

## Hygson Assef Pereira da Rocha

## Efeito da modelagem probabilística de parâmetros na análise da interferência produzida por múltiplos satélites geoestacionários em receptores do Serviço Fixo Terrestre

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio.

Orientador: Prof. José Mauro Pedro Fortes

Rio de Janeiro setembro de 2016



## Hygson Assef Pereira da Rocha

## Efeito da modelagem probabilística de parâmetros na análise da interferência produzida por múltiplos satélites geoestacionários em receptores do Serviço Fixo Terrestre

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

> **Prof. José Mauro Pedro Fortes** Orientador Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

> **Prof. Raimundo Sampaio Neto** Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

> > **Prof. Ernesto Leite Pinto** Instituto Militar de Engenharia – IME

**Prof. Márcio da Silveira Carvalho** Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 12 de setembro de 2016

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

### Hygson Assef Pereira da Rocha

Graduou-se em Engenharia de Comunicações pelo Instituto Militar de Engenharia - IME (Rio de Janeiro, Brasil). Fez Especialização em Engenharia de Redes e Sistemas de Telecomunicações no Instituto Nacional de Telecomunicações - Inatel (Minas Gerais, Brasil).

Ficha Catalográfica
Rocha, Hygson Assef Pereira da
Efeito da modelagem probabilística de parâmetros na análise da interferência produzida por múltiplos satélites geoestacionários em receptores do Serviço Fixo Terrestre / Hygson Assef Pereira da Rocha; orientador: José Mauro Pe- dro Fortes. – 2016.
91 f.: il.; 29,7 cm
Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2016.
Inclui referências bibliográficas.
1. Engenharia Elétrica – Teses. 2. Interferência; 3. Satélites Geoestacionários; 4. Modelagem Probabilística; 5. Serviço Fixo Terrestre. I. Fortes, José Mauro Pedro. II. Pon- tifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento

de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

## Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao meu orientador, professor José Mauro, presente ao longo de toda a jornada do mestrado. Sem seu apoio e orientação, este trabalho não teria sido possível. Agradeço à CAPES e à PUC-Rio, pelo auxílio financeiro concedido através de bolsa de pós-graduação do PROSUP.

Agradeço também aos meus pais, Maria Helena e Nelson Rocha, por terem investido na minha educação e por terem me ensinado a importância do estudo e da qualificação profissional.

Um agradecimento especial à minha esposa Carina, pela paciência e compreensão durante os inúmeros dias de dedicação a este trabalho e pelo incentivo nas horas difíceis.

### Resumo

Rocha, Hygson Assef Pereira da; Fortes, José Mauro Pedro. Efeito da modelagem probabilística de parâmetros na análise da interferência produzida por múltiplos satélites geoestacionários em receptores do Serviço Fixo Terrestre. Rio de Janeiro, 2016. 91p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

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. Esta dissertação analisa a proteção de receptores do Serviço Fixo Terrestre (FS - Fixed Service) contra a interferência agregada produzida pela transmissão de múltiplos satélites geoestacionários do Serviço Fixo por Satélite (FSS - Fixed Satellite Service) na faixa de 7 GHz. Estudos recentes, realizados no âmbito do Setor de Radicomunicações da União Internacional de Telecomunicações (ITU-R), consideraram modelos matemáticos determinísticos 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 alguns cenários específicos e os resultados obtidos foram comparados àqueles resultantes do cálculo determinístico.

## Palavras-chave

Interferência;. Satélites Geoestacionários;. Modelagem Probabilística;. Serviço Fixo Terrestre.

### Abstract

Rocha, Hygson Assef Pereira da; Fortes, José Mauro Pedro(Adviser). Effect of the probabilistic modeling of parameters in the analysis of the interference produced by multiple geostationary satellites in Fixed Service receivers. Rio de Janeiro, 2016. 91p. MsC Thesis – Departmento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The sharing of frequencies between satellite communication systems and terrestrial systems have been studied since the appearance of the first commercial satellite comunicacacoes. This dissertation analyzes the protection of Fixed Service (FS) receivers from the aggregate interference produced by the transmissions 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 deterministic 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 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 some specific scenarios and the obtained results were compared to those resulted from the deterministic calculation.

### Keywords

Interference;. Geostationary Satellites;. Probabilistic Modeling;. Fixed Service.

# Sumário

1	Introdução	<b>14</b>	
2	Descrição do Problema	16	
3	Modelo Matemático	20	
4	Resultados Numéricos	30	
4.1	Influência da variação dos parâmetros	30	
4.1.	1 Razão Desvio Padrão-Média	34	
4.1.	2 Ângulo de elevação	34	
4.1.	3 Azimute da antena receptora do FS	35	
4.1.	4 Latitude do receptor do FS	38	
4.2	Considerações de cenários específicos	40	
4.2.	1 Antena receptora do FS com ganho de 30 dBi	40	
4.2.	4.2.2 Antena receptora do FS com ganho de 20 dBi		
4.2.	3 Antena receptora do FS com ganho de 12 dBi	50	
4.2.	4 Comentários sobre os resultados apresentados	55	
5	Conclusões	57	
Referências bibliográficas			
А	Mudança de base	61	
В	Diagramas de azimutes complementares	64	
B.1	Antena receptora do FS com ganho de 30 dB e 1 grau de elevação	64	
B.2	Antena receptora do FS com ganho de 30 dB e 5 graus de elevação	69	
B.3	Antena receptora do FS com ganho de 20 dB e 1 grau de elevação	73	
B.4	Antena receptora do FS com ganho de 20 dB e 5 graus de elevação	78	
B.5	Antena receptora do FS com ganho de 12 dB e 1 grau de elevação	82	
B.6	Antena receptora do FS com ganho de 12 dB e 5 graus de elevação	87	

# Lista de figuras

2.1	Geometria que ilustra a interferência produzida pela transmissão de um satélite geoestacionário $S_k$ em um receptor do FS.	16
3.1 3.2 3.3	Diagrama ilustrando os vetores de posição geográfica do receptor do FS e de posição do satélite geoestacionário $S_k$ . Sistema de coordenadas centrado na posição do receptor do FS. Geometria ilustrando os ângulos $\delta_k$ (ângulo de chegada do sinal transmitido pelo satélite $S_k$ ) e $\psi_k$ (ângulo entre a direção de	20 21
	apontamento da antena receptora do FS e a direção do satélite $S_k$ ).	22
3.4	fdp de uma variável aleatória com distribuição gama.	27
4.1	Limites de densidade de fluxo de potência na superfície da Terra, de 7.250 a 7.750 MHz, de acordo com o Art. 21 do Regulamento de Radiocomunicações (RR) da ITU.	31
4.2 4.3	Diagramas de radiação de antenas receptoras da estação do FS. Função Distribuição Cumulativa de Probabilidade (CPDF) da va- riável aleatória $(i/n)_{dB}$ , obtida a partir de $\Delta = 2$ dB e $RDPM =$ 1,2, considerando-se o receptor do FS localizado na latitude $\theta_{FS} =$	33
4.4	$30^{\circ}$ S, com uma antena receptora com angulo de elevação $\epsilon = 0^{\circ}$ , ganho máximo $G_{\text{max}} = 30$ dBi e apontamento na direção do azi- mute $\alpha = 60^{\circ}$ . Funções de Distribuição Cumulativa de Probabilidade (CPDF) da	33
	variável aleatória $(i/n)_{dB}$ , obtidas a partir de $\Delta = 2$ dB e $RDPM =$ 1,0 / 1,2 / 1,4 / 1,6 / 1,8, considerando-se o receptor do FS localizado na latitude $\theta_{FS} = 30^{\circ}$ S, com uma antena receptora com ângulo de elevação $\epsilon = 0^{\circ}$ , ganho máximo $G_{max} = 30$ dBi e apontamento na direção do azimute $\alpha = 60^{\circ}$ .	34
4.5	Funções de Distribuição Cumulativa de Probabilidade (CPDF) da variável aleatória $(i/n)_{dB}$ , obtidas a partir de $\Delta = 2$ dB e $RDPM =$ 1,2, considerando-se o receptor do FS localizado na latitude $\theta_{FS} =$ $30^{\circ}$ S, com uma antena receptora com ganho máximo $G_{max} = 30$ dBi, apontamento na direção do azimute $\alpha = 60^{\circ}$ e ângulos de	
4.6	elevação $\epsilon = 0^{\circ}, 0, 5^{\circ}, 1^{\circ}, 3^{\circ}$ e 5°. Funções de Distribuição Cumulativa de Probabilidade (CPDF) da razão $(i/n)_{dB}$ , obtidas a partir de $\Delta = 2$ dB e $RDPM = 1,2$ . Cada curva corresponde a um valor diferente de azimute da antena receptora do FS, considerando-se o receptor do FS localizado na	35
4.7	latitude $\theta_{FS} = 30^{\circ}$ S, com uma antena receptora com ganho máximo $G_{\text{max}} = 30$ dBi e ângulo de elevação $\epsilon = 0^{\circ}$ . Diagramas de azimutes determinístico e probabilístico ( $\Delta = 2$ dB e $RDPM = 1,2$ ), com o receptor localizado na latitude $\theta_{FS} = 30^{\circ}$ S,	36
	com antena de ganho $G_{ t max}=$ 30 dBi e elevação $\epsilon=0^\circ.$	37

4.	8	Diagramas de azimutes determinístico e probabilístico ( $\Delta = 2$ dP e <i>DDDM</i> = 1.0 e 1.9), com e recenter localizado na latituda	
		dB e $RDFM = 1,0$ e 1,0), com o receptor localizado na latitude	27
4	0	$\theta_{FS} = 50$ S, com antena de gamo $G_{max} = 50$ dDi e elevação $\epsilon = 0$ .	57
4.	9	Diagramas de azimules ( $\Delta = 2$ dD e <i>RDPM</i> = 1,2), com o receptor	
		localizado ha latitude $\theta_{FS} = 15$ S, com antena de ganno $G_{\text{max}} =$	20
4	10	30 dBi e elevação $\epsilon = 0$ . Maria são da intermeda da asimutas muchidas em função da latituda	38
4.	10	variação do intervaio de azimutes proibidos em função da latitude	
		do receptor do FS, com $G_{\text{max}} = 30$ dBI, angulo de elevação 0,	
		$\Delta = 2 \text{ dB}, \text{ RDPM} = 1,2 \text{ e considerando } (i/n)_{\text{dB}}$ excedido com	00
		$p = 10^{-4}$ .	39
4.	11	Largura da região de azimutes proibidos em função do modulo da	
		latitude do receptor do FS, com $G_{\text{max}} = 30$ dBi, ângulo de elevação	
		$0^{\circ}$ , $\Delta = 2 \text{ dB}$ , $RDPM = 1,0 \text{ e } 1,8 \text{ e considerando } (i/n)_{\text{dB}}$ excedido	
		com $p = 10^{-4}$ .	39
4.	12	Diagramas de azimutes ( $\Delta = 2$ dB e $RDPM = 1,0$ e 1,8), estando	
		o receptor na latitude $\theta_{FS} = 0^{\circ}$ , com $G_{max} = 30$ dBi e $\epsilon = 0^{\circ}$ .	41
4.	13	Diagramas de azimute ( $\Delta = 2 \text{ dB} \text{ e } RDPM = 1,0 \text{ e } 1,8$ ), estando	
		o receptor na latitude $\theta_{FS} = 15^{\circ}$ S, com $G_{max} = 30$ dBi e $\epsilon = 0^{\circ}$ .	41
4.	14	Diagramas de azimutes ( $\Delta = 2 \text{ dB}$ e $RDPM = 1,0$ e 1,8), estando	
		o receptor na latitude $\theta_{FS} = 30^{\circ}$ S, com $G_{max} = 30$ dBi e $\epsilon = 0^{\circ}$ .	42
4.	15	Diagramas de azimutes ( $\Delta = 2 \text{ dB}$ e $RDPM = 1,0$ e 1,8), estando	
		o receptor na latitude $\theta_{FS} = 45^{\circ}$ S, com $G_{max} = 30$ dBi e $\epsilon = 0^{\circ}$ .	42
4.	16	Diagramas de azimutes ( $\Delta=2$ dB e $RDPM=$ 1,0 e 1,8), estando	
		o receptor na latitude $\theta_{FS} = 60^{\circ}$ S, com $G_{max} = 30$ dBi e $\epsilon = 0^{\circ}$ .	43
4.	17	Diagramas de azimutes ( $\Delta=2$ dB e $RDPM=$ 1,0 e 1,8), estando	
		o receptor na latitude $ heta_{FS} = 75^{\circ}$ S, com $G_{max} =$ 30 dBi e $\epsilon = 0^{\circ}$ .	43
4.	18	Variação do intervalo de azimutes proibidos em função da latitude	
		do receptor do FS, com $G_{max} = 30$ dBi, ângulo de elevação $0^{\circ}$ ,	
		$\Delta = 2$ dB, $RDPM = 1,0$ e 1,8 e considerando $(i/n)_{dB}$ excedido	
		$com p = 10^{-4}.$	45
4.	19	Diagramas de azimute ( $\Delta=2$ dB e $R\!D\!P\!M=$ 1,0 e 1,8), estando	
		o receptor na latitude $ heta_{FS} = 0^{\circ}$ , com $G_{max} = 20$ dBi e $\epsilon = 0^{\circ}$ .	46
4.	20	Diagramas de azimute ( $\Delta=2$ dB e $R\!D\!P\!M=$ 1,0 e 1,8), estando	
		o receptor na latitude $\theta_{FS} = 15^{\circ}$ S, com $G_{max} = 20$ dBi e $\epsilon = 0^{\circ}$ .	46
4.	21	Diagramas de azimute ( $\Delta=2$ dB e $R\!D\!P\!M=$ 1,0 e 1,8), estando	
		o receptor na latitude $\theta_{FS} = 30^{\circ}$ S, com $G_{max} = 20$ dBi e $\epsilon = 0^{\circ}$ .	47
4.	22	Diagramas de azimute ( $\Delta=2$ dB e $R\!D\!P\!M=$ 1,0 e 1,8), estando	
		o receptor na latitude $\theta_{FS} = 45^{\circ}$ S, com $G_{max} = 20$ dBi e $\epsilon = 0^{\circ}$ .	47
4.	23	Diagramas de azimute ( $\Delta=2$ dB e $R\!D\!P\!M=$ 1,0 e 1,8), estando	
		o receptor na latitude $ heta_{FS} = 60^{\circ}$ S, com $G_{max} = 20$ dBi e $\epsilon = 0^{\circ}$ .	48
4.	24	Diagramas de azimutes ( $\Delta=2$ dB e $R\!D\!P\!M=$ 1,0 e 1,8), estando	
		o receptor na latitude $ heta_{FS} = 75^{\circ}$ S, com $G_{max} = 20$ dBi e $\epsilon = 0^{\circ}$ .	48
4.	25	Variação do intervalo de azimutes proibidos em função da latitude	
		do receptor do FS, com $G_{ t max}=20$ dBi, ângulo de elevação $0^\circ$ ,	
		$\Delta=2$ dB, $R\!D\!P\!M=$ 1,0 e 1,8 e considerando $(i/n)_{ m dB}$ excedido	
		$com \ p = 10^{-4}.$	50
4.	26	Diagramas de azimute ( $\Delta=2$ dB e $R\!D\!P\!M=$ 1,0 e 1,8), estando	
		o receptor na latitude $ heta_{FS}=0^\circ$ , com $G_{ t max}=$ 12 dBi e $\epsilon=0^\circ.$	51

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1421631/CA

4.27	Diagramas de azimute ( $\Delta=2$ dB e $R\!D\!P\!M=$ 1,0 e 1,8), estando	
	o receptor na latitude $\theta_{FS} = 15^{\circ}$ S, com $G_{max} = 12$ dBi e $\epsilon = 0^{\circ}$ .	51
4.28	Diagramas de azimute ( $\Delta = 2 \text{ dB}$ e $RDPM = 1,0$ e 1,8), estando	
	o receptor na latitude $\theta_{FS} = 30^{\circ}$ S, com $G_{max} = 12$ dBi e $\epsilon = 0^{\circ}$ .	52
4.29	Diagramas de azimute ( $\Delta = 2 \text{ dB} \text{ e } RDPM = 1,0 \text{ e } 1,8$ ), estando	
	o receptor na latitude $\theta_{FS} = 45^{\circ}$ S, com $G_{max} = 12$ dBi e $\epsilon = 0^{\circ}$ .	52
4.30	Diagramas de azimute ( $\Delta = 2 \text{ dB} \text{ e } RDPM = 1,0 \text{ e } 1,8$ ), estando	-
	o receptor na latitude $\theta_{FS} = 60^{\circ}$ S, com $G_{max} = 12$ dBi e $\epsilon = 0^{\circ}$ .	53
4.31	Diagramas de azimute ( $\Delta = 2 \text{ dB} \text{ e } RDPM = 1,0 \text{ e } 1,8$ ), estando	•
4 9 9	o receptor na latitude $\theta_{FS} = 75^{\circ}$ S, com $G_{max} = 12$ dBi e $\epsilon = 0^{\circ}$ .	53
4.32	Variação do intervalo de azimutes proibidos em função da latitude	
	do receptor do FS, com $G_{\text{max}} = 12$ dBI, angulo de elevação $0^{\circ}$ ,	
	$\Delta = 2$ dB, RDPM = 1,0 e 1,8 e considerando $(i/n)_{dB}$ excedido	F 1
	$\operatorname{com} p = 10^{-4}$ .	54
A.1	Geometria para determinação da matriz de mudança de base.	61
B.1	Diagramas de azimutes ( $\Delta = 2$ dB e $RDPM = 1,0$ e 1,8), com o	
	receptor na latitude $\theta_{FS} = 0^{\circ}$ , com $G_{\text{max}} = 30$ dBi e $\epsilon = 1^{\circ}$ .	64
В.2	Diagramas de azimutes ( $\Delta = 2$ dB e $RDPM = 1,0$ e 1,8), com o	05
БЭ	receptor na latitude $\theta_{FS} = 15^{\circ}$ S, com $G_{max} = 30$ dBi e $\epsilon = 1^{\circ}$ .	65
D.3	Diagramas de azimutes ( $\Delta = 2$ dB e $RDPM = 1,0$ e 1,8), com o	GE
Dи	receptor na latitude $\theta_{FS} = 30$ S, com $G_{max} = 30$ dBl e $\epsilon = 1$ . Diagramas de azimutes ( $\Lambda = 2$ dP e $DDDM = 1.0$ e 1.9) com e	00
D.4	Diagramas de azimutes ( $\Delta = 2$ dB e <i>RDFM</i> = 1,0 e 1,0), com o	66
RБ	Diagramas do azimutos ( $\Lambda = 2$ dB o $RDPM = 1.0 \circ 1.8$ ), com o	00
D.J	recentor na latitude $\theta_{TG} = 60^{\circ}$ S com $G_{} = 30$ dBi e $\epsilon = 1^{\circ}$	66
R 6	Diagramas de azimutes ( $\Lambda = 2$ dB e $BDPM = 1.0$ e 1.8) com o	00
D.0	receptor na latitude $\theta_{FS} = 75^{\circ}$ S. com $G_{rer} = 30$ dBi e $\epsilon = 1^{\circ}$ .	67
B.7	Variação do intervalo de azimutes proibidos em função da latitude	0.
	do receptor do FS, com $G_{max} = 30$ dBi, ângulo de elevação 1°,	
	$\Delta = 2$ dB, $RDPM = 1,0$ e 1,8 e considerando $(i/n)_{dB}$ excedido	
	$com \ p = 10^{-4}.$	68
B.8	Diagramas de azimutes ( $\Delta=2$ dB e $R\!D\!P\!M=$ 1,0 e 1,8), com o	
	receptor na latitude $ heta_{FS}=0^\circ$ , com $G_{ t max}=$ 30 dBi e $\epsilon=5^\circ$ .	69
B.9	Diagramas de azimutes ( $\Delta=2$ dB e $RDPM=$ 1,0 e 1,8), com o	
_	receptor na latitude $\theta_{FS} = 15^{\circ}$ S, com $G_{max} = 30$ dBi e $\epsilon = 5^{\circ}$ .	70
B.10	Diagramas de azimutes ( $\Delta = 2 \text{ dB} \text{ e } RDPM = 1,0 \text{ e } 1,8$ ), com o	
D 44	receptor na latitude $\theta_{FS} = 30^{\circ}$ S, com $G_{max} = 30$ dBi e $\epsilon = 5^{\circ}$ .	70
B.11	Diagramas de azimutes ( $\Delta = 2$ dB e $RDPM = 1,0$ e 1,8), com o	<b>F</b> 1
D 10	receptor na latitude $\theta_{FS} = 45^{\circ}$ S, com $G_{max} = 30$ dBi e $\epsilon = 5^{\circ}$ .	71
D.12	Diagramas de azimutes ( $\Delta = 2$ dB e $RDPM = 1,0$ e 1,8), com o	71
R 12	Diagramas de azimutes $(\Lambda - 2) dR = RDPM - 10 \circ 18)$ com o	(1
0.10	recentor na latitude $\theta_{TG} = 75^{\circ}$ com $C_{-} = 30$ dRi e $c = 5^{\circ}$	79
R 14	Variação do intervalo de azimutes proibidos em função da latitude	14
0.1 r	do receptor do FS, com $G_{\text{max}} = 30$ dBi ângulo de elevação 5°	
	$\Delta = 2$ dB. $RDPM = 1.0$ e 1.8 e considerando $(i/n)_{ab}$ excedido	
	$com p = 10^{-4}$ .	73
	-	

