



Eleonora Alves Manhães de Andrade

**Consideração Conjunta da Atenuação por Chuvas e de
Interferências Externas na Estimação dos Parâmetros
de Desempenho de Enlaces Digitais Terrestres**

Dissertação de Mestrado

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

Orientador: Prof. José Mauro Pedro Fortes

Rio de Janeiro
Abril de 2008

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.



Eleonora Alves Manhães de Andrade

Consideração Conjunta da Atenuação por Chuvas e de Interferências Externas na Estimação dos Parâmetros de Desempenho de Enlaces Digitais Terrestres

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

Dr. José Mauro Pedro Fortes

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica — PUC-Rio

Dr. Emanuel Paiva de Oliveira Costa

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

Dr. Raimundo Sampaio Neto

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

Dr. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 11 de Abril de 2008

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

Eleonora Alves Manhães de Andrade

Graduou-se em Engenharia de Telecomunicações pela Universidade Federal Fluminense

Ficha Catalográfica

Andrade, Eleonora Alves Manhães de

Consideração Conjunta da Atenuação por Chuvas e de Interferências Externas na Estimação dos Parâmetros de Desempenho de Enlaces Digitais Terrestres / Eleonora Alves Manhães de Andrade; orientador: José Mauro Pedro Fortes. - 2008.

98 f: il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008
Inclui bibliografia.

1. Engenharia Elétrica – Teses. 2. Disponibilidade. 3. Desempenho de erro. 4. Métodos de Predição. 5. Análise conjunta.
I. Fortes, José Mauro Pedro. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Agradecimentos

Ao meu professor José Mauro Fortes, pela orientação neste estudo.

Aos meus pais e familiares, pelo apoio e incentivo.

Aos colegas da PUC, pela companhia e apoio nos momentos de dúvidas e necessidades.

À CAPES, ao CNPq e à PUC-Rio, pelo auxílio concedido.

Resumo

Andrade, Eleonora Alves Manhães de; Fortes, José Mauro Pedro. **Consideração Conjunta da Atenuação por Chuvas e de Interferências Externas na Estimação dos Parâmetros de Desempenho de Enlaces Digitais Terrestres**. Rio de Janeiro, 2008. 98p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Recomendações específicas da União Internacional de Telecomunicações estabelecem objetivos de desempenho para enlaces de comunicações digitais terrestres. Esses objetivos impõem restrições a parâmetros tais como a taxa de segundos errados, a taxa de segundos severamente errados e a taxa de erro de bloco de fundo, a partir dos quais se define a disponibilidade do enlace. Os valores destes parâmetros são afetados por diversos fatores de degradação, sendo os principais deles a atenuação devido a chuvas e a interferências. Neste estudo é apresentada uma metodologia para a estimação destes parâmetros que considera, de forma conjunta, os efeitos devidos a essas degradações. O estudo considera, de forma analítica, as relações entre os diversos parâmetros envolvidos, e a caracterização estatística de cada um deles. Resultados numéricos ilustram o uso dos estimadores desenvolvidos no trabalho em situações de interesse prático.

Palavras-chave

Disponibilidade. Desempenho de erro. Métodos de Predição. Análise conjunta.

Abstract

Andrade, Eleonora Alves Manhães de; Fortes, José Mauro Pedro. **Joint Effect of Rain Attenuation and Interference in the Estimation of Fixed Service Link Performance Parameters**. Rio de Janeiro, 2008. 98p. MsC Thesis — Department of Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Specific recommendations published by The International Telecommunications Union establish performance objectives for digital communication links. These objectives impose constraints to parameters like the errored second rate, the severely errored second rate and the background block error ratio. Based on these parameters is defined the link availability. The values of these parameters are affected by various degradation factors, being the attenuation due to rain and external interferences the principal ones. This study presents a methodology to estimate the performance parameters for the parameters that jointly considers the effects due to these two degradations and uses analytical relations among the parameters involved as well as their statistical characterization. Numerical results illustrate the use of the developed estimators in situations of practical interest.

Keywords

Availability. Error Performance. Prediction Methods. Joint Analysis.

Sumário

1	Introdução	12
2	Descrição do Problema	14
2.1	Definição dos Parâmetros de Desempenho de Erro	14
2.2	Relacionamento entre as variáveis aleatórias r_{eb} , r_{es} , r_{ses} e r_{bbe} e b	18
3	Estimativa dos Parâmetros de desempenho de erro	30
3.1	Efeito da atenuação devida à chuva	37
3.2	Efeito da degradação devida à chuva e à interferência externa	40
4	Resultados Numéricos	44
4.1	Caso 1: Receptor localizado na latitude $20^{\circ}S$	46
4.2	Caso 2: Receptor localizado na latitude 0°	61
4.3	Caso 3: Receptor localizado na latitude $20^{\circ}N$	75
5	Conclusões	89
	Referências Bibliográficas	91
A	Cálculo do valor esperado de uma variável aleatória a partir de sua Função Distribuição de Probabilidade	93
B	Limitantes para o valor esperado de variáveis aleatórias não negativas definidas em um intervalo finito, quando a FDPC não é conhecida em todo o intervalo	95
C	Função Distribuição de Probabilidade Cumulativa da atenuação devida à chuva.	97
C.1	Estatística anual da atenuação devida à chuva	97
C.2	Estatística da atenuação devida à chuva para o pior mês	98

Lista de figuras

2.1	Taxa de erro de bit para sistemas QPSK	16
2.2	Taxa de erro de bit para sistemas QAM-M	17
2.3	Probabilidade de bloco errado r_{eb} para $N_B = 801$ e $\alpha = 10$	19
2.4	Probabilidade de segundo errado r_{es} para $N_B = 801$, $\alpha = 10$ e $n = 192000$	21
2.5	Probabilidade de segundo severamente errado r_{ses} para $\alpha = 10$	23
2.6	Probabilidade de bloco errado de fundo r_{bbe} para $\alpha = 10$	28
2.7	Variáveis r_{eb} , r_{es} , r_{ses} e r_{bbe} como função da taxa de erro de bit b para $\alpha = 10$, $n = 2000$ e $N_B = 3424$	29
3.1	Probabilidade de bloco errado de fundo r_{bbe}	33
3.2	Relação entre a Taxa de Erro de Bit e o fator de degradação para a modulação QPSK	35
3.3	Relação entre a Taxa de Erro de Bit e o fator de degradação para a modulação QAM-128	36
4.1	Função Distribuição Cumulativa de x para latitude de $20^\circ S$ e longitude de 300°	48
4.2	Função Densidade de Probabilidade ($p_y(\gamma)$) e Função Distribuição de Probabilidade Cumulativa ($C_y(\gamma)$) de y para latitude de $20^\circ S$ e longitude de 300° (Estrutura orbital A)	49
4.3	Função Distribuição Cumulativa de z para latitude de $20^\circ S$ e longitude de 300° (Estrutura orbital A)	50
4.4	FDPC das variáveis aleatórias r_{eb} , r_{es} , r_{ses} e r_{bbe} para latitude de $20^\circ S$, longitude de 300° (Estrutura orbital A e modulação QPSK) e $(E_b/N_0)_{cs[dB]} = 39$ dB (curva sólida : chuva, curva tracejada : chuva e interferência)	51
4.5	FDPC das variáveis aleatórias r_{eb} , r_{es} , r_{ses} e r_{bbe} para latitude de $20^\circ S$, longitude de 300° (Estrutura orbital A e modulação QAM-128) e $(E_b/N_0)_{cs[dB]} = 49$ dB (curva sólida : chuva, curva tracejada : chuva e interferência)	51
4.6	Taxa de bloco errado para latitude de $20^\circ S$ e longitude de 300° e Estrutura orbital A	52
4.7	Taxa de segundo errado para latitude de $20^\circ S$ e longitude de 300° e Estrutura orbital A	53
4.8	Taxa de segundo severamente errado para latitude de $20^\circ S$ e longitude de 300° e Estrutura orbital A	53
4.9	Taxa de bloco errado de fundo para latitude de $20^\circ S$ e longitude de 300° e Estrutura orbital A	54
4.10	Função Densidade de Probabilidade ($p_y(\gamma)$) e Função Distribuição Cumulativa ($C_y(\gamma)$) de y para latitude de $20^\circ S$ e longitude de 300° (Estrutura orbital B)	55
4.11	Função Distribuição Cumulativa de z para latitude $20^\circ S$ e longitude 300° (Estrutura orbital B)	56
4.12	FDPC das variáveis aleatórias r_{eb} , r_{es} , r_{ses} e r_{bbe} para latitude $20^\circ S$, longitude 300° (Estrutura orbital B e modulação QPSK) e $(E_b/N_0)_{cs[dB]} = 39$ dB (curva sólida : chuva, curva tracejada : chuva e interferência)	57
4.13	FDPC das variáveis aleatórias r_{eb} , r_{es} , r_{ses} e r_{bbe} para latitude $20^\circ S$, longitude 300° (Estrutura orbital B e modulação QAM-128) e $(E_b/N_0)_{cs[dB]} = 49$ dB (curva sólida : chuva, curva tracejada : chuva e interferência)	57
4.14	Taxa de bloco errado para latitude $20^\circ S$ e longitude 300° e Estrutura orbitl B	58

4.15	Taxa de segundo errado para latitude $20^\circ S$ e longitude 300° e Estrutura orbitl B	59
4.16	Taxa de segundo severamente errado para latitude $20^\circ S$ e longitude 300° e Estrutura orbitl B	59
4.17	Taxa de bloco errado de fundo para latitude $20^\circ S$ e longitude 300° e Estrutura orbitl B	60
4.18	Função Distribuição Cumulativa de x para latitude de 0° e longitude de 310°	62
4.19	Função Densidade de Probabilidade ($p_y(\gamma)$) e Função Distribuição Cumulativa ($p_y(\gamma)$) de y para latitude de 0° e longitude de 310° (Estrutura orbital A)	63
4.20	Função Distribuição Cumulativa de z para latitude 0° e longitude 310° (Estrutura orbital A)	64
4.21	FDPC das variáveis aleatórias r_{eb} , r_{es} , r_{ses} e r_{bbe} para latitude 0° , longitude 310° (Estrutura orbital A e modulação QPSK) e $(E_b/N_0)_{cs[dB]} = 39$ dB (curva sólida : chuva, curva tracejada : chuva e interferência)	65
4.22	FDPC das variáveis aleatórias r_{eb} , r_{es} , r_{ses} e r_{bbe} para latitude 0° , longitude 310° (Estrutura orbital A e modulação QAM-128) e $(E_b/N_0)_{cs[dB]} = 49$ dB (curva sólida : chuva, curva tracejada : chuva e interferência)	65
4.23	Taxa de bloco errado para latitude 0° e longitude 310° e Estrutura orbital A	66
4.24	Taxa de segundo errado para latitude 0° e longitude 310° e Estrutura orbital A	67
4.25	Taxa de segundo severamente errado para latitude 0° e longitude 310° e Estrutura orbital A	67
4.26	Taxa de bloco errado de fundo para latitude 0° e longitude 310° e Estrutura orbital A	68
4.27	Função Densidade de Probabilidade ($p_y(\gamma)$) e Função Distribuição Cumulativa ($p_y(\gamma)$) de y para latitude de 0° e longitude de 310° (Estrutura orbital B)	69
4.28	Função Distribuição Cumulativa de z para latitude 0° e longitude 310° (Estrutura orbital B)	70
4.29	FDPC das variáveis aleatórias r_{eb} , r_{es} , r_{ses} e r_{bbe} para latitude 0° , longitude 310° (Estrutura orbital B e modulação QPSK) e $(E_b/N_0)_{cs[dB]} = 39$ dB (curva sólida : chuva, curva tracejada : chuva e interferência)	71
4.30	FDPC das variáveis aleatórias r_{eb} , r_{es} , r_{ses} e r_{bbe} para latitude 0° , longitude 310° (Estrutura orbital B e modulação QAM-128) e $(E_b/N_0)_{cs[dB]} = 49$ dB (curva sólida : chuva, curva tracejada : chuva e interferência)	71
4.31	Taxa de bloco errado para latitude 0° e longitude 310° e Estrutura orbital B	72
4.32	Taxa de segundo errado para latitude 0° e longitude 310° e Estrutura orbital B	73
4.33	Taxa de segundo severamente errado para latitude 0° e longitude 310° e Estrutura orbital B	73
4.34	Taxa de bloco errado de fundo para latitude 0° e longitude 310° e Estrutura orbital B	74
4.35	Função Distribuição Cumulativa de x para latitude de $20^\circ N$ e longitude de 77°	76
4.36	Função Densidade de Probabilidade ($p_y(\gamma)$) e Função Distribuição Cumulativa ($p_y(\gamma)$) de y para latitude de $20^\circ N$ e longitude de 77° (Estrutura orbital A)	77
4.37	Função Distribuição Cumulativa de z para latitude $20^\circ N$ e longitude 77° (Estrutura orbital A)	78
4.38	FDPC das variáveis aleatórias r_{eb} , r_{es} , r_{ses} e r_{bbe} para latitude $20^\circ N$, longitude 77° (Estrutura orbital A e modulação QPSK) e $(E_b/N_0)_{cs[dB]} = 39$ dB (curva sólida : chuva, curva tracejada : chuva e interferência)	79

