



Rainel Sánchez Pino

**Proteção de redes do Serviço Fixo por Satélite
que utilizam satélites geoestacionários contra a
interferência gerada pelos lances de descida de
sistemas não geoestacionários operando na
faixa 3,7-4,2 GHz**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. José Mauro Pedro Fortes

Rio de Janeiro
Abril de 2018



Rainel Sánchez Pino

**Proteção de redes do Serviço Fixo por Satélite
que utilizam satélites geoestacionários contra a
interferência gerada pelos lances de descida de
sistemas não geoestacionários operando na
faixa 3,7-4,2 GHz**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica. 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. Pedro Henrique Gouveia Coelho

Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ

Prof. Márcio da Silveira Carvalho

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 6 de Abril de 2018

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

Rainel Sánchez Pino

Graduou-se em Engenharia em Telecomunicações e Eletrônica no Instituto Superior Politécnico José Antonio Hechevarría (Havana, Cuba) em 2013.

Ficha Catalográfica

Sánchez Pino, Rainel

Proteção de redes do Serviço Fixo por Satélite que utilizam satélites geoestacionários contra a interferência gerada pelos lances de descida de sistemas não geoestacionários operando na faixa 3,7-4,2 GHz / Rainel Sánchez Pino; orientador: José Mauro Pedro Fortes. – Rio de Janeiro: PUC-Rio, Departamento de Engenharia Elétrica, 2018.

v., 114 f: il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica.

Inclui bibliografia

1. Serviço Fixo por Satélite;. 2. interferência agregada;. 3. sistemas de satélites não-geoestacionários;. 4. limites de densidade de fluxo de potência.. I. Pedro Fortes, José Mauro. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 620.11

Agradecimentos

A meu orientador José Mauro por toda a ajuda, pelo apoio e as sugestões feitas para que o trabalho realizado nesta dissertação fosse feito da melhor maneira.

À CAPES e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ser realizado.

A meus pais Bárbara Nancy e Ramón por serem minha principal motivação, por serem o exemplo de trabalho e amor, pela minha vida, tudo que eu sou eu devo a eles.

A meus irmão Ramón e minha irmã Arlety pelo apoio, pelo amor e carinho de sempre.

A meus avós Elsa e Vidal que mesmo sem estar ao meu lado, estiveram sempre presentes para poder continuar.

A meus colegas do Cetuc, Leonardo, Randy, Yuneisi, Daylis, David, Julio, Robert, Mauricio, Juan Pablo, José Luis, Jennifer, Azucena, Alberth, Javier, Marcelo, Teddy, Jussif, Christian, Laisa pela companhia e pelos momentos compartilhados na PUC.

A meus familiares, amigos e amigas por serem parte da minha vida.

Resumo

Sánchez Pino, Rainel; Pedro Fortes, José Mauro. **Proteção de redes do Serviço Fixo por Satélite que utilizam satélites geoestacionários contra a interferência gerada pelos lances de descida de sistemas não geoestacionários operando na faixa 3,7-4,2 GHz**. Rio de Janeiro, 2018. 114p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Neste trabalho, limites para a densidade de fluxo de potência equivalente produzida pelos lances de descida de sistemas de satélites não-geoestacionários (não-GEO), operando na faixa de 3,7-4,2 GHz, são analisados. Estes limites visam proteger os receptores do Serviço Fixo por Satélite (FSS) das interferências produzidas por sistemas de satélites não geoestacionários, quando ambos operam na faixa de frequências considerada. A análise destes limites foi motivada pela Resolução 157 da Conferência Mundial de Radiocomunicações de 2015 (WRC-15), que ressalta a necessidade de estudos envolvendo aspectos técnicos e operacionais relativos à operação de sistemas não-GEO operando na faixa de frequências de 3,7 - 4,2 GHz de modo a permitir que esses sistemas possam operar nestas faixas de frequências assegurando, ao mesmo tempo, que os serviços primários existentes, entre eles o FSS, continuem protegidos. A importância do assunto fez com que este tópico fosse incluído na agenda da WRC-19. No trabalho, é inicialmente desenvolvida uma metodologia para a determinação de máscaras limitantes para a densidade de fluxo de potência equivalente produzida pelos lances de descida ($epfd_{\downarrow}$) de sistemas de satélites não-GEO. Esta metodologia foi utilizada na obtenção de duas máscaras baseadas, respectivamente, nos critérios de proteção das recomendações ITU-R S.1323 e ITU-R F.1495. Uma análise comparativa das máscaras de $epfd_{\downarrow}$ obtidas foi feita considerando-se cinco constelações de satélites não-GEO do tipo *Walker Delta*, escolhidas adequadamente para cobrir um amplo conjunto de possibilidades. A análise utilizou, como base, o comportamento estatístico das margens associadas a cada uma das máscaras de $epfd_{\downarrow}$ propostas.

Palavras-chave

Serviço Fixo por Satélite; interferência agregada; sistemas de satélites não-geoestacionários; limites de densidade de fluxo de potência.

Abstract

Sánchez Pino, Rainer; Pedro Fortes, José Mauro (Advisor). **Protection of Fixed-Satellite Service networks that use geostationary satellites from the interference generated by the down-links of non-geostationary satellite systems operating in the 3.7-4.2 GHz band.** Rio de Janeiro, 2018. 114p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In this work, the limits for the equivalent power-flux density produced by the down-links of non-geostationary satellite systems (non-GSO), operating in the 3,7-4,2 GHz band are analyzed. These limits aim the protection of Fixed-Satellite Service (FSS) receivers, from the interferences produced by non-geostationary satellite systems, operating in the same frequency band. The analysis of these limits was motivated by Resolution 157 of the 2015 World Radiocommunication Conference (WRC-15), that recognized the need for studies on technical and operational aspects related to the operation of non-GSO systems operating in the 3,7-4,2 GHz frequency band, so that these systems can adequately operate in these frequency band while ensuring, at the same time, that the existing primary services, among them the FSS, remain protected. Due to its importance the topic was included in the agenda of the WRC-19. In this work, a methodology for the determination of limiting masks for the equivalent power-flux density generated by the down-links ($epfd_{\downarrow}$) of non-GSO satellite systems is initially developed. This methodology was used to obtain two mask based, respectively, on the protection criteria of the ITU-R S.1323 and ITU-R F.1495 recommendations. A comparative analysis of the two obtained $epfd_{\downarrow}$ masks was made considering five *Walker Delta* type non-GSO satellite constellation, appropriately chosen to cover a wide set of possibilities. The analysis used, as a basis, the statistic behavior of the margins associated to each of the proposed $epfd_{\downarrow}$ masks.

Keywords

Fixed-satellite Service; aggregate interference; non-geostationary satellite service; power flux density limits.

Sumário

1	Introdução	14
2	Descrição do problema	16
3	Modelagem Matemática	18
3.1	Densidade de fluxo de potência equivalente (lance de descida)	18
3.2	Relacionamento entre $epfd_{\downarrow}$ e $\Delta T/T$ ou I/N	20
3.3	Função Distribuição de Probabilidade Complementar	22
4	Máscaras de $epfd_{\downarrow}$	26
4.1	Máscara de $epfd_{\downarrow}$ baseada na Recomendação ITU-R S.1323	26
4.2	Máscara de $epfd_{\downarrow}$ baseada na Recomendação ITU-R F.1495	34
4.3	Margens da densidade de fluxo de potência equivalente no lance de descida $epfd_{\downarrow}$	38
5	Resultados Numéricos	42
5.1	Estação terrena receptora vítima localizada na latitude de 0°	45
5.2	Estação terrena receptora vítima localizada na latitude de $\pm 10^{\circ}$	54
5.3	Estação terrena receptora vítima localizada na latitude de $\pm 20^{\circ}$	63
5.4	Estação terrena receptora vítima localizada na latitude de $\pm 30^{\circ}$	71
5.5	Estação terrena receptora vítima localizada na latitude de $\pm 40^{\circ}$	79
5.6	Estação terrena receptora vítima localizada na latitude de $\pm 50^{\circ}$	87
5.7	Estação terrena receptora vítima localizada na latitude de $\pm 60^{\circ}$	95
6	Conclusões	103
	Referências bibliográficas	105
A	Cálculo da potência de transmissão dos satélites não-GEO	107
B	Metodologia de projeto das máscaras de $epfd$	110
C	Relacionamento entre a degradação devida a interferências y e a razão interferência-ruído	114

Lista de figuras

2.1	Densidade de fluxo de potência equivalente no lance de descida.	16
2.2	Densidade de fluxo de potência equivalente no lance de subida.	17
2.3	Densidade de fluxo de potência equivalente entre satélites.	17
3.1	Satélite não-GEO interfere numa antena receptora do FSS.	19
4.1	Função distribuição cumulativa da degradação y devida a interferências externas.	28
4.2	Máscara a ser satisfeita pela função distribuição de probabilidade complementar da degradação y devida a interferências externas.	29
4.3	Máscara a ser satisfeita pela função distribuição de probabilidade complementar da densidade de fluxo de potência equivalente no lance de descida $epfd_{\downarrow}$.	31
4.4	Função distribuição de probabilidade complementar da degradação devida a interferências externas y .	35
4.5	Máscara a ser satisfeita pela função distribuição de probabilidade complementar da densidade de fluxo de potência equivalente no lance de descida $epfd_{\downarrow}$.	36
4.6	Valores de E_{ℓ} que satisfazem (4-19).	38
4.7	Margens μ_{ℓ} que satisfazem o critério de proteção para uma estação terrena vítima do FSS.	39
5.1	Diagrama de radiação da antena da estação terrena receptora vítima.	44
5.2	Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 1,2 m.	47
5.3	Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 2,4 m.	48
5.4	Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 4,5 m.	49
5.5	Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 8 m.	50
5.6	Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 10 m.	51
5.7	Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 1,2 m.	56
5.8	Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 2,4 m.	57

5.9	Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 4,5 m.	58
5.10	Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 8 m.	59
5.11	Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 10 m.	60
5.12	Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 1,2 m.	64
5.13	Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 2,4 m.	65
5.14	Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 4,5 m.	66
5.15	Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 8 m.	67
5.16	Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 10 m.	68
5.17	Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 1,2 m.	72
5.18	Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 2,4 m.	73
5.19	Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 4,5 m.	74
5.20	Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 8 m.	75
5.21	Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 10 m.	76
5.22	Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 1,2 m.	80
5.23	Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 2,4 m.	81
5.24	Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 4,5 m.	82

5.25	Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 8 m.	83
5.26	Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 10 m.	84
5.27	Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 1,2 m.	88
5.28	Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 2,4 m.	89
5.29	Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 4,5 m.	90
5.30	Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 8 m.	91
5.31	Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 10 m.	92
5.32	Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 1,2 m.	96
5.33	Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 2,4 m.	97
5.34	Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 4,5 m.	98
5.35	Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 8 m.	99
5.36	Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 10 m.	100
A.1	Geometria utilizada no cálculo da metade do ângulo de meia potência (δ_b).	108
A.2	Curva da máscara de pdf estabelecida no Artigo 21 e a pdf produzida pelos satélites não-GEO.	109

Lista de tabelas

4.1	Valores de p_ℓ utilizados na amostragem da máscara de $epfd_\downarrow$.	31
4.2	Limites para o comportamento da densidade de fluxo de potência equivalente no lance de descida $epfd_\downarrow$, baseados na Recomendação ITU-R S.1323.	32
4.3	Limites para o comportamento da densidade de fluxo de potência equivalente no lance de descida $epfd_\downarrow$, baseados na Recomendação ITU-R S.1323.	33
4.4	Limites para o comportamento da densidade de fluxo de potência equivalente no lance de descida $epfd_\downarrow$, baseados na recomendação ITU-R F.1495.	36
4.5	Limites para o comportamento da densidade de fluxo de potência equivalente no lance de descida $epfd_\downarrow$, baseados na recomendação ITU-R F.1495.	37
4.6	Valores de Φ_s^{min} e Φ_s^{max} para uma estação terrena vítima localizada na longitude ϕ e na latitude θ e um ângulo de elevação mínimo $\varepsilon = 10^\circ$.	41
5.1	Características técnicas dos sistemas de satélites não-GEO considerados	42
5.2	Valores da metade do ângulo de meia potência e da densidade de potência de transmissão das antenas dos satélites não-GEO.	45
5.3	Margens \mathcal{M}_{999} excedidas com probabilidade 0.999 (azul: $-2 \leq \mathcal{M}_{999} \leq 0$; verde: $-5 \leq \mathcal{M}_{999} < -2$; vermelho: $\mathcal{M}_{999} < -5$); latitude da estação terrena vítima: 0°)	52
5.4	Margens \mathcal{M}_{99} excedidas com probabilidade 0.99 (azul: $-2 \leq \mathcal{M}_{99} \leq 0$; verde: $-5 \leq \mathcal{M}_{99} < -2$; vermelho: $\mathcal{M}_{99} < -5$); latitude da estação terrena vítima: 0°)	53
5.5	Número típico de satélites na órbita não-GEO visíveis pela estação terrena receptora vítima.	55
5.6	Margens \mathcal{M}_{999} excedidas com probabilidade 0.999 (azul: $-2 \leq \mathcal{M}_{999} \leq 0$; verde: $-5 \leq \mathcal{M}_{999} < -2$; vermelho: $\mathcal{M}_{999} < -5$); latitude da estação terrena vítima: $\pm 10^\circ$)	61
5.7	Margens \mathcal{M}_{99} excedidas com probabilidade 0.99 (azul: $-2 \leq \mathcal{M}_{99} \leq 0$; verde: $-5 \leq \mathcal{M}_{99} < -2$; vermelho: $\mathcal{M}_{99} < -5$); latitude da estação terrena vítima: $\pm 10^\circ$)	62
5.8	Margens \mathcal{M}_{999} excedidas com probabilidade 0.999 (azul: $-2 \leq \mathcal{M}_{999} \leq 0$; verde: $-5 \leq \mathcal{M}_{999} < -2$; vermelho: $\mathcal{M}_{999} < -5$); latitude da estação terrena vítima: $\pm 20^\circ$)	69
5.9	Margens \mathcal{M}_{99} excedidas com probabilidade 0.99 (azul: $-2 \leq \mathcal{M}_{99} \leq 0$; verde: $-5 \leq \mathcal{M}_{99} < -2$; vermelho: $\mathcal{M}_{99} < -5$); latitude da estação terrena vítima: $\pm 20^\circ$)	70
5.10	Margens \mathcal{M}_{999} excedidas com probabilidade 0.999 (azul: $-2 \leq \mathcal{M}_{999} \leq 0$; verde: $-5 \leq \mathcal{M}_{999} < -2$; vermelho: $\mathcal{M}_{999} < -5$); latitude da estação terrena vítima: $\pm 30^\circ$)	77

5.11 Margens \mathcal{M}_{99} excedidas com probabilidade 0.99 (azul: $-2 \leq \mathcal{M}_{99} \leq 0$; verde: $-5 \leq \mathcal{M}_{99} < -2$; vermelho: $\mathcal{M}_{99} < -5$); latitude da estação terrena vítima: $\pm 30^\circ$)	78
5.12 Margens \mathcal{M}_{999} excedidas com probabilidade 0.999 (azul: $-2 \leq \mathcal{M}_{999} \leq 0$; verde: $-5 \leq \mathcal{M}_{999} < -2$; vermelho: $\mathcal{M}_{999} < -5$); latitude da estação terrena vítima: $\pm 40^\circ$)	85
5.13 Margens \mathcal{M}_{99} excedidas com probabilidade 0.99 (azul: $-2 \leq \mathcal{M}_{99} \leq 0$; verde: $-5 \leq \mathcal{M}_{99} < -2$; vermelho: $\mathcal{M}_{99} < -5$); latitude da estação terrena vítima: $\pm 40^\circ$)	86
5.14 Margens \mathcal{M}_{999} excedidas com probabilidade 0.999 (azul: $-2 \leq \mathcal{M}_{999} \leq 0$; verde: $-5 \leq \mathcal{M}_{999} < -2$; vermelho: $\mathcal{M}_{999} < -5$); latitude da estação terrena vítima: $\pm 50^\circ$)	93
5.15 Margens \mathcal{M}_{99} excedidas com probabilidade 0.99 (azul: $-2 \leq \mathcal{M}_{99} \leq 0$; verde: $-5 \leq \mathcal{M}_{99} < -2$; vermelho: $\mathcal{M}_{99} < -5$); latitude da estação terrena vítima: $\pm 50^\circ$)	94
5.16 Margens \mathcal{M}_{999} excedidas com probabilidade 0.999 (azul: $-2 \leq \mathcal{M}_{999} \leq 0$; verde: $-5 \leq \mathcal{M}_{999} < -2$; latitude da estação terrena vítima: $\pm 60^\circ$)	101
5.17 Margens \mathcal{M}_{99} excedidas com probabilidade 0.99 (azul: $-2 \leq \mathcal{M}_{99} \leq 0$; verde: $-5 \leq \mathcal{M}_{99} < -2$; latitude da estação terrena vítima: $\pm 60^\circ$)	102

Lista de símbolos e abreviações

BER	Taxa de Erro de Bit
CS	Clear Sky
<i>epfd</i>	densidade de fluxo de potência equivalente
FSS	Serviço Fixo por Satélites
GEO	Geostacionários
HEO	Órbita Elíptica Alta
ITU	União Internacional de Telecomunicações
não-GEO	não-geoestacionário
RR	Regulamento de Radiocomunicações
WRC	Conferência Mundial de Radio-comunicações

1

Introdução

Os sistemas de comunicação via satélite permitem a transmissão de informação entre pontos da superfície terrestre, de forma barata e eficiente, independentemente da distância entre eles. A operação de sistemas de comunicações por satélites se faz por um processo complexo que requer coordenação e planejamento, em nível internacional, para que os diversos sistemas que compartilham a mesma faixa de frequências estejam suficientemente protegidos das interferências geradas por eles, e para que haja um uso eficiente dos recursos órbitas/espectro, além de garantir que os recursos disponíveis sejam igualmente acessíveis a todos os países do mundo.

Até a década de 90, os sistemas de comunicação via satélite utilizavam majoritariamente satélites geoestacionários (GEO). Até então, o Artigo 22 do Regulamento de Radiocomunicações da União Internacional de Telecomunicações (RR-ITU) [2] especificava limites máximos para a densidade de fluxo de potência produzida na superfície da Terra por satélites geoestacionários de modo a garantir a proteção dos serviços fixos por satélites (FSS), não sendo contemplada a proteção dos sistemas FSS contra interferências geradas por sistemas não-geoestacionários.

Em 1997, com o objetivo de proteger receptores do serviço fixo por satélite (FSS) das interferências causadas pelos então novos satélites não-geoestacionários, a Conferência Mundial de Radio-comunicações (WRC-97) [3] propôs estudos para a determinação dos limites de potência (e.g. densidade de fluxo de potência equivalente *epfd*) que esses satélites deveriam atender para garantir esta proteção. Assim, no período 1997-2000, foram realizados estudos e análises [4–8] envolvendo diversos tipos de constelações de satélites não-geoestacionários. Em todos estes estudos, o comportamento estatístico das interferências geradas pelos sistemas não-geoestacionários foi obtido via simulação do movimento orbital dos satélites. Com base nos resultados desses estudos, a WRC-2000 incluiu, no Artigo 22 do RR-ITU, limites máximos de *epfd* a serem atendidos pelos satélites não-GEO [9].

Em vista das recentes evoluções tecnológicas e da ampliação das faixas de frequência a serem utilizadas por sistemas de comunicações que utilizam satélites não-geoestacionários (não-GEO), a Resolução 157 [1], aprovada pela

Conferência Mundial de Radio-comunicações de 2015 (WRC-15), aponta a necessidade de estudos sobre os problemas técnicos e operacionais envolvendo sistemas não geoestacionários operando nestas novas faixas de frequência. Em particular foi adicionada a faixa de frequência de 3,7-4,2 GHz [1]. Foi observado que os limites de $epfd$ no Artigo 22 na banda 3,7-4,2 GHz, determinados na WRC-03, foram definidos para sistemas de satélites com orbitas altamente elípticas (HEO), sendo ainda necessário determinar limites de $epfd$ para sistemas não-GEO com outros tipos de órbita. Assim, a conferência reconheceu a necessidade de uma revisão dos valores dos limites de $epfd$ que constam atualmente do Artigo 22 do RR-ITU para a faixa 3,7-4,2 GHz, ressaltando que esta revisão deve levar em consideração as características dos novos sistemas submetidos.

O presente trabalho visa o desenvolvimento de análises e estudos cujos resultados possam fornecer subsídios técnicos para a revisão, pela WRC-19, do Artigo 22 do RR-ITU. Com este objetivo, é inicialmente feita, no Capítulo 2, uma descrição sucinta do problema a ser abordado. A modelagem matemática utilizada na análise do problema, que inclui a caracterização estatística da densidade de fluxo de potência equivalente no lance de descida ($epfd_{\downarrow}$), é apresentada no Capítulo 3. Esta modelagem é também utilizada no desenvolvimento da metodologia apresentada no Capítulo 4 para a obtenção de máscaras de $epfd_{\downarrow}$ para a proteção dos lances de descida de redes que utilizam satélites geoestacionários. A metodologia proposta é utilizada na determinação de duas máscaras de $epfd_{\downarrow}$, obtidas a partir dos critérios de proteção constantes das recomendações ITU-R S.1323 e ITU-R F.1495, respectivamente. Estas duas máscaras são analisadas com base num conjunto de constelações não-GEO adequadamente escolhido, sendo os resultados obtidos apresentados no Capítulo 5. Na análise, o método analítico proposto em [13] é utilizado na determinação do comportamento estatístico das interferências. Conforme ressaltado em [13], este método analítico é mais eficiente e preciso do que os métodos de simulação usuais utilizados em [4]-[8] [10]-[12], que podem requerer um tempo de computação proibitivo [14] para fornecer resultados confiáveis. Finalmente as conclusões do trabalho são apresentadas no Capítulo 6.

2

Descrição do problema

A densidade de fluxo de potência equivalente ($epfd$) é definida em [2] como a soma das densidades de fluxo de potência produzidas por estações transmissoras de um sistema de satélites não-GEO na estação receptora vítima de uma rede de satélite GEO que pode estar localizada sobre a superfície da Terra (estação terrena) ou na órbita de satélites geoestacionários (satélite). Esta definição engloba tanto a densidade de fluxo de potência equivalente produzida pelas transmissões dos satélites do sistema não-GEO no receptor de uma estação terrena da rede GEO ($epfd$ down, aqui denotada por $epfd_{\downarrow}$) quanto a a densidade de fluxo de potência equivalente produzida por todas as estações terrenas transmissoras que operam no sistema não-GEO no receptor de um satélite geoestacionário ($epfd$ up). Estas duas possibilidades são ilustradas nas figuras 2.1 e 2.2, respectivamente. Além disso, o conceito engloba também a interferência entre satélites, ou seja, a densidade de fluxo de potência equivalente produzida pelas transmissões dos satélites do sistema não-GEO no receptor de de um satélite GEO ($epfd$ inter-satellite), conforme ilustrado na Figura Figura 2.3.

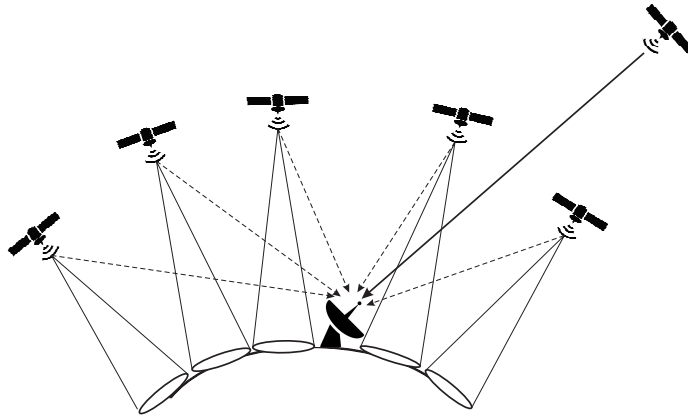


Figura 2.1: Densidade de fluxo de potência equivalente no lance de descida.

Neste trabalho, apenas a densidade de fluxo de potência no lance de descida $epfd_{\downarrow}$ é analisada, ou seja, considera-se a densidade de fluxo de potência equivalente produzida pelos satélites de um sistema não-GEO na estação terrena de uma rede GEO.

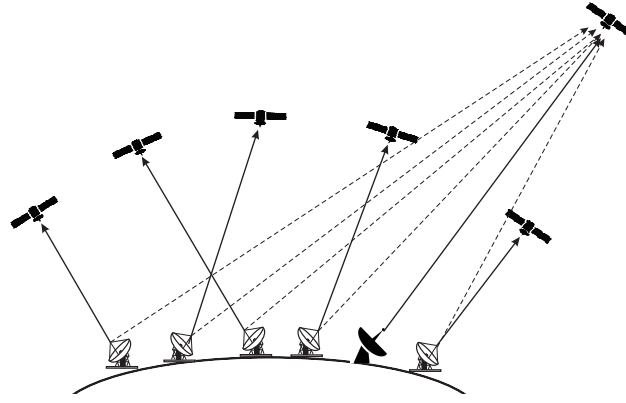


Figura 2.2: Densidade de fluxo de potência equivalente no lance de subida.

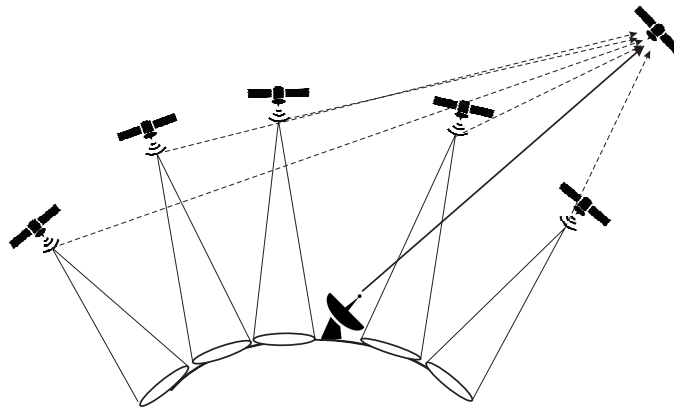


Figura 2.3: Densidade de fluxo de potência equivalente entre satélites.

O problema a ser estudado é a determinação de limites para o comportamento estatístico da $epfd_{\downarrow}$ produzida pelo sistema não-GEO de modo a garantir a operação adequada do enlace de descida da rede GEO (interferências em níveis aceitáveis). São considerados sistemas GEO e não-GEO operando na faixa 3,7-4,2 GHz. Conforme ressaltado anteriormente, os limites de $epfd_{\downarrow}$ que constam atualmente do Artigo 22 do Regulamento de Radiocomunicações da ITU para esta faixa de frequências dizem respeito apenas a sistemas HEO de satélites não-GEO. Assim, este trabalho concentra esforços na definição de limites de $epfd_{\downarrow}$ a serem satisfeitos por sistemas não geoestacionários com constelações do tipo *Walker Delta* [15]. Com este objetivo, a modelagem matemática utilizada na caracterização estatística da $epfd_{\downarrow}$ é apresentada no Capítulo 3. Esta modelagem é também utilizada no desenvolvimento da metodologia apresentada no Capítulo 4 para a obtenção de máscaras de $epfd_{\downarrow}$ para a proteção dos lances de descida de redes que utilizam satélites geoestacionários.

3

Modelagem Matemática

Neste capítulo, é apresentada a base matemática e teórica utilizada na modelagem da densidade de fluxo de potência equivalente no lance de descida (*down-link equivalent power flux-density* - $epfd_{\downarrow}$) produzida por sistemas de satélites não geoestacionários em receptores do serviço fixo por satélite operando na mesma faixa de frequências. Além disso, é também apresentado o critério de proteção dos receptores das estações terrenas do FSS considerado na avaliação da $epfd_{\downarrow}$.

3.1

Densidade de fluxo de potência equivalente (lance de descida)

Considere a Figura 3.1, onde um satélite de um sistema não geoestacionário (não-GEO), contendo N satélites, interfere em um receptor do serviço fixo por satélite operando na mesma faixa de frequências. Na figura, apenas o j -ésimo satélite da constelação não-GEO é considerado. O receptor vítima do FSS está localizado na posição \mathbf{p} e tem sua antena receptora apontada na direção do satélite geoestacionário (vetor \mathbf{a}). Os ângulos ψ_j e γ_j representam, respectivamente, o ângulo de chegada do sinal interferente e o ângulo entre a direção de apontamento da antena receptora da estação terrena vítima e a direção do satélite não-GEO interferente. Além disso, δ_j representa o ângulo entre a direção de apontamento da antena transmissora do satélite interferente (no caso particular considerado, o ponto sub-satélite) e a direção da estação terrena vítima. Note que, se $0 \leq \psi_j \leq 90^\circ$, o satélite interferente (Satélite j) é visível pela estação terrena vítima e, neste caso, sua contribuição para a $epfd_{\downarrow}$ numa banda de referência B_{ref} pré especificada, expressa em W/m^2 , é dada por

$$e_j = 10^{\frac{P_j}{10}} \frac{G_t(\delta_j)}{4\pi d_j^2} \frac{G_r(\gamma_j)}{G_{r,max}} \quad (3-1)$$

onde P_j é a potência, em RF, expressa em dBW, na entrada da antena transmissora do j -ésimo satélite do sistema não-GEO na banda de referência B_{ref} e $G_t(\delta_j)$ é o ganho da antena transmissora do Satélite j na direção da estação terrena do sistema GEO vítima. Ainda em (3-1), d_j é a distância, em metros, entre o satélite interferente j e a estação terrena vítima do sistema GEO e $G_r(\gamma_j)$ é o ganho da antena receptora da estação terrena do sistema

GEO na direção do satélite interferente j , sendo $G_{r,max}$ o seu ganho máximo.

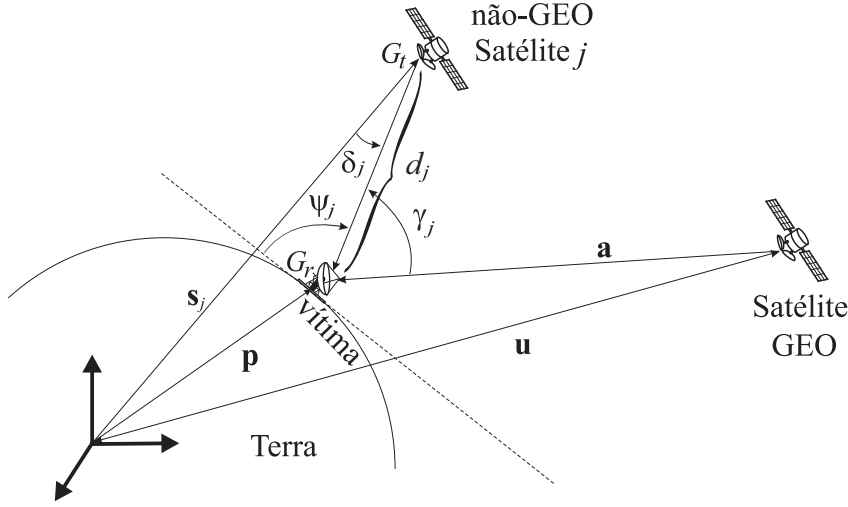


Figura 3.1: Satélite não-GEO interfere numa antena receptora do FSS.

A densidade de fluxo de potência equivalente no lance de descida, na banda de referência B_{ref} , produzida por todos os satélites visíveis da constelação de satélites não geoestacionários na estação terrena vítima do sistema GEO, expressa em W/m^2 , é então dada por

$$e_{\downarrow} = \sum_{j=1}^{N_v} e_j = \sum_{j=1}^{N_v} 10^{\frac{P_j}{10}} \frac{G_t(\delta_j)}{4\pi d_j^2} \frac{G_r(\gamma_j)}{G_{r,max}} \quad (3-2)$$

onde N_v é o número satélites visíveis do sistema não-GEO. Quando expressa em $dB(W/m^2)$, esta densidade de fluxo de potência equivalente se escreve

$$epfd_{\downarrow} = 10 \log(e_{\downarrow}) = 10 \log \left(\sum_{j=1}^{N_v} 10^{\frac{P_j}{10}} \frac{G_t(\delta_j)}{4\pi d_j^2} \frac{G_r(\gamma_j)}{G_{r,max}} \right) \quad (3-3)$$

As posições dos satélites interferentes, do satélite GEO e da estação terrena vítima, representadas respectivamente por $\{\mathbf{s}_j, j = 1, \dots, N\}$, \mathbf{u} e \mathbf{p} , são usualmente dadas em coordenadas esféricas, em termos de latitude, longitude e distância ao centro da Terra. Assim, por exemplo, as posições dos satélites não GEO são dadas por

$$\mathbf{s}_j = \begin{pmatrix} \theta_j \\ \phi_j \\ h_j \end{pmatrix} ; \quad j = 1, \dots, N \quad (3-4)$$

onde θ_j , ϕ_j e h_j representam, respectivamente, a latitude, a longitude e a distância ao centro da Terra do Satélite j . De maneira análoga, tem-se

$$\mathbf{u} = \begin{pmatrix} \theta_u \\ \phi_u \\ h_u \end{pmatrix} \quad (3-5)$$

e

$$\mathbf{p} = \begin{pmatrix} \theta_p \\ \phi_p \\ h_p \end{pmatrix} \quad (3-6)$$

O ângulo δ_j depende dos vetores \mathbf{s}_j e \mathbf{p} e o ângulo γ_j depende dos vetores \mathbf{s}_j , \mathbf{p} e \mathbf{u} . Assim (3-1) pode ser escrita como,

$$e_j(P_j, \mathbf{s}_j, \mathbf{p}, \mathbf{u}) = 10^{\frac{P_j}{10}} \frac{G_t(\mathbf{s}_j, \mathbf{p})}{4\pi d_j^2} \frac{G_r(\mathbf{s}_j, \mathbf{p}, \mathbf{u})}{G_{r,max}} \quad (3-7)$$

Considerando-se que a posição da estação terrena receptora do FSS \mathbf{p} é fixa e conhecida e assumindo que todos os satélites da constelação não-GEO operam com a mesma potência, ou seja, $P_j = P \forall j$, tem-se que e_j em (3-7) depende apenas de \mathbf{s}_j e \mathbf{u} , explicitando-se esta dependência, tem-se

$$e_j(\mathbf{s}_j, \mathbf{u}) = 10^{\frac{P}{10}} \frac{G_t(\mathbf{s}_j)}{4\pi d_j^2} \frac{G_r(\mathbf{s}_j, \mathbf{u})}{G_{r,max}} \quad (3-8)$$

A densidade de fluxo de potência equivalente no lance de descida e_\downarrow , na banda de referência B_{ref} , produzida por todos os satélites da constelação não-GEO na estação terrena vítima do sistema GEO, pode ser então reescrita como,

$$e_\downarrow(\mathbf{s}, \mathbf{u}) = \sum_{j=1}^N e_j(\mathbf{s}_j, \mathbf{u}) \quad (3-9)$$

onde \mathbf{s} é o vetor que contém as posições de todos os satélites do sistema não-GEO, dado por

$$\mathbf{s} = \begin{pmatrix} \mathbf{s}_0 \\ \mathbf{s}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{s}_N \end{pmatrix} \quad (3-10)$$

Note que, em (3-9), $e_j(\mathbf{s}_j, \mathbf{u}) = 0$ para todos os satélites do sistema não-GEO que não são visíveis pela estação terrena vítima.

3.2

Relacionamento entre $epfd_\downarrow$ e $\Delta T/T$ ou I/N

A densidade de fluxo de potência equivalente no lance de descida, $epfd_\downarrow$, que caracteriza a interferência agregada, produzida numa banda de referência B_{ref} , na estação terrena de uma rede GEO, devida às transmissões de todos os satélites interferentes visíveis de um sistema não-GEO, pode ser vista como um aumento ΔT na temperatura de ruído T do receptor do enlace GEO vítima.

O aumento percentual relativo da temperatura de ruído do receptor é então dado por $\Delta T/T$. Note que, para uma interferência com densidade espectral de potência plana na banda de referência, esta razão é também igual à razão entre a potência interferente I e a potência de ruído térmico N na banda de referência, ou seja

$$\frac{\Delta T}{T} = \left(\frac{I}{N} \right)_{B_{ref}} \quad (3-11)$$

Seja $epfd_{\downarrow}$ o valor da densidade de fluxo de potência equivalente que atinge a antena de um receptor vítima de uma rede de satélites GEO, medida numa banda de referência B_{ref} e expressa em dB(W/m²). A potência interferente $I_{B_{ref}}$ produzida por esta $epfd_{\downarrow}$, em Watts, se escreve

$$I_{B_{ref}} = A_e 10^{\frac{epfd_{\downarrow}}{10}} \quad (3-12)$$

onde A_e é a área efetiva da antena de recepção da estação terrena do sistema de satélite GEO, expressa em m². Esta área efetiva pode ser escrita como

$$A_e = \frac{G_{r,max}}{G_{1m^2}} \quad (3-13)$$

onde $G_{r,max}$ é o ganho máximo da antena de recepção da estação terrena do sistema de satélite GEO e G_{1m^2} é o ganho de 1 m², definido por

$$G_{1m^2} = \frac{4\pi}{\lambda^2} \quad (3-14)$$

com λ representando o comprimento de onda associado à frequência central dos sinais envolvidos. Considerando-se (3-13), a potência interferente em (3-12) se escreve

$$I_{B_{ref}} = \frac{G_{r,max}}{G_{1m^2}} 10^{\frac{epfd_{\downarrow}}{10}} \quad (3-15)$$

Por outro lado, sendo T a temperatura de ruído do receptor da estação do sistema de satélites GEO, a potência de ruído térmico neste receptor, na banda de referência B_{ref} , se escreve

$$N_{B_{ref}} = k T B_{ref} \quad (3-16)$$

onde k representa a constante de Boltzman ($1,38054 \times 10^{-23} J/K$).

Considerando-se (3-15) e (3-16), (3-11) se escreve

$$\frac{\Delta T}{T} = \left(\frac{I}{N} \right)_{B_{ref}} = \frac{G_{r,max}}{G_{1m^2} k T B_{ref}} 10^{\frac{epfd_{\downarrow}}{10}} \quad (3-17)$$

ou, em dB,

$$\frac{\Delta \mathcal{T}}{\mathcal{T}} = \frac{\mathcal{I}}{\mathcal{N}} = \mathcal{K} + epfd_{\downarrow} \quad (3-18)$$

com

$$\frac{\Delta \mathcal{T}}{\mathcal{T}} = 10 \log \left[\left(\frac{\Delta T}{T} \right) \right] \quad (3-19)$$

$$\frac{\mathcal{I}}{\mathcal{N}} = 10 \log \left[\left(\frac{I}{N} \right)_{B_{ref}} \right] \quad (3-20)$$

$$\mathcal{K} = 10 \log \left(\frac{G_{r,max}}{G_{1m^2} k T B_{ref}} \right) \quad (3-21)$$

Uma expressão que relaciona os valores de $epfd_{\downarrow}$ aos valores correspondentes de $\Delta T/T$, ou $(I/N)_{B_{ref}}$, torna-se bastante útil na avaliação quantitativa de níveis de $epfd_{\downarrow}$, uma vez que operadores de sistemas de comunicação por satélite se sentem mais confortáveis em discutir e aceitar valores de $\Delta T/T$ ou $(I/N)_{B_{ref}}$.

3.3

Função Distribuição de Probabilidade Complementar

Neste trabalho, as posições orbitais $\{\mathbf{s}_j, j = 1, \dots, N\}$ dos satélites do sistema não-GEO e a posição orbital \mathbf{u} do satélite GEO são modeladas como vetores aleatórios. Consequentemente, a densidade de fluxo de potência equivalente no lance de decida, e_{\downarrow} , é também uma variável aleatória.

No caso de sistemas não-GEO com constelação de satélites do tipo *Walker Delta* [15], se a posição de um os satélites da constelação é conhecida (satélite de referência) as posições de todos os outros satélites podem ser determinadas. Assim, sendo \mathbf{s}_0 a posição do satélite de referencia, tem-se que

$$\mathbf{s}_j = \mathbf{F}_j(\mathbf{s}_0) \quad , \quad j = 1, \dots, N \quad (3-22)$$

com as funções $\{\mathbf{F}_j(\mathbf{s}_0), j = 1, \dots, N\}$ definidas pela estrutura da constelação *Walker Delta*.

Considerando-se (3-22), (3-9) pode ser reescrita como,

$$e_{\downarrow}(\mathbf{s}_0, \mathbf{u}) = \sum_{j=1}^N e_j(\mathbf{F}_j(\mathbf{s}_0), \mathbf{u}) \quad (3-23)$$

Observe que (3-23) indica claramente que a densidade de fluxo de potência equivalente no lance de descida e_{\downarrow} , na banda de referência B_{ref} , produzida por todos os satélite visíveis da constelação de satélites não geoestacionários na estação terrena vítima do sistema GEO, depende dos vetores aleatórios \mathbf{s}_0 e \mathbf{u} , sendo também uma variável aleatória. Sua função distribuição de probabilidade complementar é dada por,

$$C_{e_{\downarrow}}(E) = P(e_{\downarrow} > E) = \int_E^{\infty} p_{e_{\downarrow}}(\alpha) d\alpha \quad (3-24)$$

onde $p_{e_{\downarrow}}(\cdot)$ é a função densidade de probabilidade da variável aleatória e_{\downarrow} , que pode ser escrita a partir da função densidade de probabilidade conjunta das variáveis e_{\downarrow} , \mathbf{s}_0 e \mathbf{u} . Tem-se assim,

$$p_{e_{\downarrow}}(E) = \int_{\Omega_{\mathbf{u}}} \int_{\Omega_{\mathbf{s}}} p_{e_{\downarrow}, \mathbf{u}, \mathbf{s}_0}(E, \mathbf{U}, \mathbf{S}) d\mathbf{U} d\mathbf{S} \quad (3-25)$$

com $\Omega_{\mathbf{u}}$ e $\Omega_{\mathbf{s}}$ representando, respectivamente, os espaços onde os vetores \mathbf{u} e \mathbf{s}_0 tomam valores.

