
ESTUDO DOS NÍVEIS DE RADIOFREQUÊNCIA NA FAIXA CELULAR, NO INTERIOR DE UMA FUSELAGEM SIMULADA

Caio E. L. Neves*

Mário Leite Pereira Filho**

Júlio Carlos Teixeira***

Plínio F. dos Santos Rodrigues****

Resumo

A proibição do uso de telefones celulares no interior de aeronaves é assunto de debate na comunidade aeronáutica. Suspeita-se que as transmissões de telefones celulares no interior da fuselagem venham a causar interferência nos equipamentos de bordo, comprometendo a segurança do voo. Este trabalho tem o objetivo de verificar experimentalmente as variações de energia de um sinal de radiofrequência (RF) no interior de um modelo de fuselagem por meio da simulação de um telefone celular transmitindo em seu interior, e comparar quantitativamente os valores obtidos com os níveis de imunidade estipulados para aviônicos utilizados em aeronaves civis.

Palavras-chave: Telefone celular, interferência em equipamentos, segurança de voo.

* Faculdade de Engenharia São Paulo (Fesp). *E-mail:* caio_in@hotmail.com

** Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT). *E-mail:* mleite@ipt.br

*** Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT). *E-mail:* teixeira@ipt.br

**** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP) e Faculdade de Engenharia São Paulo (Fesp). *E-mail:* plinio@lcs.poli.usp.br

Abstract

The forbidding use of cellular phones in Airplanes have been a subject of discussion in aeronautic community. There are some suspicions related with aircraft fuselage equipment interference during the flight, due to cellular phone connections compromising the flight security. This work deals to experimental tests to evaluate the energy radio frequency (RF) signs variations in the inner of a modeled fuselage of a simulated cellular phone transmission in the same fuselage. This signs are compared quantitatively with the immunity levels adopted to civil aircraft avionics.

Keywords: Cellular phones, equipment interference, flight security.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente existe um debate na comunidade aeronáutica sobre a proibição da utilização de telefones celulares no interior de aeronaves, pois suspeita-se que suas transmissões venham a causar interferência nos equipamentos de bordo, comprometendo a segurança do voo (FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION, 2000). Essas suspeitas se baseiam no fato de as aeronaves comerciais serem construídas em sua maior parte como uma estrutura metálica. Assim, emissões de radiofrequência (RF) irradiadas em seu interior sofreriam reflexão e espalhamento e poderiam ocasionar pontos de concentração de energia capazes de atingir níveis elevados, de acordo com a potência do sinal irradiado. Além disso, a fuselagem também proporcionaria a propagação orientada dos sinais de RF, gerando ondas estacionárias em seu interior (PERRY; GEPPERT, 1996; AIR SAFETY GROUP, 2004). No caso dos telefones celulares, a potência do sinal transmitido varia em função da quantidade de tráfego e da qualidade da ligação (*link*) com a estação rádio-base (ERB). A potência de transmissão de um telefone celular em um *link* de boa qualidade com uma ERB é da ordem de miliwatts. Entretanto, em voo, a intensidade do sinal de *link* é fraco por causa da distância para as ERBs e pela blindagem da fuselagem. Dessa forma, a potência de transmissão do aparelho tende a aumentar sensivelmente, podendo atingir até 2 watts (CIVIL AVIATION AUTHORITY, 2000). Nessa condição, sinais de *link* podem contribuir para o surgimento de ondas estacionárias e pontos de concentração de energia no interior da fuselagem que poderiam exceder os limites de imunidade estipulados para aviônicos utilizados em aeronaves civis. Há também quilômetros de fios e cabos dos diversos sistemas eletrônicos da aeronave que ficariam expostos a níveis de campos potencialmente elevados.

A RTCA DO-160 (RADIO TECHNICAL COMMISSION FOR AERONAUTICAL, 1997) é uma das normas utilizadas como referência no setor aeronáutico, estipulando os limites de imunidade a campos irradiados para aviônicos utilizados em aeronaves civis. Essa norma vem tendo seus limites de imunidade a campos irradiados progressivamente aumentados, considerando principalmente que as interferências são geradas externamente à aeronave. Como relatos de suspeitas de interferência nos equipamentos de bordo das aeronaves são cada vez mais comuns, existe a necessidade de melhor entendimento dos fenômenos gerados pela utilização de telefones celulares no interior de aeronaves (CIVIL AVIATION AUTHORITY, 2003).

