

# Simulação de Enlaces de Dados Aeronáuticos

Marcondes Azevedo Matos, Waldecir João Perrella e Marcelo da Silva Pinho

**Resumo**— Neste artigo é apresentada uma comparação entre alguns enlaces de dados aeronáuticos. Nele é proposto um modelo para simulação do canal aeronáutico. Também são apresentados vários cenários típicos de vôo como rota, pouso, decolagem, táxi e estacionamento. Finalmente, é obtido o desempenho de um enlace de dados aeronáutico nos vários cenários propostos.

**Palavras-Chave**— Enlaces de dados aeronáuticos, modelagem de canal, simulação de sistemas de comunicação.

**Abstract**— In this article a comparison between some aeronautical datalinks is shown. An aeronautical channel model for simulation is proposed. Some typical scenarios as en-route, takeoff, landing, taxi and parking are shown. Finally, the performance of an aeronautical datalink is obtained.

**Keywords**— Aeronautical datalink, channel modeling, communication systems simulation.

## I. INTRODUÇÃO

Devido a atual demanda e crescimento do tráfego aéreo mundial, a ICAO (International Civil Aviation Organization) propôs novos padrões de enlaces de dados para substituição do atual sistema. Este trabalho tem como objetivo a simulação de um enlace de dados aeronáutico VDL (VHF Digital Link) proposto pela ICAO em vários cenários típicos de vôo.

O artigo é dividido da seguinte forma: Na seção II será mostrada uma comparação entre alguns enlaces de dados aeronáuticos atuais e em desenvolvimento. Na seção III será proposto um modelo de canal aeronáutico com desvanecimento multipercurso para simulação dos enlaces de dados. Na seção IV serão apresentados vários cenários típicos de um vôo baseados em resultados de medições já publicadas ou valores empíricos. Finalmente, os resultados do desempenho do enlace de dados nos diversos cenários serão mostrados na seção V e as conclusões na seção VI.

## II. ENLACES DE DADOS AERONÁUTICOS

No início da aviação comercial, por volta da década de 30, as comunicações entre o controle de tráfego aéreo e as aeronaves eram feitas exclusivamente por meio de voz utilizando rádios nas faixas de LF, MF e HF. A faixa de VHF só foi utilizada a partir da II Guerra Mundial [1], [2].

Atualmente, os meios físicos utilizados para comunicação aeronáutica são os seguintes [3], [4], [5]:

- HF;

- SATCOM;
- VHF;
- Datalink Modo S (Apenas vigilância);

A faixa de HF é utilizada para comunicações de longa distância (acima de 280 km). Possui cobertura global e baixo custo porém apresenta baixa confiabilidade. A faixa de frequências utilizada vai de 2,85 MHz à 22 MHz. Cada canal possui uma banda de 2,4 kHz. Utiliza a modulação AM-SSB (Amplitude Modulation - Single Side Band) para enlaces analógicos e MPSK (M-ary Phase Shift Keying) para enlaces digitais ( $M = 2, 4$  ou  $8$ ), com taxas de transmissão de 300 a 1800 bps.

A comunicação via satélite (SATCOM) também é utilizada para comunicações de longa distância. Possui cobertura quase global (exceto nos pólos) e boa confiabilidade porém apresenta um alto custo. Utiliza a rede de satélites geo-estacionários Imarsat. Utiliza as modulações QPSK (Quadrature Phase Shift Keying), BPSK (Binary Phase Shift Keying) e MPSK, com taxas de transmissão de 8,4 a 21 kbps.

A faixa de VHF é utilizada para comunicações de curta distância (até 280 km). A faixa de frequências utilizadas vai de 118 MHz a 137 MHz. Cada canal possui uma banda de 25 kHz. Utiliza a modulação AM-DSB (Amplitude Modulation - Double Side Band) para enlaces analógicos e AM-MSK (Amplitude Modulated - Minimum Shift Keying), D8PSK (Differentially encoded 8 Phase Shift Keying) e GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying) para enlaces digitais, com taxas de transmissão de 2400 a 31500 bps.

Atualmente o Datalink Modo S é utilizado apenas para vigilância. Utiliza frequências na faixa de 1 GHz, com taxas de até 4 Mbps.

Os primeiros enlaces de dados foram implantados na década de 60 e em 1976 foi implementado o ACARS (Aircraft Communications Addressing and Reporting System) que ainda funciona nos dias de hoje [3].