Considerando-se que

$$p_{e_{\downarrow}, \mathbf{u}, \mathbf{s}_0}(E, \mathbf{U}, \mathbf{S}) = p_{e_{\downarrow}, \mathbf{s}_0 | \mathbf{u} = \mathbf{U}}(E, \mathbf{S}) p_{\mathbf{u}}(\mathbf{U}) \quad (3-26)$$

e os resultados em (3-24) e (3-25) é possível reescrever a função distribuição de probabilidade complementar da variável aleatória e_{\downarrow} como

$$C_{e_{\downarrow}}(E) = \int_E^{\infty} \int_{\Omega_{\mathbf{u}}} \int_{\Omega_{\mathbf{s}}} p_{e_{\downarrow}, \mathbf{s}_0 | \mathbf{u} = \mathbf{U}}(\alpha, \mathbf{S}) p_{\mathbf{u}}(\mathbf{U}) d\mathbf{U} d\mathbf{S} d\alpha \quad (3-27)$$

ou, de outra forma,

$$C_{e_{\downarrow}}(E) = \int_{\Omega_{\mathbf{u}}} p_{\mathbf{u}}(\mathbf{U}) C_{e_{\downarrow} | \mathbf{u} = \mathbf{U}}(E) d\mathbf{U} \quad (3-28)$$

com a função distribuição de probabilidade complementar condicional $C_{e_{\downarrow} | \mathbf{u} = \mathbf{U}}(E)$ da variável aleatória e_{\downarrow} , dada por

$$C_{e_{\downarrow} | \mathbf{u} = \mathbf{U}}(E) = P(e_{\downarrow} > E | \mathbf{u} = \mathbf{U}) = \int_E^{\infty} \int_{\Omega_{\mathbf{s}}} p_{e_{\downarrow}, \mathbf{s}_0 | \mathbf{u} = \mathbf{U}}(\alpha, \mathbf{S}) d\mathbf{S} d\alpha \quad (3-29)$$

Note que, em (3-29), a integral interna pode ser escrita, como

$$\int_{\Omega_{\mathbf{s}}} p_{e_{\downarrow}, \mathbf{s}_0 | \mathbf{u} = \mathbf{U}}(\alpha, \mathbf{S}) d\mathbf{S} = \int_{\Omega_{\mathbf{s}}} p_{e_{\downarrow} | \mathbf{s}_0 = \mathbf{S}, \mathbf{u} = \mathbf{U}}(\alpha) p_{\mathbf{s}_0 | \mathbf{u} = \mathbf{U}}(\mathbf{S}) d\mathbf{S} \quad (3-30)$$

Considerando-se que, os vetores aleatórios \mathbf{s}_0 e \mathbf{u} que caracterizam, respectivamente, a posição orbital do satélite de referencia e a posição orbital do satélite GEO, são estatisticamente independentes, tem-se que, (3-30) reduz-se a

$$\int_{\Omega_{\mathbf{s}}} p_{e_{\downarrow}, \mathbf{s}_0 | \mathbf{u} = \mathbf{U}}(\alpha, \mathbf{S}) d\mathbf{S} = \int_{\Omega_{\mathbf{s}}} p_{e_{\downarrow} | \mathbf{s}_0 = \mathbf{S}, \mathbf{u} = \mathbf{U}}(\alpha) p_{\mathbf{s}_0}(\mathbf{S}) d\mathbf{S} \quad (3-31)$$

e, neste caso, a função distribuição de probabilidade complementar em (3-29), se escreve

$$C_{e_{\downarrow} | \mathbf{u} = \mathbf{U}}(E) = \int_E^{\infty} \int_{\Omega_{\mathbf{s}}} p_{e_{\downarrow} | \mathbf{s}_0 = \mathbf{S}, \mathbf{u} = \mathbf{U}}(\alpha) p_{\mathbf{s}_0}(\mathbf{S}) d\mathbf{S} d\alpha \quad (3-32)$$

Note que, dados $\mathbf{s}_0 = \mathbf{S}$ e $\mathbf{u} = \mathbf{U}$, a variável aleatória e_{\downarrow} em (3-23) assume um valor constante \mathcal{E} (que depende de \mathbf{S} e \mathbf{U}), com probabilidade 1. Neste caso,

$$p_{e_{\downarrow} | \mathbf{s}_0 = \mathbf{S}, \mathbf{u} = \mathbf{U}}(E) = \delta(E - \mathcal{E}(\mathbf{S}, \mathbf{U})) \quad (3-33)$$

onde $\delta(\cdot)$ é a função delta. Observe que, em (3-33), a dependência de \mathcal{E} , com \mathbf{S} e \mathbf{U} é explicitada. O valor de $\mathcal{E}(\mathbf{S}, \mathbf{U})$ é obtido a partir de (3-23) e (3-8), sendo

dado por

$$\mathcal{E}(\mathbf{S}, \mathbf{U}) = \sum_{j=1}^N 10^{\frac{P}{10}} \frac{G_t(\mathbf{F}_j(\mathbf{S}))}{4\pi d_j^2} \frac{G_r(\mathbf{F}_j(\mathbf{S}), \mathbf{U})}{G_{r,max}} \quad (3-34)$$

Considerando-se (3-33), a função distribuição de probabilidade complementar condicional em (3-32) pode ser reescrita como

$$C_{e_{\downarrow}|\mathbf{u}=\mathbf{U}}(E) = \int_{\Omega_s} \int_E^{\infty} \delta(\alpha - \mathcal{E}(\mathbf{S}, \mathbf{U})) d\alpha p_{\mathbf{s}_0}(\mathbf{S}) d\mathbf{S} \quad (3-35)$$

Observe que a integral interna em (3-35) pode ser escrita como

$$\int_E^{\infty} \delta(\alpha - \mathcal{E}(\mathbf{S}, \mathbf{U})) d\alpha = u(\mathcal{E}(\mathbf{S}, \mathbf{U}) - E) \quad (3-36)$$

onde $u(\cdot)$ é a função degrau unitário.

Substituindo-se (3-36) em (3-35), obtém-se finalmente,

$$C_{e_{\downarrow}|\mathbf{u}=\mathbf{U}}(E) = \int_{\Omega_s} u(\mathcal{E}(\mathbf{S}, \mathbf{U}) - E) p_{\mathbf{s}_0}(\mathbf{S}) d\mathbf{S} \quad (3-37)$$

Note que, como,

$$epfd_{\downarrow} = 10 \log(e_{\downarrow}), \quad (3-38)$$

é possível mostrar que a função distribuição de probabilidade complementar condicional da variável aleatória $epfd_{\downarrow}$, pode ser obtida a partir da função distribuição de probabilidade complementar condicional da variável aleatória e_{\downarrow} , sendo dada por

$$C_{epfd_{\downarrow}|\mathbf{u}=\mathbf{U}}(E) = C_{e_{\downarrow}|\mathbf{u}=\mathbf{U}}\left(10^{\frac{E}{10}}\right) \quad (3-39)$$

com $C_{e_{\downarrow}|\mathbf{u}=\mathbf{U}}(\cdot)$ obtida a partir de (3-37).

Vale lembrar que a função distribuição de probabilidade complementar (não condicional) da variável aleatória $epfd_{\downarrow}$ pode ser obtida através da relação

$$C_{epfd_{\downarrow}}(E) = \int_{\Omega_u} p_{\mathbf{u}}(\mathbf{U}) C_{epfd_{\downarrow}|\mathbf{u}=\mathbf{U}}(E) d\mathbf{U} \quad (3-40)$$

As funções distribuição de probabilidade complementares das variáveis aleatórias $\Delta\mathcal{T}/\mathcal{T}$ e \mathcal{I}/\mathcal{N} podem ser facilmente obtidas considerando-se (3-18). Tem-se assim,

$$C_{\Delta\mathcal{T}/\mathcal{T}|\mathbf{u}=\mathbf{U}}(\eta) = C_{\mathcal{I}/\mathcal{N}|\mathbf{u}=\mathbf{U}}(\eta) = C_{epfd_{\downarrow}|\mathbf{u}=\mathbf{U}}(\eta - \mathcal{K}) \quad (3-41)$$

e

$$C_{\Delta\mathcal{T}/\mathcal{T}}(\eta) = C_{\mathcal{I}/\mathcal{N}}(\eta) = C_{epfd_{\downarrow}}(\eta - \mathcal{K}) \quad (3-42)$$

com \mathcal{K} dado por (3-21).

A função distribuição de probabilidade complementar condicional em (3-37), a partir da qual é possível determinar as funções distribuição de probabilidade complementar condicionais em (3-39) e (3-41), pode ser determinada através do método de Monte Carlo (simulação) ou utilizando-se o Método Analítico em [13]. Neste trabalho o Método Analítico em [13] é utilizado, uma vez

que ele produz resultados bastante precisos na região de muito baixa probabilidade de $C_{e_{\downarrow}|\mathbf{u}=\mathbf{U}}(E)$. O mesmo nível de precisão com o método de Monte Carlo pode requerer um tempo de computação excessivamente alto e muitas vezes proibitivo.

4

Máscaras de $epfd_{\downarrow}$

A densidade de fluxo de potência equivalente no lance de descida ($epfd_{\downarrow}$), produzida por emissões de todas as estações transmissoras de um sistema de satélites não-GEO visíveis por uma estação receptora do FSS na faixa de frequências 3,7-4,2 GHz, não deve exceder determinados limites para percentagens de tempo dadas. No Artigo 22 do regulamento de Radiocomunicações são apresentadas tabelas, para diferentes faixas de frequências, que mostram os níveis de $epfd_{\downarrow}$ que não podem ser excedidos durante determinadas percentagens de tempo. Não sendo estabelecidos, ainda, limites de $epfd_{\downarrow}$ para a banda de 3,7-4,2 GHz. Esses limites relacionam-se com a $epfd_{\downarrow}$ que seria obtida em condições de propagação de espaço livre, para uma determinada antena e numa banda de referência especificada e as direções apontando para a órbita de satélites GEO.

De modo a garantir a proteção do FSS de sistemas de satélites não-GEO, nesta seção serão consideradas duas máscaras de $epfd_{\downarrow}$, obtidas com base nas recomendações ITU-R S.1323 e ITU-R F.1495.

4.1

Máscara de $epfd_{\downarrow}$ baseada na Recomendação ITU-R S.1323

A Recomendação ITU-R S.1323 da União Internacional de Telecomunicações [17] estabelece que, para uma determinada rede de satélites, a interferência causada por emissões das demais redes de satélites que operam na mesma faixa de frequências, deve ser responsável por, no máximo, 10% do tempo permitido para as Taxas de Erro de Bit (BER) especificadas nas metas de desempenho da rede considerada. Usualmente, essas metas de desempenho especificam valores de BER associados a máximas percentagens de tempo P com as quais esses valores podem ser excedidos, ou seja, especificam pares de valores $\{(BER_j, P_j); j = 1, \dots, m\}$ tais que a taxa de erro de bit b não pode exceder o nível BER_j durante uma percentagem de tempo maior do que P_j . Em termos de probabilidade, estas restrições se escrevem

$$P(b > BER_j) \leq p_j ; j = 1, \dots, m \quad (4-1)$$

onde $p_j = P_j/100$. Note que as metas de desempenho em (4-1) consideram que as variações (degradações) da taxa de erro de bit são devidas a diversos fatores, entre eles, chuvas, ruído térmico e interferências. Conforme indicado anteriormente a Recomendação ITU-R S.1323 estabelece que a interferência causada pelas redes de satélites que operam na mesma faixa de frequências, deve ser responsável por, no máximo, 10% do tempo permitido para as Taxas de Erro de Bit (BER) especificadas nas metas de desempenho. Isto significa que as variações da taxa de erro de bit devidas somente a interferências devem satisfazer às condições

$$P(b > BER_j) \leq 0,1p_j ; j = 1, \dots, m \quad (4-2)$$

Note que a dependência da Taxa de Erro de Bit (BER) com a razão E_b/N_0 (Energia por bit/Nível espectral de ruído térmico) é usualmente conhecida e dada pela curva de desempenho do modem utilizado. Esta dependência é aqui representada pela função

$$b = f(e) \quad (4-3)$$

onde b é a taxa de erro de bit e e a razão E_b/N_0 (expressa em dB). Observe que, qualquer degradação na razão E_b/N_0 provoca um aumento na BER , indicando que a função f é decrescente. Assim, as metas de desempenho em (4-2) podem, alternativamente, ser escritas como

$$P\left(e < \left(\frac{E_b}{N_0}\right)_j\right) \leq 0,1p_j ; j = 1, \dots, m \quad (4-4)$$

onde

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_j = f^{-1}(BER_j) ; j = 1, \dots, m \quad (4-5)$$

Numa condição onde a degradação de desempenho seja atribuída apenas à interferências externas, seja y a degradação, expressa em dB, da razão E_b/N_0 em céu claro (*clear sky*), devida apenas a interferências externas, ou seja, a razão E_b/N_0 se escreve

$$e = \left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{CS} - y \quad (4-6)$$

onde $(E_b/N_0)_{CS}$ denota a razão E_b/N_0 em céu claro. Considerando-se (4-6), as restrições em (4-4) podem ser também escritas como

$$P(y > Y_j) \leq 0,1p_j ; j = 1, \dots, m \quad (4-7)$$

onde

$$Y_j = \left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{CS} - \left(\frac{E_b}{N_0}\right)_j ; j = 1, \dots, m \quad (4-8)$$

Note que as restrições em (4-7) indicam que a Função Distribuição de Probabilidade Complementar da degradação y , devida a interferências

externas, definida por

$$C_y(Y) = P(y > Y) = 1 - F_y(Y) \quad (4-9)$$

deve ficar abaixo dos pontos de coordenadas $\{(Y_j, 0, 1p_j), j = 1, \dots, m\}$, conforme ilustrado na Figura 4.1.

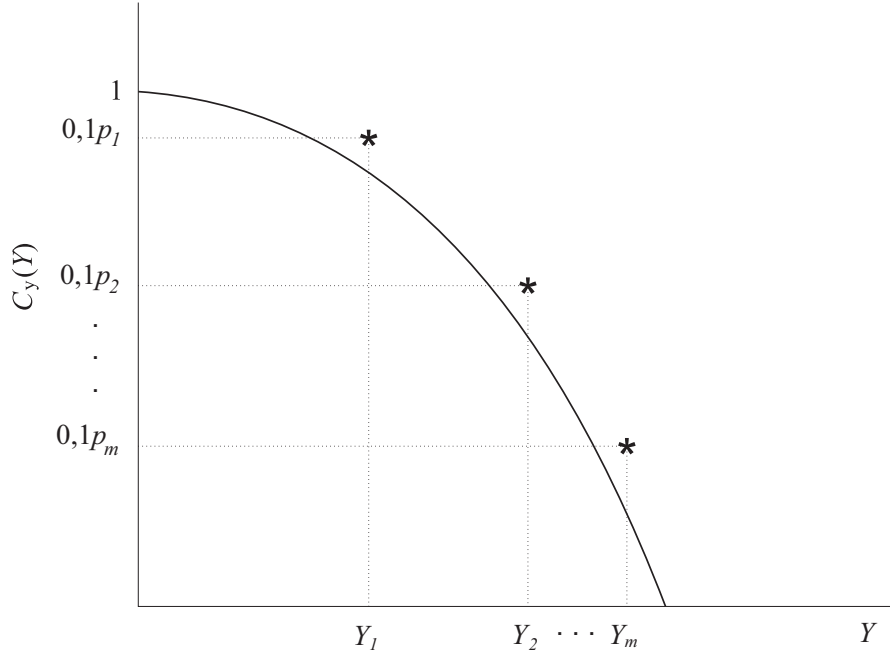


Figura 4.1: Função distribuição cumulativa da degradação y devida a interferências externas.

Obviamente, existe uma infinidade de curvas de $C_y(Y)$ que satisfazem às restrições em (4-7). No trabalho desenvolvido em [18], é apresentada uma metodologia que, considerando os valores mínimo Y_{min} e máximo Y_{max} da variável aleatória y (valores esses que ocorrem com probabilidade diferente de zero), determina, através de uma parametrização adequada e da solução de um problema de otimização com restrições convenientemente definido, uma função densidade de probabilidade para a variável aleatória y , tal que a probabilidade de y pertencer ao intervalo aberto (Y_{min}, Y_{max}) seja máxima (ver Apêndice B). O trabalho propõe ainda que a função distribuição de probabilidade complementar associada à função densidade de probabilidade obtida seja utilizada como uma máscara $M_y(Y)$ para o comportamento estatístico da degradação y devida às interferências externas que afetam o enlace de um sistema vítima como, por exemplo, o receptor de uma estação terrena que utiliza um satélite geoestacionário. Isto significa que o comportamento estatístico da variável aleatória y deve satisfazer à condição

$$C_y(Y) \leq M_y(Y), \quad \forall \quad Y \in [Y_{min}, Y_{max}] \quad (4-10)$$

A aplicação desta metodologia a um exemplo onde $(Y_1 \ Y_2 \ Y_3)^T = (10, 3 \ 11, 4 \ 12, 5)$, $(p_1 \ p_2 \ p_3)^T = (4 \times 10^{-2} \ 6 \times 10^{-3} \ 4 \times 10^{-4})$, $Y_{min} = 0$ dB e $Y_{max} = 33$ dB resultou na máscara $M_y(Y)$ apresentada na Figura 4.2 onde, como referência, estão também indicado por asteriscos os pontos de coordenadas $\{(Y_j, 0.1p_j), j = 1, \dots, 3\}$.

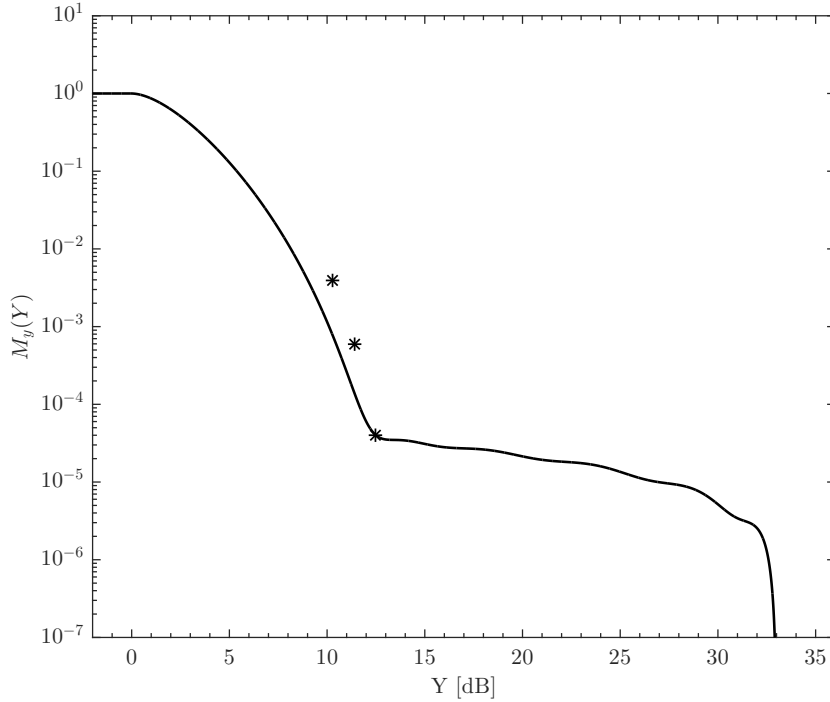


Figura 4.2: Máscara a ser satisfeita pela função distribuição de probabilidade complementar da degradação y devida a interferências externas.

Conforme mostrado no Apêndice C, a degradação y da razão E_b/N_0 , devida a interferências externas, expressa em dB, se relaciona à razão interferência-ruído pela relação

$$y = 10 \log \left(1 + 10^{\frac{\mathcal{I}/\mathcal{N}}{10}} \right) \quad (4-11)$$

onde \mathcal{I}/\mathcal{N} denota a razão interferência-ruído, também expressa em dB.

Utilizando este relacionamento, mostra-se facilmente que

$$C_{\mathcal{I}/\mathcal{N}}(\eta) = C_y \left(10 \log \left(1 + 10^{\frac{\eta}{10}} \right) \right) \quad (4-12)$$

indicando que a função distribuição de probabilidade complementar da razão interferência-ruído pode ser obtida diretamente da função distribuição de probabilidade complementar da variável aleatória y .

Note que se $C_y(Y)$ é determinada pelo procedimento proposto em [18], a função distribuição de probabilidade complementar $C_{\mathcal{I}/\mathcal{N}}(\eta)$, obtida

utilizando-se (4-12), pode ser vista como uma máscara para o comportamento estatístico da razão interferência ruído. Neste caso,

$$M_{I/N}(\eta) = M_y \left(10 \log \left(1 + 10^{\frac{\eta}{10}} \right) \right) \quad (4-13)$$

Finalmente, (4-12) e (3-42) permitem escrever

$$C_{epfd_{\downarrow}}(E) = C_y \left(10 \log \left(1 + 10^{\frac{E+\mathcal{K}}{10}} \right) \right) \quad (4-14)$$

com \mathcal{K} dado por (3-21). Note novamente que, se $C_y(Y)$ é determinada pelo procedimento proposto em [18], a função distribuição de probabilidade complementar $C_{epfd_{\downarrow}}(E)$ obtida utilizando-se (4-14) pode ser vista como uma máscara para o comportamento estatístico da densidade de fluxo de potência equivalente, $epfd_{\downarrow}$, objetivo deste trabalho. Tem-se, neste caso,

$$M_{epfd_{\downarrow}}(E) = M_y \left(10 \log \left(1 + 10^{\frac{E+\mathcal{K}}{10}} \right) \right) \quad (4-15)$$

A partir de (4-15) e da máscara da degradação devida a interferências externas $M_y(Y)$ apresentada na Figura 4.2 foi obtida, por exemplo, a máscara para a densidade de fluxo de potência equivalente no lance descida $M_{epfd_{\downarrow}}(E)$ mostrada na Figura 4.3. Esta máscara $M_{epfd_{\downarrow}}(E)$ foi obtida para um diâmetro de antena da estação terrena receptora vítima de 1,2 m, uma temperatura de ruído de 100 K, um ganho de 1 m² de 33,5 dB, um ganho máximo da antena da estação terrena receptora vítima de 31,4 dB e para a banda de referência de 4 kHz.

A partir da máscara de densidade de fluxo de potência equivalente $M_{epfd_{\downarrow}}(E)$ apresentada na Figura 4.3 é possível, mediante uma amostragem, se fazer uma seleção de pontos $\{(M_{\ell}, p_{\ell}); \ell = 1, \dots, K\}$, representativos da máscara. Esses pontos, que devem ser satisfeitos pelo comportamento estatístico da densidade de fluxo de potência equivalente no lance de descida $epfd_{\downarrow}$, correspondem a tabelas como as utilizadas no Artigo 22 do Regulamento de Radiocomunicações da União Internacional de Telecomunicações [2].

Neste trabalho, as máscaras de $epfd_{\downarrow}$ foram amostradas nos valores de p_{ℓ} apresentados na Tabela 4.1, que contém ainda uma classificação do tipo de interferência (longo, médio, curto e curtíssimo prazos).

A amostragem da máscara de $epfd_{\downarrow}$ da Figura 4.3 nos valores de p_{ℓ} da Tabela 4.1 conduziu às restrições da Tabela 4.2, apresentadas no formato usual das tabelas do Artigo 22 do RR.

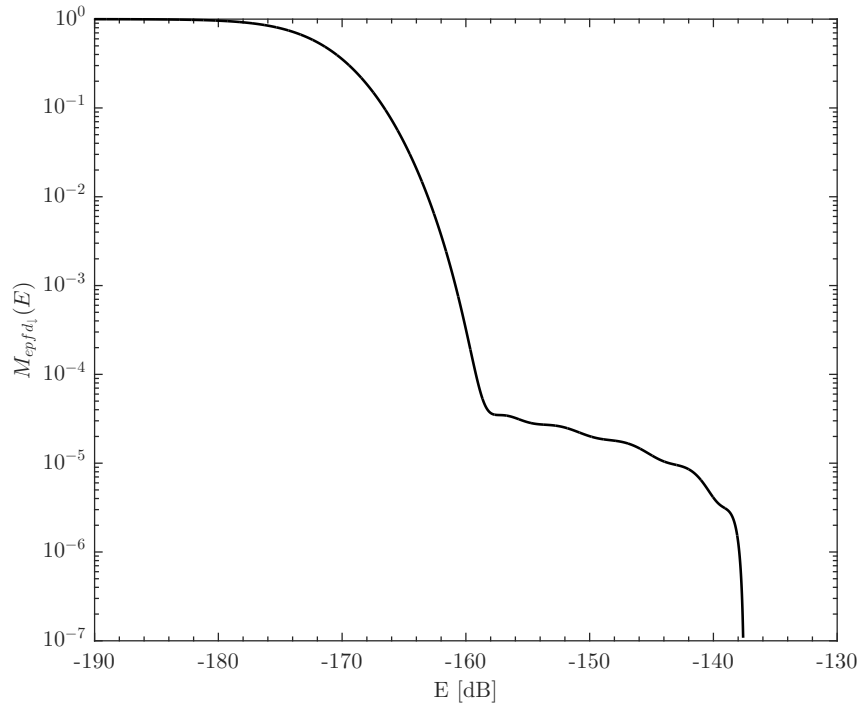


Figura 4.3: Máscara a ser satisfeita pela função distribuição de probabilidade complementar da densidade defluxo de potencia equivalente no lance de descida $epfd_{\downarrow}$.

Tabela 4.1: Valores de p_{ℓ} utilizados na amostragem da máscara de $epfd_{\downarrow}$.

p_{ℓ}	classificação da interferência
1,0	longo prazo
0,2	longo prazo
10^{-2}	medio prazo
10^{-3}	curto prazo
10^{-4}	curto prazo
$3,0 \times 10^{-6}$	curtíssimo prazo
$4,0 \times 10^{-7}$	curtíssimo prazo
0,0	-

O mesmo procedimento foi utilizado para a obtenção de limites para a densidade de fluxo de potência equivalente no lance de descida $epfd_{\downarrow}$, para diâmetros de antena da estação terrena receptora vítima de 2,4 m ($G_{r,max} = 37,5$ dB), 4,5 m ($G_{r,max} = 42,9$ dB), 8 m ($G_{r,max} = 47,9$ dB) e 10 m ($G_{r,max} = 49,8$ dB). Além disso, foi utilizada uma temperatura de ruído de 100 K para antenas com diâmetro menor que 4,5 m e uma temperatura de ruído de 70 K para antenas com diâmetro igual ou maior de 4,5 m. Uma Tabela com 8

Tabela 4.2: Limites para o comportamento da densidade de fluxo de potência equivalente no lance de descida $epfd_{\downarrow}$, baseados na Recomendação ITU-R S.1323.

$epfd_{\downarrow}$ (dB(W/m ²))	Percentagem de tempo durante o qual a $epfd_{\downarrow}$ não pode ser excedida	Banda de referência (kHz)	Diâmetro da antena de referencia (m)
-192,5	0	4	1,2
-168,2	80		
-163,1	99		
-160,9	99,9		
-159,2	99,99		
-138,9	99,9997		
-137,7	99,99996		
-137,6	100		

pontos (restrições) para cada diâmetro de antena da estação terrena receptora vítima, é apresentada na Tabela 4.3, no formato usual das tabelas do RR.

Tabela 4.3: Limites para o comportamento da densidade de fluxo de potência equivalente no lance de descida $epfd_{\downarrow}$, baseados na Recomendação ITU-R S.1323.

$epfd_{\downarrow}$ (dB(W/m ²))	Porcentagem de tempo durante o qual a $epfd_{\downarrow}$ não pode ser excedida	Banda de referência (kHz)	Diâmetro da antena de referencia (m)
-198,5 -174,2 -169,1 -166,9 -165,2 -144,9 -143,7 -143,6	0 80 99 99,9 99,99 99,9997 99,99996 100	4	2,4
-205,5 -181,2 -176,1 -173,9 -172,2 -151,9 -150,8 -150,6	0 80 99 99,9 99,99 99,9997 99,99996 100	4	4,5
-210,5 -186,2 -181,1 -178,9 -177,2 -156,9 -155,8 -155,6	0 80 99 99,9 99,99 99,9997 99,99996 100	4	8
-212,5 -188,2 -183,0 -180,8 -179,2 -158,9 -157,7 -157,6	0 80 99 99,9 99,99 99,9997 99,99996 100	4	10

4.2

Máscara de $epfd_{\downarrow}$ baseada na Recomendação ITU-R F.1495

A recomendação ITU-R F.1495 [16] estabelece um critério para a proteção de receptores do FS contra as interferências variantes no tempo produzidas por outros sistemas de comunicações, todos operando na faixa de 17,7-19,3 GHz (Banda Ka). Atualmente não existe nenhum critério para a proteção de estações terrenas do FSS contra as interferências variantes no tempo produzidas por outros sistemas operando na faixa de 4 GHz (Banda C). Além disso, acreditamos que se fosse desenvolvido um critério com este objetivo, ele não seria muito diferente do critério definido na recomendação ITU-R F.1495. Assim, neste trabalho, além da Recomendação ITU-R S.1323, a Recomendação ITU-R F.1495 é também utilizada como base para a obtenção de limites para o comportamento da densidade de fluxo de potência equivalente no lance de descida $epfd_{\downarrow}$.

O critério de proteção definido na Recomendação ITU-R F.1495 estabelece que

- Para o longo prazo, a razão \mathcal{I}/\mathcal{N} na entrada do receptor do FS não pode exceder -10 dB por mais do que 20 % do tempo.
- Para o curto prazo, a razão \mathcal{I}/\mathcal{N} na entrada do receptor do FS não pode exceder +14 dB por mais do que 0,01% do tempo e +18 dB por mais do 0,0003 % do tempo.

Note que, em termos de probabilidade, este critério se escreve

$$P\left(\left(\frac{\mathcal{I}}{\mathcal{N}}\right) > \left(\frac{\mathcal{I}}{\mathcal{N}}\right)_j\right) \leq p_j ; j = 1, \dots, m \quad (4-16)$$

com $m = 3$, $(\mathcal{I}/\mathcal{N})_1 = -10\text{dB}$, $(\mathcal{I}/\mathcal{N})_2 = 14\text{dB}$, $(\mathcal{I}/\mathcal{N})_3 = 18\text{dB}$, $p_1 = 0,2$, $p_2 = 10^{-4}$ e $p_3 = 3 \times 10^{-6}$.

Com base no relacionamento entre a razão interferência-ruído e a degradação y devida a interferências externas, mostrado no Apêndice C, e indicado em (4-11), pode ser facilmente mostrado que as restrições em (4-16) são equivalentes a

$$P(y > Y_j) \leq p_j ; j = 1, \dots, m \quad (4-17)$$

com

$$Y_j = 10 \log \left(1 + 10^{\frac{(\mathcal{I}/\mathcal{N})_j}{10}} \right) \quad (4-18)$$

No caso da Recomendação ITU-R F.1495, as restrições equivalentes são dadas por (4-17), com $m = 3$, $Y_1 = 0,4139$, $Y_2 = 14,17$, $Y_3 = 18,07$, $p_1 = 0,2$, $p_2 = 10^{-4}$ e $p_3 = 3 \times 10^{-6}$.

Como na Seção 4.1, a metodologia proposta em [18] foi utilizada na obtenção de uma máscara $M_y(Y)$ para a degradação devida a interferências externas. No procedimento, considerou-se $Y_{min} = 0$ dB e $Y_{max} = 33$ dB, obtendo-se a máscara apresentada na Figura 4.4 onde, como referência, estão também indicado por asteriscos os pontos de coordenadas $\{(Y_j, p_j), j = 1, \dots, 3\}$.

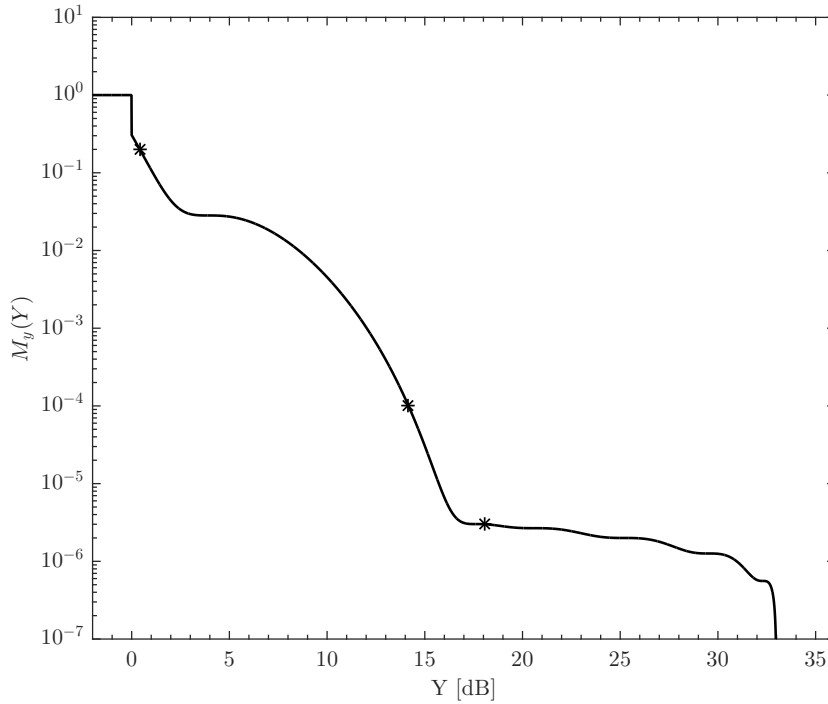


Figura 4.4: Função distribuição de probabilidade complementar da degradação devida a interferências externas y .

Utilizando (4-15) e a máscara $M_y(Y)$ da degradação devida a interferências externas apresentada na Figura 4.4, foi obtida a máscara para a densidade de fluxo de potência equivalente no lance descida $M_{epfd_{\downarrow}}(E)$ mostrada na Figura 4.5. Esta máscara $M_{epfd_{\downarrow}}(E)$ foi obtida para um diâmetro da estação terrena receptora vítima de 1,2 m, uma temperatura de ruído de 100 K, um ganho de 1 m² de 33,5 dB, um ganho máximo da antena da estação terrena receptora vítima de 31,4 dB e para a banda de referencia de 4 kHz.

A partir da máscara de densidade de fluxo de potência equivalente $M_{epfd_{\downarrow}}(E)$ apresentada na Figura 4.5 é possível, mediante uma amostragem, se fazer a seleção de pontos $\{(M_{\ell}, p_{\ell}); \ell = 1, \dots, K\}$, representativos da máscara. Esses pontos, que devem ser satisfeitos pelo comportamento estatístico da densidade de fluxo de potência equivalente no lance de descida $epfd_{\downarrow}$, cor-

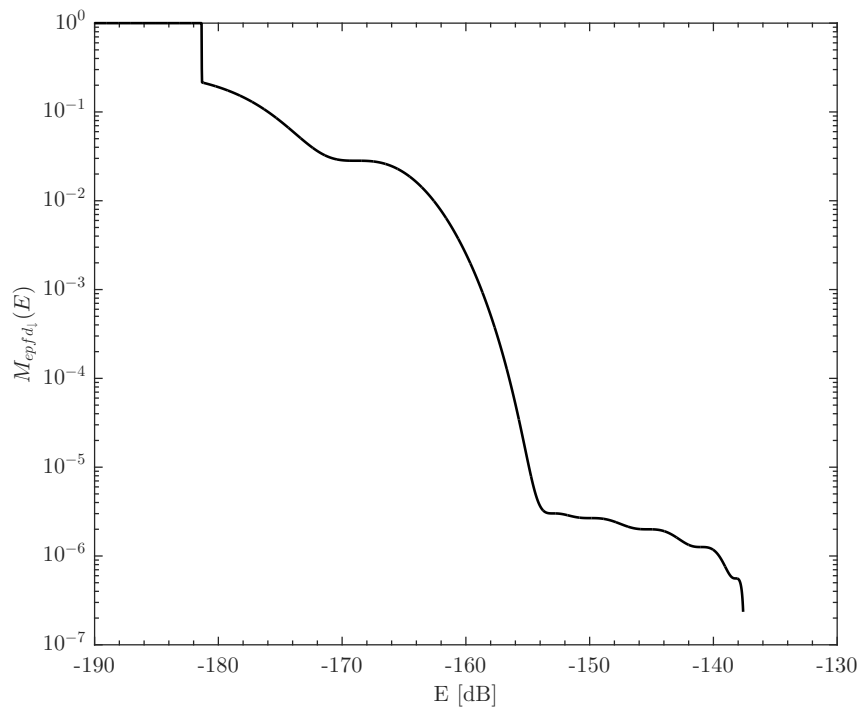


Figura 4.5: Máscara a ser satisfeita pela função distribuição de probabilidade complementar da densidade defluxo de potencia equivalente no lance de descida $epfd_{\downarrow}$.

respondem a tabelas como as utilizadas no Artigo 22 do Regulamento de Radiocomunicações da União Internacional de Telecomunicações [2].

A amostragem da máscara de $epfd_{\downarrow}$ da Figura 4.5 nos valores de p_{ℓ} da Tabela 4.1 conduziu às restrições da Tabela 4.4, apresentadas no formato usual das tabelas do Artigo 22 do RR.

Tabela 4.4: Limites para o comportamento da densidade de fluxo de potência equivalente no lance de descida $epfd_{\downarrow}$, baseados na recomendação ITU-R F.1495.

$epfd_{\downarrow}$ (dB(W/m ²))	Percentagem de tempo durante o qual a $epfd_{\downarrow}$ não pode ser excedida	Banda de referência (kHz)	Diâmetro da antena de referencia (m)
-181,4	0	4	1,2
-180,5	80		
-162,6	99		
-158,8	99,9		
-156,5	99,99		
-152,5	99,9997		
-137,7	99,99996		
-137,6	100		

O mesmo procedimento foi utilizado para a obtenção de limites para a densidade de fluxo de potência equivalente no lance de descida $epfd_{\downarrow}$, para diâmetros de antena da estação terrena receptora vítima de 2,4 m ($G_{r,max} = 37,5$ dB), 4,5 m ($G_{r,max} = 42,9$ dB), 8 m ($G_{r,max} = 47,9$ dB) e 10 m ($G_{r,max} = 49,8$ dB). Além disso, foi utilizada uma temperatura de ruído de 100 K para antenas com diâmetro menor que 4,5 m e uma temperatura de ruído de 70 K para antenas com diâmetro igual ou maior de 4,5 m. Uma Tabela com 8 pontos (restrições) para cada diâmetro de antena da estação terrena receptora vítima, é apresentada na Tabela 4.5, no formato usual das tabelas do RR.

Tabela 4.5: Limites para o comportamento da densidade de fluxo de potência equivalente no lance de descida $epfd_{\downarrow}$, baseados na recomendação ITU-R F.1495.

$epfd_{\downarrow}$ (dB(W/m ²))	Porcentagem de tempo durante o qual a $epfd_{\downarrow}$ não pode ser excedida	Banda de referência (kHz)	Diâmetro da antena de referencia (m)
-187,4 -186,5 -168,6 -164,8 -162,5 -158,5 -143,7 -143,6	0 80 99 99,9 99,99 99,9997 99,99996 100	4	2,4
-194,4 -193,5 -175,6 -171,8 -169,5 -165,5 -150,7 -150,6	0 80 99 99,9 99,99 99,9997 99,99996 100	4	4,5
-199,4 -198,4 -180,6 -176,8 -174,5 -170,5 -155,7 -155,6	0 80 99 99,9 99,99 99,9997 99,99996 100	4	8
-201,1 -200,5 -182,6 -178,7 -176,5 -172,5 -157,7 -157,6	0 80 99 99,9 99,99 99,9997 99,99996 100	4	10

4.3

Margens da densidade de fluxo de potência equivalente no lance de descida $epfd_{\downarrow}$

Sejam $\{E_{\ell}, \ell = 1, 2, \dots, K\}$ os valores de $epfd_{\downarrow}$ excedidos com probabilidade p_{ℓ} , ou seja, valores que satisfazem à condição

$$C_{epfd_{\downarrow}}(E_{\ell}) = p_{\ell} \quad \ell = 1, 2, \dots, K. \quad (4-19)$$

Estes valores são mostrados na Figura 4.6, onde um exemplo de função distribuição de probabilidade complementar da variável aleatória $epfd_{\downarrow}$ é ilustrado. São também mostrados na Figura os pontos (M_{ℓ}, p_{ℓ}) correspondentes às amostras da máscara $M_{epfd_{\downarrow}}(E_{\ell})$.

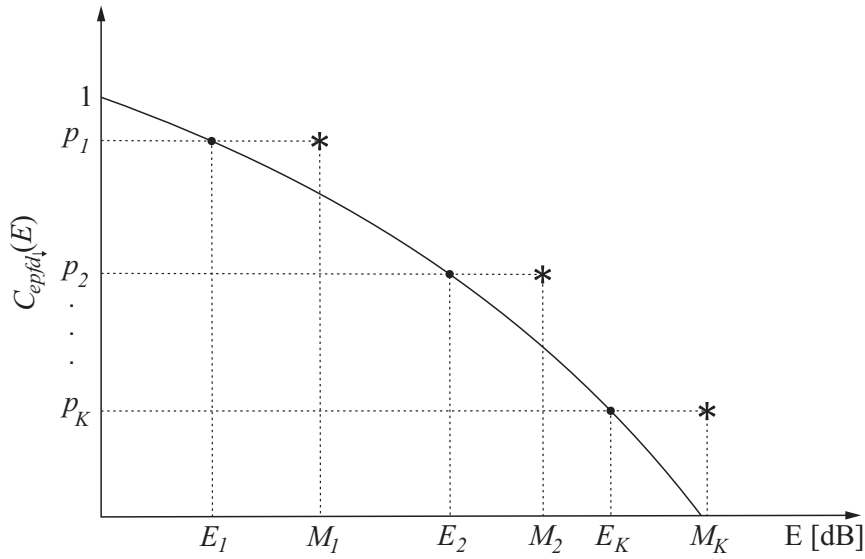


Figura 4.6: Valores de E_{ℓ} que satisfazem (4-19).

Para que o comportamento estatístico da $epfd_{\downarrow}$ satisfaça às restrições impostas pela máscara de densidade de fluxo de potência equivalente no lance de descida, $M_{epfd_{\downarrow}}(E_{\ell})$, é necessário que as condições

$$C_{epfd_{\downarrow}}(M_{\ell}) \leq p_{\ell} \quad ; \quad \ell = 1, \dots, K \quad (4-20)$$

sejam satisfeitas. Considerando-se que a $epfd_{\downarrow}$ é uma variável aleatória contínua, verifica-se facilmente que as condições em (4-20) são equivalentes a

$$E_{\ell} \leq M_{\ell} \quad ; \quad \ell = 1, \dots, K \quad (4-21)$$

Sejam então $\{\mu_{\ell}, \ell = 1, \dots, K\}$ as margens com as quais as condições em (4-21) são satisfeitas, ou seja,

$$\mu_{\ell} = M_{\ell} - E_{\ell} \quad ; \quad \ell = 1, \dots, K. \quad (4-22)$$

Estas margens encontram-se ilustradas na Figura 4.7. Note que uma margem negativa significa que o critério de proteção para uma estação terrena vítima do FSS não é satisfeito. Observe ainda que, no exemplo da Figura 4.7, todas as margens são positivas, indicando que todas as restrições impostas pela máscara de $epfd_{\downarrow}$ são satisfeitas.

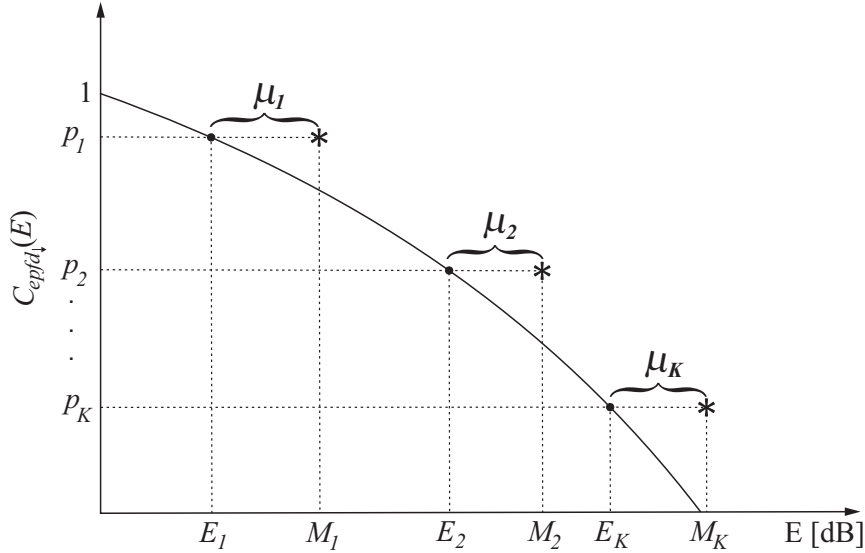


Figura 4.7: Margens μ_{ℓ} que satisfazem o critério de proteção para uma estação terrena vítima do FSS.