2 OBJETIVO

Este trabalho tem o objetivo de verificar experimentalmente as variações de energia de um sinal de RF no interior de um modelo de fuselagem através da simulação de um telefone celular transmitindo em seu interior, e comparar quantitativamente os valores obtidos com os níveis de imunidade para aviônicos especificados pela norma RTCA DO-160 D.

3 MATERIAIS

Como modelo de fuselagem, foi utilizado um duto metálico de paredes corrugadas usado em sistemas de ventilação industrial com 1,5 m de diâmetro e 18 m de comprimento (Figura 1), do Laboratório de Vazão do Agrupamento de Metrologia de Fluidos do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT).



Figura 1 Vista frontal do duto de ventilação.

Para a realização das medidas e determinação dos parâmetros do sistema, utilizaram-se: antenas do tipo monopolo banda larga, analisadores de espectro (Hewlett Packard HP8594E e Rohde&Schwarz FSP30), uma ponte Standing Wave Ratio (SWR) Rohde&Schwarz ZRC, uma antena dipolo log-periódica Rohde&Schwarz HL223, cabos coaxiais e tripés específicos para medidas de compatibilidade eletromagnética.

4 MÉTODOS

Para gerar o sinal irradiado no interior do duto, foi utilizado o analisador de espectro HP8594E, gerando um sinal do tipo *continuous wave* (CW), com frequência de 900 MHz e potência nominal de 2,75 dBm. Utilizaram-se duas antenas do tipo monopolo banda larga, usadas em equipamentos de comunicação móvel, com 15 cm de comprimento. A antena transmissora foi fixada a um suporte de madeira e posicionada em uma das extremidades do duto, situada a 3 m de uma das extremidades, de forma que a metade do comprimento físico da antena na polarização vertical coincidissem com o eixo longitudinal do duto. Para a antena receptora, construiu-se uma estrutura suporte de madeira que possibilitava as medidas no eixo longitudinal e também em pontos da seção transversal do duto. Esta possuía 49 pontos para fixação da antena receptora, distribuídos simetricamente, formando seis círculos concêntricos, cujos raios aumentavam em passos de $\frac{1}{4} \lambda$ do sinal transmitido (8,33 cm), demarcados nas posições: 0°, 90°, 180° e 270° (Figura 2).



Figura 2 Estrutura de suporte da antena receptora.

Inicialmente, a antena receptora foi posicionada no ponto de medida central da estrutura, na polarização vertical, coincidindo com o eixo longitudinal do duto, e afastada 3,33 m (10λ) da antena transmissora com o analisador de espectro posicionado do lado externo. Foram medidos os níveis de campo no interior do duto de forma a mapear 4 planos transversais consecutivos, espaçados de $\frac{1}{4} \lambda$ e tomados a partir de 3,33 m (10λ), e 4 planos a partir de 6,66 m (20λ), perfazendo um total de 392 pontos medidos.

Também foram realizadas medidas apenas no eixo longitudinal do duto a cada $\frac{1}{4} \lambda$, a partir de 3,33 m (10λ) até 8,80 m (27λ), totalizando 66 pontos medidos. As medidas realizadas foram normalizadas em relação ao nível de potência medido no ponto do eixo longitudinal do duto situado a 3,33 m da fonte transmissora (Figura 3).



Figura 3 Antena transmissora posicionada no interior do duto.

A norma RTCA DO-160D especifica os limites de imunidade a campos irradiados em valores de intensidade de campo elétrico (E), expressos em volts por metro (V/m).

Como as medidas realizadas no duto foram expressas em dBm, foi necessária a conversão destas para o mesmo sistema de unidades da norma para fins de comparação. Para melhorar a precisão do modelo, determinaram-se os seguintes parâmetros do sistema de medição: ganho das antenas, perdas por reflexão, coeficiente de reflexão e atenuação dos cabos utilizados.

