

# Efeito da modelagem probabilística de parâmetros no cálculo da interferência agregada produzida por satélites geoestacionários em receptores do Serviço Fixo Terrestre na faixa de 7 GHz

Hygson Assef Pereira da Rocha e José Mauro Fortes

**Resumo**—Este artigo analisa a proteção de receptores do Serviço Fixo Terrestre (*Fixed Service* - FS) contra a interferência agregada produzida pela transmissão de múltiplos satélites geoestacionários do Serviço Fixo por Satélite (*Fixed Satellite Service* - FSS) na faixa de 7 GHz. Estudos recentes, realizados no âmbito do Setor de Radiocomunicações da União Internacional de Telecomunicações (ITU-R), consideraram modelos matemáticos conservadores. Este trabalho desenvolve uma análise probabilística dessa interferência agregada, baseada em um modelo matemático no qual as densidades de fluxo de potência produzidas pelos satélites na superfície da Terra e os ganhos nos lóbulos laterais da antena receptora do FS são caracterizados como variáveis aleatórias. O modelo matemático proposto foi aplicado a um cenário específico e os resultados obtidos foram comparados àqueles resultantes do cálculo determinístico.

**Palavras-Chave**—interferência; modelagem probabilística; satélites geoestacionários; serviço fixo terrestre.

**Abstract**—This paper analyzes the protection of Fixed Service (FS) receivers from the aggregate interference produced by the transmission of multiple Fixed Satellite Service (FSS) geostationary satellites in the 7 GHz band. Recent studies within the Radiocommunication Sector of the International Telecommunication Union (ITU-R) have considered conservative mathematical models. This work develops a probabilistic analysis of this aggregate interference, based on a mathematical model in which the power flux density produced by the satellites on the Earth surface and the FS receiving antenna side-lobe gains are characterized as random variables. The proposed mathematical model was applied to a specific scenario and the obtained results were compared to those from the deterministic calculation.

**Keywords**—interference; probabilistic modeling; geostationary satellites; fixed service.

## I. INTRODUÇÃO

O compartilhamento de frequências entre sistemas de comunicações por satélite e sistemas terrestres tem sido objeto de estudos desde o aparecimento dos primeiros sistemas comerciais de comunicações por satélite. Com o objetivo de avaliar a possibilidade de compartilhamento entre o FSS e o outros serviços na faixa de 7.150 a 7.250 MHz, o Setor de Radiocomunicações da União Internacional de Telecomunicações (ITU-R) realizou estudos de 2012 a 2015, compilados em [1], que levaram em consideração modelos

matemáticos simplificados, que utilizaram uma distribuição uniforme de estações receptoras do FS e histogramas de ângulos de elevação e largura de feixe das antenas do Serviço Fixo (FS), obtidos a partir do banco de dados do Serviço Fixo Terrestre da ITU.

Um caso particular de interesse se refere à interferência produzida pela transmissão de vários satélites geoestacionários do FSS em receptores do FS na faixa de 7 GHz. Conforme consta na Recomendação ITU-R 1107-2 [2], a proteção dos receptores do FS operando nessa faixa de frequência, considerando que o desvanecimento é controlado pelo multipercurso, é dada pelo critério da Recomendação ITU-R F.758-5 [3], que estabelece um limite ao comportamento estatístico da razão interferência agregada-ruído térmico no receptor. Os estudos que abordaram esse caso particular consideraram algumas situações de pior caso. Mais especificamente, utilizaram um diagrama de radiação de referência para a antena receptora do FS e consideraram que cada um dos satélites interferentes produzia na superfície da Terra a densidade de fluxo de potência máxima permitida, especificada no Artigo 21 do Regulamento de Radiocomunicações (RR) da ITU. Uma questão a ser analisada é quantificar o quão pessimistas são essas hipóteses.

Para responder essa questão, este artigo considera um cálculo de interferência baseado em um modelo matemático no qual as densidades de fluxo de potência dos satélites e os ganhos nos lóbulos laterais das antenas receptoras do FS são modelados como variáveis aleatórias. Detalhes desse modelo matemático são apresentados na Seção II. Na Seção III, o modelo proposto é aplicado a uma situação específica envolvendo múltiplos satélites geoestacionários e receptores do FS localizados em diferentes latitudes. Os resultados obtidos são comparados àqueles do cálculo tradicional (determinístico) de interferência. Finalmente, na Seção IV, é apresentada a conclusão deste estudo.