B.15	Diagramas de azimutes ( $\Delta = 2$ dB e $RDPM =$ 1,0 e 1,8), estando	
	o receptor na latitude $ heta_{FS} = 0^{\circ}$ , com $G_{max} = 20 \text{ dBi e } \epsilon = 1^{\circ}$ .	74
B.16	Diagramas de azimutes ( $\Delta = 2 \text{ dB}$ e $RDPM = 1,0$ e 1,8), estando	
	o receptor na latitude $\theta_{FS} = 15^{\circ}$ S, com $G_{max} = 20$ dBi e $\epsilon = 1^{\circ}$ .	74
B.17	Diagramas de azimutes ( $\Delta = 2 \text{ dB} \text{ e } RDPM = 1,0 \text{ e } 1,8$ ), estando	
	o receptor na latitude $\theta_{FS} = 30^{\circ}$ S, com $G_{max} = 20$ dBi e $\epsilon = 1^{\circ}$ .	75
B.18	Diagramas de azimutes ( $\Delta = 2 \text{ dB} \text{ e } RDPM = 1,0 \text{ e } 1,8$ ), estando	
	o receptor na latitude $\theta_{FS} = 45^{\circ}$ S, com $G_{max} = 20$ dBi e $\epsilon = 1^{\circ}$ .	75
B.19	Diagramas de azimutes ( $\Delta = 2$ dB e $RDPM = 1,0$ e 1,8), estando	
	o receptor na latitude $\theta_{FS} = 60^{\circ}$ S, com $G_{max} = 20$ dBi e $\epsilon = 1^{\circ}$ .	76
B.20	Diagramas de azimutes ( $\Delta = 2$ dB e $RDPM = 1,0$ e 1,8), estando	
	o receptor na latitude $\theta_{FS} = 75^{\circ}$ S, com $G_{max} = 20$ dBi e $\epsilon = 1^{\circ}$ .	76
B.21	Variação do intervalo de azimutes proibidos em função da latitude	
	do receptor do FS, com $G_{max} = 20$ dBi, ângulo de elevação 1°.	
	$\Delta = 2$ dB. <i>BDPM</i> = 1.0 e 1.8 e considerando $(i/n)_{\text{ap}}$ excedido	
	$com n = 10^{-4}$ .	78
B.22	Diagramas de azimutes ( $\Delta = 2 \text{ dB} \text{ e } RDPM = 1.0 \text{ e } 1.8$ ), estando	
	o receptor na latitude $\theta_{FS} = 0^\circ$ , com $G_{max} = 20$ dBi e $\epsilon = 5^\circ$ .	79
B.23	Diagramas de azimutes ( $\Delta = 2 \text{ dB} \text{ e } RDPM = 1.0 \text{ e } 1.8$ ), estando	
	o receptor na latitude $\theta_{FS} = 15^{\circ}$ S. com $G_{max} = 20$ dBi e $\epsilon = 5^{\circ}$ .	79
B.24	Diagramas de azimutes ( $\Delta = 2 \text{ dB} \text{ e } RDPM = 1.0 \text{ e } 1.8$ ), estando	
	o receptor na latitude $\theta_{FS} = 30^{\circ}$ S, com $G_{max} = 20$ dBi e $\epsilon = 5^{\circ}$ .	80
B.25	Diagramas de azimutes ( $\Delta = 2 \text{ dB} \text{ e } RDPM = 1.0 \text{ e } 1.8$ ), estando	
	o receptor na latitude $\theta_{FS} = 45^{\circ}$ S. com $G_{max} = 20$ dBi e $\epsilon = 5^{\circ}$ .	80
B.26	Diagramas de azimutes ( $\Delta = 2 \text{ dB} \text{ e } RDPM = 1.0 \text{ e } 1.8$ ), estando	
•	o receptor na latitude $\theta_{FS} = 60^{\circ}$ S. com $G_{max} = 20$ dBi e $\epsilon = 5^{\circ}$ .	81
B.27	Diagramas de azimutes ( $\Delta = 2 \text{ dB} \text{ e } RDPM = 1.0 \text{ e } 1.8$ ). estando	-
	o receptor na latitude $\theta_{FS} = 75^{\circ}$ S, com $G_{max} = 20$ dBi e $\epsilon = 5^{\circ}$ .	81
B.28	Variação do intervalo de azimutes proibidos em função da latitude	
	do receptor do FS, com $G_{max} = 20$ dBi, ângulo de elevação 5°.	
	$\Delta = 2$ dB, $RDPM = 1.0$ e 1.8 e considerando $(i/n)_{dB}$ excedido	
	$com \ p = 10^{-4}.$	83
B.29	Diagramas de azimute ( $\Delta = 2$ dB e $RDPM = 1,0$ e 1,8), estando	
	o receptor na latitude $\theta_{FS} = 1^{\circ}$ , com $G_{max} = 12$ dBi e $\epsilon = 1^{\circ}$ .	83
B.30	Diagramas de azimute ( $\Delta = 2$ dB e $RDPM = 1,0$ e 1,8), estando	
	o receptor na latitude $\theta_{FS} = 15^{\circ}$ S, com $G_{max} = 12$ dBi e $\epsilon = 1^{\circ}$ .	84
B.31	Diagramas de azimute ( $\Delta = 2$ dB e $RDPM = 1,0$ e 1,8), estando	
	o receptor na latitude $\theta_{FS} = 30^{\circ}$ S, com $G_{max} = 12$ dBi e $\epsilon = 1^{\circ}$ .	84
B.32	Diagramas de azimute ( $\Delta = 2$ dB e $RDPM = 1,0$ e 1,8), estando	
	o receptor na latitude $\theta_{FS} = 45^{\circ}$ S, com $G_{max} = 12$ dBi e $\epsilon = 1^{\circ}$ .	85
B.33	Diagramas de azimute ( $\Delta = 2$ dB e $RDPM = 1,0$ e 1,8), estando	
	o receptor na latitude $\theta_{FS} = 60^{\circ}$ S, com $G_{max} = 12$ dBi e $\epsilon = 1^{\circ}$ .	85
B.34	Diagramas de azimute ( $\Delta = 2$ dB e $RDPM = 1,0$ e 1,8), estando	
	o receptor na latitude $\theta_{FS} = 75^{\circ}$ S, com $G_{max} = 12$ dBi e $\epsilon = 1^{\circ}$ .	86
B.35	Variação do intervalo de azimutes proibidos em função da latitude	
	do receptor do FS, com $G_{max} = 12$ dBi, ângulo de elevação $1^{\circ}$ .	
	$\Delta = 2$ dB, $RDPM = 1,0$ e 1,8 e considerando $(i/n)_{dB}$ excedido	
	$com p = 10^{-4}.$	86

B.36 Diagramas de azimute ( $\Delta=2$ dB e $R\!D\!P\!M=$ 1,0 e 1,8), estando	
o receptor na latitude $ heta_{FS}=0^\circ$ , com $G_{ t max}=12$ dBi e $\epsilon=5^\circ.$	88
B.37 Diagramas de azimute ( $\Delta=2$ dB e $R\!D\!P\!M=$ 1,0 e 1,8), estando	
o receptor na latitude $ heta_{FS} = 15^{\circ}$ S, com $G_{max} = 12$ dBi e $\epsilon = 5^{\circ}$ .	88
B.38 Diagramas de azimute ( $\Delta=2$ dB e $R\!D\!P\!M=$ 1,0 e 1,8), estando	
o receptor na latitude $ heta_{FS} = 30^\circ$ S, com $G_{max} = 12$ dBi e $\epsilon = 5^\circ$ .	89
B.39 Diagramas de azimute ( $\Delta=2$ dB e $R\!D\!P\!M=$ 1,0 e 1,8), estando	
o receptor na latitude $ heta_{FS} = 45^{\circ}$ S, com $G_{max} = 12$ dBi e $\epsilon = 5^{\circ}$ .	89
B.40 Diagramas de azimute ( $\Delta=2$ dB e $R\!D\!P\!M=$ 1,0 e 1,8), estando	
o receptor na latitude $ heta_{FS}=60^\circ$ S, com $G_{ extsf{max}}=12$ dBi e $\epsilon=5^\circ$ .	90
B.41 Diagramas de azimute ( $\Delta=2$ dB e $R\!D\!P\!M=$ 1,0 e 1,8), estando	
o receptor na latitude $ heta_{FS} = 75^{\circ}$ S, com $G_{max} = 12$ dBi e $\epsilon = 5^{\circ}$ .	90
B.42 Variação do intervalo de azimutes proibidos em função da latitude	
do receptor do FS, com $G_{ t max}=12$ dBi, ângulo de elevação $5^\circ$ ,	
$\Delta=2$ dB, $\mathit{RDPM}=$ 1,0 e 1,8 e considerando $(i/n)_{ t dB}$ excedido	
com $p = 10^{-4}$ .	91

## Lista de tabelas

4.1 Características técnicas da estação receptora do FS. 32

## 1 Introdução

Satélites geoestacionários vêm sendo utilizados em comunicações desde a década de 60. Sendo a órbita de satélites geoestacionários e o espectro de radiofrequências recursos limitados, é importante que esses recursos sejam utilizados de maneira eficiente. Nos últimos anos, o crescimento da demanda por serviços via satélite motivou a procura de novas faixas de frequência (além das já alocadas) para o Servico Fixo por Satélite (FSS - Fixed-Satellite Service) e o uso de satélites não-geoestacionárias, que podem, por exemplo, proporcionar a utilização de antenas menores quando estão em órbitas mais próximas da superfície da Terra. Uma das possibilidades seria a atribuição, ao FSS, das faixas de 7.150 a 7.250 MHz (sentido espaço-Terra) e 8.400 a 8.500 MHz (sentido Terra-espaço). Entretanto, essas faixas de frequência já são atualmente utilizadas por outros serviços, entre eles o Serviço Fixo Terrestre (FS - Fixed Service). Assim, a utilização dessas faixas pelo FSS requer a realização de estudos visando possibilitar que esses dois serviços operem na mesma faixa de frequências sem que haja restrições desnecessárias em quaisquer deles.

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 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, reunidos em (1), (2), (3), (4), (5) e (6), 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 FS, obtidos a partir do banco de dados da ITU.

Análises de interferência envolvendo tipos diferentes de sistemas dependem, em geral, de parâmetros específicos de cada um deles. Ao envolver sistemas por satélite, essas análises têm que considerar não só os parâmetros do enlace via satélite (potências de transmissão, ganhos das antenas, aspectos de propagação, etc), mas também parâmetros relacionados à orbita do satélite. No caso de sistemas que utilizam satélites não-geoestacionários, por exemplo, são considerados os parâmetros descritivos da sua constelação (inclinação dos planos orbitais, número de satélites por plano, número de planos, tipo de órbita, etc.). Do mesmo modo, ao envolver sistemas terrestres, essas análises têm que considerar os parâmetros técnicos específicos dos sistemas terrestres, tais como as potências de transmissão, os ganhos e apontamentos (ângulos de elevação e azimutes) das antenas receptoras e o ruído térmico nos receptores.

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. Para faixas onde o desvanecimento é dominado pelo multipercurso, como é o caso da faixa de 7 GHz, a Recomendação ITU-R F.758-5 (7) estabelece um limite à razão entre a interferência agregada e o ruído térmico no receptor do FS. Os estudos que abordaram esse caso particular consideraram algumas hipóteses conservadoras, que podem representar situações com baixa probabilidade de ocorrência. 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 Art. 21 do Regulamento de Radiocomunicações (RR) da ITU. Na verdade, numa situação real, como o diagrama de radiação das antenas receptoras do FS possui nulos fora do lóbulo principal (comportamento oscilatório), considerar que todos os ganhos nos lóbulos laterais são os do diagrama de referência é uma situação muito pouco provável. Também é baixa a probabilidade de todos os satélites interferentes estarem transmitindo com máxima densidade de fluxo de potência. Uma questão a ser analisada é quantificar o quão conservadoras são essas hipóteses.

Para responder essa questão, este trabalho 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 no Capítulo 3. No Capítulo 2, é descrito o critério de proteção usualmente utilizado para o FS. No Capítulo 4, o modelo matemático desenvolvido é aplicado a cenários específicos envolvendo múltiplos satélites geoestacionários e receptores do FS localizados em diferentes latitudes. Os resultados numéricos obtidos são comparados àqueles resultantes do cálculo tradicional de interferência (determinístico). Finalmente, no Capítulo 5, são apresentadas as conclusões resultantes da análise realizada.

## 2 Descrição do Problema

Considere a geometria ilustrada na Figura 2.1, na qual um receptor do Serviço Fixo Terrestre (FS - *Fixed Service*) está sujeito à interferência produzida pela transmissão de um satélite geoestacionário  $S_k$  do Serviço Fixo Por Satélite (FSS - *Fixed-Satellite Service*). Nessa figura,  $\delta_k$  é o ângulo de chegada, à superfície da Terra, do sinal transmitido por esse satélite e  $\psi_k$  é o ângulo entre a direção de apontamento da antena receptora do FS e a direção do satélite  $S_k$ , a partir da posição geográfica do receptor do FS.



Figura 2.1: Geometria que ilustra a interferência produzida pela transmissão de um satélite geoestacionário  $S_k$  em um receptor do FS.

Sendo  $pfd_k$  a densidade de fluxo de potência, em W/m<sup>2</sup>Hz, produzida na superfície da Terra (na posição geográfica do receptor do FS) pelo satélite  $S_k$ , em condição de propagação em espaço livre, a densidade de potência do sinal interferente transmitido pelo satélite  $S_k$  no receptor do FS, em W/Hz, é dada por

$$i_k = \frac{pfd_k A_e(\psi_k)}{\ell_a}, \qquad (2-1)$$

onde  $\ell_a$  é a perda no alimentador da antena receptora do FS e  $A_e(\psi_k)$  é a área efetiva dessa antena na direção do satélite  $S_k$ , cuja relação com seu ganho é dada por

$$A_e(\psi_k) = \frac{\lambda^2}{4\pi} g(\psi_k). \qquad (2-2)$$

Em (2-2),  $\lambda$  é o comprimento de onda correspondente à frequência da portadora interferente,  $g(\cdot)$  é o diagrama de radiação dessa antena e  $g(\psi_k)$  é o seu ganho na direção do satélite  $S_k$ . Substituindo (2-2) em (2-1), tem-se

$$i_k = \frac{\lambda^2}{4\pi\ell_a} pfd_k g(\psi_k).$$
(2-3)

Seja  $(i_k)_{dB}$  a densidade de potência da interferência produzida pelo k-ésimo satélite expressa em dB[W/Hz], ou seja,  $(i_k)_{dB} = 10 \log_{10}(i_k)$ . De (2-3) tem-se, então,

$$(i_k)_{dB} = 10 \log_{10} \left( \frac{\lambda^2}{4\pi \ell_a} \right) + 10 \log_{10} pfd_k + 10 \log_{10} g(\psi_k) \,. \tag{2-4}$$

Note que o cálculo de  $i_k$  em (2-3) depende da posição geográfica do receptor do FS, da posição do satélite  $S_k$ , do apontamento (azimute e elevação) da antena receptora do FS e do diagrama de radiação dessa antena. A densidade de potência da interferência agregada produzida, no receptor do FS, pela transmissão simultânea de múltiplos satélites, em dB[W/Hz], escreve-se

$$i_{\rm dB} = 10 \log_{10} \left( \sum_{k=1}^{m} 10^{(i_k)_{\rm dB}/10} \right) \,.$$
 (2-5)

onde m é o número de satélites interferentes visíveis ao receptor do FS.

As regras de convivência entre sistemas que compartilham a mesma faixa de frequência visam garantir que o sistema vítima não sofra interferência em níveis acima dos aceitáveis. O objetivo da análise desenvolvida neste trabalho é verificar se a interferência agregada produzida por vários satélites geoestacionários do FSS (sistema interferente) sobre um receptor do FS (sistema vítima), na faixa de 7 GHz, satisfaz ao critério de proteção do sistema vítima, sem que sejam impostas restrições desnecessárias de transmissão aos sistemas interferentes.

Em geral, esses critérios de proteção são definidos em termos de restrições impostas à razão entre a interferência agregada e o ruído térmico no receptor do sistema vítima. Essa razão, em dB, é escrita como

$$\left(\frac{i}{n}\right)_{dB} = 10\log_{10}\left(\frac{i}{n}\right) = i_{dB} - n_{dB}, \qquad (2-6)$$

onde  $i_{dB}$  é a densidade de potência da interferência agregada em dB[W/Hz] e  $n_{dB}$  é a densidade de potência do ruído térmico, em dB[W/Hz], na entrada do receptor do FS, ou seja,  $n_{dB} = 10 \log_{10}(kT)$ , sendo k a constante de Boltzmann  $(1,38 \times 10^{-23} \text{ Joule/Kelvin})$  e T a temperatura equivalente de ruído na entrada do receptor do FS expressa em Kelvin.