Por meio do analisador de espectro FSP30, foram determinadas as curvas de resposta em frequência dos cabos coaxiais e obtidos os valores de atenuação na frequência

de 900 MHz. As perdas por reflexão das antenas foram determinadas utilizando uma ponte SWR conectada ao analisador de espectro. O módulo do coeficiente de reflexão das antenas (R) foi determinado por:

$$|R| = 10^{-0,05 \cdot |a|} \quad (1)$$

onde o parâmetro “ a ” é a perda por reflexão da antena.

Para cálculo do ganho das antenas, utilizou-se a técnica do ganho absoluto (BALANIS, 1997; KRAUSS; FLEISCH, 1999), usando uma antena log-periódica de parâmetros conhecidos como antena transmissora. Como antena receptora, utilizaram-se duas antenas monopolo, situadas a 3 m de distância, em campo aberto e posicionadas sobre um tripé de madeira. O sinal transmitido pela antena log-periódica foi gerado pelo analisador de espectro HP8594E na frequência de 900 MHz e potência nominal de 2,75 dBm (P_{trans}). Como a antena log-periódica possui a mesma impedância dos cabos utilizados (50 ohms), foram desprezadas as perdas por reflexão do sinal incidente, considerando apenas a atenuação dos cabos (A_{trans}). Assim, os valores de potência irradiados incidentes nas antenas receptoras foram dados por:

$$P_{trans}' = (P_{trans} - A_{trans}) \quad (2)$$

Considerando as perdas do sistema de medição de ganho, o valor para a potência recebida pelas antenas foi dado por:

$$P_{receb}' = P_{receb} - A_{recep1} - [10 \cdot \log(1 - |R|^2)] \quad (3)$$

onde $1 - |R|^2$ é o percentual do sinal incidente entregue pela antena ao cabo ligado à entrada do analisador de espectro.

O ganho das antenas foi determinado por:

$$G_t + G_r = 20 \log(4 \cdot \pi \cdot r / \lambda) + 10 \cdot \log(P_r / P_t) \quad (4)$$

onde G_t é o ganho da antena transmissora; G_r , o ganho da antena receptora (dB); r , a distância entre as antenas (m); λ , o comprimento de onda do sinal transmitido (m); P_r , a potência recebida (W); e P_t , a potência transmitida (W).

A partir do ganho das antenas, foi possível calcular a área efetiva (A_e) de cada uma das antenas:

$$A_e = (\lambda^2 / 4 \cdot \pi) \cdot D_o \quad (5)$$

onde D_o é a máxima diretividade da antena.

Como as antenas eram omnidirecionais, a máxima diretividade foi considerada como o valor numérico do ganho absoluto das antenas. A potência irradiada no interior do duto (P_{trans}'') foi calculada considerando-se as perdas nos cabos e o valor de ganho numérico da antena transmissora:

$$P_{trans}'' = P_{trans}' \cdot G_t \quad (6)$$

Para estabelecer uma relação entre o nível de potência irradiado e medido no interior do duto com a potência dos sinais transmitidos por telefones celulares, foi necessário determinar uma constante de proporcionalidade entre esses níveis. Selecionou-se a potência de 1,8 W, nível de potência alcançado por telefones que operam na faixa de 900 MHz em condições de *link* fraco com uma ERB. Supondo serem lineares os parâmetros entre a potência real irradiada no interior do duto, expressa em Watts, e os valores de potência de telefones celulares, foi calculada uma constante de proporcionalidade (K) através da razão entre a potência de 1,8 W e a potência de transmissão irradiada no interior do duto:

$$K = 1,8 (W) / P_{trans}''(W) \quad (7)$$

Com as medidas de potência efetuadas no interior do duto em watts e considerando as perdas do sistema, estas foram multiplicadas pela constante K e os valores obtidos ($Preceb''$) representam teoricamente os níveis de potência medidos no interior do duto, caso o sinal irradiado possuísse potência de 1,8 W e multiplicados por K, para valores expressos de intensidade de campo elétrico expressos em volts por metro, foi determinado o valor da densidade de potência incidente (W_i) na antena receptora através da equação:

$$W_i = Preceb'' / A_e \quad (8)$$

Assim, os valores de intensidade de campo elétrico foram determinados através de:

$$E = (W_i \cdot 2 \cdot n)^{1/2} \quad (9)$$

onde “n” é a impedância intrínseca do meio ($120 \cdot \pi$ ohms para o espaço livre como meio), considerando que a condição de campo distante é $2L^2/\lambda$.