## II. MODELO MATEMÁTICO

Considere a geometria ilustrada na Figura 1, na qual um receptor do Serviço Fixo Terrestre (FS) está sujeito à interferência produzida pela transmissão de um satélite geoestacionário  $S_k$ . A densidade de potência do sinal interferente produzido pelo satélite  $S_k$ , (em W/Hz), é dada por [4]

$$i_k = \frac{\lambda^2}{4\pi\ell_a} pfd_k g(\psi_k), \quad (1)$$

Hygson Assef Pereira da Rocha e José Mauro Fortes, Centro de Estudos em Telecomunicações, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, Brasil, E-mails: hygson@cetuc.puc-rio.br e jmfortes@cetuc.puc-rio.br.

onde  $pdf_k$  é a densidade de fluxo de potência (em  $W/m^2Hz$ ) produzida na superfície da Terra pelo satélite  $S_k$ , em condição de propagação em espaço livre, na posição geográfica do receptor do FS. Ainda em (1),  $\lambda$  é o comprimento de onda correspondente à frequência da portadora interferente,  $\ell_a$  é a perda no alimentador da antenna receptora do FS,  $g(\cdot)$  é o diagrama de radiação dessa antenna e  $g(\psi_k)$  é o seu ganho na direção  $\psi_k$  do satélite  $S_k$ .

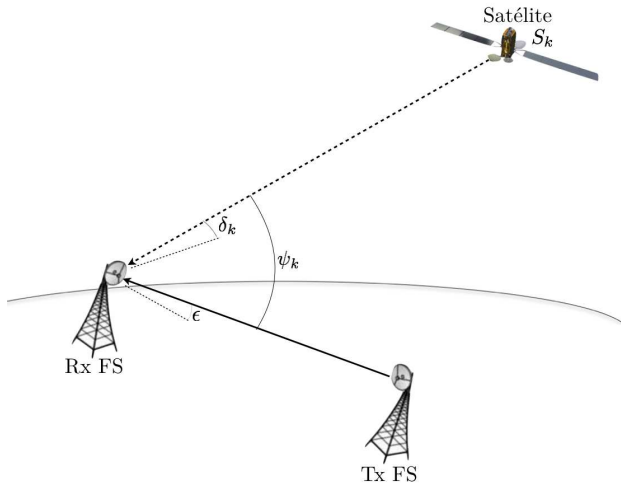


Fig. 1. Interferência produzida pela transmissão do satélite  $S_k$  no receptor de uma estação terrestre do Serviço Fixo (FS).

A densidade de potência da interferência agregada produzida, no receptor FS, pela transmissão de  $m$  satélites geoestacionários é dada por

$$i = \sum_{k=1}^m i_k. \quad (2)$$

No cálculo tradicional (determinístico) da densidade de potência interferente agregada, o diagrama de radiação  $g(\cdot)$  da antenna receptora do FS é usualmente dado por um diagrama de referência  $g_{ref}(\cdot)$ , que não leva em consideração o comportamento oscilatório do ganho nos lóbulos laterais das antenas reais. Além disso, são utilizados, para as densidades de fluxo de potência  $pdf_k$ , os limites máximos permitidos pela Tabela 21-4 do Artigo 21 do Regulamento de Radiocomunicações (RR). Esses limites são definidos por uma máscara de referência  $pdf_{max}(\delta)$  cujos valores variam em função do ângulo de chegada ( $\delta$ ) do sinal.

Note que o cálculo de  $i_k$  em (1) depende da posição geográfica do receptor do FS, das posições dos satélites  $S_k$ ,  $k = 1, \dots, m$ , e do apontamento (azimute e elevação) da antenna receptora do FS. Na modelagem probabilística proposta neste trabalho, as densidades de fluxo de potência dos satélites,  $pdf_k$ , e os ganhos da antenna receptora do FS nos lóbulos laterais,  $g(\psi_k)$  para  $|\psi_k| > \psi_m$  ( $2\psi_m$  é a largura do lóbulo principal), são caracterizados, respectivamente, pelas variáveis aleatórias  $x_k$  e  $y_k$ . Nesse caso,  $i_k$  é também uma variável aleatória,

caracterizada por

$$i_k = \begin{cases} a g_{ref}(\psi_k) x_k & ; |\psi_k| \leq \psi_m \\ a x_k y_k & ; |\psi_k| > \psi_m \end{cases} \quad (3)$$

