

Efeito do erro de apontamento de antenas fixadas em plataformas móveis no desempenho de sistemas de comunicação digital por satélite

Marcus Vinícius Galletti Arrais e José Mauro Pedro Fortes

Resumo—O dimensionamento de enlaces digitais de comunicação é realizado com base em objetivos de desempenho a serem satisfeitos por determinados parâmetros, considerando o comportamento aleatório das fontes de degradação do sinal. Em sistemas de comunicação móvel por satélite, o desempenho pode ser fortemente afetado pelo erro de apontamento da antena provocado pelo movimento da plataforma. Neste artigo, é apresentada uma metodologia para a caracterização estatística da degradação conjunta por erro de apontamento e por atenuação por chuvas, e avaliado o efeito dessas fontes de degradação nos diversos parâmetros de desempenho. A metodologia proposta permite dimensionar o sistema de comunicações móveis por satélite, e determinar algumas restrições a serem impostas ao comportamento estatístico do erro de apontamento da antena.

Palavras-Chave—Erro de Apontamento, Parâmetros de Desempenho, Comunicações Móveis por Satélite, Plataformas Móveis.

Abstract—The design of digital communication links is based on performance objectives to be satisfied by certain performance parameters. In mobile satellite communication systems, performance can be strongly affected by the antenna pointing error due to the platform motion. This paper presents a methodology for the statistical characterization of the joint degradation due to pointing error and to rain, and evaluates the effect of these degradation sources on the various performance parameters. The proposed methodology allows for the design of the mobile satellite communication systems, and for the determination of some constraints to be imposed on the statistical behavior of the antenna pointing errors.

Keywords—Pointing Error, Performance Parameters, Mobile Satellite Communications, Moving Platforms Style file.

I. INTRODUÇÃO

A utilização de estações terrenas providas de um sistema de rastreamento e apontamento automático de antenas tem sido proposta para possibilitar comunicações por satélite em veículos.

Quando antenas de estações terrenas são fixadas em veículos, uma nova fonte significativa de degradação é inserida no sistema: o erro de apontamento da antena causado pelo movimento da plataforma. Para minimizar esse problema, são utilizados sistemas de amortecimento e compensação de movimento.

O objetivo deste trabalho é caracterizar estatisticamente o comportamento da degradação causada pelo erro de apontamento da antena, em conjunto com a degradação causada por

chuvas, de forma a possibilitar o adequado dimensionamento do enlace móvel.

II. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O dimensionamento de um enlace por satélite é feito com base em objetivos de desempenho, relacionados a restrições impostas a parâmetros tais como a Taxa de Erro de Bit (BER), a Taxa de Segundo Errado (ESR), a Taxa de Segundo Severamente Errado (SESR) e a Taxa de Bloco Errado de Fundo (BBER) [5].

Como exemplo, é comum limitar a probabilidade de que determinados níveis de BER sejam excedidos. Considerando que a BER está associada ao valor da razão E_b/N_0 (Energia de bit/Nível espectral de ruído), essa limitação pode ser expressa por

$$P(b > BER_j) = P\left(e < \left(\frac{E_b}{N_0}\right)_j\right) \leq p_j; j = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

sendo que BER_j e $(E_b/N_0)_j$ se relacionam de acordo com a curva de desempenho da modulação adotada, e e e b são respectivamente a razão E_b/N_0 e a BER de operação.

A Recomendação ITU-R S.1323 da ITU [8] estabelece que a degradação provocada por interferência de outras redes de satélite deve ser responsável por, no máximo, 10% do tempo permitido para as Taxas de Erro de Bit. Como a interferência intersistemas não é tratada neste trabalho, é estipulado um limite, equivalente a 90% dos objetivos de desempenho, para a influência da degradação conjunta por chuvas e erro de apontamento no desempenho geral do sistema. Além disso, na medida em que a razão E_b/N_0 é afetada por fontes de degradação, podemos converter o problema de limitação da probabilidade de que determinados valores de taxa de erro de bit sejam excedidos na limitação da probabilidade de que a degradação conjunta z , composta pelas degradações por chuva x e por erro de apontamento y , exceda determinados valores. Quando expressas em dB, z é a soma de x e y , e assim, (1) se escreve

$$\begin{aligned} P\left(e < \left(\frac{E_b}{N_0}\right)_j\right) &= P\left(\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{CS} - z < \left(\frac{E_b}{N_0}\right)_j\right) \\ &= P(z = x + y > Z_j) \leq 0,9p_j \end{aligned} \quad (2)$$

onde $\{Z_j; j = 1, \dots, n\}$ são valores de degradação relacionados aos níveis $\{(E_b/N_0)_j; j = 1, \dots, n\}$, e $(E_b/N_0)_{CS}$ é a

razão E_b/N_0 em céu claro e sem a influência de outras fontes de degradação, de forma que

$$Z_j = \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_{CS} - \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_j \quad (3)$$

