

# EMC e Aviação

# O que é Compatibilidade Eletromagnética (EMC)?

## Definição

EMC é a capacidade de equipamentos e sistemas eletrônicos funcionarem em seu ambiente eletromagnético pretendido, sem sofrer ou causar degradação inaceitável devido à interferência eletromagnética (EMI).

## Dois Aspectos Fundamentais:

- **Emissão:** O equipamento não deve gerar EMI em níveis que perturbem outros sistemas.
- **Suscetibilidade (ou Imunidade):** O equipamento deve ser capaz de operar corretamente na presença de EMI esperada no ambiente.

*EMC ≠ Ausência de EMI, mas sim o controle e coexistência gerenciada.*

# A Importância Crítica da EMC na Aviação

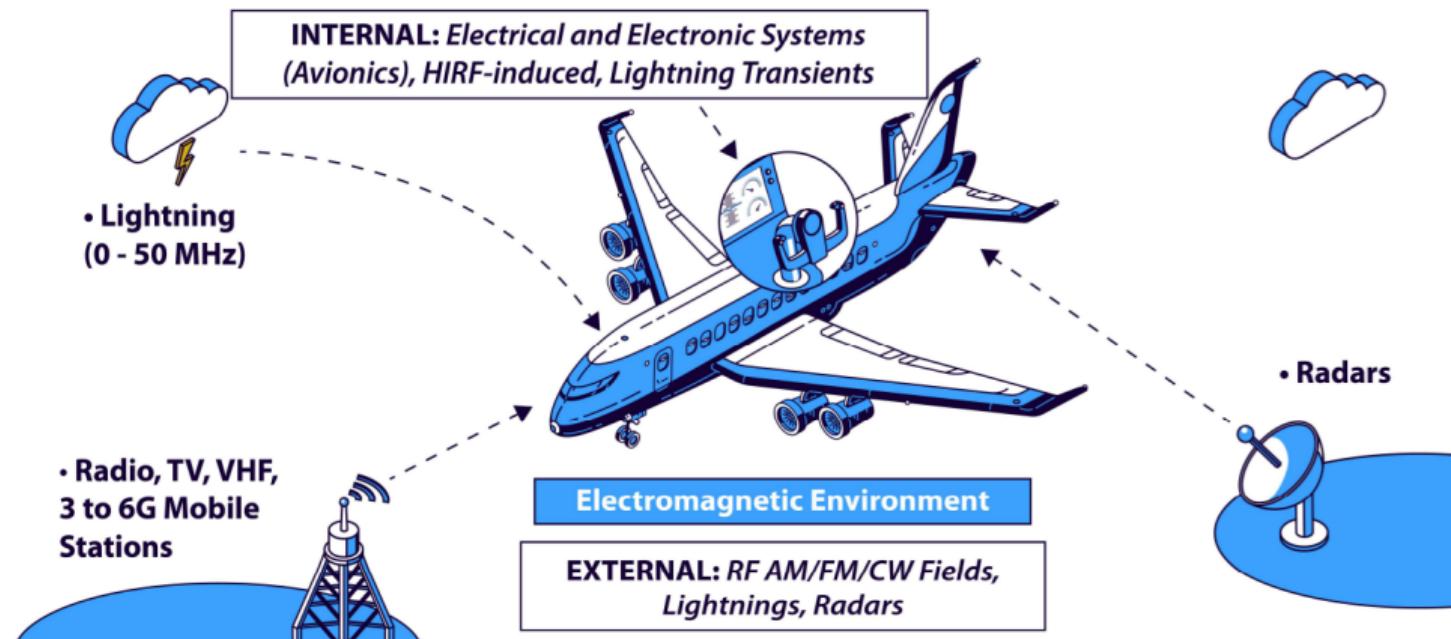
- **Segurança de Voo:** A falha ou mau funcionamento de sistemas aviônicos críticos (navegação, comunicação, controle de voo) devido à EMI pode ter consequências catastróficas.
  - **Confiabilidade da Missão:** A integridade operacional dos sistemas é essencial para o sucesso da missão (comercial, militar, etc.).
  - **Densidade Eletrônica:** Aeronaves modernas possuem centenas de sistemas eletrônicos operando em proximidade, aumentando o potencial de interferência mútua (intra-sistema).
  - **Ambiente Eletromagnético Hostil:** Exposição a fontes externas de alta intensidade (Raios, HIRF, PEDs).
  - **Certificação Obrigatória:** Regulamentações rigorosas exigem demonstração de conformidade com EMC.

## Consequência

Não conformidade com EMC pode levar à recusa de certificação, atrasos, custos elevados e, no pior caso, acidentes.

## Fontes de Interferência Eletromagnética (EMI)

O ambiente eletromagnético (EME) de uma aeronave é complexo, com fontes internas e externas.



# Fontes de Interferência Eletromagnética (EMI)

## Fontes Internas (Intra-sistema):

- Equipamentos eletrônicos (clocks, fontes chaveadas)
- Sistemas de potência (geradores, conversores)
- Atuadores elétricos e motores
- Cablagem e chicotes
- Descargas estáticas (ESD) internas
- Sistemas de comunicação/radar próprios

## Fontes Externas (Inter-sistema):

- Campos de Rádio Frequência de Alta Intensidade (HIRF)
- Raios (efeitos diretos e indiretos - LEMP)
- Dispositivos Eletrônicos Portáteis (PEDs)
- Estações de Rádio/TV/Radar terrestres
- Outras aeronaves
- Emissões de satélites
- Descargas estáticas (P-static)

# Fontes Internas Detalhadas

- **Fontes Chaveadas:** Ruído de alta frequência (harmônicos da frequência de chaveamento) conduzido e radiado. Presente em quase todos os LRUs (Line Replaceable Units).
- **Osciladores e Clocks:** Geram sinais de frequência específica (banda estreita) que podem acoplar em circuitos sensíveis.
- **Linhas de Dados Digitais:** Transições rápidas de tensão/corrente geram espectro de RF de banda larga. Ex: Barramentos ARINC 429, AFDX.
- **Motores Elétricos e Atuadores:** Ruído de comutação (motores DC com escovas), harmônicos de PWM (motores brushless).
- **Cablagem Mal Projetada:** Atua como antena transmissora e receptora, facilitando o acoplamento. Loops de terra.
- **Transmissores a Bordo:** Rádios VHF/HF, radares, TCAS, Wi-Fi. Podem interferir com outros sistemas se a isoliação não for adequada.