Note que, fixada a posição (θ, ϕ) da estação terrena receptora vítima da rede do satélite GEO, diferentes curvas para a função distribuição de probabilidade complementar da variável aleatória $epfd_{\downarrow}$ são obtidas para diferentes apontamentos da antena da estação terrena vítima, ou seja, para diferentes posições \mathbf{u} do satélite GEO. Assim, dados $\theta = \Theta$, $\phi = \Phi$ é possível obter a função distribuição de probabilidade complementar condicional $C_{epfd_{\downarrow}|\mathbf{u}=\mathbf{U}}(E)$ a partir de (3-39) e (3-37), com $\mathcal{E}(\mathbf{S}, \mathbf{U})$ dado por (3-34) e com a integral em $\Omega_{\mathbf{s}}$ em 3-37 obtida utilizando o Método Analítico [13]. Como os níveis $\{E_{\ell}, \ell = 1, 2, \dots, K\}$ são escolhidos com base na função distribuição de probabilidade complementar condicional $C_{epfd_{\downarrow}|\mathbf{u}=\mathbf{U}}(E)$ e nas probabilidades p_{ℓ} , esses níveis são também dependentes de \mathbf{u} . Assim, dada a posição geográfica da estação terrena vítima, as margens $\{\mu_{\ell}, \ell = 1, \dots, K\}$ definidas em (4-22) dependem da posição \mathbf{u} do satélite GEO. Explicitando-se esta dependência em (4-22), tem-se

$$\mu_{\ell}(\mathbf{u}) = M_{\ell} - E_{\ell}(\mathbf{u}) \quad (4-23)$$

onde \mathbf{u} é a posição orbital do satélite utilizado pela estação terrena vítima.

Note que, para $\mathbf{u} = \mathbf{U}$, os níveis da densidade de fluxo de potencia equivalente no lance de descida $\{E_{\ell}(\mathbf{U}), \ell = 1, 2, \dots, K\}$ podem ser determinados resolvendo uma equação equivalente a (4-19),

$$C_{epfd_{\downarrow}|\mathbf{u}=\mathbf{U}}(E_{\ell}(\mathbf{U})) = p_{\ell} \quad \ell = 1, 2, \dots, K \quad (4-24)$$

A função densidade de probabilidade das ℓ -th margens pode ser expressa como

$$p_{\mu_{\ell}}(\mathcal{M}) = \int_{\Omega_{\mathbf{u}}} p_{\mu_{\ell}|\mathbf{u}=\mathbf{U}}(\mathcal{M}) p_{\mathbf{u}}(\mathbf{U}) d\mathbf{U} \quad (4-25)$$

Observe que, dado $\mathbf{u} = \mathbf{U}$, μ_{ℓ} é igual a $M_{\ell} - E_{\ell}(\mathbf{U})$ com probabilidade 1, ou seja,

$$p_{\mu_{\ell}|\mathbf{u}=\mathbf{U}}(\mathcal{M}) = \delta(\mathcal{M} - (M_{\ell} - E_{\ell}(\mathbf{U}))) \quad (4-26)$$

Substituindo (4-26) em (4-25), tem-se que,

$$p_{\mu_{\ell}}(\mathcal{M}) = \int_{\Omega_{\mathbf{u}}} \delta(\mathcal{M} - (M_{\ell} - E_{\ell}(\mathbf{U}))) p_{\mathbf{u}}(\mathbf{U}) d\mathbf{U} \quad (4-27)$$

A função distribuição de probabilidade das margens μ_{ℓ} da densidade de fluxo de potência equivalente no lance de descida $epfd_{\downarrow}$, é dada por,

$$F_{\mu_{\ell}}(\mathcal{M}) = P(\mu_{\ell} \leq \mathcal{M}) = \int_{-\infty}^{\mathcal{M}} \int_{\Omega_{\mathbf{u}}} \delta(\beta - (M_{\ell} - E_{\ell}(\mathbf{U}))) p_{\mathbf{u}}(\mathbf{U}) d\mathbf{U} d\beta \quad (4-28)$$

ou,

$$F_{\mu_{\ell}}(\mathcal{M}) = P(\mu_{\ell} \leq \mathcal{M}) = \int_{\Omega_{\mathbf{u}}} u(\mathcal{M} - (M_{\ell} - E_{\ell}(\mathbf{U}))) p_{\mathbf{u}}(\mathbf{U}) d\mathbf{U} \quad (4-29)$$

Note que, por se tratar de um satélite na órbita de satélites geoestacionários, sua posição \mathbf{u} é caracterizada apenas pela longitude ϕ_s de sua posição orbital. Neste caso, é possível escrever

$$\mu_{\ell}(\phi_s) = M_{\ell} - E_{\ell}(\phi_s) \quad (4-30)$$

Neste trabalho, a posição orbital ϕ_s do satélite GEO é modelada por uma variável aleatória uniformemente distribuída no intervalo $[\Phi_s^{min}, \Phi_s^{max}]$. Este intervalo foi aqui definido como a parte da órbita de satélites geoestacionários onde os satélites são vistos pela estação terrena vítima com ângulos de elevação superiores a um valor ε pré-especificado. A Tabela apresenta os valores de Φ_s^{min} e Φ_s^{max} para uma estação terrena vítima localizada na longitude ϕ e na latitude θ e um ângulo de elevação mínimo $\varepsilon = 10^\circ$.

Tabela 4.6: Valores de Φ_s^{min} e Φ_s^{max} para uma estação terrena vítima localizada na longitude ϕ e na latitude θ e um ângulo de elevação mínimo $\varepsilon = 10^\circ$.

θ [grau]	Φ_s^{min} [grau]	Φ_s^{max} [grau]
0	$\phi - 70$	$\phi + 70$
10	$\phi - 70$	$\phi + 70$
20	$\phi - 70$	$\phi + 70$
30	$\phi - 68$	$\phi + 68$
40	$\phi - 66$	$\phi + 66$
50	$\phi - 60$	$\phi + 60$
60	$\phi - 50$	$\phi + 50$

Neste caso (4-27) e (4-29) podem ser reescritas, respectivamente, como

$$p_{\mu_\ell}(\mathcal{M}) = \frac{1}{(\Phi_s^{max} - \Phi_s^{min})} \int_{\Phi_s^{min}}^{\Phi_s^{max}} \delta(\mathcal{M} - (M_\ell - E_\ell(\Phi_s))) d\Phi_s \quad (4-31)$$

e

$$F_{\mu_\ell}(\mathcal{M}) = P(\mu_\ell \leq \mathcal{M}) = \frac{1}{(\Phi_s^{max} - \Phi_s^{min})} \int_{\Phi_s^{min}}^{\Phi_s^{max}} u(\mathcal{M} - (M_\ell - E_\ell(\Phi_s))) d\Phi_s \quad (4-32)$$

5

Resultados Numéricos

Neste capítulo, é feita uma análise comparativa das duas máscaras de $epfd_{\downarrow}$ obtidas, respectivamente, nas seções 4.1 e 4.2. Na análise, são considerados cinco cenários envolvendo constelações de satélites não-geoestacionários do tipo *Walker Delta*, escolhidas adequadamente para cobrir um amplo conjunto de possibilidades. Para cada um desses cenários, foi obtida a função distribuição de probabilidade das margens $\{\mu_{\ell}, \ell = 1, \dots, K\}$ associadas a cada uma das máscaras consideradas. Essas funções distribuição de probabilidade foram obtidas utilizando-se (4-32), ou seja, considerando-se que a posição orbital ϕ_s do satélite geoestacionário é modelada por uma variável aleatória uniformemente distribuída no intervalo $[\Phi_s^{min}, \Phi_s^{max}]$, que caracteriza a região da órbita de satélites geoestacionários na qual o satélite é visto pela estação terrena vítima com ângulo de elevação superior a 10 graus. As constelações *Walker Delta* consideradas são apresentadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Características técnicas dos sistemas de satélites não-GEO considerados

Sistema	A	B	C	D	E
Altura [km]	10352	1414	1400	1375	1200
Inclinação do plano orbital [grau]	55	52	52	84,7	87,4
Número de planos orbitais	4	8	12	12	18
Número de Satélites por plano	5	6	10	24	40
ΔM entre planos adjacentes [grau]	0	7,5	3	1,25	4,5
Espaçamento entre planos [grau]	90	45	30	15,36	10,2

Em todos os cenários, considerou-se uma frequência de operação igual a 4 GHz. Além disso, em cada um dos cenários analisados, foram consideradas estações terrenas vítima com antenas receptoras de diâmetros iguais a 1, 2, 2, 4, 4, 5, 8, 0 e 10, 0 metros. Para essas antenas, utilizou-se o diagrama de radiação da Nota RR No 22.5C.12 do Artigo 22 do Regulamento de Radiocomunicações [2], ou seja, considerou-se, para as antenas de diâmetros 8,0 e 10,0 metros ($(D/\lambda) \geq 100$)

$$G(\gamma) = \begin{cases} G_{max} - 2,5 \times 10^{-3} \left(\frac{D}{\lambda} \gamma \right) & ; & 0 \leq \gamma < \gamma_m \\ G_1 & ; & \gamma_m \leq \gamma < \gamma_r \\ 29 - 25 \log(\gamma) & ; & \gamma_r \leq \gamma < 20^\circ \\ -3,5 & ; & 20^\circ \leq \gamma < 26,3^\circ \\ 32 - 25 \log(\gamma) & ; & 26,3^\circ \leq \gamma < 48^\circ \\ -10 & ; & 48^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ \end{cases}, \quad (5-1)$$

para a antena de diâmetro 4,5 metros ($42 \leq (D/\lambda) < 100$)

$$G(\gamma) = \begin{cases} G_{max} - 2,5 \times 10^{-3} \left(\frac{D}{\lambda} \gamma \right) & ; & 0 \leq \gamma < \gamma_m \\ G_1 & ; & \gamma_m \leq \gamma < 100 \left(\frac{\lambda}{D} \right) \\ 29 - 25 \log(\gamma) & ; & 100 \left(\frac{\lambda}{D} \right) \leq \gamma < 20^\circ \\ -3,5 & ; & 20^\circ \leq \gamma < 26,3^\circ \\ 32 - 25 \log(\gamma) & ; & 26,3^\circ \leq \gamma < 48^\circ \\ -10 & ; & 48^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ \end{cases} \quad (5-2)$$

e para as antenas de diâmetros 1,2 e 2,4 metros ($(D/\lambda) \geq 100$)

$$G(\gamma) = \begin{cases} G_{max} - 2,5 \times 10^{-3} \left(\frac{D}{\lambda} \gamma \right) & ; & 0 \leq \gamma < \gamma_m \\ G_1 & ; & \gamma_m \leq \gamma < 100 \left(\frac{\lambda}{D} \right) \\ 32 - 25 \log(\gamma) & ; & 100 \left(\frac{\lambda}{D} \right) \leq \gamma < 48^\circ \\ -10 & ; & 48^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ \end{cases} \quad (5-3)$$

Em (5-1), (5-2) e (5-3), D e λ são, respectivamente, o diâmetro da antena e o comprimento de onda associado à frequência de operação, expressos em metros e G_1 é o ganho do primeiro lóbulo lateral, dado por

$$G_1 = 2 + 15 \log \left(\frac{D}{\lambda} \right) \quad (5-4)$$

Além disso,

$$\gamma_m = \frac{20\lambda}{D} \sqrt{G_{max} - G_1} \quad (5-5)$$

$$\gamma_r = 15,85 \left(\frac{D}{\lambda} \right)^{-0,6} \quad (5-6)$$

e o ganho máximo da antena é dado por

$$G_{max} = 10 \log \left(\eta \left(\pi \frac{D}{\lambda} \right)^2 \right) \quad (5-7)$$

onde η representa a eficiência da antena, considerada igual a 0,55. Na figura 5.1 estão mostrados os digramas de radiação da antena da estação terrena vítima para os cinco diâmetros já especificados.

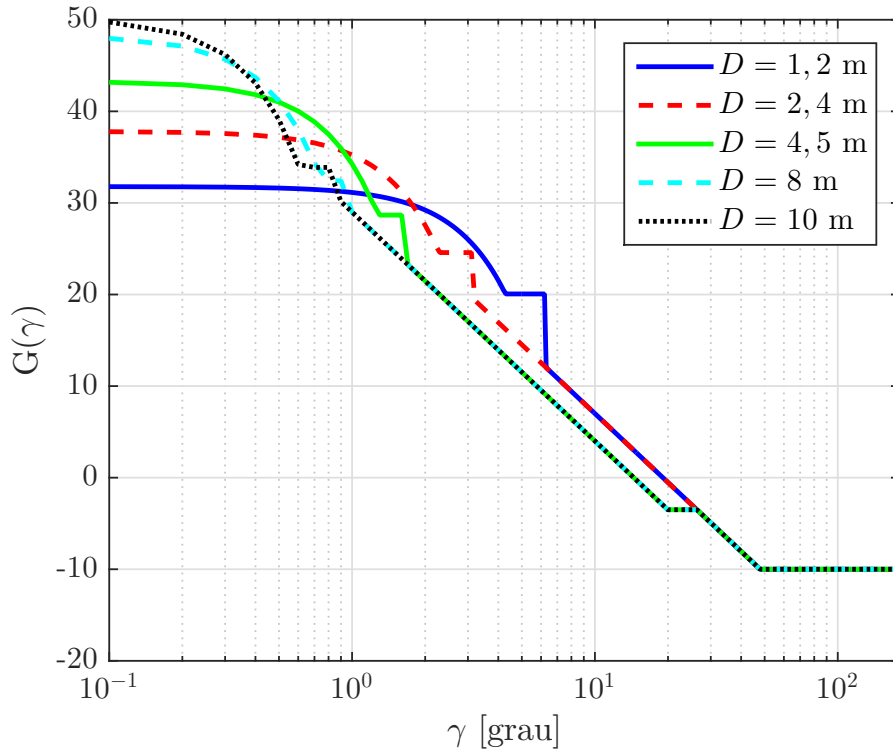


Figura 5.1: Diagrama de radiação da antena da estação terrena receptora vítima.

Para o diagrama de radiação das antenas transmissoras dos satélites não-GEO, considerou-se o diagrama de radiação da Recomendação ITU-R S.672-4 [19], para o caso particular de feixe circular e de um *near-in-side-lobe level* $L_N = -20$ dB. Este diagrama de radiação é dado por

$$G(\delta) = \begin{cases} G_m - 3 \left(\frac{\delta}{\delta_b} \right)^2 & ; \quad \delta_b \leq \delta \leq 2,58\delta_b \\ G_m - 20 & ; \quad 2,58\delta_b \leq \delta \leq 6,32\delta_b \\ G_m - 20 + 25 \log \left(\frac{6,32\delta_b}{\delta} \right) & ; \quad 6,32\delta_b \leq \delta \leq Y \\ 0 & ; \quad Y \leq \delta \leq 90^\circ \\ L_B & ; \quad 90^\circ \leq \delta \leq 180^\circ \end{cases} \quad (5-8)$$

onde

$$L_B = 0,25 G_m - 5 \quad (5-9)$$

$$Y = 6,32 \delta_b 10^{0,04(G_m-5)} \quad (5-10)$$

Em todos os cenários analisados, considerou-se um ganho máximo $G_m = 23$ dBi. Para cada um dos sistemas não-GEO considerados, o valor do ângulo δ_b (metade do ângulo de meia potência) foi determinado pelo procedimento

descrito no Apêndice A. Este apêndice contém ainda um procedimento para a determinação da densidade de potência de transmissão P_T dos satélites não-GEO, considerada como o valor máximo de densidade de potência que garante o atendimento aos limites de densidade de *e.i.r.p* fora do eixo da Recomendação ITU-R S.524. A Tabela 5.1 apresenta os valores de δ_b e P_T obtidos para cada um dos sistemas não-GEO considerados.

Tabela 5.2: Valores da metade do ângulo de meia potência e da densidade de potência de transmissão das antenas dos satélites não-GEO.

	$\delta_b[\text{grau}]$	$P_T[\text{dBW}]$
Sistema A	24,1	-36,5
Sistema B	69,0	-56,3
Sistema C	56,0	-57,5
Sistema D	31,4	-53,8
Sistema E	22,7	-48,5

Devido à simetria inerente às constelações *Walker Delta*, a longitude da localização da estação terrena vítima não tem influência nos resultados. Assim, foram consideradas estações terrenas vítima localizadas em diferentes latitudes. Mais especificamente foram consideradas as latitudes 0° , $\pm 10^\circ$, $\pm 20^\circ$, $\pm 30^\circ$, $\pm 40^\circ$, $\pm 50^\circ$ e $\pm 60^\circ$.

Os resultados correspondentes a cada latitude de antena da estação terrena receptora vítima do FSS são apresentados nas seções 5.1 a 5.7. Em cada uma destas seções, casos envolvendo os sistemas de satélites não-GEO, na Tabela 5.1 foram analisados e a função distribuição de probabilidade complementar condicional $C_{epfd_\downarrow|\mathbf{u}=\mathbf{U}}(E)$ da densidade de fluxo de potencia equivalente no lance de descida foi determinada considerando-se (3-39) e (3-37). A intergral em (3-37) foi calculada utilizando-se o Método Analítico desenvolvido em [13]. A partir destas funções distribuição de probabilidade complementar condicionais, os níveis de $epfd_\downarrow$, $E_\ell(\mathbf{U})$, ou equivalentemente $E_\ell(\Phi_s)$, foram determinados a partir de (4-24), para $\ell = 1, \dots, K$. As funções distribuição de probabilidade das margens $\{\mu_\ell, \ell = 1, \dots, K\}$ foram finalmente determinadas utilizado-se (4-32).

5.1

Estação terrena receptora vítima localizada na latitude de 0°

Nesta seção, considera-se uma estação terrena vítima localizada na latitude 0° , e são determinadas, para cada um dos sistemas de satélites não-GEO apresentados na Tabela 5.1, as funções distribuição de probabilidade das margens $\{\mu_\ell, \ell = 1, \dots, 8\}$ da densidade de fluxo de potência no lance

de descida $epfd_{\downarrow}$, associadas às máscaras obtidas nas seções 4.1 e 4.2. Os resultados obtidos para estações terrenas vítima com antenas receptoras de diâmetros 1,2, 2,4, 4,5, 8 e 10 metros são apresentados nas figuras 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 e 5.6, respectivamente. Nestas figuras, a Máscara 1 refere-se à máscara definida na Seção 4.1 e a Máscara 2 à máscara definida na Seção 4.2. Conforme evidenciado pelas tabelas 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5, a Máscara 2 apresentou margens maiores que as da Máscara 1 para $\ell = 1, 4$ e 5 e menores que as da Máscara 1 para $\ell = 2$ e 6 . Para $\ell = 3, 7$ e 8 as margens correspondentes às duas máscara ficaram bem próximas. Estes fatos estão refletidos nas figuras 5.2 a 5.6.

Observe que, de maneira geral, os aumentos no diâmetro da antena receptora vítima implicam num aumento da margem correspondente a $\ell = 4$ e numa diminuição das margens correspondentes a $\ell = 5, 6, 7$ e 8 , enquanto que as margens correspondentes a $\ell = 1, 2$ e 3 praticamente não sofrem variações. Os resultados obtidos podem ser melhor apreciados nas tabelas 5.3 e 5.4 que mostram os valores de margem \mathcal{M}_{999} e \mathcal{M}_{99} excedidos com probabilidades 0,999 e 0,99, respectivamente.

É importante observar que duas hipótese de pior caso, consideradas neste trabalho, contribuíram para as margens negativas significativas que aparecem nas tabelas 5.3 e 5.4 (em vermelho): (i) a hipótese de que cada um dos satélites não-geoestacionários transmite a maior densidade de potência permissível pelas restrições impostas pelo Artigo 21 do RR para a proteção do FS e (ii) a hipótese de que todos dos satélites interferentes operam com este nível máximo de densidade de potência. Observe que nos sistemas D e E, onde o número de satélites visíveis pela estação terrena vítima é alto (tipicamente 21 no Sistema D e 39 no Sistema E quando a estação terrena vítima está localizada na latitude 0°), existe um maior número de margens negativas significativas.

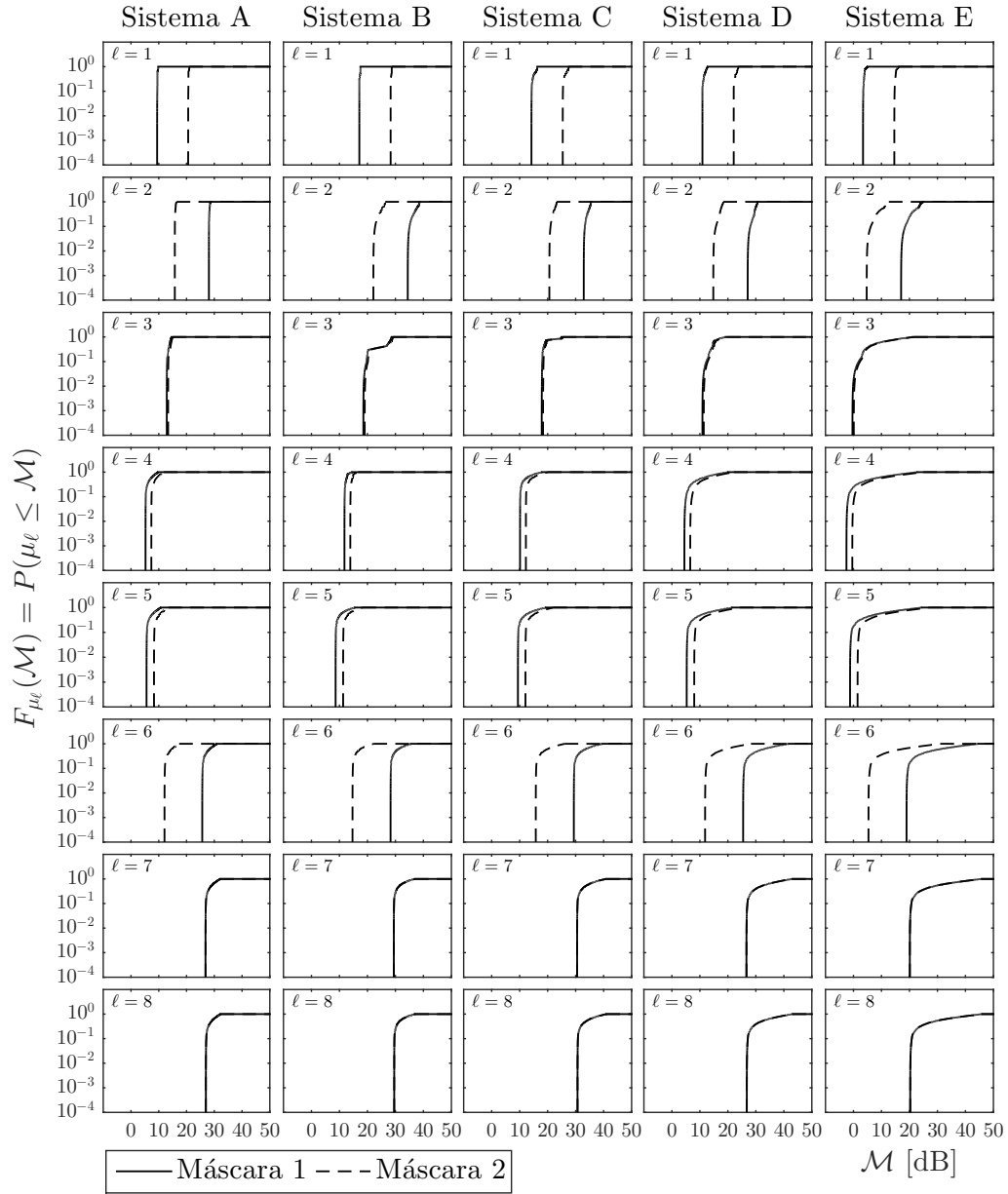


Figura 5.2: Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 1,2 m.

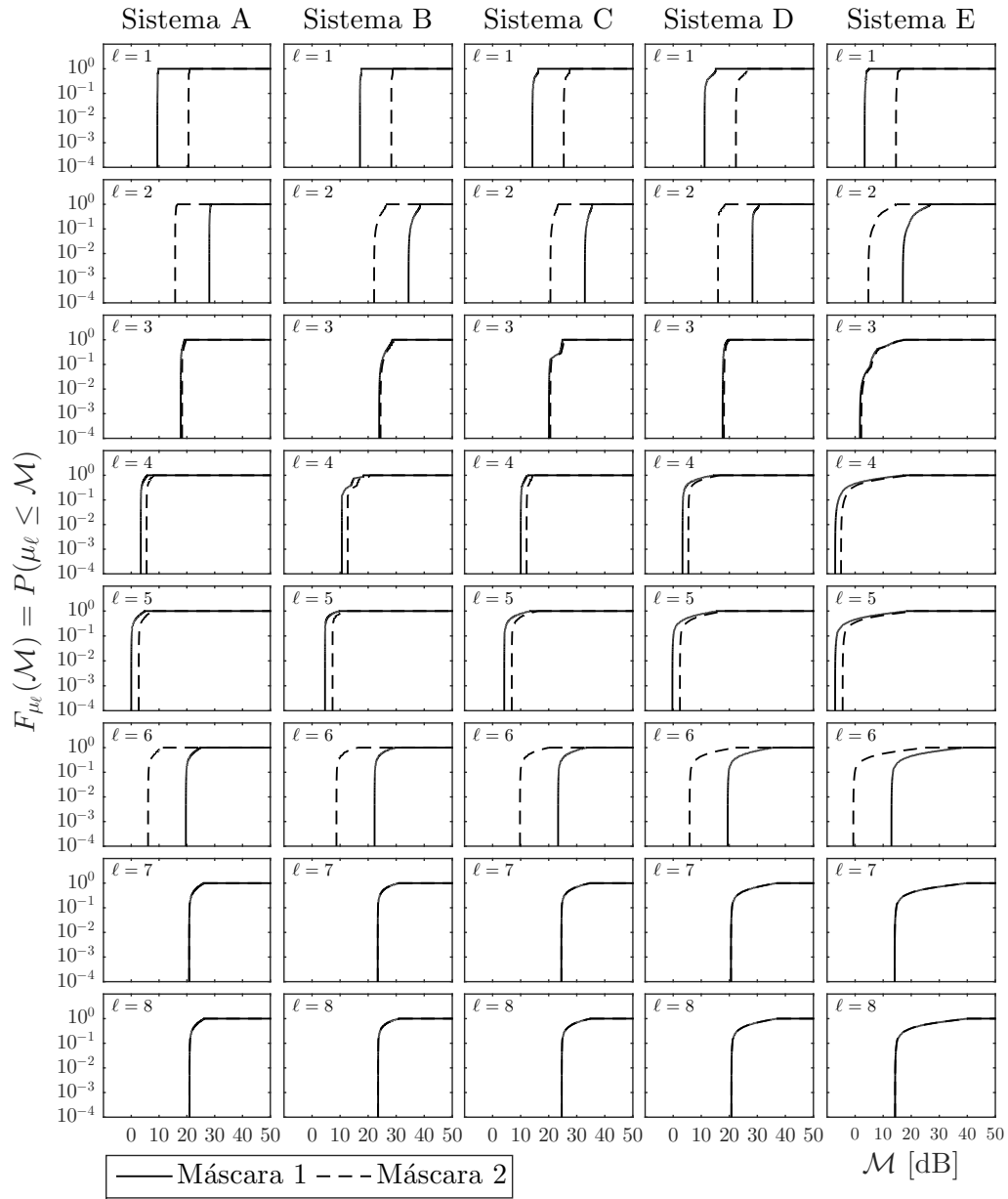


Figura 5.3: Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 2,4 m.

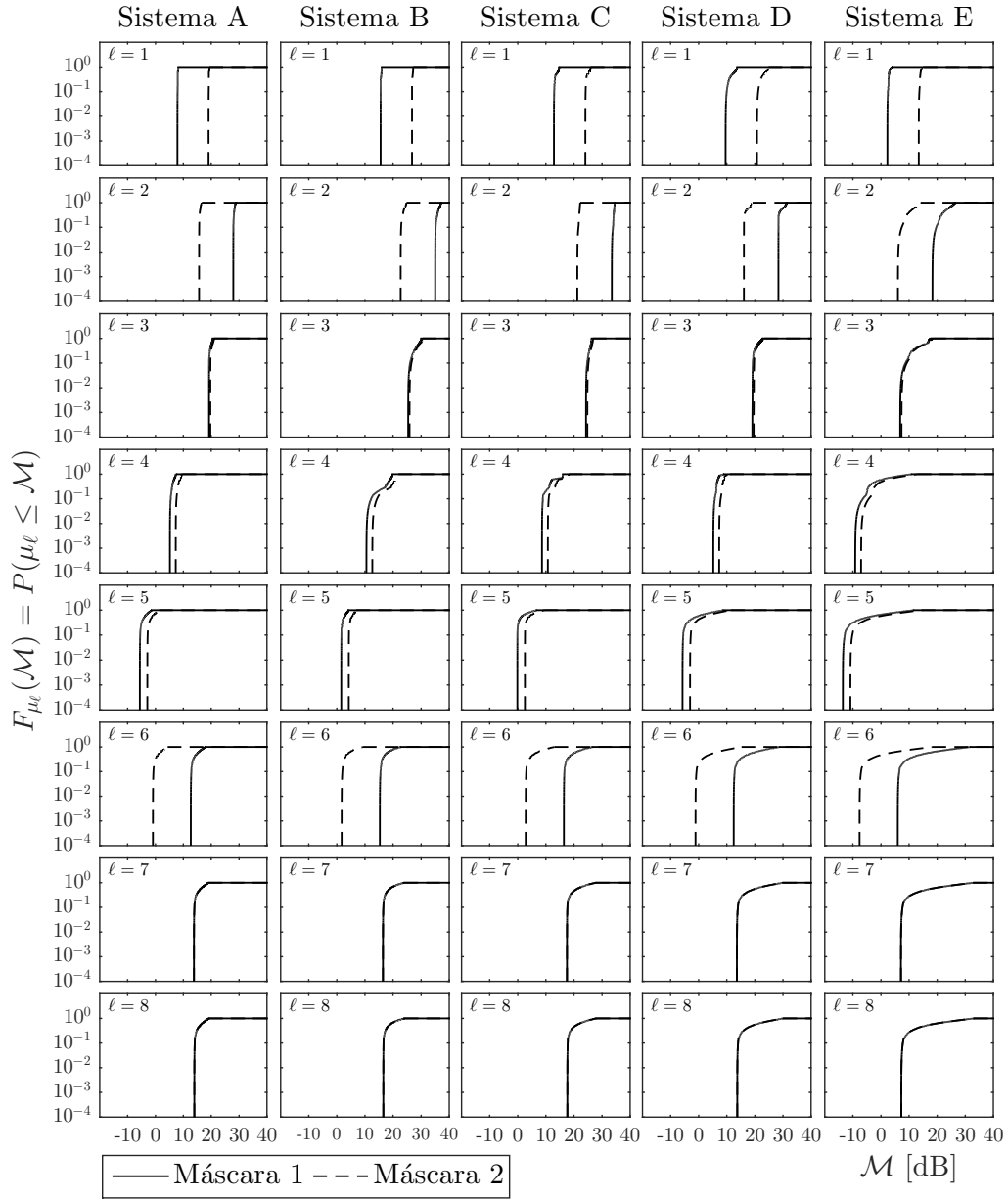


Figura 5.4: Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 4,5 m.

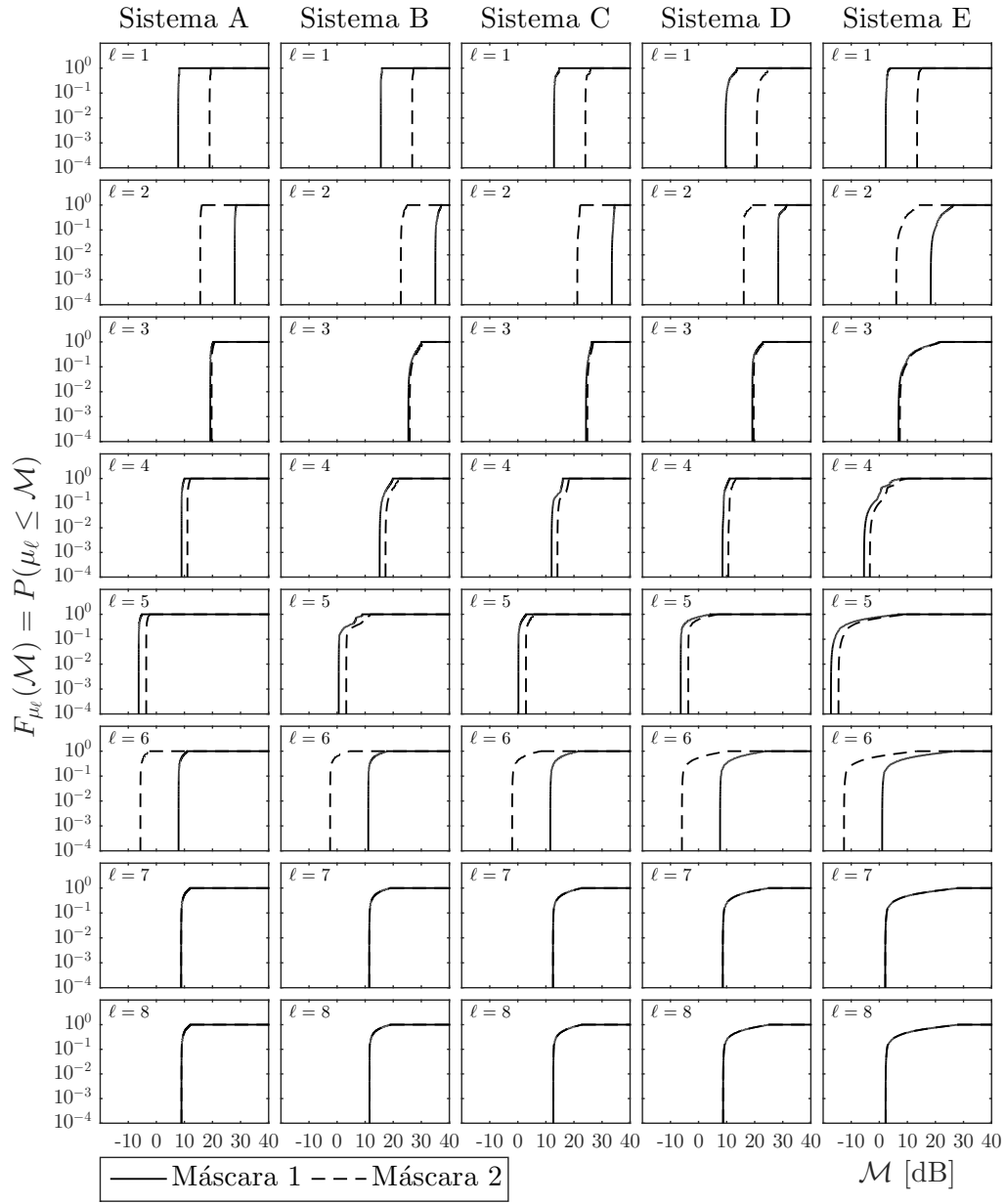


Figura 5.5: Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 8 m.

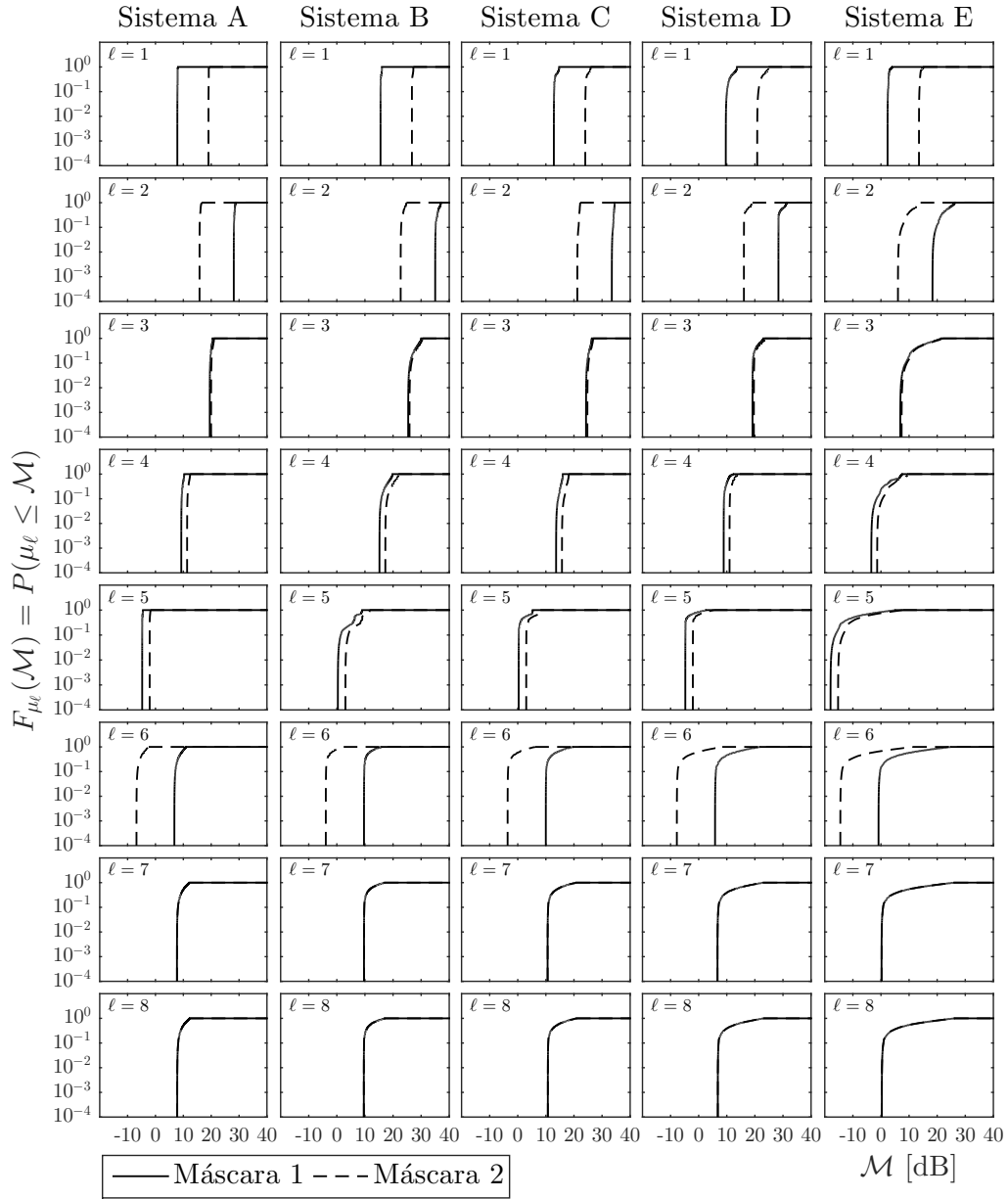


Figura 5.6: Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 10 m.