III. MODELAGEM MATEMÁTICA

Nesta seção, primeiramente é determinada a influência da degradação conjunta z nos diversos parâmetros de desempenho. Em seguida, são determinadas as caracterizações estatísticas das variáveis aleatórias envolvidas, com o objetivo de estimar os valores dos parâmetros de desempenho quando o enlace é submetido a degradações de caráter aleatório.

A. Relacionamento entre os Parâmetros de Desempenho e a Razão E_b/N_0

Para enlaces digitais por satélite, os objetivos de desempenho estão definidos na Recomendação ITU-R S.1521-1 [5], que impõe restrições aos parâmetros de desempenho.

Em [1], [6] foram determinados os relacionamentos entre esses parâmetros, e adotada uma metodologia para a caracterização estatística de cada uma delas a partir da estatística da razão E_b/N_0 . Essa metodologia parte da definição das seguintes variáveis aleatórias:

- e : Razão E_b/N_0 ;
- b : Taxa de erro de bit;
- r_{eb} : Probabilidade de bloco errado;
- r_{es} : Probabilidade de segundo errado;
- r_{ses} : Probabilidade de segundo severamente errado;
- r_{bbe} : Taxa de bloco errado de fundo.

Em sistemas de comunicação por satélite, as duas modulações digitais mais utilizadas são BPSK e QPSK, que, por terem envoltória constante, são adequadas para transmissão em canais não lineares. Tanto para sistemas BPSK quanto para sistemas QPSK utilizando codificação de Gray [4], a taxa de erro de bit é dada por

$$b = Q\left(\sqrt{2 \times 10^{e/10}}\right) \quad (4)$$

sendo a função Q definida por

$$Q(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_t^{\infty} e^{-\frac{\alpha^2}{2}} d\alpha \quad (5)$$

A variável aleatória r_{eb} é definida como a probabilidade de que um bloco tenha pelo menos um bit errado [5]. Considerando a ocorrência de erros em surto segundo uma distribuição de Poisson, r_{eb} se relaciona com b [1], [6] através de

$$r_{eb} = 1 - e^{-\frac{N_B}{\alpha} b} \quad (6)$$

onde N_B é o número de bits por bloco e α é o número médio de erros de bit por surto, cujos valores típicos variam entre 10 e 20.

A variável r_{es} é definida como a probabilidade que um período de um segundo tenha pelo menos um bloco errado [5]. Modelando o número de blocos errados em um segundo como uma variável aleatória de Poisson, é possível mostrar que o relacionamento entre r_{es} e r_{eb} [1], [6] é dado por

$$r_{es} = 1 - e^{-n r_{eb}} \quad (7)$$

sendo n o número de blocos por segundo.

Um Segundo Severamente Errado deve ter pelo menos 30% de blocos errados [5]. Para a determinação do relacionamento entre r_{eb} e r_{ses} , foi utilizado um modelo de distribuição binominal para o número de blocos errados por segundo. Assim, aproximando a distribuição binominal por uma função normal [1], [6], r_{ses} pode ser expressa por

$$r_{ses} = Q\left(\frac{\sqrt{n}(0,3 - r_{eb})}{\sqrt{r_{eb}(1 - r_{eb})}}\right) - Q\left(\frac{\sqrt{n}(1 - r_{eb})}{\sqrt{r_{eb}(1 - r_{eb})}}\right) \quad (8)$$