Para fins de comparação entre os níveis de campo irradiado em um ambiente metálico fechado e níveis de potência na situação de campo aberto, foram realizadas medidas na quadra de esportes do IPT. Foi irradiado um sinal idêntico ao gerado no interior do duto, com as mesmas antenas monopolo para transmissão e recepção do sinal. As antenas transmissora e receptora foram fixadas a 0,75 m de altura do piso, e

demarcaram-se pontos de medição a partir de 3,33 m (10λ) espaçados a cada $\frac{1}{4}\lambda$ até 8,80 m (27λ), totalizando 66 pontos. Durante as medidas, posicionou-se o analisador de espectro o mais distante possível das antenas, e os valores foram normalizados em relação ao primeiro ponto situado a 3,33 m da fonte transmissora. Aos valores medidos em campo aberto, foi dado o mesmo tratamento matemático aplicado aos valores medidos no interior do duto.

5 RESULTADOS

Com todos os valores medidos expressos em V/m e supondo uma potência de transmissão de 1,8 W, foram traçadas curvas de intensidade de campo elétrico ao longo do eixo longitudinal do duto e em campo aberto (Figura 4). A Tabela 1 apresenta os maiores valores de intensidade de campo medidos e as respectivas distâncias da antena transmissora ao longo do eixo longitudinal do duto.

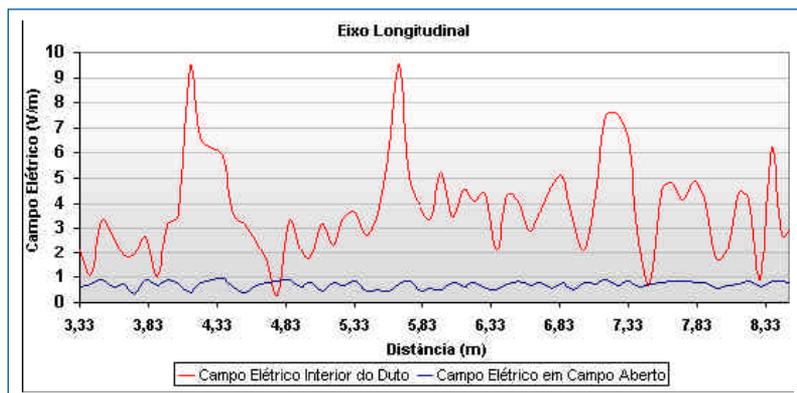


Figura 4 Medidas de campo elétrico no eixo longitudinal do duto e em campo aberto.

TABELA 1

Intensidade de campo elétrico (V/m)

| Distância (m) | E (V/m) | Distância (m) | E (V/m) |
|---------------|---------|---------------|---------|
| 5,65 | 9,53 | 8,37 | 6,25 |
| 4,13 | 9,43 | 8,77 | 6,13 |
| 7,25 | 7,56 | 6,85 | 6,02 |

Para a visualização da distribuição de campo nas seções transversais do duto, elaboraram-se rotinas de cálculo com o auxílio do programa Matlab® para a interpolação bidimensional entre os pontos e elaboração dos gráficos. Na Figura 5, são apresentadas as distribuições de campo nos planos transversais, onde os planos de 1 a 4 representam a distribuição de campo calculadas a partir de 3,33 m (10λ) da antena transmissora e espaçados de $\frac{1}{4} \lambda$ (8,3 cm). Os planos de 5 a 8 representam as distribuições de campo calculadas a partir de 6,66 m (20λ) espaçados de $\frac{1}{4} \lambda$ (8,3 cm). A Tabela 2 apresenta os maiores valores de intensidade de campo encontrados em cada um dos planos transversais.