Tabela 5.3: Margens \mathcal{M}_{999} excedidas com probabilidade 0.999 (azul: $-2 \leq \mathcal{M}_{999} \leq 0$; verde: $-5 \leq \mathcal{M}_{999} < -2$; vermelho: $\mathcal{M}_{999} < -5$); latitude da estação terrena vítima: 0°)

Máscaras		Máscara 1					Máscara 2				
Diâmetro [metro]		1,2	2,4	4,5	8	10	1,2	2,4	4,5	8	10
Sistema A	$\ell=1$	9,4	9,4	7,9	7,8	7,8	20,6	20,6	19,1	19,0	19,0
	2	28,1	28,1	27,9	27,9	28,1	15,8	15,8	15,6	15,6	15,8
	3	12,9	17,8	19,2	19,2	19,5	13,4	18,3	19,7	19,7	20,0
	4	5,2	3,4	5,2	9,0	9,3	7,3	5,5	7,3	11,1	11,4
	5	5,6	0,0	-5,6	-6,3	-4,8	8,3	2,7	-2,9	-3,6	-2,1
	6	25,7	19,6	12,7	7,9	6,8	12,1	6,1	-0,9	-5,7	-6,8
	7	26,8	20,8	13,8	8,8	7,7	26,8	20,8	13,8	8,8	7,7
	8	27,0	21,0	13,9	8,9	7,8	27,0	21,0	13,9	8,9	7,8
Sistema B	$\ell=1$	17,1	17,1	15,6	15,6	15,5	28,3	28,3	26,8	26,8	26,7
	2	34,4	34,4	35,0	35,0	35,0	22,1	22,1	22,7	22,7	22,7
	3	18,6	23,9	25,4	25,4	25,4	19,0	24,4	25,9	25,9	25,9
	4	11,8	10,6	10,6	15,2	15,2	13,9	12,7	12,6	17,3	17,3
	5	8,6	4,6	1,6	0,6	0,4	11,3	7,3	4,3	3,3	3,1
	6	28,3	22,3	15,3	11,1	9,7	14,7	8,7	1,7	-2,5	-3,9
	7	29,4	23,4	16,4	11,4	9,7	29,4	23,4	16,4	11,5	9,7
	8	29,6	23,6	16,5	11,5	9,6	29,6	23,6	16,5	11,5	9,6
Sistema C	$\ell=1$	14,2	14,2	12,9	12,9	12,8	25,4	25,4	24,1	24,1	24,0
	2	32,9	32,9	33,5	33,5	33,5	20,6	20,6	21,2	21,2	21,2
	3	17,9	20,1	24,3	24,3	24,3	18,4	20,6	24,8	24,8	24,8
	4	10,1	10,0	8,6	12,0	13,7	12,2	12,1	10,7	14,1	15,7
	5	9,4	4,1	-0,1	0,2	0,3	12,1	6,8	2,5	2,9	3,0
	6	29,4	23,4	16,4	11,6	10,0	15,8	9,8	2,8	-2,0	-3,6
	7	30,5	24,5	17,5	12,5	10,6	30,5	24,5	17,5	12,5	10,6
	8	30,7	24,7	17,6	12,6	10,7	30,7	24,7	17,6	12,6	10,7
Sistema D	$\ell=1$	10,9	11,2	9,6	9,6	9,7	22,1	22,4	20,8	20,8	20,8
	2	27,1	28,3	28,4	28,4	28,4	14,8	16,0	16,1	16,1	16,1
	3	10,9	17,6	19,1	19,2	19,2	11,4	18,1	19,6	19,6	19,6
	4	4,5	3,3	5,2	8,5	8,9	6,6	5,4	7,3	10,6	11,0
	5	5,3	-0,3	-5,7	-6,4	-4,8	8,0	2,4	-3,1	-3,7	-2,1
	6	25,5	19,4	12,5	7,7	5,8	11,9	5,9	-1,1	-5,9	-7,8
	7	26,6	20,6	13,6	8,6	6,7	26,6	20,6	13,6	8,6	6,7
	8	26,8	20,8	13,7	8,7	6,8	26,8	20,8	13,7	8,7	6,8
Sistema E	$\ell=1$	3,4	3,4	2,3	2,3	2,3	14,6	14,6	13,5	13,5	13,5
	2	17,0	17,0	18,3	18,3	18,3	4,7	4,7	6,1	6,1	6,1
	3	-0,3	1,8	6,9	6,9	6,9	0,1	2,2	7,3	7,3	7,4
	4	-2,5	-7,1	-9,1	-5,4	-3,4	-0,4	-5,0	-7,1	-3,3	-1,3
	5	-1,2	-7,1	-13,6	-17,2	-17,9	1,5	-4,4	-10,9	-14,5	-15,2
	6	19,0	13,0	6,0	1,0	-0,9	5,4	-0,6	-7,6	-12,6	-14,5
	7	20,1	14,1	7,1	2,1	0,2	20,1	14,1	7,1	2,1	0,2
	8	20,3	14,3	7,2	2,3	0,3	20,3	14,3	7,2	2,3	0,3

Tabela 5.4: Margens \mathcal{M}_{99} excedidas com probabilidade 0.99 (azul: $-2 \leq \mathcal{M}_{99} \leq 0$; verde: $-5 \leq \mathcal{M}_{99} < -2$; vermelho: $\mathcal{M}_{99} < -5$); latitude da estação terrena vítima: 0°)

Máscaras		Máscara 1					Máscara 2				
Diâmetro [metro]		1,2	2,4	4,5	8	10	1,2	2,4	4,5	8	10
Sistema A	$\ell=1$	9,4	9,4	7,9	7,8	7,9	20,6	20,6	19,1	19,0	19,0
	2	28,1	28,1	27,9	27,9	28,1	15,8	15,8	15,6	15,6	15,8
	3	12,9	17,8	19,2	19,2	19,5	13,4	18,3	19,7	19,7	20,0
	4	5,2	3,4	5,2	9,0	9,3	7,3	5,5	7,3	11,1	11,4
	5	5,6	0,0	-5,6	-6,3	-4,8	8,3	2,7	-2,9	-3,6	-2,1
	6	25,7	19,7	12,7	7,9	6,8	12,1	6,1	-0,9	-5,7	-6,8
	7	26,8	20,8	13,8	8,8	7,7	26,9	20,8	13,8	8,9	7,8
	8	27,0	21,0	14,0	9,0	7,8	27,0	21,0	14,0	9,0	7,8
Sistema B	$\ell=1$	17,1	17,1	15,6	15,6	15,5	28,3	28,3	26,8	26,8	26,7
	2	34,5	34,5	35,0	35,0	35,0	22,2	22,2	22,7	22,7	22,7
	3	18,7	24,0	25,5	25,5	25,5	19,1	24,5	25,9	25,9	25,9
	4	11,8	10,6	10,7	15,2	15,2	13,9	12,7	12,8	17,3	17,3
	5	8,6	4,6	1,6	0,6	0,5	11,3	7,3	4,3	3,3	3,2
	6	28,3	22,3	15,3	11,1	9,7	14,7	8,7	1,7	-2,5	-3,9
	7	29,4	23,4	16,4	11,5	9,7	29,5	23,4	16,4	11,5	9,7
	8	29,6	23,6	16,5	11,6	9,6	29,6	23,6	16,5	11,6	9,6
Sistema C	$\ell=1$	14,2	14,2	12,9	12,9	12,9	25,4	25,4	24,1	24,1	24,0
	2	32,9	32,9	33,5	33,5	33,5	20,7	20,7	21,2	21,2	21,2
	3	17,9	20,1	24,3	24,3	24,3	18,4	20,6	24,8	24,8	24,8
	4	10,1	10,0	8,7	12,1	13,7	12,2	12,1	10,7	14,2	15,8
	5	9,4	4,2	-0,1	0,2	0,3	12,1	6,8	2,5	2,9	3,0
	6	29,4	23,4	16,4	11,6	10,0	15,8	9,8	2,8	-2,0	-3,6
	7	30,5	24,5	17,5	12,5	10,6	30,6	24,5	17,5	12,6	10,7
	8	30,7	24,7	17,7	12,7	10,7	30,7	24,7	17,7	12,7	10,7
Sistema D	$\ell=1$	10,9	11,2	9,6	9,6	9,7	22,1	22,4	20,8	20,8	20,9
	2	27,2	28,27	28,4	28,4	28,4	14,9	16,0	16,1	16,1	16,1
	3	11,1	17,7	19,2	19,2	19,2	11,5	18,2	19,6	19,6	19,6
	4	4,5	3,4	5,3	8,6	8,9	6,6	5,4	7,4	10,7	11,0
	5	5,3	-0,3	-5,7	-6,4	-4,8	8,0	2,4	-3,0	-3,7	-2,1
	6	25,5	19,5	12,5	7,7	5,9	11,9	5,9	-1,1	-5,9	-7,7
	7	26,7	20,6	13,6	8,7	6,7	26,7	20,7	13,7	8,7	6,7
	8	26,8	20,8	13,8	8,8	6,8	26,8	20,8	13,8	8,8	6,8
Sistema E	$\ell=1$	3,4	3,4	2,3	2,3	2,4	14,6	14,6	13,5	13,5	13,5
	2	17,2	17,2	18,5	18,5	18,5	4,9	4,9	6,2	6,2	6,2
	3	-0,1	2,2	7,0	7,0	7,1	0,3	2,6	7,5	7,5	7,5
	4	-2,4	-7,0	-8,9	-5,1	-3,3	-0,3	-4,9	-6,8	-3,0	-1,2
	5	-1,2	-7,1	-13,5	-17,1	-17,8	1,5	-4,4	-10,8	-14,4	-15,1
	6	19,0	13,0	6,0	1,1	-0,8	5,4	-0,6	-7,6	-12,5	-14,4
	7	20,2	14,2	7,2	2,2	0,3	20,2	14,2	7,2	2,2	0,3
	8	20,3	14,3	7,3	2,3	0,4	20,3	14,3	7,3	2,3	0,4

5.2

Estação terrena receptora vítima localizada na latitude de $\pm 10^\circ$

Nesta seção, considera-se uma estação terrena vítima localizada na latitude $\pm 10^\circ$, sendo determinadas, para cada um dos sistemas de satélites não-GEO apresentados na Tabela 5.1, as funções distribuição de probabilidade das margens $\{\mu_\ell, \ell = 1, \dots, 8\}$ da densidade de fluxo de potência no lance de descida $epfd_\downarrow$, associadas às máscaras obtidas nas seções 4.1 e 4.2. Os resultados obtidos para estações terrenas vítima com antenas receptoras de diâmetros 1,2, 2,4, 4,5, 8 e 10 metros são apresentados nas figuras 5.7, 5.8, 5.9, 5.10 e 5.11, respectivamente. Nestas figuras, a Máscara 1 refere-se à máscara definida na Seção 4.1 e a Máscara 2 à máscara definida na Seção 4.2. Conforme evidenciado pelas tabelas 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5, a Máscara 2 apresentou margens maiores que as da Máscara 1 para $\ell = 1, 4$ e 5 e menores que as da Máscara 1 para $\ell = 2$ e 6 . Para $\ell = 3, 7$ e 8 as margens correspondentes às duas máscaras ficaram bem próximas. Estes fatos estão refletidos nas figuras 5.7 a 5.11.

Observe que, do mesmo modo que na Seção 5.1, de maneira geral, os aumentos no diâmetro da antena receptora vítima implicam num aumento da margem correspondente a $\ell = 4$ e numa diminuição das margens correspondentes a $\ell = 5, 6, 7$ e 8 , enquanto que as margens correspondentes a $\ell = 1, 2$ e 3 praticamente não sofrem variações. Novamente, os resultados obtidos podem ser melhor apreciados nas tabelas 5.6 e 5.7 que mostram os valores de margem \mathcal{M}_{999} e \mathcal{M}_{99} excedidos com probabilidades 0,999 e 0,99, respectivamente.

Também aqui, as duas hipóteses de pior caso identificadas na seção anterior contribuíram para as margens negativas significativas que aparecem, em vermelho, nas tabelas 5.6 e 5.7. Note que, novamente, nos sistemas D e E, onde o número de satélites visíveis pela estação terrena vítima é alto (tipicamente 22 no Sistema D e 41 no Sistema E quando a estação terrena vítima está localizada na latitude $\pm 10^\circ$), existe um maior número de margens negativas significativas.

Cabe comentar aqui que, enquanto nos sistemas A, B e C, o número típico de satélites visíveis praticamente não varia quando a latitude da estação terrena vítima aumenta (mantendo-se aproximadamente iguais a 6, 5 e 12, respectivamente), no caso dos sistemas D e E, que possuem órbitas polares (ângulos de inclinação próximos a 90°), o número de satélites visíveis tende a crescer com o aumento da latitude da estação terrena vítima. Este comportamento é mostrado na Tabela 5.5.

Tabela 5.5: Número típico de satélites na órbita não-GEO visíveis pela estação terrena receptora vítima.

Latitudes ET	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°
Sistema A	6	6	6	6	6	6	6
Sistema B	5	5	5	5	5	5	5
Sistema C	12	12	12	12	12	12	12
Sistema D	21	22	23	24	26	35	51
Sistema E	39	41	42	46	57	71	102

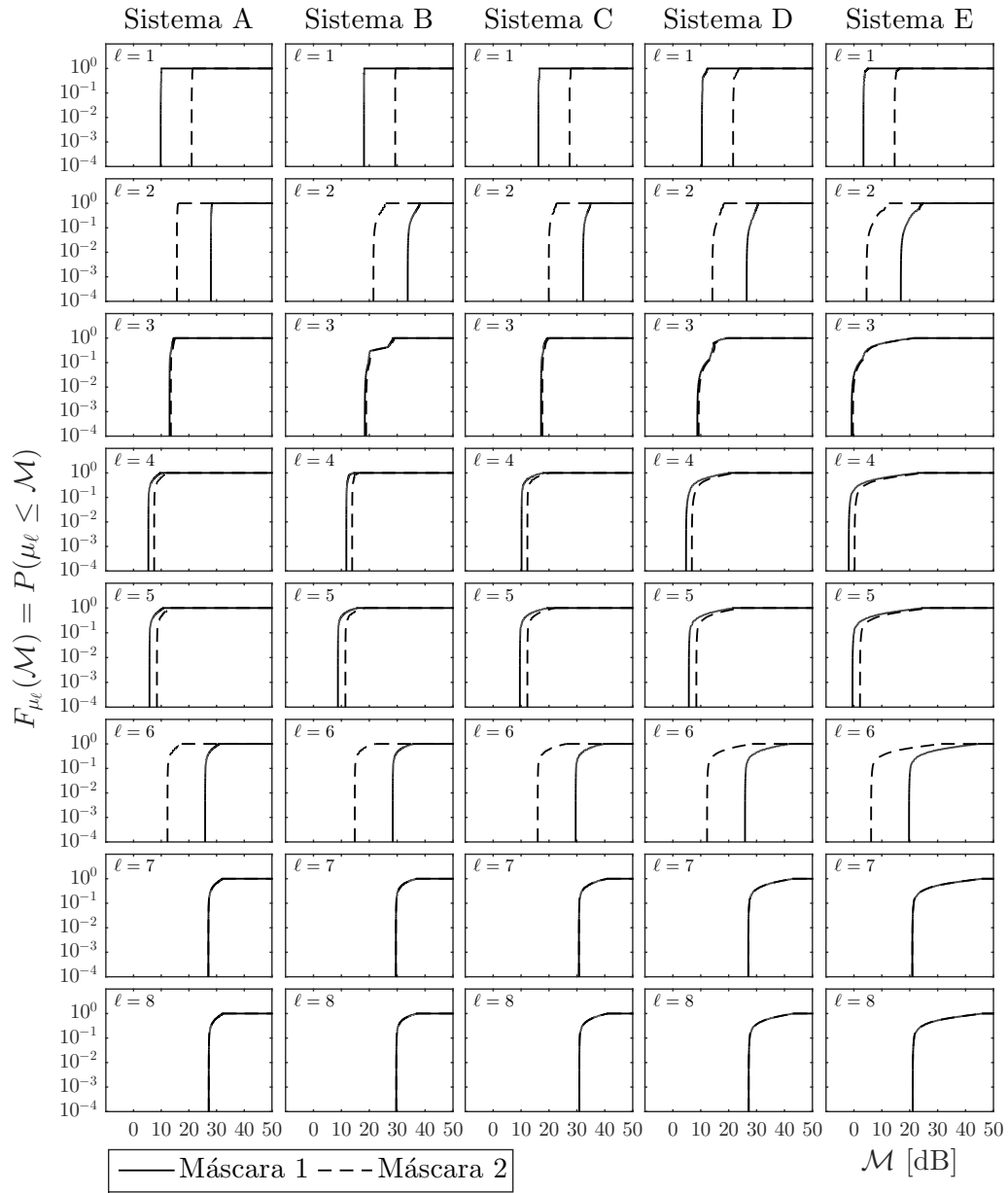


Figura 5.7: Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 1,2 m.

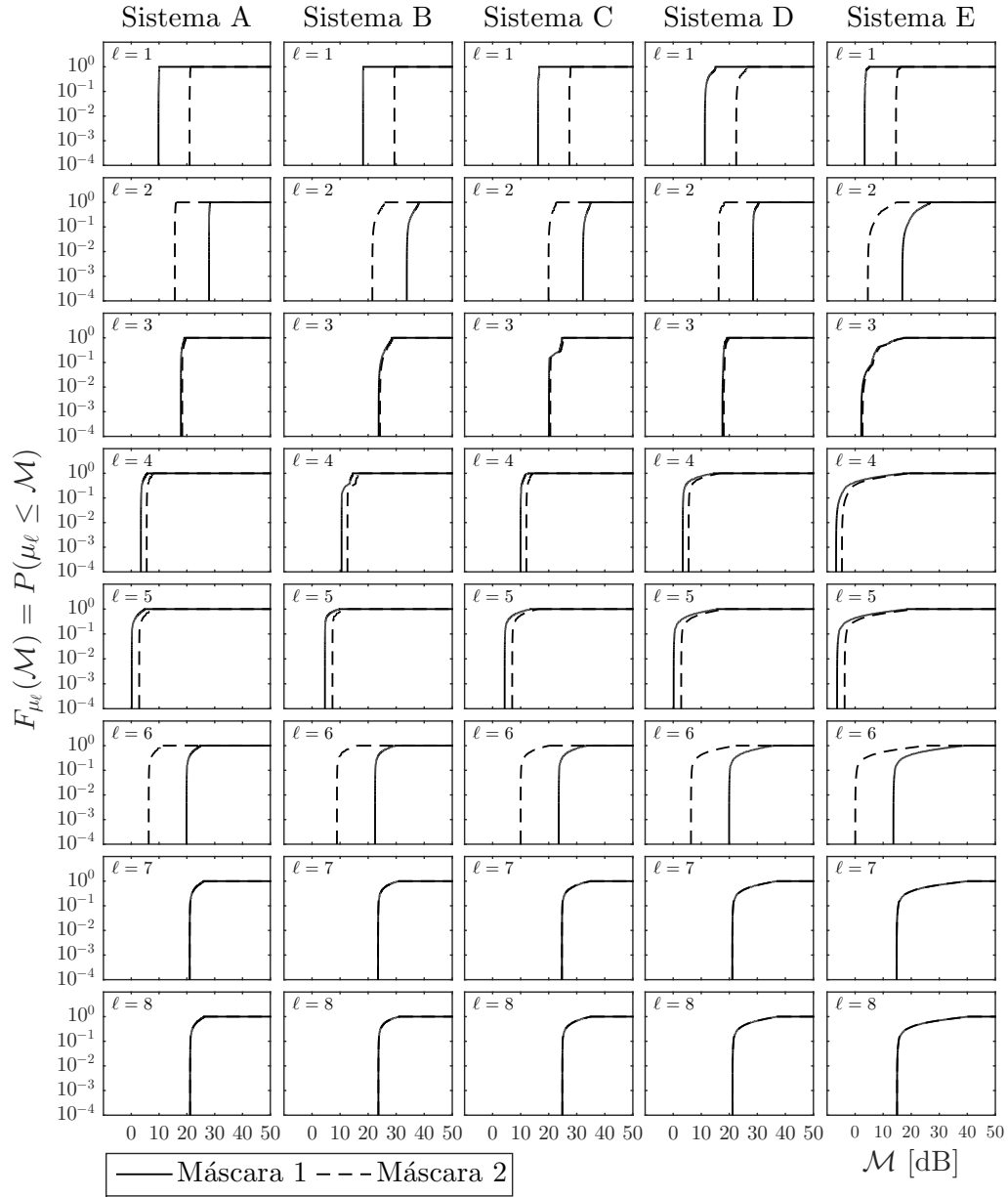


Figura 5.8: Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 2,4 m.

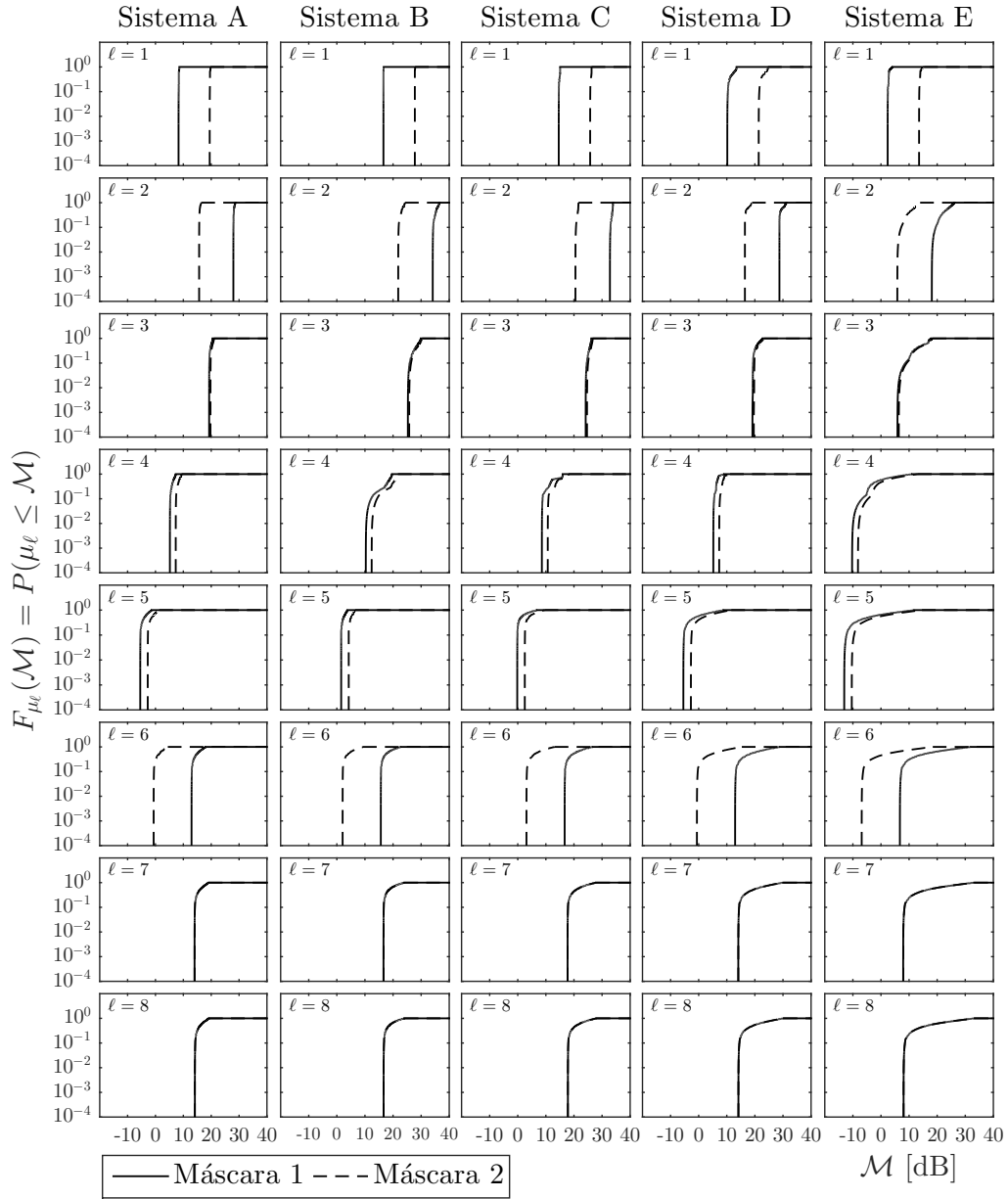


Figura 5.9: Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 4,5 m.

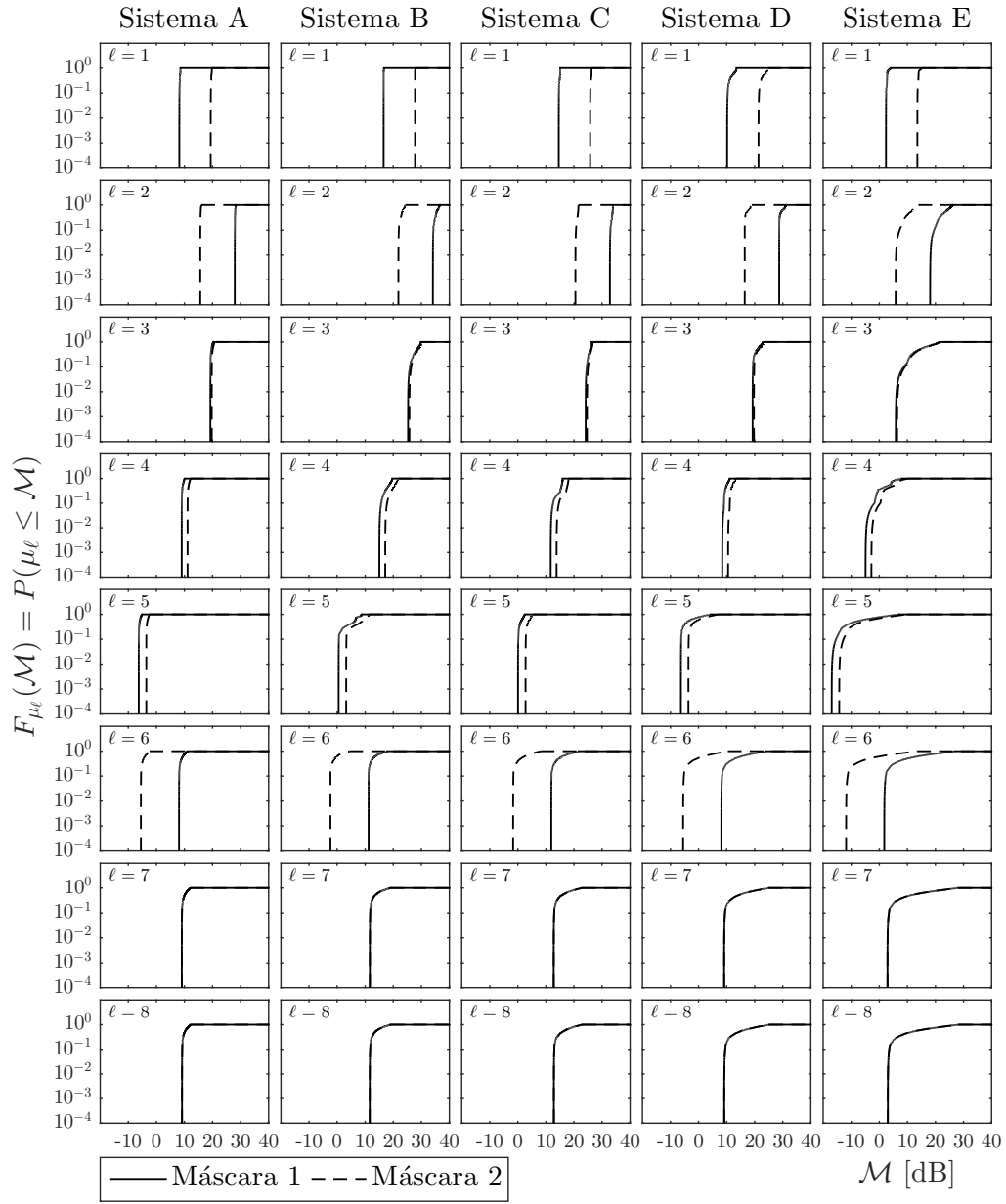


Figura 5.10: Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 8 m.

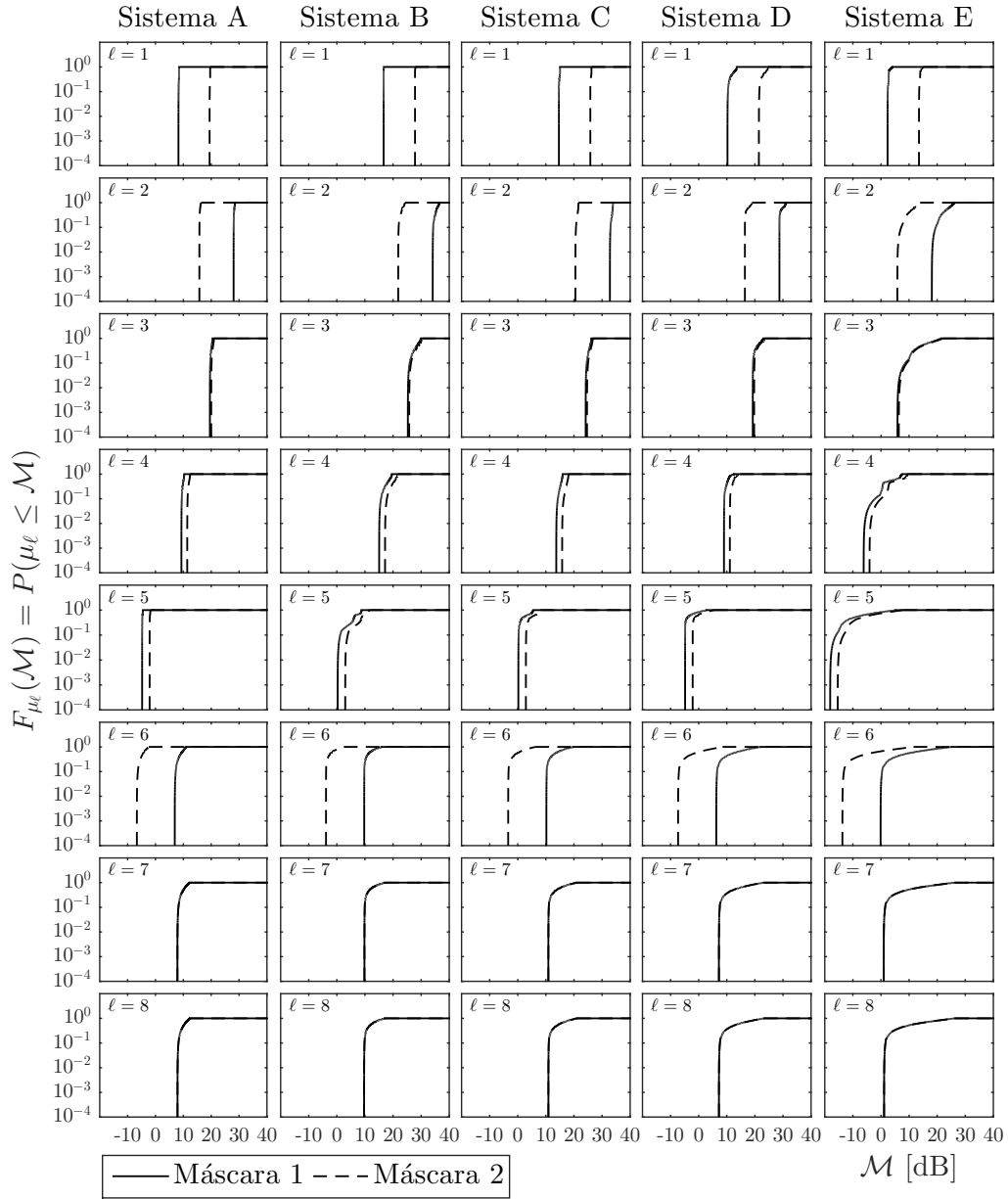


Figura 5.11: Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 10 m.

Tabela 5.6: Margens \mathcal{M}_{999} excedidas com probabilidade 0.999 (azul: $-2 \leq \mathcal{M}_{999} \leq 0$; verde: $-5 \leq \mathcal{M}_{999} < -2$; vermelho: $\mathcal{M}_{999} < -5$); latitude da estação terrena vítima: $\pm 10^\circ$)

Máscaras		Máscara 1					Máscara 2				
Diâmetro [metro]		1,2	2,4	4,5	8	10	1,2	2,4	4,5	8	10
Sistema A	$\ell=1$	9,8	9,8	8,3	8,2	8,2	21,0	21,0	19,5	19,4	19,4
	2	28,0	28,0	28,0	27,9	28,0	15,7	15,7	15,7	15,7	15,8
	3	13,0	17,9	19,3	19,3	19,5	13,5	18,3	19,7	19,7	20,0
	4	5,4	3,5	5,2	9,0	9,3	7,5	5,6	7,3	11,1	11,4
	5	5,8	0,2	-5,5	-6,3	-4,8	8,5	2,9	-2,8	-3,6	-2,1
	6	25,9	19,9	12,9	8,1	6,9	12,3	6,3	-0,7	-5,5	-6,7
	7	27,0	21,0	14,0	9,1	7,9	27,0	21,0	14,0	9,1	7,9
	8	27,2	21,2	14,1	9,1	7,9	27,2	21,2	14,1	9,1	7,9
Sistema B	$\ell=1$	18,1	18,2	16,6	16,6	16,6	29,3	29,4	27,8	27,8	27,8
	2	33,8	33,8	34,1	34,1	34,1	21,5	21,5	21,8	21,8	21,8
	3	18,4	23,8	25,3	25,3	25,3	18,9	24,2	25,8	25,8	25,8
	4	11,8	10,5	10,3	15,1	15,1	13,9	12,6	12,4	17,2	17,2
	5	8,8	4,6	1,5	0,6	0,3	11,4	7,3	4,2	3,2	3,0
	6	28,4	22,5	15,7	11,2	9,7	14,8	8,9	2,1	-2,4	-3,9
	7	29,5	23,5	16,6	11,7	9,8	29,6	23,6	16,6	11,7	9,8
	8	29,7	23,7	16,6	11,6	9,7	29,7	23,7	16,6	11,6	9,7
Sistema C	$\ell=1$	16,2	16,2	14,6	14,6	14,6	27,4	27,4	25,8	25,8	25,8
	2	32,2	32,2	32,8	32,8	32,8	19,9	19,9	20,5	20,5	20,5
	3	17,2	20,1	24,2	24,2	24,2	17,6	20,6	24,6	24,6	24,6
	4	10,2	9,9	8,6	11,7	13,7	12,3	12,0	10,7	13,8	15,8
	5	9,6	4,3	-0,2	0,1	0,2	12,3	7,0	2,5	2,8	2,9
	6	29,6	23,6	16,7	11,9	10,2	16,0	10,0	3,1	-1,7	-3,4
	7	30,7	24,7	17,7	12,8	10,9	30,7	24,7	17,7	12,8	10,9
	8	30,9	24,9	17,8	12,8	10,9	30,9	24,9	17,8	12,8	10,9
Sistema D	$\ell=1$	10,4	11,2	10,2	10,2	10,2	21,6	22,5	21,4	21,4	21,4
	2	26,5	28,5	28,7	28,7	28,7	14,2	16,29	16,5	16,5	16,5
	3	8,8	17,6	19,2	19,3	19,3	9,3	18,0	19,6	19,7	19,7
	4	4,7	3,4	5,2	8,5	9,0	6,8	5,5	7,3	10,5	11,1
	5	5,7	0,2	-5,5	-6,3	-4,8	8,4	2,3	-2,8	-3,6	-2,1
	6	25,9	20,0	13,0	8,1	6,3	12,3	6,3	-0,6	-5,5	-7,3
	7	27,0	21,1	14,1	9,1	7,2	27,0	21,1	14,1	9,1	7,2
	8	27,2	21,2	14,1	9,1	7,2	27,2	21,2	14,1	9,1	7,2
Sistema E	$\ell=1$	3,4	3,4	2,4	2,4	2,3	14,6	14,6	13,6	13,6	13,5
	2	16,8	16,8	18,1	18,1	18,1	4,5	4,6	5,8	5,8	5,8
	3	-0,8	2,2	5,9	5,9	5,9	-0,3	2,7	6,4	6,4	6,4
	4	-1,8	-6,8	-10,2	-4,9	-6,1	0,3	-4,7	-8,2	-2,8	-4,0
	5	-0,5	-6,4	-13,1	-16,9	-18,1	2,2	-3,7	-10,4	-14,3	-15,4
	6	19,8	13,7	6,7	1,8	-0,1	6,2	0,1	-6,9	-11,8	-13,7
	7	20,9	14,8	7,9	2,9	1,0	20,9	14,8	7,9	2,9	1,0
	8	21,1	15,0	8,0	3,1	1,1	21,1	15,0	8,0	3,1	1,1

Tabela 5.7: Margens \mathcal{M}_{99} excedidas com probabilidade 0.99 (azul: $-2 \leq \mathcal{M}_{99} \leq 0$; verde: $-5 \leq \mathcal{M}_{99} < -2$; vermelho: $\mathcal{M}_{99} < -5$); latitude da estação terrena vítima: $\pm 10^\circ$)

Máscaras		Máscara 1					Máscara 2				
Diâmetro [metro]		1,2	2,4	4,5	8	10	1,2	2,4	4,5	8	10
Sistema A	$\ell=1$	9,8	9,8	8,3	8,2	8,3	21,0	21,0	19,5	19,4	19,4
	2	28,0	28,0	28,0	27,9	28,0	15,7	15,7	15,7	15,7	15,8
	3	13,0	17,9	19,3	19,3	19,5	13,5	18,3	19,7	19,7	20,0
	4	5,4	3,5	5,2	9,0	9,3	7,5	5,6	7,3	11,1	11,4
	5	5,8	0,2	-5,5	-6,3	-4,8	8,5	2,9	-2,8	-3,6	-2,1
	6	25,9	19,9	13,0	8,1	7,0	12,3	6,3	-0,6	-5,5	-6,6
	7	27,0	21,0	14,0	9,1	7,9	27,1	21,0	14,0	9,1	7,9
	8	27,2	21,2	14,2	9,2	7,9	27,2	21,2	14,2	9,2	7,9
Sistema B	$\ell=1$	18,1	18,2	16,6	16,6	16,6	29,3	29,4	27,8	27,8	27,8
	2	33,8	33,8	34,1	34,1	34,1	21,5	21,6	21,9	21,9	21,9
	3	18,5	23,8	25,3	25,3	25,3	19,0	24,3	25,8	25,8	25,8
	4	11,8	10,5	10,5	15,1	15,1	13,9	12,6	12,6	17,2	17,2
	5	8,8	4,6	1,5	0,6	0,4	11,5	7,3	4,2	3,3	3,1
	6	28,4	22,5	15,7	11,2	9,7	14,8	8,9	2,1	-2,4	-3,8
	7	29,6	23,5	16,6	11,7	9,8	29,6	23,6	16,6	11,7	9,8
	8	29,7	23,7	16,7	11,7	9,7	29,7	23,7	16,7	11,7	9,7
Sistema C	$\ell=1$	16,2	16,2	14,6	14,6	14,6	27,4	27,4	25,8	25,8	25,8
	2	32,2	32,2	32,8	32,8	32,8	20,0	20,0	20,5	20,5	20,5
	3	17,2	20,1	24,2	24,2	24,2	17,7	20,6	24,7	24,7	24,7
	4	10,2	10,0	8,6	11,8	13,8	12,3	12,1	10,7	13,9	15,9
	5	9,6	4,3	-0,2	0,1	0,2	12,3	7,0	2,5	2,8	2,9
	6	29,6	23,6	16,7	11,9	10,2	16,0	10,0	3,1	-1,7	-3,4
	7	30,7	24,7	17,7	12,8	10,9	30,8	24,7	17,8	12,8	10,9
	8	30,9	24,9	17,9	12,9	10,9	30,9	24,9	17,9	12,9	10,9
Sistema D	$\ell=1$	10,4	11,3	10,2	10,2	10,3	21,6	22,5	21,4	21,4	21,4
	2	26,5	28,5	28,7	28,7	28,7	14,3	16,2	16,5	16,5	16,5
	3	9,1	17,6	19,3	19,3	19,3	9,5	18,1	19,7	19,7	19,7
	4	4,8	3,4	5,2	8,5	9,0	6,9	5,5	7,3	10,6	11,1
	5	5,8	0,2	-5,4	-6,3	-4,8	8,4	2,9	-2,7	-3,6	-2,1
	6	25,9	20,0	13,0	8,1	6,3	12,3	6,4	-0,6	-5,5	-7,3
	7	27,1	21,1	14,1	9,1	7,2	27,1	21,1	14,1	9,2	7,2
	8	27,2	21,2	14,2	9,2	7,2	27,2	21,2	14,2	9,2	7,2
Sistema E	$\ell=1$	3,4	3,4	2,4	2,4	2,4	14,6	14,6	13,6	13,6	13,5
	2	17,0	17,0	18,2	18,2	18,2	4,7	4,7	6,0	6,0	6,0
	3	-0,6	2,6	6,1	6,2	6,2	-0,1	3,1	6,6	6,6	6,6
	4	-1,8	-6,7	-9,9	-4,6	-5,8	0,3	-4,6	-7,8	-2,5	-3,7
	5	-0,5	-6,4	-13,0	-16,8	-17,9	2,2	-3,7	-10,3	-14,1	-15,2
	6	19,8	13,7	6,8	1,8	-0,1	6,2	0,1	-6,8	-11,8	-13,7
	7	21,0	14,9	7,9	3,0	1,0	21,0	14,9	8,0	3,0	1,0
	8	21,1	15,0	8,1	3,1	1,2	21,1	15,0	8,1	3,1	1,2

5.3

Estação terrena receptora vítima localizada na latitude de $\pm 20^\circ$

Nesta seção, considera-se uma estação terrena vítima localizada na latitude $\pm 20^\circ$, sendo determinadas, para cada um dos sistemas de satélites não-GEO apresentados na Tabela 5.1, as funções distribuição de probabilidade das margens $\{\mu_\ell, \ell = 1, \dots, 8\}$ da densidade de fluxo de potência no lance de descida $epfd_\downarrow$, associadas às máscaras obtidas nas seções 4.1 e 4.2. Os resultados obtidos para estações terrenas vítima com antenas receptoras de diâmetros 1,2, 2,4, 4,5, 8 e 10 metros são apresentados nas figuras 5.12, 5.13, 5.14, 5.15 e 5.16, respectivamente. Nestas figuras, a Máscara 1 refere-se à máscara definida na Seção 4.1 e a Máscara 2 à máscara definida na Seção 4.2. Conforme evidenciado pelas tabelas 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5, a Máscara 2 apresentou margens maiores que as da Máscara 1 para $\ell = 1, 4$ e 5 e menores que as da Máscara 1 para $\ell = 2$ e 6 . Para $\ell = 3, 7$ e 8 as margens correspondentes às duas máscara ficaram bem próximas. Estes fatos estão refletidos nas figuras 5.12 a 5.16.

Observe que, do mesmo modo que nas seções anteriores, de maneira geral, os aumentos no diâmetro da antena receptora vítima implicam num aumento da margem correspondente a $\ell = 4$ e numa diminuição das margens correspondentes a $\ell = 5, 6, 7$ e 8 , enquanto que as margens correspondentes a $\ell = 1, 2$ e 3 praticamente não sofrem variações. Novamente, os resultados obtidos podem ser melhor apreciados nas tabelas 5.8 e 5.9 que mostram os valores de margem \mathcal{M}_{999} e \mathcal{M}_{99} excedidos com probabilidades 0,999 e 0,99, respectivamente.

Também aqui, as duas hipóteses de pior caso identificadas na Seção 5.1 contribuíram para as margens negativas significativas que aparecem, em vermelho, nas tabelas 5.8 e 5.9. Note que, novamente, nos sistemas D e E, onde o número de satélites visíveis pela estação terrena vítima é alto (tipicamente 23 no Sistema D e 42 no Sistema E quando a estação terrena vítima está localizada na latitude $\pm 20^\circ$), existe um maior número de margens negativas significativas.

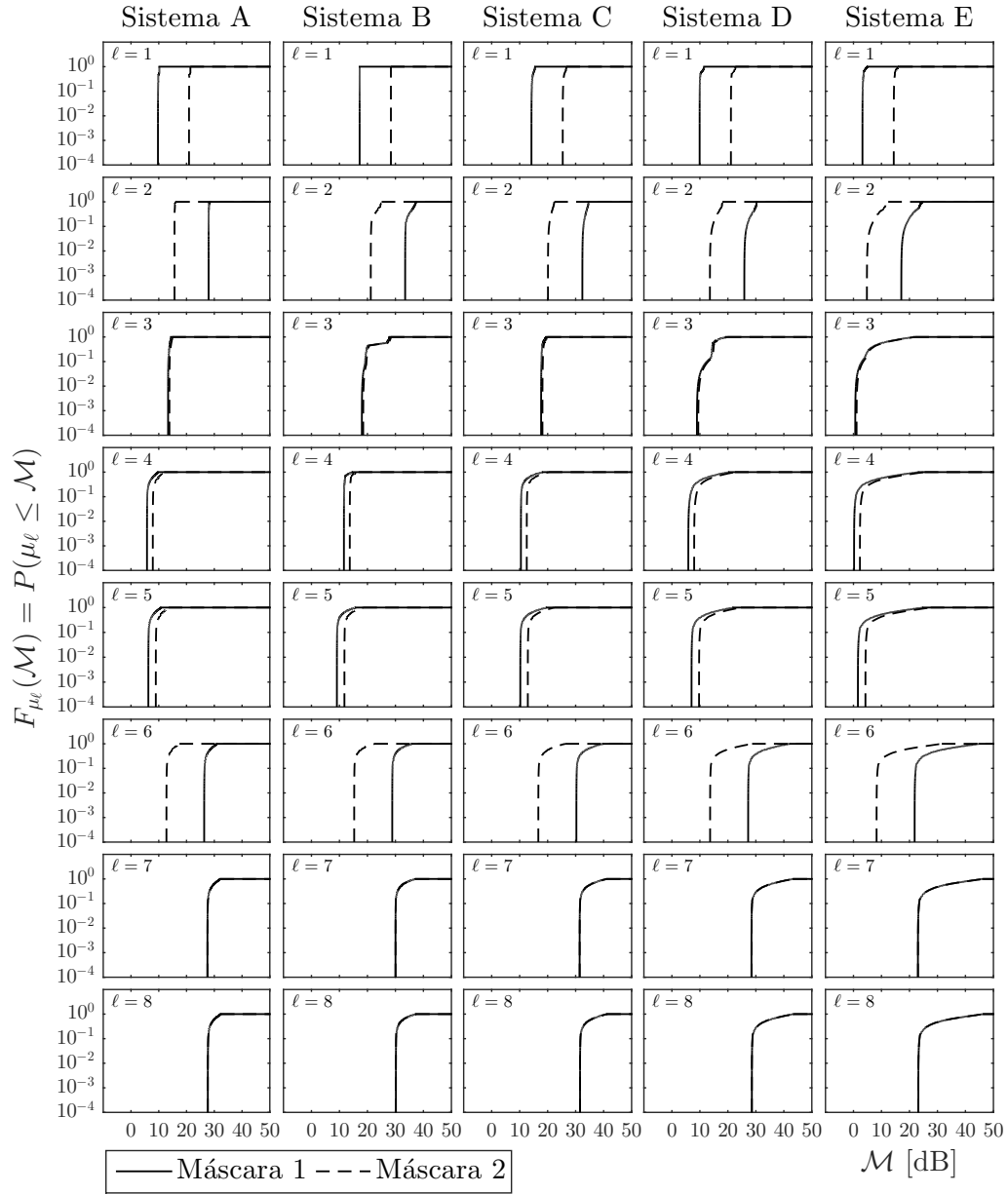


Figura 5.12: Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 1,2 m.