4.39	FDPC das variáveis aleatórias r_{eb} , r_{es} , r_{ses} e r_{bbe} para latitude $20^\circ N$, longitude 77° (Estrutura orbital A e modulação QAM-128) e $(E_b/N_0)_{cs[dB]} = 49$ dB (curva sólida : chuva, curva tracejada : chuva e interferência)	79
4.40	Taxa de bloco errado para latitude $20^\circ N$ e longitude 77° e Estrutura orbital A	80
4.41	Taxa de segundo errado para latitude $20^\circ N$ e longitude 77° e Estrutura orbital A	81
4.42	Taxa de segundo severamente errado para latitude $20^\circ N$ e longitude 77° e Estrutura orbital A	81
4.43	Taxa de bloco errado de fundo para latitude $20^\circ N$ e longitude 77° e Estrutura orbital A	82
4.44	Função Densidade de Probabilidade ($p_y(\gamma)$) e Função Distribuição Cumulativa ($P_y(\gamma)$) de y para latitude de $20^\circ N$ e longitude de 77° (Estrutura orbital B)	83
4.45	Função Distribuição Cumulativa de z para na latitude de $20^\circ N$ e longitude de 77° (Estrutura orbital B)	84
4.46	FDPC das variáveis aleatórias r_{eb} , r_{es} , r_{ses} e r_{bbe} para latitude $20^\circ N$, longitude 77° (Estrutura orbital B e modulação QPSK) e $(E_b/N_0)_{cs[dB]} = 39$ dB (curva sólida : chuva, curva tracejada : chuva e interferência)	85
4.47	FDPC das variáveis aleatórias r_{eb} , r_{es} , r_{ses} e r_{bbe} para latitude $20^\circ N$, longitude 77° (Estrutura orbital B e modulação QAM-128) e $(E_b/N_0)_{cs[dB]} = 49$ dB (curva sólida : chuva, curva tracejada : chuva e interferência)	85
4.48	Taxa de bloco errado para latitude $20^\circ N$ e longitude 77° e Estrutura orbital B	86
4.49	Taxa de segundo errado para latitude $20^\circ N$ e longitude 77° e Estrutura orbital B	87
4.50	Taxa de segundo severamente errado para latitude $20^\circ N$ e longitude 77° e Estrutura orbital B	87
4.51	Taxa de bloco errado de fundo para latitude $20^\circ N$ e longitude 77° e Estrutura orbital B	88

Lista de tabelas

2.1	<i>Valores de n (blocos/s) e N_B (bits/bloco) para links do sistema SDH</i>	24
2.2	<i>Valores de n (blocos/s) e N_B (bits/bloco) para links do sistema PDH</i>	24
4.1	<i>Localização dos receptores</i>	44
4.2	<i>Características do enlace terrestre</i>	44
4.3	<i>Características técnicas dos sistemas HEO</i>	45

1

Introdução

Os requisitos de desempenho de sistemas de transmissão digital são especificados sob dois aspectos: disponibilidade e desempenho de erro. A disponibilidade é definida como a percentagem de tempo em que o sistema se encontra disponível para transmitir informação. O desempenho de erro é avaliado em termos da quantidade de erros que ocorrem enquanto o sistema estiver disponível [1].

A União Internacional de Telecomunicações publicou uma série de recomendações que definem objetivos para o desempenho de erro e disponibilidade de sistemas de comunicação digital. A recomendação ITU-R G.821 [3], utilizada por muitos anos para avaliação de desempenho de sistemas operando abaixo da taxa primária, estabelece requisitos para parâmetros de qualidade baseados na taxa de erro de bit (BER). A Recomendação ITU-R G.826 [7] estabelece objetivos de desempenho para sistemas que operem na taxa primária ou acima dela. Tais objetivos impõem restrições a parâmetros baseados em blocos, tais como a taxa de segundo errado (ESR), a taxa de segundo severamente errado (SESR) e a taxa de erro de bloco de fundo (BBER).

Os requisitos de desempenho estabelecidos pelas recomendações da série G são referentes ao Circuito Hipotético de Referência de 27500 km (*HRP-Hypothetical Reference Path*) e não são aplicados diretamente a enlaces de rádio digital. Assim, a Seção de Radiocomunicação da ITU (ITU-R) produziu a série F de recomendações para lidar com o desempenho destes enlaces [6].

Para avaliar se os objetivos de desempenho estabelecidos nas recomendações da ITU são atendidos, os parâmetros aos quais as restrições são impostas devem ser estimados. A Recomendação ITU-R F.1605 [8] propõe métodos de estimação de desempenho de erro e disponibilidade para enlaces de rádio. Estes métodos se baseiam em relações teóricas entre os parâmetros de desempenho baseados em erros de bloco e a taxa de erro de bit e são próprios para a predição dos parâmetros de desempenho de erro e disponibilidade na presença de atenuação por chuva e propagação em multipercurso. Os efeitos desses fatores de propagação no desempenho do enlace são analisados individualmente. A caracterização estatística desses fatores, necessária na estimação dos parâmetros, é determinada a partir de métodos de predição contidos na Recomendação ITU-R P.530-11 [10].

O desempenho de erro, quantificado neste estudo pelas taxas EBR, SER, SESR e BBER, pode ser deteriorado por fatores como condições de propagação, interferências externas, entre outros. Como o efeito desses fatores varia no tempo, a estimação dos parâmetros que indicam o desempenho deve ser baseada em análises estatísticas.

Neste trabalho, são propostas metodologias de estimação dos parâmetros de erro na presença simultânea de chuva e interferência externa, duas importantes fontes de degradação para enlaces do sistema fixo terrestre. A metodologia apresentada baseia-se em um enfoque probabilístico, no qual as probabilidades de ocorrência dos diversos parâmetros de desempenho de erro são modeladas como variáveis aleatórias. Além disso, ela considera conjuntamente os efeitos de chuva e interferências externas nas estimativas dos parâmetros de desempenho de erro. Estes fatores constituem características originais do trabalho realizado.

De modo a evidenciar o efeito agregado de chuvas e interferências externas, optou-se por, primeiramente, avaliar o efeito por chuvas. Em seguida, considerou-se, através de uma modelagem conjunta, os efeitos das degradações devidas a chuvas e interferências externas.

No Capítulo 2, serão citados os conceitos relativos a desempenho de erro e disponibilidade estabelecidos em Recomendações da ITU e utilizados neste estudo. Serão ainda apresentados os modelos utilizados na definição de relações teóricas entre eventos de erro de bloco e a taxa de erro de bit. As metodologias de estimação dos parâmetros são definidas no Capítulo 3, para as modelagens conjunta e individual dos efeitos das degradações. No Capítulo 4, são apresentados os resultados numéricos gerados pela aplicação destas metodologias em casos de interesse prático.

2

Descrição do Problema

Os requisitos de desempenho para enlaces de comunicação digital estabelecidos por recomendações da ITU impõem restrições a parâmetros de desempenho de erro e disponibilidade. A Recomendação ITU-T G.826 [7] especifica e define esses parâmetros com base em erros de bloco. De acordo com esta Recomendação, um bloco é um "conjunto de bits consecutivos associados ao caminho; cada bit pertence a um e somente um bloco".

Os conceitos utilizados neste trabalho para a análise de desempenho de erro de enlaces de sistemas de comunicação digital, definidos na Recomendação G.826, estão apresentados a seguir.

2.1

Definição dos Parâmetros de Desempenho de Erro

Os parâmetros de desempenho de erro são especificados a partir de fatores denominados eventos de erro e são definidos com base na frequência com que os erros ocorrem. Estes eventos e suas definições [7] são citados a seguir

1. Bloco Errado (Errored Block-EB): "Um bloco no qual um ou mais bits estejam errados".
2. Segundo Errado (Errored Second-ES): "Período de um segundo com um ou mais blocos errados ou pelo menos um defeito".
3. Segundo Severamente Errado (Severely Errored Second-SES): "Período de um segundo que contenha $\geq 30\%$ de blocos errados ou pelo menos um defeito".
4. Bloco Errado de Fundo (Background Block Error-BBE): "Um bloco errado que não ocorre como parte de um SES".

Os parâmetros de desempenho de erro definidos na Recomendação G.826 são os seguintes

1. Taxa de Segundo Errado (Errored Second Rate-ESR): "Razão entre ES e o total de segundos no período de disponibilidade durante um intervalo de medida".

2. Taxa de Segundo Severamente Errado (Severely Errored Second rate-SESR): "Razão entre SES e o total de segundos no período de disponibilidade durante um intervalo de medida".
3. Taxa de Bloco Errado de Fundo(Background Block Error Rate-BBER): "Razão entre BBE e o total de segundos no período de disponibilidade durante um intervalo de medida. A contagem do total de blocos exclui todos os blocos durante SESs".

Um sistema pode estar nos estados de disponibilidade ou de indisponibilidade. A Recomendação G.826 apresenta critérios de entrada e saída desses estados que dependem da ocorrência consecutiva de eventos SES . Um período de indisponibilidade tem como marco inicial, a situação onde há 10 eventos consecutivos de SES, os quais fazem parte do tempo de indisponibilidade. O sistema sai do estado de indisponibilidade quando há uma sequência de 10 eventos não-SES consecutivos, os quais pertencem ao período de disponibilidade.

Pelas definições apresentadas, observa-se que os parâmetros de desempenho de erro são definidos como taxas referentes à ocorrência dos eventos de erro de bloco.

No presente estudo, tais parâmetros serão estimados por uma metodologia onde as probabilidades dos eventos de erro EB, ES e SES, bem como a taxa de BBE são modeladas por variáveis aleatórias.

São, então, definidas as seguintes variáveis aleatórias

1. r_{eb} : Probabilidade de bloco errado
2. r_{es} : Probabilidade de segundo errado
3. r_{ses} : Probabilidade de segundo severamente errado
4. r_{bbe} : Taxa de bloco errado de fundo

A motivação para este enfoque é apresentada a seguir.

A taxa de erro de bit (BER) depende do nível de sinal e do nível do ruído térmico na entrada do receptor. Mais especificamente, a BER depende da razão entre a energia por bit e o nível espectral de potência do ruído térmico (E_b/N_0). Esta dependência é uma característica do sistema que está ligada à modulação utilizada.

Para modulação QPSK, utilizando codificação de Gray, a relação entre BER e E_b/N_0 é dada por [4]

$$BER = Q \left(\sqrt{2 \left(\frac{E_b}{N_0} \right)} \right) \quad (2-1)$$

onde a função Q é definida por

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

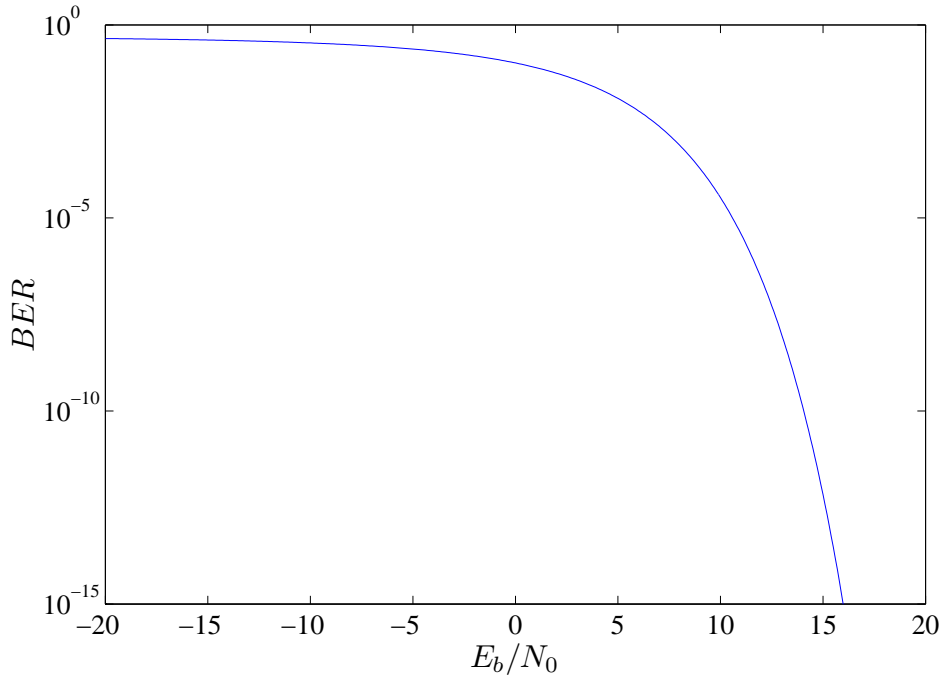


Figura 2.1: Taxa de erro de bit para sistemas QPSK

E para a modulação QAM-M, utilizando codificação de Gray, a relação pode ser aproximada [4] por

$$BER = \frac{4(\sqrt{M} - 1)}{\sqrt{M} \log_2 M} Q \left(\sqrt{\frac{3 \log_2 M}{(M - 1)} \frac{E_b}{N_0}} \right) \quad (2-3)$$

As Figuras 2.1 e 2.2 ilustram a taxa de erro de bit como função da razão E_b/N_0 para as modulações QPSK e QAM-M, respectivamente.