Para faixas onde o desvanecimento é dominado pelo multipercurso, como é o caso da faixa de 7 GHz, a Recomendação ITU-R F.758-5 (7) estabelece que, em princípio, a razão entre a interferência agregada e o ruído térmico no receptor do FS, em dB, não deve exceder -10 dB, ou seja,

$$\left(\frac{i}{n}\right)_{\rm dB} \le -10\,\rm dB. \tag{2-7}$$

No cálculo tradicional de interferência, no qual o valor de  $(i/n)_{dB}$  é obtido de forma determinística, a partir de (2-4) a (2-6), o diagrama de radiação  $g(\cdot)$ da antena 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, ou seja,  $g(\psi_k) = g_{ref}(\psi_k)$  em (2-4). Além disso, são utilizados, para as densidades de fluxo de potência  $pfd_k$ , os limites máximos permitidos pela Tabela 21-4 do Art. 21 do Regulamento de Radiocomunicações (RR) da ITU. Esses limites máximos são definidos por uma máscara  $pfd_{max}(\delta_k)$  cujos valores variam em função do ângulo de chegada  $(\delta_k)$  do sinal de cada satélite. Dessa forma, em (2-4), faz-se  $pfd_k = pfd_{max}(\delta_k)$ .

Essa situação, entretanto, é muito pouco provável, pois 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 correspondem aos valores máximos dados pela máscara do RR.

Uma das maneiras de tornar o cálculo de interferências mais compatível com as situações reais é considerar a modelagem probabilística de alguns dos parâmetros envolvidos. No modelo probabilístico proposto neste trabalho, os ganhos nos lóbulos laterais da antena receptora do FS e as densidades de fluxo de potência produzidas pelos satélites são caracterizados como variáveis aleatórias. Nesse caso, de acordo com (2-4), a densidade de potência da interferência produzida pelo k-ésimo satélite  $(i_k)_{dB}$  e, consequentemente, a interferência agregada  $i_{dB}$  em (2-5) e a razão  $(i/n)_{dB}$  em (2-6) são também variáveis aleatórias.

Esse fato motivou a utilização, no presente trabalho, de um critério de proteção alternativo, no qual se permite que  $(i/n)_{dB}$  possa ser maior que -10 dB, desde que com uma probabilidade p suficientemente pequena (por exemplo, p = 0.01%), ou seja,

$$P\left(\left(\frac{i}{n}\right)_{\rm dB} > -10\right) \le p.$$
(2-8)

Conforme será visto no Capítulo 3, o cálculo probabilístico da interferência agregada produzida pela transmissão de múltiplos satélites em um receptor do FS envolve vários parâmetros. A influência de cada um desses parâmetros na caracterização estatística da razão  $(i/n)_{dB}$  é analisada no Capítulo 4.

## 3 Modelo Matemático

Neste capítulo, é desenvolvido o modelo matemático utilizado na modelagem probabilística da interferência produzida por múltiplos satélites geoestacionários em um receptor do Serviço Fixo Terrestre (FS - *Fixed Service*). Com esse objetivo, considere, inicialmente, o diagrama da Figura 3.1, no qual os vetores  $\mathbf{p} \in \mathbf{s}_k$  representam, respectivamente, a posição geográfica do receptor do FS na superfície da Terra e a posição do satélite geoestacionário  $S_k$ .



Figura 3.1: Diagrama ilustrando os vetores de posição geográfica do receptor do FS e de posição do satélite geoestacionário  $S_k$ .

Esses vetores são representados utilizando-se um sistema de coordenadas cartesianas xyz, com origem no centro da Terra, com o plano xy coincidindo com o plano do Equador e com o eixo z apontando para o Norte. Suas componentes são definidas em termos de latitude, longitude e distância à origem do sistema (coordenadas esféricas). Nesse caso, o vetor  $\mathbf{p}$  se escreve, em coordenadas retangulares, como

$$\mathbf{p} = \begin{bmatrix} r_{\rm FS} \cos \theta_{\rm FS} \cos \phi_{\rm FS} \\ r_{\rm FS} \cos \theta_{\rm FS} \sin \phi_{\rm FS} \\ r_{\rm FS} \sin \theta_{\rm FS} \end{bmatrix}, \qquad (3-1)$$

onde  $\theta_{\rm FS} = \phi_{\rm FS}$  são, respectivamente, a latitude e a longitude do receptor do FS e  $r_{\rm FS} = r_{\rm T} + h_{\rm FS}$ , onde  $r_{\rm T}$  é o raio da Terra e  $h_{\rm FS}$  é a altura do receptor do FS.

Neste tipo de estudo (compartilhamento de frequências entre o FSS e o FS), usualmente, considera-se o raio da Terra constante e igual a 6.378 km, sendo desprezados o relevo e a altura do receptor do FS ( $h_{\rm FS} = 0$ ). O vetor  $\mathbf{s}_k$ , por sua vez, pode ser escrito, em coordenadas retangulares, como

$$\mathbf{s}_{k} = \begin{bmatrix} r_{\mathbf{s}_{k}} \cos \phi_{\mathbf{s}_{k}} \cos \phi_{\mathbf{s}_{k}} \\ r_{\mathbf{s}_{k}} \cos \phi_{\mathbf{s}_{k}} \sin \phi_{\mathbf{s}_{k}} \\ r_{\mathbf{s}_{k}} \sin \phi_{\mathbf{s}_{k}} \end{bmatrix}, \qquad (3-2)$$

onde  $\theta_{s_k}$  e  $\phi_{s_k}$  são, respectivamente, a latitude (igual a 0 para satélites geoestacionários) e a longitude do satélite  $S_k$ , e  $r_{s_k} = r_T + h_{s_k}$ , onde  $h_{s_k}$  é a altura do satélite  $S_k$  (em torno de 36.000 km para satélites geoestacionários).

Conforme ilustrado na Figura 3.2, o apontamento da antena receptora do FS é caracterizado por um vetor unitário **a**, representado em um sistema de coordenadas cartesianas x'y'z' centrado na posição geográfica do receptor do FS, com o eixo z' coincidente com a direção do vetor **p** e com o plano x'y'tangente à superfície da Terra. Nesse plano, o eixo y' aponta para a direção do Norte. Os ângulos  $\epsilon$  e  $\alpha$  representam, respectivamente, a elevação e o azimute da antena receptora do FS.



Figura 3.2: Sistema de coordenadas centrado na posição do receptor do FS.

Assim, no sistema x'y'z', o vetor **a** é escrito, em coordenadas retangulares, como

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} \cos \epsilon \sin \alpha \\ \cos \epsilon \cos \alpha \\ \sin \epsilon \end{bmatrix}.$$
(3-3)

Para calcular a densidade de potência da interferência produzida pelo satélite interferente  $S_k$ , de acordo com (2-4), há necessidade de se calcular os ângulos  $\delta_k$  (ângulo de chegada do sinal transmitido pelo satélite  $S_k$ ) e  $\psi_k$ (ângulo entre a direção de apontamento da antena receptora do FS e a direção do satélite  $S_k$ ). De acordo com a Figura 3.3, o ângulo  $\delta_k$  é o complemento do ângulo entre os vetores  $\mathbf{p} \in \mathbf{s}_k - \mathbf{p}$ , ou seja,

$$\delta_k = 90^\circ - \arccos\left(\frac{\mathbf{p}^T \cdot (\mathbf{s}_k - \mathbf{p})}{||\mathbf{p}|| \, ||\mathbf{s}_k - \mathbf{p}||}\right) \,. \tag{3-4}$$



Figura 3.3: Geometria ilustrando os ângulos  $\delta_k$  (ângulo de chegada do sinal transmitido pelo satélite  $S_k$ ) e  $\psi_k$  (ângulo entre a direção de apontamento da antena receptora do FS e a direção do satélite  $S_k$ ).

O ângulo  $\psi_k$  é aquele formado pelos vetores **a** e  $\mathbf{s}_k - \mathbf{p}$ , sendo dado por

$$\psi_k = \arccos\left(\frac{\mathbf{a}^T \cdot (\mathbf{s}_k - \mathbf{p})}{||\mathbf{a}|| \, ||\mathbf{s}_k - \mathbf{p}||}\right) \,. \tag{3-5}$$

No entanto, antes de realizar o cálculo em (3-5), deve-se representar o vetor **a** na mesma base em que são representados os vetores  $\mathbf{s}_k$  e **p**. Enquanto esses vetores estão expressos na base ortonormal B, relacionada ao sistema xyz, o vetor **a** está expresso na base ortonormal B', relacionada com o sistema x'y'z'. Para representar o vetor **a** na base B, multiplica-se sua representação na base B' pela matriz de mudança de base  $\mathbf{M}$ , ou seja,

$$\left[\mathbf{a}\right]_{B} = \mathbf{M} \left[\mathbf{a}\right]_{B'}, \qquad (3-6)$$

onde  $[\mathbf{a}]_B$  representa o vetor  $\mathbf{a}$ na base  $B,\, [\mathbf{a}]_{B'}$ é o vetor  $\mathbf{a}$ na base B'e

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} -\sin\phi_{\rm FS} & -\cos\phi_{\rm FS}\sin\theta_{\rm FS} & \cos\theta_{\rm FS}\cos\phi_{\rm FS} \\ \cos\phi_{\rm FS} & -\sin\phi_{\rm FS}\sin\theta_{\rm FS} & \cos\theta_{\rm FS}\sin\phi_{\rm FS} \\ 0 & \cos\theta_{\rm FS} & \sin\theta_{\rm FS} \end{bmatrix}.$$

A determinação da matriz M encontra-se demonstrada no Apêndice A.

No caso determinístico, para verificar se o critério de proteção definido na Recomendação ITU-R F.758-5 (7) é satisfeito para um receptor do FS com características bem definidas, ou seja, para uma determinada frequência, com uma dada localização geográfica **p** (latitude  $\theta_{\rm FS}$  e longitude  $\phi_{\rm FS}$ ) e com ganho e apontamento **a** de sua antena receptora (azimute  $\alpha$  e elevação  $\epsilon$ ) conhecidos, calcula-se a razão  $(i/n)_{\rm dB}$  utilizando-se (2-4) a (2-6), (3-4) e (3-5).

Na modelagem probabilística proposta neste trabalho, as densidades de fluxo de potência dos satélites,  $pfd_k$ , e os ganhos nos lóbulos laterais da antena receptora do FS,  $g(\psi_k)$  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 que, considerando (2-3), é caracterizada por

$$i_{k} = \begin{cases} b g_{ref}(\psi_{k}) y_{k} ; |\psi_{k}| \leq \psi_{m} \\ b x_{k} y_{k} ; |\psi_{k}| > \psi_{m} \end{cases}$$
(3-7)

onde  $b = \lambda^2/(4\pi \ell_a)$  e  $g_{ref}(\psi_k)$  é o ganho da antena receptora do FS na direção  $\psi_k$  do satélite  $S_k$ , dado pelo diagrama de referência  $g_{ref}(\cdot)$ .

Para o caso em que  $i_k = b g_{ref}(\psi_k) y_k$ , a função densidade de probabilidade (fdp) da variável aleatória  $i_k$  pode ser escrita em função da fdp da variável aleatória  $y_k$  através da equação

$$p_{i_k}(I) = \frac{1}{b g_{ref}(\psi_k)} p_{y_k}\left(\frac{I}{b g_{ref}(\psi_k)}\right).$$
(3-8)

No caso em que  $i_k = b x_k y_k$ , a fdp da variável aleatória  $i_k$  pode ser escrita em função da fdp conjunta das variáveis aleatórias  $i_k$ ,  $x_k \in y_k$ ,

$$p_{i_k}(I) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p_{x_k y_k i_k}(X, Y, I) \, \mathrm{d}X \, \mathrm{d}Y \,.$$
(3-9)

Observando que a fdp condicional da variável aleatória  $i_k$ , dado que  $x_k = X$  e  $y_k = Y$ , pode ser expressa como

$$p_{i_{k|x_{k}=X,y_{k}=Y}}(I) = \frac{p_{x_{k}y_{k}i_{k}}(X,Y,I)}{p_{x_{k}y_{k}}(X,Y)}, \qquad (3-10)$$

pode-se reescrever (3-9) como

$$p_{i_k}(I) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p_{i_k|_{x_k=X, y_k=Y}}(I) \, p_{x_k y_k}(X, Y) \, \mathrm{d}X \, \mathrm{d}Y \,. \tag{3-11}$$

Como  $x_k \in y_k$  podem ser modeladas por variáveis aleatórias estatistica-

mente independentes,  $p_{x_ky_k}(X, Y) = p_{x_k}(X) p_{y_k}(Y)$ . Assim, nesse caso, a fdp da variável aleatória  $i_k$  é dada por

$$p_{i_k}(I) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p_{i_k|_{x_k=X, y_k=Y}}(I) \, p_{x_k}(X) \, p_{y_k}(Y) \, \mathrm{d}X \, \mathrm{d}Y \tag{3-12}$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} p_{x_k}(X) \left[ \int_{-\infty}^{\infty} p_{i_k|_{x_k=X, y_k=Y}}(I) \, p_{y_k}(Y) \, \mathrm{d}Y \right] \mathrm{d}X \,. \tag{3-13}$$

Como  $i_k = b x_k y_k$ , observa-se que, dados  $x_k = X e y_k = Y$ , a variável aleatória  $i_k$  assume o valor bXY com probabilidade 1, sendo possível escrever

$$p_{i_{k|x_{k}=X,y_{k}=Y}}(I) = \delta(I - bXY).$$
(3-14)

Substituindo (3-14) em (3-13), encontra-se

$$p_{i_k}(I) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{bX} p_{x_k}(X) p_{y_k}\left(\frac{I}{bX}\right) \, \mathrm{dX} \,. \tag{3-15}$$

Portanto, a fdp da variável aleatória  $i_k$  é

$$p_{i_k}(I) = \begin{cases} \frac{1}{b g_{ref}(\psi_k)} p_{y_k} \left(\frac{I}{b g_{ref}(\psi_k)}\right) & ; \quad |\psi_k| \le \psi_m \\ \\ \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{bX} p_{x_k}(X) p_{y_k} \left(\frac{I}{bX}\right) \mathrm{d}X & ; \quad |\psi_k| > \psi_m \end{cases}$$
(3-16)

Observe que a densidade de potência i da interferência agregada produzida por m satélites é dada por

$$i = \sum_{k=1}^{m} i_k$$
 (3-17)

e que a fdp da variável aleatória i pode ser escrita em termos de sua função característica (10), ou seja,

$$p_i(I) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} M_i(v) \, e^{-jvI} \, \mathrm{d}v \,, \qquad (3-18)$$

onde  $j=\sqrt{-1}$ e $M_i(v)$ é a função característica da variável aleatóriai, definida por

$$M_i(v) = \mathbb{E}\left[e^{jvi}\right] = \int_{-\infty}^{\infty} p_i(I) e^{jvI} \,\mathrm{d}I \,. \tag{3-19}$$

Considerando que as parcelas de interferência  $i_k \text{ em } (3-17)$  são estatisti-

camente independentes, tem-se (10)

$$M_i(v) = \prod_{k=1}^m M_{i_k}(v), \qquad (3-20)$$

com  $M_{i_k}(v)$  sendo as funções características das variáveis aleatórias  $i_k, k = 1, \ldots m$ , ou seja,

$$M_{i_k}(v) = \int_{-\infty}^{\infty} p_{i_k}(I) e^{jvI} \,\mathrm{d}I \,.$$
 (3-21)

Quando $i_k = b \, g_{\textit{ref}}(\psi_k) \, y_k,$ a função  $M_{i_k}(v)$ é dada por

$$M_{i_k}(v) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{b g_{ref}(\psi_k)} p_{y_k} \left(\frac{I}{b g_{ref}(\psi_k)}\right) e^{jvI} dI$$
$$= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{b g_{ref}(\psi_k)} p_{y_k}(X) e^{jv(b g_{ref}(\psi_k)X)} b g_{ref}(\psi_k) dX$$
$$= \int_{-\infty}^{\infty} p_{y_k}(X) e^{j(vb g_{ref}(\psi_k))X} dX = M_{y_k}(bg_{ref}(\psi_k)v).$$
(3-22)

Quando $i_k = b \, x_k \, y_k,$ a função  $M_{i_k}(v)$ é dada por

$$M_{i_k}(v) = \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{bX} p_{x_k}(X) p_{y_k} \left( \frac{I}{bX} \right) dX \right] e^{jvI} dI$$
  
$$= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{bX} p_{x_k}(X) \left[ \int_{-\infty}^{\infty} p_{y_k} \left( \frac{I}{bX} \right) e^{jvI} dI \right] dX$$
  
$$= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{bX} p_{x_k}(X) \left[ \int_{-\infty}^{\infty} p_{y_k}(Y) e^{jvbXY} bX dY \right] dX$$
  
$$= \int_{-\infty}^{\infty} p_{x_k}(X) \left[ \int_{-\infty}^{\infty} p_{y_k}(Y) e^{j(vbX)Y} dY \right] dX$$
  
$$= \int_{-\infty}^{\infty} p_{x_k}(X) M_{y_k}(bvX) dX. \qquad (3-23)$$

Observe que os resultados em (3-22) e em (3-23) podem ser obtidos diretamente de (3-7), uma vez que, para  $|\psi_k| \leq \psi_m$ ,

$$M_{i_k}(v) = \mathbb{E}\left[e^{jvi_k}\right] = \mathbb{E}\left[e^{jvb\,g_{ref}(\psi_k)\,y_k}\right]$$
$$= M_{y_k}(bg_{ref}(\psi_k)v)$$
(3-24)

e, para  $|\psi_k| > \psi_m$ ,

$$\begin{split} M_{i_k}(v) &= \mathbb{E}\left[e^{jvi_k}\right] = \mathbb{E}\left[e^{jvb\,x_k\,y_k}\right] \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} p_x(X) \,\mathbb{E}\left[e^{jvb\,x_k\,y_k} | x_k = X\right] \,\mathrm{d}X = \int_{-\infty}^{\infty} p_x(X) \,\mathbb{E}\left[e^{jvb\,X\,y_k}\right] \,\mathrm{d}X \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} p_{x_k}(X) \,M_{y_k}(bvX) \,\mathrm{d}X \,. \end{split}$$
(3-25)

Dessa forma, tem-se

$$M_{i_{k}}(v) = \begin{cases} M_{y_{k}}(bg_{ref}(\psi_{k})v) & ; & |\psi_{k}| \leq \psi_{m} \\ \\ \int_{-\infty}^{\infty} p_{x_{k}}(X) M_{y_{k}}(bvX) dX & ; & |\psi_{k}| > \psi_{m} \end{cases}$$
(3-26)

Como  $i_{dB} = 10 \log_{10}(i)$ , é possível mostrar que a função densidade de probabilidade da variável aleatória  $i_{dB}$  é

$$p_{i_{dB}}(I) = \frac{\ln(10)}{10} \ 10^{I/10} \ p_i(10^{I/10}) \tag{3-27}$$

e sua função distribuição de probabilidade (FDP) é dada por

$$F_{i_{dB}}(I) = P(i_{dB} \le I) = \int_{-\infty}^{I} p_{i_{dB}}(Z) \, \mathrm{d}Z.$$
 (3-28)

Considerando-se (3-28), o critério de proteção (2-8), proposto no Capítulo 2, pode ser escrito como

$$1 - F_{(i/n)_{\rm dB}}(-10) \le p. \tag{3-29}$$

O lado esquerdo de (3-29) é usualmente conhecido como Função Distribuição Cumulativa de Probabilidade (*Cumulative Probability Distribution Function* - CPDF) da variável aleatória  $(i/n)_{dB}$ , definida por

$$C_{(i/n)_{dB}}(\alpha) \triangleq P\left(\left(\frac{i}{n}\right)_{dB} > \alpha\right) = 1 - F_{(i/n)_{dB}}(\alpha).$$
(3-30)

Alternativamente, (3-30) pode ser escrita como

$$C_{(i/n)_{dB}}(\alpha) = P\left(i_{dB} > \alpha + n_{dB}\right) = 1 - F_{i_{dB}}(\alpha + n_{dB})$$

$$= C_{i_{dB}}(\alpha + n_{dB}) = \int_{\alpha + n_{dB}}^{\infty} p_{i_{dB}}(Z) \, \mathrm{d}Z \,.$$
(3-31)

Neste trabalho, considerou-se o caso particular em que os ganhos nos lóbulos laterais da antena receptora do FS são variáveis aleatórias com distribuição gama, ou seja, suas fdp's são dadas por

$$p_{y_k}(Y) = \frac{\beta_k^{\alpha_k}}{\Gamma(\alpha_k)} Y^{\alpha_k - 1} e^{-\beta_k Y} u(Y).$$
(3-32)

Os parâmetros  $\alpha_k$  e  $\beta_k$  são determinados a partir da Razão Desvio Padrão-Média (*RDPM*), dada por *RDPM* =  $1/\sqrt{\alpha_k}$ , e da condição  $P(y_k > g_{ref}(\psi_k)) = 0,1$ , estabelecida como objetivo de projeto de antenas, no qual se aceita que 10% dos picos dos lóbulos laterais ( $|\psi_k| > \psi_m$ , sendo  $2\psi_m$  a largura do lóbulo principal da antena) ultrapassem os níveis do diagrama de referência, como na Recomendação ITU-R S.580-6 (11). Essa fdp é ilustrada na Figura 3.4, para seis diferentes valores de *RDPM*.