O ACARS tem sido o principal suporte para as comunicações de dados ar/terra. Porém, devido a atual demanda e crescimento do tráfego aéreo mundial, a capacidade do ACARS está quase esgotada em algumas regiões. Além disso, o ACARS não é adequado para comunicações de dados críticos de controle de tráfego aéreo.

Dessa forma a ICAO especificou a família de enlaces digitais em VHF para substituir o ACARS e suportar a próxima geração de serviços de dados de controle de tráfego aéreo.

Há quatro modos de VDL (VHF Digital Link). O modo 1 é um pequeno aprimoramento sobre o ACARS sendo que

---

Marcondes Azevedo Matos, Waldecir João Perrella e Marcelo da Silva Pinho  
Departamento de Eletrônica e Computação, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, Brasil.  
E-mails: marcondesmatos@bigfoot.com, waldecir@ele.ita.br, mpinho@ele.ita.br.

oferece uma comunicação orientada a bit do que orientada a caractere.

O VDL modo 2 embora muito similar ao modo 1 tem melhoras significativas com relação ao ACARS pois utiliza uma modulação com um melhor desempenho.

O VDL modo 3 utiliza a mesma modulação do VDL modo 2 mas introduz o gerenciamento de canal TDMA (Time Division Multiple Access). Isso permite o seu uso para comunicações de voz digital bem como de enlace de dados.

O VDL modo 4 é uma abordagem diferente que, além da comunicação de dados, pode suportar a ADS-B (Automatic Dependent Surveillance – Broadcast) e aplicações de prevenção de colisão de aeronaves.

#### A. ACARS

O ACARS é um sistema de comunicação de dados para troca de mensagens entre uma aeronave e os sistemas terrestres. É um sistema de dados orientado a caractere. Ele fornece um enlace de dados de baixa capacidade (2,4 kbps) em um canal padrão de 25 kHz.

O ACARS utiliza a modulação AM-MSK com uma taxa de bits de 2,4 kbps. O controle de acesso ao meio do ACARS é o CSMA (Carrier Sense Multiple Access) não-persistente.

O maior ponto forte do ACARS é a sua larga disponibilidade, pois há uma rede de estações terrestres que dá uma cobertura em grande parte do planeta. No entanto, o ACARS fornece uma baixa qualidade de serviço, não sendo suficiente para a maioria das aplicações de controle de tráfego aéreo. Ele também fornece uma baixa taxa de dados e as novas tecnologias podem oferecer uma taxa maior para um mesmo canal. A capacidade de canais disponíveis está chegando à saturação na Europa e América do Norte e não há canais de VHF adicionais disponíveis.

#### B. VDL Modo 1

Os VDLs modos 1 e 2 foram originalmente projetados como aprimoramentos do ACARS. Os modos 1 e 2 são praticamente idênticos, diferindo apenas na camada física. O VDL modo 1 foi planejado como uma segurança caso o VDL modo 2 não pudesse ser padronizado. Entretanto, como a camada física do VDL modo 2 já foi aceita pela ICAO, não há planos para implementação do VDL modo 1.

O VDL modo 1 utiliza a modulação AM-MSK com uma taxa de bits de 2,4 kbps. É o mesmo esquema de modulação do ACARS. Assim como o ACARS, o VDL modo 1 utiliza o CSMA não persistente como controle de acesso ao meio.

#### C. VDL Modo 2

O VDL modo 2 utiliza a modulação D8PSK operando a uma taxa de bits de 31,5 kbps. Cada símbolo é representado pela diferença entre a fase atual e a fase anterior da portadora. O D8PSK fornece a maior taxa de dados entre as modulações incluídas nos padrões do VDL e por esta razão é especificado nos modos 2, 3 e 4.

O VDL modo 2 utiliza o CSMA p-persistente como protocolo de controle de acesso ao meio. Este protocolo é

similar ao protocolo Ethernet que é atualmente utilizado em redes locais de computadores. A principal desvantagem do CSMA é que ele não possui uma boa eficiência de utilização do canal. Além disso, não oferece um mecanismo de priorização de mensagens o que dificulta o atendimento dos níveis de qualidade de serviço exigidos pelas aplicações críticas de gerenciamento de tráfego aéreo.

#### D. VDL Modo 3

O VDL modo 3 fornece serviços de dados e voz digital, integrando um único rádio ambos os serviços. Ele fornece 4 canais lógicos independentes em um canal padrão de 25 kHz. Cada canal pode ser utilizado por voz digital ou dados.

O VDL modo 3 é baseado na modulação D8PSK com uma taxa de bits de 31,5 kbps, similarmente ao VDL modo 2. Entretanto a técnica de acesso ao meio é o TDMA gerenciado pela estação de terra cuja intenção é a de aprimorar a eficiência de utilização do enlace com relação ao alcançado pelo CSMA.