As imperfeições do canal de transmissão (por exemplo, atenuação por chuvas e interferências) causam degradações na razão E_b/N_0 . Assim, considerando-se as imperfeições, esta razão, aqui denotada por E , se escreve

$$E = \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_{CS} \frac{1}{Z} \quad (2-4)$$

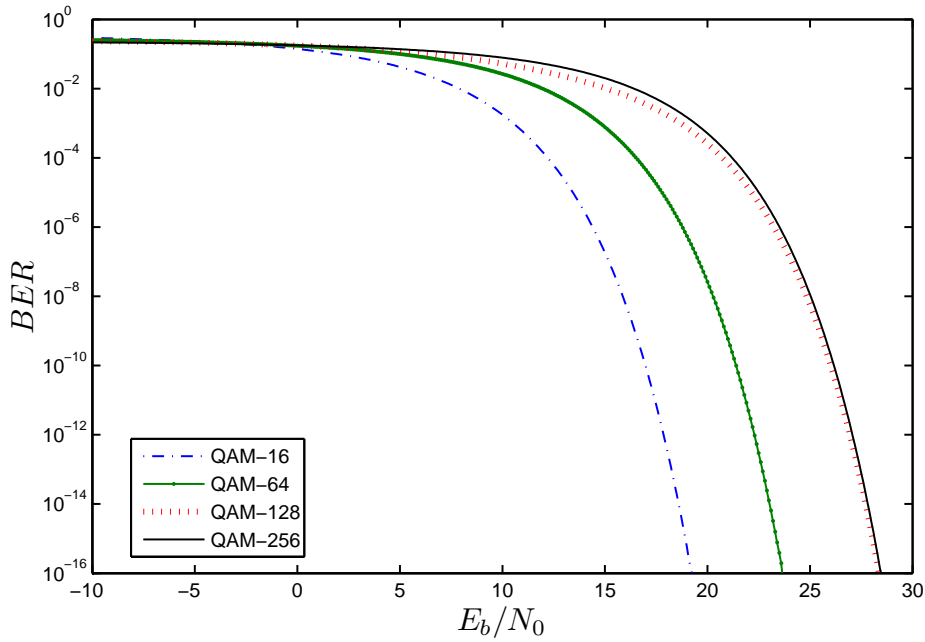


Figura 2.2: Taxa de erro de bit para sistemas QAM-M

Em (2-4), Z corresponde ao fator de degradação devida às imperfeições consideradas e $(E_b/N_0)_{CS}$ é a relação Energia por bit/Nível espectral do ruído térmico em condições de céu claro (*Clear Sky*). Quando expressa em dB, (2-4) se escreve

$$e = \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_{CS_{[dB]}} - z = f(z) \quad (2-5)$$

onde e e z correspondem aos valores E e Z expressos em dB, respectivamente .

Neste trabalho, são consideradas as degradações da razão E_b/N_0 devidas ao efeito de chuvas e de interferências externas. Dada a natureza aleatória dessas duas quantidades, o fator de degradação z será modelado por uma variável aleatória cujo comportamento estatístico depende das imperfeições do canal consideradas.

A partir de (2-4) e (2-5) é possível reescrever (2-1) como

$$BER = Q \left(\sqrt{2 \left(\frac{E_b}{N_0} \right)} \right) = Q \left(\sqrt{2 \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_{CS} \frac{1}{10^{z/10}}} \right) \quad (2-6)$$

De maneira análoga, (2-3) se escreve

$$BER = \frac{4(\sqrt{M} - 1)}{\sqrt{M} \log_2 M} Q \left(\sqrt{\frac{3 \log_2 M}{(M - 1)} \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_{CS} \frac{1}{10^{z/10}}} \right) \quad (2-7)$$

Note que, sendo função da variável aleatória z , a taxa de erro de bit (BER) é também aleatória, sendo aqui representada pela variável aleatória b . Assim,

$$b = Q \left(\sqrt{2 \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_{CS} \frac{1}{10^{z/10}}} \right) = g_1(z) \quad (2-8)$$

no caso da modulação QPSK, e

$$b = \frac{4(\sqrt{M} - 1)}{\sqrt{M} \log_2 M} Q \left(\sqrt{\frac{3 \log_2 M}{(M - 1)} \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_{CS} \frac{1}{10^{z/10}}} \right) = g_2(z) \quad (2-9)$$

no caso de modulações QAM-M.

O comportamento estatístico da taxa de erro de bit b , caracterizado, por exemplo, por sua Função Densidade de Probabilidade $p_b(B)$ ou por sua Função Distribuição de Probabilidade $F_b(B)$, será definido a partir do comportamento estatístico do fator de degradação z e do relacionamento em (2-8) ou (2-9).

Como as probabilidades dos eventos de erro EB, ES e SES, bem como a taxa de BBE dependem da taxa de erro de bit, elas serão também variáveis aleatórias. O relacionamento entre essas variáveis aleatórias e a taxa de erro de bit b serão apresentadas na seção que se segue.

2.2

Relacionamento entre as variáveis aleatórias r_{eb} , r_{es} , r_{ses} e r_{bbe} e b

As variáveis r_{eb} , r_{es} e r_{ses} , que representam probabilidades de ocorrência dos eventos de erro EB, ES e SES, assim como a variável r_{bbe} , que representa a taxa de blocos errados de fundo, serão relacionadas à taxa de erro de bit b por um modelo que considera a ocorrência de erros em surto segundo uma distribuição de Poisson.

Relacionamento entre as variáveis r_{eb} e b

A probabilidade de bloco errado será definida a partir do modelo de ocorrência de erros em surto apresentado em [5], que considera um número médio de erros por surto α .

De acordo com este modelo, a probabilidade de ocorrência de erro de bloco é expressa por

$$r_{eb} = 1 - e^{(-N_B b / \alpha)} = f_1(b) \quad (2-10)$$

onde N_B é o número de bits por bloco.

Valores típicos de erros por surto (α) variam entre 10 e 20 [8].

Para valores de $N_B b / \alpha \ll 1$, a relação (2-10) pode ser simplificada utilizando-se os 2 primeiros termos da expansão em série de Taylor da função $e^{-N_B b / \alpha}$, ou seja, utilizando-se

$$e^{-N_B b / \alpha} \approx 1 - \frac{N_B b}{\alpha} \quad (2-11)$$

A probabilidade r_{eb} é, então, aproximada [5] por

$$r_{eb} \approx 1 - \left(1 - \frac{N_B b}{\alpha}\right) \approx \frac{N_B b}{\alpha} \quad (2-12)$$

A Figura 2.3 ilustra a curva aproximada e a calculada por (2-10) para $N_B = 801$ e $\alpha = 10$.

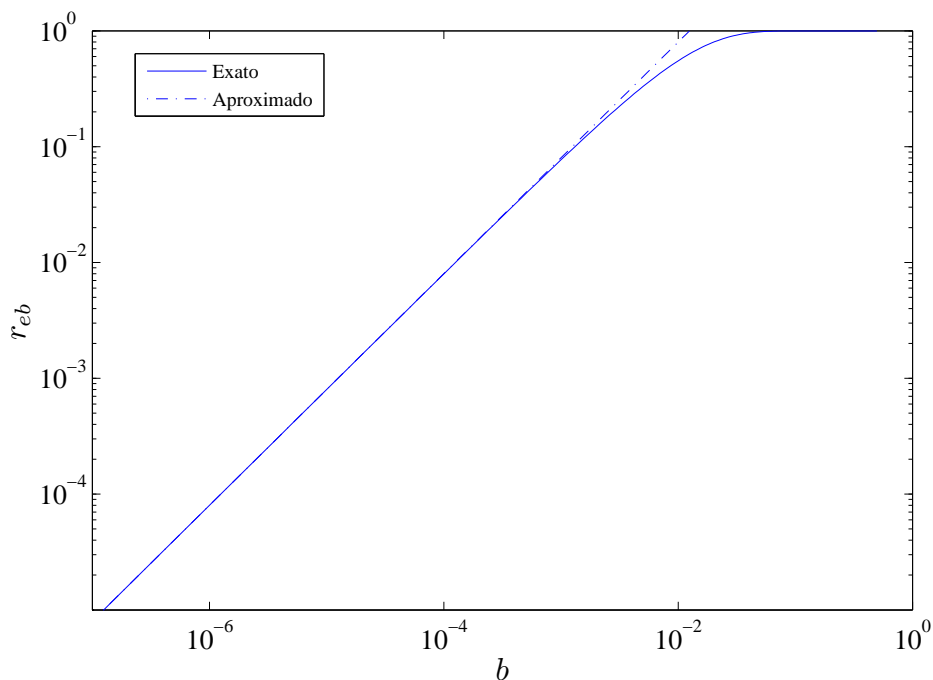


Figura 2.3: Probabilidade de bloco errado r_{eb} para $N_B = 801$ e $\alpha = 10$

Relacionamento entre as variáveis r_{es} e r_{eb}

Seja w a variável aleatória que caracteriza o número de blocos errados em um segundo. Esta quantidade é aqui modelada por uma variável aleatória de Poisson com parâmetro γ , onde γ é o número médio de blocos errados em um segundo. A probabilidade de haver k blocos errados em um segundo é, então, dada por

$$P(w = k) = \frac{\gamma^k e^{-\gamma}}{k!} \quad (2-13)$$

Note que, sendo n o número de blocos por segundo, o parâmetro γ é dado por $\gamma = nr_{eb}$.

Pela definição, para que haja um segundo errado, é necessário que pelo menos um dos seus blocos contenha erro. Assim, a probabilidade de segundo errado r_{es} é expressa por

$$\begin{aligned} r_{es} &= 1 - P(w = 0) = 1 - \frac{\gamma^0 e^{-\gamma}}{0!} \\ &= 1 - e^{-nr_{eb}} = h_2(r_{eb}) \end{aligned} \quad (2-14)$$

Substituindo a expressão (2-10) de r_{eb} em (2-14), chega-se a

$$r_{es} = 1 - e^{-n(1 - e^{(-nN_B b/\alpha)})} = f_2(b) \quad (2-15)$$

Utilizando a aproximação em (2-12), obtém-se a expressão aproximada de r_{es}

$$r_{es} \approx 1 - e^{(-nN_B b/\alpha)} \quad (2-16)$$

Note que a equação acima é válida para $N_B b/\alpha \ll 1$.

A variável aleatória r_{es} representa a probabilidade de haver segundo errado e, como expresso em (2-14), depende da probabilidade de bloco errado r_{eb} . A relação entre r_{es} e r_{eb} está ilustrada na Figura 2.4 para $N_B = 801$, $\alpha = 10$ e $n = 192000$.