# Fontes Externas Detalhadas: HIRF e Raios

## HIRF (High-Intensity Radiated Fields):

- Originados por radares potentes (militares, controle de tráfego aéreo, meteorológicos), transmissores de TV/Rádio.
- Níveis de campo elétrico podem exceder 200 V/m (até milhares de V/m em cenários militares).
- Frequências de 10 kHz a 40 GHz.
- Ameaça significativa para sistemas de controle de voo digitais (Fly-by-Wire).

## Raios (Lightning):

- **Efeitos Diretos:** Danos físicos à estrutura, pontos de queima, potencial de ignição de combustível.
- **Efeitos Indiretos (LEMP - Lightning Electromagnetic Pulse):** Correntes e tensões induzidas em cabos e equipamentos devido aos campos eletromagnéticos intensos e rápidos ( $dV/dt$ ,  $dl/dt$  elevados). Ameaça principal aos eletrônicos.

# Mecanismos de Acoplamento Eletromagnético

Como a energia EMI viaja da fonte para a "vítima"?

## Quatro Mecanismos Principais:

- ① **Acoplamento Conduzido:** A EMI viaja através de um caminho condutor direto (fios, cabos, planos de terra, estrutura metálica).
- ② **Acoplamento Radiado (Campo Elétrico):** Acoplamento capacitivo entre condutores. Predominante quando a impedância da fonte e/ou vítima é alta.  
 $I_{acoplada} \propto C_m \frac{dV}{dt}$ .
- ③ **Acoplamento Radiado (Campo Magnético):** Acoplamento indutivo entre loops de corrente. Predominante quando a impedância da fonte e/ou vítima é baixa.  
 $V_{induzida} \propto M \frac{dl}{dt}$ .
- ④ **Acoplamento por Ondas Eletromagnéticas (Campo Distante):** Fonte e vítima separadas por distâncias maiores que  $\lambda/2\pi$  (aproximado). A energia se propaga como uma onda EM.

# Acoplamento Conduzido

- **Caminhos Comuns:** Linhas de alimentação (power lines), linhas de sinal, conexões de terra.
- **Modos de Acoplamento:**
  - **Modo Diferencial (DM):** Ruído flui em um condutor e retorna pelo outro (par de fios).  $V_{DM} = V_1 - V_2$ .
  - **Modo Comum (CM):** Ruído flui na mesma direção em ambos os condutores e retorna pelo plano de terra ou estrutura.  $V_{CM} = (V_1 + V_2)/2$ . Frequentemente mais problemático para EMI radiada.
- **Fontes Típicas:** Ruído de fontes chaveadas, transientes em linhas de potência, loops de terra.
- **Mitigação:** Filtros (LC,  $\pi$ ), indutores de modo comum (common-mode chokes), bom projeto de aterramento, isolação galvânica (optoacopladores, transformadores).

# Acoplamento Radiado - Campo Próximo (Near-Field)

Distância  $r < \lambda/(2\pi)$ , onde  $\lambda$  é o comprimento de onda.

## Acoplamento Capacitivo (Campo Elétrico Dominante):

- Ocorre entre condutores com potenciais diferentes.
- Modelado por uma capacidade mútua ( $C_m$ ).
- A corrente acoplada é proporcional à  $dV/dt$  da fonte e  $C_m$ .
- Eficaz entre circuitos de alta impedância.
- Mitigação: Blindagem (aterrada), separação física, redução de  $dV/dt$ .

## Acoplamento Indutivo (Campo Magnético Dominante):

- Ocorre entre loops de corrente.
- Modelado por uma indutância mútua ( $M$ ).
- A tensão induzida é proporcional à  $dI/dt$  da fonte,  $M$ , e área do loop da vítima.
- Eficaz entre circuitos de baixa impedância.
- Mitigação: Blindagem (magnética ou condutiva), redução da área do loop, fiação trançada (twisted pair), separação física.

# Acoplamento Radiado - Campo Distante (Far-Field)

Distância  $r > \lambda/(2\pi)$ .

- A fonte de EMI se comporta como uma antena, irradiando ondas eletromagnéticas.
- A vítima (cabo, abertura na blindagem, componente) se comporta como uma antena receptora.
- Campos elétrico ( $E$ ) e magnético ( $H$ ) são perpendiculares entre si e à direção de propagação.
- A relação entre  $E$  e  $H$  é a impedância de onda do meio ( $\eta = E/H$ ). No espaço livre,  $\eta_0 \approx 377\Omega$ .
- A intensidade do campo decai com  $1/r$ . A densidade de potência decai com  $1/r^2$ .
- **Equação da Antena (simplificada):** Tensão recebida  $V_{rec} \propto E_{inc} \cdot h_{eff}$ , onde  $h_{eff}$  é a altura efetiva da antena receptora.
- **Mitigação:** Blindagem eficaz (shielding), orientação de antenas, filtros, absorvedores de RF.

# Acoplamento Através de Aberturas e Blindagem

Blindagens metálicas são usadas para refletir ou absorver energia EM. No entanto, aberturas comprometem sua eficácia.

- **Aberturas Físicas:** Janelas, portas, juntas, fendas, furos de ventilação, conectores.
- **Mecanismo:** Campos externos induzem correntes na superfície da blindagem. Essas correntes "vazam" para dentro através das aberturas, ou a própria abertura age como uma antena (slot antenna).
- **Eficácia da Blindagem (SE - Shielding Effectiveness):** Medida em dB,  
 $SE = R + A + M$ , onde R é perda por reflexão, A é perda por absorção, M é correção por múltiplas reflexões (geralmente ignorado para metais espessos).
- **Impacto da Abertura:** A eficácia da blindagem é limitada pela maior dimensão ( $L$ ) da abertura. A atenuação de uma abertura se degrada significativamente quando  $L \approx \lambda/2$ .
- **Mitigação:** Minimizar o tamanho das aberturas, usar juntas condutivas (gaskets), guias de onda abaixo do corte (waveguides below cutoff) para ventilação, conectores blindados.

# Tipos de Interferência Eletromagnética (EMI)

Classificação baseada na localização relativa da fonte e vítima:

- **EMI Intra-sistema (Intra-system EMI):**

- Fonte e vítima estão dentro da mesma aeronave (ou sistema).
- Ex: Ruído da fonte de alimentação afetando um receptor de rádio na mesma aeronave; diafonia (crosstalk) entre cabos adjacentes.
- Controlado principalmente pelo projeto cuidadoso dos subsistemas e integração.