#### E. VDL Modo 4

O VDL modo 4 é um sistema geral de comunicação de dados. O sistema é baseado no enlace sueco STDMA (Self-Organising Time Division Multiplex) que também suporta aplicações de navegação e vigilância como o DGNSS (Differential Global Navigation Satellite System) e o ADB-S. Outra aplicação suportada pelo modo 4 é a comunicação entre aeronaves sem depender de uma estação de terra.

O VDL modo 4 pode utilizar as modulações D8PSK e a GFSK. A modulação D8PSK é a mesma utilizada nos modos 2 e 3. Já o GFSK opera a uma taxa de bits de 19,2 kbps. O GFSK é o caso geral da modulação GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying) que é utilizada nos sistemas GSM, DECT, WLAN 802.11 e Globalstar.

O GFSK apresenta um desempenho com relação à interferência co-canal melhor que o D8PSK. Neste caso ele é indicado para comunicações do tipo broadcast. Por outro lado, o D8PSK é mais indicado para comunicações ponto a ponto devido a sua maior taxa de bits.

### III. MODELAGEM DO CANAL DE RÁDIO MÓVEL

Os modelos de canal com desvanecimento multipercurso são caracterizados pelo espectro de potência Doppler e o espectro de potência do atraso, ou seja, a função espalhamento  $P_s(\mathbf{t}, f_D)$  [6]. Assumindo que o espectro de potência Doppler e o espectro de potência do atraso são independentes ( $P_s(\mathbf{t}, f_D) = P_s(\mathbf{t}) \cdot P_s(f_D)$ ) e sabendo que a função espalhamento é proporcional a função densidade de probabilidade (fdp) Doppler e do atraso ( $P_s(\mathbf{t}, f_D) \sim p_s(\mathbf{t}, f_D)$ ) então é suficiente especificar as fdp  $p(\mathbf{t})$  (perfil potência-atraso) e  $p(f_D)$  para definir o modelo do canal aeronáutico [7].

Observa-se que a forma do perfil potência-atraso não tem um impacto significativo no desempenho do canal e normalmente adota-se do tipo uniforme ou exponencial como [8]:

$$p_t(\mathbf{t}) = \begin{cases} \frac{1}{\mathbf{t}_{slope} (1 - e^{-\mathbf{t}_{max}/\mathbf{t}_{slope}})} e^{-\mathbf{t}/\mathbf{t}_{slope}}, & se 0 < \mathbf{t} \leq \mathbf{t}_{max} \\ 0 & \end{cases} \quad (1)$$

onde  $\mathbf{t}_{max}$  é o atraso máximo do espalhamento.

Para o espectro de potência Doppler assume-se que os raios refletidos são recebidos uniformemente o que leva a uma distribuição da forma

$$p_{fd}(f_D) = \begin{cases} \frac{1}{\mathbf{p} f_{Dmax} \sqrt{1 - (f_D / f_{Dmax})^2}}, & se |f_D| < f_{D1} \\ 0 & \end{cases} \quad (2)$$

onde  $f_{Dmax}$  é a máxima frequência Doppler e a distribuição é conhecida como espectro Jakes [9].

Para os casos em que os raios refletidos não são distribuídos isotropicamente então a densidade espectral de potência Doppler será apenas uma fração do espectro Jakes compreendida entre os ângulos  $\mathbf{j}_L < \mathbf{j} < \mathbf{j}_H$ , onde  $\mathbf{j}_L$  é o menor ângulo e  $\mathbf{j}_H$  o maior ângulo de chegada dos raios, como podemos observar na Figura 1.

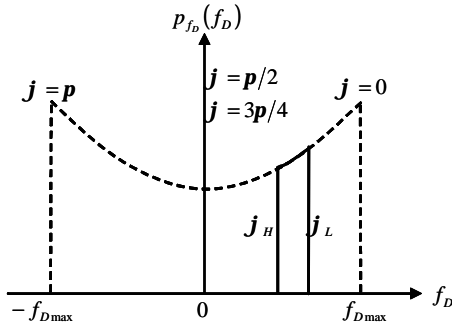


Figura 1 – Densidade espectral de potência Doppler não isotrópica

Neste caso, a densidade espectral de potência Doppler é dada por

$$p_{fd}(f_D) = \begin{cases} \frac{1}{(\mathbf{j}_H - \mathbf{j}_L) f_{Dmax} \sqrt{1 - (f_D / f_{Dmax})^2}}, & se f_{Dmax} \cos \mathbf{j}_H < f_D < f_{Dmax} \cos \mathbf{j}_L \\ 0 & \end{cases} \quad (3)$$

ou

$$p_{fd}(f_D) = \begin{cases} \frac{1}{(\mathbf{j}_H - \mathbf{j}_L) f_{Dmax} \sqrt{1 - (f_D / f_{Dmax})^2}}, & se f_{Dmax} \cos \mathbf{j}_L < f_D < f_{Dmax} \cos \mathbf{j}_H \\ 0 & \end{cases} \quad (4)$$