onde  $a = \lambda^2 / (4\pi\ell_a)$  e  $g_{ref}(\psi_k)$  é o ganho da antenna receptora do FS na direção  $\psi_k$  do satélite  $S_k$ . Como  $x_k$  e  $y_k$  podem ser consideradas variáveis aleatórias estatisticamente independentes, a função densidade de probabilidade da densidade de potência do sinal interferente  $i_k$  é dada por

$$p_{i_k}(Z) = \begin{cases} \frac{1}{a g_{ref}(\psi_k)} p_{x_k}\left(\frac{Z}{a g_{ref}(\psi_k)}\right) & ; |\psi_k| \leq \psi_m \\ \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{aX} p_{x_k}(X) p_{y_k}\left(\frac{Z}{aX}\right) dX & ; |\psi_k| > \psi_m \end{cases} \quad (4)$$

Considerando-se que  $i_k$ ,  $k = 1, \dots, m$ , são variáveis aleatórias estatisticamente independentes, a função densidade de probabilidade da densidade de potência da interferência agregada  $i$ , dada por (2), escreve-se

$$p_i(Z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} M_i(v) e^{-jvZ} dv, \quad (5)$$

com

$$M_i(v) = \prod_{k=1}^m M_{i_k}(v), \quad (6)$$

sendo  $M_{i_k}(v)$  a função característica da variável aleatória  $i_k$ , definida por

$$M_{i_k}(v) = \int_{-\infty}^{\infty} p_{i_k}(Z) e^{jvZ} dZ. \quad (7)$$

Considerando-se (7) e (4), obtém-se

$$M_{i_k}(v) = \begin{cases} M_{x_k}(a g_{ref}(\psi_k)v) & ; |\psi_k| \leq \psi_m \\ \int_{-\infty}^{\infty} p_{x_k}(X) M_{y_k}(avX) dX & ; |\psi_k| > \psi_m \end{cases} \quad (8)$$

Seja  $i_{dB}$  a interferência agregada expressa em  $dB[W/Hz]$ , ou seja,  $i_{dB} = 10 \log_{10}(i)$ . A função densidade de probabilidade da variável aleatória  $i_{dB}$  é, então, dada por

$$p_{i_{dB}}(I) = \frac{\ln(10)}{10} 10^{I/10} p_i(10^{I/10}) \quad (9)$$

e sua função distribuição de probabilidade é dada por

$$F_{i_{dB}}(I) = P(i_{dB} \leq I) = \int_{-\infty}^I p_{i_{dB}}(\xi) d\xi. \quad (10)$$

O critério de proteção do Serviço Fixo (FS) definido na Recomendação ITU-R F.758-5 [3] estabelece que a razão, em  $dB$ , entre a densidade de potência da interferência agregada  $i$  e a densidade de potência do ruído térmico  $n$  na entrada do receptor do FS não deve exceder  $-10$   $dB$ , ou seja,

$$\left(\frac{i}{n}\right)_{dB} \leq -10. \quad (11)$$

É importante ressaltar que esse limite considera uma situação de pior caso, na qual as densidades de fluxo de potência produzidas por cada satélite na superfície da Terra são as máximas

permitidas pela máscara de referência do RR, variando com o ângulo de chegada  $\delta_k$ , ou seja,  $pdf_k = pdf_{max}(\delta_k)$ , e os ganhos nos lóbulos laterais da antena receptora do FS são iguais ao do diagrama de referência, ou seja,  $g(\psi_k) = g_{ref}(\psi_k)$ .

Numa situação mais realista, como nem todos os ganhos nos lóbulos laterais da antena receptora do FS (nas direções dos satélites interferentes) correspondem aos valores dados pelo diagrama de referência e nem todas as densidades de fluxo de potência, produzidas pelos satélites na superfície da Terra, correspondem aos valores máximos dados pela máscara do RR, a probabilidade da razão interferência agregada-ruído térmico ser menor ou igual a  $-10$  dB pode ser muito baixa. Assim, no presente trabalho, como essa razão é caracterizada por uma variável aleatória, sugere-se a utilização de um critério de proteção alternativo, no qual se permite que  $(i/n)_{dB}$  possa ser maior que  $-10$ , mas com uma probabilidade  $p$  suficientemente pequena, ou seja,

$$P\left(\left(\frac{i}{n}\right)_{dB} > -10\right) \leq p. \quad (12)$$

Esse critério pode ser reescrito como

$$C_{(i/n)_{dB}}(-10) \leq p, \quad (13)$$

onde  $C_{(i/n)_{dB}}(\cdot)$  denota a distribuição cumulativa de probabilidade da razão  $(i/n)_{dB}$ , definida por

$$C_{(i/n)_{dB}}(Z) = P\left(\left(\frac{i}{n}\right)_{dB} > Z\right) = 1 - F_{i_{dB}}(Z + n_{dB}). \quad (14)$$