- **EMI Inter-sistema (Inter-system EMI):**

- Fonte está fora da aeronave, vítima está dentro (ou vice-versa).
- Ex: HIRF de um radar terrestre afetando o sistema de controle de voo; emissões da aeronave interferindo com comunicações terrestres.
- Controlado por blindagem da aeronave, filtros na interface, e limites de emissão/susceptibilidade definidos por normas (DO-160).

# Tipos de EMI (Banda Estreita vs Banda Larga)

Classificação baseada nas características espectrais da interferência:

- **EMI de Banda Estreita (Narrowband - NB):**

- A energia da EMI está concentrada em uma única frequência ou em uma faixa de frequência muito estreita.
- A largura de banda da EMI ( $BW_{EMI}$ ) é menor que a largura de banda do receptor/vítima ( $BW_{VIT}$ ).
- Fontes típicas: Osciladores, clocks, transmissores de rádio (sinais CW ou AM/FM).
- Medido em unidades como  $dB\mu V$  ou  $dBm$ .

- **EMI de Banda Larga (Broadband - BB):**

- A energia da EMI está distribuída sobre uma ampla faixa de frequências.
- $BW_{EMI} > BW_{VIT}$ .
- Fontes típicas: Fontes chaveadas, motores com escovas, descargas (ESD, raios), sinais digitais rápidos, ignição.
- Medido em unidades de densidade espectral, como  $dB\mu V/MHz$  ou  $dBm/Hz$ .

# Impacto da EMI em Sistemas Críticos

A EMI pode causar diversos efeitos indesejados:

- **Degradação de Desempenho:** Aumento da taxa de erro de bit (BER) em comunicações digitais, redução da relação sinal-ruído (SNR) em receptores analógicos, imprecisão em sensores.
- **Mau Funcionamento:** Operação incorreta, travamento (hang-up), reset espontâneo de processadores, atuação incorreta de atuadores.
- **Indicações Falsas:** Leituras errôneas em displays (altitude, velocidade, combustível), alarmes falsos.
- **Perda de Função:** Desligamento completo de um sistema.
- **Dano Físico (Casos Extremos):** Sobretensões induzidas por raios ou chapeamento podem danificar componentes.

## Exemplos de Sistemas Vulneráveis

Sistemas Fly-by-Wire, FADEC (Full Authority Digital Engine Control), GPS, ILS (Instrument Landing System), Rádios VHF/HF, Displays de Cockpit (EFIS), Piloto Automático.

# Normativas, Regulamentações e Testes

A segurança exige conformidade com padrões rigorosos.

- **Autoridades de Aviação Civil:**

- FAA (Federal Aviation Administration - EUA): Regulamentos FAR Part 23, 25, 27, 29. Advisory Circulars (ACs) sobre HIRF, raios, PEDs.
- EASA (European Union Aviation Safety Agency - Europa): Regulamentos CS-23, CS-25, etc. Certification Specifications (CS).
- ANAC (Agência Nacional de Aviação Civil - Brasil): RBAC (Regulamentos Brasileiros da Aviação Civil). Harmonizados com FAA/EASA.

# Normativas, Regulamentações e Testes

A segurança exige conformidade com padrões rigorosos.

- **Organismos de Padronização:**

- **RTCA (Radio Technical Commission for Aeronautics):** Desenvolve padrões técnicos voluntários, amplamente adotados pela FAA/EASA. **DO-160** é o principal documento de EMC.
- **EUROCAE (European Organisation for Civil Aviation Equipment):** Equivalente europeu da RTCA. Documentos ED frequentemente harmonizados com RTCA (ex: ED-14 = DO-160).
- **SAE (Society of Automotive Engineers):** Padrões ARP (Aerospace Recommended Practices) relevantes (ex: ARP5412 para raios).
- **MIL-STD (Padrões Militares - EUA):** MIL-STD-461 (EMC), MIL-STD-464 (Nível de Sistema). Requisitos geralmente mais severos.

# RTCA DO-160: O Padrão da Indústria

**Título:** Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment.

- Define um conjunto de condições ambientais mínimas (testes) e procedimentos aplicáveis a equipamentos eletrônicos embarcados.
- Usado por fabricantes para qualificar seus equipamentos e por autoridades para certificar aeronaves.
- Cobre diversos ambientes: Temperatura, Altitude, Vibração, Umidade, Choque, Fungos, e **Efeitos Eletromagnéticos**.
- Versão atual (em 2025): DO-160G (com Change 1).
- Estruturado em Seções (Sections), cada uma cobrindo um tipo de teste ambiental.
- **Categorias de Equipamento:** Para muitos testes (especialmente EMC), o fabricante declara uma categoria que indica o nível de severidade que o equipamento suporta (ex: Categoria H para HIRF, Categoria A, B, C, etc. para raios). A categoria necessária depende da localização e criticidade do equipamento na aeronave.

# RTCA DO-160: Estrutura das Seções de EMC

As seções relacionadas a EMC/EMI são cruciais:

- **Seção 15:** Efeito Magnético (Magnetic Effect) - Verifica se o equipamento afeta bússolas magnéticas.
- **Seção 16:** Entrada de Energia (Power Input) - Testa operação com variações de tensão, frequência, transientes na alimentação AC e/ou DC.
- **Seção 17:** Surto de Tensão (Voltage Spike) - Suscetibilidade a picos de tensão rápidos na alimentação.
- **Seção 18:** Suscetibilidade Conduzida em Frequência de Áudio (Audio Frequency Conducted Susceptibility – Power Inputs) - Imunidade a ruído em baixa frequência nas linhas de alimentação.
- **Seção 19:** Suscetibilidade Induzida por Sinal (Induced Signal Susceptibility) - Imunidade a sinais acoplados indutivamente nos cabos.

# RTCA DO-160: Estrutura das Seções de EMC

- **Seção 20:** Suscetibilidade a Rádio Frequência (Radio Frequency Susceptibility - Radiated and Conducted) - Imunidade a campos de RF externos (HIRF) e RF injetada nos cabos.
- **Seção 21:** Emissão de Energia em Rádio Frequência (Emission of Radio Frequency Energy) - Limita a RF radiada e conduzida pelo equipamento.
- **Seção 22:** Suscetibilidade a Transitórios de Raios (Lightning Induced Transient Susceptibility) - Imunidade a tensões/correntes induzidas por raios nos cabos.
- **Seção 23:** Efeitos Diretos de Raios (Lightning Direct Effects) - (Aplicável a equipamentos externos).
- **Seção 25:** Descarga Eletrostática (Electrostatic Discharge - ESD).