Considere um canal de comunicação móvel com  $N$  percursos da estação base para a estação móvel. Cada raio possui uma fase  $\mathbf{q}_n$ , um atraso  $\mathbf{t}_n$  e um desvio Doppler  $f_{Dn}$ , onde  $\mathbf{q}_n, \mathbf{t}_n$

e  $f_{Dn}$  são valores aleatórios. De acordo com [10], a resposta ao impulso do canal pode ser escrita como

$$h(\mathbf{t}, t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N e^{j\mathbf{q}_n} \cdot e^{j2\mathbf{p} f_{Dn} t} \cdot \mathbf{d}(\mathbf{t} - \mathbf{t}_n) \quad (5)$$

onde  $t$  é o tempo e  $\mathbf{t}$  o atraso. De acordo com o teorema do limite central,  $h(\mathbf{t}, t)$  é um processo gaussiano complexo e por isso sua amplitude tem uma distribuição do tipo Rayleigh.

A versão em tempo discreto é representada na Figura 1 e dada por

$$h_k(i) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N e^{j\mathbf{q}_n} \cdot e^{j2\mathbf{p} f_{Dn} kT} \cdot \mathbf{d}(iT - \mathbf{t}_n), \quad (6)$$

$$-L \leq i \leq L$$

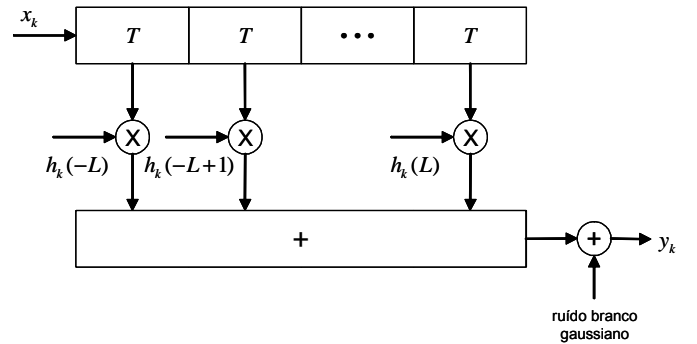


Figura 2 – Modelo do canal em tempo discreto

Um canal do tipo Rice (com sinal em visada direta) pode ser modelado adicionando-se uma componente constante ao canal Rayleigh acima. Esta componente é dada por

$$h_{LOS_k} = a \cdot e^{j2\mathbf{p} f_{DLOS} kT} \quad (7)$$

onde  $f_{DLOS}$  é o desvio Doppler do raio em visada direta.

A relação de potência entre o raio direto e os raios refletidos é chamada de fator Rice e é dado por

$$K = \frac{a^2}{c^2} \quad \text{ou} \quad (8)$$

$$K = 10 \log \frac{a^2}{c^2} [dB]$$

onde  $a \in \Re$  é a amplitude do raio direto e  $c^2 \in \Re$  é a variância do processo difuso. Para que a potência média não seja alterada, ou seja,  $E|h(\mathbf{t}, t)|^2 = a^2 + c^2 = 1$ , obtém-se que

$$a = \sqrt{\frac{K}{K+1}} \quad (9)$$

e

$$c = \sqrt{\frac{1}{K+1}} \quad (10)$$

Valores de  $K \gg 1$  indicam um desvanecimento ameno enquanto que para  $K \ll 1$  temos um forte desvanecimento. No limite quando  $K \rightarrow 0$  temos  $a=0$  e  $c=1$ , ou seja, um

desvanecimento Rayleigh. E quando  $K \rightarrow \infty$  temos  $a=1$  e  $c=0$ , ou seja, apenas o ruído branco aditivo gaussiano.

IV. SIMULAÇÃO

Para avaliação do desempenho da modulação utilizada nos enlaces de dados aeronáuticos, além do modelo de canal proposto acima, foram simulados o modulador e demodulador D8PSK. Na Figura 3 temos um diagrama simplificado da simulação.