Figura 3.4: fdp de uma variável aleatória com distribuição gama.

Em (3-32), a escolha da variável aleatória com distribuição gama foi feita com base em resultados de um estudo realizado para o Intelsat (9), 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 de estações terrenas. Nesse estudo, que considerou medidas de diagramas de radiação de mais de 300 antenas, foram avaliadas as possibilidades de utilização de quatro possíveis densidades de probabilidade: exponencial, Rayleigh, Rice ao quadrado e gama. De acordo com (9), para quase todos os dados experimentais considerados, o desvio padrão excede a média, ou seja, a Razão Desvio Padrão-Média (RDPM) é maior que 1, o que não acontece com as três primeiras densidades de probabilidade consideradas.

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

$$p_{x_k}(X) = \begin{cases} \frac{1}{b_k - a_k} & ; \quad X \in [a_k, b_k] \\ 0 & ; \quad X \notin [a_k, b_k] \end{cases}$$
(3-33)

onde  $b_k = pfd_{max}(\delta_k)$  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

$$M_{x_{k}}(v) = \frac{1}{jv(b_{k} - a_{k})} \left( e^{jvb_{k}} - e^{jva_{k}} \right) \quad e \quad M_{y_{k}}(v) = \left( \frac{\beta_{k}}{\beta_{k} - jv} \right)^{\alpha_{k}} .$$
(3-34)

Substituindo (3-33) e (3-34) em (3-23), calcula-se o integral por substituição, fazendo  $Z = \beta_k - jbvX$ , e encontra-se

$$M_{i_k}(v) = \int_{a_k}^{b_k} \frac{1}{b_k - a_k} \left( \frac{\beta_k}{\beta_k - jbvX} \right)^{\alpha_k} dX = \frac{\beta_k^{\alpha_k}}{b_k - a_k} \frac{j}{bv} \int_{\beta_k - jbvb_k}^{\beta_k - jbvb_k} Z^{-\alpha_k} dZ$$
$$= \frac{\beta_k^{\alpha_k}}{(b_k - a_k) (1 - \alpha_k)} \frac{j}{bv} \left[ (\beta_k - jbvb_k)^{1 - \alpha_k} - (\beta_k - jbva_k)^{1 - \alpha_k} \right]$$
$$= \frac{\beta_k^{\alpha_k}}{(b_k - a_k) (\alpha_k - 1)} \frac{1}{bv} \left[ \frac{ba_k v + j\beta_k}{(\beta_k - jba_k v)^{\alpha_k}} - \frac{bb_k v + j\beta_k}{(\beta_k - jbb_k v)^{\alpha_k}} \right]. \quad (3-35)$$

Dessa forma, a função característica da variável aleatória  $i_k$ , dada por (3-16), escreve-se como

$$M_{i_{k}}(v) = \begin{cases} \frac{1}{jbg_{ref}(\psi_{k})(b_{k}-a_{k})v} \left(e^{jbg_{ref}(\psi_{k})b_{k}v} - e^{jbg_{ref}(\psi_{k})a_{k}v}\right), & |\psi_{k}| \leq \psi_{m}, \\ \frac{\beta_{k}^{\alpha_{k}}(\alpha_{k}-1)^{-1}}{b(b_{k}-a_{k})v} \left[\frac{ba_{k}v + j\beta_{k}}{(\beta_{k}-jba_{k}v)^{\alpha_{k}}} - \frac{bb_{k}v + j\beta_{k}}{(\beta_{k}-jbb_{k}v)^{\alpha_{k}}}\right], & |\psi_{k}| > \psi_{m}. \end{cases}$$

$$(3-36)$$

Assim, no caso particular em que  $p_{x_k}(X)$  e  $p_{y_k}(Y)$  são dados, respectivamente, por (3-33) e (3-32), a função característica da variável aleatória *i*, que representa a densidade de potência da interferência agregada produzida pelas transmissões dos satélites, pode ser obtida através de (3-20) e (3-36), resultando

$$M_{i}(v) = \prod_{k=1}^{m_{1}} \frac{1}{jbg_{k}(b_{k}-a_{k})v} \left(e^{jbg_{k}b_{k}v} - e^{jbg_{k}a_{k}v}\right) \times \prod_{k=1}^{m_{2}} \frac{\beta_{k}^{\alpha_{k}} (\alpha_{k}-1)^{-1}}{b(b_{k}-a_{k})v} \left[\frac{ba_{k}v + j\beta_{k}}{(\beta_{k}-jvba_{k})^{\alpha_{k}}} - \frac{bb_{k}v + j\beta_{k}}{(\beta_{k}-jvbb_{k})^{\alpha_{k}}}\right].$$
(3-37)

Em (3-37),  $m_1$  é o número de satélites visíveis pelo receptor do FS na direção  $\psi_k$  tal que  $|\psi_k| \leq \psi_m$  (lóbulo principal) e  $m_2$  é o número de satélites visíveis na direção  $\psi_k$  tal que  $|\psi_k| > \psi_m$  (lóbulos laterais). Finalmente, a função distribuição cumulativa de probabilidade  $C_{(i/n)_{dB}}(Z)$  pode ser obtida a partir de (3-31), (3-27), (3-18) e (3-37), resultando em

$$C_{(i/n)_{dB}}(Z) = \int_{Z+n_{dB}}^{\infty} \frac{\ln(10)}{10} \ 10^{\xi/10} \left(\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} M_i(v) \, e^{-jv 10^{\xi/10}} \, \mathrm{d}v\right) \mathrm{d}\xi \,, \quad (3-38)$$

permitindo que se verifique se o critério de proteção do receptor FS é satisfeito nessa abordagem probabilística.

Neste trabalho, a função  $C_{(i/n)_{dB}}(Z)$  foi implementada usando o software MatLab. Como se chegou a uma expressão analítica para  $M_i(v)$  em (3-37), reduziu-se consideravelmente a quantidade de cálculo numérico, que ficou restrita à integração numérica de (3-38) e ao cálculo dos parâmetros  $\alpha_k$  e  $\beta_k$  em (3-32). Apesar disso, os cálculos foram bastante demorados (algumas images levaram quase 3 horas para serem geradas), devido ao grade número de amostradas necessárias para se calcular (3-37), uma vez que o cálculo considerou algumas quantidades como fatores ( $x_k \in y_k$ ), e não em dB.

Uma alternativa ao cálculo de  $p_i(I)$  em (3-18), tendo em vista (3-17), seria através da convolução das funções densidades de probabilidades das variáveis aleatórias  $i_k$ , ou seja,

$$p_i(I) = p_{i_1}(I) * p_{i_2}(I) * p_{i_3}(I) * \dots * p_{i_m}(I).$$
(3-39)

No entanto, essa implementação se mostrou muito mais complexa e menos precisa do que o cálculo de  $p_i(I)$  usando o conceito de função característica, pois a operação de convolução no MatLab cria mais amostras do que as das funções  $p_{i_k}(I)$ . Além disso, a execução dessas convoluções requer que as amostras de  $p_{i_k}(I)$ , não igualmente espaçadas (devido à obtenção de  $p_{i_k}(I)$  a partir de  $p_{i_{k_{dR}}}(I)$ ), sejam interpoladas.

## 4 Resultados Numéricos

Neste capítulo, a modelagem matemática desenvolvida no Capítulo 3 é aplicada a cenários específicos envolvendo múltiplos satélites geoestacionários e receptores do Serviço Fixo Terrestre (FS) localizados em diferentes latitudes e com diferentes ganhos e apontamentos de suas antenas receptoras. Em cada um dos cenários, foi determinada a Função Distribuição Cumulativa de Probabilidade (CPDF - *Cumulative Probability Distribution Function*) da razão  $(i/n)_{dB}$ , cuja expressão analítica encontra-se em (3-38). Com essas CPDFs, foi possível a geração de diversos gráficos que permitem caracterizar o comportamento estatístico da interferência agregada produzida pela transmissão dos satélites no receptor do FS e verificar o atendimento aos critérios de proteção descritos no Capítulo 2. A Seção 4.1 analisa a variação dos parâmetros técnicos de interesse na determinação da CPDF de  $(i/n)_{dB}$  e a Seção 4.2 reúne os resultados numéricos relativos a alguns cenários específicos, considerando diferentes valores de ganho e elevação da antena receptora do FS e diferentes latitudes do receptor do FS.

### 4.1 Influência da variação dos parâmetros

Conforme visto no Capítulo 3, o cálculo probabilístico da interferência agregada produzida pela transmissão de múltiplos satélites no receptor do FS envolve vários parâmetros. A influência de cada um desses parâmetros no cálculo da CPDF da razão  $(i/n)_{dB}$  é analisada nesta seção. Os parâmetros cujas variações foram analisadas são a latitude do receptor do FS, o ganho e o apontamento (azimute e elevação) da antena receptora do FS, além da Razão Desvio Padrão-Média (*RDPM*), parâmetro utilizado para o cálculo da função densidade de probabilidade dos ganhos nos lóbulos laterais dessa antena.

De acordo com a Recomendação ITU-R F.1107-2 (12), considerou-se uma distribuição uniforme de satélites ao longo da órbita de satélites geoestacionários, com espaçamento de 3° entre eles. Considerou-se ainda que os valores máximos permitidos para a densidade de fluxo de potência produzida na superfície da Terra por cada um dos satélites interferentes,  $pfd_{max}$ , são aqueles constantes da Tabela 21-4 do Artigo 21 do Regulamento de Radiocomunicações (RR), para a faixa de 7.250 a 7.850 MHz, ou seja, em  $dB[W/m^2Hz]$ ,

$$10 \log_{10} \left( p f d_{max}(\delta_k) \right) = \begin{cases} -188 & ; \ 0^\circ \le \delta_k < 5^\circ \\ -188 + 0, \ 5(\delta_k - 5) \ ; \ 5^\circ \le \delta_k < 25^\circ \\ -178 & ; \ 25^\circ \le \delta_k \le 90^\circ \end{cases}$$
(4-1)

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 estendidos à nova alocação do Serviço Fixo por Satélite (FSS) na faixa de 7.150 a 7.250 MHz. Esses limites correspondem à condição de propagação em espaço livre e encontram-se ilustrados na Figura 4.1. Conforme esperado, observa-se que sinais interferentes que chegam ao receptor do FS com ângulos de chegada muito baixos têm um limite de  $pfd_{max}$  muito menor que os sinais que incidem no receptor de FS com ângulos de chegada maiores.



Figura 4.1: Limites de densidade de fluxo de potência na superfície da Terra, de 7.250 a 7.750 MHz, de acordo com o Art. 21 do Regulamento de Radiocomunicações (RR) da ITU.

Há uma grande variedade de receptores do FS em operação ou sendo desenvolvidos para atender requisitos futuros, o que envolve uma variedade de parâmetros técnicos. Valores típicos desses parâmetros, para diferentes faixas de frequências, podem ser encontrados no Anexo 2 da Recomendação ITU-R F.758-5 (7). No caso dos parâmetros típicos de sistemas do FS operando na faixa 7.110 - 7.900 GHz, objeto deste estudo, foram considerados os valores especificados na Tabela 4.1.

O diagrama de radiação  $g_{ref}(\cdot)$  utilizado para a antena do FS é aquele

Tabela 1.1. Caracteristicas tecinicas da estação receptora do re		
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, 20  dBi  e  12  dBi	

Tabela 4.1: Características técnicas da estação receptora do FS

indicado na Recomendação ITU-R F.1245-2 (8), para  $D/\lambda \leq 100,$ ou seja,

$$g_{ref}(\psi_k) = 10^{G_{ref}(\psi_k)/10} \tag{4-2}$$

onde

$$G_{ref}(\psi_k) = \begin{cases} G_{\max} - 2.5 \times 10^{-3} \left(\frac{D}{\lambda}\psi_k\right)^2; \ 0^\circ \le \psi_k < \psi_m \\ 39 - 5\log\left(\frac{D}{\lambda}\right) - 25\log\psi_k; \ \psi_m \le \psi_k < 48^\circ \\ -3 - 5\log\left(\frac{D}{\lambda}\right) \qquad ; \ 48^\circ \le \psi_k \le 180^\circ \end{cases}$$
(4-3)

com  $G_{\text{max}}$  sendo o ganho máximo da antena em dBi,  $\lambda$  o comprimento de onda associado à frequência da transmissão e D o diâmetro da antena, que se relaciona ao ganho máximo  $G_{\text{max}}$  da antena através de

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

Ainda em (4-3), o ângulo  $\psi_m$  é calculado por

$$\psi_m = \frac{20\lambda}{D} \sqrt{G_{\text{max}} - 2 + 15\log\left(D/\lambda\right)} \,. \tag{4-4}$$

Os diagramas de radiação correspondentes a antenas com ganhos  $G_{\text{máx}} =$  30 dBi  $(D/\lambda = 13,57)$ ,  $G_{\text{máx}} = 20$  dBi  $(D/\lambda = 4,29)$  e  $G_{\text{máx}} = 12$  dBi  $(D/\lambda = 1,71)$  são apresentados na Figura 4.2.

A título de ilustração inicial, considere uma estação receptora do FS com as características técnicas da Tabela 4.1, localizada na latitude  $\theta_{FS} = 30^{\circ}$ S e longitude  $\phi_{FS} = 45^{\circ}$ O e com uma antena receptora com ganho de 30 dBi e apontamento definido pela elevação 0° e azimute 10°. O cálculo determinístico (que utiliza  $g_{ref}(\cdot) e pfd_{max}(\delta)$ ) conduz a um valor de  $(i/n)_{dB}$  igual a -10, 7 dB, atendendo, assim, ao critério definido em (2-7), que estabelece que  $(i/n)_{dB} \leq$ -10 dB. Em uma segunda situação, onde o receptor do FS tem sua antena receptora apontada no azimute 60°, o cálculo determinístico conduz ao valor  $(i/n)_{dB} = -8, 5$  dB, não atendendo nesse caso ao critério de proteção em (2-7). Nessa segunda situação, a abordagem probabilística, considerando (3-33)



Figura 4.2: Diagramas de radiação de antenas receptoras da estação do FS.

com  $\Delta = 2$  dB e (3-32) com RDPM = 1,2, conduziu à distribuição cumulativa de probabilidade de  $(i/n)_{dB}$  mostrada na Figura 4.3, onde se verifica que a probabilidade de  $(i/n)_{dB}$  ser maior que -10 dB é  $5,8 \times 10^{-5}$ . Isso significa que o critério de proteção em (2-7) não é atendido com probabilidade muito pequena  $(5,8 \times 10^{-5})$ . Por outro lado, se o critério de proteção alternativo em (2-8) fosse considerado, com  $p = 10^{-4}$ , o resultado obtido satisfaria esse critério.



Figura 4.3: Função Distribuição Cumulativa de Probabilidade (CPDF) da variável aleatória  $(i/n)_{dB}$ , obtida a partir de  $\Delta = 2$  dB e RDPM = 1,2, considerando-se o receptor do FS localizado na latitude  $\theta_{FS} = 30^{\circ}$ S, com uma antena receptora com ângulo de elevação  $\epsilon = 0^{\circ}$ , ganho máximo  $G_{max} = 30$  dBi e apontamento na direção do azimute  $\alpha = 60^{\circ}$ .

### 4.1.1 Razão Desvio Padrão-Média

Para avaliar a influência do parâmetro RDPM (Razão Desvio Padrão-Média), as distribuições cumulativas de probabilidade de  $(i/n)_{dB}$  foram também determinadas para valores de RDPM que variam de 1,0 a 1,8. Os resultados obtidos estão ilustrados na Figura 4.4. Nessa figura, as probabilidades de  $(i/n)_{dB}$  ser maior que -10 dB, para RDPM = 1,4, 1,6 e 1,8, são, respectivamente, iguais a  $1,3 \times 10^{-4}, 2,8 \times 10^{-4}$  e  $6,1 \times 10^{-4}$ . Isso significa que o critério de proteção em (2-8) (com  $p = 10^{-4}$ ) não é atendido quando RDPM é maior que 1,2. No caso determinístico, verifica-se que  $(i/n)_{dB} = -8,5$  dB, ou seja, nesse caso, a probabilidade de  $(i/n)_{dB}$  ser maior que -10 dB é 1, não atendendo ao critério de proteção em (2-7).



Figura 4.4: Funções de Distribuição Cumulativa de Probabilidade (CPDF) da variável aleatória  $(i/n)_{dB}$ , obtidas a partir de  $\Delta = 2$  dB e RDPM = 1,0 / 1,2 / 1,4 / 1,6 / 1,8, considerando-se o receptor do FS localizado na latitude  $\theta_{FS} = 30^{\circ}$ S, com uma antena receptora com ângulo de elevação  $\epsilon = 0^{\circ}$ , ganho máximo  $G_{max} = 30$  dBi e apontamento na direção do azimute  $\alpha = 60^{\circ}$ .