A variável aleatória r_{bbe} não está associada à probabilidade de ocorrência de eventos de erro, mas a uma razão entre o número de blocos errados e o número total de blocos, quando ambos não ocorrem em um segundo severamente errado [5]. Para a determinação do relacionamento entre r_{eb} e r_{bbe} , foi adotado um modelo que considera o número de blocos errados em uma sequência de n blocos como uma variável aleatória binominal. O relacionamento entre a probabilidade de bloco errado e a taxa de bloco errado de fundo [1], [6] é então dada por

$$\begin{aligned} r_{bbe} = & \frac{\sqrt{nr_{eb}(1-r_{eb})}}{n\sqrt{2\pi(1-r_{ses})}} \left(e^{-\frac{m_1^2(r_{eb})}{2}} - e^{-\frac{m_2^2(r_{eb})}{2}} \right) + \\ & + \frac{r_{eb}}{1-r_{ses}} (Q(m_1) - Q(m_2)) \end{aligned} \quad (9)$$

$$m_1 = \frac{1 - nr_{eb}}{\sqrt{nr_{eb}(1-r_{eb})}}$$

$$m_2 = \frac{n(0,3-r_{eb})-1}{\sqrt{nr_{eb}(1-r_{eb})}}$$

Ressalte-se que r_{bbe} não é definido quando $r_{ses} = 1$, visto que, se a probabilidade de segundo severamente errado é igual a 1, de acordo com a definição, não há possibilidade da ocorrência de blocos errados de fundo.

B. Caracterização Estatística da Degradação Devida a Chuvas e da Degradação Devida ao Erro de Apontamento

A Recomendação ITU-R P.618-10 [3] apresenta um modelo para a estimação do comportamento estatístico da atenuação por chuvas, que considera os seguintes parâmetros: taxa de precipitação atmosférica excedida em 0,01% do ano, dada em mm/h ($R_{0,01}$); altitude da estação em relação ao nível médio dos mares (h_s); elevação da antena (θ); latitude da estação terrena (ϕ); e frequência de operação (f).

De acordo com [3], esse modelo é válido para determinar a Função Distribuição de Probabilidade Cumulativa (FDPC) da atenuação por chuvas $C_x(X) = P(x > X)$ para valores de probabilidade compreendidos no intervalo $[10^{-5}, 5 \times 10^{-2}]$, não sendo adequado para representar a FDPC fora desse intervalo. Assim, são considerados um limitante superior e um limitante inferior para a FDPC, conforme ilustrado na Figura 1, para o caso particular em que $f = 14,2$ GHz, $R_{0,01} = 23$ mm/h, $h_s = 0$ km, $\theta = 25^\circ$ e $\phi = 40^\circ$.

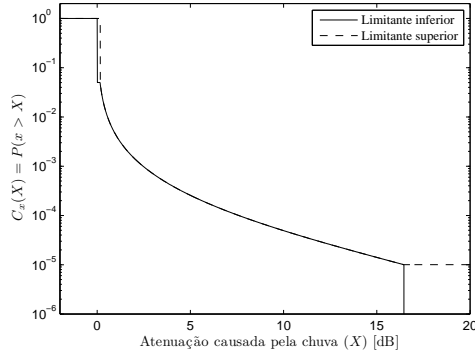


Fig. 1. FDPC da atenuação por chuva, considerando os limitantes inferior e superior.

No que diz respeito ao erro de apontamento da antena, resultados de testes de laboratório citados em [2] indicam que seu comportamento estatístico pode ser caracterizado por uma Densidade de Probabilidade de Levy [9], a qual pode ser descrita por sua função característica, dada por

$$M_\phi(v) = e^{-|\gamma v|^\delta} \quad (10)$$

onde ϕ é o erro de apontamento. O parâmetro δ assume valores no intervalo $(0, 2]$, e determina a cauda da distribuição, sendo que, quanto menor esse valor, maior a probabilidade de grandes erros de apontamento. O parâmetro γ é relacionado à dispersão [9]. Esses parâmetros são influenciados por diversos fatores relacionados às condições de operação da estação terrena móvel, tais como a velocidade de deslocamento, a rugosidade do terreno e a eficiência dos sistemas de compensação de movimento. A Função Densidade de Probabilidade (fdp) do erro de apontamento $p_\phi(\Phi) = -\frac{d}{dY}C_y(Y)$ é dada por

$$p_\phi(\Phi) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} M_\phi(v) e^{-jv\Phi} dv \quad (11)$$

A degradação causada pelo erro de apontamento dependerá do diagrama de radiação da antena da estação móvel. Considerando uma antena parabólica de abertura circular, tem-se que o ganho normalizado $g(\theta)$ [7] pode ser expresso por

$$g(\theta) = \left(\frac{2^{n+1}(n+1)! J_{n+1}(\pi d/\lambda \times \sin \theta)}{(\pi d/\lambda \times \sin \theta)^{n+1}} \right)^2 \quad (12)$$

sendo θ o afastamento angular do eixo, d o diâmetro da antena, λ o comprimento de onda correspondente à frequência de operação e n o parâmetro que caracteriza a iluminação da abertura.