# DO-160 Seções Relevantes: Emissões (S15, S21)

Garantir que o equipamento não interfira com outros.

## Seção 15: Efeito Magnético

- Objetivo: Limitar o campo magnético DC e AC de baixa frequência gerado pelo equipamento para não afetar bússolas.
- Categorias: Y, Z, A, B, C (definem distância segura da bússola).

## Seção 21: Emissão de Energia em RF

- Objetivo: Limitar as emissões de RF (conduzidas e radiadas) para proteger receptores de rádio/navegação a bordo.
- **Emissão Conduzida:** Mede o ruído de RF nas linhas de alimentação e de sinal (150 kHz a 152 MHz). Limites em  $dB\mu V$ .
- **Emissão Radiada:** Mede o campo elétrico irradiado pelo equipamento e cablagem (100 MHz a 6 GHz). Limites em  $dB\mu V/m$  a 1 metro.
- Categorias: B, L, M, H, P, Q (definem os limites de emissão).

# DO-160 Seções Relevantes: Suscetibilidade (S17-S20, S25)

Garantir que o equipamento funcione no ambiente EME esperado.

## Seção 17 (Voltage Spike), Seção 18 (Audio Freq Cond Susc), Seção 19 (Induced Signal Susc):

- Testam a robustez a ruídos de baixa frequência, transientes e sinais acoplados nos cabos (simulando ruído de motores, diafonia, etc.).

## Seção 20: Suscetibilidade a RF (Condutida e Radiada)

- **Susc. Condutida (CS):** Injeta RF nos cabos de alimentação e sinal (10 kHz a 400 MHz). Níveis em  $V_{rms}$  ou  $mA$ .
- **Susc. Radiada (RS):** Expõe o equipamento e cabos a campos elétricos de RF (100 MHz a 18 GHz ou 40 GHz). Níveis em  $V/m$ . Simula HIRF e transmissores próximos.

# DO-160 Seções Relevantes: Suscetibilidade (S17-S20, S25)

- Categorias (ex: R, T, W, Y para RS; B, C, W, Y para CS) definem os níveis de teste.

## Seção 25: Descarga Eletrostática - ESD

- Aplica descargas eletrostáticas (contato e ar) em pontos acessíveis. Tensões até 15 kV.

# DO-160 Seções Relevantes: Raios (S22) e HIRF (S20)

Dois dos maiores desafios de EMC em aviação.

## Seção 22: Suscetibilidade a Transitórios Induzidos por Raios

- Simula os efeitos indiretos de raios (correntes/tensões induzidas nos cabos).
- Aplica formas de onda específicas (definidas em termos de  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$ , tempo de subida, duração) aos feixes de cabos (pin injection, cable bundle tests).
- Múltiplas formas de onda (Waveforms 1 a 5) representando diferentes fenômenos de acoplamento e fases da descarga atmosférica.
- Cinco níveis de teste (Level 1 a 5), com Level 5 sendo o mais severo. A escolha do nível depende da localização do equipamento e da arquitetura de proteção da aeronave.

# DO-160 Seções Relevantes: Raios (S22) e HIRF (S20)

## Seção 20: Suscetibilidade a RF Radiada (HIRF)

- A parte de Suscetibilidade Radiada (RS) da Seção 20 é usada para demonstrar conformidade com requisitos de HIRF.
- Níveis de teste podem chegar a milhares de V/m em algumas categorias militares ou para locais muito expostos. Níveis DO-160 civis típicos vão de 1 V/m a 200 V/m (com picos mais altos em algumas frequências).
- Testes realizados em câmaras anecoicas ou reverberantes.

# Testes de EMC em Aeronaves - Visão Geral

A conformidade com EMC é verificada em múltiplos níveis:

- **Nível de Equipamento (LRU - Line Replaceable Unit):**

- Testes realizados em laboratório de EMC, seguindo DO-160.
- Equipamento é testado individualmente (ou com cabos e cargas simuladas).
- Objetivo: Qualificar o equipamento para instalação na aeronave.
- Ambiente controlado (câmaras anechoicas/reverberantes, salas blindadas).

- **Nível de Sistema/Subsistema:**

- Testes de integração de múltiplos LRUs que compõem um sistema funcional (ex: sistema de navegação completo).
- Verifica a interação entre equipamentos.

# Testes de EMC em Aeronaves - Visão Geral

- **Nível de Aeronave Completa:**

- Testes realizados na aeronave finalizada.
- Objetivo: Validar a performance EMC geral, incluindo efeitos da instalação, cablagem real, estrutura da aeronave (blindagem do airframe).
- Ex: Teste HIRF em campo aberto ou câmara grande; teste de raios injetando corrente na estrutura; verificação de compatibilidade entre sistemas (ex: ligar todos os transmissores).
- Essencial, pois os testes de LRU não cobrem todos os efeitos de instalação.

# EMC em Sistemas de Comunicação (VHF, HF, SATCOM)

Sistemas de comunicação são inherentemente sensíveis e também fontes potenciais de EMI.

- **Desafios:**

- **Sensibilidade do Receptor:** Receptores são projetados para detectar sinais muito fracos (microvolts). Ruído de RF interno ou externo pode dessensibilizar o receptor (aumentar o noise floor) ou ser confundido com o sinal desejado.
- **Emissões do Transmissor:** Transmissores de alta potência (HF pode ter centenas de Watts) podem interferir com outros sistemas a bordo (harmônicos, espúrios, intermodulação).
- **Intermodulação:** Sinais de múltiplos transmissores podem se misturar em elementos não-lineares (amplificadores, ou mesmo estruturas metálicas "efeito ferrugem") criando frequências indesejadas ( $f_{IMD} = n \cdot f_1 \pm m \cdot f_2$ ).
- **Co-localização de Antenas:** Múltiplas antenas em proximidade na fuselagem requerem alta isolação para evitar acoplamento direto.

# EMC em Sistemas de Comunicação (VHF, HF, SATCOM)

## ● Considerações de EMC:

- Blindagem rigorosa de receptores e transmissores.
- Filtragem na entrada/saída de RF e linhas de alimentação.
- Planejamento cuidadoso da localização de antenas.
- Gerenciamento de frequência para evitar produtos de intermodulação problemáticos.