## 4.1.2 Ângulo de elevação

A influência do ângulo de elevação ( $\epsilon$ ) da antena receptora do FS foi também avaliada. Distribuições cumulativas de probabilidade de  $(i/n)_{dB}$  foram determinadas para  $\epsilon = 0,5^{\circ}, 1^{\circ}, 3^{\circ}$  e 5°. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 4.5. Nesse caso, as probabilidades de  $(i/n)_{dB}$  ser maior que -10 dB, para  $\epsilon = 0,5^{\circ}, 1^{\circ}, 3^{\circ}$  e 5°, são, respectivamente,  $1,1 \times 10^{-4}, 2,0 \times 10^{-4}, 1,8 \times 10^{-3}$ e  $1,1 \times 10^{-2}$ . Isso significa que o critério de proteção em (2-8) (com  $p = 10^{-4}$ ) só é atendido para ângulos de elevação menores que  $0.5^{\circ}$ . No caso determinístico, para os ângulos de elevação considerados,  $(i/n)_{dB} > -10$  dB, ou seja, para esse caso específico, não é atendido o critério de proteção em (2-7).



Figura 4.5: Funções de Distribuição Cumulativa de Probabilidade (CPDF) da variável aleatória  $(i/n)_{dB}$ , obtidas a partir de  $\Delta = 2$  dB e RDPM = 1,2, considerando-se o receptor do FS localizado na latitude  $\theta_{FS} = 30^{\circ}$ S, com uma antena receptora com ganho máximo  $G_{max} = 30$  dBi, apontamento na direção do azimute  $\alpha = 60^{\circ}$  e ângulos de elevação  $\epsilon = 0^{\circ}, 0.5^{\circ}, 1^{\circ}, 3^{\circ}$  e 5°.

### 4.1.3 Azimute da antena receptora do FS

A Figura 4.6 ilustra, para um receptor do FS com as características da Tabela 4.1, localizado na latitude  $\theta_{FS} = 30^{\circ}$ S e longitude  $\phi_{FS} = 45^{\circ}$ O, utilizando uma antena receptora com ângulo de elevação 0° e ganho de 30 dBi, as distribuições cumulativas de probabilidade da razão  $(i/n)_{dB}$  obtidas para diferentes direções de azimute da antena receptora do FS, tendo sido considerada a modelagem probabilística com  $\Delta = 2$  dB e RDPM = 1,2. Nessa figura, está também indicado o critério de proteção em (2-8), para  $p = 10^{-4}$ (asterisco). Observe que, para alguns dos azimutes considerados, o critério em (2-8) 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 4.7, que mostra o gráfico, em coordenadas polares, do valor  $(i/n)_{dB}$  excedido com probabilidade  $p = 10^{-4}$ , em função do azimute da antena receptora do FS (diagrama de azimutes). A título de comparação, a figura inclui ainda o diagrama de azimutes correspondente ao valor de  $(i/n)_{dB}$  obtido pelo cálculo determinístico, de onde se pode observar também os azimutes proibidos no caso determinístico, cujos valores de  $(i/n)_{dB}$ não atendem ao critério em (2-7).



Figura 4.6: Funções de Distribuição Cumulativa de Probabilidade (CPDF) da razão  $(i/n)_{dB}$ , obtidas a partir de  $\Delta = 2$  dB e RDPM = 1,2. Cada curva corresponde a um valor diferente de azimute da antena receptora do FS, considerando-se o receptor do FS localizado na latitude  $\theta_{FS} = 30^{\circ}$ S, com uma antena receptora com ganho máximo  $G_{max} = 30$  dBi e ângulo de elevação  $\epsilon = 0^{\circ}$ .

Os diagramas de azimutes apresentados na Figura 4.7 permitem algumas observações. Em primeiro lugar, percebe-se imediatamente o conjunto de azimutes proibidos. No caso determinístico, esse conjunto corresponde aos azimutes para os quais o valor calculado de  $(i/n)_{dB}$  não atende ao critério de proteção em (2-7). Mais especificamente, esse conjunto é formado pelos intervalos [40°, 100°] e [260°, 320°], totalizando 120°. No caso probabilístico, o conjunto de azimutes proibidos é formado pelos azimutes associados a CPDFs que não atendem ao critério de proteção em (2-8), correspondendo, nesse caso, aos intervalos [62°, 92°] e [268°, 298°], que totalizam 60° (redução de 50%). Esses números mostram, de maneira clara, o quão pessimista pode ser a abordagem determinística. A Figura 4.8 ilustra o diagrama de azimute para diferentes valores de *RDPM* (1,2 / 1,4 / 1,6 e 1.8), indicando que, nesse exemplo específico, a influência do *RDPM* é pequena.


Figura 4.7: Diagramas de azimutes determinístico e probabilístico ( $\Delta = 2$  dB e RDPM = 1,2), com o receptor localizado na latitude  $\theta_{FS} = 30^{\circ}$ S, com antena de ganho  $G_{\text{max}} = 30$  dBi e elevação  $\epsilon = 0^{\circ}$ .



Figura 4.8: Diagramas de azimutes determinístico e probabilístico ( $\Delta = 2 \text{ dB}$  e RDPM = 1,0 e 1,8), com o receptor localizado na latitude  $\theta_{FS} = 30^{\circ}\text{S}$ , com antena de ganho  $G_{\text{max}} = 30$  dBi e elevação  $\epsilon = 0^{\circ}$ .

### 4.1.4 Latitude do receptor do FS

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 4.9, obtida para receptores do FS localizados na latitude 15°S. Nessa figura, o conjunto de azimutes proibidos é formado pelos intervalos  $[52^{\circ}, 112^{\circ}]$  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° para 48° (redução de 60%).



Figura 4.9: Diagramas de azimutes ( $\Delta = 2 \text{ dB} \text{ e } RDPM = 1,2$ ), com o receptor localizado na latitude  $\theta_{FS} = 15^{\circ}\text{S}$ , com antena de ganho  $G_{\text{max}} = 30 \text{ dBi e}$  elevação  $\epsilon = 0^{\circ}$ .

A variação do conjunto de azimutes proibidos com a latitude do receptor do FS pode ser melhor apreciada na Figura 4.10. Nessa figura, estão indicados os conjuntos de azimutes proibidos correspondentes ao cálculo determinístico e à modelagem probabilística da interferência (para  $\Delta = 2$  dB e *RDPM* = 1,2). Finalmente, na Figura 4.11, verifica-se a variação da largura da região de azimutes proibidos, em função do módulo da latitude do receptor FS, tanto no cálculo determinístico quanto na modelagem probabilística. Uma maior redução no conjunto de azimutes proibidos é verificada para receptores do FS localizados em baixas latitudes.



Figura 4.10: Variação do intervalo de azimutes proibidos em função da latitude do receptor do FS, com  $G_{\text{max}} = 30$  dBi, ângulo de elevação 0°,  $\Delta = 2$  dB, RDPM = 1,2 e considerando  $(i/n)_{dB}$  excedido com  $p = 10^{-4}$ .



Figura 4.11: Largura da região de azimutes proibidos em função do módulo da latitude do receptor do FS, com  $G_{\text{max}} = 30$  dBi, ângulo de elevação 0°,  $\Delta = 2$  dB, RDPM = 1,0 e 1,8 e considerando  $(i/n)_{dB}$  excedido com  $p = 10^{-4}$ .

Uma avaliação mais abrangente dos efeitos da modelagem probabilística de parâmetros no cálculo de interferências pode ser feita através dos exemplos específicos apresentados na Seção 4.2, onde diferentes cenários são considerados.

### 4.2 Considerações de cenários específicos

Nesta seção, foram analisados cenários específicos considerando-se algumas possibilidades de escolha dos parâmetros técnicos envolvidos (ângulo de elevação, azimute e ganho da antena receptora do FS, latitude do receptor do FS e Razão Desvio Padrão-Média - RDPM) no cálculo do comportamento estatístico da razão  $(i/n)_{dB}$ . Os cenários foram escolhidos considerando-se receptores do FS localizados em latitudes que variam de 0° a 75°S, a cada 15 graus, utilizando antenas receptoras com ganhos de 30 dBi, 20 dBi e 12 dBi. Para o apontamento dessas antenas, foi considerado o ângulo de elevação de 0° (resultados relativos a ângulos de elevação 1° e 5° podem ser encontrados no Apêndice B) e azimutes variando de 0° a 360°, de grau em grau. Os resultados correspondentes a antenas receptoras do FS com ganhos de 30 dBi, 20 dBi e 12 dBi estão reunidos, respectivamente, nas subseções 4.2.1, 4.2.2 e 4.2.3. Finalmente, comentários resultantes da análise comparativa dos resultados apresentados nessas três subseções são feitos na subseção 4.2.4.

## 4.2.1 Antena receptora do FS com ganho de 30 dBi

Nesta subseção, estão reunidos os gráficos obtidos considerando-se o ganho da antena receptora do FS igual a 30 dBi,  $\Delta = 2$  dB e *RDPM* = 1,0 e 1,8. O ângulo de elevação considerado é 0°. Com esses dados, foram obtidos diagramas de azimutes correspondentes a receptores do FS localizados em latitudes iguais a 0°, 15°S, 30°S, 45°S, 60°S e 75°S, que são apresentados nas images 4.12 a 4.17. Devido à simetria utilizada para a distribuição dos satélites geoestacionários ao longo da órbita no plano do Equador, os diagramas de azimutes correspondentes às latitudes 15°N, 30°N, 45°N, 60°N e 75°N são simétricos (em relação à linha de azimutes 90°/270°) aos diagramas correspondentes de latitudes do hemisfério sul, não variando com a longitude do receptor do FS. Nessas images, as linhas sólidas dizem respeito aos valores de  $(i/n)_{dB}$  excedidos com probabilidade  $p = 10^{-4}$ , sendo a mais interna relativa ao cálculo probabilístico com RDPM = 1,0 e a mais externa, com RDPM = 1,8. Para efeito de comparação, estão ilustrados também, em linhas pontilhadas, os diagramas de azimutes correspondentes ao cálculo determinístico de  $(i/n)_{dB}$ .



Figura 4.12: Diagramas de azimutes ( $\Delta = 2 \text{ dB e } RDPM = 1,0 \text{ e } 1,8$ ), estando o receptor na latitude  $\theta_{FS} = 0^{\circ}$ , com  $G_{\text{max}} = 30 \text{ dBi e } \epsilon = 0^{\circ}$ .



Figura 4.13: Diagramas de azimute ( $\Delta = 2$  dB e RDPM = 1,0 e 1,8), estando o receptor na latitude  $\theta_{FS} = 15^{\circ}$ S, com  $G_{max} = 30$  dBi e  $\epsilon = 0^{\circ}$ .



Figura 4.14: Diagramas de azimutes ( $\Delta = 2 \text{ dB e } RDPM = 1,0 \text{ e } 1,8$ ), estando o receptor na latitude  $\theta_{FS} = 30^{\circ}\text{S}$ , com  $G_{\text{max}} = 30 \text{ dBi e } \epsilon = 0^{\circ}$ .



Figura 4.15: Diagramas de azimutes ( $\Delta = 2 \text{ dB e } RDPM = 1,0 \text{ e } 1,8$ ), estando o receptor na latitude  $\theta_{FS} = 45^{\circ}\text{S}$ , com  $G_{\text{max}} = 30 \text{ dBi e } \epsilon = 0^{\circ}$ .



Figura 4.16: Diagramas de azimutes ( $\Delta = 2$  dB e RDPM = 1,0 e 1,8), estando o receptor na latitude  $\theta_{FS} = 60^{\circ}$ S, com  $G_{max} = 30$  dBi e  $\epsilon = 0^{\circ}$ .



Figura 4.17: Diagramas de azimutes ( $\Delta = 2 \text{ dB e } RDPM = 1,0 \text{ e } 1,8$ ), estando o receptor na latitude  $\theta_{FS} = 75^{\circ}\text{S}$ , com  $G_{\text{max}} = 30 \text{ dBi e } \epsilon = 0^{\circ}$ .

Os diagramas de azimutes apresentados nas images 4.12 a 4.17 permitem algumas observações. De uma maneira geral, quando a razão  $(i/n)_{dB}$  é modelada como uma variável aleatória, o cálculo probabilístico conduz a um valor de  $(i/n)_{dB}$ , excedido com probabilidade  $p = 10^{-4}$ , menor do que o valor calculado deterministicamente. Essa diferença cresce à medida em que o azimute da antena receptora do FS se distancia da faixa de azimutes proibidos. Por exemplo, essa diferença pode chegar a 3 dB no azimute 0°. Dessa forma, há uma redução no conjunto de azimutes proibidos no caso probabilístico, quando comparado com o caso determinístico (com exceção das altas latitudes).

Por exemplo, no caso determinístico, para um receptor do FS localizado na latitude 0°, com antena de ganho 30 dBi e elevação 0° (Figura 4.12), o conjunto de azimutes proibidos é formado pelos intervalos  $[59^{\circ}, 121^{\circ}]$  e  $[239^{\circ}, 301^{\circ}]$ , totalizando 124°. No caso probabilístico, nesse caso, para RDPM = 1,0, o conjunto de azimutes proibidos correspondendo aos intervalos  $[79^{\circ}, 101^{\circ}]$  e  $[259^{\circ}, 281^{\circ}]$ , que totalizam 44° (redução de 64,5%). Isso mostra, de maneira clara, o quão pessimista pode ser a abordagem determinística. Verifica-se também que a separação entre os diagramas de azimutes obtidos probabilisticamente, com RDPM = 1,0 e RDPM = 1,8, cresce com o aumento do módulo da latitude e é maior para azimutes em torno de 0°, mostrando que, nesse exemplo específico, a influência do RDPM é pequena para baixas latitudes e para apontamentos em torno da direção da órbita de satélites geoestacionários.

Por último, observa-se que, na medida em que cresce o módulo da latitude do receptor do FS, com antena de ganho 30 dBi e elevação 0°, observa-se que os valores de  $(i/n)_{dB}$  excedidos com probabilidade  $p = 10^{-4}$  são maiores que os valores de  $(i/n)_{dB}$  obtidos no cálculo determinístico para um conjunto cada vez maior de azimutes. Isso ocorre porque, ao se afastar do Equador, o receptor do FS recebe interferência de um número cada vez maior de sinais transmitidos pelos satélites geoestacionários através do lóbulo principal da antena receptora, onde os valores de ganho não são modelados como variáveis aleatórias. Nesse caso, um número menor de sinais atinge o receptor do FS na região dos lóbulos laterais da antena receptora, onde os ganhos são modelados como variáveis aleatórias. Como a modelagem do ganho da antena do FS, nos lóbulos laterais, foi feita de modo que a probabilidade desse ganho ser maior que o valor correspondente do diagrama de referência é 10%, então o valor de  $(i/n)_{dB}$  obtido no cálculo determinístico pode, para alguns azimutes, ser menor que o valor de  $(i/n)_{dB}$  excedido com probabilidade  $p = 10^{-4}$ .

Esses comentários podem ser melhor observados na Figura 4.18, que ilustra o gráfico de variação do conjunto de azimutes proibidos com o módulo da latitude do receptor do FS, considerando uma antena receptora de ganho 30 dBi e elevação 0°. Nessa figura, estão indicados os conjuntos de azimutes proibidos correspondentes ao cálculo determinístico e à modelagem probabilística da interferência (para  $\Delta = 2$  dB e RDPM = 1,0 e 1,8). Para receptores do FS localizados em baixas latitudes, verifica-se uma maior redução no conjunto de azimutes proibidos. O intervalo de azimutes proibidos aumenta com o aumento da RDPM, apesar de a diferença ser pouco expressiva para baixas latitudes. Verifica-se também que, para latitudes com módulo a partir de 70°, não faz diferença usar a modelagem probabilística, visto que os conjuntos de azimutes proibidos, tanto no caso probabilístico quanto determinístico, são os mesmos.



Figura 4.18: Variação do intervalo de azimutes proibidos em função da latitude do receptor do FS, com  $G_{\text{max}} = 30$  dBi, ângulo de elevação 0°,  $\Delta = 2$  dB, RDPM = 1,0 e 1,8 e considerando  $(i/n)_{dB}$  excedido com  $p = 10^{-4}$ .

### 4.2.2 Antena receptora do FS com ganho de 20 dBi

Nesta subseção, estão reunidos os gráficos obtidos considerando-se o ganho da antena receptora do FS igual a 20 dBi,  $\Delta = 2$  dB e *RDPM* = 1,0 e 1,8. O ângulo de elevação considerado é 0°. Para esses dados, foram obtidos diagramas de azimutes correspondentes a receptores do FS localizados em latitudes iguais a 0°, 15°S, 30°S, 45°S, 60°S e 75°S, que são apresentados nas images 4.19 a 4.24. Devido à simetria utilizada para a distribuição dos satélites geoestacionários ao longo da órbita no plano do Equador, os diagramas de azimutes correspondentes às latitudes 15°N, 30°N, 45°N, 60°N e 75°N são simétricos (em relação à linha de azimutes 90°/270°) aos diagramas correspondentes de latitudes do hemisfério sul, não variando com a longitude do receptor do FS. Nessas images, as linhas sólidas dizem respeito aos valores de  $(i/n)_{dB}$  excedidos com probabilidade  $p = 10^{-4}$ , sendo a mais interna relativa ao cálculo probabilístico com RDPM = 1,0 e a mais externa, com RDPM = 1,8. Para efeito de comparação, estão ilustrados também, em linhas pontilhadas, os diagramas de azimutes correspondentes ao cálculo determinístico de  $(i/n)_{dB}$ .



Figura 4.19: Diagramas de azimute ( $\Delta = 2 \text{ dB e } RDPM = 1,0 \text{ e } 1,8$ ), estando o receptor na latitude  $\theta_{FS} = 0^{\circ}$ , com  $G_{\text{max}} = 20 \text{ dBi e } \epsilon = 0^{\circ}$ .



Figura 4.20: Diagramas de azimute ( $\Delta = 2$  dB e RDPM = 1,0 e 1,8), estando o receptor na latitude  $\theta_{FS} = 15^{\circ}$ S, com  $G_{max} = 20$  dBi e  $\epsilon = 0^{\circ}$ .



Figura 4.21: Diagramas de azimute ( $\Delta = 2$  dB e RDPM = 1,0 e 1,8), estando o receptor na latitude  $\theta_{FS} = 30^{\circ}$ S, com  $G_{max} = 20$  dBi e  $\epsilon = 0^{\circ}$ .



Figura 4.22: Diagramas de azimute ( $\Delta = 2$  dB e RDPM = 1,0 e 1,8), estando o receptor na latitude  $\theta_{FS} = 45^{\circ}$ S, com  $G_{max} = 20$  dBi e  $\epsilon = 0^{\circ}$ .