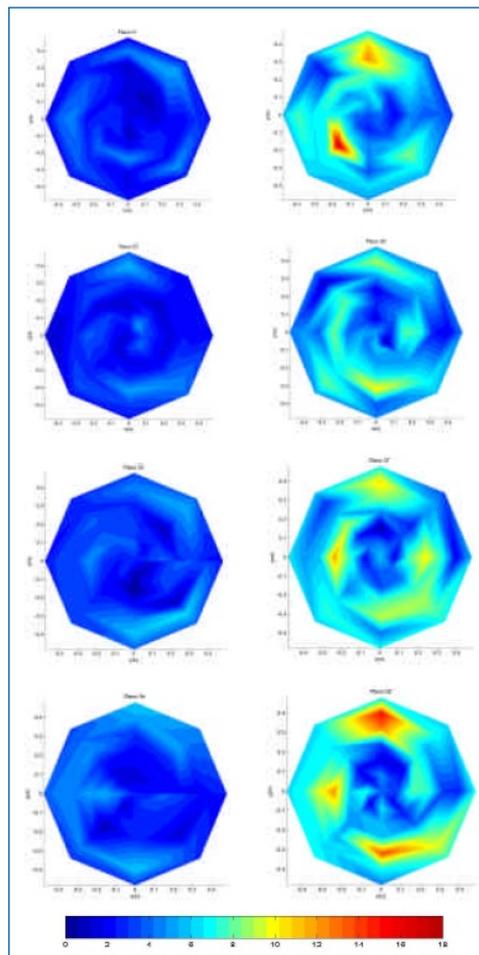


Figura 5 Distribuição de campo elétrico nos planos transversais (V/m).

TABELA 2

Intensidade de campo elétrico (V/m)

| Plano | E (V/m) | Plano | E (V/m) |
|-------|---------|-------|---------|
| 1 | 5,21 | 5 | 15,42 |
| 2 | 4,33 | 6 | 9,99 |
| 3 | 5,27 | 7 | 11,38 |
| 4 | 6,12 | 8 | 13,74 |

6 CONCLUSÃO

A partir das representações gráficas da intensidade de campo medida no interior do duto, é possível observar alguns fenômenos relativos à propagação de sinais de RF quando irradiados em ambientes metálicos fechados, tais como reflexão, espalhamento, ondas estacionárias e pontos de concentração de energia. Durante a realização das medidas, verificou-se o quanto é crítica a precisão geométrica na localização dos pontos no interior do duto, pois mínimas variações no ponto de medição resultavam em variações significativas nos níveis de energia medidos. As variações bruscas na intensidade do sinal ao longo do duto decorrem do fenômeno conhecido como *fading* (BERTONNI, 2000), em que as variações da intensidade do sinal são ocasionadas pelas reflexões do sinal irradiado nas paredes metálicas do duto e chegam à antena receptora através de diversos caminhos. Nos pontos onde a resultante dos sinais irradiado e refletido é construtiva, existe um ganho no nível do sinal irradiado; nos pontos onde a resultante é destrutiva, ocorre a atenuação do sinal. Observa-se também um padrão de repetição nos picos de energia indicando o surgimento de ondas estacionárias com pontos ultrapassando os 9 V/m de intensidade de campo. Quando se comparam os resultados obtidos no interior do duto com os valores obtidos em campo aberto, é claramente observável a influência das reflexões do sinal no interior do ambiente metálico fechado, pois, em campo aberto, os picos obtidos não atingem nem 1 V/m de intensidade.

Nos planos transversais, também é possível observar os efeitos de *fading*. Estes apresentam variações bruscas na distribuição de campo em um mesmo plano e em planos situados a distâncias múltiplas da fonte transmissora. Nos planos 5 e 8 (à direita da Figura 5) distantes 20λ e $20 + 3/4\lambda$ da antena transmissora, observam-se grandes variações de intensidade de campo quando comparados com os campos 1 e 4 (à esquerda da Figura 5), situados a 10λ e $10 + 3/4\lambda$, respectivamente. Nos planos situados a partir de 20λ (5, 6, 7 e 8), são observados pontos de intensidade de campo superando os 10 V/m com pico de 15 V/m.