Neste trabalho, considerou-se um caso particular em que os ganhos nos lóbulos laterais da antena receptora do FS são variáveis aleatórias com distribuição gama, ou seja, suas funções densidade de probabilidade são dadas por

$$p_{y_k}(Y) = \frac{\beta_k^{\alpha_k}}{\Gamma(\alpha_k)} Y^{\alpha_k-1} e^{-\beta_k Y} u(Y) \quad (15)$$

Os parâmetros  $\alpha_k$  e  $\beta_k$  são determinados a partir da Razão Desvio Padrão-Média (*RDFPM*), dada por  $RDFPM = 1/\sqrt{\alpha_k}$ , e da condição  $P(y_k > g_{ref}(\psi_k)) = 0, 1$ . A escolha da variável aleatória com distribuição gama foi feita com base em resultados de um estudo realizado para o Intelsat [5], visando determinar, a partir de diagramas de radiação reais, a função densidade de probabilidade mais adequada para modelar os ganhos nos lóbulos laterais das antenas receptoras.

As densidades de fluxo de potência  $x_k$  dos satélites geoestacionários foram consideradas variáveis aleatórias uniformes no intervalo  $[a_k, b_k]$ , ou seja,

$$p_{x_k}(X) = \begin{cases} \frac{1}{b_k - a_k} & ; \quad X \in [a_k, b_k] \\ 0 & ; \quad X \notin [a_k, b_k] \end{cases} \quad (16)$$

onde  $b_k = pdf_{max}(\delta_k)$  e  $a_k$  corresponde aos valores de densidade de fluxo de potência  $\Delta$  dB abaixo de  $b_k$ , ou seja,  $a_k = 10^{(10 \log b_k - \Delta)/10}$ . Dessa forma, as funções características das variáveis aleatórias  $x_k$  e  $y_k$  são dadas, respectivamente, por

$$M_{x_k}(v) = \frac{1}{jv(b_k - a_k)} (e^{jvb_k} - e^{jva_k}) \quad (17)$$

e

$$M_{y_k}(v) = \left(\frac{\beta_k}{\beta_k - iv}\right)^{\alpha_k}. \quad (18)$$

Assim, no caso particular em que  $p_{x_k}(X)$  e  $p_{y_k}(Y)$  são dados, respectivamente, por (16) e (15), a função característica da variável aleatória  $i$ , que representa a densidade de potência interferente agregada produzida pelas transmissões dos satélites, pode ser obtida através de (6), (8), (17), (16) e (18), resultando, após manipulações matemáticas,

$$M_i(v) = \prod_{k=1}^{m_1} \frac{1}{jag_k(b_k - a_k)v} (e^{jag_k b_k v} - e^{jag_k a_k v}) \times \prod_{k=1}^{m_2} \frac{\beta_k^{\alpha_k} (\alpha_k - 1)^{-1}}{a(b_k - a_k)v} \left[ \frac{aa_k v + j\beta_k}{(\beta_k - jva a_k)^{\alpha_k}} - \frac{ab_k v + j\beta_k}{(\beta_k - jvb a_k)^{\alpha_k}} \right] \quad (19)$$

Em (19),  $m_1$  é o número de satélites visíveis pelo receptor do FS na direção  $|\psi_k| \leq \psi_m$  (lóbulo principal),  $m_2$  é o número de satélites visíveis na direção  $|\psi_k| > \psi_m$  (lóbulos laterais),  $g_k = g(\psi_k)$  e  $j = \sqrt{-1}$ . Finalmente, a distribuição cumulativa de probabilidade  $C_{(i/n)_{dB}}(Z)$  pode ser obtida a partir de (14), (10), (9), (5) e (19).