# Desafios de EMC em Comunicações (Exemplos)

## Dessensibilização do Receptor GPS por Harmônico de Rádio VHF:

- Frequência GPS L1: 1575.42 MHz.
- Rádios VHF COM operam entre 118 – 137 MHz.
- O 11º ou 12º harmônico de um transmissor VHF pode cair perto da frequência do GPS.
- Se o filtro do transmissor VHF não atenuar suficientemente os harmônicos, e/ou a isolação entre as antenas VHF e GPS for baixa, o receptor GPS pode ser bloqueado (jammed) ou perder o lock.

# Desafios de EMC em Comunicações (Exemplos)

## Interferência de PEDs em Rádios de Navegação/Comunicação:

- Dispositivos como laptops, telefones celulares, jogos eletrônicos possuem clocks e barramentos digitais que irradiam RF.
- Embora a potência seja baixa, a proximidade com a cablagem da aeronave ou antenas internas pode causar interferência, especialmente em receptores sensíveis (VOR, ILS, GPS).
- Justificativa para as restrições de uso de PEDs durante fases críticas do voo.

# EMC em Sistemas de Navegação (GPS, ILS, VOR)

A precisão e integridade dos dados de navegação são vitais para a segurança.

- **GPS/GNSS (Global Navigation Satellite System):**

- Sinais extremamente fracos vindos do espaço ( $\approx -125$  dBm a  $-130$  dBm).
- Altamente vulnerável a interferência (intencional - jamming/spoofing, ou não intencional - harmônicos, PEDs).
- Perda do sinal GPS pode impactar navegação, vigilância (ADS-B) e timing.

- **ILS (Instrument Landing System) e VOR (VHF Omnidirectional Range):**

- Sistemas baseados em VHF/UHF. Receptores sensíveis.
- Interferência pode causar desvios nas indicações de curso (localizer) e trajetória de planeio (glideslope) do ILS, ou erro na marcação radial do VOR.
- Fontes de interferência: Transmissores de FM comerciais (harmônicos), outros sistemas da aeronave, PEDs.

- **Requisitos de EMC:**

- Baixos níveis de emissão na banda de operação desses sistemas (DO-160 S21).
- Alta imunidade a ruído conduzido e radiado (DO-160 S20).
- Atenção especial à instalação da antena e cablagem para minimizar acoplamento.

# Vulnerabilidades de Navegação à EMI

## Exemplo: Interferência em ILS por Transmissor FM

- Frequências ILS Localizer: 108.10 – 111.95 MHz.
- Frequências ILS Glideslope: 329.15 – 335.00 MHz.
- Transmissores de Rádio FM: 88 – 108 MHz.
- Um transmissor FM operando perto de 108 MHz pode ter produtos de intermodulação ou emissões espúrias que caiam na banda do Localizer.
- Filtros inadequados na estação FM ou no receptor ILS podem levar a indicações errôneas durante a aproximação. Incidentes documentados ocorreram.

# Vulnerabilidades de Navegação à EMI

## Exemplo: Perda de GPS devido a Ruído de Laptop

- Clocks internos de laptops ou outros PEDs podem gerar harmônicos na banda L1 do GPS (1575.42 MHz).
- Se o dispositivo estiver próximo da antena GPS (mesmo dentro da cabine) e sua blindagem for inadequada, pode causar perda de sinal ou aumento do erro de posição reportado.

### Importância dos Testes

Testes rigorosos (DO-160) e boas práticas de instalação são essenciais para mitigar esses riscos.

# EMC em Sistemas de Radar (Meteorológico, TCAS)

Radares são transmissores de alta potência e receptores sensíveis operando em micro-ondas.

- **Radar Meteorológico (Weather Radar - WXR):**

- Opera tipicamente em Banda C (5.4 GHz) ou Banda X (9.3 GHz). Potência de pico de Kilowatts.
- Potencial de interferência com outros sistemas operando em micro-ondas (SATCOM, Wi-Fi).
- Suscetível a interferência de outros radares ou fontes de RF de alta potência na mesma banda.
- Ruído interno (ex: da fonte de alimentação) pode degradar a detecção de alvos fracos.

# EMC em Sistemas de Radar (Meteorológico, TCAS)

- **TCAS (Traffic Collision Avoidance System):**

- Interroga e recebe respostas de transponders de outras aeronaves em 1030 MHz e 1090 MHz.
- Transmissor de potência moderada, receptor sensível.
- Suscetível a interferência de outros sistemas operando perto de 1 GHz (ex: DME, outros transponders, sistemas militares).
- Emissões do próprio transmissor TCAS precisam ser controladas para não afetar outros sistemas.

- **Considerações de EMC:**

- Blindagem, filtragem, e layout cuidadoso do guia de ondas/linha de transmissão.
- Sincronização ou blanking (desligamento momentâneo) podem ser necessários entre sistemas de radar/transponder para evitar auto-interferência.

# Estudos de Caso: Incidentes Históricos (Exemplos)

A história da aviação tem lições importantes sobre EMC.

## Voo TWA 800 (1996) - Especulação Inicial sobre EMI

- Embora a **causa oficial** tenha sido determinada como explosão do tanque de combustível central, a investigação inicial considerou fortemente a EMI como possível gatilho (ex: falha induzida por EMI na fiação do sistema de indicação de combustível - FQIS).
- O incidente levou a um foco renovado na segurança da fiação e na análise de falhas potenciais induzidas por EMI em sistemas críticos, mesmo que **não** tenha sido a causa raiz neste caso específico.

# Estudos de Caso: Incidentes Históricos (Exemplos)

## Problemas com Piloto Automático e HIRF (Décadas de 1980-1990)

- Vários incidentes reportados de mau funcionamento do piloto automático ou sistemas de controle de voo quando aeronaves sobrevoavam transmissores de alta potência (militares, rádio/TV).
- Contribuiu significativamente para o desenvolvimento dos requisitos e testes de HIRF (DO-160 Seção 20) e para a regulamentação específica da FAA/EASA sobre HIRF.

*Nota: Muitos incidentes de EMI não são catastróficos, mas causam resets, indicações falsas ou perda temporária de função, sendo reportados como dificuldades operacionais.*

# Estudos de Caso: Interferência por PEDs

A proliferação de eletrônicos de consumo cria um desafio contínuo.