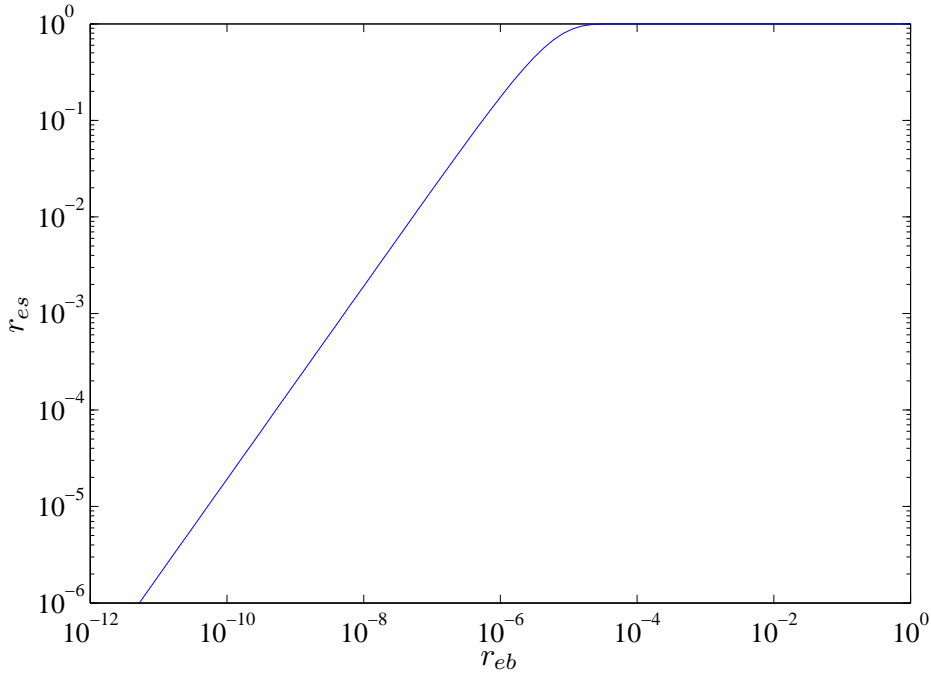


Figura 2.4: Probabilidade de segundo errado r_{es} para $N_B = 801$, $\alpha = 10$ e $n = 192000$

Relacionamento entre as variáveis r_{ses} e r_{eb}

Na determinação de uma relação teórica entre as variáveis r_{ses} e b , será utilizado, como em [5], um modelo de distribuição binomial para representar o número de blocos errados por segundo y . De acordo com este modelo, sendo n o número de blocos por segundo, a probabilidade de haver k blocos errados em um segundo é dada por

$$P(y = k) = r_{eb}^k (1 - r_{eb})^{(n-k)} \frac{n!}{k!(n-k)!}, \quad k = 1, \dots, n \quad (2-17)$$

Pela definição de segundo severamente errado, apresentada anteriormente, para que um evento de SES ocorra, o número de blocos errados deve ser igual ou superior a 30% do total de blocos no período de um segundo, ou seja, a probabilidade de ocorrer um evento SES é a probabilidade de $y \geq 0,3n$.

$$r_{ses} = P(y \geq 0,3n) = \sum_{k=0,3n}^n P(y = k) \quad (2-18)$$

Aplicando (2-17) em (2-18), obtém-se

$$r_{ses} = \sum_{k=0,3n}^n r_{eb}^k (1 - r_{eb})^{(n-k)} \frac{n!}{k!(n-k)!} \quad (2-19)$$

A equação acima pode ser aproximada pela integral de uma função normal com média μ e variância σ^2 [5], cujas expressões são apresentadas a seguir

$$\mu = nr_{eb} \quad (2-20)$$

$$\sigma^2 = nr_{eb}(1 - r_{eb}) \quad (2-21)$$

Essa aproximação é válida para $nr_{eb}(1 - r_{eb}) \gg 1$.

A variável r_{ses} é, então, dada por

$$r_{ses} = \int_{0,3n}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sqrt{nr_{eb}(1 - r_{eb})}} e^{-(Y - nr_{eb})^2 / 2nr_{eb}(1 - r_{eb})} dY \quad (2-22)$$

Através da mudança de variável

$$\alpha = \frac{Y - nr_{eb}}{\sqrt{nr_{eb}(1 - r_{eb})}} \quad (2-23)$$

chega-se a seguinte expressão para a variável r_{ses}

$$r_{ses} = \int_a^b \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\alpha^2/2} d\alpha \quad (2-24)$$

onde

$$a = \frac{n(0,3 - r_{eb})}{\sqrt{nr_{eb}(1 - r_{eb})}} \quad (2-25)$$

$$b = \frac{n(1 - r_{eb})}{\sqrt{nr_{eb}(1 - r_{eb})}} \quad (2-26)$$

Pela definição da função Q em (2-2), obtém-se

$$r_{ses} = Q\left(\frac{\sqrt{n}(0,3 - r_{eb})}{\sqrt{r_{eb}(1 - r_{eb})}}\right) - Q\left(\frac{\sqrt{n}(1 - r_{eb})}{\sqrt{r_{eb}(1 - r_{eb})}}\right) = h_3(r_{eb}) \quad (2-27)$$

A relação entre as variáveis r_{eb} e b ($r_{eb} = f_1(b)$), expressa em (2-10) permite que (2-27) seja reescrita como

$$r_{ses} = Q\left(\frac{\sqrt{n}(0,3 - f_1(b))}{\sqrt{f_1(b)(1 - f_1(b))}}\right) - Q\left(\frac{\sqrt{n}(1 - f_1(b))}{\sqrt{f_1(b)(1 - f_1(b))}}\right) = f_3(b) \quad (2-28)$$

Para valores de r_{eb} acima de 0,3, intervalo no qual pode ocorrer segundo severamente errado, a segunda parcela da equação acima é muito inferior à primeira. Dessa forma, r_{ses} pode ser aproximada por

$$r_{ses} \approx Q \left(\frac{\sqrt{n}(0,3 - r_{eb})}{\sqrt{r_{eb}(1 - r_{eb})}} \right) \quad (2-29)$$

A Figura 2.5 apresenta a relação de funcionalidade entre r_{ses} e r_{eb} para valores de n iguais a 2000 e 192000. Encontra-se ainda ilustrado nesta figura, o valor R_{eb}^{ses} de r_{eb} que corresponde a $r_{ses} = 1$, ou seja, R_{eb}^{ses} satisfaz à equação

$$h_3(R_{eb}^{ses}) = 1 \quad (2-30)$$

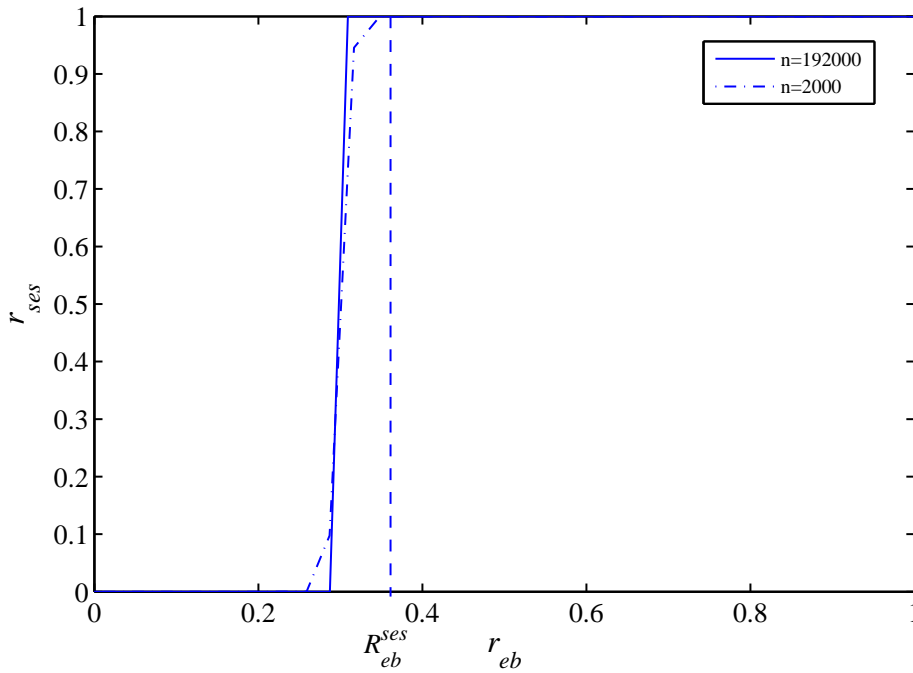


Figura 2.5: Probabilidade de segundo severamente errado r_{ses} para $\alpha = 10$

Note que a medida que n cresce, $h_3(r_{eb})$ tende a uma função degrau centrada em 0,3. A taxa de erro de bit B^{ses} , correspondente a esse valor, ou seja, acima do qual todos os segundos são severamente errados ($r_{ses} = 1$) é dada por

$$0,3 = f_1(B_{ses}) = 1 - e^{(-N_B B^{ses} / \alpha)}$$

$$B^{ses} = -\frac{\alpha}{N_B} \ln(0,7) \quad (2-31)$$

onde $f_1(b)$ é dada por 2-10.

Valores típicos de n (número de blocos por segundo) e N_B (número de bits por bloco) para links dos sistemas SDH e PDH são encontrados nas Tabelas 2.1 e 2.2 [7] [6].

Tabela 2.1: Valores de n (blocos/s) e N_B (bits/bloco) para links do sistema SDH

Taxa de bit(Mbit/s)	Blocos/s (n)	Bits/bloco (N_B)
1,5	2000	832
2	2000	1120
6	2000	3424
34	8000	6120
140	8000	18792
155	192000	801

Tabela 2.2: Valores de n (blocos/s) e N_B (bits/bloco) para links do sistema PDH

Taxa de bit(kbit/s)	Blocos/s (n)	Bits/bloco (N_B)
1544	333	4632
2048	1000	2048
44736	9398	4760

Relacionamento entre as variáveis r_{bbe} e r_{eb}

A variável aleatória r_{bbe} , diferentemente das outras variáveis ligadas a eventos de erro que foram consideradas probabilidades, é definida como uma razão entre o número de blocos errados que não pertencem a um segundo severamente errado e o número total de blocos, com exceção dos blocos que pertencem a um segundo severamente errado.

Por esta definição, sendo $n_{\overline{SES}}$ o número médio de blocos errados em um segundo que não seja SES e sendo n o número de blocos por segundos, a razão de blocos errados de fundo é dada por

$$r_{bbe} = \frac{n_{\overline{SES}}}{n} \quad (2-32)$$

A variável $n_{\overline{SES}}$ será definida por um modelo que considera (2-17), ou seja, que o número y de blocos errados em n blocos é uma variável aleatória binomial.

Para que não haja um evento SES, o número de blocos errados não deve exceder 30% do número total de blocos no período de um segundo, ou seja, $y < 0,3n$. Logo,

para considerar somente os blocos errados que pertencem a segundos que não sejam severamente errados

$$n_{\overline{SES}} = E[y \mid y < 0, 3n] \quad (2-33)$$

Pela definição de valor esperado, $n_{\overline{SES}}$ é calculado por

$$n_{\overline{SES}} = \int_{-\infty}^{\infty} Y p_{y|y<0,3n}(Y) dY \quad (2-34)$$

A densidade de probabilidade da variável binomial y é dada pela equação

$$p_y(Y) = \sum_{k=1}^n \frac{n!}{(n-k)!k!} (r_{eb})^k (1-r_{eb})^{n-k} \delta(Y-k) \quad (2-35)$$

E a densidade condicional $p_{y|y<0,3n}(Y)$ [2] é dada por

$$p_{y|y<0,3n}(Y) = \frac{\frac{d}{dY} P(y \leq Y, y < 0, 3n)}{P(y < 0, 3n)} \quad (2-36)$$

Note que

$$P(y \leq Y, y < 0, 3n) = \begin{cases} P(y \leq Y) & Y < 0, 3n \\ P(y < 0, 3n) & Y \geq 0, 3n \end{cases} \quad (2-37)$$

Conseqüentemente, a densidade de probabilidade condicional $p_{y|y<0,3n}(Y)$ é dada por

$$p_{y|y<0,3n}(Y) = \begin{cases} p_y(Y)/P(y < 0, 3n) & Y < 0, 3n \\ 0 & Y \geq 0, 3n \end{cases} \quad (2-38)$$

Note também que $P(y < 0, 3n) = 1 - r_{ses}$ é a probabilidade de não haver segundo severamente errado.

Aplicando (2-38) e (2-35) em (2-34), é obtida a expressão

$$n_{\overline{SES}} = \frac{1}{1-r_{ses}} \int_{-\infty}^{\infty} Y \sum_{k=1}^{0,3n-1} \frac{n!}{(n-k)!k!} (r_{eb})^k (1-r_{eb})^{n-k} \delta(Y-k) dY \quad (2-39)$$

Retirando da integral os fatores que não dependem de Y

$$n_{\overline{SES}} = \frac{1}{1-r_{ses}} \sum_{k=1}^{0,3n-1} \frac{n!}{(n-k)!k!} (r_{eb})^k (1-r_{eb})^{n-k} \int_{-\infty}^{\infty} Y \delta(Y-k) dY \quad (2-40)$$

E ainda resolvendo a integral em Y , chega-se a expressão para o número médio

de blocos errados de fundo para segundos não severamente errados

$$n_{\overline{SES}} = \frac{1}{1 - r_{ses}} \sum_{k=1}^{0,3n-1} k \frac{n!}{(n-k)!k!} (r_{eb})^k (1 - r_{eb})^{n-k} \quad (2-41)$$

A aproximação da distribuição binomial por uma normal com média μ e variância σ^2 , utilizada para a variável r_{ses} , pode ser aplicada em (2-41). Logo,

$$n_{\overline{SES}} = \frac{1}{1 - r_{ses}} \int_1^{0,3n-1} Y \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-(Y-\mu)^2/2\sigma^2} dY \quad (2-42)$$

Os valores de μ e σ são dados por (2-20) e (2-21), respectivamente.