### III. RESULTADOS NUMÉRICOS

Nesta seção, a modelagem matemática desenvolvida na Seção II é aplicada a um cenário específico envolvendo 120 satélites geoestacionários, receptores do FS localizados na longitude  $45^\circ S$  e nas latitudes  $0^\circ$ ,  $15^\circ S$ ,  $30^\circ S$ ,  $45^\circ S$  e  $60^\circ S$  e antenas receptoras com ângulo de elevação  $0^\circ$  e azimutes variando de  $0^\circ$  a  $180^\circ$ . Não foram consideradas latitudes do hemisfério norte nem outras longitudes, devido à simetria utilizada na distribuição dos satélites geoestacionários ao longo da órbita. Para cada latitude considerada, foi determinado o comportamento estatístico da interferência agregada (densidade de potência) produzida no receptor do FS pela transmissão dos satélites visíveis, de modo a verificar o atendimento ao critério de proteção em (13).

Conforme sugerido na Recomendação ITU-R F.1107-2 [2], os satélites foram considerados uniformemente distribuídos ao longo da órbita de satélites geoestacionários. Utilizou-se um espaçamento de  $3^\circ$  entre eles. Considerou-se ainda que os valores máximos permitidos para a densidade de fluxo de potência produzida na superfície da Terra pelo  $k$ -ésimo satélite interferente,  $pdf_{max}(\delta_k)$ , são aqueles constantes da Tabela 21-4 do Artigo 21 do Regulamento de Radiocomunicações (RR), na faixa de 7.250 a 7.850 MHz, ou seja, em dB[W/m<sup>2</sup>Hz],

$$10 \log_{10}(pdf_{max}(\delta_k)) = \begin{cases} -188 & ; \quad 0^\circ \leq \delta_k < 5^\circ \\ -188 + 0,5(\delta_k - 5) & ; \quad 5^\circ \leq \delta_k < 25^\circ \\ -178 & ; \quad 25^\circ \leq \delta_k \leq 90^\circ \end{cases} \quad (20)$$

onde  $\delta_k$  representa o ângulo de chegada do sinal transmitido pelo  $k$ -ésimo satélite interferente à superfície da Terra, no ponto onde está localizado o receptor FS. De acordo com [1], considera-se que os limites dessa faixa podem ser aplicados à nova alocação do FSS na faixa de 7.150 a 7.250 MHz.

As características técnicas consideradas para os receptores do FS são especificadas na Tabela I. De acordo com a Recomendação ITU-R F.758-5 [3], esses valores são

considerados típicos para sistemas FS operando na faixa de 7 GHz.

TABELA I  
CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DA ESTAÇÃO RECEPTORA DO FS.

Perda no alimentador da antena ( $L_A$ )	3 dB
Densidade de potência do ruído térmico ( $n_{dB}$ )	-201,5 dB[W/Hz]
Frequência da portadora ( $f$ )	7.200 MHz
Ganho máximo da antena ( $G_{max}$ )	30 dBi
Ângulo de elevação da antena ( $\epsilon$ )	0°
Eficiência da antena ( $\eta$ )	55%

O diagrama de radiação de referência  $g_{ref}(\cdot)$  utilizado a antena receptora do FS é aquele indicado na Recomendação ITU-R F.1245-2 [4] para  $D/\lambda \leq 100$ , ou seja,

$$g_{ref}(\psi_k) = 10^{G_{ref}(\psi_k)/10} \quad (21)$$

onde

$$G_{ref}(\psi_k) = \begin{cases} G_{max} - 2,5 \times 10^{-3} \left( \frac{D}{\lambda} \psi_k \right)^2 & ; 0^\circ \leq \psi_k < \psi_m \\ 39 - 5 \log \left( \frac{D}{\lambda} \right) - 25 \log \psi_k & ; \psi_m \leq \psi_k < 48^\circ \\ -3 - 5 \log \left( \frac{D}{\lambda} \right) & ; 48^\circ \leq \psi_k \leq 180^\circ \end{cases} \quad (22)$$

com  $G_{max}$  sendo o ganho máximo da antena em dBi,  $\lambda$  o comprimento de onda associado à frequência da transmissão e  $D$  o diâmetro da antena, dado por

$$D = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{10^{G_{max}/10}}{\eta}}.$$

Ainda em (22),  $\psi_m$  é dado por

$$\psi_m = \frac{20\lambda}{D} \sqrt{G_{max} - 2 + 15 \log(D/\lambda)} \quad (23)$$