Um erro de apontamento $\phi = \Phi$ provoca uma degradação $y = Y$ equivalente à discriminação da antena no ângulo entre o apontamento real e o apontamento ideal, ou seja

$$Y = g(0) - g(\Phi) = -g(\Phi) \quad (13)$$

uma vez que o ganho normalizado no eixo da antena $g(0)$ é considerado 0 dB. Essa relação é sempre válida para o enlace de recepção da estação móvel. No caso do enlace de transmissão, somente será válida se o satélite estiver operando na região linear.

Note que, conhecido o relacionamento entre as variáveis ϕ e y , é possível determinar o comportamento estatístico da degradação y a partir do comportamento do erro de apontamento ϕ . Como (12) é uma função não monótona, pode ser utilizado um método computacional para essa caracterização, que parte da definição do subconjunto A_ϕ como sendo o conjunto dos valores do erro de apontamento que causam uma degradação superior a um dado valor Y [1], ou seja

$$A_\phi = \{\Phi \in \Omega_\phi : y = -g(\Phi) > Y\} \quad (14)$$

onde Ω_ϕ é o conjunto dos possíveis valores de ϕ .

A partir de A_ϕ podemos definir a função indicadora $\mathbb{1}_{A_\phi}(\Phi)$, de forma que

$$\mathbb{1}_{A_\phi}(\Phi) = \begin{cases} 1 & , \quad \Phi \in A_\phi \\ 0 & , \quad \Phi \notin A_\phi \end{cases} \quad (15)$$

A FDPC da variável aleatória y será então dada por

$$C_y(Y) = P(y > Y) = \int_{-\infty}^{\infty} \mathbb{1}_{A_\phi}(\Phi) p_\phi(\Phi) d\Phi \quad (16)$$

Uma vez que as degradações por chuvas x e por erro de apontamento y são estatisticamente independentes, a fdp da degradação conjunta $z = x + y$ pode ser obtida pela convolução das fdp's de x e de y , ou seja,

$$p_z(Z) = p_x(X) * p_y(Y) \quad (17)$$

C. Cálculo dos parâmetros de desempenho

O comportamento estatístico da variável aleatória b , correspondente à taxa de erro de bit, pode ser determinado a partir do comportamento estatístico da degradação conjunta z , uma vez que o relacionamento entre as duas variáveis é conhecido e dado por (2) e (4), que em conjunto formam uma função monótona e estritamente crescente, o que possibilita a determinação de uma expressão analítica para a FDPC de b [1], [6], dada por

$$\begin{aligned} C_b(B) &= P(b > B) \\ &= P\left(Q\left(\sqrt{2 \times 10^{\frac{1}{10}} \left(\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{CS}^{-z}\right)}\right) > B\right) \\ &= P\left(z > \left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{CS} - 10 \log\left(\frac{1}{2} (Q^{-1}(B))^2\right)\right) \\ &= C_z\left(\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{CS} - 10 \log\left(\frac{1}{2} (Q^{-1}(B))^2\right)\right) \end{aligned} \quad (18)$$

Da mesma forma, os comportamentos estatísticos das variáveis aleatórias r_{eb} e r_{es} , representados pelas respectivas FDPCs $C_{eb}(R)$ e $C_{es}(R)$, podem ser determinadas a partir do comportamento estatístico de b e dos relacionamentos expressos respectivamente em (6) e (7), que são funções monótonas e estritamente crescentes.

Já o relacionamento entre r_{eb} e r_{ses} é dado por (8), que é uma função monótona, mas não estritamente crescente, e o

relacionamento entre r_{eb} e r_{bbe} é dado por (9), que é uma função não monótona. Assim, os comportamentos estatísticos de r_{ses} e r_{bbe} , representados respectivamente pelas FDPCs $C_{ses}(R)$ e $C_{bbe}(R)$, podem ser determinados a partir do comportamento estatístico de r_{eb} , utilizando um procedimento similar ao adotado em (14), (15) e (16) [1].