Fazendo a seguinte mudança de variável

$$\alpha = \frac{Y - \mu}{\sigma} \quad (2-43)$$

obtem-se um valor de $n_{\overline{SES}}$ igual a

$$n_{\overline{SES}} = \frac{1}{1 - r_{ses}} \int_{(1-\mu)/\sigma}^{(0,3n-1-\mu)/\sigma} (\sigma\alpha + \mu) \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\alpha^2/2} d\alpha \quad (2-44)$$

Considerando-se as expressões de μ e σ dadas por (2-20) e (2-21), respectivamente, assim como a expressão em (2-27) chega-se a

$$\begin{aligned} n_{\overline{SES}} &= \frac{\sqrt{nr_{eb}(1-r_{eb})}}{1 - h_3(r_{eb})} \int_{m_1(r_{eb})}^{m_2(r_{eb})} \alpha \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\alpha^2/2} d\alpha \\ &+ \frac{nr_{eb}}{1 - h_3(r_{eb})} \int_{m_1(r_{eb})}^{m_2(r_{eb})} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\alpha^2/2} d\alpha \end{aligned} \quad (2-45)$$

onde

$$\begin{aligned} m_1(r_{eb}) &= \frac{1 - \mu}{\sigma} \\ &= \frac{1 - nr_{eb}}{\sqrt{nr_{eb}(1-r_{eb})}} \end{aligned} \quad (2-46)$$

$$\begin{aligned}
 m_2(r_{eb}) &= \frac{0,3n - 1 - \mu}{\sigma} \\
 &= \frac{n(0,3 - r_{eb}) - 1}{\sqrt{nr_{eb}(1 - r_{eb})}} \quad (2-47)
 \end{aligned}$$

Resolvidas as integrais em (2-45), é determinada a expressão da variável n_{SES}

$$\begin{aligned}
 n_{SES} &= \frac{\sqrt{nr_{eb}(1 - r_{eb})}}{\sqrt{2\pi}(1 - h_3(r_{eb}))} \left(e^{-m_1^2(r_{eb})/2} - e^{-m_2^2(r_{eb})/2} \right) \\
 &+ \frac{nr_{eb}}{1 - h_3(r_{eb})} [Q(m_1(r_{eb})) - Q(m_2(r_{eb}))] \quad (2-48)
 \end{aligned}$$

Substituindo (2-48) em (2-32), obtém-se, finalmente, a expressão para a variável r_{bbe}

$$\begin{aligned}
 r_{bbe} &= \frac{\sqrt{nr_{eb}(1 - r_{eb})}}{n\sqrt{2\pi}(1 - h_3(r_{eb}))} \left(e^{-m_1^2(r_{eb})/2} - e^{-m_2^2(r_{eb})/2} \right) \\
 &+ \frac{r_{eb}}{1 - h_3(r_{eb})} [Q(m_1(r_{eb})) - Q(m_2(r_{eb}))] = h_4(r_{eb}) \quad (2-49)
 \end{aligned}$$

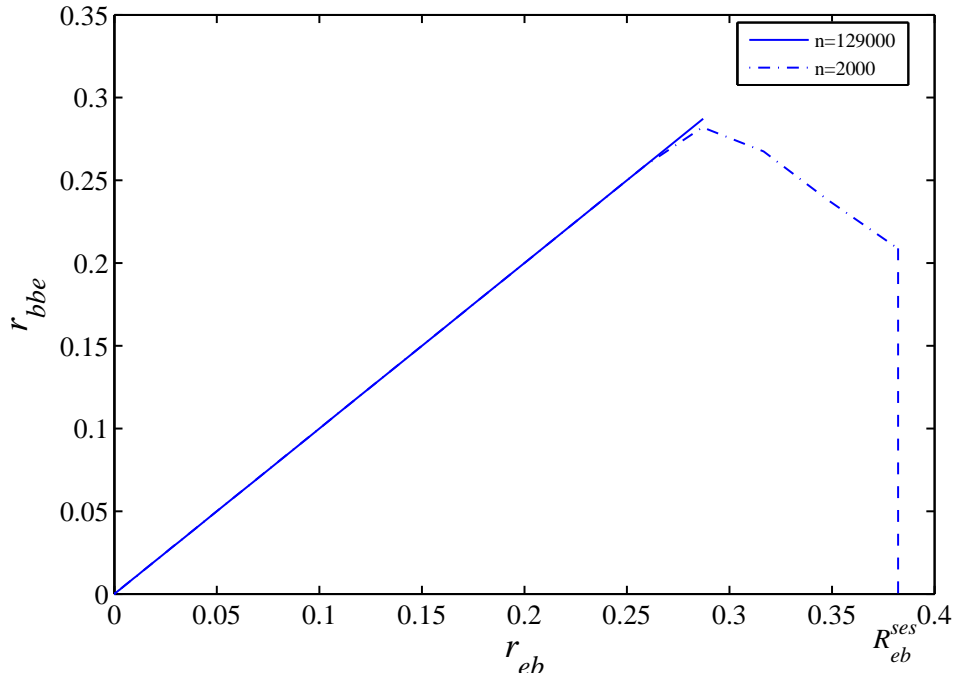
Note que r_{bbe} só é definido se $r_{ses} < 1$. Isto significa que r_{bbe} só é definido para $r_{eb} < R_{eb}^{ses}$, onde R_{eb}^{ses} é solução de (2-30).

Em (2-49), $m_1(r_{eb})$, $m_2(r_{eb})$ e $h_3(r_{eb})$ são dados respectivamente por (2-46), (2-47) e (2-27).

Este resultado permite calcular a razão entre o número de blocos errados em segundos que não sejam severamente errados e o número total de blocos nesses segundos, o que caracteriza a variável r_{bbe} .

A Figura 2.6 ilustra a variável r_{bbe} como função de r_{eb} . Note nesta figura que, quando n é pequeno, existe uma região em torno de $r_{eb} = 0,3n$ onde r_{bbe} decresce. Isto é esperado, uma vez que neste caso a transição de 0 para 1 de r_{ses} não é abrupta, fazendo com que os numeradores em (2-49) decaiam mais rapidamente do que o denominador $(1 - r_{ses})$.

Considerando-se que $r_{eb} = f_1(b)$ e $r_{ses} = f_3(b)$, onde f_1 e f_3 são dados por (2-10) e (2-28), é possível reescrever (2-49) como


 Figura 2.6: Probabilidade de bloco errado de fundo r_{bbe} para $\alpha = 10$

$$\begin{aligned}
 r_{bbe} &= \frac{\sqrt{nf_1(b)(1-f_1(b))}}{n\sqrt{2\pi}(1-f_3(b))} \left[e^{-m_1^2(f_1(b))/2} - e^{-m_2^2(f_1(b))/2} \right] \\
 &+ \frac{f_1(b)}{[1-f_3(b)]} \{Q[m_1(f_1(b))] - Q[m_2(f_1(b))]\} = f_4(b) \quad (2-50)
 \end{aligned}$$

onde, conforme indicado anteriormente, $m_1(r_{eb})$ e $m_2(r_{eb})$ são dados por (2-46) e (2-47).

As variáveis r_{es} , r_{ses} e r_{bbe} foram definidas como funções da variável r_{eb} , que, por sua vez, foi modelada como função de b . Conseqüentemente aquelas também são relacionadas a b . Tal relacionamento está ilustrado na Figura 2.7.

Como pode ser observado pela Figura 2.7, para valores de $r_{ses} = 0$, a variável r_{bbe} difere da variável r_{eb} . Isto é explicado pelo fato de a aproximação da distribuição binomial pela normal, utilizada na determinação da variável r_{bbe} , não ser válida para valores pequenos de b . No caso da Figura 2.7, para valores de $b < 10^{-6}$.

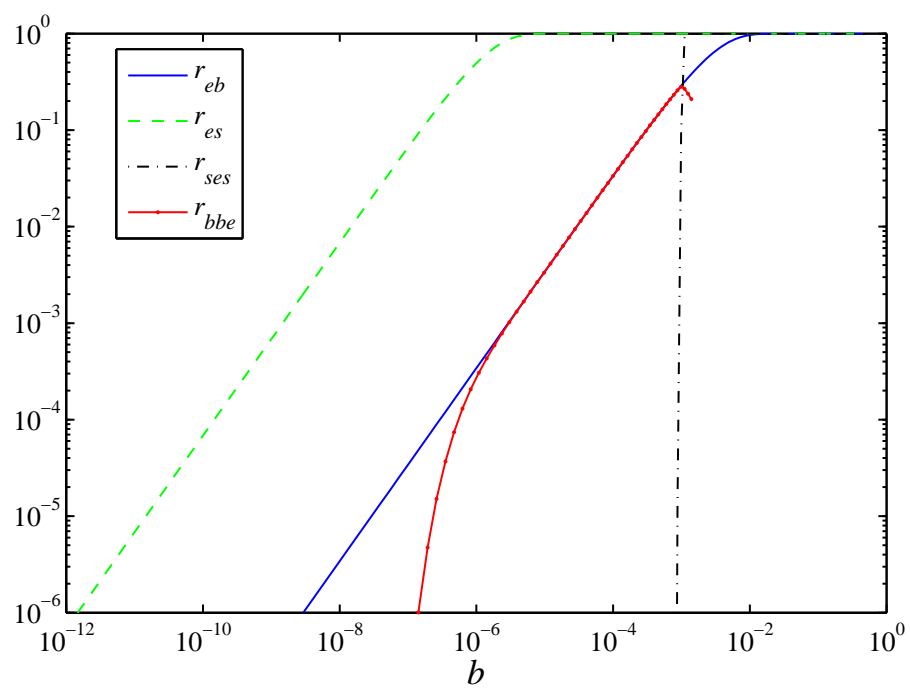


Figura 2.7: Variáveis r_{eb} , r_{es} , r_{ses} e r_{bbe} como função da taxa de erro de bit b para $\alpha = 10$, $n = 2000$ e $N_B = 3424$

3

Estimativa dos Parâmetros de desempenho de erro

Neste estudo, a taxa de erro de bit é modelada por uma variável aleatória b , refletindo assim os efeitos da degradação aleatória z na razão E_b/N_0 . O comportamento estatístico do fator z é representado por sua Função Distribuição de Probabilidade Cumulativa (FDPC), cuja definição é dada por

$$C_z(\Gamma) = P(z > \Gamma) = \int_{\Gamma}^{\infty} p_z(\alpha) d\alpha \quad (3-1)$$

Com base em (3-1), serão determinadas as FDPCs das variáveis aleatórias r_{eb} , r_{es} , r_{ses} e r_{bbe} , definidas no Capítulo 2. A partir dessas FDPCs serão estimados os parâmetros de desempenho de erro, que são calculados a partir das taxas de ocorrência dos eventos de erro. Quando as probabilidades dos eventos de erro EB, ES e SES são modeladas por variáveis aleatórias, os parâmetros de desempenho de erro correspondentes são dados pelo valor esperado dessas variáveis aleatórias. Assim,

$$ESR = E[r_{es}] \quad (3-2)$$

e

$$SESR = E[r_{ses}] \quad (3-3)$$

Do mesmo modo, a taxa de blocos errados EBR, não incluída no conjunto de parâmetros de desempenho de erro, pode ser estimada por

$$EBR = E[r_{eb}] \quad (3-4)$$

De maneira análoga, a taxa de bloco errado de fundo BBER é dada pelo valor esperado da variável aleatória r_{bbe} , ou seja,

$$BBER = E[r_{bbe}] \quad (3-5)$$

Como apresentado no Apêndice A, o valor esperado de uma variável w pode ser calculado a partir de sua Função Distribuição de Probabilidade Cumulativa $C_w(W)$. Assim, as taxas EBR, ESR, SESR e BBER são estimadas a partir das FDPCs das variáveis aleatórias r_{eb} , r_{es} , r_{ses} e r_{bbe} , respectivamente. Estas variáveis representam probabilidades ou taxas, logo só assumem valores entre 0 e 1. Desta forma, com base em (A-9) e sendo $C_{r_{eb}}(R)$, $C_{r_{es}}(R)$, $C_{r_{ses}}(R)$ e $C_{r_{bbe}}(R)$ as FDPCs dessas variáveis,

os parâmetros de desempenho são estimados por

$$EBR = \int_0^1 C_{r_{eb}}(R)dR \quad (3-6)$$

$$ESR = \int_0^1 C_{r_{es}}(R)dR \quad (3-7)$$

$$SESR = \int_0^1 C_{r_{ses}}(R)dR \quad (3-8)$$

$$BBER = \int_0^1 C_{r_{bbe}}(R)dR \quad (3-9)$$

Uma vez que a variável r_{eb} foi modelada como função da taxa de erro de bit b , sua FDPC será determinada com base em $C_b(B)$. Se os cálculos em (3-6) a (3-9) tiverem que ser feitos sob a condição de disponibilidade, a FDPC da variável aleatória b a ser utilizada deve ser a FDPC condicional

$$C_{b|D}(B) \quad (3-10)$$

onde D é o evento que caracteriza a disponibilidade.

Uma aproximação usualmente utilizada [8] é que a condição de disponibilidade ocorre quando $\{r_{ses} < 1\}$, ou, equivalentemente, quando $\{b < B^{ses}\}$ ou $\{r_{eb} < R_{eb}^{ses}\}$, onde R_{eb}^{ses} satisfaz a equação (2-30) e B^{ses} é dado por (2-31).