A título de ilustração, considere um receptor do FS com as características da Tabela I, localizado na latitude  $\theta_{FS} = 6^\circ S$  e longitude  $\phi_{FS} = 60^\circ O$  e com uma antena receptora com apontamento na direção do azimute  $10^\circ$ . O cálculo determinístico, que utiliza  $g_{ref}(\cdot)$  e  $pdf_{max}(\delta)$ , conduz a um valor de  $(i/n)_{dB}$  igual a  $-10,4$  dB, atendendo ao critério em (11), que estabelece que  $(i/n)_{dB} \leq -10$  dB. Em uma outra situação, onde o receptor do FS tem sua antena receptora apontada no azimute de  $60^\circ$ , o cálculo determinístico conduz ao valor  $(i/n)_{dB} = -9,7$  dB, não atendendo ao critério em (11).

Na abordagem probabilística, considerando-se  $\Delta = 2$  dB e  $RDPM = 1,2$ , obtém-se, para a segunda situação (azimute de  $60^\circ$ ), a distribuição cumulativa de probabilidade de  $(i/n)_{dB}$  mostrada na Figura 2, onde se verifica que a probabilidade de  $(i/n)_{dB}$  ser maior que  $-10$  dB é  $1,7 \times 10^{-11}$ . Isso significa que o critério de proteção em (11) não é atendido com probabilidade  $1,7 \times 10^{-11}$ . Por outro lado, se o critério de proteção alternativo em (13) fosse considerado, com  $p = 10^{-4}$ , o resultado obtido satisfaria esse critério. A Figura 3 ilustra, para um receptor do FS com as características da Tabela I, localizado na latitude  $\theta_{FS} = 30^\circ S$  e longitude  $\phi_{FS} = 45^\circ O$ , as distribuições cumulativas de probabilidade da razão  $(i/n)_{dB}$

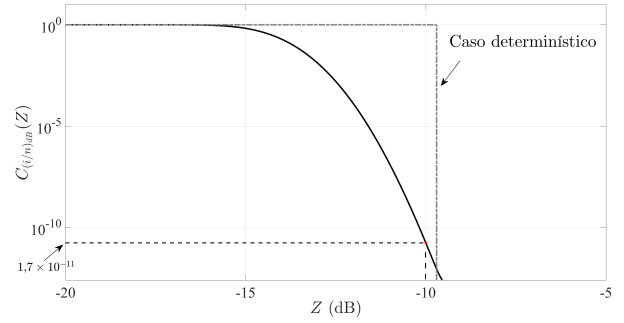


Fig. 2. Distribuição cumulativa de probabilidade (CDF) da variável aleatória  $(i/n)_{dB}$ , obtida a partir de  $\Delta = 2$  dB e  $RDPM = 1,2$ , com o receptor do FS localizado na latitude  $\theta_{FS} = 30^\circ S$ ,  $G_{max} = 30$ ,  $\epsilon = 0^\circ$  e azimute  $\alpha = 60^\circ$ .

para diferentes direções de azimute para o apontamento da antena receptora do FS. Nessa figura, está também indicado o critério de proteção em (13), para  $p = 10^{-4}$  (asterisco vermelho). Observe que, para alguns dos azimutes considerados, o critério em (13) não é atendido. Esses azimutes são aqui denominados de azimutes proibidos, que devem ser evitados no apontamento das antenas do FS. Nesse sentido, um diagrama interessante é o da Figura 4, que mostra gráficos em coordenadas polares dos valores de  $(i/n)_{dB}$ , excedidos com probabilidade  $p = 10^{-4}$ , em função dos azimutes de apontamento da antena receptora. A título de comparação, a figura inclui ainda o gráfico correspondente aos valores de  $(i/n)_{dB}$  obtidos pelo cálculo determinístico.

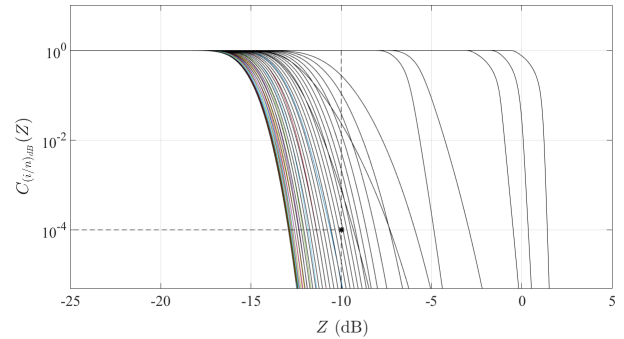


Fig. 3. Exemplos de distribuições cumulativas de probabilidade da razão  $(i/n)_{dB}$ . Cada curva corresponde a um valor diferente do azimute da direção de apontamento da antena receptora do FS.