Na medida em que as probabilidades de ocorrência de eventos de erro foram modeladas como variáveis aleatórias, os parâmetros de desempenho correspondentes, que se tratam de taxas de ocorrência, são dados pelos valores médios dessas variáveis [1], [6], e podem ser calculados a partir de suas FDPCs. Tem-se assim

$$ESR = \int_0^1 C_{es}(R) dR \quad (19)$$

$$SESR = \int_0^1 C_{ses}(R) dR \quad (20)$$

$$BBER = \int_0^1 C_{bbe}(R) dR \quad (21)$$

IV. RESULTADOS NUMÉRICOS

Nesta seção, inicialmente, é estudada a influência do diagrama de radiação da antenna no comportamento da degradação conjunta z . Em seguida, é realizado o dimensionamento do enlace para um dos cenários de operação previstos em [5]. Em [1], é feito o dimensionamento em diversos outros cenários de operação. O comportamento estatístico da degradação por chuvas utilizado é o representado na Figura 1.

Para avaliar a influência do diâmetro da antenna da estação terrena no desempenho do sistema de comunicações móveis por satélite, é determinado o comportamento estatístico da degradação conjunta quando utilizadas antenas de diferentes diâmetros, e fixados os parâmetros do erro de apontamento em $\delta = 1,75$ e $\gamma = 0,354$, a configuração de blocagem em $N_B = 832$ e $n = 2000$, a frequência de operação em $f = 14,2$ GHz, e o parâmetro de iluminação da antenna em $n = 1$ (iluminação parabólica).

Convém observar que nos diagramas de radiação expressos em (12), os valores máximos dos lóbulos laterais independem do diâmetro da antenna. O primeiro lóbulo lateral, por exemplo, apresenta um valor máximo igual a $-24,6$ dB, o segundo lóbulo um valor máximo de $-33,6$ dB e o terceiro um valor máximo de $-39,7$ dB. No entanto, com o aumento do diâmetro, os lóbulos laterais ficam mais próximos do eixo da antenna, como ilustrado na Figura 2.

A FDPC da degradação conjunta z é apresentada na Figura 3 para diversos valores de diâmetro da antenna. Observe que o aumento do diâmetro da antenna da estação móvel provoca um aumento significativo na degradação do enlace. Além disso, há pontos de inflexão nas curvas, causados pelos lóbulos laterais dos diagramas de radiação. Essas inflexões ocorrem nos mesmos valores de degradação correspondentes aos valores máximos de cada lóbulo ($24,6$ dB, $33,6$ dB, $39,7$ dB, ...).

A seguir, é feito o dimensionamento do enlace em um dos cenários de operação previstos em [5]. A Recomendação ITU-R S.1521-1 [5] estabelece os objetivos de desempenho para enlaces por satélite baseados em Hierarquia Digital Síncrona (SDH). Os parâmetros de desempenho considerados são a

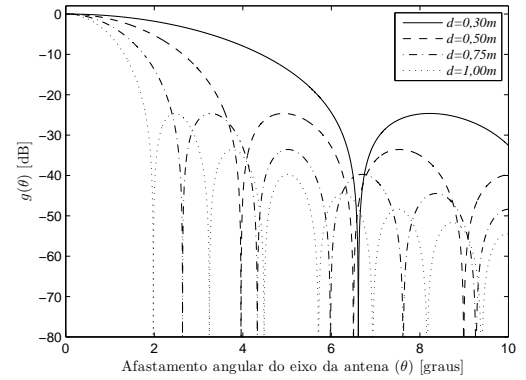


Fig. 2. Variação do diagrama de radiação com o diâmetro da antenna.

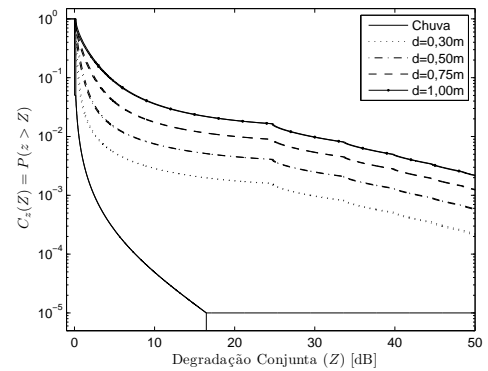


Fig. 3. Influência do diâmetro da antenna na FDPC da degradação conjunta.