O que acontece na prática é que estas estimativas são feitas em situações de alta disponibilidade, e neste caso, as estimativas condicionais são bem próximas das estimativas não condicionais, calculadas neste trabalho.

As demais variáveis foram modeladas como funções da probabilidade de bloco errado, logo suas FDPCs serão obtidas a partir da função distribuição de probabilidade cumulativa de r_{eb} , $C_{r_{eb}}(R)$.

Relacionamento entre as FDPCs das variáveis r_{eb} e b

Através da expressão em (2-10) é determinada a relação entre as funções de distribuição cumulativa de r_{eb} e b . Essa relação é expressa por

$$\begin{aligned}
 C_{r_{eb}}(R) &= P(r_{eb} > R) \\
 &= P\left(1 - e^{\left(\frac{-N_B b}{\alpha}\right)} > R\right) \\
 &= P\left(b > \ln\left(\frac{1}{1-R}\right) \frac{\alpha}{N_B}\right) \\
 &= C_b\left(\ln\left(\frac{1}{1-R}\right) \frac{\alpha}{N_B}\right)
 \end{aligned}
 \tag{3-11}$$

Relacionamento entre as FDPCs das variáveis aleatórias r_{es} e r_{eb}

A relação entre $C_{r_{es}}(R)$ e $C_{r_{eb}}(R)$, dada pela expressão abaixo, foi determinada com base em (2-14).

$$\begin{aligned}
 C_{r_{es}}(R) &= P(r_{es} > R) \\
 &= P\left(1 - e^{(-nr_{eb})} > R\right) \\
 &= P\left(r_{eb} > \ln\left(\frac{1}{1-R}\right) \frac{1}{n}\right) \\
 &= C_{r_{eb}}\left(\ln\left(\frac{1}{1-R}\right) \frac{1}{n}\right)
 \end{aligned}
 \tag{3-12}$$

Relacionamento entre as FDPCs das variáveis r_{ses} e r_{eb}

Considerando o relacionamento entre r_{ses} e r_{eb} , dado por (2-27), pode-se afirmar que

$$P(r_{ses} > R) = P(r_{eb} > R_{eb}^{[R]})
 \tag{3-13}$$

ou seja,

$$C_{r_{ses}}(R) = C_{r_{eb}}(R_{eb}^{[R]})
 \tag{3-14}$$

onde os pontos R e $R_{eb}^{[B]}$ se relacionam por

$$R = h_3(R_{eb}^{[R]})
 \tag{3-15}$$

considerando (2-27)

$$R = Q \left(\frac{\sqrt{n}(0,3 - R_{eb}^{[R]})}{\sqrt{R_{eb}^{[R]}(1 - R_{eb}^{[R]})}} \right) - Q \left(\frac{\sqrt{n}(1 - R_{eb}^{[R]})}{\sqrt{R_{eb}^{[R]}(1 - R_{eb}^{[R]})}} \right) \quad (3-16)$$

Relacionamento entre as FDPCs das variáveis r_{bbe} e r_{eb}

O relacionamento entre r_{bbe} e r_{eb} é expresso em (2-49). Conforme mostrado anteriormente, para valores pequenos de n , este relacionamento não é biunívoco. Para obter a FDPC de r_{bbe} , considere o valor R_{eb}^{ses} de r_{eb} correspondente a $r_{ses} = 1$ (R_{eb}^{ses} é solução de (2-30)). Este valor é indicado na Figura 3.1, onde o relacionamento entre r_{bbe} e r_{eb} é ilustrado para $n = 2000$. Nesta figura, está também ilustrado o valor R_{eb}^* , de r_{eb} , para o qual r_{bbe} é máximo.

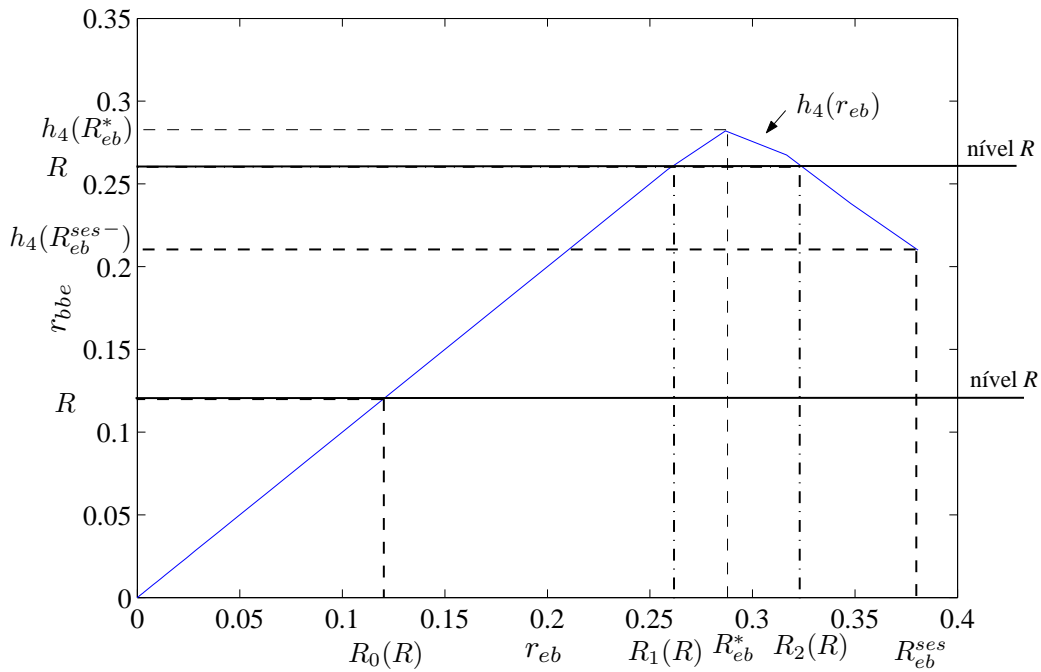


Figura 3.1: Probabilidade de bloco errado de fundo r_{bbe}

Observa-se da Figura 3.1 que se o nível R é tal que $0 \leq R \leq h_4(R_{eb}^{ses-})$ existe apenas um valor $R_0(R)$ de r_{eb} que conduz a $r_{bbe} = R$, ou seja, a equação

$$\begin{aligned}
 h_4(x) &= \frac{\sqrt{nx(1-x)}}{n\sqrt{2\pi}(1-h_3(x))} \left[e^{-m_1^2(x)/2} - e^{-m_2^2(x)/2} \right] \\
 &+ \frac{x}{(1-h_3(x))} [Q(m_1(x)) - Q(m_2(x))] = R
 \end{aligned} \tag{3-17}$$

tem apenas uma solução em x ($x = R_0(R)$).

Em (3-17), $h_3(\cdot)$, $m_1(\cdot)$ e $m_2(\cdot)$ são dados, respectivamente, por (2-27), (2-46) e (2-47). Por outro lado, se $h_4(R_{eb}^{ses-}) < R < h_4(R_{eb}^*)$, existem dois valores, $R_1(R)$ e $R_2(R)$, que conduzem a $r_{bbe} = R$. Neste caso, a equação (3-17) tem duas soluções ($x = R_1(R)$ e $x = R_2(R)$).

Como r_{bbe} só é definida para $r_{ses} < 1$, ou seja, se $r_{eb} < R_{eb}^{ses}$, a FDPC de r_{bbe} é dada por

$$P(r_{bbe} > R) = \begin{cases} 1 & , R < 0 \\ P(R_0(R) < r_{eb} \mid r_{eb} < R_{eb}^{ses}) & , 0 \leq R \leq h_4(R_{eb}^{ses-}) \\ P(R_1(R) < r_{eb} < R_2(R) \mid r_{eb} < R_{eb}^{ses}) & , h_4(R_{eb}^{ses-}) < R < h_4(R_{eb}^*) \\ 0 & , R \geq h_4(R_{eb}^*) \end{cases} \tag{3-18}$$

Finalmente, considerando-se a definição de FDPC, obtém-se

$$C_{r_{bbe}}(R) = \begin{cases} 1 & , R < 0 \\ \frac{C_{r_{eb}}(R_0(R)) - [C_{r_{eb}}(R_{eb}^{ses}) + P(r_{eb} = R_{eb}^{ses})]}{1 - [C_{r_{eb}}(R_{eb}^{ses}) + P(r_{eb} = R_{eb}^{ses})]} & , 0 \leq R \leq h_4(R_{eb}^{ses-}) \\ \frac{C_{r_{eb}}(R_1(R)) - [C_{r_{eb}}(R_2(R)) + P(r_{eb} = R_2(R))]}{1 - [C_{r_{eb}}(R_{eb}^{ses}) + P(r_{eb} = R_{eb}^{ses})]} & , h_4(R_{eb}^{ses-}) < R < h_4(R_{eb}^*) \\ 0 & , R \geq h_4(R_{eb}^*) \end{cases} \tag{3-19}$$

Conforme ilustrado na Figura 2.6, para grandes valores de n , $R_{eb}^* = R_{eb}^{ses} = 0,3$. Observa-se ainda que o relacionamento entre r_{bbe} e r_{eb} é biunívoco. Neste caso, a FDPC de r_{bbe} , dada por (3-19) se reduz a

$$C_{r_{bbe}}(R) = \begin{cases} 1 & , R < 0 \\ \frac{C_{r_{eb}}(R_0(R)) - [C_{r_{eb}}(0,3) + P(r_{eb}=0,3)]}{1 - [C_{r_{eb}}(0,3) + P(r_{eb}=0,3)]} & , 0 \leq R < h_4(0,3) \\ 0 & , R \geq h_4(0,3) \end{cases} \quad (3-20)$$

Como pode ser observado pelos relacionamentos em (3-11), (3-12), (3-14) e (3-19), para determinar as funções distribuição de probabilidade cumulativa das variáveis r_{eb} , r_{es} , r_{ses} e r_{bbe} é necessário conhecer o comportamento estatístico da taxa de erro de bit b , representado por sua FPDC. Note ainda que, pela relação entre a variável aleatória b e o fator de degradação z expressa em (2-8) ou em (2-9), é possível determinar $C_b(B)$ a partir de $C_z(\Gamma)$. As Figuras 3.2 e 3.3 ilustram, para um valor fixo de E_b/N_0 , o relacionamento entre a taxa de erro de bit b e a variável z para as modulações QPSK e QAM-128, respectivamente.

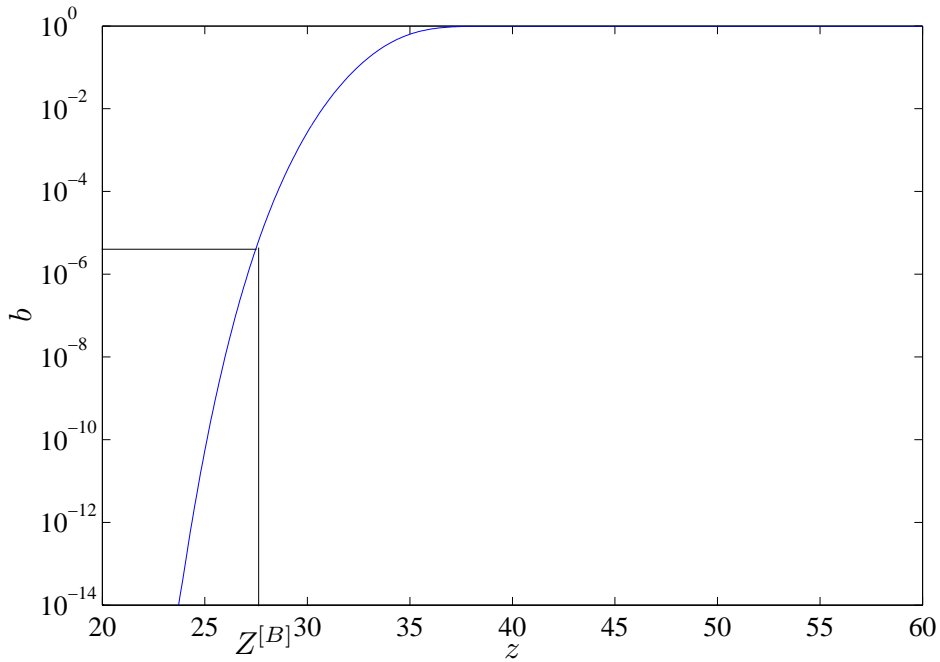


Figura 3.2: Relação entre a Taxa de Erro de Bit e o fator de degradação para a modulação QPSK