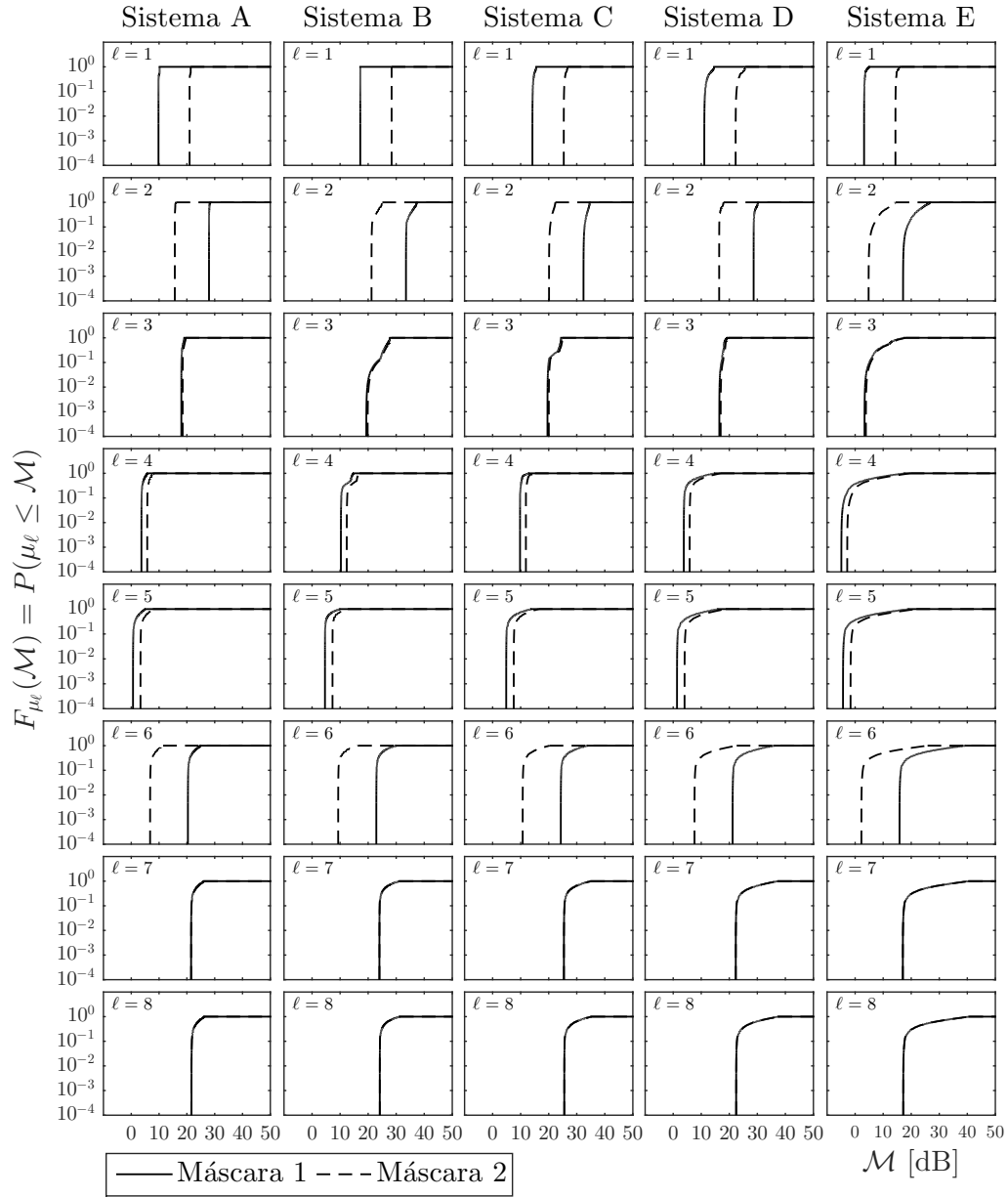


Figura 5.13: Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 2,4 m.

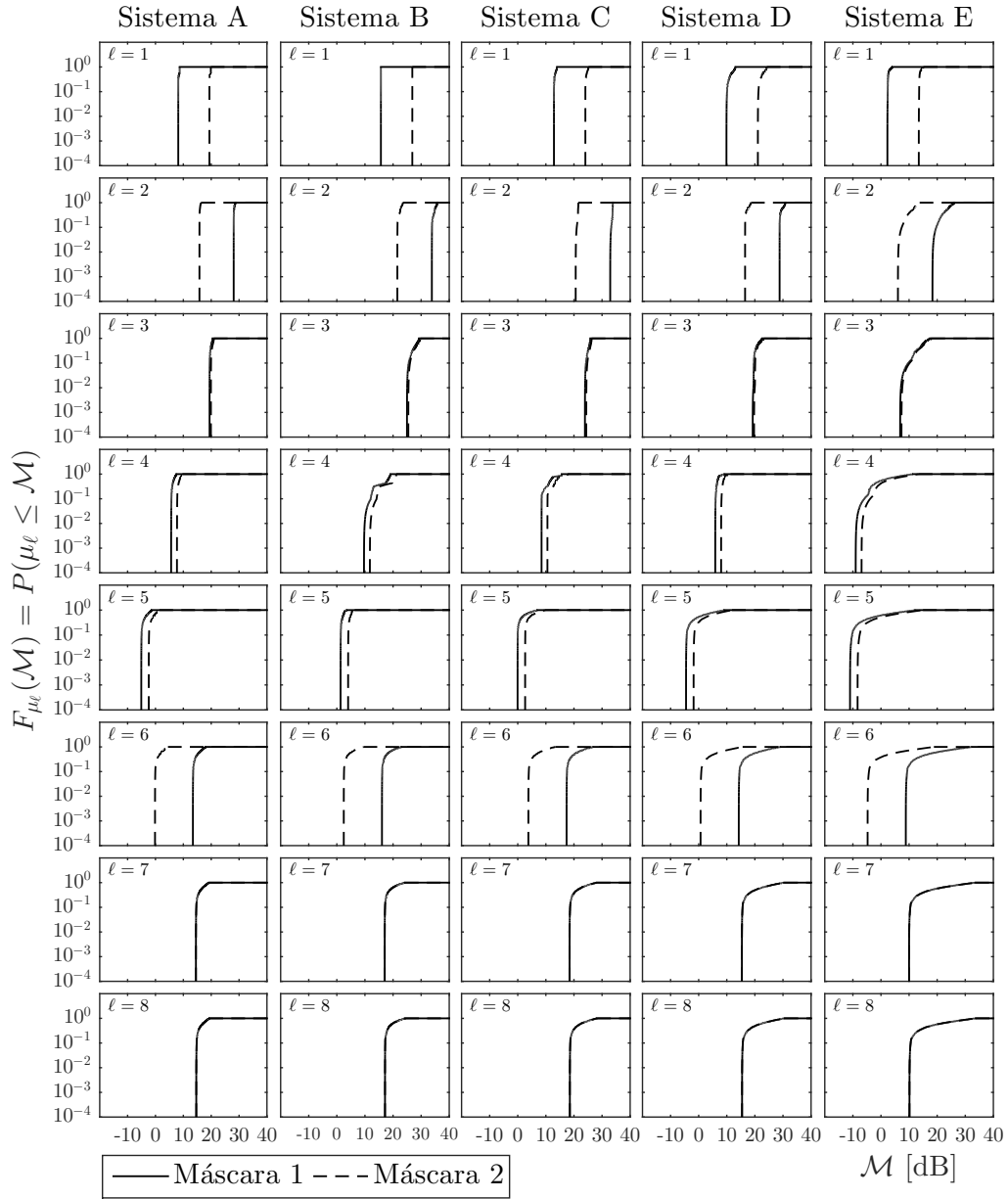


Figura 5.14: Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 4,5 m.

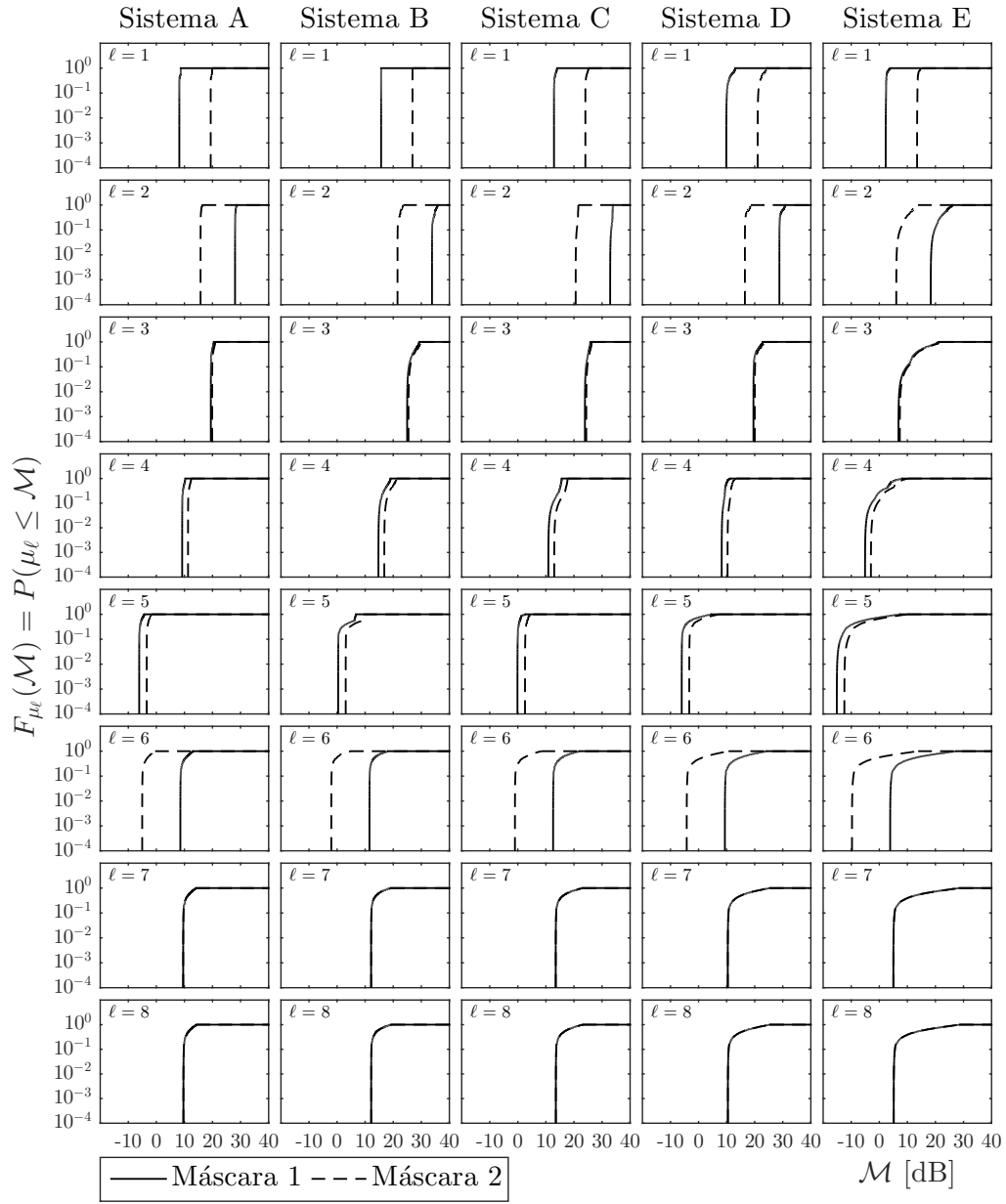


Figura 5.15: Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 8 m.

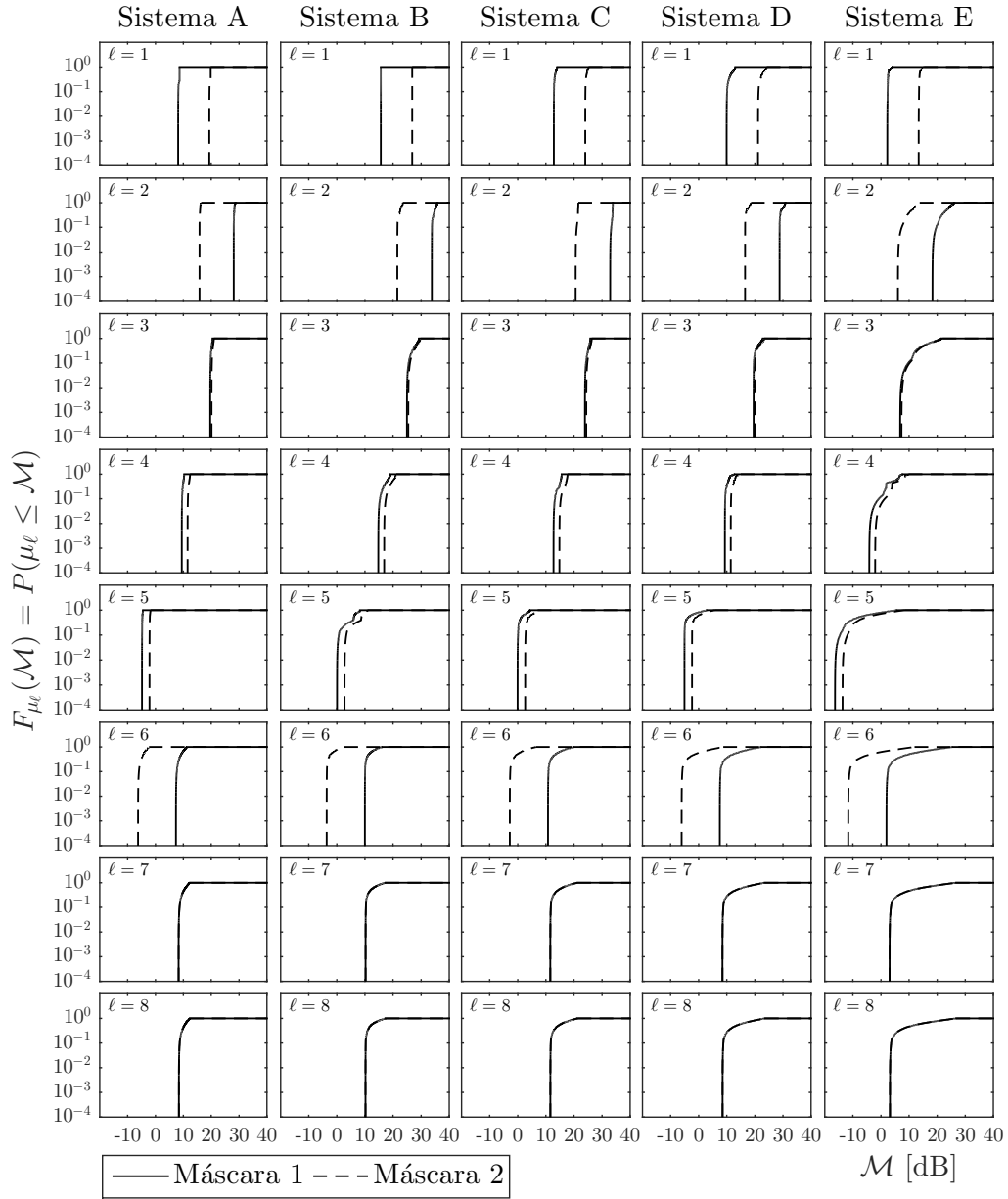


Figura 5.16: Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 10 m.

Tabela 5.8: Margens \mathcal{M}_{999} excedidas com probabilidade 0.999 (azul: $-2 \leq \mathcal{M}_{999} \leq 0$; verde: $-5 \leq \mathcal{M}_{999} < -2$; vermelho: $\mathcal{M}_{999} < -5$); latitude da estação terrena vítima: $\pm 20^\circ$)

Máscaras		Máscara 1					Máscara 2				
Diâmetro [metro]		1,2	2,4	4,5	8	10	1,2	2,4	4,5	8	10
Sistema A	$\ell=1$	9,7	9,8	8,2	8,2	8,1	20,9	21,0	19,4	19,4	19,3
	2	28,0	28,0	28,1	28,0	28,1	15,7	15,7	15,8	15,8	15,8
	3	13,4	18,0	19,4	19,4	19,7	13,8	18,5	19,9	19,9	20,1
	4	5,8	3,7	5,6	9,2	9,4	7,9	5,7	7,7	11,3	11,5
	5	6,3	0,6	-5,1	-6,1	-4,8	8,9	3,3	-2,4	-3,4	-2,1
	6	26,4	20,4	13,4	8,6	7,4	12,8	6,8	-0,2	-5,0	-6,2
	7	27,5	21,5	14,5	9,6	8,3	27,5	21,5	14,5	9,6	8,3
	8	27,7	21,7	14,6	9,6	8,4	27,7	21,7	14,6	9,6	8,4
Sistema B	$\ell=1$	17,2	17,2	15,7	15,7	15,6	28,4	28,4	26,9	26,9	26,8
	2	33,5	33,5	33,8	33,8	33,8	21,2	21,2	21,5	21,5	21,5
	3	18,0	19,4	25,0	25,0	25,0	18,5	19,9	25,4	25,4	25,4
	4	11,6	10,3	9,7	14,7	14,8	13,7	12,4	11,8	16,8	16,9
	5	9,1	4,6	1,3	0,4	0,1	11,8	7,3	4,0	3,1	2,8
	6	28,9	22,9	16,1	11,5	10,0	15,3	9,3	2,5	-2,1	-3,6
	7	30,0	24,0	17,0	12,1	10,2	30,0	24,0	17,0	12,1	10,2
	8	30,2	24,2	17,1	12,1	10,2	30,2	24,2	17,1	12,1	10,2
Sistema C	$\ell=1$	14,2	14,2	12,9	12,9	12,8	25,4	25,4	24,1	24,1	24,0
	2	32,4	32,4	32,9	32,9	32,9	20,1	20,1	20,6	20,6	20,6
	3	17,7	19,6	23,9	23,9	23,9	18,1	20,0	24,4	24,4	24,4
	4	10,4	9,8	8,5	10,9	12,7	12,5	11,9	10,6	13,0	14,8
	5	10,2	4,8	-0,1	-0,1	-0,1	12,9	7,5	2,6	2,6	2,6
	6	30,3	24,3	17,4	12,6	10,8	16,7	10,7	3,8	-1,0	-2,8
	7	31,4	25,4	18,4	13,5	11,6	31,4	25,4	18,5	13,5	11,6
	8	31,6	25,6	18,5	13,5	11,6	31,6	25,6	18,5	13,5	11,6
Sistema D	$\ell=1$	9,9	11,2	9,9	9,9	9,9	21,1	22,3	21,1	21,1	21,1
	2	25,9	28,7	28,8	28,8	28,8	13,6	16,4	16,5	16,5	16,5
	3	9,0	16,5	19,3	19,6	19,6	9,5	17,0	19,7	20,0	20,0
	4	5,9	3,9	5,9	8,3	9,3	8,0	5,9	8,0	10,3	11,4
	5	7,0	1,4	-4,5	-6,0	-5,1	9,7	4,1	-1,8	-3,3	-2,4
	6	27,3	21,2	14,3	9,4	7,5	13,7	7,6	0,7	-4,2	-6,1
	7	28,4	22,3	15,4	10,4	8,5	28,4	22,4	15,4	10,4	8,5
	8	28,6	22,5	15,4	10,4	8,5	28,6	22,5	15,4	10,4	8,5
Sistema E	$\ell=1$	3,2	3,2	2,3	2,3	2,2	14,4	14,4	13,5	13,5	13,4
	2	17,1	17,1	18,3	18,3	18,3	4,8	4,8	6,0	6,1	6,1
	3	0,7	3,4	6,8	6,9	6,9	1,1	3,8	7,3	7,3	7,3
	4	0,2	-4,9	-9,0	-5,1	-4,1	2,3	-2,8	-6,9	-3,0	-2,0
	5	1,6	-4,3	-11,0	-15,1	-16,3	4,3	-1,6	-8,3	-12,4	-13,7
	6	21,9	15,8	8,8	3,9	2,0	8,3	2,2	-4,8	-9,7	-11,6
	7	23,0	17,0	10,0	5,0	3,1	23,0	17,0	10,0	5,0	3,1
	8	23,2	17,2	10,1	5,1	3,2	23,2	17,2	10,1	5,1	3,2

Tabela 5.9: Margens \mathcal{M}_{99} excedidas com probabilidade 0.99 (azul: $-2 \leq \mathcal{M}_{99} \leq 0$; verde: $-5 \leq \mathcal{M}_{99} < -2$; vermelho: $\mathcal{M}_{99} < -5$); latitude da estação terrena vítima: $\pm 20^\circ$)

Máscaras		Máscara 1					Máscara 2				
Diâmetro [metro]		1,2	2,4	4,5	8	10	1,2	2,4	4,5	8	10
Sistema A	$\ell=1$	9,7	9,8	8,2	8,2	8,2	20,9	21,0	19,4	19,4	19,3
	2	28,0	28,0	28,1	28,0	28,1	15,7	15,7	15,8	15,8	15,8
	3	13,4	18,0	19,4	19,4	19,7	13,8	18,5	19,9	19,9	20,1
	4	5,8	3,7	5,7	9,2	9,5	7,9	5,7	7,7	11,3	11,5
	5	6,3	0,6	-5,1	-6,1	-4,8	8,9	3,3	-2,4	-3,4	-2,1
	6	26,4	20,4	13,4	8,6	7,4	12,8	6,8	-0,2	-5,0	-6,2
	7	27,5	21,5	14,5	9,6	8,3	27,6	21,5	14,5	9,6	8,3
	8	27,7	21,7	14,7	9,7	8,4	27,7	21,7	14,7	9,7	8,4
Sistema B	$\ell=1$	17,2	17,2	15,7	15,7	15,6	28,4	28,4	26,9	26,9	26,8
	2	33,5	33,5	33,8	33,8	33,8	21,2	21,2	21,5	21,5	21,5
	3	18,2	19,7	25,0	25,0	25,0	18,6	20,2	25,5	25,5	25,5
	4	11,6	10,3	9,9	14,8	14,8	13,7	12,4	12,0	16,9	16,9
	5	9,1	4,6	1,3	0,4	0,1	11,8	7,3	4,0	3,1	2,8
	6	28,9	22,9	16,1	11,5	10,0	15,3	9,3	2,5	-2,1	-3,6
	7	30,0	24,0	17,0	12,1	10,2	30,1	24,0	17,1	12,1	10,3
	8	30,2	24,2	17,1	12,2	10,2	30,2	24,2	17,1	12,2	10,2
Sistema C	$\ell=1$	14,2	14,2	12,9	12,9	12,9	25,4	25,4	24,1	24,1	24,0
	2	32,4	32,4	32,9	32,9	32,9	20,2	20,2	20,7	20,7	20,6
	3	17,7	19,6	23,9	23,9	23,9	18,2	20,1	24,4	24,4	24,4
	4	10,5	9,8	8,5	11,0	12,8	12,6	11,9	10,6	13,1	14,9
	5	10,2	4,9	-0,1	-0,1	0,0	12,9	7,5	2,6	2,6	2,6
	6	30,3	24,3	17,4	12,6	10,8	16,7	10,7	3,8	-1,0	-2,8
	7	31,4	25,4	18,5	13,5	11,6	31,5	25,5	18,5	13,5	11,6
	8	31,6	25,6	18,6	13,6	11,6	31,6	25,6	18,6	13,6	11,6
Sistema D	$\ell=1$	9,9	11,2	9,9	9,9	10,0	21,1	22,3	21,1	21,1	21,1
	2	26,0	28,7	28,8	28,8	28,8	13,7	16,4	16,5	16,5	16,5
	3	9,3	16,5	19,5	19,6	19,6	9,8	17,0	19,9	20,0	20,0
	4	5,9	3,8	5,9	8,3	9,3	8,0	5,9	8,0	10,4	11,4
	5	7,0	1,4	-4,5	-6,0	-5,1	9,7	4,1	-1,8	-3,3	-2,4
	6	27,3	21,2	14,3	9,4	7,5	13,7	7,6	0,7	-4,2	-6,0
	7	28,4	22,3	15,4	10,4	8,5	28,5	22,4	15,4	10,4	8,5
	8	28,6	22,5	15,5	10,5	8,5	28,6	22,5	15,5	10,5	8,5
Sistema E	$\ell=1$	3,2	3,2	2,3	2,3	2,3	14,4	14,4	13,5	13,5	13,4
	2	17,2	17,2	18,5	18,5	18,5	4,9	4,9	6,2	6,2	6,2
	3	0,9	3,5	7,1	7,1	7,1	1,3	4,0	7,6	7,6	7,6
	4	0,3	-4,8	-8,7	-4,8	-3,8	2,4	-2,7	-6,6	-2,8	-1,7
	5	1,6	-4,3	-10,9	-15,0	-16,2	4,3	-1,6	-8,3	-12,3	-13,5
	6	21,9	15,9	8,9	3,9	2,0	8,3	2,3	-4,7	-9,7	-11,6
	7	23,1	17,1	10,0	5,1	3,1	23,1	17,1	10,1	5,1	3,1
	8	23,2	17,2	10,2	5,2	3,2	23,2	17,2	10,2	5,2	3,2

5.4

Estação terrena receptora vítima localizada na latitude de $\pm 30^\circ$

Nesta seção, considera-se uma estação terrena vítima localizada na latitude $\pm 30^\circ$, sendo determinadas, para cada um dos sistemas de satélites não-GEO apresentados na Tabela 5.1, as funções distribuição de probabilidade das margens $\{\mu_\ell, \ell = 1, \dots, 8\}$ da densidade de fluxo de potência no lance de descida $epfd_\downarrow$, associadas às máscaras obtidas nas seções 4.1 e 4.2. Os resultados obtidos para estações terrenas vítima com antenas receptoras de diâmetros 1,2, 2,4, 4,5, 8 e 10 metros são apresentados nas figuras 5.17, 5.18, 5.19, 5.20 e 5.21, respectivamente. Nestas figuras, a Máscara 1 refere-se à máscara definida na Seção 4.1 e a Máscara 2 à máscara definida na Seção 4.2. Conforme evidenciado pelas tabelas 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5, a Máscara 2 apresentou margens maiores que as da Máscara 1 para $\ell = 1, 4$ e 5 e menores que as da Máscara 1 para $\ell = 2$ e 6 . Para $\ell = 3, 7$ e 8 as margens correspondentes às duas máscara ficaram bem próximas. Estes fatos estão refletidos nas figuras 5.17 a 5.21.

Observe que, do mesmo modo que nas seções anteriores, de maneira geral, os aumentos no diâmetro da antena receptora vítima implicam num aumento da margem correspondente a $\ell = 4$ e numa diminuição das margens correspondentes a $\ell = 5, 6, 7$ e 8 , enquanto que as margens correspondentes a $\ell = 1, 2$ e 3 praticamente não sofrem variações. Novamente, os resultados obtidos podem ser melhor apreciados nas tabelas 5.10 e 5.11 que mostram os valores de margem \mathcal{M}_{999} e \mathcal{M}_{99} excedidos com probabilidades 0,999 e 0,99, respectivamente.

Também aqui, as duas hipóteses de pior caso identificadas na Seção 5.1 contribuíram para as margens negativas significativas que aparecem, em vermelho, nas tabelas 5.10 e 5.11. Note que, novamente, nos sistemas D e E, onde o número de satélites visíveis pela estação terrena vítima é alto (tipicamente 24 no Sistema D e 46 no Sistema E quando a estação terrena vítima está localizada na latitude $\pm 30^\circ$), existe um maior número de margens negativas significativas.

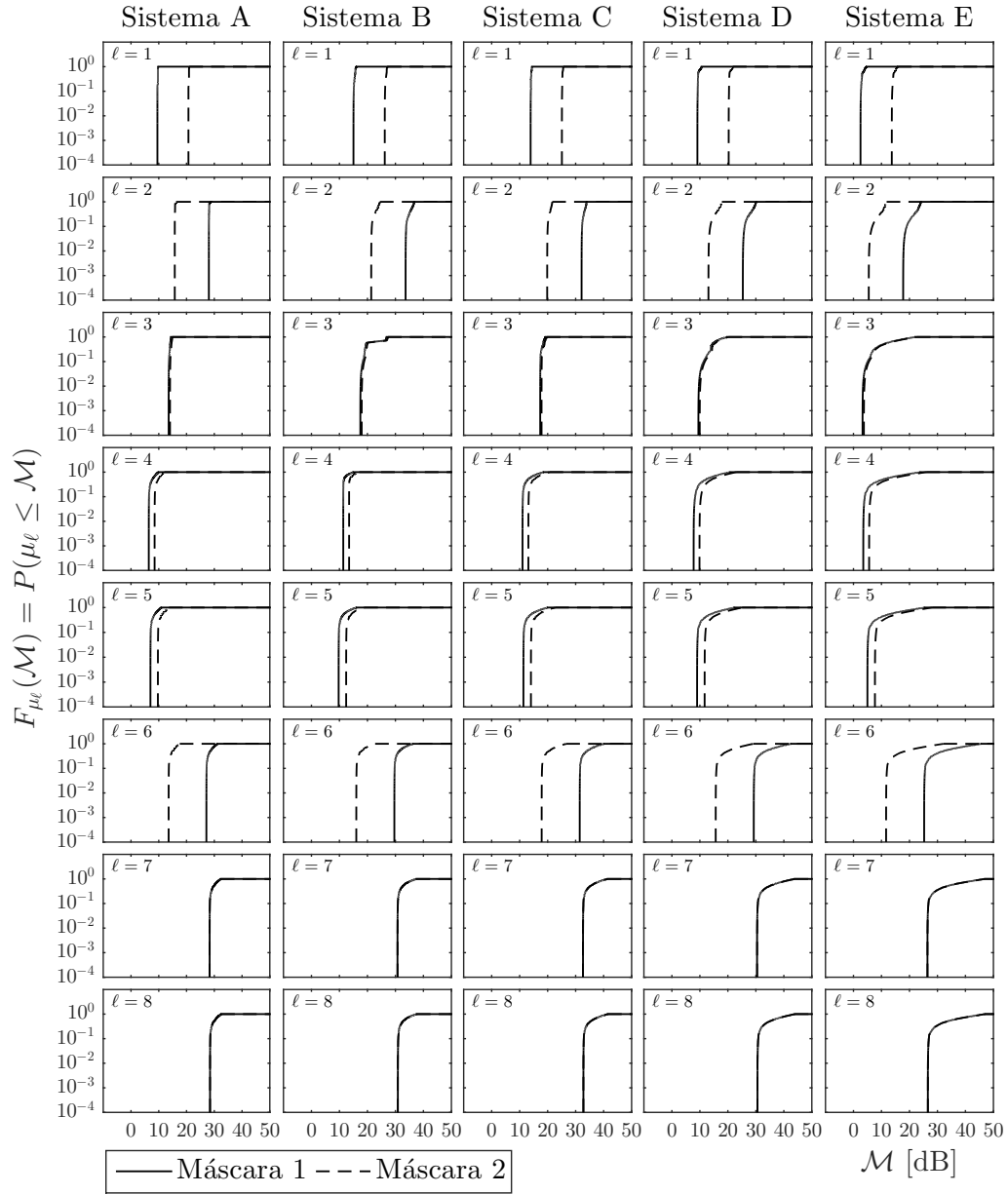


Figura 5.17: Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 1,2 m.

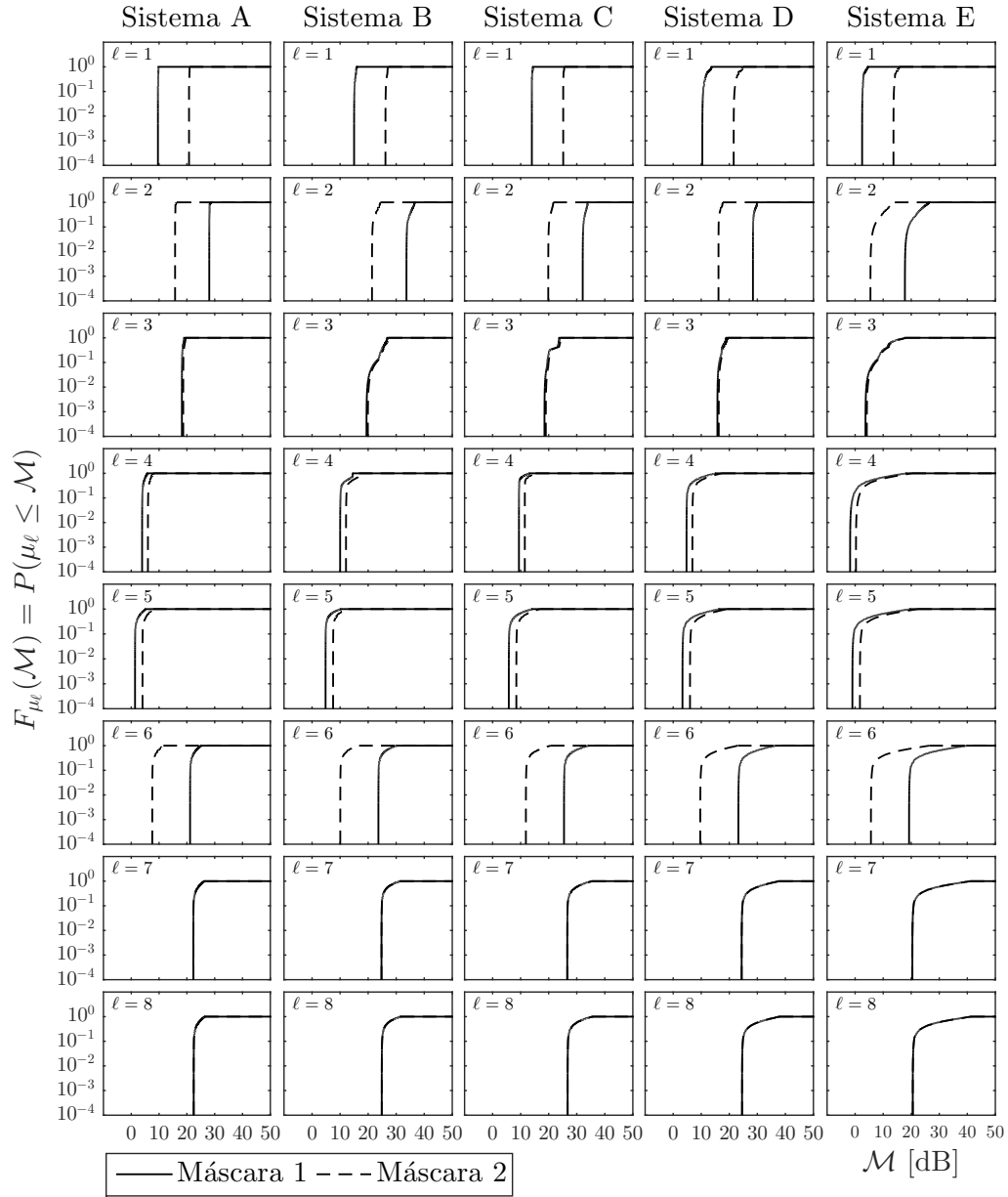


Figura 5.18: Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 2,4 m.

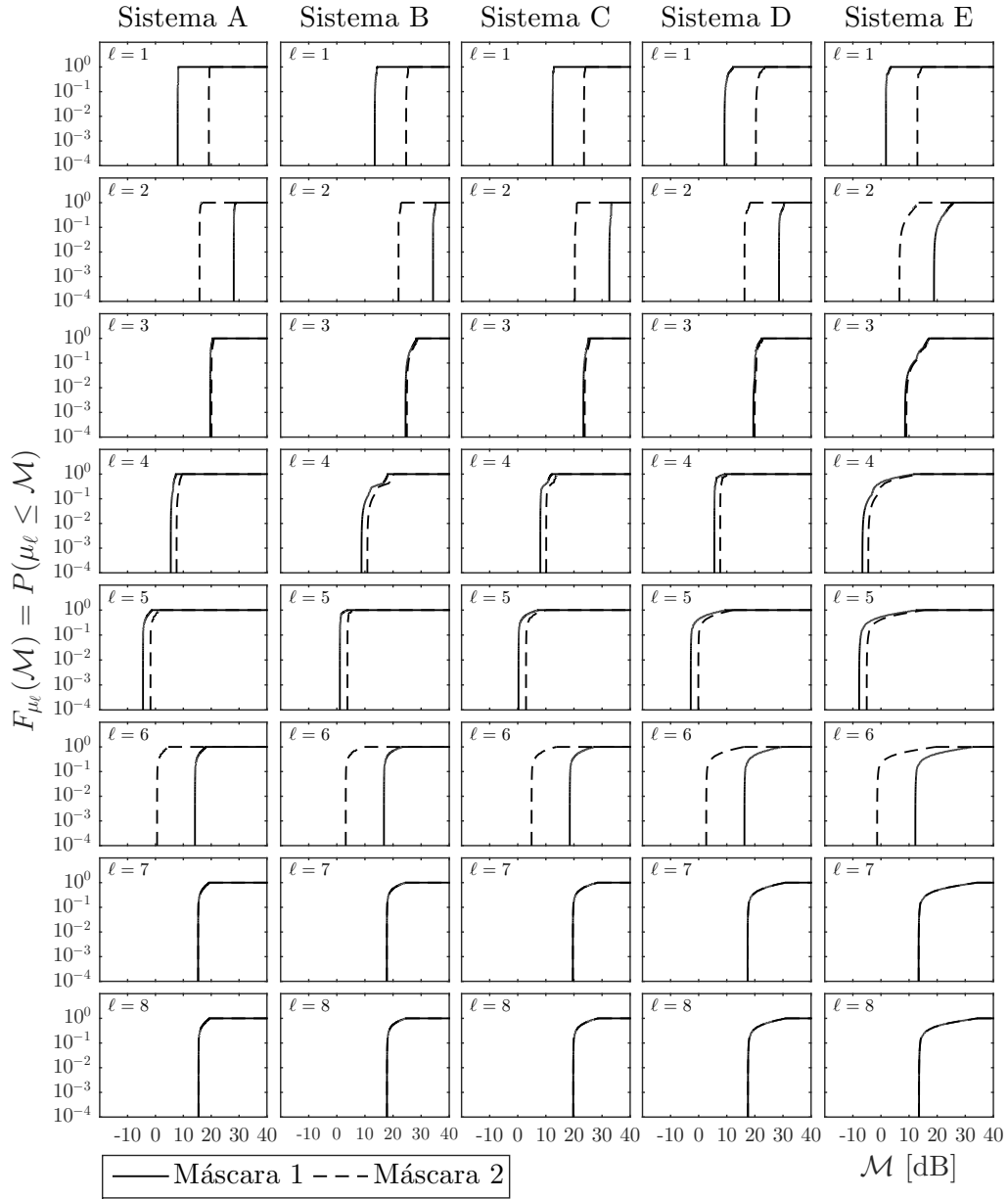


Figura 5.19: Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 4,5 m.

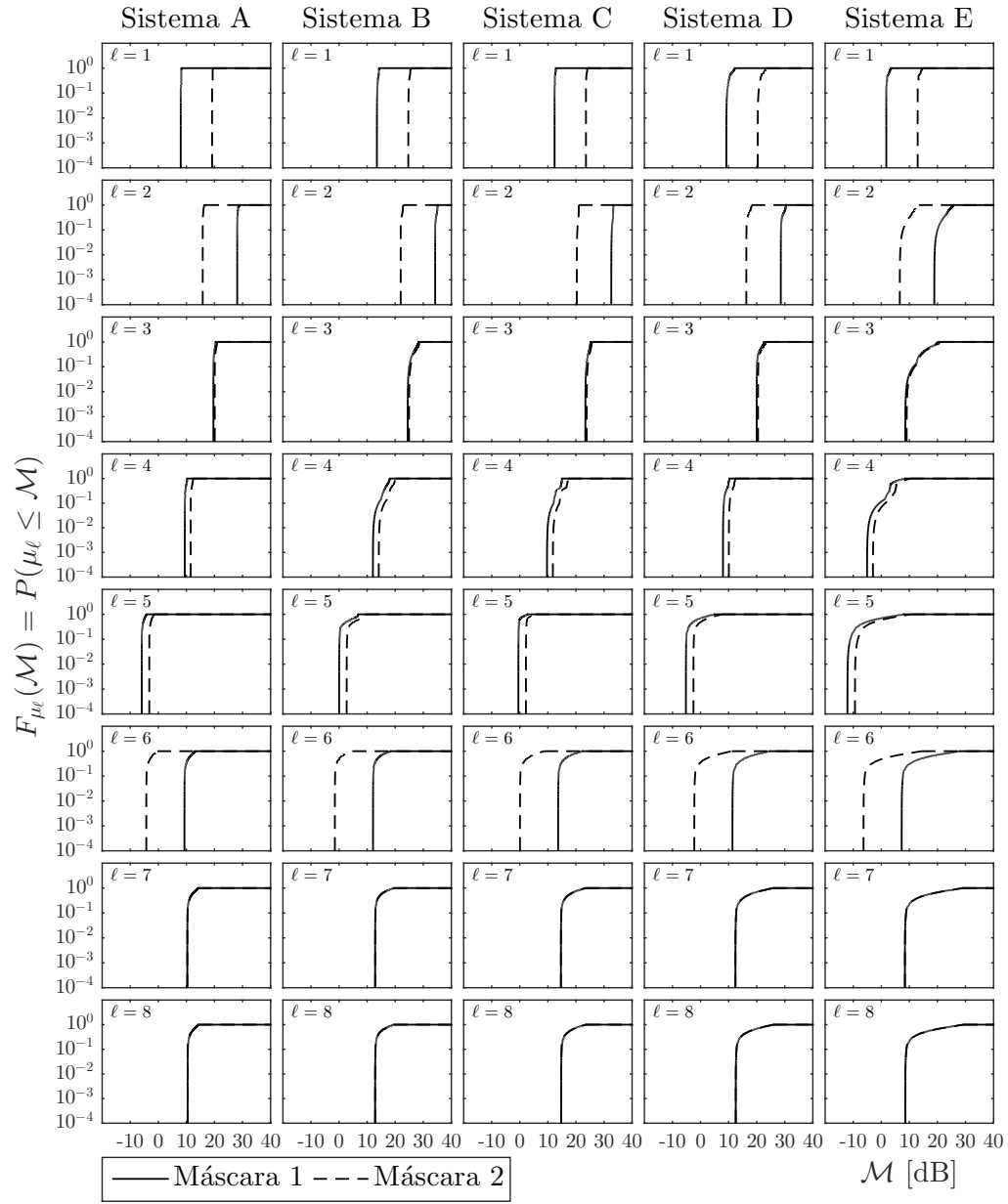


Figura 5.20: Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 8 m.

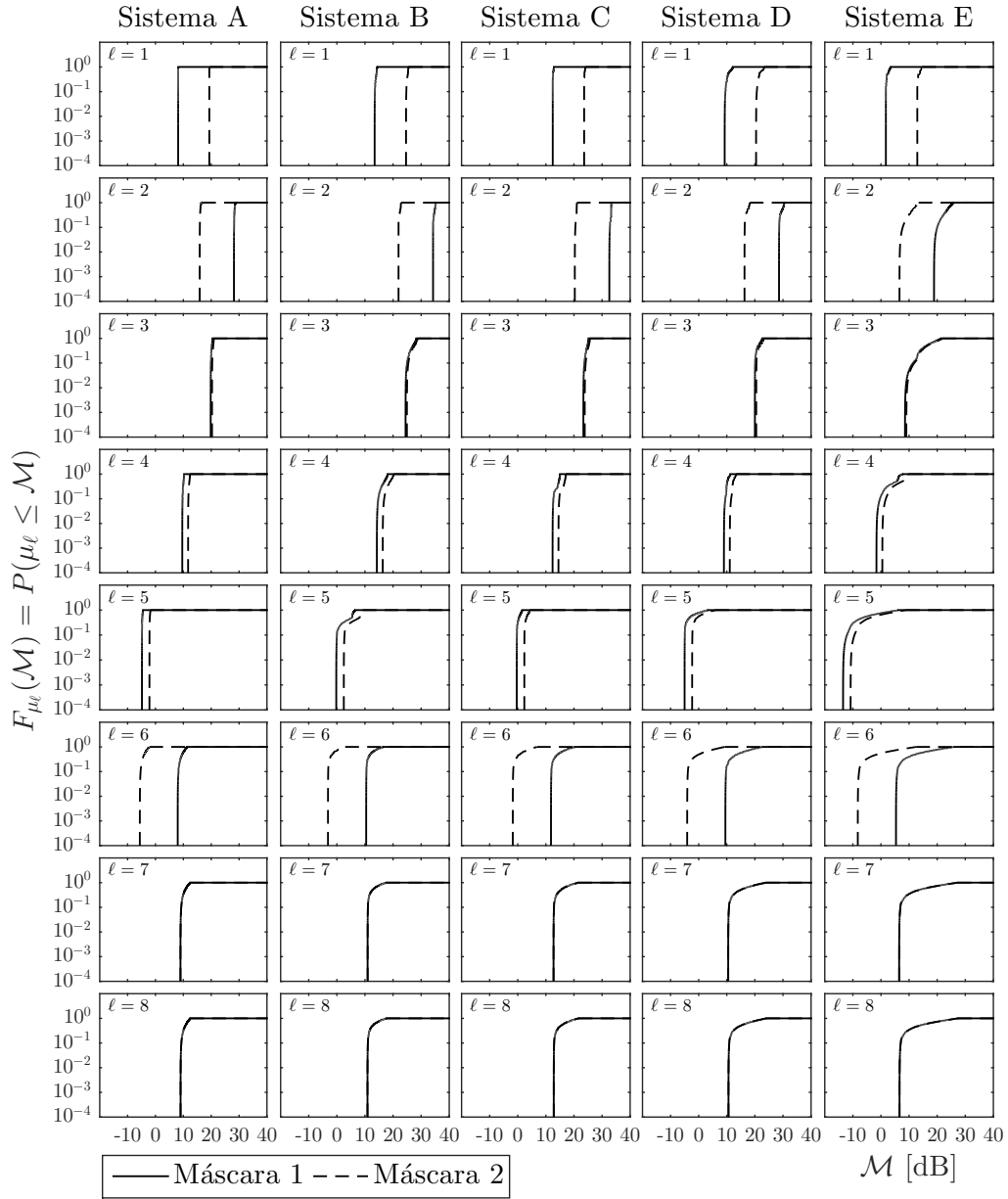


Figura 5.21: Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 10 m.