Figura 4.23: Diagramas de azimute ( $\Delta = 2$  dB e RDPM = 1,0 e 1,8), estando o receptor na latitude  $\theta_{FS} = 60^{\circ}$ S, com  $G_{max} = 20$  dBi e  $\epsilon = 0^{\circ}$ .



Figura 4.24: Diagramas de azimutes ( $\Delta = 2$  dB e RDPM = 1,0 e 1,8), estando o receptor na latitude  $\theta_{FS} = 75^{\circ}$ S, com  $G_{max} = 20$  dBi e  $\epsilon = 0^{\circ}$ .

Os diagramas de azimutes apresentados nas images 4.19 a 4.24 permitem as seguintes observações. De uma maneira geral, os conjuntos de azimutes proibidos são maiores do que os correspondentes a antenas receptoras do FS com ganho de 30 dBi. Por exemplo, para a situação onde o receptor do FS está localizado na latitude 0°, com uma antena receptora de ganho 20 dBi e ângulo de elevação igual a 0° (Figura 4.19), o conjunto de azimutes proibidos é, no caso probabilístico (RDPM = 1,0), formado pelos intervalos [56°, 124°] e [236°, 304°], totalizando 136°. Com esses mesmos dados (latitude 0°, 0° de ângulo de elevação e RDPM = 1,0), mas com uma antena receptora do FS de ganho 30 dBi (Figura 4.12), o conjunto de azimutes proibidos é formado pelos intervalos [79°, 101°] e [259°, 281°], totalizando 44°. Esse aumento ocorre devido à diferença entre os diagramas de radiação das antenas receptoras do FS com ganhos de 30 dBi e 20 dBi, conforme ilustrados na Figura 4.2. Observa-se que o diagrama de radiação da antena receptora de 20 dBi de ganho possui um lóbulo principal mais largo que o da antena de ganho igual a 30 dBi.

No caso determinístico, para a situação onde o receptor do FS está localizado na latitude 0°, com uma antena receptora de ganho 20 dBi e ângulo de elevação igual a 0° (Figura 4.19), o conjunto de azimutes proibidos vai de 0° a 360°. Isso mostra que, para esse caso, a utilização de uma antena receptora de 20 dBi de ganho e azimute de apontamento em qualquer direção, seria proibida com base nos resultados do cálculo determinístico. Entretanto, os resultados da modelagem probabilística, mais realista, desenvolvida neste trabalho, indicam que essa antena pode ser utilizada em determinados azimutes, considerando-se a probabilidade  $p = 10^{-4}$  de que  $(i/n)_{dB} \geq -10$  dB.

Essas observações podem ser melhor visualizadas no gráfico da Figura 4.25, que mostra a variação do conjunto de azimutes proibidos com a latitude do receptor do FS. Nessa figura, estão indicados os conjuntos de azimutes proibidos correspondentes ao cálculo determinístico e à modelagem probabilística da interferência (para  $\Delta = 2$  dB e RDPM = 1,0 e 1,8). Esse gráfico mostra que é grande a influência da RDPM. Por exemplo, para o caso determinístico, antenas receptoras do FS com ganho de 20 dBi e ângulo de elevação igual a 0° não podem ser utilizadas, em qualquer azimute, com receptores do FS localizados em latitudes cujos módulos sejam inferiores a 44°. No caso probabilístico, para RDPM = 1,8, essas antenas podem ser utilizadas, em alguns azimutes, para latitudes de módulo maior que 16°. E considerando o cálculo probabilístico com RDPM = 1,0, as antenas receptoras do FS, com ganho de 20 dBi e ângulo de elevação igual a 0°, podem sempre ser utilizadas em alguns azimutes fora da região de azimutes proibidos. Por último, observa-se na figura 4.25 que a modelagem probabilística não tem efeito para latitudes cujos módulos são

maiores que  $60^{\circ}$ .



Figura 4.25: Variação do intervalo de azimutes proibidos em função da latitude do receptor do FS, com  $G_{\text{max}} = 20$  dBi, ângulo de elevação 0°,  $\Delta = 2$  dB, RDPM = 1,0 e 1,8 e considerando  $(i/n)_{dB}$  excedido com  $p = 10^{-4}$ .

### 4.2.3 Antena receptora do FS com ganho de 12 dBi

Nesta subseção, estão reunidos os diagramas de azimutes obtidos considerando-se o ganho da antena receptora do FS igual a 12 dBi,  $\Delta = 2$  dB e RDPM = 1,0 e 1,8. O ângulo de elevação considerado foi 0°. Para esses dados, foram obtidos os diagramas de azimutes correspondentes a receptores do FS localizados em latitudes iguais a 0°, 15°S, 30°S, 45°S, 60°S e 75°S, que são apresentados nas images 4.26 a 4.31. Devido à simetria utilizada para a distribuição dos satélites geoestacionários ao longo da órbita no plano do Equador, os diagramas de azimutes correspondentes às latitudes 15°N, 30°N, 45°N, 60°N e 75°N são simétricos (em relação à linha de azimutes 90°/270°) aos diagramas correspondentes de latitudes do hemisfério sul, não variando com a longitude do receptor do FS. Nessas images, as linhas sólidas dizem respeito aos valores de  $(i/n)_{\rm dE}$  excedidos com probabilidade  $p = 10^{-4}$ , sendo a mais interna relativa ao cálculo probabilístico com RDPM = 1,0 e a mais externa, com RDPM = 1,8. Para efeito de comparação, estão ilustrados também, em linhas pontilhadas, os diagramas de azimutes correspondentes ao cálculo determinístico de  $(i/n)_{\rm dE}$ .



Figura 4.26: Diagramas de azimute ( $\Delta = 2 \text{ dB e } RDPM = 1,0 \text{ e } 1,8$ ), estando o receptor na latitude  $\theta_{FS} = 0^{\circ}$ , com  $G_{\text{max}} = 12 \text{ dBi e } \epsilon = 0^{\circ}$ .



Figura 4.27: Diagramas de azimute ( $\Delta = 2$  dB e RDPM = 1,0 e 1,8), estando o receptor na latitude  $\theta_{FS} = 15^{\circ}$ S, com  $G_{max} = 12$  dBi e  $\epsilon = 0^{\circ}$ .



Figura 4.28: Diagramas de azimute ( $\Delta = 2$  dB e RDPM = 1,0 e 1,8), estando o receptor na latitude  $\theta_{FS} = 30^{\circ}$ S, com  $G_{max} = 12$  dBi e  $\epsilon = 0^{\circ}$ .



Figura 4.29: Diagramas de azimute ( $\Delta = 2$  dB e RDPM = 1,0 e 1,8), estando o receptor na latitude  $\theta_{FS} = 45^{\circ}$ S, com  $G_{max} = 12$  dBi e  $\epsilon = 0^{\circ}$ .



Figura 4.30: Diagramas de azimute ( $\Delta = 2$  dB e RDPM = 1,0 e 1,8), estando o receptor na latitude  $\theta_{FS} = 60^{\circ}$ S, com  $G_{max} = 12$  dBi e  $\epsilon = 0^{\circ}$ .



Figura 4.31: Diagramas de azimute ( $\Delta = 2$  dB e RDPM = 1,0 e 1,8), estando o receptor na latitude  $\theta_{FS} = 75^{\circ}$ S, com  $G_{max} = 12$  dBi e  $\epsilon = 0^{\circ}$ .

Os diagramas de azimutes apresentados nas images 4.26 a 4.31 permitem as seguintes observações. Em primeiro lugar, os conjuntos de azimutes proibidos, tanto no caso determinístico quanto no caso probabilístico, são iguais a  $[0^{\circ}, 360^{\circ}]$ , para latitudes cujo módulo é menor que 45°. Esse fato pode ser melhor visualizado no gráfico da Figura 4.32, que mostra a variação do conjunto de azimutes proibidos com a latitude do receptor do FS. Nessa figura, estão indicados os conjuntos de azimutes proibidos correspondentes ao cálculo determinístico e à modelagem probabilística da interferência (para  $\Delta = 2$  dB e RDPM = 1,0 e 1,8). Esse gráfico mostra que, para esse caso, é desprezível a influência da RDPM, pois o conjunto de azimutes proibidos é praticamente o mesmo independentemente da latitude e valor de RDPM na faixa de 1,0 e 1,8.

Para o caso determinístico, antenas receptoras do FS com ganho de 12 dBi e ângulo de elevação igual a 0° não podem ser utilizadas, em qualquer azimute, com receptores do FS localizados em latitudes cujos módulos sejam inferiores a 60°. No caso probabilístico, para *RDPM* variando de 1,0 a 1,8, essas antenas podem ser utilizadas, em alguns azimutes, para latitudes de módulo maior que  $45^{\circ}$ . Por último, observa-se na Figura 4.32 que a modelagem probabilística não tem efeito para latitudes cujos módulos são maiores que 70°.

Azimute da antena do FS (em graus) 150 Caso determinístico ---- RDPM = 1,8 RDPM = 1,0100 50 0 -50 -100 -150 0 70 80 10 20 30 40 50 60 Módulo da Latitude do receptor do FS (em graus)

Figura 4.32: Variação do intervalo de azimutes proibidos em função da latitude do receptor do FS, com  $G_{\text{max}} = 12$  dBi, ângulo de elevação 0°,  $\Delta = 2$  dB, RDPM = 1,0 e 1,8 e considerando  $(i/n)_{dB}$  excedido com  $p = 10^{-4}$ .

54

#### 4.2.4

#### Comentários sobre os resultados apresentados

Os resultados mostrados nas subseções 4.2.1, 4.2.2 e 4.2.3 permitiram avaliar o efeito conjunto da modelagem probabilística dos ganhos nos lóbulos laterais da antena receptora do FS e da densidade de fluxo de potência, produzida por cada um dos satélites geoestacionários na superfície da Terra, no cálculo da interferência agregada gerada pela transmissão de múltiplos satélites geoestacionários em um receptor do Serviço Fixo Terrestre (FS) na faixa de 7 GHz. A influência da variação de alguns dos parâmetros envolvidos também foi analisada, tanto no cálculo determinístico quanto no cálculo probabilístico de interferência. Os parâmetros analisados foram a latitude do receptor do FS, o ganho e o apontamento (azimute e elevação) da antena receptora do FS e a Razão Desvio Padrão-Média (*RDPM*) das variáveis aleatórias que caracterizam os ganhos no lóbulos laterais da antena receptora do FS.

Comentários relativos aos resultados apresentados neste capítulo são aqui reunidos resumidamente. De uma maneira geral, o cálculo probabilístico, aqui considerado mais realista, conduz a um valor de  $(i/n)_{dB}$ , excedido com probabilidade  $p = 10^{-4}$ , menor do que o valor calculado deterministicamente. Essa diferença cresce à medida em que o azimute da antena receptora do FS se distancia da faixa de azimutes proibidos. Como consequência, há uma redução no conjunto de azimutes proibidos resultante do cálculo probabilístico, quando comparado ao conjunto de azimutes proibidos obtido pelo cálculo determinístico (com exceção das altas latitudes). Isso mostra, de maneira clara, o quão pessimista pode ser a abordagem determinística.

No que diz respeito ao ganho da antena receptora do FS, no caso de ângulo de elevação igual a 0°, as principais diferenças são verificadas comparando-se as images 4.18, 4.25 e 4.32. Essas diferenças resultam do fato de antenas com ganho menores terem lóbulos principais mais largos. Observa-se que, conforme esperado, o conjunto de azimutes proibidos aumenta na medida em que o ganho da antena receptora do FS diminui, ou seja, na medida em que seu lóbulo principal fica mais largo. Considerando a Figura 4.18, observa-se que receptores do FS que utilizam antenas receptoras de 30 dBi de ganho podem operar em qualquer latitude, obedecendo a restrição imposta pelo conjunto de azimutes proibidos. Além disso, para latitudes maiores que 60° em módulo, não há diferença entre os conjuntos de azimutes proibidos resultantes dos cálculos determinístico e probabilístico.

No caso de receptores do FS utilizando antenas receptoras com 20 dBi de ganho (ver Figura 4.25), o cálculo determinístico indica que, independentemente do azimute de apontamento de sua antena receptora, sua operação não seria possível em latitudes inferiores, em módulo, a 45°. Na abordagem probabilística, esse limite é reduzido para 15° (RDPM = 1,8), podendo chegar a 0° (RDPM = 1,0). Esse comportamento torna-se ainda mais crítico no caso de receptores do FS que utilizam antenas receptoras com ganho igual a 12 dBi (ver Figura 4.32). Nesse caso, o cálculo determinístico indica que, independentemente do azimute de apontamento de sua antena receptora, sua operação não seria possível em latitudes inferiores, em módulo, a 60°. O cálculo probabilístico proporciona uma pequena redução desse valor, para 45°, independentemente do valor considerado para a RDPM. A existência de limites mínimos de latitudes tão altos para a localização de receptores do FS praticamente inviabiliza a utilização de antenas receptoras com ganho de 12 dBi.

# 5 Conclusões

A análise feita neste trabalho permitiu avaliar a interferência agregada produzida pela transmissão de múltiplos satélites geoestacionários do Serviço Fixo Por Satélite (FSS - *Fixed-Satellite Service*) sobre receptores do Serviço Fixo Terrestre (FS - *Fixed Service*) operando na faixa de 7 GHz. Com isso, foi possível verificar o atendimento ao critério de proteção do FS em diversos cenários. O cálculo da interferência foi baseado em uma 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, foram modelados por variáveis aleatórias com funções densidade de probabilidade consideradas adequadas para a caracterização dessas variáveis. Como consequência, a razão interferência agregada-ruído térmico no receptor do FS,  $(i/n)_{dB}$ , é também caracterizada por uma variável aleatória.

Através da modelagem matemática, foi obtida a expressão analítica da distribuição cumulativa de probabilidade de  $((i/n)_{dB})$ , que foi utilizada na análise de diversos cenários, com vários valores de ganho e apontamento (azimute e elevação) da antena receptora, latitude do receptor do FS e Razão Desvio Padrão-Média (*RDPM*) das variáveis aleatórias que caracterizam os ganhos nos lóbulos laterais da antena receptora do FS. Os resultados numéricos obtidos permitiram verificar quantitativamente o efeito da modelagem probabilística das densidades de fluxo de potência dos satélites e dos ganhos nos lóbulos laterais da antena receptora do FS na verificação do atendimento ao critério de proteção do FS.

De uma maneira geral, o cálculo probabilístico, aqui considerado mais realista, conduz a um valor de  $(i/n)_{dB}$ , excedido com probabilidade  $p = 10^{-4}$ , menor do que o valor calculado deterministicamente. Essa diferença cresce à medida em que o azimute da antena receptora do FS se distancia da faixa de azimutes proibidos. Como consequência, há uma redução no conjunto de azimutes proibidos resultante do cálculo probabilístico, quando comparado ao conjunto de azimutes proibidos obtido pelo cálculo determinístico (com exceção das altas latitudes). Isso mostra, de maneira clara, o quão pessimista pode ser a abordagem determinística. Indicações quantitativas dessa abordagem podem ser observadas nas figuras 4.18, 4.25 e 4.32.

De maneira geral, com base nos resultados descritos ao longo do Capítulo 4, as principais conclusões deste trabalho encontram-se resumidas abaixo:

- Para antenas receptoras do FS com ganho de 30 dBi e para latitudes com módulo abaixo de 60° (ver Figura 4.18), há uma redução no conjunto de azimutes proibidos resultante do cálculo probabilístico, quando comparado ao conjunto de azimutes proibidos obtido pelo cálculo determinístico. Isso significa que, para latitudes maiores que 60° em módulo, não há diferença entre os conjuntos de azimutes proibidos resultantes dos cálculos determinístico e probabilístico.
- No caso de receptores do FS utilizando antenas receptoras com 20 dBi de ganho (ver Figura 4.25), o cálculo determinístico indica que, independentemente do azimute de apontamento de sua antena receptora, sua operação não seria possível em latitudes inferiores, em módulo, a 45°. Na abordagem probabilística, esse limite é reduzido para 15°.
- Esse comportamento torna-se ainda mais crítico no caso de receptores do FS que utilizam antenas receptoras com ganho igual a 12 dBi (ver Figura 4.32). Nesse caso, o cálculo determinístico indica que, independentemente do azimute de apontamento de sua antena receptora, sua operação não seria possível em latitudes inferiores, em módulo, a 60°. O cálculo probabilístico proporciona uma pequena redução desse valor, para 45°.
- A existência de limites mínimos de latitudes tão altos para a localização de receptores do FS praticamente inviabiliza a utilização de antenas receptoras de ganho de 12 dBi.

### Referências bibliográficas

- RUSSIAN FEDERATION. Compatibility studies between the fixedsatellite service and the terrestrial and other space services in the frequency bands 7.150-7.250 MHz and 8.400-8.500 MHz. Working Document Towards a Preliminary Draft New Report ITU-R S.[FSS 7/8 GHz Compatibility], Document 4A/90-E, September 2012.
- [2] REPUBLIC OF KOREA. Compatibility studies between the fixedsatellite service and the terrestrial and other space services in the frequency bands 7.150-7.250 MHz and 8.400-8.500 MHz. Working Document Towards a Preliminary Draft New Report ITU-R S.[FSS 7/8 GHz Compatibility], Document 4A/166-E, April 2013.
- [3] USA. Compatibility studies between the fixed-satellite service and the terrestrial and other space services in the frequency bands 7.150-7.250 MHz and 8.400-8.500 MHz. Proposed Updates to Working Document Towards a Preliminary Draft New Report ITU-R S.[FSS 7/8 GHz Compatibility], Document 4A/195-E, April 2013.
- [4] CHINA. Compatibility studies between the fixed-satellite service and the terrestrial and other space services in the frequency bands 7.150-7.250 MHz and 8.400-8.500 MHz. Working document towards a preliminary draft new Report ITU-R S.[FSS 7/8 GHz Compatibility], Document 4A/414-E, January 2014.
- [5] EUROPEAN SPACE AGENCY. Compatibility studies between the fixed-satellite service and the terrestrial and other space services in the frequency bands 7.150-7.250 MHz and 8.400-8.500 MHz. Working document towards a preliminary draft new Report ITU-R S.[FSS 7/8 GHz Compatibility], Document 4A/416-E, January 2014.
- [6] JAPAN. Compatibility studies between the fixed-satellite service and the terrestrial and other space services in the frequency bands 7.150-7.250 MHz and 8.400-8.500 MHz. Proposal for the additional element of working document towards a preliminary draft new Report ITU-R S.[FSS 7/8 GHz Compatibility], Document 4A/506-E, June 2014.

- [7] 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, Genebra, 2012.
- [8] 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, Genebra, 2012.
- [9] Statistical model for sidelobe interference in satellite networks. Relatório Final do Contrato INTEL-198, 1982.
- [10] ALBUQUERQUE J. P., FORTES J. M. P., FINAMORE A. C., Probabilidade, Variáveis Aleatórias e Processos Estocásticos. Editora Interciência e PUC- RJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2008.
- [11] Radiation diagrams for use as design objectives for antennas of earth stations operating with geostationary satellites. Recommendation ITU-R S.580-6, Genebra, 2004.
- [12] Probabilistic analysis for assessing interference into the fixed service from satellites using the geostationary orbit. Recommendation ITU-R F.1107-2, Genebra, 2011.