Através das curvas e dos planos de distribuição de intensidade de campo, é possível constatar que sinais de RF de potências relativamente baixas, quando irradiados em ambientes metálicos fechados, podem apresentar ganhos relativamente elevados de concentração de energia em determinadas regiões. Com base nisso, as autoridades aeronáuticas justificam a proibição do uso de telefones celulares no interior de aeronaves em qualquer fase do voo.

As medidas e os cálculos realizados foram uma tentativa de relacionar quantitativamente as medidas efetuadas a valores de potência que poderiam ser obtidos caso fosse utilizada uma fonte de sinal capaz de gerar sinais de RF com valores de potências típicos das transmissões de telefones celulares. Quando se comparam os valores de campo obtidos no trabalho com valores de imunidade a campos irradiados especificados pela norma RTCA/DO-160D, observa-se que os maiores valores obtidos excedem ou ficam relativamente próximos aos limites de imunidade de algumas classes de equipamentos. Por exemplo, a norma estipula o limite de imunidade para equipamentos “parcialmente protegidos” (classe U) em 20 V/m e para equipamentos supostamente “protegidos” (classe T) em 5 V/m. A cada nova versão da RTCA/DO-160, os limites mínimos de imunidade a campos elétricos são progressivamente aumentados, mas com foco nos campos irradiados externamente à aeronave. Além disso, aviônicos e aeronaves fabricados antes de julho de 1997, data da última versão da norma RTCA/DO-160, estavam em conformidade com limites de imunidade de versões anteriores da RTCA/DO-160 (A, B ou C), ou seja, menos severos que os especificados pela versão atual. Quando analisamos os valores obtidos neste trabalho, verificamos que, para um sinal transmitido com potência de 1,8 W, é possível exceder alguns dos limites especificados para equipamentos classificados com “severamente expostos” (classe Z) nas versões inicial, A e B da norma RTCA/DO-160, anteriores a 1984.

Atualmente diversos operadores de aeronaves, inclusive no Brasil, utilizam tanto aeronaves novas quanto aviões com mais de 25 anos de uso. Com base nos resultados obtidos neste trabalho e em outros trabalhos pesquisados, parece prudente, por razões de segurança, a postura atual empregada pelas autoridades aeronáuticas quanto à restrição da utilização de telefones celulares ou de qualquer outro tipo de transmissor intencional no interior de aeronaves em todas as etapas do voo.

REFERÊNCIAS

AIR SAFETY GROUP. Celular a bordo: proibir ou restringir? A expectativa de mudanças na legislação e a posição atual do DAC. Disponível em: <<http://www.airsafetygroup.com.br>>. Acesso em: 29 set. 2004.

- BALANIS, C. A. *Antenna theory: analysis and design*. New York: John Wiley & Sons, 1997.
- BERTONI, H. L. *Radio propagation for modern wireless systems*. New Jersey: Prentice Hall, 2000.
- CIVIL AVIATION AUTHORITY. *Interference levels in aircraft at radio frequencies used by portable telephones*. London: Civil Aviation Authority, May 2000.
- _____. *CAA Paper 2003/3: effects of interference from cellular telephones on aircraft avionic equipment*. London: Civil Aviation Authority, 2003.
- FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. Use of portable electronic devices aboard aircraft. Circular AC nº 91.21-1A, 10 Feb. 2000.
- KRAUSS, J. D.; FLEISCH, D. A. *Electromagnetics: with applications*. 2. ed. Singapore: Mac-Graw-Hill Book, 1999.
- PERRY, T. S.; GEPPERT, L. Do portable electronics endanger the flight? *IEEE Spectrum*, v. 16, issue 9, p. 29-33, Sept. 1996.
- RADIO TECHNICAL COMMISSION FOR AERONAUTICAL. *RTCA/DO-160D*. Environmental conditions and test procedures for airborne equipment. USA: Radio Technical Commission for Aeronautical, July 1997.