Tabela 5.10: Margens \mathcal{M}_{999} excedidas com probabilidade 0.999 (azul: $-2 \leq \mathcal{M}_{999} \leq 0$; verde: $-5 \leq \mathcal{M}_{999} < -2$; vermelho: $\mathcal{M}_{999} < -5$); latitude da estação terrena vítima: $\pm 30^\circ$)

Máscaras		Máscara 1					Máscara 2				
Diâmetro [metro]		1,2	2,4	4,5	8	10	1,2	2,4	4,5	8	10
Sistema A	$\ell=1$	9,5	9,6	8,0	8,0	8,1	20,7	20,8	19,2	19,2	19,3
	2	28,1	28,0	28,1	28,1	28,2	15,8	15,8	15,8	15,8	15,9
	3	13,6	18,2	19,6	19,6	19,8	14,0	18,7	20,1	20,1	20,3
	4	6,4	3,9	5,5	9,4	9,6	8,5	6,0	7,6	11,5	11,7
	5	7,0	1,4	-4,5	-5,9	-4,8	9,7	4,0	-1,8	-3,2	-2,2
	6	27,2	21,1	14,2	9,3	8,0	13,6	7,6	0,6	-4,3	-5,6
	7	28,3	22,3	15,3	10,3	9,0	28,3	22,3	15,3	10,3	9,0
	8	28,5	22,5	15,4	10,4	9,0	28,5	22,5	15,4	10,4	9,0
Sistema B	$\ell=1$	15,0	15,0	13,5	13,5	13,4	26,2	26,2	24,7	24,7	24,6
	2	33,6	33,7	34,2	34,2	34,2	21,4	21,4	22,0	22,0	22,0
	3	17,5	19,4	24,5	24,5	24,5	18,0	19,9	24,9	24,9	24,9
	4	11,4	10,0	8,8	12,1	14,2	13,5	12,1	10,9	14,2	16,3
	5	9,7	4,8	1,1	0,0	-0,2	12,4	7,5	3,8	2,7	2,5
	6	29,6	23,7	16,8	12,1	10,4	16,0	10,1	3,2	-1,5	-3,2
	7	30,7	24,8	17,8	12,9	10,9	30,8	24,8	17,8	12,9	11,0
	8	30,9	24,9	17,8	12,8	10,9	30,9	24,9	17,8	12,8	10,9
Sistema C	$\ell=1$	13,9	14,0	12,4	12,4	12,4	25,1	25,2	23,6	23,6	23,6
	2	32,1	32,1	32,6	32,6	32,6	19,8	19,8	20,3	20,3	20,3
	3	17,3	18,5	23,4	23,4	23,4	17,8	19,0	23,8	23,8	23,8
	4	11,0	9,4	8,0	9,7	12,4	13,1	11,5	10,1	11,8	14,5
	5	11,3	5,8	0,3	-0,5	-0,4	14,0	8,5	2,9	2,2	2,3
	6	31,5	25,5	18,5	13,7	11,8	17,9	11,9	4,9	0,1	-1,8
	7	32,6	26,6	19,6	14,6	12,7	32,6	26,6	19,6	14,7	12,7
	8	32,8	26,8	19,7	14,7	12,8	32,8	26,8	19,7	14,7	12,8
Sistema D	$\ell=1$	9,1	10,4	9,2	9,2	9,2	20,3	21,6	20,4	20,4	20,4
	2	25,4	28,4	28,6	28,6	28,6	13,1	16,2	16,3	16,3	16,3
	3	9,5	15,8	19,5	20,0	20,0	10,0	16,2	19,9	20,5	20,5
	4	7,8	4,8	5,6	8,0	9,0	9,9	6,8	7,7	10,1	11,1
	5	9,0	3,3	-2,8	-5,2	-5,0	11,7	6,0	-0,1	-2,5	-2,3
	6	29,3	23,24	16,3	11,4	9,5	15,7	9,7	2,7	-2,2	-4,1
	7	30,4	24,4	17,4	12,4	10,5	30,4	24,4	17,4	12,4	10,5
	8	30,6	24,6	17,5	12,5	10,6	30,6	24,6	17,5	12,5	10,6
Sistema E	$\ell=1$	2,5	2,5	1,8	1,8	1,7	13,7	13,7	13,0	13,0	12,9
	2	17,8	17,8	18,9	18,9	18,9	5,5	5,5	6,6	6,6	6,6
	3	3,3	3,7	8,6	8,6	8,6	3,7	4,2	9,1	9,1	9,1
	4	3,5	-1,8	-6,6	-5,0	-1,6	5,6	0,3	-4,5	-2,9	0,5
	5	5,0	-1,0	-7,8	-12,1	-13,5	7,7	1,7	-5,1	-9,4	-10,8
	6	25,3	19,2	12,2	7,3	5,4	11,7	5,6	-1,4	-6,3	-8,2
	7	26,4	20,4	13,4	8,4	6,5	26,4	20,4	13,4	8,4	6,5
	8	6,6	20,6	13,5	8,5	6,6	26,6	20,6	13,5	8,5	6,6

Tabela 5.11: Margens \mathcal{M}_{99} excedidas com probabilidade 0.99 (azul: $-2 \leq \mathcal{M}_{99} \leq 0$; verde: $-5 \leq \mathcal{M}_{99} < -2$; vermelho: $\mathcal{M}_{99} < -5$); latitude da estação terrena vítima: $\pm 30^\circ$)

Máscaras		Máscara 1					Máscara 2				
Diâmetro [metro]		1,2	2,4	4,5	8	10	1,2	2,4	4,5	8	10
Sistema A	$\ell=1$	9,5	9,6	8,0	8,0	8,1	20,7	20,8	19,2	19,2	19,3
	2	28,1	28,0	28,1	28,1	28,2	15,8	15,8	15,8	15,8	15,9
	3	13,6	18,2	19,6	19,6	19,8	14,1	18,7	20,1	20,1	20,3
	4	6,4	3,9	5,5	9,4	9,6	8,5	6,0	7,6	11,5	11,7
	5	7,0	1,4	-4,5	-5,9	-4,8	9,7	4,1	-1,8	-3,2	-2,2
	6	27,2	21,2	14,2	9,3	8,0	13,6	7,6	0,6	-4,3	-5,6
	7	28,3	22,3	15,3	10,3	9,0	28,4	22,3	15,3	10,4	9,0
	8	28,5	22,5	15,4	10,5	9,0	28,5	22,5	15,4	10,5	9,0
Sistema B	$\ell=1$	15,0	15,0	13,5	13,5	13,5	26,2	26,2	24,7	24,7	24,6
	2	33,7	33,7	34,2	34,2	34,2	21,4	21,4	22,0	22,0	22,0
	3	17,6	19,7	24,5	24,5	24,5	18,0	20,2	25,0	25,0	25,0
	4	11,4	10,0	8,9	12,3	14,3	13,5	12,1	11,0	14,4	16,4
	5	9,7	4,8	1,1	0,0	-0,2	12,4	7,5	3,8	2,7	2,5
	6	29,6	23,7	16,8	12,1	10,5	16,0	10,1	3,2	-1,5	-3,1
	7	30,8	24,8	17,8	12,9	11,0	30,8	24,8	17,8	12,9	11,0
	8	30,9	24,9	17,9	12,9	10,9	30,9	24,9	17,9	12,9	10,9
Sistema C	$\ell=1$	13,9	14,0	12,4	12,4	12,4	25,1	25,2	23,6	23,6	23,6
	2	32,1	32,1	32,6	32,6	32,6	19,9	19,9	20,3	20,3	20,3
	3	17,4	18,6	23,4	23,4	23,4	17,8	19,1	23,9	23,9	23,9
	4	11,0	9,4	8,0	9,9	12,4	13,1	11,5	10,1	12,0	14,5
	5	11,4	5,8	0,3	-0,5	-0,3	14,0	8,5	3,0	2,2	2,3
	6	31,5	25,5	18,5	13,7	11,8	17,9	11,9	4,9	0,1	-1,8
	7	32,6	26,6	19,6	14,7	12,7	32,7	26,6	19,6	14,7	12,8
	8	32,8	26,8	19,8	14,8	12,8	32,8	26,8	19,8	14,8	12,8
Sistema D	$\ell=1$	9,1	10,4	9,2	9,2	9,3	20,3	21,6	20,4	20,4	20,5
	2	25,4	28,4	28,6	28,6	28,6	13,1	16,2	16,3	16,3	16,3
	3	9,7	15,8	19,7	20,0	20,0	10,1	16,3	20,1	20,5	20,5
	4	7,8	4,8	5,6	8,0	9,0	9,9	6,9	7,7	10,1	11,1
	5	9,0	3,3	-2,8	-5,2	-5,0	11,7	6,0	-0,1	-2,5	-2,3
	6	29,3	23,3	16,3	11,4	9,5	15,7	9,8	2,7	-2,2	-4,1
	7	30,5	24,4	17,4	12,5	10,5	30,5	24,5	17,4	12,5	10,5
	8	30,6	24,6	17,6	12,6	10,6	30,6	24,6	17,6	12,6	10,6
Sistema E	$\ell=1$	2,5	2,5	1,8	1,8	1,7	13,7	13,7	13,0	13,0	12,9
	2	17,9	17,9	19,0	19,0	19,0	5,6	5,6	6,7	6,7	6,7
	3	3,4	4,0	8,8	8,8	8,8	3,9	4,5	9,3	9,3	9,3
	4	3,6	-1,7	-6,4	-4,6	-1,5	5,6	0,4	-4,3	-2,5	0,6
	5	5,0	-0,9	-7,7	-12,0	-13,4	7,7	1,8	-5,0	-9,3	-10,7
	6	25,3	19,3	12,3	7,3	5,4	11,7	5,7	-1,3	-6,3	-8,2
	7	26,5	20,5	13,4	8,4	6,5	26,5	20,5	13,5	8,5	6,5
	8	26,6	20,6	13,6	8,6	6,6	26,6	20,6	13,6	8,6	6,6

5.5

Estação terrena receptora vítima localizada na latitude de $\pm 40^\circ$

Nesta seção, considera-se uma estação terrena vítima localizada na latitude $\pm 40^\circ$, sendo determinadas, para cada um dos sistemas de satélites não-GEO apresentados na Tabela 5.1, as funções distribuição de probabilidade das margens $\{\mu_\ell, \ell = 1, \dots, 8\}$ da densidade de fluxo de potência no lance de descida $epfd_\downarrow$, associadas às máscaras obtidas nas seções 4.1 e 4.2. Os resultados obtidos para estações terrenas vítima com antenas receptoras de diâmetros 1,2, 2,4, 4,5, 8 e 10 metros são apresentados nas figuras 5.22, 5.23, 5.24, 5.25 e 5.26, respectivamente. Nestas figuras, a Máscara 1 refere-se à máscara definida na Seção 4.1 e a Máscara 2 à máscara definida na Seção 4.2. Conforme evidenciado pelas tabelas 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5, a Máscara 2 apresentou margens maiores que as da Máscara 1 para $\ell = 1, 4$ e 5 e menores que as da Máscara 1 para $\ell = 2$ e 6 . Para $\ell = 3, 7$ e 8 as margens correspondentes às duas máscaras ficaram bem próximas. Estes fatos estão refletidos nas figuras 5.22 a 5.26.

Observe que, do mesmo modo que nas seções anteriores, de maneira geral, os aumentos no diâmetro da antena receptora vítima implicam num aumento da margem correspondente a $\ell = 4$ e numa diminuição das margens correspondentes a $\ell = 5, 6, 7$ e 8 , enquanto que as margens correspondentes a $\ell = 1, 2$ e 3 praticamente não sofrem variações. Novamente, os resultados obtidos podem ser melhor apreciados nas tabelas 5.12 e 5.13 que mostram os valores de margem \mathcal{M}_{999} e \mathcal{M}_{99} excedidos com probabilidades 0,999 e 0,99, respectivamente.

Também aqui, as duas hipóteses de pior caso identificadas na Seção 5.1 contribuíram para as margens negativas significativas que aparecem, em vermelho, nas tabelas 5.12 e 5.13. Note que, novamente, no sistemas E, onde o número de satélites visíveis pela estação terrena vítima é alto (tipicamente 57 quando a estação terrena vítima está localizada na latitude $\pm 40^\circ$), existe um maior número de margens negativas significativas. Observe que, embora o número de satélites visíveis pela estação terrena vítima do Sistema E tenha aumentado em comparação ao caso da Seção 5.4 onde a estação terrena vítima está localizada na latitude $\pm 30^\circ$, as margens aumentaram ficando menos negativas. Isto se deve ao fato da estação terrena vítima, localizada em alta latitude, estar apontando para a órbita de satélites geoestacionários, fazendo com que as transmissões provenientes dos satélites interferentes (a maioria deles sobre as regiões polares) atinjam a estação terrena vítima pelos lóbulos laterais de sua antena receptora, produzindo interferências muito pequenas.

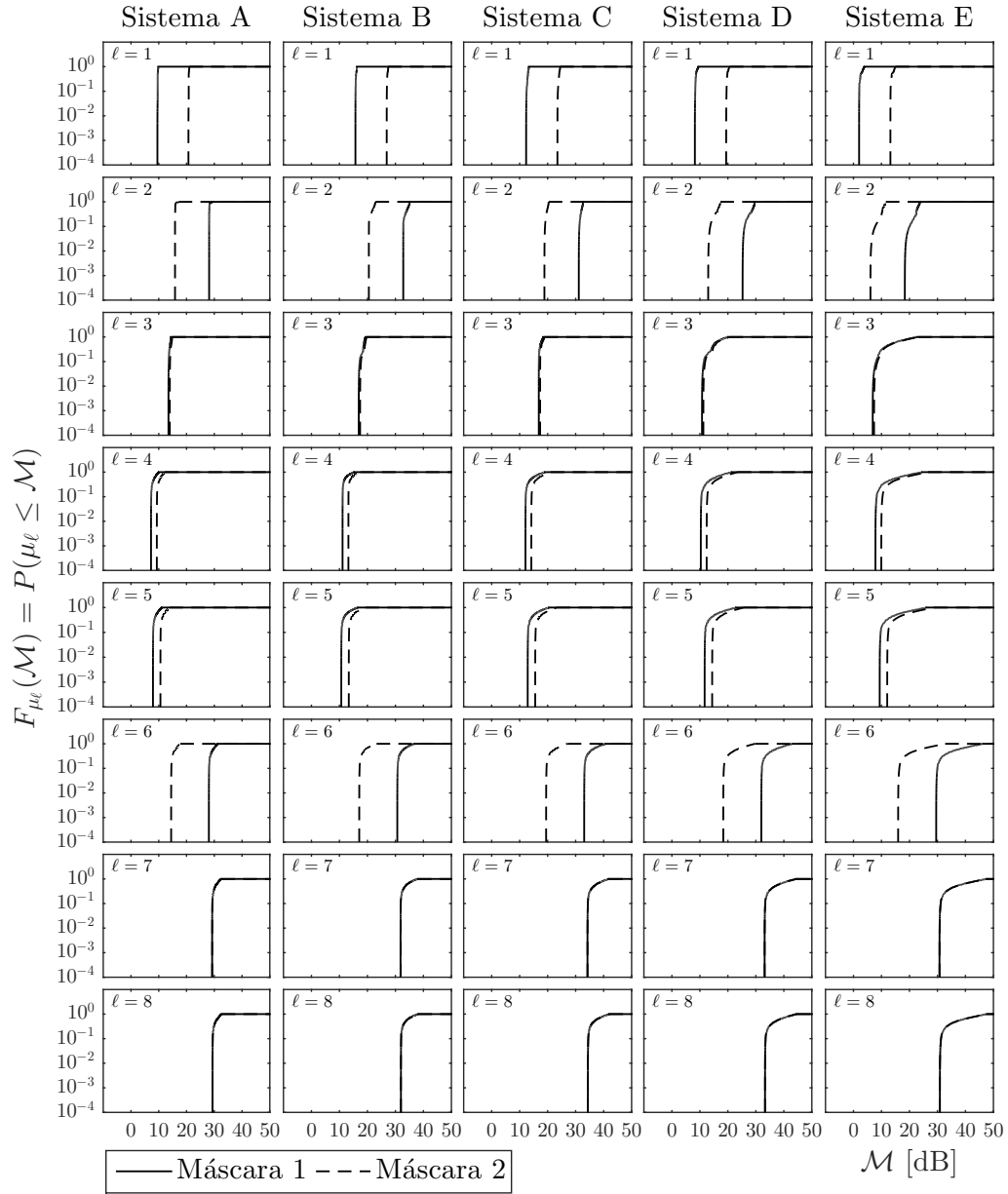


Figura 5.22: Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 1,2 m.

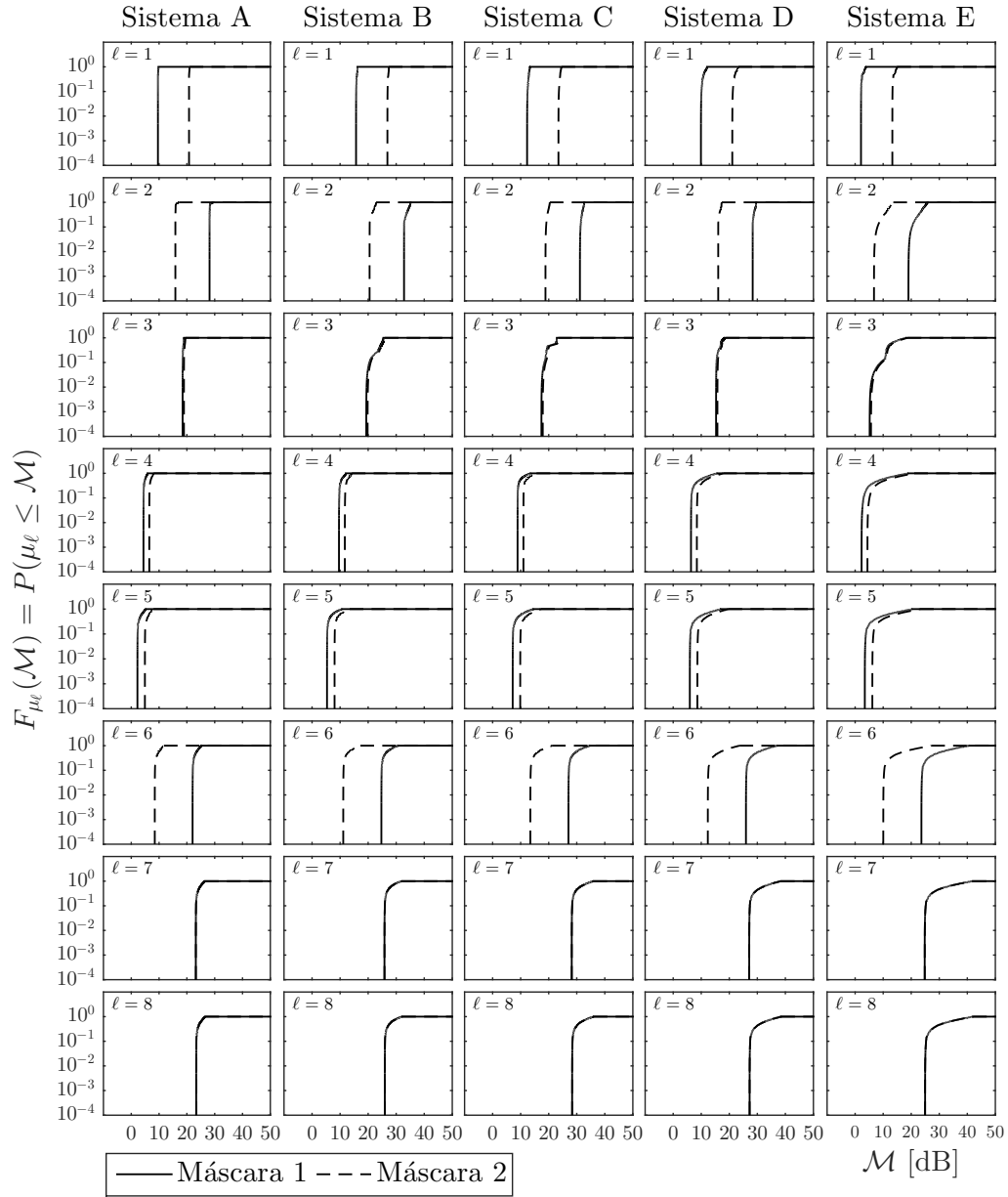


Figura 5.23: Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 2,4 m.

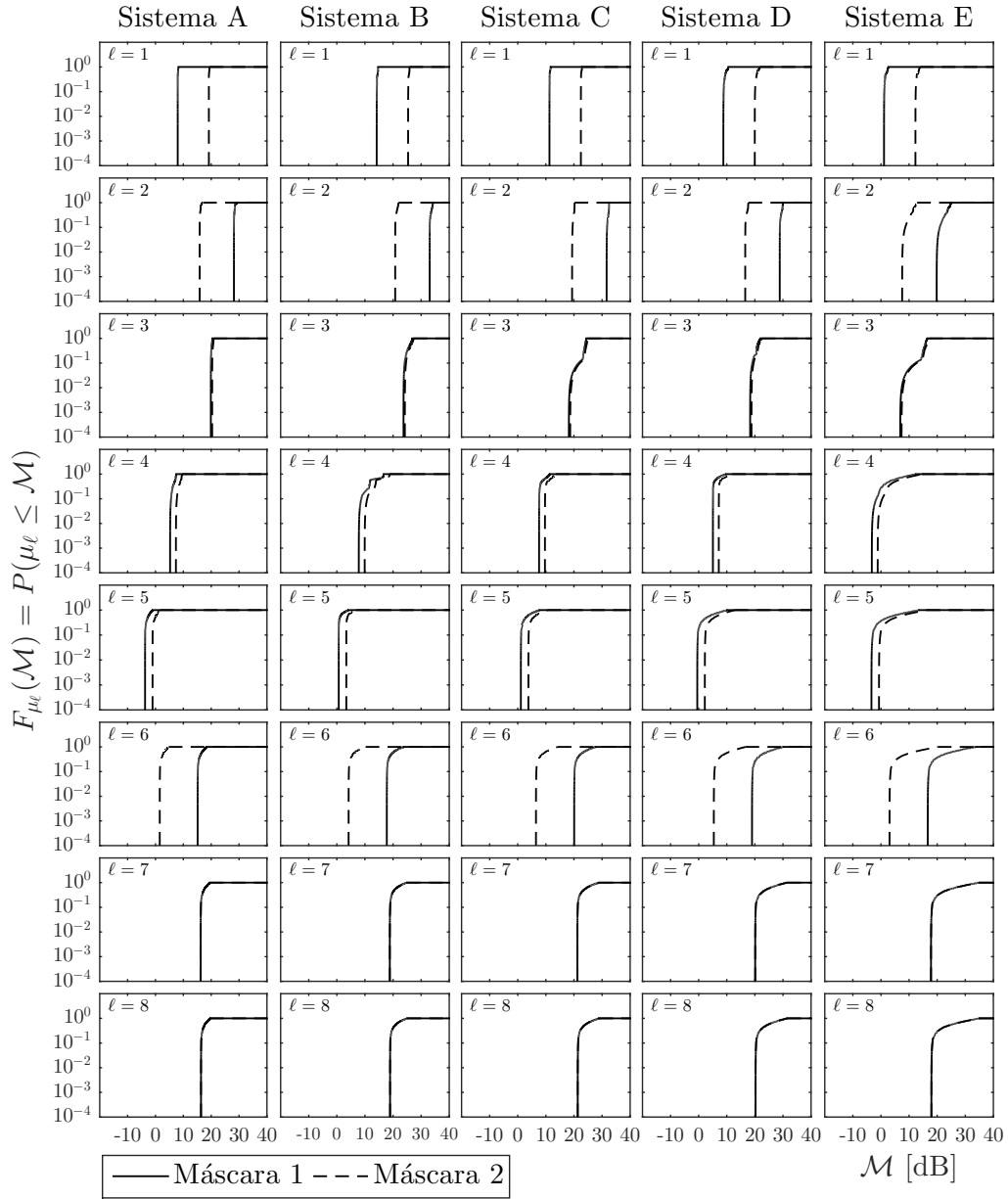


Figura 5.24: Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 4,5 m.

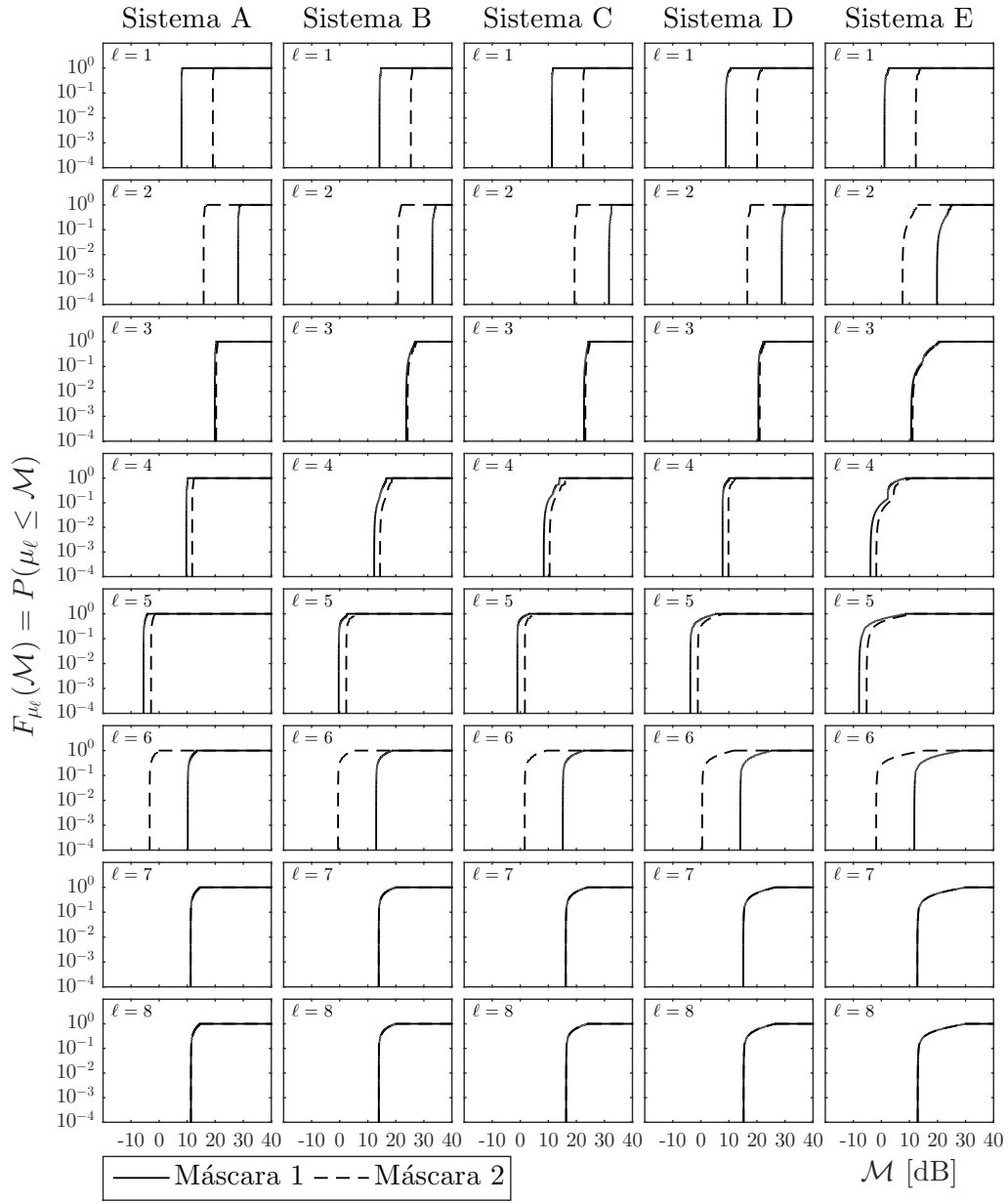


Figura 5.25: Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 8 m.

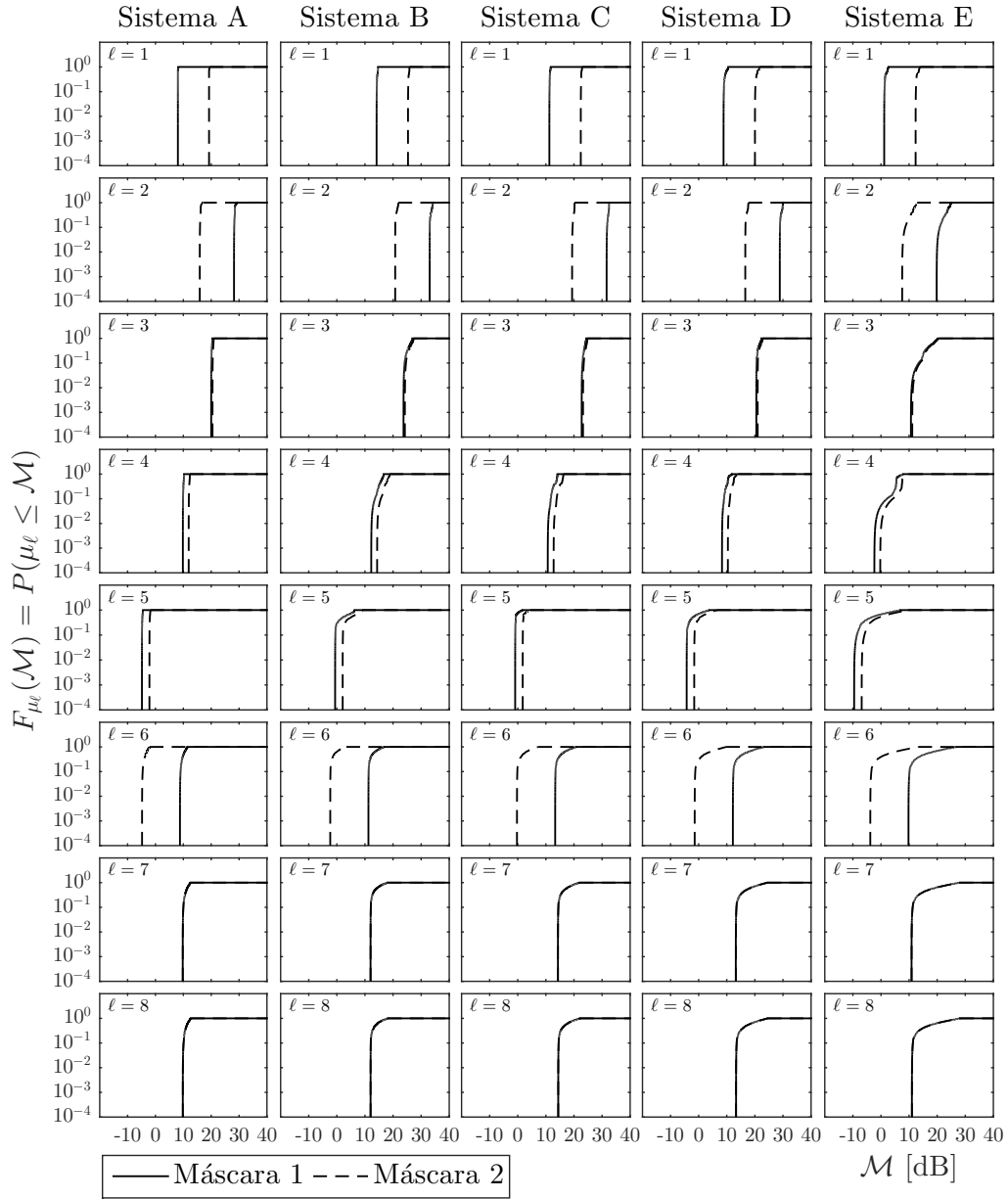


Figura 5.26: Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 10 m.

Tabela 5.12: Margens \mathcal{M}_{999} excedidas com probabilidade 0.999 (azul: $-2 \leq \mathcal{M}_{999} \leq 0$; verde: $-5 \leq \mathcal{M}_{999} < -2$; vermelho: $\mathcal{M}_{999} < -5$); latitude da estação terrena vítima: $\pm 40^\circ$)

Máscaras		Máscara 1					Máscara 2				
Diâmetro [metro]		1,2	2,4	4,5	8	10	1,2	2,4	4,5	8	10
Sistema A	$\ell=1$	9,5	9,6	8,0	8,0	8,0	20,7	20,8	19,2	19,2	19,2
	2	28,1	28,1	28,2	28,2	28,2	15,9	15,9	15,9	15,9	15,9
	3	13,5	18,5	19,9	19,9	20,0	14,0	18,9	20,3	20,3	20,5
	4	7,2	4,4	5,3	9,7	9,8	9,3	6,5	7,3	11,8	11,9
	5	7,9	2,2	-3,7	-5,6	-4,9	10,6	4,9	-1,0	-2,9	-2,2
	6	28,1	22,1	15,1	10,2	8,8	14,5	8,5	1,5	-3,4	-4,8
	7	29,2	23,2	16,2	11,2	9,8	29,2	23,2	16,2	11,3	9,8
	8	29,4	23,4	16,3	11,3	9,8	29,4	23,4	16,3	11,3	9,8
Sistema B	$\ell=1$	15,7	15,7	14,2	14,2	14,1	26,9	26,9	25,4	25,4	25,3
	2	32,8	32,8	33,1	33,1	33,1	20,5	20,5	20,8	20,8	20,8
	3	16,9	19,3	23,7	23,7	23,7	17,4	19,8	24,2	24,2	24,2
	4	11,1	9,6	7,8	12,3	12,3	13,2	11,7	9,9	14,4	14,3
	5	10,7	5,3	0,7	-0,4	-0,6	13,3	8,0	3,4	2,3	2,1
	6	30,7	24,7	17,8	13,0	11,2	17,1	11,1	4,2	-0,6	-2,3
	7	31,8	25,8	18,8	13,9	12,0	31,8	25,8	18,9	13,9	12,0
	8	32,0	26,0	18,9	13,9	12,0	32,0	26,0	18,9	13,9	12,0
Sistema C	$\ell=1$	12,3	12,3	11,3	11,3	11,2	23,5	23,5	22,5	22,5	22,4
	2	31,1	31,1	31,6	31,6	31,6	18,8	18,8	19,3	19,3	19,3
	3	16,8	17,4	18,2	22,7	22,8	17,3	17,9	18,7	23,2	23,2
	4	12,1	8,9	7,6	8,4	10,7	14,2	11,0	9,7	10,5	12,8
	5	12,9	7,2	1,1	-1,0	-0,9	15,6	9,8	3,8	1,7	1,8
	6	33,1	27,0	20,1	15,2	13,3	19,5	13,5	6,5	1,6	-0,3
	7	34,2	28,2	21,2	16,2	14,3	34,2	28,2	21,2	16,2	14,3
	8	34,4	28,4	21,3	16,3	14,4	34,4	28,4	21,3	16,3	14,4
Sistema D	$\ell=1$	8,2	9,9	8,8	8,9	8,8	19,4	21,1	20,0	20,1	20,0
	2	25,3	28,3	28,9	28,9	28,9	13,0	16,1	16,6	16,6	16,6
	3	10,8	15,3	18,3	20,5	20,5	11,2	15,8	18,8	21,0	21,0
	4	10,3	6,3	5,1	7,8	8,3	12,4	8,4	7,2	9,8	10,4
	5	11,7	5,9	-0,5	-3,8	-4,3	14,4	8,6	2,2	-1,1	-1,6
	6	32,0	25,9	19,0	14,1	12,2	18,4	12,4	5,4	0,5	-1,4
	7	33,1	27,1	20,1	15,1	13,2	33,1	27,1	20,1	15,1	13,2
	8	33,3	27,3	20,2	15,2	13,3	33,3	27,3	20,2	15,2	13,3
Sistema E	$\ell=1$	2,0	2,1	1,1	1,1	1,1	13,2	13,3	12,3	12,3	12,3
	2	18,4	19,0	19,8	19,8	19,8	6,1	6,7	7,5	7,5	7,5
	3	6,9	5,2	6,9	10,7	10,7	7,4	5,7	7,4	11,1	11,2
	4	7,8	2,3	-3,2	-3,9	-2,3	9,9	4,4	-1,2	-1,8	-0,2
	5	9,4	3,5	-3,4	-8,0	-9,5	12,1	6,1	-0,7	-5,3	-6,9
	6	29,6	23,6	16,7	11,7	9,8	16,0	10,0	3,1	-1,9	-3,8
	7	30,7	24,8	17,8	12,8	10,9	30,7	24,8	17,8	12,8	10,9
	8	30,9	25,0	17,9	12,9	11,0	30,9	25,0	17,9	12,9	11,0

Tabela 5.13: Margens \mathcal{M}_{99} excedidas com probabilidade 0.99 (azul: $-2 \leq \mathcal{M}_{99} \leq 0$; verde: $-5 \leq \mathcal{M}_{99} < -2$; vermelho: $\mathcal{M}_{99} < -5$); latitude da estação terrena vítima: $\pm 40^\circ$)

Máscaras		Máscara 1					Máscara 2				
Diâmetro [metro]		1,2	2,4	4,5	8	10	1,2	2,4	4,5	8	10
Sistema A	$\ell=1$	9,5	9,6	8,0	8,0	8,0	20,7	20,8	19,2	19,2	19,2
	2	28,1	28,1	28,2	28,2	28,2	15,9	15,9	15,9	15,9	15,9
	3	13,5	18,5	19,9	19,9	20,0	14,0	18,9	20,3	20,3	20,5
	4	7,2	4,4	5,3	9,7	9,8	9,3	6,5	7,4	11,8	11,9
	5	7,9	2,2	-3,7	-5,6	-4,9	10,6	4,9	-1,0	-2,9	-2,2
	6	28,1	22,1	15,1	10,2	8,8	14,5	8,5	1,5	-3,4	-4,8
	7	29,2	23,2	16,2	11,2	9,8	29,3	23,2	16,2	11,3	9,8
	8	29,4	23,4	16,3	11,4	9,8	29,4	23,4	16,3	11,4	9,8
Sistema B	$\ell=1$	15,7	15,7	14,2	14,2	14,2	26,9	26,9	25,4	25,4	25,3
	2	32,8	32,8	33,1	33,1	33,1	20,5	20,5	20,8	20,8	20,8
	3	16,9	19,4	23,8	23,8	23,8	17,4	19,9	24,2	24,2	24,2
	4	11,1	9,6	7,9	12,4	12,4	13,2	11,7	10,0	14,5	14,5
	5	10,7	5,3	0,7	-0,3	-0,6	13,4	8,0	3,4	2,3	2,1
	6	30,7	24,7	17,8	13,0	11,3	17,1	11,1	4,2	-0,6	-2,3
	7	31,8	25,8	18,9	13,9	12,0	31,9	25,8	18,9	13,9	12,0
	8	32,0	26,0	18,9	14,0	12,0	32,0	26,0	18,9	14,0	12,0
Sistema C	$\ell=1$	12,3	12,3	11,3	11,3	11,3	23,5	23,5	22,5	22,5	22,4
	2	31,2	31,1	31,6	31,6	31,6	18,9	18,9	19,4	19,4	19,4
	3	16,8	17,5	18,5	22,8	22,8	17,3	18,0	19,0	23,2	23,3
	4	12,1	8,9	7,6	8,5	10,8	14,2	11,0	9,7	10,6	12,9
	5	12,9	7,2	1,1	-1,0	-0,9	15,6	9,9	3,8	1,7	1,8
	6	33,1	27,1	20,1	15,2	13,3	19,5	13,5	6,5	1,6	-0,3
	7	34,2	28,2	21,2	16,2	14,3	34,3	28,2	21,2	16,3	14,3
	8	34,4	28,4	21,4	16,4	14,4	34,4	28,4	21,4	16,4	14,4
Sistema D	$\ell=1$	8,2	9,9	8,8	8,9	8,9	19,4	21,1	20,0	20,1	20,0
	2	25,4	28,3	28,9	28,9	28,9	13,1	16,1	16,6	16,6	16,6
	3	10,8	15,3	18,4	20,5	20,5	11,3	15,8	18,9	21,0	21,0
	4	10,4	6,4	5,1	7,8	8,4	12,4	8,5	7,2	9,8	10,5
	5	11,7	6,0	-0,5	-3,7	-4,3	14,4	8,6	2,2	-1,1	-1,6
	6	32,0	26,0	19,0	14,1	12,2	18,4	12,4	5,4	0,5	-1,4
	7	33,1	27,1	20,1	15,2	13,2	33,2	27,1	20,1	15,2	13,2
	8	33,3	27,3	20,3	15,3	13,3	33,3	27,3	20,3	15,3	13,3
Sistema E	$\ell=1$	2,0	2,1	1,1	1,1	1,2	13,2	13,3	12,3	12,3	12,3
	2	18,5	19,1	19,9	19,9	19,9	6,2	6,8	7,6	7,6	7,6
	3	7,0	5,6	7,4	10,9	10,9	7,5	6,0	7,9	11,4	11,4
	4	7,9	2,4	-3,1	-3,5	-1,9	10,0	4,5	-1,0	-1,4	0,2
	5	9,4	3,5	-3,3	-7,9	-9,5	12,1	6,2	-0,7	-5,2	-6,8
	6	29,6	23,7	16,7	11,8	9,8	16,0	10,1	3,1	-1,8	-3,8
	7	30,8	24,8	17,8	12,9	10,9	30,8	24,9	17,9	12,9	10,9
	8	30,9	25,0	18,0	13,0	11,0	30,9	25,0	18,0	13,0	11,0

5.6

Estação terrena receptora vítima localizada na latitude de $\pm 50^\circ$

Nesta seção, considera-se uma estação terrena vítima localizada na latitude $\pm 50^\circ$, sendo determinadas, para cada um dos sistemas de satélites não-GEO apresentados na Tabela 5.1, as funções distribuição de probabilidade das margens $\{\mu_\ell, \ell = 1, \dots, 8\}$ da densidade de fluxo de potência no lance de descida $epfd_\downarrow$, associadas às máscaras obtidas nas seções 4.1 e 4.2. Os resultados obtidos para estações terrenas vítima com antenas receptoras de diâmetros 1,2, 2,4, 4,5, 8 e 10 metros são apresentados nas figuras 5.27, 5.28, 5.29, 5.30 e 5.31, respectivamente. Nestas figuras, a Máscara 1 refere-se à máscara definida na Seção 4.1 e a Máscara 2 à máscara definida na Seção 4.2. Conforme evidenciado pelas tabelas 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5, a Máscara 2 apresentou margens maiores que as da Máscara 1 para $\ell = 1, 4$ e 5 e menores que as da Máscara 1 para $\ell = 2$ e 6 . Para $\ell = 3, 7$ e 8 as margens correspondentes às duas máscaras ficaram bem próximas. Estes fatos estão refletidos nas figuras 5.27 a 5.31.