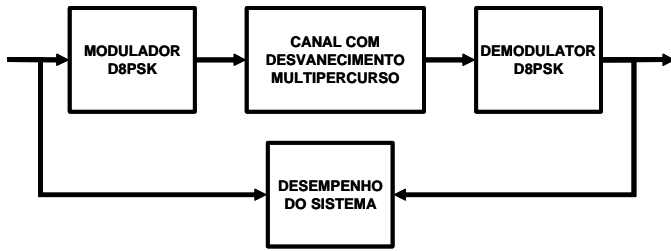


Figura 3 – Diagrama em blocos da simulação

A. Transmissor e Receptor

Foi simulada a modulação D8PSK que é a utilizada nos enlaces de dados VDL modos 2, 3 e 4. A modulação D8PSK é um caso específico ( $M=8$ ) da modulação MDPSK.

Na modulação MDPSK (M-ary Differentially encoded Phase Shift Keying) os sinais modulados são definidos por [11]

$$s_i(t) = A \cos(2p f_c t + f_i), \quad (1)$$

$$0 \leq t \leq T, \quad i = 0, 1, \dots, M - 1$$

Onde

$$f_i = f_{i-1} + \Delta f_i \quad (2)$$

é uma das  $M$  possíveis fases do sinal modulado e

$$\Delta f_i = \frac{2p i}{M} \quad i = 0, 1, \dots, M - 1 \quad (3)$$

$M$  normalmente é escolhido como potência de 2 de forma que cada símbolo seja formado por  $n$  bits ( $n = \log_2 M$ ).

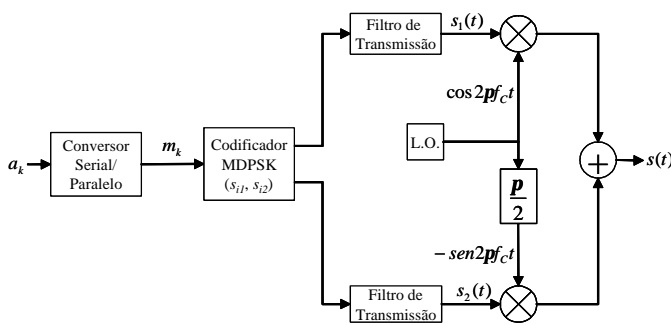


Figura 4 – Diagrama em blocos do transmissor MDPSK

Na Figura 4 temos o diagrama em blocos do transmissor simulado que é basicamente um modulador em quadratura. A codificação normalmente utiliza o código Gray pois no mesmo há uma variação de apenas um bit entre fases adjacentes.

O transmissor utiliza um filtro de transmissão cuja resposta em frequência é do tipo raiz quadrada do coseno levantado (SRRC – Square Root Raised Cosine) com fator de rolagento  $a$ . A resposta em frequência é dada por [12]

$$H_{SRRC}(f) = \begin{cases} \sqrt{T_s} & 0 \leq |f| < \frac{1-a}{2T_s} \\ \sqrt{\frac{T_s}{2} \left[ 1 + \cos \left[ p \frac{T_s}{a} \left( |f| - \frac{1-a}{2T_s} \right) \right] \right]} & \frac{1-a}{2T_s} \leq |f| \leq \frac{1+a}{2T_s} \\ 0 & |f| > \frac{1+a}{2T_s} \end{cases} \quad (4)$$

Para os VDL modos 2, 3 e 4 o valor nominal de  $a$  é 0,6.

Na Figura 5 temos o diagrama em blocos do receptor MDPSK não coerente simulado. A não necessidade de sincronismo entre o receptor e a portadora transmitida é uma das vantagens do DPSK em relação ao PSK. Além de o receptor ser mais simples, algumas vezes não é possível recuperar o sincronismo quando o sinal está muito degradado como em alguns casos de canais com desvanecimento multipercurso [13].

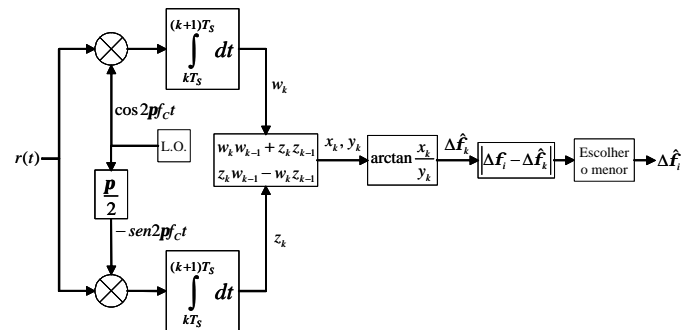


Figura 5 – Diagrama em blocos do receptor MDPSK

Basicamente o receptor estima a fase do símbolo atual e compara com os  $M$  possíveis símbolos. O critério de decisão é a menor diferença entre eles.