- **Relatos de Tripulações:** Existem numerosos relatos anedóticos e alguns documentados (ex: via NASA ASRS - Aviation Safety Reporting System) de tripulações observando anomalias em instrumentos (bússola, VOR, GPS, piloto automático) coincidindo com o uso de PEDs por passageiros.
- **Testes da FAA/RTCA:** Estudos realizados (ex: pela RTCA SC-202) confirmaram que certos PEDs podem emitir RF em níveis que excedem os limites de emissão da DO-160 S21 e, teoricamente, interferir com sistemas de bordo, especialmente se próximos a cablagem ou antenas.
- **Variabilidade:** O nível de emissão varia enormemente entre diferentes PEDs e modos de operação. A eficácia da blindagem da aeronave e a localização do PED também são fatores cruciais.

# Estudos de Caso: Interferência por PEDs

A proliferação de eletrônicos de consumo cria um desafio contínuo.

- **Abordagem Regulatória:** As regras atuais (FAA/EASA) permitem o uso de PEDs em modo avião (transmissores desligados) durante a maior parte do voo, mas restringem o uso durante fases críticas (pouso/decolagem) e proíbem transmissores (celular, Wi-Fi, Bluetooth) abaixo de 10.000 pés (a menos que a aeronave seja especificamente aprovada). Aeronaves com sistemas Wi-Fi/Pico-cell a bordo passaram por testes rigorosos de não-interferência.

## Desafio Contínuo

Novos dispositivos e tecnologias sem fio exigem vigilância e avaliação contínuas.

# Simulação Computacional em EMC (CEM)

Ferramentas de modelagem eletromagnética auxiliam no projeto e análise.

## • Por que Simular?

- Identificar problemas de EMC no início do ciclo de projeto (mais barato corrigir).
- Otimizar layouts de PCB, projeto de blindagens, posicionamento de cabos/antenas.
- Analisar cenários complexos ou difíceis de testar fisicamente (ex: acoplamento interno em alta frequência, efeitos de raios em estruturas complexas).
- Reduzir o número de iterações de protótipos e testes físicos.

# Simulação Computacional em EMC (CEM)

- **Métodos Numéricos Comuns:**

- **Método dos Momentos (MoM):** Bom para problemas de radiação/espalhamento envolvendo estruturas metálicas (antenas, fuselagem). Resolve equações integrais.
- **Método dos Elementos Finitos (FEM):** Bom para problemas envolvendo volumes dielétricos complexos, cavidades. Resolve equações diferenciais (Equações de Maxwell).
- **Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FD TD):** Resolve as equações de Maxwell diretamente no domínio do tempo. Versátil para banda larga, materiais complexos, transientes (raios, ESD).
- **Teoria de Linhas de Transmissão Multicondutoras (MTL):** Eficiente para análise de acoplamento em feixes de cabos longos.
- **Ferramentas de Software:** CST Studio Suite, Ansys HFSS, FEKO, EMCoS, etc.

# Benefícios e Limitações da Simulação EMC

## Benefícios:

- Análise de "what-if" rápida e de baixo custo.
- Visualização de campos E/H, correntes de superfície, parâmetros S.
- Identificação de ressonâncias e pontos "quentes" de acoplamento.
- Complementa os testes, permitindo investigar a causa raiz de falhas.
- Permite avaliar o impacto de modificações antes de implementá-las.

## Limitações e Desafios:

- **Precisão do Modelo:** "Garbage in, garbage out". Requer modelos geométricos precisos e propriedades de materiais corretas (condutividade, permissividade, permeabilidade - muitas vezes dependentes da frequência).
- **Complexidade Computacional:** Modelos detalhados de aeronaves inteiras exigem recursos computacionais significativos (memória, tempo de CPU).

# Benefícios e Limitações da Simulação EMC

- **Validação:** Os resultados da simulação devem ser validados com medições experimentais sempre que possível.
- **Expertise Necessária:** Requer conhecimento de eletromagnetismo e da ferramenta de software específica.
- Dificuldade em modelar detalhes finos (costuras, juntas, contatos não ideais) que podem ser importantes para EMC.

# Novas aeronaves: Desafios de EMC

O uso extensivo de materiais compósitos trouxe novos desafios.

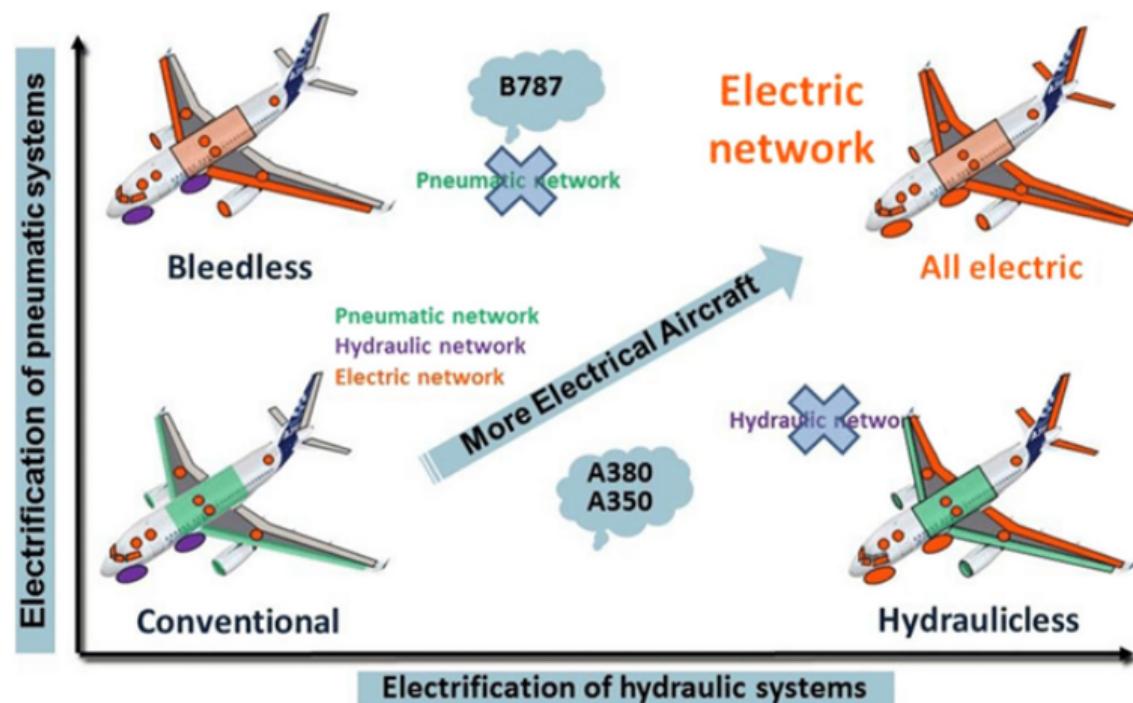
- **Estrutura Primária em Compósito (CFRP - Carbon Fiber Reinforced Polymer):**
  - Diferente das fuselagens tradicionais de alumínio, o CFRP é significativamente menos condutor.
  - **Implicação 1: Blindagem reduzida.** O efeito de "Gaiola de Faraday" natural da fuselagem metálica é menor. Maior penetração de campos externos (HIRF, raios) para o interior.
  - **Implicação 2: Retorno de Corrente.** Caminhos de retorno para correntes de modo comum e de raios são mais complexos e resistivos. Requer rede de aterramento dedicada (malhas de cobre, tiras condutivas).
  - **Implicação 3: Suscetibilidade a Raios.** Maior potencial para tensões induzidas em cabos devido à menor blindagem e maior resistência do caminho de retorno. Requer proteção robusta em nível de equipamento e cablagem.