Observe que, do mesmo modo que nas Seções anteriores, de maneira geral, os aumentos no diâmetro da antena receptora vítima implicam num aumento da margem correspondente a $\ell = 4$ e numa diminuição das margens correspondentes a $\ell = 5, 6, 7$ e 8 , enquanto que as margens correspondentes a $\ell = 1, 2$ e 3 praticamente não sofrem variações. Novamente, os resultados obtidos podem ser melhor apreciados nas tabelas 5.14 e 5.15 que mostram os valores de margem \mathcal{M}_{999} e \mathcal{M}_{99} excedidos com probabilidades 0,999 e 0,99, respectivamente.

Também aqui, as duas hipóteses de pior caso identificadas na Seção 5.1 contribuíram para as margens negativas significativas que aparecem, em vermelho, nas tabelas 5.14 e 5.15. Note que, novamente, o número de satélites visíveis pela estação terrena vítima, nos sistemas D e E é alto (tipicamente 35 no Sistema D e 71 no Sistema E quando a estação terrena vítima está localizada na latitude $\pm 50^\circ$). Observe que, novamente, embora o número de satélites visíveis pela estação terrena vítima do Sistema E tenha aumentado em comparação ao caso da Seção 5.5 onde a estação terrena vítima está localizada na latitude $\pm 40^\circ$, as margens aumentaram ficando menos negativas. Conforme já ressaltado, isto se deve ao fato da estação terrena vítima, localizada em alta latitude, estar apontando para a órbita de satélites geoestacionários, fazendo com que as transmissões provenientes dos satélites interferentes (a maioria deles sobre as regiões polares) atinjam a estação terrena vítima pelos lóbulos laterais de sua antena receptora, produzindo interferências muito pequenas.

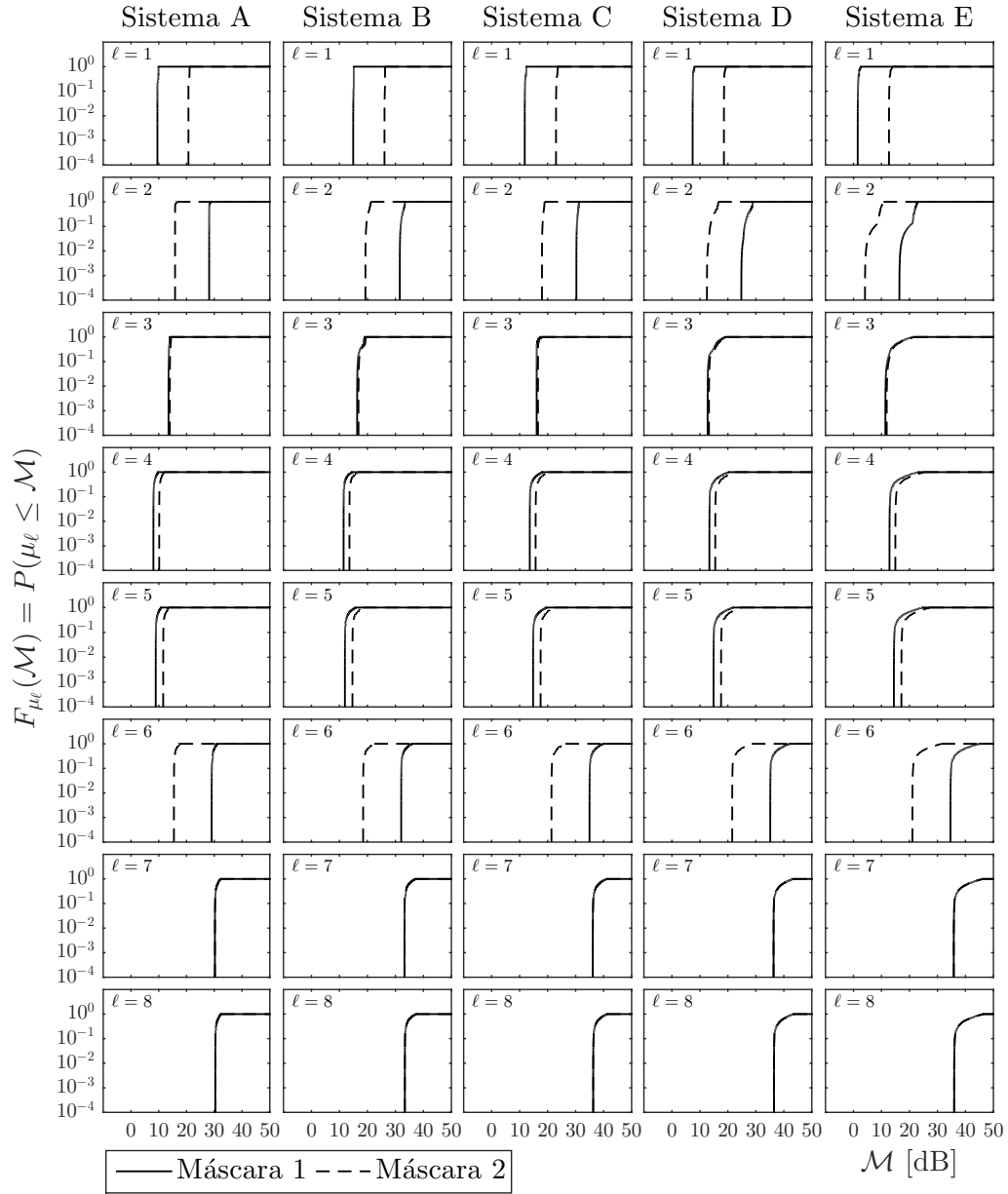


Figura 5.27: Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 1,2 m.

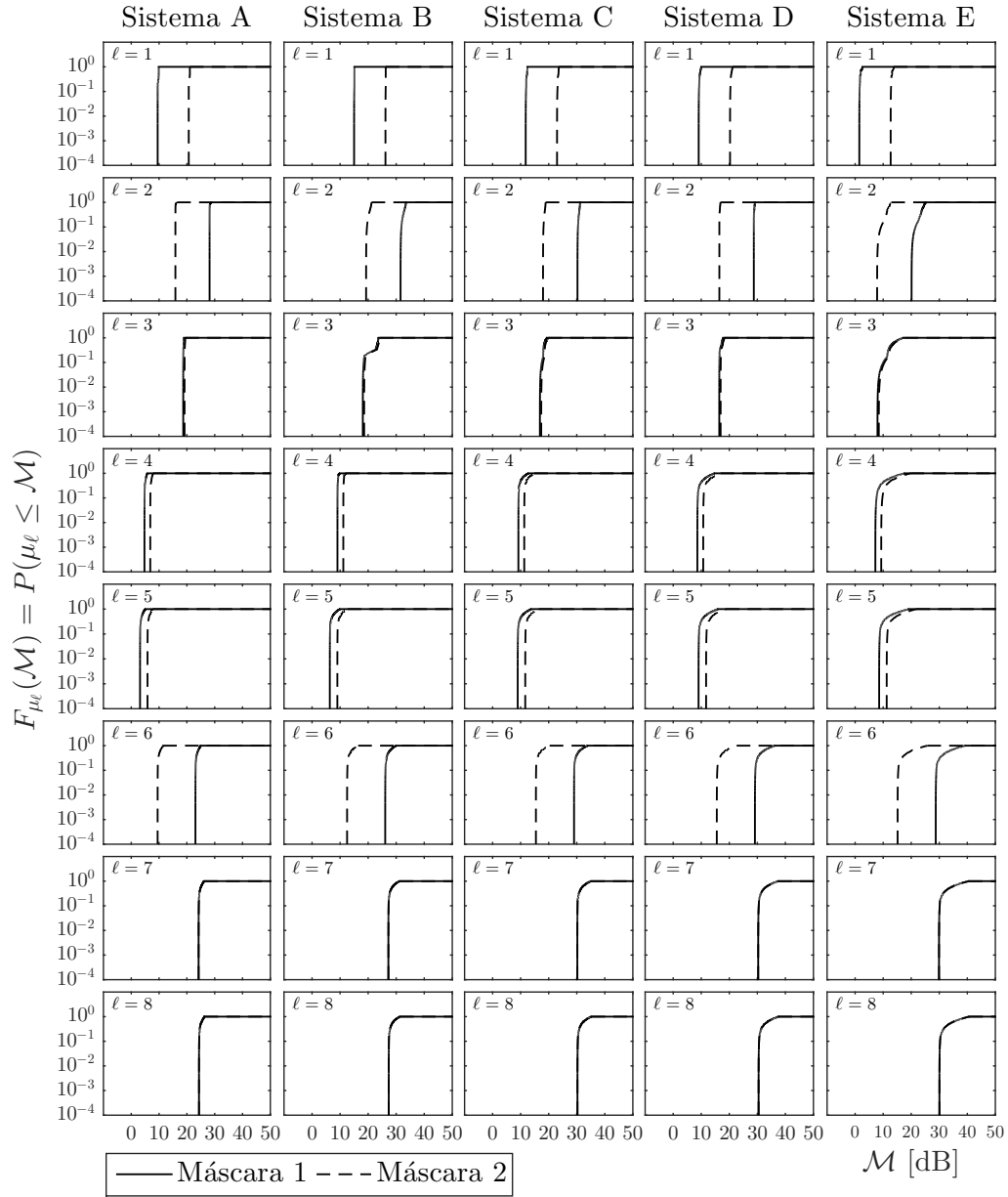


Figura 5.28: Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 2,4 m.

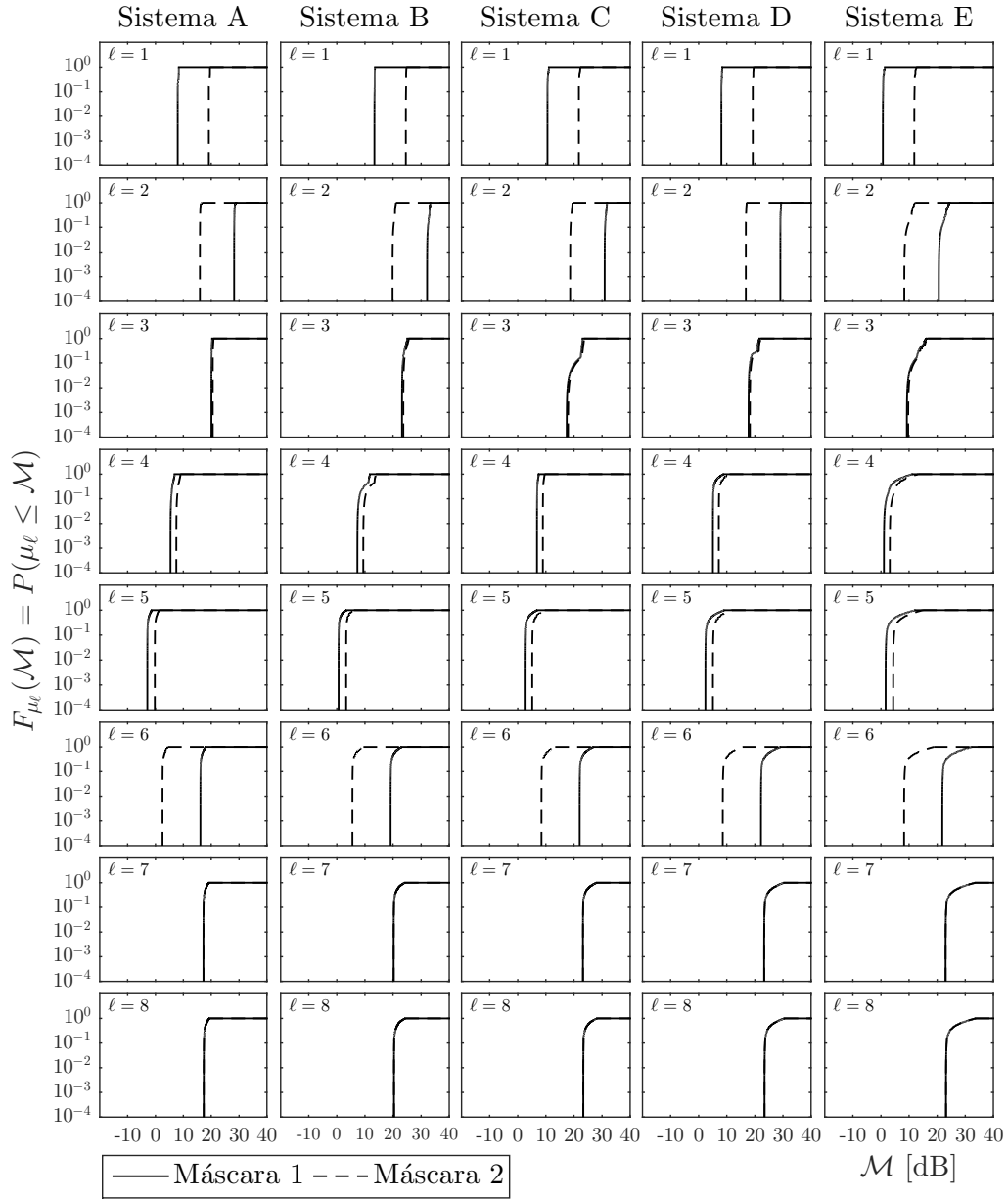


Figura 5.29: Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 4,5 m.

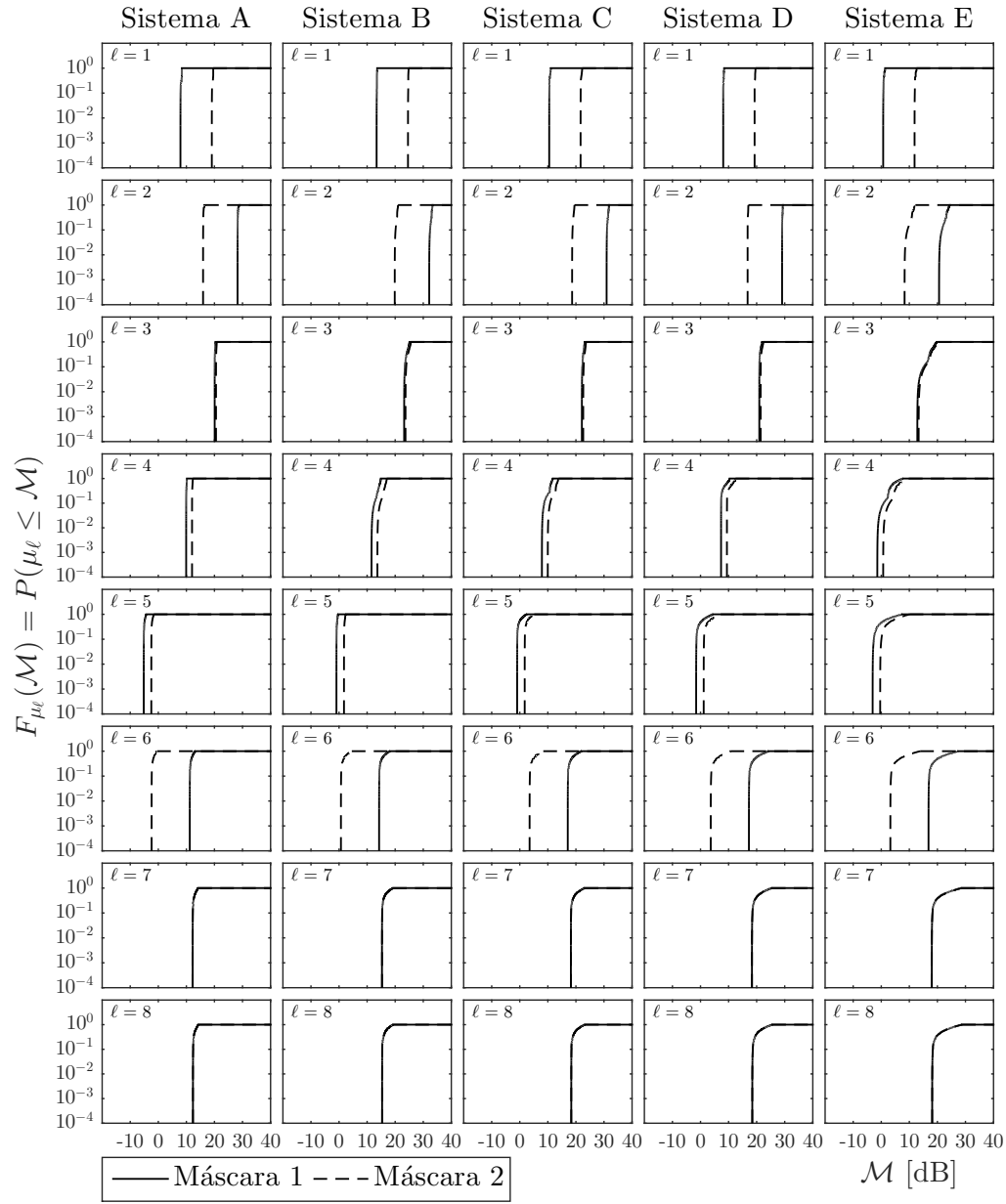


Figura 5.30: Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 8 m.

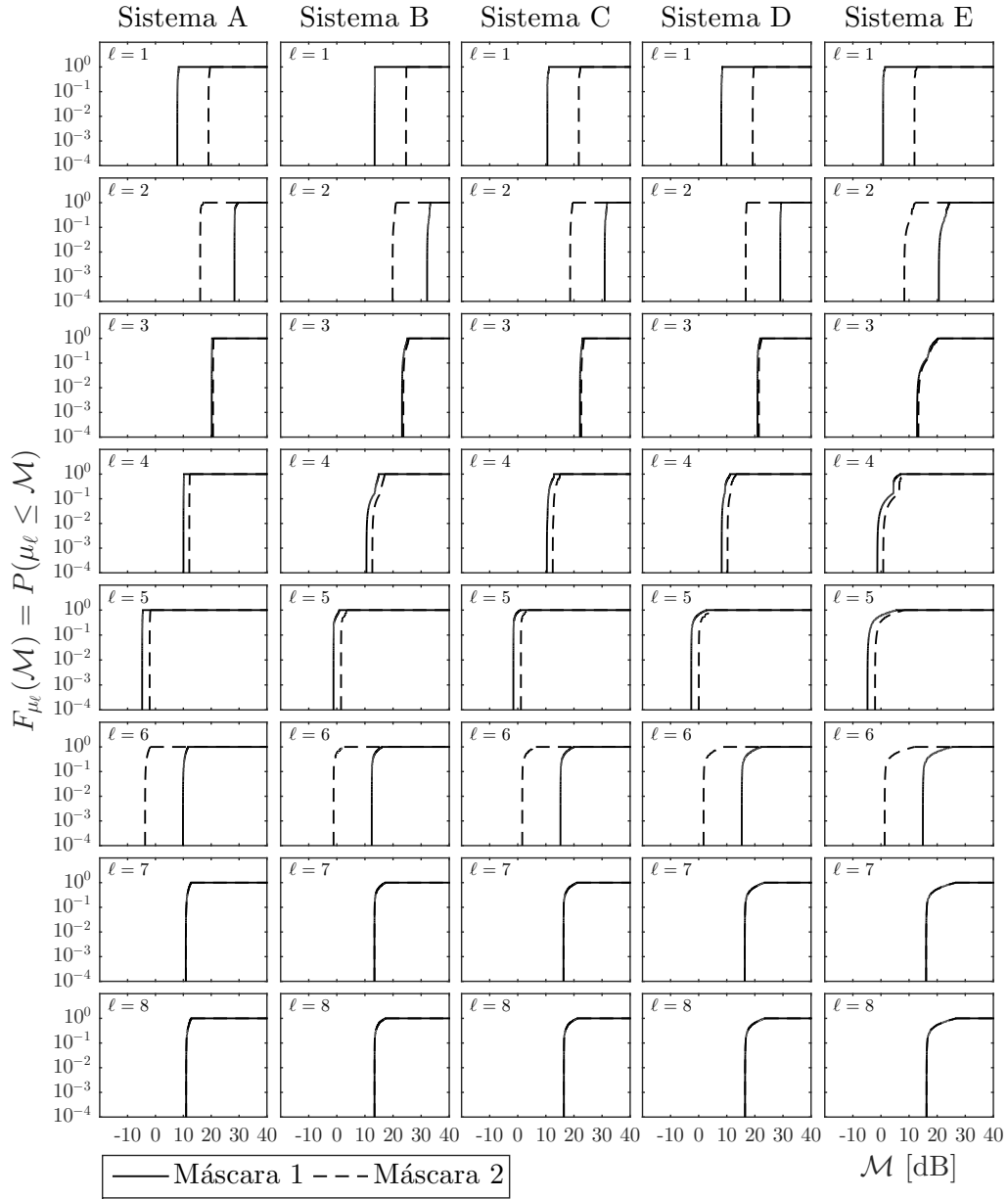


Figura 5.31: Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 10 m.

Tabela 5.14: Margens \mathcal{M}_{999} excedidas com probabilidade 0.999 (azul: $-2 \leq \mathcal{M}_{999} \leq 0$; verde: $-5 \leq \mathcal{M}_{999} < -2$; vermelho: $\mathcal{M}_{999} < -5$); latitude da estação terrena vítima: $\pm 50^\circ$)

Máscaras		Máscara 1					Máscara 2				
Diâmetro [metro]		1,2	2,4	4,5	8	10	1,2	2,4	4,5	8	10
Sistema A	$\ell=1$	9,5	9,5	8,0	7,9	7,8	20,7	20,7	19,2	19,1	19,0
	2	28,2	28,2	28,2	28,2	28,3	15,9	15,9	15,9	15,9	16,1
	3	13,5	18,7	20,1	20,1	20,2	14,0	19,2	20,6	20,6	20,7
	4	8,1	4,7	5,4	9,9	10,0	10,2	6,8	7,5	12,0	12,1
	5	8,9	3,2	-2,9	-5,2	-4,8	11,6	5,8	-0,2	-2,5	-2,1
	6	29,1	23,1	16,1	11,2	9,9	15,5	9,5	2,5	-2,4	-3,7
	7	30,2	24,2	17,2	12,2	10,9	30,2	24,2	17,2	12,3	10,9
	8	30,4	24,4	17,3	12,3	11,0	30,4	24,4	17,3	12,3	11,0
Sistema B	$\ell=1$	14,9	15,0	13,4	13,4	13,4	26,1	26,2	24,6	24,6	24,6
	2	31,6	31,6	32,1	32,1	32,1	19,3	19,3	19,8	19,8	19,8
	3	16,3	18,1	23,2	23,2	23,2	16,8	18,6	23,7	23,7	23,7
	4	11,5	9,1	7,3	11,6	10,5	13,6	11,1	9,4	13,7	12,6
	5	12,0	6,3	0,6	-0,9	-1,2	14,6	9,0	3,3	1,8	1,5
	6	32,1	26,1	19,1	14,3	12,4	18,5	12,5	5,6	0,7	-1,2
	7	33,2	27,2	20,2	15,3	13,4	33,2	27,2	20,2	15,3	13,4
	8	33,4	27,4	20,3	15,3	13,4	33,4	27,4	20,3	15,3	13,4
Sistema C	$\ell=1$	11,8	11,8	10,6	10,5	10,5	23,0	23,0	21,8	21,7	21,7
	2	30,3	30,3	30,9	30,9	30,9	18,0	18,0	18,6	18,6	18,6
	3	16,1	16,9	17,5	22,1	22,1	16,6	17,3	17,9	22,6	22,6
	4	13,6	9,2	6,8	7,9	10,4	15,7	11,3	8,9	10,0	12,5
	5	14,8	8,9	2,5	-0,9	-1,6	17,5	11,6	5,2	1,8	1,1
	6	35,0	29,0	22,0	17,1	15,2	21,4	15,4	8,4	3,5	1,6
	7	36,1	30,2	23,2	18,2	16,3	36,1	30,2	23,2	18,2	16,3
	8	36,3	30,3	23,3	18,3	16,4	36,3	30,3	23,3	18,3	16,4
Sistema D	$\ell=1$	7,4	9,1	8,1	8,1	8,0	18,6	20,3	19,3	19,3	19,2
	2	24,8	28,8	29,1	29,1	29,0	12,5	16,5	16,8	16,8	16,8
	3	12,8	16,4	17,8	20,9	20,9	13,2	16,9	18,3	21,4	21,4
	4	13,4	8,6	5,1	7,3	8,2	15,5	10,7	7,2	9,4	10,3
	5	14,9	9,0	2,4	-1,6	-2,6	17,6	11,7	5,1	1,1	0,0
	6	35,2	29,1	22,2	17,2	15,3	21,6	15,5	8,6	3,6	1,7
	7	36,3	30,3	23,3	18,3	16,4	36,3	30,3	23,3	18,3	16,4
	8	36,5	30,5	23,4	18,4	16,5	36,5	30,5	23,4	18,4	16,5
Sistema E	$\ell=1$	1,5	1,5	0,7	0,7	0,7	12,7	12,7	11,9	11,9	11,9
	2	16,4	20,1	20,6	20,6	20,6	4,1	7,9	8,3	8,3	8,3
	3	11,4	8,0	9,2	12,9	12,9	11,9	8,5	9,7	13,3	13,3
	4	12,9	7,2	1,1	-1,4	-1,3	15,0	9,3	3,2	0,7	0,8
	5	14,4	8,6	1,7	-3,1	-4,8	17,1	11,3	4,4	-0,4	-2,1
	6	34,7	28,7	21,8	16,8	14,9	21,1	15,2	8,2	3,2	1,3
	7	35,8	29,9	23,0	18,0	16,1	35,8	29,9	23,0	18,0	16,1
	8	36,0	30,1	23,1	18,1	16,2	36,0	30,1	23,1	18,1	16,2

Tabela 5.15: Margens \mathcal{M}_{99} excedidas com probabilidade 0.99 (azul: $-2 \leq \mathcal{M}_{99} \leq 0$; verde: $-5 \leq \mathcal{M}_{99} < -2$; vermelho: $\mathcal{M}_{99} < -5$); latitude da estação terrena vítima: $\pm 50^\circ$)

Máscaras		Máscara 1					Máscara 2				
Diâmetro [metro]		1,2	2,4	4,5	8	10	1,2	2,4	4,5	8	10
Sistema A	$\ell=1$	9,5	9,5	8,0	7,9	7,9	20,7	20,7	19,2	19,1	19,0
	2	28,2	28,2	28,2	28,2	28,3	15,9	15,9	16,0	16,0	16,1
	3	13,5	18,7	20,1	20,1	20,2	14,0	19,2	20,6	20,6	20,7
	4	8,1	4,7	5,4	9,9	10,0	10,2	6,8	7,5	12,0	12,1
	5	8,9	3,2	-2,9	-5,2	-4,8	11,6	5,9	-0,2	-2,5	-2,1
	6	29,1	23,1	16,1	11,2	9,9	15,5	9,5	2,5	-2,4	-3,7
	7	30,2	24,2	17,2	12,2	10,9	30,2	24,2	17,2	12,3	10,9
	8	30,4	24,4	17,3	12,4	11,0	30,4	24,4	17,3	12,4	11,0
Sistema B	$\ell=1$	14,9	15,0	13,4	13,4	13,5	26,1	26,2	24,6	24,6	24,6
	2	31,6	31,6	32,2	32,2	32,2	19,3	19,3	19,9	19,9	19,9
	3	16,4	18,1	23,2	23,2	23,2	16,8	18,6	23,7	23,7	23,7
	4	11,5	9,1	7,4	11,7	10,7	13,6	11,1	9,5	13,8	12,8
	5	12,0	6,3	0,6	-0,9	-1,2	14,7	9,0	3,3	1,8	1,5
	6	32,1	26,1	19,2	14,3	12,4	18,5	12,5	5,6	0,7	-1,2
	7	33,2	27,2	20,2	15,3	13,4	33,3	27,2	20,2	15,3	13,4
	8	33,4	27,4	20,3	15,4	13,4	33,4	27,4	20,3	15,4	13,4
Sistema C	$\ell=1$	11,8	11,8	10,6	10,5	10,5	23,0	23,0	21,8	21,7	21,7
	2	30,3	30,3	30,9	30,9	30,9	18,0	18,0	18,7	18,7	18,7
	3	16,1	16,9	17,7	22,1	22,2	16,6	17,4	18,2	22,6	22,6
	4	13,6	9,2	6,9	8,0	10,5	15,7	11,3	8,9	10,1	12,6
	5	14,8	9,0	2,5	-0,9	-1,6	17,5	11,6	5,2	1,8	1,1
	6	35,0	29,0	22,1	17,1	15,2	21,4	15,4	8,5	3,5	1,6
	7	36,1	30,2	23,2	18,2	16,3	36,2	30,2	23,2	18,2	16,3
	8	36,3	30,3	23,3	18,4	16,4	36,3	30,3	23,3	18,4	16,4
Sistema D	$\ell=1$	7,4	9,1	8,1	8,1	8,1	18,6	20,3	19,3	19,3	19,2
	2	25,0	28,8	29,1	29,1	29,0	12,8	16,5	16,8	16,8	16,8
	3	12,8	16,4	17,8	20,9	20,9	13,3	16,9	18,3	21,4	21,4
	4	13,4	8,6	5,1	7,3	8,2	15,5	10,7	7,2	9,4	10,3
	5	14,9	9,1	2,4	-1,5	-2,6	17,6	11,7	5,1	1,1	0,1
	6	35,2	29,2	22,2	17,3	15,3	21,6	15,6	8,6	3,7	1,8
	7	36,3	30,3	23,3	18,3	16,4	36,4	30,3	23,3	18,4	16,4
	8	36,5	30,5	23,5	18,5	16,5	36,5	30,5	23,5	18,5	16,5
Sistema E	$\ell=1$	1,5	1,5	0,7	0,7	0,7	12,7	12,7	11,9	11,9	11,9
	2	16,7	20,3	20,7	20,7	20,7	4,5	8,0	8,4	8,4	8,4
	3	11,5	8,2	9,4	13,1	13,1	11,9	8,6	9,9	13,5	13,5
	4	12,9	7,3	1,1	-1,2	-1,0	15,0	9,3	3,2	0,9	1,1
	5	14,5	8,6	1,7	-3,0	-4,7	17,1	11,3	4,4	-0,3	-2,1
	6	34,7	28,8	21,8	16,9	14,9	21,1	15,2	8,3	3,3	1,3
	7	35,9	29,9	23,0	18,0	16,1	35,9	29,9	23,0	18,0	16,1
	8	36,0	30,1	23,2	18,2	16,2	36,0	30,1	23,2	18,2	16,2

5.7

Estação terrena receptora vítima localizada na latitude de $\pm 60^\circ$

Nesta seção, considera-se uma estação terrena vítima localizada na latitude $\pm 60^\circ$, sendo determinadas, para cada um dos sistemas de satélites não-GEO apresentados na Tabela 5.1, as funções distribuição de probabilidade das margens $\{\mu_\ell, \ell = 1, \dots, 8\}$ da densidade de fluxo de potência no lance de descida $epfd_\downarrow$, associadas às máscaras obtidas nas seções 4.1 e 4.2. Os resultados obtidos para estações terrenas vítima com antenas receptoras de diâmetros 1,2, 2,4, 4,5, 8 e 10 metros são apresentados nas figuras 5.32, 5.33, 5.34, 5.35 e 5.36, respectivamente. Nestas figuras, a Máscara 1 refere-se à máscara definida na Seção 4.1 e a Máscara 2 à máscara definida na Seção 4.2. Conforme evidenciado pelas tabelas 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5, a Máscara 2 apresentou margens maiores que as da Máscara 1 para $\ell = 1, 4$ e 5 e menores que as da Máscara 1 para $\ell = 2$ e 6 . Para $\ell = 3, 7$ e 8 as margens correspondentes às duas máscaras ficaram bem próximas. Estes fatos estão refletidos nas figuras 5.31 a 5.36.

Observe que, do mesmo modo que nas Seções anteriores, de maneira geral, os aumentos no diâmetro da antena receptora vítima implicam num aumento da margem correspondente a $\ell = 4$ e numa diminuição das margens correspondentes a $\ell = 5, 6, 7$ e 8 , enquanto que as margens correspondentes a $\ell = 1, 2$ e 3 praticamente não sofrem variações. Novamente, os resultados obtidos podem ser melhor apreciados nas tabelas 5.16 e 5.17 que mostram os valores de margem \mathcal{M}_{999} e \mathcal{M}_{99} excedidos com probabilidades 0,999 e 0,99, respectivamente.

Também aqui, as duas hipóteses de pior caso identificadas na Seção 5.1 contribuíram para as margens negativas significativas que aparecem, em vermelho, nas tabelas 5.16 e 5.17. Note que, novamente, o número de satélites visíveis pela estação terrena vítima, nos sistemas D e E é alto (tipicamente 51 no Sistema D e 102 no Sistema E quando a estação terrena vítima está localizada na latitude $\pm 60^\circ$). Mais uma vez, observe que embora o número de satélites visíveis pela estação terrena vítima do Sistema E tenha aumentado em comparação ao caso da Seção 5.6 onde a estação terrena vítima está localizada na latitude $\pm 50^\circ$, as margens aumentaram ficando menos negativas. Conforme já ressaltado, isto se deve ao fato da estação terrena vítima, localizada em alta latitude, estar apontando para a órbita de satélites geoestacionários, fazendo com que as transmissões provenientes dos satélites interferentes (a maioria deles sobre as regiões polares) atinjam a estação terrena vítima pelos lóbulos laterais de sua antena receptora, produzindo interferências muito pequenas.

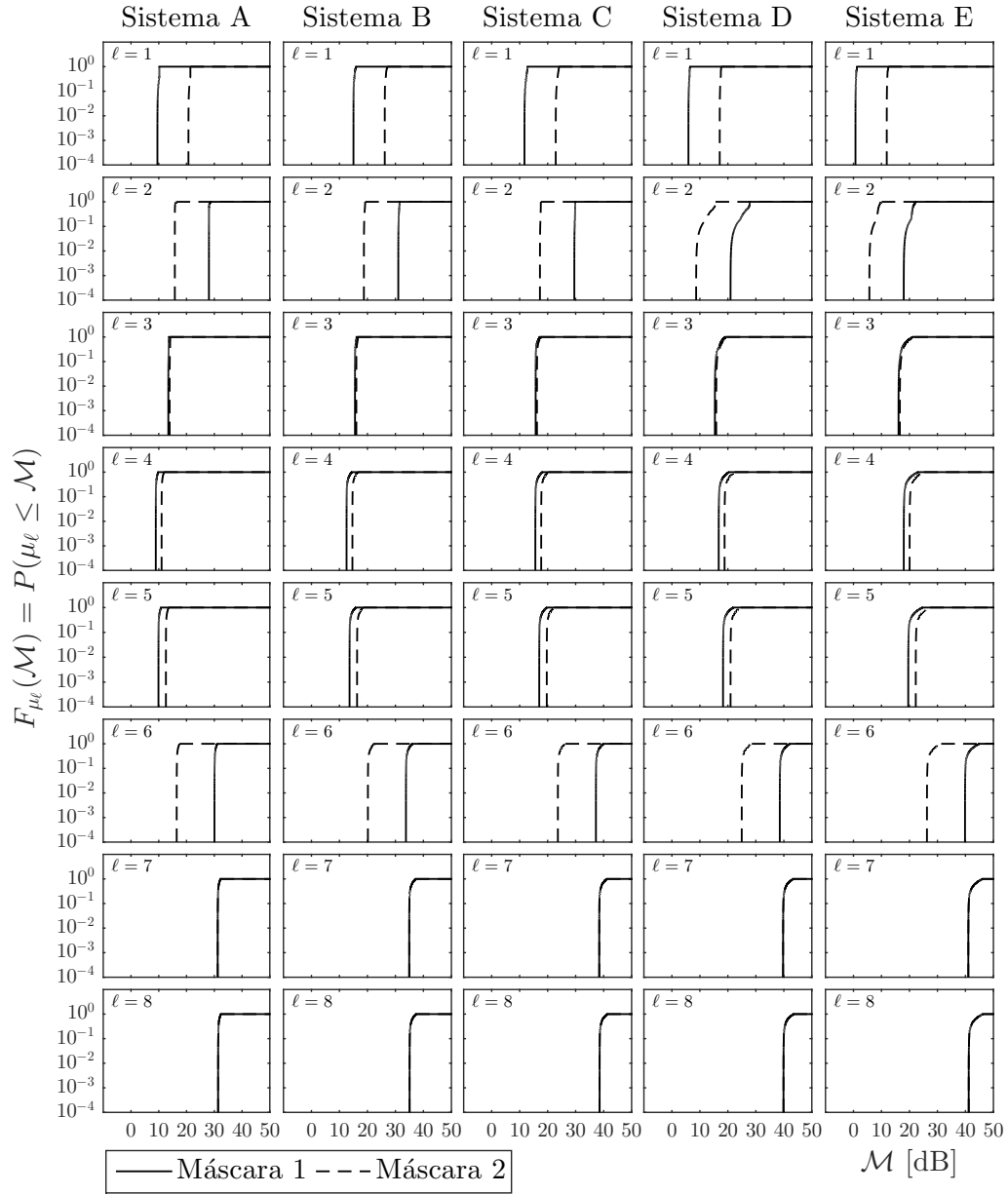


Figura 5.32: Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 1,2 m.

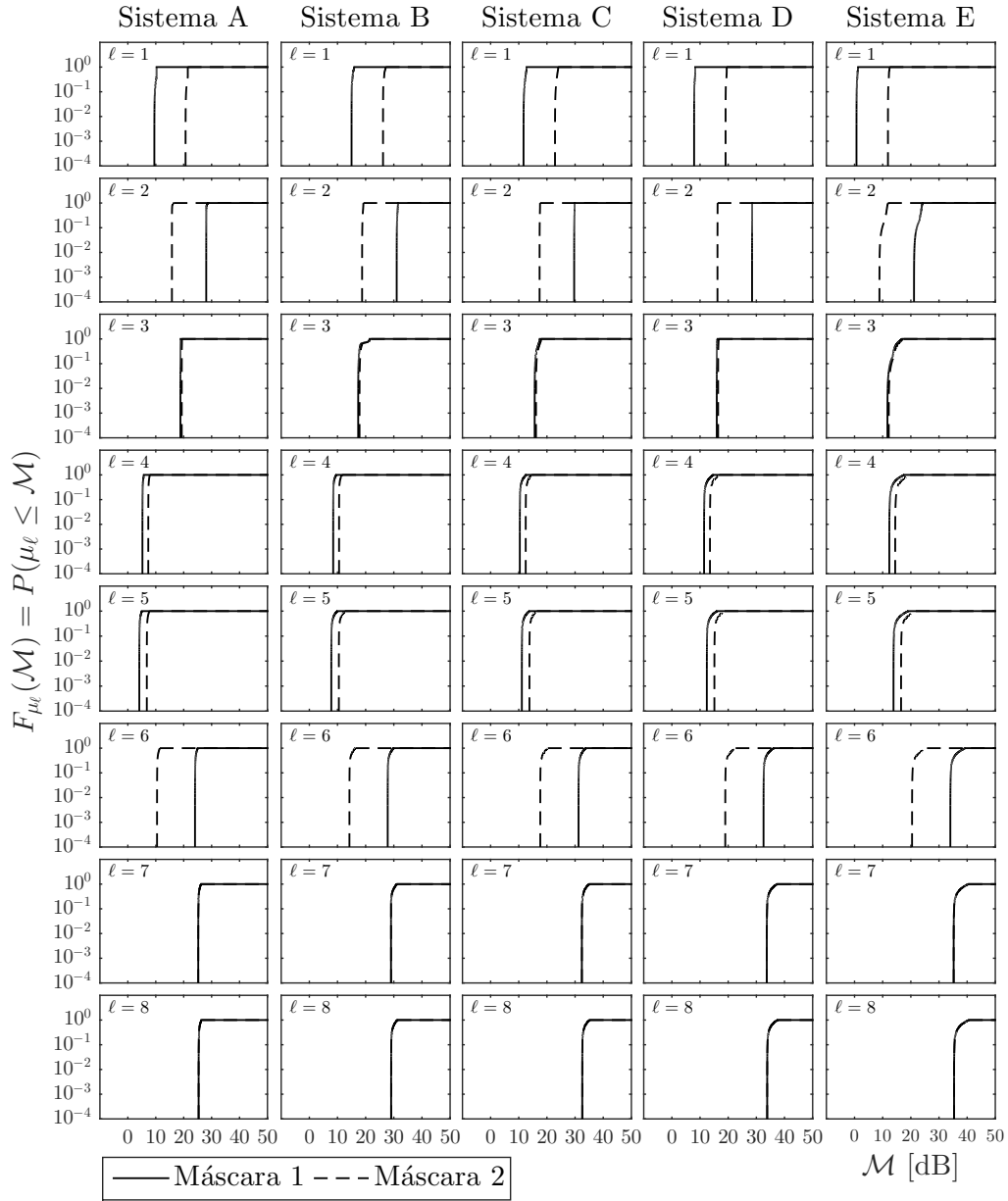


Figura 5.33: Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 2,4 m.

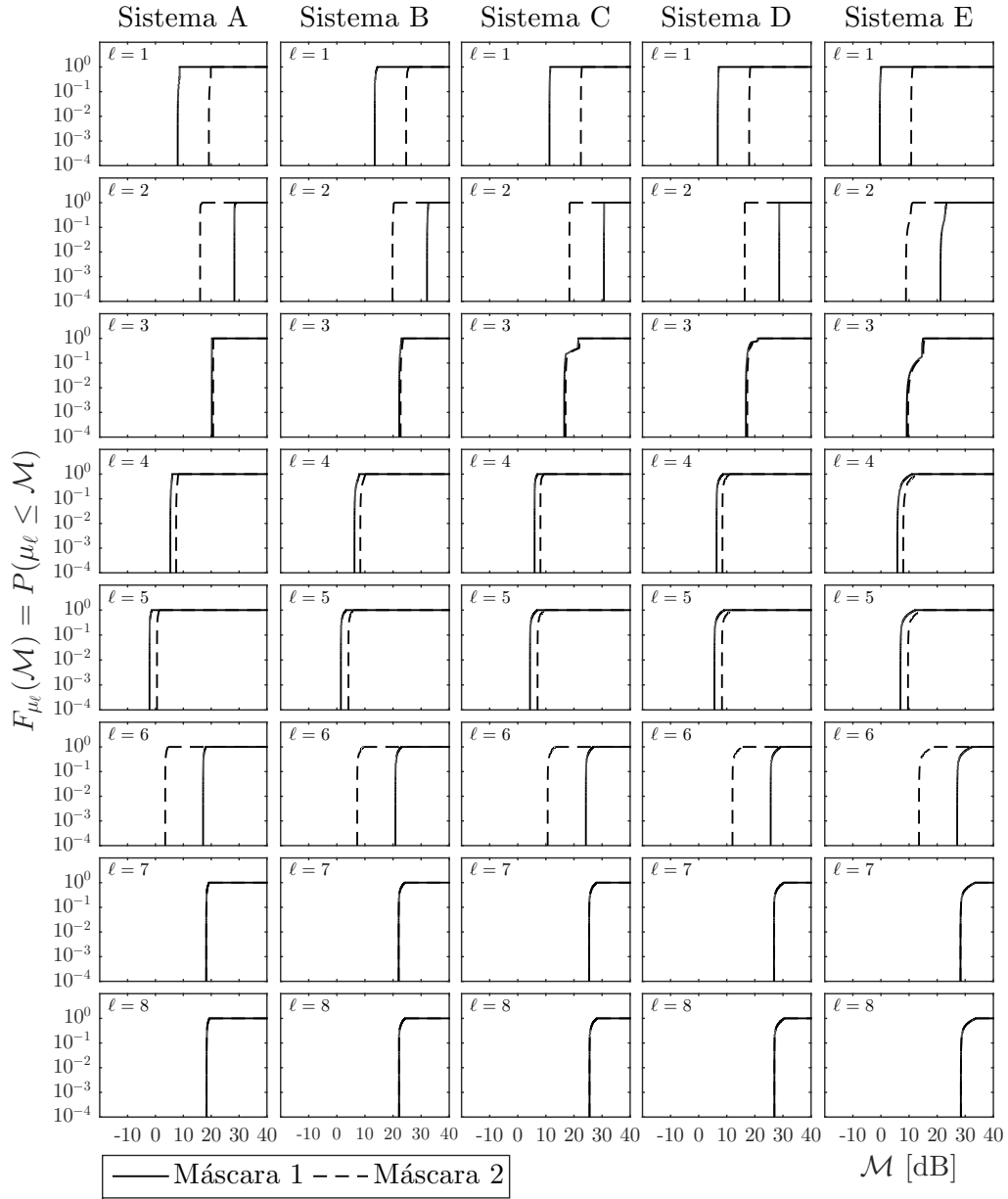


Figura 5.34: Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 4,5 m.