O receptor também utiliza um filtro do tipo SRRC e possui a mesma resposta em frequência do filtro de transmissão.

B. Canal

Para simulação do canal utilizou-se o modelo de dois raios. Este modelo considera um canal Rice com apenas um caminho refletido com o atraso máximo ( $T_{max}$ ) e um caminho em visada direta como mostrado na Figura 6.

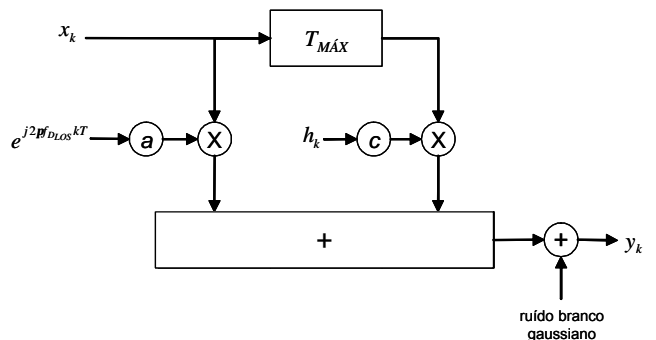


Figura 6 – Modelo de dois raios utilizado na simulação

### C. Cenários

A seguir são propostos vários cenários aeronáuticos de forma a abranger as principais fases de um voo típico como rota, pouso, decolagem, táxi e estacionamento. Resultados de medidas publicadas e valores empíricos foram utilizados para a especificação de cada cenário [12], [10], [15]. A seguir serão apresentadas as principais características de cada cenário simulado.

#### 1) Cenário de Cruzeiro

O cenário de cruzeiro é aplicado quando a aeronave está em voo reto e nivelado e emprega comunicações terra-ar e ar-ar. A comunicação terra-ar é o enlace entre a torre do aeroporto e uma aeronave e a comunicação ar-ar é o enlace entre duas aeronaves em voo.

##### a) Tipo de Desvanecimento

Tipicamente, este cenário consiste em um caminho em visada direta e um grupo de caminhos refletidos e com atrasos. De acordo com [10] e [15], o caminho direto pode ser modelado como um processo constante e a componente difusa do canal como um processo Rayleigh. O fator Rice tem uma grande variação de 2 a 20 dB onde 2 dB é o pior caso e 15 dB é o valor típico encontrado.

##### b) Doppler

No cruzeiro ocorrem velocidades máximas de 440 m/s para enlances terra-ar e 660 m/s para enlances ar-ar. A menor velocidade é de cerca de 17 m/s. As componentes espalhadas tipicamente não são distribuídas isotropicamente. Em [15], uma largura do feixe da ordem de  $\theta = 3,5^\circ$  é estimada e o espectro Doppler correspondente é calculado, assumindo que os espalhadores são uniformemente distribuídos dentro do feixe. Como pior caso, assume-se que o caminho direto coincide com a parte frontal da aeronave ( $f_{D_{LOS}} = f_{D_{max}}$ ) e as componentes espalhadas por trás da aeronave.

##### c) Atraso

O pior caso de atraso é de aproximadamente 200  $\mu$ s para enlances terra-ar e até 1 ms para enlances ar-ar. Em [10], os valores típicos para o atraso são de 33  $\mu$ s para enlances terra-ar e 66  $\mu$ s para enlances ar-ar.

#### 2) Cenário de Pouso e Decolagem

O cenário de pouso e decolagem é aplicado quando a aeronave está se aproximando ou afastando do aeroporto para pouso ou decolagem e é uma mistura entre o cenário de cruzeiro e o de táxi. Neste cenário emprega-se basicamente a comunicação terra-ar. Como o pouso e a decolagem possuem características muito similares, apenas o pouso será visto a seguir.

##### a) Tipo de Desvanecimento

Assume-se que há visada direta quando a aeronave está pousando ou decolando. Também há componentes espalhadas, principalmente pelas construções do próprio aeroporto. Novamente, o resultado é um canal com desvanecimento Rice com um fator típico de 15dB caracterizando uma forte componente em visada direta.