FDPC da BER, a ESR, a SESR e a BBER. A taxa de bits considerada neste cenário é de $R_b = 1664$ bits/s, e assim temos que o comprimento do bloco é de $N_B = 832$ bits, e a taxa de blocos é de $n = 2000$ blocos/s. O diâmetro da antenna é de $d = 0,30$ m.

Além disso, são analisados diversos valores dos parâmetros do erro de apontamento da antenna. Supondo um sistema que possa ser configurado com uma razão $(E_b/N_0)_{CS}$ máxima de 40 dB, são definidas limitações para o comportamento do erro de apontamento.

Para o cenário avaliado, são definidos em [5] três objetivos para o mesmo valor de BER, e portanto o dimensionamento é realizado considerando apenas o objetivo mais restritivo. Mais especificamente, é necessário determinar o menor valor da razão $(E_b/N_0)_{CS}$ para que $P(b > 10^{-8}) < 3,6 \times 10^{-4}$. A Figura 4 apresenta o comportamento de $P(b > 10^{-8})$ em função da razão $(E_b/N_0)_{CS}$, para diferentes valores dos parâmetros do erro de apontamento, quando não há nenhum tipo de degradação e quando o enlace é sujeito apenas à degradação por chuvas. É possível ainda comparar cada curva com o objetivo de desempenho.

Observe que, para parâmetros do erro de apontamento, dentre os avaliados, com valores iguais ou piores que $(\delta = 1,80; \gamma = 0,250)$, não é possível atender o objetivo com um sistema cuja razão $(E_b/N_0)_{CS}$ seja limitada em 40 dB.

Nas figuras 5 a 7 podem ser observados os desempenhos relacionados à ESR, à SESR e à BBER, que podem ser comparados com os respectivos objetivos definidos em [5].

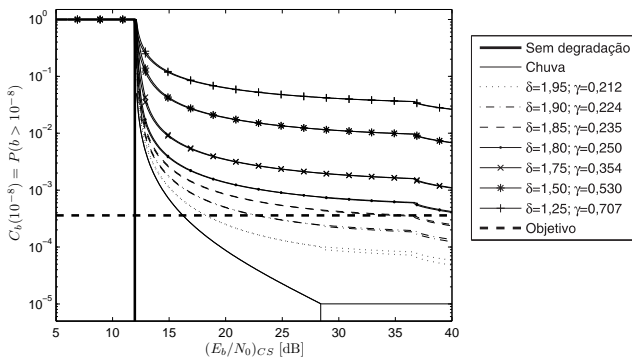


Fig. 4. Dimensionamento pelo critério da taxa de erro de bit: $C_b(10^{-8}) < 3,6 \times 10^{-4}$.

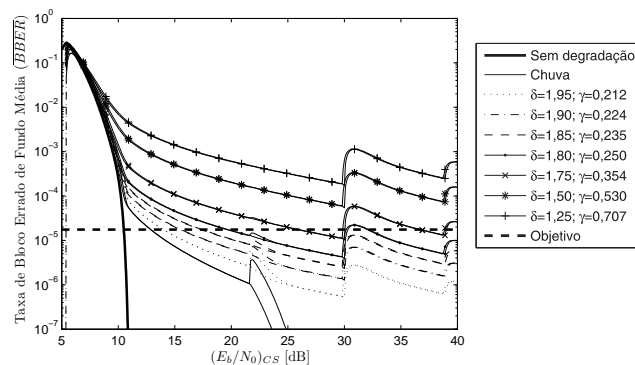


Fig. 7. Dimensionamento pelo critério da taxa de bloco errado de fundo: $BBER < 1,75 \times 10^{-5}$.

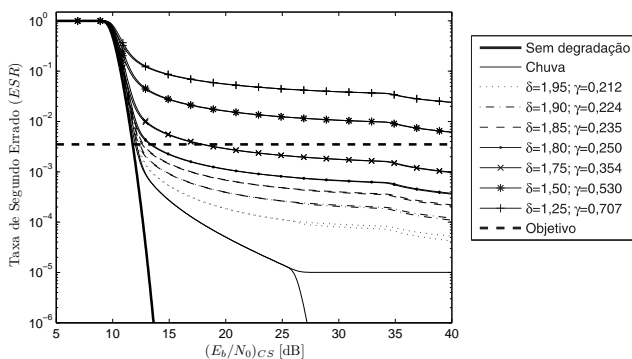


Fig. 5. Dimensionamento pelo critério da taxa de segundo errado: $ESR < 3,5 \times 10^{-3}$.