Os gráficos apresentados na Figura 4 permitem algumas observações. Em primeiro lugar, percebe-se imediatamente o conjunto de azimutes proibidos. No caso determinístico, esse conjunto é formado pelos intervalos  $[40^\circ, 100^\circ]$  e  $[260^\circ, 320^\circ]$ , totalizando  $120^\circ$ . No caso probabilístico, o conjunto de azimutes proibidos é formado pelos intervalos  $[62^\circ, 92^\circ]$  e  $[268^\circ, 298^\circ]$ , totalizando  $60^\circ$  (redução de 50%). Esses números mostram, de maneira clara, o quão pessimista é a abordagem determinística. Em outras latitudes, a redução do conjunto de azimutes proibidos proporcionada pela modelagem probabilística pode ser ainda mais expressiva, conforme indicado, por exemplo, na Figura 5, obtida para receptores do FS localizados na latitude  $15^\circ S$ . Nessa figura, o conjunto de azimutes proibidos é formado pelos intervalos  $[52^\circ, 112^\circ]$

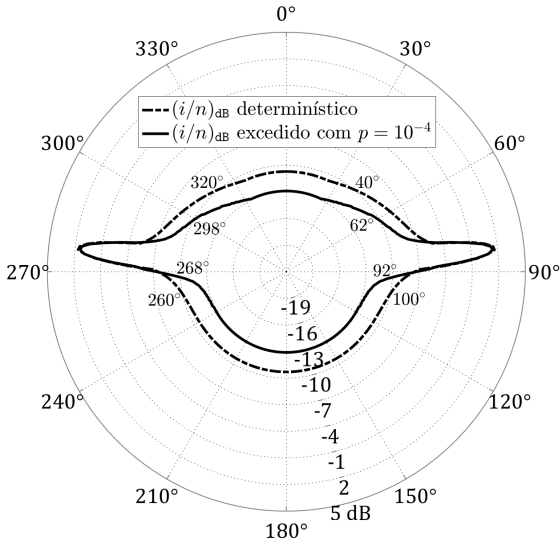


Fig. 4. Curvas  $(i/n)_{dB}$  versus os azimutes da direção de apontamento da antena do FS (coordenadas polares), com  $G_{max} = 30$  dBi e ângulo de elevação  $0^\circ$ , estando o receptor na latitude  $30^\circ S$ .

e  $[248^\circ, 308^\circ]$ , no caso determinístico, e pelos intervalos  $[72^\circ, 96^\circ]$  e  $[264^\circ, 288^\circ]$ , no caso probabilístico, resultando numa redução total de  $120^\circ$  para  $48^\circ$  (redução de 60%). A

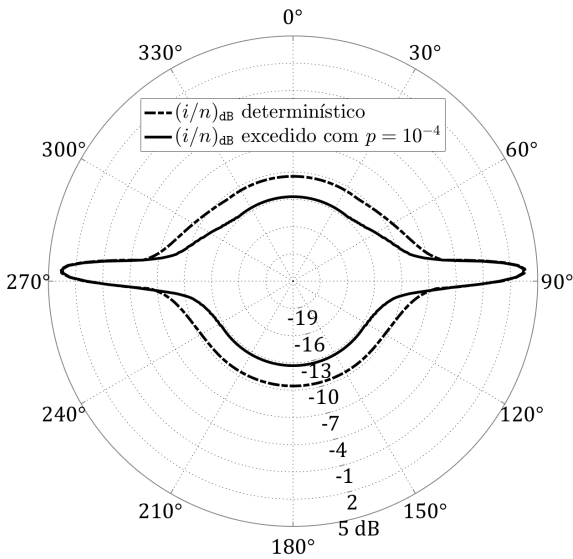


Fig. 5. Curvas  $(i/n)_{dB}$  versus os azimutes da direção de apontamento da antena do FS (coordenadas polares), com  $G_{max} = 30$  dBi e ângulo de elevação  $0^\circ$ , estando o receptor na latitude  $15^\circ S$ .

variação do conjunto de azimutes proibidos com a latitude do receptor do FS pode ser apreciada na Figura 6. Nessa figura, estão indicados os conjuntos de azimutes proibidos correspondentes ao cálculo determinístico e à modelagem probabilística da interferência. Verifica-se uma maior redução no conjunto de azimutes proibidos para receptores do FS localizados em baixas latitudes.