# A Mudança de base

Para se calcular o ângulo entre a direção de apontamento da antena de uma determinada estação na superfície da Terra e a direção de um satélite, é necessário representarmos os vetores de posição da estação e do satélite expressos numa mesma base ortonormal. Dessa forma, é importante sabermos como realizar a transformação das coordenadas de um vetor em uma base para outra base diferente. Este apêndice demonstra a expressão da matriz de mudança de base  $\mathbf{M}$ , necessária para mudar a representação de um vetor na base B', referente a um sistema cartesiano centrado na posição geográfica do receptor do FS, para a base B, referente a um sistema de coordenadas cuja origem é o centro da Terra.

Considere a geometria ilustrada na Figura A.1, onde o espaço  $\mathbb{R}^3$  é gerado pela base ortonormal B, composta pelos vetores unitários  $\mathbf{i}, \mathbf{j} \in \mathbf{k}$ . Esses vetores correspondem, respectivamente, aos eixos  $x, y \in z$  do sistema cartesiano com origem no centro da Terra (ponto O). O eixo z aponta para o Norte, o plano xy coincide com o plano do Equador e o plano xz contém o meridiano de Greenwich.



Figura A.1: Geometria para determinação da matriz de mudança de base.

Os vetores **s** e **p** representam, respectivamente, as posições do satélite e do receptor do FS na superfície terrestre em relação à Base *B*. Nesse caso, o vetor **p** também indica a origem O' do sistema x'y'z' em relação à Base *B*.

O relacionamento entre as coordenadas esféricas e retangulares do vetor  $\mathbf{p}$  em relação à base B é dada por

$$\mathbf{p} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{\rm FS} \cos \theta_{\rm FS} \cos \phi_{\rm FS} \\ r_{\rm FS} \cos \theta_{\rm FS} \sin \phi_{\rm FS} \\ r_{\rm FS} \sin \theta_{\rm FS} \end{bmatrix}, \qquad (A-1)$$

onde  $\theta_{\rm FS}$  e  $\phi_{\rm FS}$  são, respectivamente, a latitude e a longitude do receptor do FS e  $r_{\rm FS} = r_{\rm T} + h_{\rm FS}$ , onde  $r_{\rm T}$  é o raio médio da Terra (cerca de 6.378 km) e  $h_{\rm FS}$  é a altura do receptor do FS.

As direções dos eixos do sistema x'y'z' foram geradas pela base B', que é composta pelos vetores unitários **m**, **n** e **o**. Com respeito à base B, **o** é o vetor unitário correspondente ao prolongamento do vetor **p**, sendo dado por

$$\mathbf{o} = \begin{bmatrix} o_x \\ o_y \\ o_z \end{bmatrix} = \frac{\mathbf{p}}{\|\mathbf{p}\|} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{\rm FS} \cos \phi_{\rm FS} \\ \cos \theta_{\rm FS} \sin \phi_{\rm FS} \\ \sin \theta_{\rm FS} \end{bmatrix}.$$
(A-2)

O vetor **m** é perpendicular ao plano **ko**, sendo definido, em relação à base B, em função do produto vetorial  $\mathbf{k} \times \mathbf{o}$ , ou seja,

$$\mathbf{m} = \begin{bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix} = \frac{\mathbf{k} \times \mathbf{o}}{\|\mathbf{k} \times \mathbf{o}\|} = \frac{\begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ 0 & 0 & 1 \\ | \mathbf{o}_x & \mathbf{o}_y & \mathbf{o}_z \end{vmatrix}}{\left\| \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ 0 & 0 & 1 \\ | \mathbf{o}_x & \mathbf{o}_y & \mathbf{o}_z \end{vmatrix}} = \begin{bmatrix} \frac{-o_y}{\sqrt{o_x^2 + o_y^2}} \\ \frac{1}{\sqrt{o_x^2 + o_y^2}} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\operatorname{sen} \phi_{\mathrm{FS}} \\ \cos \phi_{\mathrm{FS}} \\ 0 \end{bmatrix}.$$
(A-3)

Finalmente, o vetor <br/>n, também em relação à base B,é dado por

$$\mathbf{n} = \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} = \mathbf{o} \times \mathbf{m} = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ o_x & o_y & o_z \\ m_x & m_y & m_z \end{vmatrix} = \begin{bmatrix} m_z o_y - m_y o_z \\ m_x o_z - m_z o_x \\ m_y o_x - m_x o_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos\phi_{\rm FS} \sin\theta_{\rm FS} \\ -\sin\phi_{\rm FS} \sin\theta_{\rm FS} \\ \cos\theta_{\rm FS} \end{bmatrix}.$$
(A-4)

A mudança de base do vetor  $\mathbf{a}$ , que caracteriza o apontamento da antena receptora do FS, da base B' para a base B, é dada por

$$\left[\mathbf{a}\right]_{B} = \mathbf{M} \left[\mathbf{a}\right]_{B'}, \qquad (A-5)$$

onde  $[\mathbf{a}]_{B'}$  é o vetor de apontamento da antena receptora do FS escrito na base

 $B' \in \mathbf{M}$ é a matriz de mudança de base, definida por  $\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{m} & \mathbf{n} & \mathbf{o} \end{bmatrix}$ , ou seja,

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_x & n_x & o_x \\ m_y & n_y & o_y \\ m_z & n_z & o_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\operatorname{sen}\phi_{\mathrm{FS}} & -\cos\phi_{\mathrm{FS}}\operatorname{sen}\theta_{\mathrm{FS}} & \cos\theta_{\mathrm{FS}}\cos\phi_{\mathrm{FS}} \\ \cos\phi_{\mathrm{FS}} & -\operatorname{sen}\phi_{\mathrm{FS}}\operatorname{sen}\theta_{\mathrm{FS}} & \cos\theta_{\mathrm{FS}}\sin\phi_{\mathrm{FS}} \\ 0 & \cos\theta_{\mathrm{FS}} & \sin\theta_{\mathrm{FS}} \end{bmatrix}.$$
(A-6)

No caso geral de um vetor qualquer  $\mathbf{v},$  tem-se

$$\left[\mathbf{v}\right]_{B} = \mathbf{M} \left[\mathbf{v}\right]_{B'} + \mathbf{p} \,. \tag{A-7}$$

A mudança da base B para a base B' do vetor  ${\bf v}$  é dada por

$$[\mathbf{v}]_{B'} = \mathbf{M}^{-1} \left( [\mathbf{v}]_B - \mathbf{p} \right) \,. \tag{A-8}$$

onde  $\mathbf{M}^{-1}$  é a inversa da matriz  $\mathbf{M}$ .

# B Diagramas de azimutes complementares

### B.1 Antena receptora do FS com ganho de 30 dB e 1 grau de elevação

De maneira análoga à subseção 4.2.1, diagramas de azimutes correspondentes a receptores do FS localizados nas latitudes 0°, 15°S, 30°S, 45°S, 60°S e 75°S são apresentados nas images B.1 a B.6, para antenas receptoras com ganho de 30 dBi e ângulo de elevação igual a 1°. As linhas sólidas dizem respeito aos valores de  $(i/n)_{dB}$  excedidos com probabilidade  $p = 10^{-4}$ , sendo a mais interna relativa ao cálculo probabilístico com RDPM = 1,0 e a mais externa, com RDPM = 1,8. Os diagramas de azimutes correspondentes ao cálculo determinístico de  $(i/n)_{dB}$  estão ilustrados em linhas pontilhadas.



Figura B.1: Diagramas de azimutes ( $\Delta = 2$  dB e RDPM = 1,0 e 1,8), com o receptor na latitude  $\theta_{FS} = 0^{\circ}$ , com  $G_{\text{max}} = 30$  dBi e  $\epsilon = 1^{\circ}$ .



Figura B.2: Diagramas de azimutes ( $\Delta = 2 \text{ dB e } RDPM = 1,0 \text{ e } 1,8$ ), com o receptor na latitude  $\theta_{FS} = 15^{\circ}\text{S}$ , com  $G_{\text{max}} = 30 \text{ dBi e } \epsilon = 1^{\circ}$ .



Figura B.3: Diagramas de azimutes ( $\Delta = 2$  dB e RDPM = 1,0 e 1,8), com o receptor na latitude  $\theta_{FS} = 30^{\circ}$ S, com  $G_{max} = 30$  dBi e  $\epsilon = 1^{\circ}$ .



Figura B.4: Diagramas de azimutes ( $\Delta = 2 \text{ dB e } RDPM = 1,0 \text{ e } 1,8$ ), com o receptor na latitude  $\theta_{FS} = 45^{\circ}\text{S}$ , com  $G_{\text{max}} = 30 \text{ dBi e } \epsilon = 1^{\circ}$ .



Figura B.5: Diagramas de azimutes ( $\Delta = 2$  dB e RDPM = 1,0 e 1,8), com o receptor na latitude  $\theta_{FS} = 60^{\circ}$ S, com  $G_{max} = 30$  dBi e  $\epsilon = 1^{\circ}$ .



Figura B.6: Diagramas de azimutes ( $\Delta = 2$  dB e RDPM = 1,0 e 1,8), com o receptor na latitude  $\theta_{FS} = 75^{\circ}$ S, com  $G_{max} = 30$  dBi e  $\epsilon = 1^{\circ}$ .

Comparando os gráficos das images 4.12 a 4.17 com os das images B.1 a B.6, verifica-se que as observações feitas na Subseção 4.2.1 são ainda pertinentes: o conjunto de azimutes proibidos é menor no caso probabilístico, quando comparado com o conjunto de azimutes proibidos resultantes do cálculo determinístico (com exceção das altas latitudes), e a influência da *RDPM* é pequena para baixas latitudes e para apontamentos da antena receptora do FS em torno da direção da órbita de satélites geoestacionários. A única diferença é um pequeno aumento nos valores de  $(i/n)_{dB}$  para azimutes na região dos azimutes proibidos. Esse aumento é observado no caso determinístico e no cálculo probabilístico e ocorre porque, com o aumento do ângulo de elevação da antena receptora do FS, o apontamento dessa antena se aproxima da direção da órbita geoestacionária.

A Figura B.7 ilustra o gráfico de variação do conjunto de azimutes proibidos com o módulo da latitude do receptor do FS, com uma antena receptora de ganho 30 dBi e ângulo de elevação igual a 1°. Nessa figura, estão indicados os conjuntos de azimutes proibidos correspondentes ao cálculo determinístico e à modelagem probabilística da interferência (para  $\Delta = 2$  dB e RDPM = 1,0 e 1,8). Comparando o gráfico dessa figura com o da Figura 4.18, correspondente a um ângulo de elevação da antena do FS igual a 0°, pode-se verificar que o conjunto de azimute proibidos é um pouco maior, devido ao aumento do valor de  $(i/n)_{dB}$  para os quais os critérios de proteção do FS não são atendidos. Por exemplo, no caso probabilístico (RDPM = 1,0), para um receptor do FS localizado na latitude 0°, com antena de ganho 30 dBi e elevação 0°, o conjunto de azimutes proibidos é formado pelos intervalos [79°, 101°] e [259°, 281°], totalizando 44°. Para um receptor do FS localizado mesma posição (latitude 0°) e com antena de ganho 30 dBi e elevação 1°, o conjunto de azimutes proibidos corresponde aos intervalos [78°, 102°] e [258°, 282°], que totalizam 48°.

Por último, observa-se que, na medida em que cresce o módulo da latitude do receptor do FS, observa-se que os valores de  $(i/n)_{dB}$  excedidos com probabilidade  $p = 10^{-4}$  são maiores que os valores de  $(i/n)_{dB}$  obtidos no cálculo determinístico, para um conjunto cada vez maior de azimutes. Como no caso abordado na subseção 4.2.1 (ângulo de elevação igual a 0°), isso ocorre porque, ao se afastar do Equador, o receptor do FS recebe interferência de um número cada vez maior de sinais transmitidos pelos satélites geoestacionários através do lóbulo principal da antena receptora, onde os ganhos não são modelados como variáveis aleatórias. Nesse caso, um número menor de sinais atinge o receptor na região dos lóbulos laterais da antena receptora do FS, onde os ganhos são modelados como variáveis aleatórias. Como a modelagem do ganho dessa antena, nos lóbulos laterais, foi feita de modo que a probabilidade do ganho dessa antena ser maior do que o valor correspondente do diagrama de referência é 0,1, então o valor de  $(i/n)_{dB}$  obtido no cálculo determinístico pode, para alguns azimutes, ser menor que o valor de  $(i/n)_{dB}$  excedido com probabilidade  $p = 10^{-4}$ .



Figura B.7: Variação do intervalo de azimutes proibidos em função da latitude do receptor do FS, com  $G_{\text{max}} = 30$  dBi, ângulo de elevação 1°,  $\Delta = 2$  dB, RDPM = 1,0 e 1,8 e considerando  $(i/n)_{dB}$  excedido com  $p = 10^{-4}$ .

# B.2

#### Antena receptora do FS com ganho de 30 dB e 5 graus de elevação

Diagramas de azimutes correspondentes a receptores do FS localizados nas latitudes 0°, 15°S, 30°S, 45°S, 60°S e 75°S são apresentados nas images B.8 a B.13, para antenas receptoras com ganho de 30 dBi e ângulo de elevação igual a 5°. As linhas sólidas dizem respeito aos valores de  $(i/n)_{dB}$  excedidos com probabilidade  $p = 10^{-4}$ , sendo a mais interna relativa ao cálculo probabilístico com RDPM = 1,0 e a mais externa, com RDPM = 1,8. Os diagramas de azimutes correspondentes ao cálculo determinístico de  $(i/n)_{dB}$  estão ilustrados em linhas pontilhadas.



Figura B.8: Diagramas de azimutes ( $\Delta = 2$  dB e RDPM = 1,0 e 1,8), com o receptor na latitude  $\theta_{FS} = 0^{\circ}$ , com  $G_{\text{max}} = 30$  dBi e  $\epsilon = 5^{\circ}$ .



Figura B.9: Diagramas de azimutes ( $\Delta = 2$  dB e RDPM = 1,0 e 1,8), com o receptor na latitude  $\theta_{FS} = 15^{\circ}$ S, com  $G_{max} = 30$  dBi e  $\epsilon = 5^{\circ}$ .



Figura B.10: Diagramas de azimutes ( $\Delta = 2$  dB e RDPM = 1,0 e 1,8), com o receptor na latitude  $\theta_{FS} = 30^{\circ}$ S, com  $G_{max} = 30$  dBi e  $\epsilon = 5^{\circ}$ .



Figura B.11: Diagramas de azimutes ( $\Delta = 2 \text{ dB e } RDPM = 1,0 \text{ e } 1,8$ ), com o receptor na latitude  $\theta_{FS} = 45^{\circ}\text{S}$ , com  $G_{\text{max}} = 30 \text{ dBi e } \epsilon = 5^{\circ}$ .



Figura B.12: Diagramas de azimutes ( $\Delta = 2$  dB e RDPM = 1,0 e 1,8), com o receptor na latitude  $\theta_{FS} = 60^{\circ}$ S, com  $G_{max} = 30$  dBi e  $\epsilon = 5^{\circ}$ .



Figura B.13: Diagramas de azimutes ( $\Delta = 2$  dB e RDPM = 1,0 e 1,8), com o receptor na latitude  $\theta_{FS} = 75^{\circ}$ S, com  $G_{max} = 30$  dBi e  $\epsilon = 5^{\circ}$ .

Comparando os gráficos das images B.8 a B.13 com os das images das subseções 4.2.1 e B.1, verifica-se que o conjunto de azimutes proibidos aumenta quando o ângulo de elevação aumenta para 5°. Por exemplo, na latitude 0°, no caso probabilístico (RDPM = 1,0), quando o ângulo de elevação é 5°, o conjunto de azimutes proibidos é formado pelos intervalos [74°, 106°] e [254°, 286°], totalizando 64°. Observando a Figura B.1 (latitude 0° e elevação 1°), verifica-se que, no caso probabilístico (RDPM = 1,0), o conjunto de azimutes proibidos é formado pelos intervalos [78°, 102°] e [258°, 282°], totalizando 48°. Além disso, verifica-se que, como nos casos anteriores (ângulos de elevação 0° e 1°), o conjunto de azimutes proibidos diminui no caso probabilístico, comparado com o caso determinístico (com exceção das altas latitudes), e a influência do RDPMé pequena para baixas latitudes e para apontamentos da antena receptora do FS próximos da direção da órbita de satélites geoestacionários.

Esse fato é melhor observado na Figura B.14, que ilustra o gráfico de variação do conjunto de azimutes proibidos com o módulo da latitude do receptor do FS, com uma antena receptora de ganho 30 dBi e ângulo de elevação igual a 5°. Nessa figura, estão indicados os conjuntos de azimutes proibidos correspondentes ao cálculo determinístico e à modelagem probabilística da interferência (para  $\Delta = 2$  dB e RDPM = 1,0 e 1,8). Conforme mencionado, observa-se que o conjunto de azimute proibidos é um pouco maior que aquele correspondente a ângulos de elevação da antena receptora do FS iguais a 0° e 1°.


Figura B.14: Variação do intervalo de azimutes proibidos em função da latitude do receptor do FS, com  $G_{\text{max}} = 30$  dBi, ângulo de elevação 5°,  $\Delta = 2$  dB, RDPM = 1,0 e 1,8 e considerando  $(i/n)_{dB}$  excedido com  $p = 10^{-4}$ .

## B.3 Antena receptora do FS com ganho de 20 dB e 1 grau de elevação

De maneira análoga à subseção 4.2.2, diagramas de azimutes correspondentes a receptores do FS localizados nas latitudes 0°, 15°S, 30°S, 45°S, 60°S e 75°S são apresentados nas images B.15 a B.20, para antenas receptoras com ganho de 20 dBi e ângulo de elevação igual a 1°. As linhas sólidas dizem respeito aos valores de  $(i/n)_{dB}$  excedidos com probabilidade  $p = 10^{-4}$ , sendo a mais interna relativa ao cálculo probabilístico com RDPM = 1,0 e a mais externa, com RDPM = 1,8. Os diagramas de azimutes correspondentes ao cálculo determinístico de  $(i/n)_{dB}$  estão ilustrados em linhas pontilhadas.



Figura B.15: Diagramas de azimutes ( $\Delta = 2 \text{ dB e } RDPM = 1,0 \text{ e } 1,8$ ), estando o receptor na latitude  $\theta_{FS} = 0^{\circ}$ , com  $G_{\text{max}} = 20 \text{ dBi e } \epsilon = 1^{\circ}$ .



Figura B.16: Diagramas de azimutes ( $\Delta = 2 \text{ dB e } RDPM = 1,0 \text{ e } 1,8$ ), estando o receptor na latitude  $\theta_{FS} = 15^{\circ}\text{S}$ , com  $G_{\text{max}} = 20 \text{ dBi e } \epsilon = 1^{\circ}$ .



Figura B.17: Diagramas de azimutes ( $\Delta = 2 \text{ dB e } RDPM = 1,0 \text{ e } 1,8$ ), estando o receptor na latitude  $\theta_{FS} = 30^{\circ}\text{S}$ , com  $G_{\text{max}} = 20 \text{ dBi e } \epsilon = 1^{\circ}$ .