##### b) Doppler

Velocidades de 25 a 150 m/s são encontradas nesta fase de voo. As componentes espalhadas não são isotropicamente distribuídas mas assume-se que chegam na parte frontal da aeronave. A largura do feixe maior que o cruzeiro visto que, normalmente a estação transmissora está localizada no aeroporto e haverá reflexões nas construções e obstáculos próximos a área do aeroporto. Assume-se então uma largura de feixe de  $\theta = 180^\circ$  e a linha de visada diretamente na parte frontal da aeronave levando à  $f_{D_{LOS}} = f_{D_{max}}$ .

##### c) Atraso

O pior caso de atraso é de aproximadamente 7  $\mu$ s para enlances terra-ar, que corresponde ao limite entre pouso e cruzeiro.

#### 3) Cenário de Táxi

O cenário de táxi é aplicado quando a aeronave está no solo e se aproximando para o terminal.

##### a) Tipo de Desvanecimento

No táxi assume-se um desvanecimento Rice visto que normalmente há visada direta entre a estação transmissora e a aeronave. Um valor típico para o fator Rice é de 6,9 dB.

##### b) Doppler

Este cenário é caracterizado por um desvanecimento lento onde velocidades típicas de táxi vão de 0 a 15 m/s e 50 m/s é considerado o pior caso. Assume-se que os sinais refletidos são igualmente distribuídos por todas as direções acarretando numa largura do feixe de  $\theta = 360^\circ$ . Admite-se que o feixe de visada direta atinja obliquamente a aeronave ocasionando um desvio Doppler de  $f_{D_{LOS}} = 0,7 \cdot f_{D_{max}}$ .

##### c) Atraso

O pior caso de atraso é de aproximadamente 0,7  $\mu$ s devido à pequena distância entre a estação transmissora e a aeronave.

#### 4) Cenário de Estacionamento

O cenário de estacionamento é aplicado quando a aeronave está no solo, com uma velocidade muito baixa e bem próxima do terminal.

##### a) Tipo de Desvanecimento

Neste cenário assume-se que a visada direta é bloqueada o que resulta em um desvanecimento Rayleigh. Obviamente este é o pior caso visto que as estações transmissoras são normalmente instaladas em locais onde haja linha de visada para o maior número de aeronaves.

##### b) Doppler

Devido ao fato de que a aeronave está estacionada ou a velocidades muito baixas, o desvanecimento é mais lento que o do táxi e velocidades de 0 a 5,5 m/s são típicas para este cenário. Mais uma vez assume-se que uma distribuição clássica de Jakes, isto é, largura do feixe de  $\theta = 360^\circ$ .

##### c) Atraso

Um atraso típico de 7  $\mu$ s é encontrado neste cenário. Uma vez que a linha de visada é bloqueada, a informação deve ser extraída apenas dos sinais refletidos.

Na Tabela 1 temos um resumo das principais características dos cenários aeronáuticos.

Tabela 1 - Cenários aeronáuticos utilizados na simulação

	Cenário Estacionamento	Cenário Táxi	Cenário Pouso/Decolagem	Cenário Rota
Velocidade da aeronave [m/s]	5,5	15	150	440
Máximo desvio Doppler $f_{Dmax}$ [Hz]	2,51	6,85	68,5	201
Atraso máximo $T_{max}$ [s]	$7.10^{-6}$	$0,7.10^{-6}$	$7.10^{-6}$	$33.10^{-6}$
Fator Rice $K$ [dB]	-	6,9	15	15
Fator $ D_{los} / D_{max} $	-	0,7	1	1
Ângulo inicial do feixe [°]	0	0	-90	178,25
Ângulo final do feixe [°]	360	360	+90	181,75
Número de percursos	40	40	40	40

V. RESULTADOS

O modelo do canal aeronáutico proposto foi simulado com uma modulação D8PSK para os vários cenários descritos acima.

A taxa de bits utilizada na simulação foi de 31,5 kbps e uma frequência de portadora de 137 MHz.

O desempenho da modulação nos diversos cenários pode ser observado na Figura 7. Também é mostrado o desempenho no canal AWGN para comparação.