#### IV. CONCLUSÃO

Neste artigo, foi considerada uma situação específica onde satélites geostacionários do Serviço Fixo Por Satélite geram

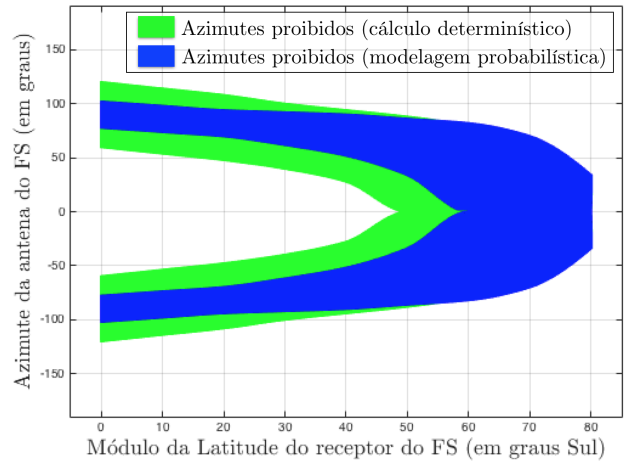


Fig. 6. Variação do intervalo de azimutes proibidos em função da latitude do receptor do FS, com  $G_{max} = 30$  dBi, ângulo de elevação  $0^\circ$  e considerando  $(i/n)_{dB}$  excedido com  $p = 10^{-4}$ .

interferência em receptores do Serviço Fixo operando na faixa de 7 GHz. Foi elaborada uma análise baseada numa modelagem probabilística onde a densidade de fluxo de potência produzida pelos satélites na superfície da Terra e os ganhos nos lóbulos laterais da antena receptora do FS nas direções dos satélites interferentes são modelados por variáveis aleatórias com funções densidade de probabilidade consideradas adequadas para a caracterização dessas variáveis.

Como consequência, a razão  $(i/n)_{dB}$ , referente à interferência agregada, foi caracterizada por uma variável aleatória. Para verificar o atendimento ao critério de proteção do FS, o valor excedido de  $(i/n)_{dB}$  com probabilidade  $p$ , suficientemente pequena, foi determinado para vários valores de azimuth e comparados com os valores obtidos de forma determinística. Os resultados indicaram que o cálculo determinístico de  $(i/n)_{dB}$  é muito pessimista em relação ao cálculo probabilístico, que é mais realista, mostrando uma redução do conjunto de azimutes proibidos crescente com a diminuição da latitude. Para baixas latitudes, a redução é bastante expressiva, variando, por exemplo, de 72% a 50%, para latitudes cujos módulos variam de  $0^\circ$  a  $40^\circ$ , conforme se verifica na Figura 6.

#### REFERÊNCIAS

- [1] *Compatibility studies between the fixed-satellite service and the terrestrial and other space services in the frequency bands 7.150-7.250 MHz (space-to-Earth) and 8.400-8.500 MHz (Earth-to-space)*, Document 4A/591, Grupo de Estudos 4A, Setor de Radiocomunicações, ITU, 2014.
- [2] *Probabilistic analysis for assessing interference into the fixed service from satellites using the geostationary orbit*, Recommendation ITU-R F.1107-2, 2011.
- [3] *System parameters and considerations in the development of criteria for sharing or compatibility between digital fixed wireless systems in the fixed service and systems in other services and other sources of interference*, Recommendation ITU-R F.758-5, 2012.
- [4] *Mathematical model of average and related radiation patterns for line-of-sight point-to-point fixed wireless system antennas for use in certain coordination studies and interference assessment in the frequency range from 1 GHz to about 70 GHz*, Recommendation ITU-R F.1245-2, 2012.
- [5] Cordova M. A. O., *Efeito da modelagem probabilística dos ganhos nos lóbulos laterais das antenas das estações terrenas no cálculo da interferência entre redes de comunicação por satélite*, Dissertação de mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2012.