Note que as restrições impostas à FDPC da BER são mais restritivas que as impostas aos demais parâmetros de desempenho. Observe também que o efeito dos lóbulos laterais na BBER é diferente do efeito nos demais parâmetros. Os pontos de inflexão observados nas curvas de SESR provocam aumentos bruscos do valor da BBER, e assim maiores valores de $(E_b/N_0)_{CS}$ podem prejudicar o desempenho em termos da taxa de blocos errados de fundo.

V. CONCLUSÕES

Com o erro de apontamento da antena, é esperada uma degradação do enlace por satélite, cujo comportamento es-

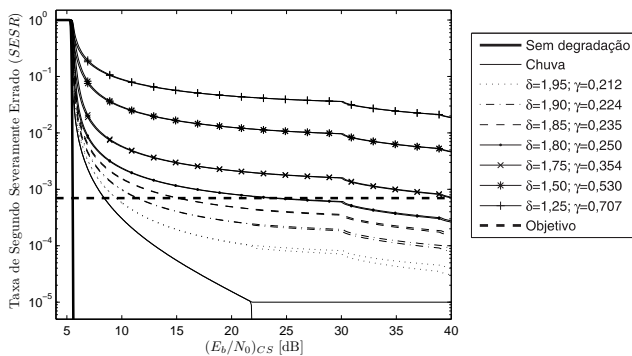


Fig. 6. Dimensionamento pelo critério da taxa de segundo severamente errado: $SESR < 7 \times 10^{-4}$.

tatístico é relacionado ao diagrama de radiação da antena da estação terrena móvel. Verificou-se, como esperado, que o uso de antenas de maior diretividade provoca uma piora significativa do desempenho do enlace. Observou-se ainda que, quando o sistema é submetido a erros de apontamento de maior magnitude, a degradação resultante é dominante em relação à degradação por chuvas. Além disso, erros de apontamento muito grandes podem impossibilitar o cumprimento dos objetivos de desempenho, tornando essencial que os sistemas de compensação de movimento da estação móvel sejam suficientemente eficazes para reduzir o erro de apontamento a níveis aceitáveis.

O método proposto permite a avaliação do desempenho do enlace móvel para qualquer meio de transporte utilizado, sendo necessária a determinação adequada dos valores dos parâmetros da função característica da densidade de probabilidade do erro de apontamento, de acordo com as características do veículo, do sistema de compensação de movimento e do terreno.

REFERÊNCIAS

- [1] Arrais, Marcus V. G.; Fortes, José Mauro P. Efeito do erro de apontamento de antenas fixadas em plataformas móveis no desempenho de sistemas de comunicação digital por satélite, Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, 2011.
- [2] Working Document on Off-Axis EIRP Emissions in the Presence of Motion-Induced Antenna Pointing Errors - Doc. 4A/220-E.
- [3] Recommendation ITU-R P.618-10 - Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication system, September 2009.
- [4] Sampaio Neto, R. Técnicas de modulação/demodulação. PTDD - Programa de Treinamento em Transmissão Digital, Embratel, 1988.
- [5] Allowable error performance for a hypothetical reference path based on synchronous digital hierarchy. Recommendation ITU-R S.1521-1, 2010.
- [6] Andrade, Eleonora A. M. de; Fortes, José Mauro P. Consideração Conjunta da Atenuação por Chuvas e de Interferências Externas na Estimativa dos Parâmetros de Desempenho de Enlaces Digitais Terrestres, 2008.
- [7] G.Maral, M. Bousquet, Satellite Communications Systems: Systems Techniques and Technology. John Wiley & Sons, 2000.
- [8] Recommendation ITU-R S.1323 - Maximum permissible levels of interference in a satellite network (GSO/FSS; non-GSO/FSS; non-GSO/MSS feeder links)* in the fixed-satellite service caused by other codirectional FSS networks below 30 GHz, 1997.
- [9] M. Shao and C. L. Nikias, "Signal Processing with Fractional Lower Order Moments: Stable Processes and Their Applications," Proceedings of the IEEE, vol. 81, no. 7, pp. 986-1010, July 1993.