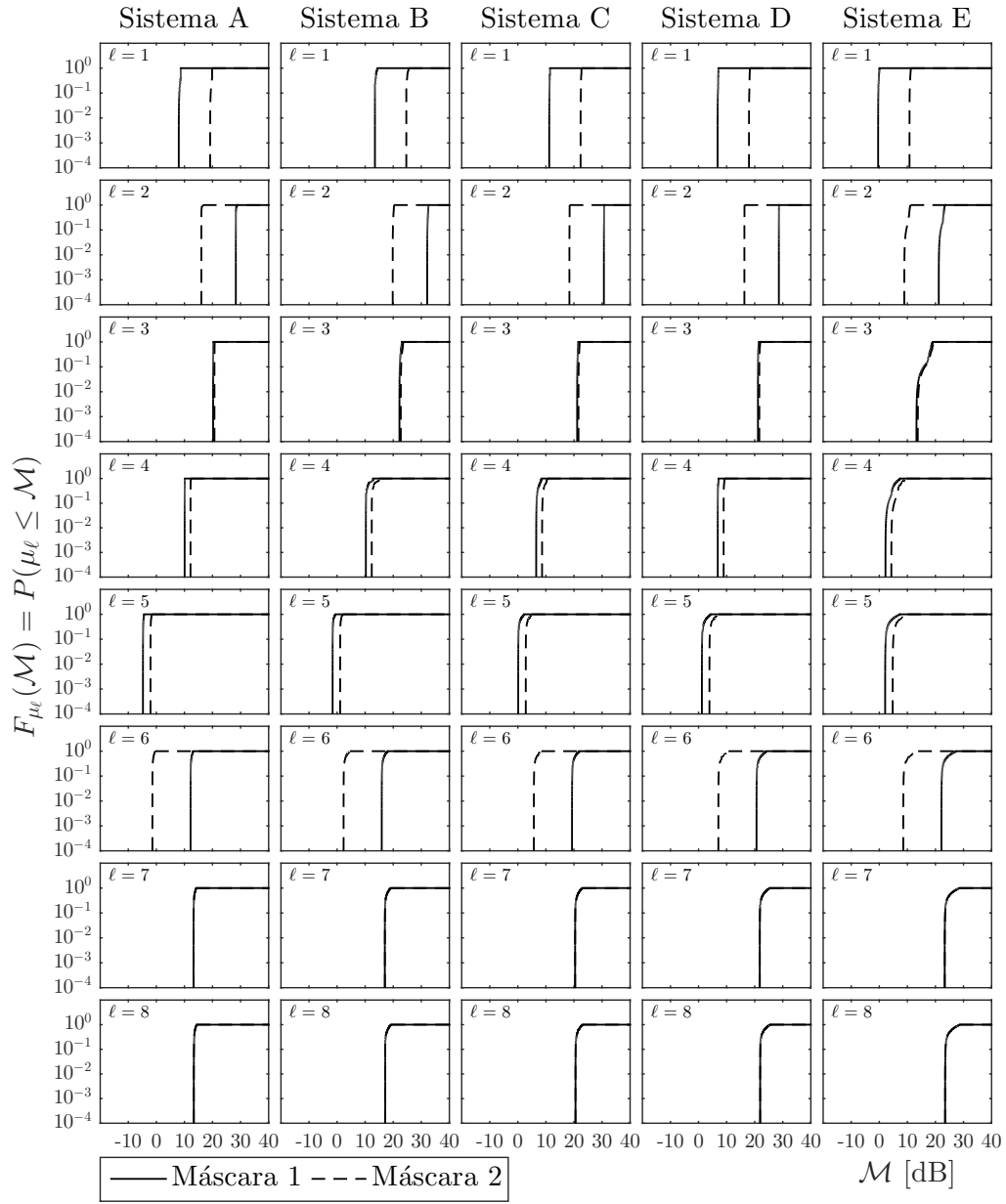


Figura 5.35: Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 8 m.

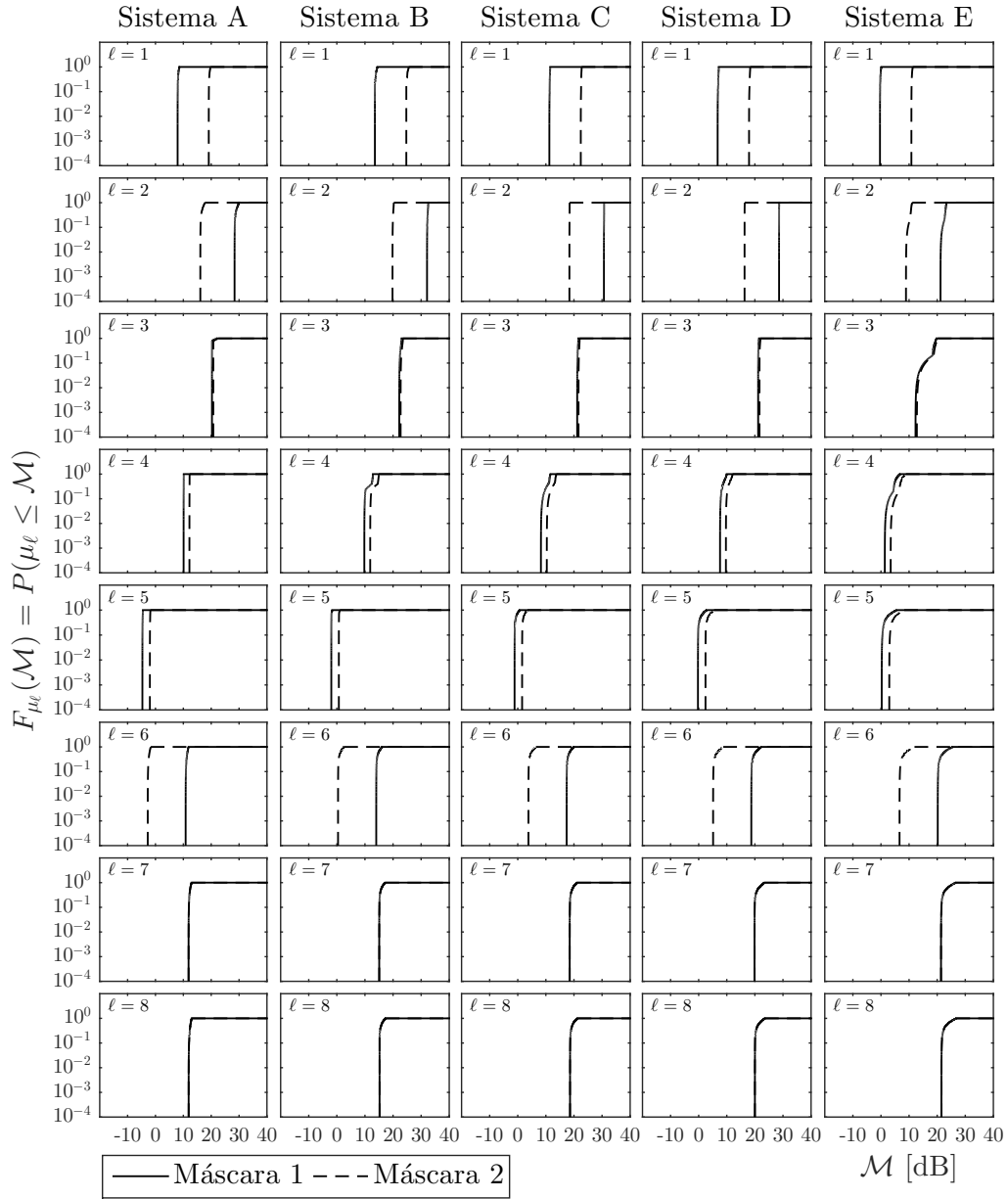


Figura 5.36: Função distribuição de probabilidade das margens de $epfd_{\downarrow}$ para uma estação terrena receptora vítima com diâmetro de antena de 10 m.

Tabela 5.16: Margens \mathcal{M}_{999} excedidas com probabilidade 0.999 (azul: $-2 \leq \mathcal{M}_{999} \leq 0$; verde: $-5 \leq \mathcal{M}_{999} < -2$; latitude da estação terrena vítima: $\pm 60^\circ$)

Máscaras		Máscara 1					Máscara 2				
Diâmetro [metro]		1,2	2,4	4,5	8	10	1,2	2,4	4,5	8	10
Sistema A	$\ell=1$	9,5	9,5	8,0	8,0	7,9	20,7	20,7	19,2	19,2	19,1
	2	28,1	28,1	28,3	28,3	28,4	15,8	15,8	16,0	16,0	16,1
	3	13,4	18,8	20,2	20,2	20,3	13,9	19,3	20,7	20,7	20,7
	4	8,9	5,2	5,3	10,1	10,1	11,0	7,3	7,4	12,2	12,2
	5	9,9	4,1	-2,1	-4,8	-4,7	12,6	6,8	0,6	-2,1	-2,0
	6	30,1	24,1	17,1	12,2	10,8	16,5	10,5	3,5	-1,4	-2,8
	7	31,2	25,2	18,2	13,2	11,9	31,2	25,2	18,2	13,3	11,9
	8	31,4	25,4	18,3	13,3	11,9	31,4	25,4	18,3	13,3	11,9
Sistema B	$\ell=1$	15,0	15,0	13,5	13,5	13,5	26,2	26,2	24,7	24,7	24,7
	2	31,0	31,0	32,1	32,1	32,1	18,7	18,7	19,8	19,8	19,8
	3	15,6	17,3	22,2	22,2	22,2	16,0	17,8	22,7	22,7	22,7
	4	12,5	8,5	6,3	10,3	9,8	14,6	10,6	8,4	12,3	11,9
	5	13,6	7,8	1,4	-1,6	-2,0	16,3	10,5	4,1	1,1	0,7
	6	33,8	27,8	20,8	15,9	14,0	20,2	14,2	7,3	2,3	0,4
	7	34,9	29,0	22,0	17,0	15,1	34,9	29,0	22,0	17,0	15,1
	8	35,1	29,1	22,1	17,1	15,2	35,1	29,1	22,1	17,1	15,2
Sistema C	$\ell=1$	11,7	11,7	11,3	11,2	11,2	22,9	22,9	22,5	22,4	22,4
	2	29,5	29,7	30,7	30,7	30,7	17,2	17,4	18,4	18,4	18,4
	3	15,7	15,6	16,5	21,1	21,1	16,2	16,1	17,0	21,6	21,6
	4	15,6	10,4	6,0	6,5	8,2	17,7	12,5	8,1	8,6	10,3
	5	17,0	11,1	4,4	0,1	-1,1	19,7	13,8	7,0	2,8	1,5
	6	37,3	31,2	24,2	19,3	17,4	23,7	17,6	10,7	5,7	3,8
	7	38,4	32,4	25,4	20,4	18,5	38,4	32,4	25,4	20,4	18,5
	8	38,6	32,6	25,5	20,5	18,6	38,6	32,6	25,5	20,5	18,6
Sistema D	$\ell=1$	5,9	7,9	6,8	6,8	6,7	17,1	19,1	18,0	18,0	17,9
	2	21,0	28,5	28,7	28,6	28,6	8,7	16,2	16,4	16,3	16,3
	3	15,4	15,9	16,8	21,2	21,2	15,8	16,4	17,3	21,6	21,6
	4	16,7	11,4	6,4	6,8	7,6	18,8	13,5	8,5	8,9	9,7
	5	18,3	12,4	5,6	1,2	-0,3	21,0	15,1	8,3	3,9	2,4
	6	38,6	32,6	25,6	20,7	18,7	25,0	19,0	12,0	7,1	5,1
	7	39,7	33,7	26,8	21,8	19,9	39,7	33,7	26,8	21,8	19,9
	8	39,9	33,9	26,9	21,9	20,0	39,9	33,9	26,9	21,9	20,0
Sistema E	$\ell=1$	0,7	0,7	-0,4	-0,4	-0,4	11,9	11,9	10,8	10,8	10,8
	2	18,0	21,1	21,2	21,2	21,2	5,7	8,9	8,9	8,9	8,9
	3	16,1	11,7	9,2	13,3	12,3	16,6	12,2	9,7	13,7	12,8
	4	18,0	12,3	5,8	2,2	1,4	20,1	14,4	7,9	4,3	3,5
	5	19,6	13,8	6,9	2,1	0,3	22,3	16,5	9,6	4,8	3,0
	6	39,9	34,0	27,1	22,1	20,2	26,3	20,4	13,5	8,5	6,6
	7	41,0	35,2	28,3	23,3	21,4	41,0	35,2	28,3	23,3	21,4
	8	41,2	35,4	28,4	23,4	21,5	41,2	35,4	28,4	23,4	21,5

Tabela 5.17: Margens \mathcal{M}_{99} excedidas com probabilidade 0.99 (azul: $-2 \leq \mathcal{M}_{99} \leq 0$; verde: $-5 \leq \mathcal{M}_{99} < -2$; latitude da estação terrena vítima: $\pm 60^\circ$)

Máscaras		Máscara 1					Máscara 2				
Diâmetro [metro]		1,2	2,4	4,5	8	10	1,2	2,4	4,5	8	10
Sistema A	$\ell=1$	9,5	9,5	8,0	8,0	8,0	20,7	20,7	19,2	19,2	19,1
	2	28,1	28,1	28,3	28,3	28,4	15,8	15,8	16,0	16,0	16,1
	3	13,5	18,8	20,2	20,2	20,3	13,9	19,3	20,7	20,7	20,7
	4	8,9	5,2	5,3	10,1	10,1	11,0	7,3	7,4	12,2	12,2
	5	9,9	4,1	-2,1	-4,8	-4,7	12,6	6,8	0,6	-2,1	-2,0
	6	30,1	24,1	17,1	12,2	10,8	16,5	10,5	3,5	-1,4	-2,8
	7	31,2	25,2	18,2	13,2	11,9	31,2	25,2	18,2	13,3	11,9
	8	31,4	25,4	18,3	13,4	11,9	31,4	25,4	18,3	13,4	11,9
Sistema B	$\ell=1$	15,0	15,0	13,5	13,5	13,5	26,2	26,2	24,7	24,7	24,7
	2	31,0	31,0	32,1	32,1	32,1	18,7	18,7	19,8	19,8	19,8
	3	15,6	17,4	22,2	22,2	22,2	16,0	17,8	22,7	22,7	22,7
	4	12,6	8,5	6,3	10,3	9,8	14,6	10,6	8,4	12,3	11,9
	5	13,6	7,8	1,4	-1,6	-2,0	16,3	10,5	4,1	1,1	0,7
	6	33,8	27,8	20,9	15,9	14,0	20,2	14,2	7,3	2,3	0,4
	7	34,9	29,0	22,0	17,0	15,1	34,9	29,0	22,0	17,0	15,1
	8	35,1	29,1	22,1	17,1	15,2	35,1	29,1	22,1	17,1	15,2
Sistema C	$\ell=1$	11,7	11,7	11,3	11,2	11,3	22,9	22,9	22,5	22,4	22,4
	2	29,5	29,7	30,7	30,7	30,7	17,3	17,4	18,4	18,4	18,4
	3	15,7	15,7	16,6	21,1	21,2	16,2	16,1	17,0	21,6	21,6
	4	15,6	10,4	6,0	6,6	8,3	17,7	12,5	8,1	8,7	10,4
	5	17,0	11,1	4,4	0,1	-1,1	19,7	13,8	7,1	2,8	1,6
	6	37,3	31,2	24,3	19,3	17,4	23,7	17,6	10,7	5,7	3,8
	7	38,4	32,4	25,4	20,4	18,5	38,4	32,4	25,4	20,4	18,5
	8	38,6	32,6	25,5	20,6	18,6	38,6	32,6	25,5	20,6	18,6
Sistema D	$\ell=1$	5,9	7,9	6,8	6,8	6,8	17,1	19,1	18,0	18,0	17,9
	2	21,1	28,5	28,7	28,6	28,6	8,8	16,2	16,4	16,3	16,3
	3	15,4	15,9	16,8	21,2	21,2	15,9	16,4	17,3	21,6	21,6
	4	16,7	11,4	6,4	6,8	7,6	18,8	13,5	8,5	8,9	9,7
	5	18,3	12,4	5,6	1,2	-0,3	21,0	15,1	8,3	3,9	2,4
	6	38,6	32,6	25,6	20,7	18,7	25,0	19,0	12,0	7,1	5,1
	7	39,7	33,7	26,8	21,8	19,9	39,8	33,7	26,8	21,8	19,9
	8	39,9	33,9	26,9	22,0	20,0	39,9	33,9	26,9	22,0	20,0
Sistema E	$\ell=1$	0,7	0,7	-0,4	-0,4	-0,3	11,9	11,9	10,8	10,8	10,8
	2	18,1	21,2	21,3	21,3	21,3	5,8	8,9	9,0	9,0	9,0
	3	16,1	11,8	9,5	13,5	12,6	16,6	12,3	9,9	14,0	13,1
	4	18,0	12,4	5,9	2,3	1,5	20,1	14,5	8,0	4,4	3,6
	5	19,6	13,9	6,9	2,1	0,3	22,3	16,5	9,6	4,8	3,0
	6	39,9	34,0	27,1	22,2	20,2	26,3	20,5	13,5	8,6	6,6
	7	41,0	35,2	28,3	23,3	21,4	41,1	35,2	28,3	23,3	21,4
	8	41,2	35,4	28,5	23,5	21,5	41,2	35,4	28,5	23,5	21,5

6

Conclusões

Inicialmente foi apresentada neste trabalho, a modelagem matemática utilizada para determinar a densidade de fluxo de potência equivalente produzida pelos lances de descida de sistemas de satélites não-GEO em uma estação terrena vítima de uma rede GEO, operando na faixa de frequência de 3,7-4,2 GHz.

Com base no modelo matemático apresentado, foi desenvolvida uma metodologia para a determinação de máscaras de $epfd_{\downarrow}$ a partir de critérios de proteção pré-estabelecidos. Embora, neste trabalho, esta metodologia tenha sido aplicada a partir dos critérios de proteção definidos nas recomendações ITU-R S.1323 e ITU-R F.1495, ela é prontamente aplicável a critérios de proteção que venham a ser definidos futuramente no âmbito da ITU.

Conforme evidenciado pelas tabelas 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5, a Máscara 2 apresentou margens maiores que as da Máscara 1 para $\ell = 1, 4$ e 5 e menores que as da Máscara 1 para $\ell = 2$ e 6 . Para $\ell = 3, 7$ e 8 as margens correspondentes às duas máscara ficaram bem próximas.

As duas máscaras de $epfd_{\downarrow}$ obtidas, foram avaliadas através de comparações com as funções distribuição de probabilidade complementar das densidades de fluxo de potência equivalente produzidas pelos lances de descida de um sistema de satélites não-GEO na estação terrena receptora vítima de uma rede de satélites GEO. Na comparação foram considerados cinco sistemas de satélites não-GEO com estrutura de órbita do tipo *Walker Delta* [15], tendo sido utilizado o método analítico em [13] na obtenção das funções distribuição de probabilidade complementar das densidades de fluxo de potência equivalente produzidas pelos lances de descida.

As comparações foram feitas com base nas margens de densidade fluxo de potência equivalente no lance de descida, associadas a cada uma das máscaras. De maneira geral, os aumentos no diâmetro da antena receptora vítima implicaram em um aumento da margem correspondente a $\ell = 4$ e em uma diminuição das margens correspondentes a $\ell = 5, 6, 7$ e 8 , enquanto que as margens correspondentes a $\ell = 1, 2$ e 3 praticamente não sofrem variações.

Foi observado que, no caso dos sistemas D e E, que possuem órbitas polares (ângulos de inclinação próximos a 90°), o número típico de satélites

visíveis tende a crescer com o aumento da latitude da estação terrena vítima, entretanto para os sistemas A, B e C que possuem órbitas não polares, o número típico de satélites visíveis se mantém constante. Além disso, foi também observado que apesar do aumento do número típico de satélites visíveis nos sistemas que possuem órbitas polares (Sistemas D e E) com o aumento da latitude da estação terrena vítima as margens aumentaram. Isto se deve ao fato da estação terrena vítima, localizada em alta latitude, estar apontando para a órbita de satélites geoestacionários, fazendo com que as transmissões provenientes dos satélites interferentes (a maioria deles sobre as regiões polares) atinjam a estação terrena vítima pelos lóbulos laterais de sua antena receptora, produzindo interferências muito pequenas.

Os resultados apresentados no Capítulo 5 mostraram claramente, que as máscaras obtidas no Capítulo 4 são adequadas para proteger uma estação terrena vítima de uma rede GEO das densidades de fluxo de potência equivalente produzidas por sistemas não-GEO com órbitas não polares.

No caso dos sistemas de satélites não-GEO que possuem órbitas polares, os resultados obtidos para posições da estação terrena vítima da rede GEO de altas latitudes ($\pm 40^\circ$, $\pm 50^\circ$ e $\pm 60^\circ$) as máscaras obtidas mostraram-se também adequadas para proteger uma estação terrena vítima de uma rede GEO das densidades de fluxo de potência equivalente produzidas por sistemas não-GEO. Para estações terrenas vítimas em baixas latitudes (0° , $\pm 10^\circ$, $\pm 20^\circ$ e $\pm 30^\circ$) foram observadas margens negativas significativas.

É importante observar que duas hipóteses de pior caso, consideradas neste trabalho, contribuíram para as margens negativas significativas obtidas para os sistemas D e E (constelações com grande número de satélites) em baixas latitudes: (i) a hipótese de que cada um dos satélites não-geoestacionários transmite a maior densidade de potência permissível pelas restrições impostas pelo Artigo 21 do RR para a proteção do Serviço Fixo Terrestre e (ii) a hipótese de que todos os satélites interferentes operam com este nível máximo de densidade de potência.

Referências bibliográficas

- [1] Study of technical and operational issues and regulatory provisions for new non-geostationary-satellite orbit systems in the 3700-4200 MHz, 4500-4800 MHz, 5925-6425 MHz and 6725-7025 MHz frequency bands allocated to the fixed-satellite service. Resolução 157, 2015 World Radiocommunication Conference Final Acts, Geneva, 2015.
- [2] Radio Regulations. International Telecommunication Union, 2012.
- [3] 1997 World Radiocommunication Conference Final Acts. Geneva, 1997.
- [4] Computer simulation of short-term interference between the feeder-links of two non-GSO MSS networks sharing the 5 and 7 GHz bands. Documento 4A/11-E, ITU-R, Março 1996.
- [5] Interference between two NGSO FSS networks. Documento A4/101-E, ITU-R, Setembro 1996.
- [6] Simulation of “in-line” interference between the feeder links of four separate non-GSO MSS constellations at 5/7 GHz (LEO-C, LEO-D, LEO-E and LEO-F). Documento 4A/109-E, ITU-R, Setembro 1996.
- [7] Simulation results on the efd calculation for NGSO FSS system operating in the 12 GHz frequency range. Documento 4A/32-E, ITU-R, Fevereiro 1998.
- [8] Working document towards a preliminary draft new recommendation on frequency sharing between the non geostationary fixed satellite service (NGSO FSS) and the fixed service (FS) in the band 40.5-42.5 GHz. Documento 4A/32-E, ITU-R, Fevereiro 1998.
- [9] 2000 World Radiocommunication Conference Final Acts. Istanbul, 2000.
- [10] Status of preliminary studies on power flux-density limits to protect the fixed service from HEO FSS satellites emissions in

- the 18 GHz band. Documento 4-9-S/TEMP/141-E, ITU-R, Genebra, Abril 2003.
- [12] **Analysiss of Criteria for Sharing between non-Geostationary Satellite Systems Operating in the High- Elliptical Orbits and Geostationary Networks in the Fixed Satellite Service.** Documento 4A/402, ITU-R, Genebra, 2003.
- [13] FORTES, J. M. P.; SAMPAIO-NETO, R. ; MALDONADO, J. E. A.. **An analytical method for assessing interference in interference environments involving NGSO satellite networks.** International journal of satellite communications, 17(6):399–419, 1999.
- [14] **Frequency sharing between NGSO systems in bands below 30 GHz, simulation times required for NGSO/NGSO sharing studies.** Documento 4A/451, ITU-R, Genebra, Fevereiro 2000.
- [15] WALKER, J.. **Circular Orbit Patterns Providing Continuos Whole Earth Coverage,** Royal Aircraft Establishment. Technical report, Tech. Rep. 70211 (UDC 629.195: 521.6), 1970. 2.2.
- [16] **Interference criteria to protect the fixed service from time varying aggregate interference from other radiocommunication services sharing the 17,7-19,3 GHz band on a co-primary basis,.** Recommendation ITU-R F.1495-2, 2012.
- [17] **Maximum permissible levels of interference in a satellite network (GSO/FSS; non-GSO/FSS; non-GSO/MSS feeder links) for a hypothetical reference digital path in the fixed-satellite service caused by other codirectional FSS networks below 30 GHz.** União International de Telecomunicações, Recommendation ITU-R S.1323, 1997.
- [18] FORTES, J. M. P.; BAPTISTA, A. J. S.. **Satellite link performance under rain and external interferences: Constraints to be imposed on the statistical behavior of the external interferences.** International journal of satellite communications and networking, 2010.
- [19] **Satellite antenna radiation pattern for use as a design objective in the fixed-satellite service employing geostationary satellites.** Recommendation ITU-R S.672-4, 1997.

A

Cálculo da potência de transmissão dos satélites não-GEO

O cálculo da potência de transmissão dos cinco sistemas de satélites não-GEO, apresentados na Tabela 5.1, foi feito considerando a máscara de pdf definida no Artigo 21 [2] para a banda de frequência de 3,7-4,2 GHz e utilizando uma banda de referencia de 4 kHz. Assim, esta máscara pode ser escrita como

$$pdf_{\text{Art.21}}(\epsilon) = \begin{cases} -162 - Y & 0 < \epsilon \leq 5 \\ -162 - Y + (12 + Y)\frac{(\epsilon-5)}{20} & 5 < \epsilon \leq 25 \\ -150 & 25 < \epsilon \leq 90 \end{cases} \quad (\text{A-1})$$

com o parâmetro Y , dado por

$$Y = 5 \log \left(\frac{N}{2} \right) \quad (\text{A-2})$$

onde N é o número de satélites dos sistemas de satélites não-GEO apresentados na Tabela 5.1 e ϵ é o ângulo de chegada com respeito ao plano horizontal.

Como apresentado no Capítulo 5, o diagrama de radiação da antena transmissora dos satélites não-GEO foi obtido considerando-se a recomendação ITU-R S.672-4 [19]. Este diagrama de radiação depende da metade do ângulo de meia potência (δ_b), cuja representação geométrica é mostrada na Figura A.1.

Na figura A.1, r é o raio da terra, h é a altura da orbita de satélites não-GEO e θ é a metade do ângulo de separação entre satélites de um mesmo plano em um sistema de satélites não-GEO. Assim, δ_b pode ser obtido como

$$\delta_b \cong \arctan \left(\frac{r}{h} \tan(\theta) \right) \quad (\text{A-3})$$

O diagrama de radiação da antena dos satélites não-GEO é expresso em função do ângulo entre a direção de apontamento da antena da estação transmissora na orbita de satélites não-GEO e a direção da estação terrena receptora vítima do FSS (δ), como a máscara de pdf do Artigo 21 [2] é expressa em função do ângulo de chegada (ϵ), é necessário estabelecer uma relação entre δ e ϵ . Este relacionamento pode ser expresso como

$$\delta = \arcsin \left(\frac{r \sin \left(\frac{\pi}{2} + \epsilon \right)}{r + h} \right) \quad (\text{A-4})$$

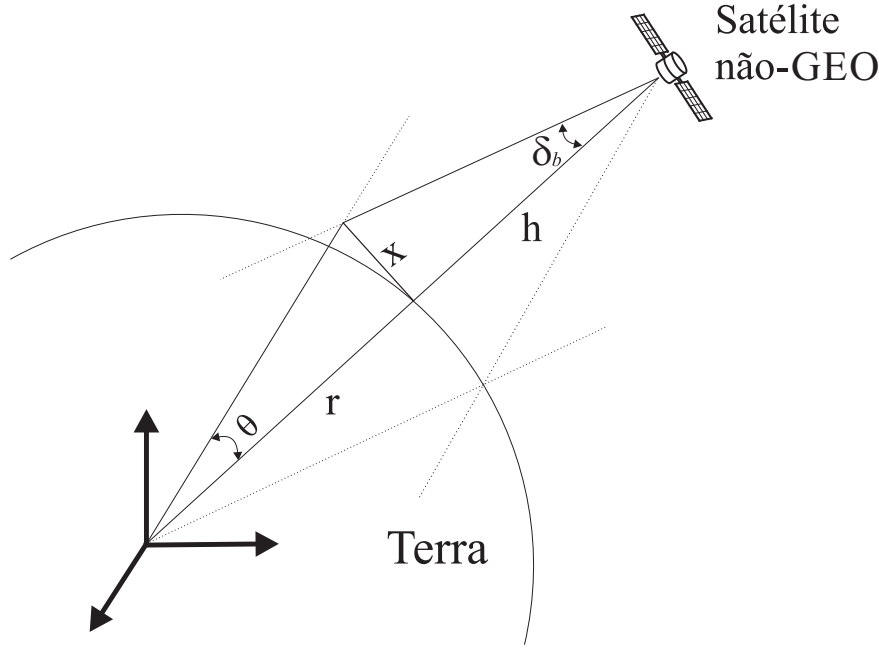


Figura A.1: Geometria utilizada no cálculo da metade do ângulo de meia potência (δ_b).

A densidade de fluxo de potência produzida pelos satélites não-GEO na superfície da Terra, pode ser expressa como

$$pfd_{\text{sat}}(\epsilon) = \frac{P_T G_T(\epsilon)}{4 \pi d^2} \quad (\text{A-5})$$

onde d é a distância entre a estação terrena receptora vítima do FSS e o sistema de satélites não-GEO interferente, $G_T(\epsilon)$ é o ganho da antena dos satélites não-GEO em função do ângulo de chegada (ϵ). Observe que a densidade de fluxo de potência produzida pelos satélites não-GEO tem que ser menor ou igual que os limites de pfd estabelecidos em (A-1), ou seja,

$$pfd_{\text{sat}}(\epsilon) \leq pfd_{\text{Art21}}(\epsilon) \quad (\text{A-6})$$

Note que, na Figura A.2, ϵ^* representa o ponto onde a densidade de fluxo de potência produzida pelos satélites não-GEO e a máscara da densidade de fluxo potência em (A-1) tomam o mesmo valor, o que pode ser expresso como

$$pfd_{\text{Art21}}(\epsilon^*) = pfd_{\text{sat}}(\epsilon^*) \quad (\text{A-7})$$

$$= \frac{P_T G_T(\epsilon^*)}{4 \pi d^2} \quad (\text{A-8})$$

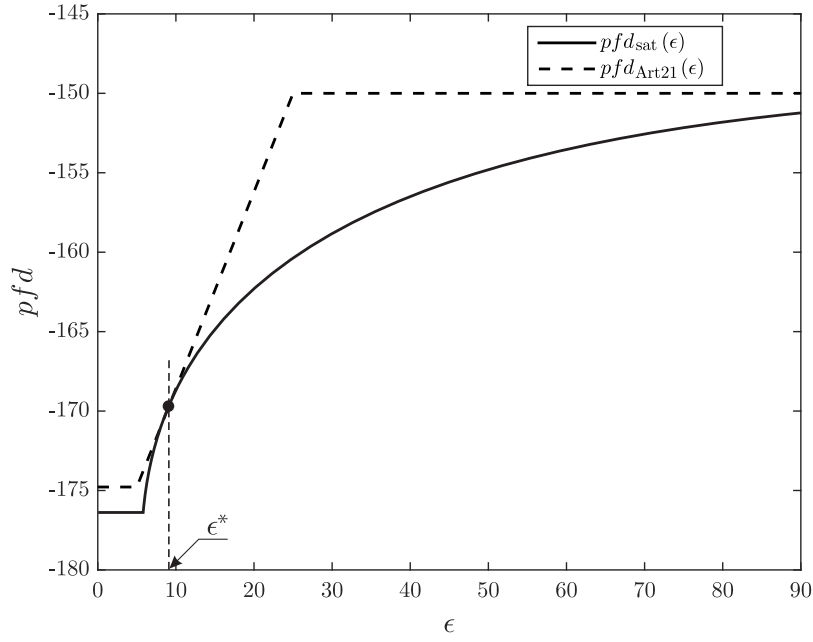


Figura A.2: Curva da máscara de pfd estabelecida no Artigo 21 e a pfd produzida pelos satélites não-GEO.

A partir de (A-8), pode ser obtida uma expressão que permite determinar a potência máxima de transmissão dos satélites não-GEO, esta expressão é dada por

$$P_T = pfd_{Art21}(\epsilon^*) \frac{4 \pi d^2}{G_T(\epsilon^*)} \quad (A-9)$$

Utilizando-se o procedimento descrito neste anexo foram calculados os valores das potências de transmissão dos satélites não-GEO para os cinco sistemas analisados neste trabalho.

B

Metodologia de projeto das máscaras de $epfd$

Como a ocorrência de interferências está estreitamente relacionada com a degradação y devida às mesmas definiu-se em [18], um problema de otimização com restrições a serem impostas ao comportamento estatístico da degradação y devida às interferências externas. Para a obtenção das máscaras foram modificadas as duas primeiras restrições do problema de otimização apresentado em [18], devido a que os resultados em [18] foram realizados para enlaces de satélites em presença de chuvas e interferências externas. Como os sistemas analisados estão alocados na banda de 3.7-4.2 GHz, a degradação devida a presença de chuvas pode ser desprezada, já que para as bandas de frequências abaixo de 10 GHz o efeito das chuvas é desprezível.

Para a degradação y da razão E_b/N_0 , é utilizada uma representação paramétrica definida em [18], assumidas as seguintes hipóteses:

1. A degradação y relativa às interferências é limitada ao intervalo $[Y_{min}, Y_{max}]$.
2. Permite-se a existência de uma probabilidade diferente de zero para as degradações iguais a Y_{min} e Y_{max} , ou seja, $P(y = Y_{min})$ e $P(y = Y_{max})$ diferentes de zero.
3. No intervalo aberto (Y_{min}, Y_{max}) , a função densidade de probabilidade da degradação devida a interferência $p_y(Y)$ é contínua e diferenciável, e será representada por uma expansão em série de uma base de funções ortonormais contínuas e diferenciáveis no intervalo (Y_{min}, Y_{max}) .

Sob estas hipóteses, a função densidade de probabilidade $p_y(Y)$ pode ser escrita como

$$p_y(Y) = \alpha_0 \delta(Y - Y_{min}) + \alpha_{n+1} \delta(Y - Y_{max}) + \sum_{i=1}^n \alpha_i \phi_i(Y) \quad (B-1)$$

onde $\delta(\cdot)$ é a função impulso, $\{\phi_i(Y), i = 1, \dots, n\}$ é o conjunto de funções ortonormais contínuas e diferenciáveis no intervalo (Y_{min}, Y_{max}) , $\{\alpha_0, \dots, \alpha_n\}$ o conjunto de parâmetros utilizados para representar a função $p_y(Y)$.

Note que, como devido às propriedades de uma função densidade de probabilidade

$$\int_{Y_{min}}^{Y_{max}} p_y(Y) dY = 1, \quad (B-2)$$

è possível expressar o valor do parâmetro α_{n+1} em (B-1) como função dos demais parâmetros $\{\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_n\}$. Tem-se assim,

$$\alpha_{n+1} = 1 - \alpha_0 - \sum_{i=1}^n \alpha_i c_i \quad (B-3)$$

onde

$$c_i = \int_{Y_{min}}^{Y_{max}} \phi(Y) dY \quad (B-4)$$

Consequentemente, $p_y(Y)$ pode ser escrita como função dos $n + 1$ primeiros parâmetros $\{\alpha_0, \dots, \alpha_n\}$, obtendo-se de (B-1), $\{c_i ; i = 1, \dots, n\}$

$$\begin{aligned} p_y(Y) = & \delta(Y - Y_{max}) + \alpha_o [\delta(Y - Y_{min}) - \delta(Y - Y_{max})] \\ & + \sum_{i=1}^n \alpha_i [\phi_i(Y) - c_i \delta(Y - Y_{max})] \end{aligned} \quad (B-5)$$

com os coeficientes c_i dados por (B-4)

A função distribuição de probabilidade da degradação devida a interferências y pode ser obtida integrando a função densidade de probabilidade da degradação devida a interferências $p_y(Y)$

$$F_y(Y) = \int_{-\infty}^Y p_y(Z) dZ \quad (B-6)$$

$$\begin{aligned} F_y(Y) = & u(Y - Y_{max}) + \alpha_o [u(Y - Y_{min}) - u(Y - Y_{max})] \\ & + \sum_{i=1}^n \alpha_i \left[\int_{-\infty}^Y \phi_i(Y) dY - c_i u(Y - Y_{max}) \right] \end{aligned} \quad (B-7)$$

Os valores $(F_y(Y_j) ; j = 1, 2, \dots, m)$ podem ser obtidos a partir de (B-7), ou seja

$$\begin{aligned} F_y(Y_j) = & u(Y_j - Y_{max}) + \alpha_o [u(Y_j - Y_{min}) - u(Y_j - Y_{max})] \\ & + \sum_{i=1}^n \alpha_i \left[\int_{-\infty}^{Y_j} \phi_i(Y) dY - c_i u(Y_j - Y_{max}) \right] \end{aligned} \quad (B-8)$$

em notação mais compacta (B-8) se escreve

$$F_y(Y_j) = f_j^{max} + \alpha_o (f_j^{min} - f_j^{max}) + (\Phi_j - f_j^{max} \tilde{\mathbf{c}})^T \tilde{\mathbf{a}} ; j = 1, 2, \dots, m \quad (B-9)$$

onde

$$f_j^{min} = u(Y_j - Y_{min}) ; j = 1, 2, \dots, m \quad (B-10)$$

$$f_j^{max} = u(Y_j - Y_{max}) ; j = 1, 2, \dots, m \quad (B-11)$$

$$\tilde{\alpha} = (\alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_n)^T \quad (B-12)$$

$$\tilde{c} = (c_1 c_2 \dots c_n)^T \quad (B-13)$$

$$\Phi_j = \left(\int_{-\infty}^{Y_j} \phi_1(Y) dY \int_{-\infty}^{Y_j} \phi_2(Y) dY \dots \int_{-\infty}^{Y_j} \phi_n(Y) dY \right)^T ; j = 1, 2, \dots, m \quad (B-14)$$

Sejam α e $\mathbf{k}_j ; j = 1, 2, \dots, m$, vetores de dimensão $(n+1)$ definidos, respectivamente, por

$$\alpha = (\alpha_o | \tilde{\alpha}^T)^T \quad (B-15)$$

$$\mathbf{k}_j = (f_j^{min} - f_j^{max} | \Phi_j^T - f_j^{max} \tilde{c}^T)^T \quad (B-16)$$

Considerando-se estas definições, (B-9) pode ser escrita, de forma mais compacta, como

$$F_y(Y_j) = f_j^{max} + \mathbf{k}_j^T \alpha ; j = 1, 2, \dots, m \quad (B-17)$$

Observe que, como $F_y(Y_j)$ é uma função distribuição de probabilidade, tem-se,

$$0 \leq F_y(Y_j) \leq 1 ; j = 1, 2, \dots, m \quad (B-18)$$

Por outro lado, as restrições em (4-7) impõem a condição

$$F_y(Y_j) \geq 1 - 0.1p_j ; j = 1, 2, \dots, m \quad (B-19)$$

A partir de (B-18) e (B-19), verifica-se que os valores $(F_y(Y_j) ; j = 1, 2, \dots, m)$ devem satisfazer às desigualdades

$$1 - 0.1p_j \leq F_y(Y_j) \leq 1 ; j = 1, 2, \dots, m \quad (B-20)$$

ou considerando (B-17)

$$1 - 0.1p_j \leq f_j^{max} + \mathbf{k}_j^T \alpha \leq 1 ; j = 1, 2, \dots, m \quad (B-21)$$

ou, de outra forma,

$$1 - 0.1p_j - f_j^{max} \leq \mathbf{k}_j^T \alpha \leq 1 - f_j^{max} ; j = 1, 2, \dots, m \quad (B-22)$$

que caracteriza um conjunto inicial de $2m$ restrições para os parâmetros $(\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_n)$ da função $p_y(Y)$ definida em (B-1). Pode-se observar que as restrições definidas (B-22) dependem dos pares (Y_j, p_j) .

A partir dos resultados em (B-22) e o desenvolvimento matemático em [18] o problema de otimização que permite estabelecer as condições a serem impostas ao comportamento estatístico da degradação y , é dado por

$$\max \mathbf{d}^T \boldsymbol{\alpha} \quad (\text{B-23})$$

sujeito a

$$\begin{aligned} \mathbf{k}_j^T \boldsymbol{\alpha} &\geq 1 - p_j - f_j^{max} \quad ; \quad j = 1, 2, \dots, m \\ \mathbf{k}_j^T \boldsymbol{\alpha} &\leq 1 - f_j^{max} \quad ; \quad j = 1, 2, \dots, m \\ \mathbf{c}^T \boldsymbol{\alpha} &\geq 0 \\ \mathbf{c}^T \boldsymbol{\alpha} &\leq 1 \\ \alpha_0 &\geq 0 \\ \alpha_0 &\leq 1 \\ \Phi_k^T \boldsymbol{\alpha} &\geq 0 \quad ; \quad k = 0, 1, \dots, N_p - 1 \end{aligned} \quad (\text{B-24})$$

C

Relacionamento entre a degradação devida a interferências y e a razão interferência-ruído

A razão E_b/N_0 (Energia por bit/Nível espectral de ruído térmico) degradada pela presença de interferências externas se escreve

$$e = \frac{E_b}{N_0 + \frac{I}{B_{ref}}} \quad (\text{C-1})$$

onde I corresponde à potência interferente (devida a interferências externas) na banda de referência B_{ref} . Note que (C-1) pode ainda ser escrita como

$$e = \frac{\frac{E_b}{N_0}}{1 + \frac{I}{N}} \quad (\text{C-2})$$

onde $N = N_0 B_{ref}$ representa a potência de ruído térmico na banda de referência B_{ref} , ou ainda,

$$e = \frac{1}{\alpha} \frac{E_b}{N_0} \quad (\text{C-3})$$

com

$$\alpha = 1 + \frac{I}{N} \quad (\text{C-4})$$

Em dB, esta degradação se escreve

$$y = 10 \log \alpha = 10 \log \left(1 + 10^{\frac{\mathcal{I}/\mathcal{N}}{10}} \right) \quad (\text{C-5})$$

com \mathcal{I}/\mathcal{N} representando a razão interferência-ruído térmico expressa em dB, ou seja,

$$\frac{\mathcal{I}}{\mathcal{N}} = 10 \log \left(\frac{I}{N} \right) \quad (\text{C-6})$$