# Novas aeronaves: Desafios de EMC

- **Sistemas Mais Elétricos:** Incorporam mais sistemas elétricos (substituindo hidráulicos/pneumáticos), aumentando a carga elétrica e o potencial de ruído de fontes chaveadas e motores.
- **Soluções de Projeto:**
  - Incorporação de malha condutora (ex: cobre expandido) na estrutura compósita ou como camada superficial.
  - Projeto cuidadoso da rede de aterramento (bonding and grounding).
  - Uso extensivo de blindagem em nível de cablagem e equipamento.
  - Requisitos de teste DO-160 mais rigorosos para equipamentos instalados em áreas de compósito.

# Aeronave Mais Elétrica (MEA - More Electric Aircraft)

Tendência na arquitetura de sistemas de aeronaves.



# O Conceito de Aeronave Mais Elétrica (MEA - More Electric Aircraft)

- **Motivação:** Redução de peso, aumento da eficiência de combustível, manutenção simplificada, maior confiabilidade, redução de emissões.
- **Princípio:** Substituir sistemas tradicionalmente hidráulicos, pneumáticos ou mecânicos por sistemas elétricos.
- **Exemplos de Sistemas Eletrificados:**
  - Atuação de superfícies de controle (substituindo hidráulica).
  - Sistema de controle ambiental (ECS - ar condicionado/pressurização elétrico).
  - Sistemas de degelo (eletrotérmicos).
  - Partida de motor elétrica.
  - Trem de pouso (atuação e freios elétricos).
- **Arquitetura de Potência:** Requer geração e distribuição de energia elétrica significativamente maior. Uso de tensões mais altas para reduzir corrente e peso da fiação.

# Implicações de EMC/EMI em Aeronaves Mais Elétricas (MEA)

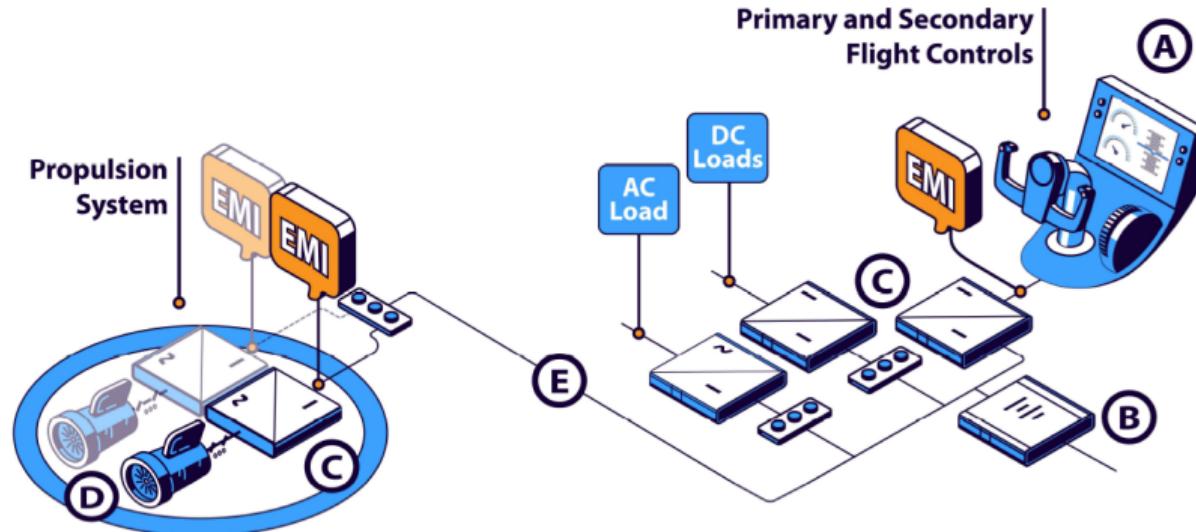


Figura: \*

- A) Avionics, B) Batteries, C) Converters, D) Electric Motors, E) EWIS.

# Implicações de EMC/EMI em Aeronaves Mais Elétricas (MEA)

Maior eletrificação intensifica os desafios de EMC.

- **Aumento do Ruído Conduzido e Radiado:**

- Proliferação de eletrônica de potência: Conversores DC/DC, AC/DC, inversores DC/AC, controladores de motor baseados em PWM (Pulse Width Modulation).
- Chaveamento de alta potência gera ruído de modo comum e diferencial significativo em uma ampla faixa de frequência.
- Harmônicos da frequência de chaveamento e transientes rápidos ( $dV/dt$ ,  $di/dt$ ) são fontes potentes de EMI.

- **Desafios na Qualidade da Energia (Power Quality):**

- Cargas variáveis e chaveadas podem introduzir distorção harmônica, flutuações de tensão e transientes na rede elétrica da aeronave.
- Requisitos mais rigorosos para a imunidade dos equipamentos (DO-160 S16, S17, S18) e para o controle de emissões conduzidas (DO-160 S21).

# Implicações de EMC/EMI em Aeronaves Mais Elétricas (MEA)

- **Acoplamento em Cablagem de Alta Potência:**

- Cabos transportando alta corrente podem gerar campos magnéticos intensos, acoplando indutivamente em cabos de sinal próximos.
- Requer atenção especial ao roteamento, separação e blindagem de cabos de potência vs sinal.

- **Necessidade de Técnicas Avançadas de Mitigação:** Filtragem mais robusta, blindagem eficaz, projeto cuidadoso de aterrramento, layout otimizado de PCBs de potência.