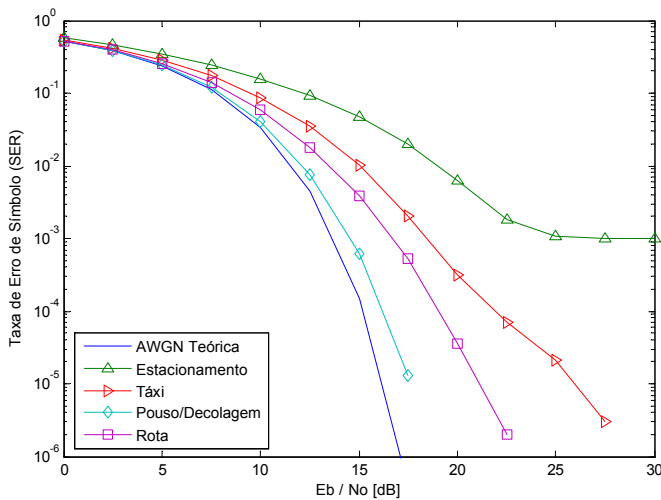


Figura 7 – Desempenho da modulação D8PSK em vários cenários aeronáuticos

Na Figura 7 verifica-se que o cenário de estacionamento possui o pior desempenho de todos os cenários. Isso é explicado pois no estacionamento não há sinal em visada direta. Para os outros cenários, observa-se que o desempenho melhora proporcionalmente ao aumento do fator Rice. Nos casos de Pouso/Decolagem e Rota que possuem o mesmo fator Rice, o cenário de Pouso/Decolagem possui um

desempenho melhor pois o mesmo possui um atraso máximo menor que o cenário de Rota, bem como um desvio Doppler menor devido a menor velocidade.

VI. CONCLUSÕES

Neste artigo foi mostrada uma comparação entre alguns enlaces de dados aeronáuticos atuais e em desenvolvimento. Foi proposto um modelo de canal aeronáutico com desvanecimento multipercorso para simulação. Foram apresentados vários cenários típicos de um voo incluindo rota, pouso, decolagem, táxi e estacionamento. Estes cenários foram baseados em resultados de medições já publicadas ou valores empíricos.

Finalmente, verificou-se que o desempenho da modulação D8PSK utilizada no enlaces de dados VDL modos 2, 3 e 4 depende bastante do cenário utilizado. Observou-se que os cenários de pouso e decolagem, que são as fases mais críticas de um voo, apresentaram o melhor desempenho com relação aos outros e que o fator Rice foi o parâmetro que teve o maior impacto no desempenho desta modulação.

REFERÊNCIAS

- [1] WHITE, F. C. Air-ground Communications: History and Expectation. *IEEE Transactions on Communications*. v. 21, n. 5, p. 398-407, mai. 1973.
- [2] GILBERT, G. A. Historical Development of Air Traffic Control System. *IEEE Transactions on Communications*. v. 21, n. 5, p. 364-375, mai. 1973.
- [3] MONTEIRO, A. M. *Simulação das Camadas 1 e 2 de um Enlace de Dados em VHF Modo 2*. 2001. 104p. Dissertação – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP. 2001.
- [4] FANS INFORMATION SERVICES. *ICAO VHF digital link course workbook*. FANS Information Services, 1999. 348p.
- [5] HELFRICK, A. D. *Principles of Avionics*. 2<sup>nd</sup> ed. Avionics Communications Inc., 2002. 385p.
- [6] BELLO, P. A. Characterization of Randomly Time-Variant Linear Channels. *IEEE Transactions on Communication Systems*. v. 11, n. 4, p. 360-393, dez. 1963.
- [7] HOEHER, P. A Statistical Discrete-Time Model for the WSSUS Multipath Channel. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. v. 41, n. 4, p. 461-468, nov. 1992.
- [8] TRANTER, W. H. et al. *Principles of Communication Systems Simulation with Wireless Applications*. Prentice Hall PTR, 2002. 778p.
- [9] JAKES, W. C. (Ed.) *Microwave Mobile Communications*. New York: McGraw-Hill, 1963. 642p.
- [10] HAAS, E. Aeronautical Channel Modeling. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. v. 51, n. 2, p. 254-264, mar. 2002.
- [11] XIONG, F. *Digital Modulation Techniques*. Norwood: Artech House Inc., 2000. 669p.
- [12] BATEMAN, A. *Digital Communications: Design for the Real World*. Addison-Wesley, 1998. 248p.
- [13] SIMON, M. K.; HINEDI, S. M.; LINDSEY, W. C. *Digital Communications Techniques: Signal Design and Detetion*. 2nd ed. Prentice Hall PTR, 1994. 888p.
- [14] RTCA. *DO-224: Signal-in-Space Minimum Aviation System Performance Standards (MASPS) Advanced VHF Digital Data Communications Including Compatibility with Digital Voice Technique*. Washington: RTCA, Inc., 1998. 143p.
- [15] ELNOUBI, S. M. A simplified stochastic model for the aeronautical mobile channel. In: *VEHICULAR TECHNOLOGY CONFERENCE*, 42., 1992. *Anais... IEEE*, 1992. p. 960-962.