Figura B.18: Diagramas de azimutes ( $\Delta = 2$  dB e RDPM = 1,0 e 1,8), estando o receptor na latitude  $\theta_{FS} = 45^{\circ}$ S, com  $G_{max} = 20$  dBi e  $\epsilon = 1^{\circ}$ .



Figura B.19: Diagramas de azimutes ( $\Delta = 2 \text{ dB e } RDPM = 1,0 \text{ e } 1,8$ ), estando o receptor na latitude  $\theta_{FS} = 60^{\circ}\text{S}$ , com  $G_{\text{max}} = 20 \text{ dBi e } \epsilon = 1^{\circ}$ .



Figura B.20: Diagramas de azimutes ( $\Delta = 2$  dB e RDPM = 1,0 e 1,8), estando o receptor na latitude  $\theta_{FS} = 75^{\circ}$ S, com  $G_{max} = 20$  dBi e  $\epsilon = 1^{\circ}$ .

Comparando os gráficos das images B.15 a B.20 (ângulo de elevação igual a 1°) com os das images 4.19 a 4.24 (ângulo de elevação igual a 0°), verificase que a diferença é pouco expressiva. As observações feitas na Subseção 4.2.2 são ainda pertinentes: de uma maneira geral, os conjuntos de azimutes proibidos são maiores do que os correspondentes a antenas receptoras do FS com ganho de 30 dBi; no caso determinístico, a utilização de uma antena receptora de 20 dBi de ganho e azimute de apontamento em qualquer direção, seria proibida com base nos resultados do cálculo determinístico; os resultados da modelagem probabilística, mais realista, indicam que essa antena pode ser utilizada em determinados azimutes, considerando-se a probabilidade  $p = 10^{-4}$ de que o nível de  $(i/n)_{dB}$  seja maior ou igual a -10 dB. A única diferença é um pequeno aumento nos valores de  $(i/n)_{dB}$  para azimutes na região dos azimutes proibidos. Esse aumento é observado no caso determinístico e no cálculo probabilístico e ocorre porque, com o aumento do ângulo de elevação da antena receptora do FS, o apontamento dessa antena se aproxima da direção da órbita geoestacionária.

A Figura B.21 ilustra o gráfico de variação do conjunto de azimutes proibidos com o módulo da latitude do receptor do FS, com uma antena receptora de ganho 20 dBi e ângulo de elevação igual a 1°. Nessa figura, estão indicados os conjuntos de azimutes proibidos correspondentes ao cálculo determinístico e à modelagem probabilística da interferência (para  $\Delta = 2$  dB e RDPM = 1,0 e 1,8). Comparando o gráfico dessa figura com o da Figura 4.25, correspondente a um ângulo de elevação da antena do FS igual a 0°, pode-se verificar que o conjunto de azimute proibidos é um pouco maior, devido ao aumento do valor de  $(i/n)_{dB}$  para os quais os critérios de proteção do FS não são atendidos. Por exemplo, no caso probabilístico (RDPM = 1,0), para um receptor do FS localizado na latitude 0°, com antena de ganho 20 dBi e elevação 0°, o conjunto de azimutes proibidos é formado pelos intervalos [56°, 124°] e [236°, 304°], totalizando 136°. Para um receptor do FS localizado na mesma posição (latitude 0°) e com antena de ganho 30 dBi e elevação 1°, o conjunto de azimutes proibidos corresponde aos intervalos [55°, 125°] e [235°, 305°], que totalizam 140°.

Esse gráfico também mostra que é grande a influência da *RDPM*. Por exemplo, para o caso determinístico, antenas receptoras do FS com ganho de 20 dBi e ângulo de elevação igual a 1° não podem ser utilizadas, em qualquer azimute, com receptores do FS localizados em latitudes cujos módulos sejam inferiores a 44°. No caso probabilístico, para RDPM = 1,8, essas antenas podem ser utilizadas, em alguns azimutes, para latitudes de módulo maior que 15°. E considerando o cálculo probabilístico com RDPM = 1,0, as antenas receptoras do FS, com ganho de 20 dBi e ângulo de elevação igual a 1°, podem sempre ser utilizadas em alguns azimutes fora da região de azimutes proibidos. Por último, observa-se na Figura B.21 que a modelagem probabilística não tem efeito para latitudes cujos módulos são maiores que 60°.



Figura B.21: Variação do intervalo de azimutes proibidos em função da latitude do receptor do FS, com  $G_{\text{max}} = 20$  dBi, ângulo de elevação 1°,  $\Delta = 2$  dB, RDPM = 1,0 e 1,8 e considerando  $(i/n)_{dB}$  excedido com  $p = 10^{-4}$ .

## B.4 Antena receptora do FS com ganho de 20 dB e 5 graus de elevação

Diagramas de azimutes correspondentes a receptores do FS localizados nas latitudes 0°, 15°S, 30°S, 45°S, 60°S e 75°S são apresentados nas images B.22 a B.27, para antenas receptoras com ganho de 20 dBi e ângulo de elevação igual a 5°. As linhas sólidas dizem respeito aos valores de  $(i/n)_{dB}$  excedidos com probabilidade  $p = 10^{-4}$ , sendo a mais interna relativa ao cálculo probabilístico com RDPM = 1,0 e a mais externa, com RDPM = 1,8. Os diagramas de azimutes correspondentes ao cálculo determinístico de  $(i/n)_{dB}$  estão ilustrados em linhas pontilhadas.



Figura B.22: Diagramas de azimutes ( $\Delta = 2 \text{ dB e } RDPM = 1,0 \text{ e } 1,8$ ), estando o receptor na latitude  $\theta_{FS} = 0^{\circ}$ , com  $G_{\text{max}} = 20 \text{ dBi e } \epsilon = 5^{\circ}$ .



Figura B.23: Diagramas de azimutes ( $\Delta = 2 \text{ dB e } RDPM = 1,0 \text{ e } 1,8$ ), estando o receptor na latitude  $\theta_{FS} = 15^{\circ}\text{S}$ , com  $G_{\text{max}} = 20 \text{ dBi e } \epsilon = 5^{\circ}$ .



Figura B.24: Diagramas de azimutes ( $\Delta = 2 \text{ dB e } RDPM = 1,0 \text{ e } 1,8$ ), estando o receptor na latitude  $\theta_{FS} = 30^{\circ}\text{S}$ , com  $G_{\text{max}} = 20 \text{ dBi e } \epsilon = 5^{\circ}$ .



Figura B.25: Diagramas de azimutes ( $\Delta = 2$  dB e RDPM = 1,0 e 1,8), estando o receptor na latitude  $\theta_{FS} = 45^{\circ}$ S, com  $G_{max} = 20$  dBi e  $\epsilon = 5^{\circ}$ .



Figura B.26: Diagramas de azimutes ( $\Delta = 2 \text{ dB e } RDPM = 1,0 \text{ e } 1,8$ ), estando o receptor na latitude  $\theta_{FS} = 60^{\circ}\text{S}$ , com  $G_{\text{max}} = 20 \text{ dBi e } \epsilon = 5^{\circ}$ .



Figura B.27: Diagramas de azimutes ( $\Delta = 2$  dB e RDPM = 1,0 e 1,8), estando o receptor na latitude  $\theta_{FS} = 75^{\circ}$ S, com  $G_{max} = 20$  dBi e  $\epsilon = 5^{\circ}$ .

Comparando os gráficos das images B.22 a B.27 com os das images das subseções 4.2.2 e B.3, verifica-se, como no caso da antena de 30 dBi, que o conjunto de azimutes proibidos aumenta quando o ângulo de elevação aumenta de 1° para 5°. Por exemplo, na latitude 0°, no caso probabilístico (RDPM =1,0), quando o ângulo de elevação é 5°, o conjunto de azimutes proibidos é formado pelos intervalos [53°, 127°] e [233°, 307°], totalizando 148°. Observando a Figura B.15 (latitude 0° e elevação 1°), verifica-se que, no caso probabilístico (RDPM = 1,0), o conjunto de azimutes proibidos é formado pelos intervalos [55°, 125°] e [235°, 305°], totalizando 140°. Além disso, verifica-se que, como nos casos anteriores (ângulos de elevação 0° e 1°), o conjunto de azimutes proibidos diminui no caso probabilístico, comparado com o caso determinístico (com exceção das altas latitudes).

Esse fato é melhor observado na Figura B.28, que ilustra o gráfico de variação do conjunto de azimutes proibidos com o módulo da latitude do receptor do FS, com uma antena receptora de ganho 20 dBi e ângulo de elevação igual a 5°. Nessa figura, estão indicados os conjuntos de azimutes proibidos correspondentes ao cálculo determinístico e à modelagem probabilística da interferência (para  $\Delta = 2$  dB e RDPM = 1,0 e 1,8). De maneira análoga à observada nos gráficos correspondentes para antenas receptoras do FS com ganho de 20 dBi e ângulos de elevação 0° e 1°, é grande a influência da RDPM. Por exemplo, para o caso determinístico, antenas receptoras do FS com ganho de 20 dBi e ângulo de elevação igual a 5° não podem ser utilizadas, em qualquer azimute, com receptores do FS localizados em latitudes cujos módulos sejam inferiores a 46°. No caso probabilístico, para RDPM = 1.8, essas antenas podem ser utilizadas, em alguns azimutes, para latitudes de módulo maior que 16°. E considerando o cálculo probabilístico com RDPM = 1,0, as antenas receptoras do FS, com ganho de 20 dBi e ângulo de elevação igual a 5°, podem sempre ser utilizadas em alguns azimutes fora da região de azimutes proibidos. Por último, observa-se na Figura B.28 que a modelagem probabilística não tem efeito para latitudes cujos módulos são maiores que 60°.

## B.5 Antena receptora do FS com ganho de 12 dB e 1 grau de elevação

De maneira análoga à subseção 4.2.3, diagramas de azimutes correspondentes a receptores do FS localizados nas latitudes 0°, 15°S, 30°S, 45°S, 60°S e 75°S são apresentados nas images B.29 a B.34, para antenas receptoras com ganho de 12 dBi e ângulo de elevação igual a 1°. As linhas sólidas dizem respeito aos valores de  $(i/n)_{dB}$  excedidos com probabilidade  $p = 10^{-4}$ , sendo a mais interna relativa ao cálculo probabilístico com RDPM = 1,0 e a mais ex-



Figura B.28: Variação do intervalo de azimutes proibidos em função da latitude do receptor do FS, com  $G_{\text{max}} = 20$  dBi, ângulo de elevação 5°,  $\Delta = 2$  dB, RDPM = 1,0 e 1,8 e considerando  $(i/n)_{dB}$  excedido com  $p = 10^{-4}$ .

terna, com RDPM = 1,8. Os diagramas de azimutes correspondentes ao cálculo determinístico de  $(i/n)_{dB}$  estão ilustrados em linhas pontilhadas.



Figura B.29: Diagramas de azimute ( $\Delta = 2$  dB e RDPM = 1,0 e 1,8), estando o receptor na latitude  $\theta_{FS} = 1^{\circ}$ , com  $G_{\text{max}} = 12$  dBi e  $\epsilon = 1^{\circ}$ .



Figura B.30: Diagramas de azimute ( $\Delta = 2 \text{ dB e } RDPM = 1,0 \text{ e } 1,8$ ), estando o receptor na latitude  $\theta_{FS} = 15^{\circ}\text{S}$ , com  $G_{\text{max}} = 12 \text{ dBi e } \epsilon = 1^{\circ}$ .



Figura B.31: Diagramas de azimute ( $\Delta = 2$  dB e RDPM = 1,0 e 1,8), estando o receptor na latitude  $\theta_{FS} = 30^{\circ}$ S, com  $G_{max} = 12$  dBi e  $\epsilon = 1^{\circ}$ .



Figura B.32: Diagramas de azimute ( $\Delta = 2 \text{ dB e } RDPM = 1,0 \text{ e } 1,8$ ), estando o receptor na latitude  $\theta_{FS} = 45^{\circ}\text{S}$ , com  $G_{\text{max}} = 12 \text{ dBi e } \epsilon = 1^{\circ}$ .



Figura B.33: Diagramas de azimute ( $\Delta = 2 \text{ dB e } RDPM = 1,0 \text{ e } 1,8$ ), estando o receptor na latitude  $\theta_{FS} = 60^{\circ}\text{S}$ , com  $G_{\text{max}} = 12 \text{ dBi e } \epsilon = 1^{\circ}$ .



Figura B.34: Diagramas de azimute ( $\Delta = 2 \text{ dB e } RDPM = 1,0 \text{ e } 1,8$ ), estando o receptor na latitude  $\theta_{FS} = 75^{\circ}\text{S}$ , com  $G_{\text{max}} = 12 \text{ dBi e } \epsilon = 1^{\circ}$ .



Figura B.35: Variação do intervalo de azimutes proibidos em função da latitude do receptor do FS, com  $G_{\text{max}} = 12$  dBi, ângulo de elevação 1°,  $\Delta = 2$  dB, RDPM = 1,0 e 1,8 e considerando  $(i/n)_{dB}$  excedido com  $p = 10^{-4}$ .

Comparando os gráficos das images 4.26 a 4.31 (ângulo de elevação igual a 0°) com os das images B.29 a B.34 (ângulo de elevação igual a 1°), verificase que a diferença é pouco expressiva. As observações feitas na Subseção 4.2.3 são ainda pertinentes: os conjuntos de azimutes proibidos, tanto no caso determinístico quanto no caso probabilístico, são iguais a  $[0^{\circ}, 360^{\circ}]$ , para latitudes cujo módulo é menor que 45°. Esse fato pode ser melhor visualizado no gráfico da Figura B.35, que mostra a variação do conjunto de azimutes proibidos com a latitude do receptor do FS. Nessa figura, estão indicados os conjuntos de azimutes proibidos correspondentes ao cálculo determinístico e à modelagem probabilística da interferência (para  $\Delta = 2$  dB e RDPM = 1,0 e 1,8). Esse gráfico mostra que, para esse caso, é também desprezível a influência da RDPM, pois o conjunto de azimutes proibidos é praticamente o mesmo independente da latitude e do valor de RDPM na faixa de 1,0 e 1,8. A única diferença é um pequeno aumento nos valores de  $(i/n)_{dB}$  para azimutes na região dos azimutes proibidos. Esse aumento é observado no caso determinístico e no cálculo probabilístico e ocorre porque, com o aumento do ângulo de elevação da antena receptora do FS, o apontamento dessa antena se aproxima da direção da órbita geoestacionária.

## B.6 Antena receptora do FS com ganho de 12 dB e 5 graus de elevação

Diagramas de azimutes correspondentes a receptores do FS localizados nas latitudes 0°, 15°S, 30°S, 45°S, 60°S e 75°S são apresentados nas images B.36 a B.41, para antenas receptoras com ganho de 12 dBi e ângulo de elevação igual a 5°. As linhas sólidas dizem respeito aos valores de  $(i/n)_{dB}$  excedidos com probabilidade  $p = 10^{-4}$ , sendo a mais interna relativa ao cálculo probabilístico com RDPM = 1,0 e a mais externa, com RDPM = 1,8. Os diagramas de azimutes correspondentes ao cálculo determinístico de  $(i/n)_{dB}$  estão ilustrados em linhas pontilhadas.



Figura B.36: Diagramas de azimute ( $\Delta = 2 \text{ dB e } RDPM = 1,0 \text{ e } 1,8$ ), estando o receptor na latitude  $\theta_{FS} = 0^{\circ}$ , com  $G_{\text{max}} = 12 \text{ dBi e } \epsilon = 5^{\circ}$ .



Figura B.37: Diagramas de azimute ( $\Delta = 2 \text{ dB e } RDPM = 1,0 \text{ e } 1,8$ ), estando o receptor na latitude  $\theta_{FS} = 15^{\circ}\text{S}$ , com  $G_{\text{max}} = 12 \text{ dBi e } \epsilon = 5^{\circ}$ .



Figura B.38: Diagramas de azimute ( $\Delta = 2 \text{ dB e } RDPM = 1,0 \text{ e } 1,8$ ), estando o receptor na latitude  $\theta_{FS} = 30^{\circ}\text{S}$ , com  $G_{\text{max}} = 12 \text{ dBi e } \epsilon = 5^{\circ}$ .



Figura B.39: Diagramas de azimute ( $\Delta = 2 \text{ dB e } RDPM = 1,0 \text{ e } 1,8$ ), estando o receptor na latitude  $\theta_{FS} = 45^{\circ}\text{S}$ , com  $G_{\text{max}} = 12 \text{ dBi e } \epsilon = 5^{\circ}$ .



Figura B.40: Diagramas de azimute ( $\Delta = 2 \text{ dB e } RDPM = 1,0 \text{ e } 1,8$ ), estando o receptor na latitude  $\theta_{FS} = 60^{\circ}\text{S}$ , com  $G_{\text{max}} = 12 \text{ dBi e } \epsilon = 5^{\circ}$ .



Figura B.41: Diagramas de azimute ( $\Delta = 2$  dB e RDPM = 1,0 e 1,8), estando o receptor na latitude  $\theta_{FS} = 75^{\circ}$ S, com  $G_{max} = 12$  dBi e  $\epsilon = 5^{\circ}$ .

Comparando os gráficos das images B.36 a B.41 com os das images das subseções 4.2.3 e B.5, verifica-se que não há diferença expressiva em relação aos conjuntos de azimutes proibidos, que são iguais a  $[0^{\circ}, 360^{\circ}]$  para latitudes cujo módulo é menor que 45°, no caso probabilístico, e para latitudes cujo módulo é menor que 60°, no caso determinístico. Como no caso da antena de 20 dBi, o conjunto de azimutes proibidos aumenta quando o ângulo de elevação aumenta de 1° para 5°.

Esse fato é melhor observado na Figura B.42, que ilustra o gráfico de variação do conjunto de azimutes proibidos com o módulo da latitude do receptor do FS, com uma antena receptora de ganho 12 dBi e ângulo de elevação igual a 5°. Nessa figura, estão indicados os conjuntos de azimutes proibidos correspondentes ao cálculo determinístico e à modelagem probabilística da interferência (para  $\Delta = 2$  dB e RDPM = 1,0 e 1,8). De maneira análoga à observada nos gráficos correspondentes para antenas receptoras do FS com ganho de 12 dBi e ângulos de elevação 0° e 1°, esse gráfico mostra que, para esse caso, é desprezível a influência da RDPM. Por último, verifica-se que, conforme indicado nas images B.7, B.21 e B.35 e nas images B.14, B.28 e B.42, o comportamento descrito na Seção 4.2.4 se repete para antenas receptoras do FS com ângulos de elevação de 1° e 5°.



Figura B.42: Variação do intervalo de azimutes proibidos em função da latitude do receptor do FS, com  $G_{\text{max}} = 12$  dBi, ângulo de elevação 5°,  $\Delta = 2$  dB, RDPM = 1,0 e 1,8 e considerando  $(i/n)_{dB}$  excedido com  $p = 10^{-4}$ .