Destas Figuras é possível observar que

$$P(b \geq B) = P(z \geq Z^{[B]}) \quad (3-21)$$

ou seja,

$$C_b(B) = C_z(Z^{[B]}) \quad (3-22)$$

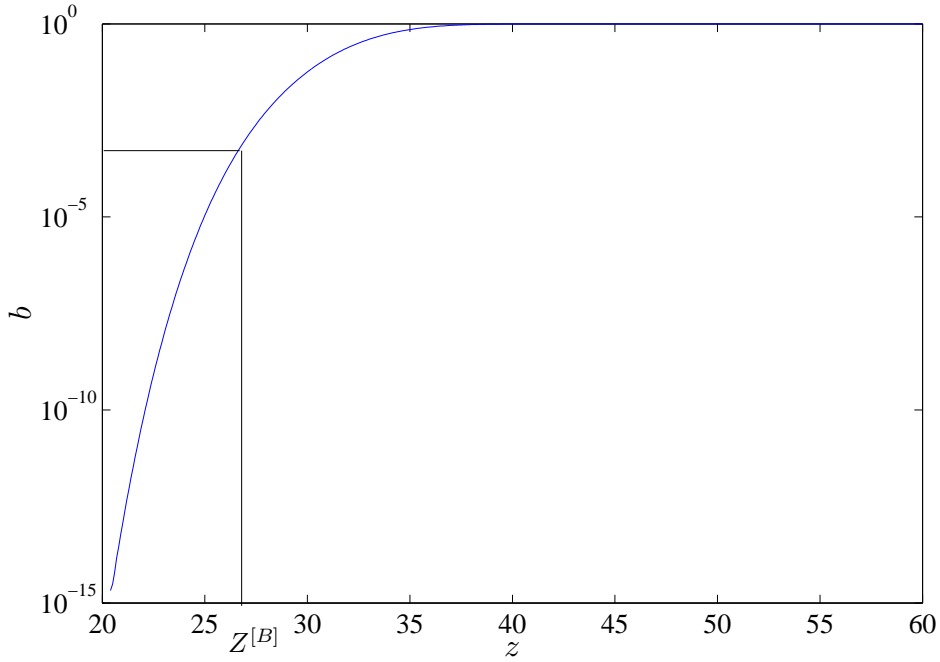


Figura 3.3: Relação entre a Taxa de Erro de Bit e o fator de degradação para a modulação QAM-128

onde os pontos $Z^{[B]}$ e B se relacionam por

$$B = Q \left(\sqrt{2 \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_{CS} \frac{1}{10^{Z^{[B]}/10}}} \right) \quad (3-23)$$

para modulação QPSK e por

$$B = \frac{4(\sqrt{M} - 1)}{\sqrt{M} \log_2 M} Q \left(\sqrt{\frac{3 \log_2 M}{(M - 1)} \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_{CS} \frac{1}{10^{Z^B/10}}} \right) \quad (3-24)$$

para modulações QAM-M.

Uma vez determinadas as FDPCs das variáveis r_{eb} , r_{es} , r_{ses} e r_{bbe} , podem ser estimados os parâmetros de desempenho de erro.

O comportamento estatístico das degradações que afetam o sinal transmitido, caracterizado por $C_z(\Gamma)$, será determinado para os cenários seguintes:

1. A chuva é a única fonte de degradação do sinal.
2. O sinal sofre o efeito da chuva e de interferência externa.

No primeiro cenário, a estatística da atenuação causada por chuvas é estimada pelo modelo matemático definido na Recomendação da ITU-R P.530-11 [10], que permite determinar os valores de atenuação excedidos em uma porcentagem de tempo especificada. Essas atenuações dependem, dentre outros fatores, da taxa de precipitação, da frequência, do comprimento do enlace e da localização do receptor.

No segundo cenário, além do efeito da chuva, o fator de degradação z inclui os efeitos de interferência externa, cuja FDPC é conhecida.

3.1

Efeito da atenuação devida à chuva

A chuva é uma importante fonte de degradação para frequências acima de 10GHz. Pelo modelo [10] utilizado para estimar o comportamento estatístico da atenuação por chuva, esta degradação depende, dentre outros fatores, da frequência f e da taxa de precipitação R (medida em mm/h) e é determinada como um valor probabilístico devido ao comportamento estatístico de R .

Nesta seção, os parâmetros de desempenho de erro utilizados para avaliar a qualidade de um sistema de transmissão digital serão estimados para o caso em que a chuva é a única fonte de degradação do sinal. O fator de atenuação x será utilizado para representar esta degradação, logo

$$z = x \quad (3-25)$$

Consequentemente, de (2-5)

$$e = \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_{CS_{[dB]}} - x = f(x) \quad (3-26)$$

A Recomendação ITU-R P.530-11 [10] apresenta métodos de predição de parâmetros de propagação que afetam o planejamento de sistemas de comunicação terrestres. Uma de suas seções trata da atenuação causada por hidrometeoros e utiliza um procedimento para estimar o comportamento estatístico da atenuação por chuva. Este procedimento é apresentado na Seção C.1 do Apêndice C e permite o cálculo dos valores de atenuação A_P que são excedidos por uma porcentagem P do tempo de observação através da equação

$$\frac{A_P}{A_{0,01}} = 0,07P^{-(0,855+0,139\log_{10}P)} \quad (3-27)$$

A expressão em (3-27) é válida para enlaces com latitudes entre $30^\circ S$ e $30^\circ N$. Nela, $A_{0,01}$ corresponde à atenuação excedida em 0.01% do tempo. Esse valor é função da taxa de precipitação a ser excedida em 0.01% do tempo ($R_{0,01}$) que depende da localização do receptor. O valor de $A_{0,01}$ depende ainda da frequência em GHz, da distância em km, do ângulo de elevação e do tipo de polarização utilizados.

Os valores da taxa $R_{0,01}$ são encontrados em mapas da Recomendação ITU-R P.837-4 [9].

A equação em (3-27) fornece uma estatística anual para a atenuação devida à chuva. Para o cálculo da estatística relativa ao pior mês, foi utilizado o método apresentado na seção C.2 do Apêndice C.

A equação (3-27) permite escrever que

$$P(x > A_P) = \frac{P}{100} \quad (3-28)$$

ou seja,

$$C_x(A_P) = \frac{P}{100} = p \quad (3-29)$$

Assim, a FDPC de x é dada por

$$C_x(\chi) = p \quad (3-30)$$

onde p é obtido resolvendo-se as equações

$$\chi = A_{0,01} 0,07 (100p)^{-(0,855+0,139(\log_{10} p + 2))} \quad (3-31)$$

para $\chi \in \mathbb{R}$.

Entretanto, como evidenciado na Recomendação ITU-R P.530-11, o modelo de estimação da estatística da chuva é adequado para valores de probabilidade p , onde $10^{-5} \leq p \leq 10^{-2}$.

Assim, o modelo permite a determinação de $C_x(\chi)$ apenas para valores de χ no intervalo $I_x = [\chi_1, \chi_2]$, onde χ_1 e χ_2 são obtidos a partir de (3-31), sendo dados por

$$\chi_1 = A_{0,01} 0,07 (1)^{-(0,855+0,139(0))} = 0,07 A_{0,01} \quad (3-32)$$

$$\chi_2 = A_{0,01} 0,07 (0.001)^{-(0,855+0,139(-3))} = 1,4424 A_{0,01} \quad (3-33)$$

O conhecimento restrito da FDPC de x limita o conhecimento das FDPCs das variáveis aleatórias r_{eb} , r_{es} , r_{ses} e r_{bbe} aos intervalos $I_{r_{eb}}$, $I_{r_{es}}$, $I_{r_{ses}}$ e $I_{r_{bbe}}$, respectivamente.

Estes intervalos podem ser obtidos considerando-se (2-10), (2-14), (2-27), (2-

49), (2-46) e (2-47) e são dados por

$$I_{reb} = [g_1(\chi_1), g_1(\chi_2)] \quad (3-34)$$

$$I_{res} = [g_2(\chi_1), g_2(\chi_2)] \quad (3-35)$$

$$I_{rees} = [g_3(\chi_1), g_3(\chi_2)] \quad (3-36)$$

$$I_{rbee} = [g_4(\chi_1), g_4(\chi_2)] \quad (3-37)$$

onde

$$g_1(\chi_i) = 1 - \exp\left(\frac{-N_B}{\alpha} Q\left(\sqrt{2\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{CS} \frac{1}{10^{\chi_i/10}}}\right)\right), \quad i = 1, 2 \quad (3-38)$$

$$g_2(\chi_i) = h_2(g_1(\chi_i)) = 1 - e^{(-ng_1(\chi_i))}, \quad i = 1, 2 \quad (3-39)$$

$$g_3(\chi_i) = h_3(g_1(\chi_i)) \quad (3-40)$$

$$= Q\left(\frac{\sqrt{n}(0, 3 - g_1(\chi_i))}{\sqrt{g_1(\chi_i)(1 - g_1(\chi_i))}}\right) - Q\left(\frac{\sqrt{n}(1 - g_1(\chi_i))}{\sqrt{g_1(\chi_i)(1 - g_1(\chi_i))}}\right), \quad i = 1, 2$$

e

$$g_4(\chi_i) = h_4(g_1(\chi_i)) \quad (3-41)$$

$$= \frac{\sqrt{ng_1(\chi_i)(1 - g_1(\chi_i))}}{n\sqrt{2\pi}[1 - g_3(\chi_i)]} \left[e^{-m_1^2(g_1(\chi_i))/2} - e^{-m_2^2(g_1(\chi_i))/2} \right] + \frac{g_1(\chi_i)}{1 - g_3(\chi_i)} [Q(m_1(g_1(\chi_i))) - Q(m_2(g_1(\chi_i)))] \quad , i = 1, 2 \quad (3-42)$$

Devido ao conhecimento parcial das FDPCs das diversas variáveis aleatórias, a estimação dos parâmetros de desempenho de erro, feita através de (3-6), (3-7), (3-8) e (3-9) fica prejudicada. Assim, é utilizado um procedimento que permite o cálculo de limitantes inferiores e superiores para estes parâmetros. Tais limitantes, aplicáveis ao cálculo dos valores esperados de uma variável aleatória quando sua FDPC não é totalmente conhecida, são apresentados no Apêndice B. São, então, definidos os seguintes limitantes para os parâmetros de desempenho:

$$C_{reb}(g_1(\chi_1))g_1(\chi_1) + \int_{g_1(\chi_1)}^{g_1(\chi_2)} C_{reb}(R)dR \leq EBR \leq g_1(\chi_1) + \int_{g_1(\chi_1)}^{g_1(\chi_2)} C_{reb}(R)dR + C_{reb}(g_1(\chi_2))(1 - g_1(\chi_2)) \quad (3-43)$$

$$\begin{aligned}
C_{r_{es}}(g_2(\chi_1))g_2(\chi_1) + \int_{g_2(\chi_1)}^{g_2(\chi_2)} C_{r_{es}}(R)dR &\leq ESR \leq \\
g_2(\chi_1) + \int_{g_2(\chi_1)}^{g_2(\chi_2)} C_{r_{es}}(R)dR + C_{r_{es}}(g_2(\chi_2))(1 - g_2(\chi_2)) &\quad (3-44)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
C_{r_{ses}}(g_3(\chi_1))g_3(\chi_1) + \int_{g_3(\chi_1)}^{g_3(\chi_2)} C_{r_{ses}}(R)dR &\leq SESR \leq \\
g_3(\chi_1) + \int_{g_3(\chi_1)}^{g_3(\chi_2)} C_{r_{ses}}(R)dR + C_{r_{ses}}(g_3(\chi_2))(1 - g_3(\chi_2)) &\quad (3-45)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
C_{r_{bbe}}(g_4(\chi_1))g_4(\chi_1) + \int_{g_4(\chi_1)}^{g_4(\chi_2)} C_{r_{bbe}}(R)dR &\leq BBER \leq \\
g_4(\chi_1) + \int_{g_4(\chi_1)}^{g_4(\chi_2)} C_{r_{bbe}}(R)dR + C_{r_{bbe}}(g_4(\chi_2))(1 - g_4(\chi_2)) &\quad (3-46)
\end{aligned}$$

Como observado por (3-43), (3-44), (3-45) e (3-46), os parâmetros de desempenho de erro, na presença de chuva, serão estimados como valores entre os respectivos limitantes.