# Tendências Futuras

## Tendências Futuras e Desafios:

- **Aumento da Conectividade:** Mais sistemas sem fio a bordo (Wi-Fi, 5G, SATCOM) aumentam a complexidade espectral.
- **Veículos Aéreos Não Tripulados (UAVs/Drones):** Requisitos de EMC específicos para operação segura, especialmente em espaço aéreo compartilhado. Comando e controle robustos.
- **Eletrificação Contínua (Rumo à Aviação Híbrida/Elétrica):** Desafios de EMC exponenciais com sistemas de propulsão e armazenamento de energia de altíssima potência.
- **Novos Materiais e Tecnologias de Semicondutores:** Impacto de materiais avançados e dispositivos de comutação mais rápidos (GaN, SiC) no perfil de EMI.
- **Cibersegurança e EMI:** Intersecção crescente, onde a EMI pode ser usada como vetor de ataque ou a vulnerabilidade a EMI pode ser explorada.

# Tendências Futuras

## EMC em Sistemas Emergentes: UAVs (Unmanned Aerial Vehicle) e eVTOLs (electric Vertical Take-Off and Landing)

Novas plataformas aéreas intensificam e introduzem desafios de EMC.

### UAVs / Drones:

- **Vulnerabilidade Crítica:** Link de Comando & Controle (C2) e GPS/GNSS sensíveis a EMI e jamming. Perda de link/navegação é catastrófica.
- **Sensores:** Interferência em sensores essenciais (LiDAR, câmeras, etc.).
- **Miniaturização:** Limitações de espaço/peso para blindagem e filtros.
- **Enxames (Swarms):** Potencial de interferência mútua entre drones próximos.
- **Certificação:** Normas de EMC específicas em desenvolvimento para operação segura (BVLOS, UAM).

# Tendências Futuras

**eVTOLs (Mobilidade Aérea Urbana - UAM (Urban Air Mobility)/AAM(Advanced Air Mobility)):**

- **Amplificação dos Desafios MEA:** Múltiplos motores elétricos (ruído distribuído), baterias de alta tensão (EMC do BMS), conversores de alta potência.
- **Ambiente Urbano Hostil:** EME complexo (reflexões, 5G/6G), HIRF.
- **Infraestrutura:** EMC associada a vertiports e sistemas de carregamento de alta potência.
- **Comunicações Densas:** Coexistência com redes de comunicação terrestres e aéreas.
- **Fly-by-Wire Extensivo:** Alta criticidade dos sistemas de controle de voo elétricos.

# Técnicas de Projeto e Mitigação: Blindagem e Aterramento

Pilares fundamentais do controle de EMI.

## Blindagem (Shielding):

- Objetivo: Confinar campos EM dentro de um invólucro (controle de emissões) ou impedir que campos externos penetrem (controle de suscetibilidade).
- Materiais: Metais condutores (Alumínio, Cobre, Aço). Compósitos com malha condutora.
- Mecanismos: Reflexão (dominante em baixa frequência e para campos E) e Absorção (dominante em alta frequência).
- Eficácia (SE) depende da frequência, material (condutividade  $\sigma$ , permeabilidade  $\mu$ ), espessura, e **integridade** (sem aberturas!).
- Aplicação: Caixas de equipamentos, cabos blindados, conectores blindados, fuselagem.

# Técnicas de Projeto e Mitigação: Blindagem e Aterramento

- **Cabos Blindados:** Reduzem acoplamento radiado (emissão e suscetibilidade). A eficácia depende da cobertura da malha (>90%), e terminação adequada da blindagem (geralmente 360° no conector).

## Aterramento (Grounding):

- Objetivo: Fornecer um caminho de baixa impedância para correntes de falha, de retorno de sinal, e de ruído (EMI). Estabelecer um potencial de referência comum.
- Tipos em Aviação: Aterramento de segurança, aterramento de sinal, aterramento de RF/blindagem.
- Desafios: Impedância do terra não é zero, especialmente em altas frequências ( $Z_{gnd} = R + j\omega L$ ). Loops de terra podem introduzir ruído.
- Boas Práticas: Caminhos de terra curtos e largos (baixa indutância), ponto único de terra (para baixa frequência) ou multiponto/plano de terra (para alta frequência), tratamento de superfícies para baixa resistência de contato (bonding).

# Técnicas de Mitigação: Filtragem, Layout, Cablagem

Controle de EMI na fonte, no caminho e na vítima.

## Filtragem (Filtering):

- Objetivo: Atenuar ruído em frequências indesejadas, permitindo a passagem do sinal/energia desejado.
- Tipos Comuns: Filtros Passa-Baixa (LPF), Passa-Alta (HPF), Passa-Banda (BPF). Indutores de modo comum. Capacitores de desacoplamento (bypass). Ferrites.
- Aplicação: Linhas de alimentação (entrada/saída de LRUs), linhas de sinal, conectores com filtro.
- Seleção: Frequência de corte, atenuação desejada, impedância da fonte/carga, corrente/tensão nominal.

# Técnicas de Mitigação: Filtragem, Layout, Cablagem

## Layout de PCB (Printed Circuit Board):

- Minimizar área de loops de corrente (reduz acoplamento indutivo e emissão magnética).
- Usar planos de terra/alimentação sólidos (baixa impedância).
- Segregação de circuitos (análogo vs digital, alta potência vs baixo nível).
- Roteamento cuidadoso de trilhas (evitar paralelismo longo, controlar impedância).
- Posicionamento de capacitores de desacoplamento perto dos Cls.

## Gestão de Cablagem:

- Segregação de feixes de cabos (potência vs sinal, sensível vs ruidoso).
- Uso de cabos blindados e/ou pares trançados (twisted pairs).
- Roteamento longe de fontes de ruído e aberturas na estrutura.
- Terminação correta das blindagens dos cabos.
- Minimizar comprimento dos cabos.

- EMC é um aspecto **crítico e não negociável** da segurança e confiabilidade da aviação.
- O ambiente EME da aeronave é complexo, com múltiplas fontes internas e externas (HIRF, Raios, PEDs sendo desafios chave).
- Compreender os mecanismos de acoplamento (conduzido, radiado) é fundamental para o projeto e mitigação.
- A conformidade com normas como RTCA DO-160, verificada por testes rigorosos em nível de equipamento e aeronave, é obrigatória.
- Técnicas de projeto (blindagem, aterramento, filtragem, layout, cablagem) são essenciais para alcançar a conformidade.
- Tendências como MEA e uso de compósitos introduzem novos desafios de EMC.