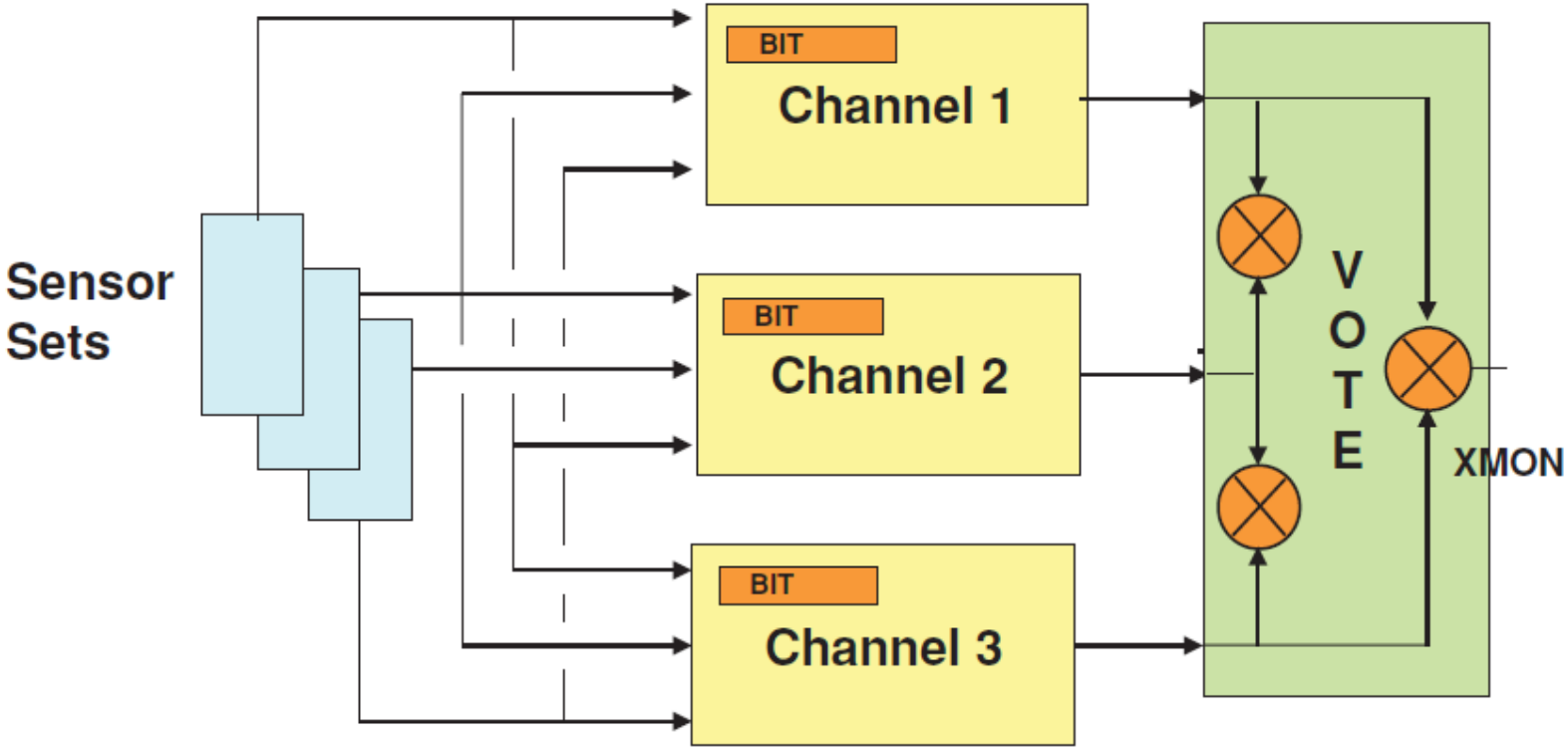
# Falhas

- **Redundância**
- Arquitetura Dual Command:Monitor



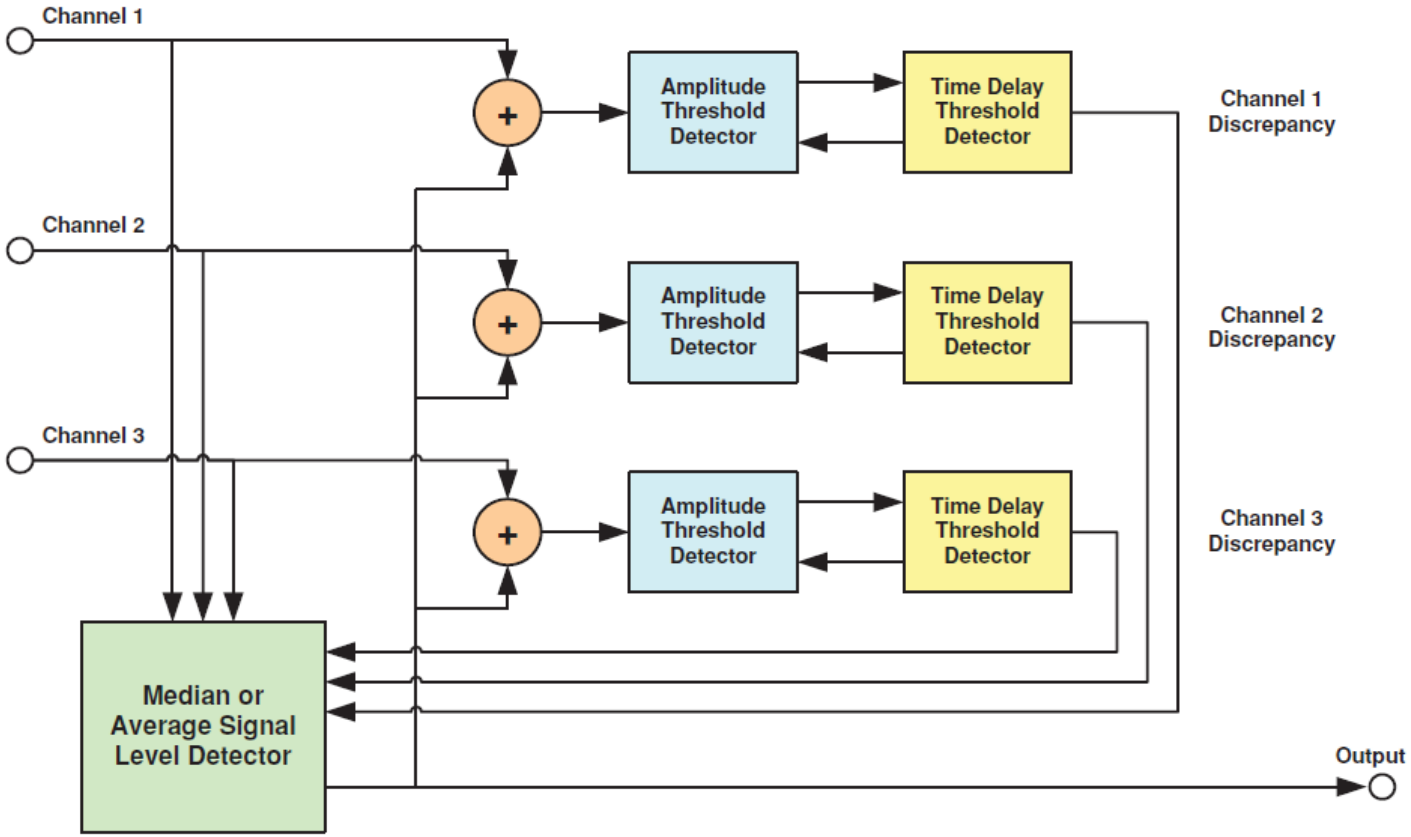
# Falhas

- **Redundância**
- Arquitetura Triplex



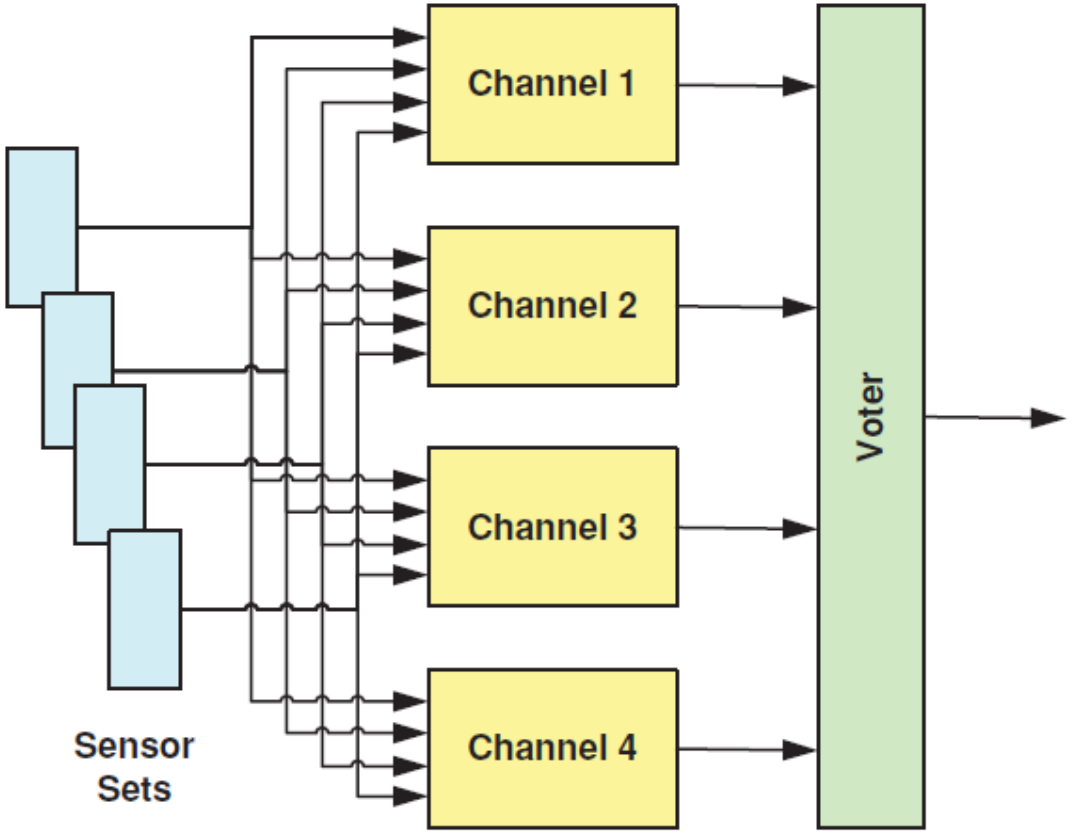
# Falhas

- **Redundância**
- Arquitetura Triplex



# Falhas

- **Redundância**
- Arquitetura Quadruplex



# Falhas



- **Redundância**
- Comparativo

| Architecture | Reliability (1st Failure) | Availability (Total Loss) | Integrity (Undetected Malfunction) |
|---|---|---|---|
| Simplex | 5000 | Minor | Major |
| Duplex | 2500 | Major | Hazardous |
| Dual Com:Mon | 1250 | Hazardous | Catastrophic |
| Triplex | 1667 | Catastrophic | Catastrophic |
| Quadruplex | 1250 | Catastrophic | Catastrophic |

# Falhas

- **Dissimilaridade**
- Uso de componentes não-similares para uma mesma função
  - Outro fabricante
  - Outro lote
  - Etc.
- Uso de softwares desenvolvidos por times diferentes para uma mesma função

# Falhas

- **Segregação**
- Separação física e via software de envio de informações