3.2

Efeito da degradação devida à chuva e à interferência externa

Nesta fase do estudo, são consideradas as degradações devidas à chuva e à interferência externa na relação E_b/N_0 , representadas, respectivamente, pelos fatores x e y . Neste caso, o fator z que caracteriza a degradação total se escreve

$$z = x + y \quad (3-47)$$

Considerando-se que as degradações devidas a chuvas e interferências externas são estatisticamente independentes, tem-se que

$$p_z(\Gamma) = p_x(\Gamma) * p_y(\Gamma) \quad (3-48)$$

ou seja,

$$p_z(\Gamma) = \int_{-\infty}^{\infty} p_y(\alpha)p_x(\Gamma - \alpha)d(\alpha) \quad (3-49)$$

Neste caso, a função distribuição de probabilidade da variável z , dada por

$$F_z(\Gamma) = \int_{-\infty}^{\Gamma} p_z(\beta) d\beta \quad (3-50)$$

se escreve

$$F_z(\Gamma) = \int_{-\infty}^{\Gamma} \int_{-\infty}^{\infty} p_y(\alpha) p_x(\beta - \alpha) d(\alpha) d\beta \quad (3-51)$$

ou ainda,

$$F_z(\Gamma) = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{\Gamma} p_x(\beta - \alpha) d\beta \right] p_y(\alpha) d\alpha \quad (3-52)$$

A expressão entre colchetes em (3-52) corresponde a $F_x(\Gamma - \alpha)$. Tem-se assim

$$F_z(\Gamma) = \int_{-\infty}^{\infty} F_x(\Gamma - \alpha) p_y(\alpha) d\alpha \quad (3-53)$$

ou seja,

$$F_z(\Gamma) = F_x(\Gamma) * p_y(\Gamma) \quad (3-54)$$

Considerando que

$$C_x(\chi) = 1 - F_x(\chi) \quad (3-55)$$

é possível reescrever (3-54) como

$$C_z(\Gamma) = 1 - [(1 - C_x(\Gamma)) * p_y(\Gamma)] = C_x(\Gamma) * p_y(\Gamma) \quad (3-56)$$

Assim, a estatística do fator de degradação z , representada por sua função de distribuição cumulativa $C_z(\Gamma)$, é estimada pela convolução entre a função distribuição de probabilidade do fator de degradação x devida à chuva (determinada pelo procedimento da Recomendação ITU-R P.530-11) e a função densidade de probabilidade do fator de degradação y devida à interferência.

Note que o conhecimento parcial de FDPC de x implica em um conhecimento parcial da FDPC da variável aleatória z , assim, $C_z(\Gamma)$ será conhecida em um intervalo $I_z = [\Gamma_1, \Gamma_2]$. Como as FDPCs das demais variáveis aleatórias são determinadas a partir de $C_z(\Gamma)$, elas também serão conhecidas apenas em certos intervalos.

Desta forma, um procedimento análogo ao da Seção 3.1 conduz a determinação dos intervalos $I_{r_{eb}}$, $I_{r_{es}}$, $I_{r_{ses}}$ e $I_{r_{bbe}}$ nos quais as FDPCs das variáveis aleatórias r_{eb} , r_{es} , r_{ses} e r_{bbe} são conhecidas respectivamente. Considerando-se (2-10), (2-14), (2-27), (2-49), (2-46) e (2-47), esses intervalos são dados por

$$I_{r_{eb}} = [g_1(\Gamma_1), g_1(\Gamma_2)] \quad (3-57)$$

$$I_{res} = [g_2(\Gamma_1), g_2(\Gamma_2)] \quad (3-58)$$

$$I_{ses} = [g_3(\Gamma_1), g_3(\Gamma_2)] \quad (3-59)$$

$$I_{bbe} = [g_4(\Gamma_1), g_4(\Gamma_2)] \quad (3-60)$$

onde

$$g_1(\Gamma_i) = 1 - \exp\left(\frac{-N_B}{\alpha} Q\left(\sqrt{2\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{CS} \frac{1}{10^{\Gamma_i/10}}}\right)\right), \quad i = 1, 2 \quad (3-61)$$

$$g_2(\Gamma_i) = h_2(g_1(\Gamma_i)) = 1 - e^{(-ng_1(\Gamma_i))}, \quad i = 1, 2 \quad (3-62)$$

$$g_3(\Gamma_i) = h_3(g_1(\Gamma_i)) \quad (3-63)$$

$$= Q\left(\frac{\sqrt{n}(0,3 - g_1(\Gamma_i))}{\sqrt{g_1(\Gamma_i)(1 - g_1(\Gamma_i))}}\right) - Q\left(\frac{\sqrt{n}(1 - g_1(\Gamma_i))}{\sqrt{g_1(\Gamma_i)(1 - g_1(\Gamma_i))}}\right), \quad i = 1, 2$$

$$g_4(\Gamma_i) = h_4(g_1(\Gamma_i)) \quad (3-64)$$

$$= \frac{\sqrt{ng_1(\Gamma_i)(1 - g_1(\Gamma_i))}}{n\sqrt{2\pi}[1 - g_3(\Gamma_i)]} \left[e^{-m_1^2(g_1(\Gamma_i))/2} - e^{-m_2^2(g_1(\Gamma_i))/2} \right] + \frac{g_1(\Gamma_i)}{1 - g_3(\Gamma_i)} [Q(m_1(g_1(\Gamma_i))) - Q(m_2(g_1(\Gamma_i)))] \quad , i = 1, 2 \quad (3-65)$$

Assim como feito na estimação dos parâmetros na presença de chuva, devido ao conhecimento parcial das FDPCs das diversas variáveis aleatórias, é utilizado o procedimento, apresentado no Apêndice B, que permite o cálculo de limitantes inferiores e superiores para estes parâmetros. São, então, definidos os seguintes limitantes para os parâmetros de desempenho de erro:

$$C_{reb}(g_1(\Gamma_1))g_1(\Gamma_1) + \int_{g_1(\Gamma_1)}^{g_1(\Gamma_2)} C_{reb}(R)dR \leq EBR \leq g_1(\Gamma_1) + \int_{g_1(\Gamma_1)}^{g_1(\Gamma_2)} C_{reb}(R)dR + C_{reb}(g_1(\Gamma_2))(1 - g_1(\Gamma_2)) \quad (3-66)$$

$$C_{res}(g_2(\Gamma_1))g_2(\Gamma_1) + \int_{g_2(\Gamma_1)}^{g_2(\Gamma_2)} C_{res}(R)dR \leq ESR \leq g_2(\Gamma_1) + \int_{g_2(\Gamma_1)}^{g_2(\Gamma_2)} C_{res}(R)dR + C_{res}(g_2(\Gamma_2))(1 - g_2(\Gamma_2)) \quad (3-67)$$

$$\begin{aligned}
C_{r_{ses}}(g_3(\Gamma_1))g_3(\Gamma_1) + \int_{g_3(\Gamma_1)}^{g_3(\Gamma_2)} C_{r_{ses}}(R)dR &\leq SESR \leq \\
g_3(\Gamma_1) + \int_{g_3(\Gamma_1)}^{g_3(\Gamma_2)} C_{r_{ses}}(R)dR + C_{r_{ses}}(g_3(\Gamma_2))(1 - g_3(\Gamma_2)) &\quad (3-68)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
C_{r_{bbe}}(g_4(\Gamma_1))g_4(\Gamma_1) + \int_{g_4(\Gamma_1)}^{g_4(\Gamma_2)} C_{r_{bbe}}(R)dR &\leq BBER \leq \\
g_4(\Gamma_1) + \int_{g_4(\Gamma_1)}^{g_4(\Gamma_2)} C_{r_{bbe}}(R)dR + C_{r_{bbe}}(g_4(\Gamma_2))(1 - g_4(\Gamma_2)) &\quad (3-69)
\end{aligned}$$

Como observado por (3-66), (3-67), (3-68) e (3-69), os parâmetros de desempenho de erro, na presença de chuva e interferência externa, serão estimados como valores entre os respectivos limitantes.

4

Resultados Numéricos

Neste capítulo, são apresentadas as estimativas dos valores dos parâmetros de desempenho de erro em dois cenários. No primeiro cenário, o enlace sofre apenas degradação devida a chuvas, enquanto que, no segundo, degradações devidas a chuvas e interferências externas são consideradas simultaneamente.

As metodologias apresentadas no Capítulo 3 foram utilizadas para estimar as taxas EBR, SER, SESR e BBER em enlaces do sistema fixo terrestre localizados em latitudes de $20^{\circ}S$, 0° e $20^{\circ}N$. Em cada uma dessas latitudes foi escolhido um valor de longitude correspondente à posição geográfica em terra, na qual as interferências externas (geradas por sistemas de satélite HEO) fossem significativas. As localizações consideradas são apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: *Localização dos receptores*

Pontos	P_1	P_2	P_3
Latitude	$20^{\circ}S$	0°	$20^{\circ}N$
Longitude	300°	310°	77°

As características dos enlaces do serviço fixo terrestre (enlaces vítimas) são apresentadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: *Características do enlace terrestre*

Características do enlace	
Frequência	18 GHz
Comprimento	8 km
Polarização	Vertical
Ângulo de elevação	0°
Ganho da antena receptora	48 dB
Número de bits por bloco	801
Número de blocos por segundo	192000
Modulação	QPSK e QAM-128

O comportamento estatístico da atenuação causada por chuvas, representado por sua FPDC $C_x(\chi)$, é calculada pelo procedimento descrito na Recomendação ITU-R P.530-11, apresentado no Apêndice C.

As interferências externas consideradas nos exemplos apresentados foram provenientes de três sistemas HEO de satélites, todos com os mesmos parâmetros técnicos e a mesma estrutura orbital. Duas diferentes estruturas orbitais foram utilizadas. Os detalhes de cada uma delas são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: *Características técnicas dos sistemas HEO*

	Estrutura A	Estrutura B
Altitude do apogeu (km)	39520	27288,3
Altitude do perigeu	950	517,4
Excentricidade	0,7247	0,66
Inclinação do plano orbital (graus)	63,4	63,435
Período orbital (h)	12	8
Número de planos orbitais	9	15 (9N, 6S)
Argumento do perigeu	-90°	-90° para N, 90° para S
Número de satélites por plano	1	1
Latitude ativa mínima	54	45

O comportamento estatístico da razão I/N correspondente à interferência agregada gerada por três sistemas HEO, todos com os mesmos parâmetros técnicos e com a mesma estrutura orbital, foi determinada em [13] para sistemas com as estruturas orbitais da Tabela 4.3. A partir desses resultados, foi possível obter o comportamento estatístico da degradação devida às interferências externas consideradas em cada um dos exemplos, uma vez que esta degradação se escreve

$$Y = 1 + \frac{I}{N} \quad (4-1)$$

ou, em dB,

$$y = 10 \log \left(1 + 10^{\frac{i/n}{10}} \right) \quad (4-2)$$

onde i/n é a razão I/N em dB.

Note que (4-2) permite escrever

$$\begin{aligned}
C_y(\gamma) &= 1 - F_y(\gamma) \\
&= 1 - P\left(10\log\left(1 + 10^{\frac{i/n}{10}}\right) \leq \gamma\right) \\
&= 1 - P\left(\frac{i}{n} \leq 10\log\left(10^{\gamma/10} - 1\right)\right) \\
&= 1 - F_{i/n}\left(10\log\left(10^{\gamma/10} - 1\right)\right) \\
&= C_{i/n}\left(10\log\left(10^{\gamma/10} - 1\right)\right)
\end{aligned} \tag{4-3}$$

Conforme mencionado anteriormente, as metodologias apresentadas no Capítulo 3 foram utilizadas para estimar os parâmetros de desempenho de erro em receptores do serviço fixo terrestre localizados em três latitudes distintas: $20^\circ S$, 0° e $20^\circ N$. Em cada uma dessas latitudes, duas estruturas orbitais foram consideradas para os satélites HEO responsáveis pelas interferências externas (ver Tabela 4.3). E ainda, em cada latitude e para cada estrutura orbital, foi determinado o valor de azimute de apontamento da antena receptora para o qual são atingidos valores significativos de atenuação. Os resultados para cada uma dessas latitudes são apresentados nas seções 4.1, 4.2 e 4.3 para $\alpha = 10$.

4.1

Caso 1: Receptor localizado na latitude $20^\circ S$

Neste caso, a longitude escolhida foi 300° (ver Tabela 4.1). Para estas coordenadas, foram calculados os valores da taxa de chuva $R_{0,01}$ e da atenuação $A_{0,01}$ excedidos por 0,01% do período referente a um ano. Estes valores são iguais a

$$R_{0,01} = 60 \text{ mm/h} \tag{4-4}$$

$$A_{0,01} = 23,93 \text{ dB} \tag{4-5}$$

Com base nestes dados, são determinados os valores A_P (em dB) de atenuação excedidos durante a percentagem de tempo P (ou seja, com probabilidade $p = P/100$)

que, considerando-se (C-8), são dados por

$$A_P = 1,675P^{-(0,855+0,139\log_{10}(P))} \quad , 10^{-3} \leq P \leq 1 \quad (4-6)$$

O intervalo de validade dos valores de A_P calculados por (4-6) é dado por $[A_1 \quad , \quad A_{0,001}]$, ou seja, por $[1,7 \quad , \quad 34,5]$.

Na definição da FDPC da degradação x devida a chuvas, considera-se a probabilidade p_w da atenuação ser excedida no pior mês. Esta probabilidade é obtida a partir da percentagem de tempo P com que A_P é excedida no período de um ano, de acordo com a metodologia da Recomendação ITU-R P.841-4. O resultado desta metodologia é apresentado no Apêndice C.2. Tem-se assim

$$p_w = \frac{P_w}{100} \quad (4-7)$$

onde P_w é calculado a partir de P através de (C-8).

A FDPC de x é, então, obtida através da relação

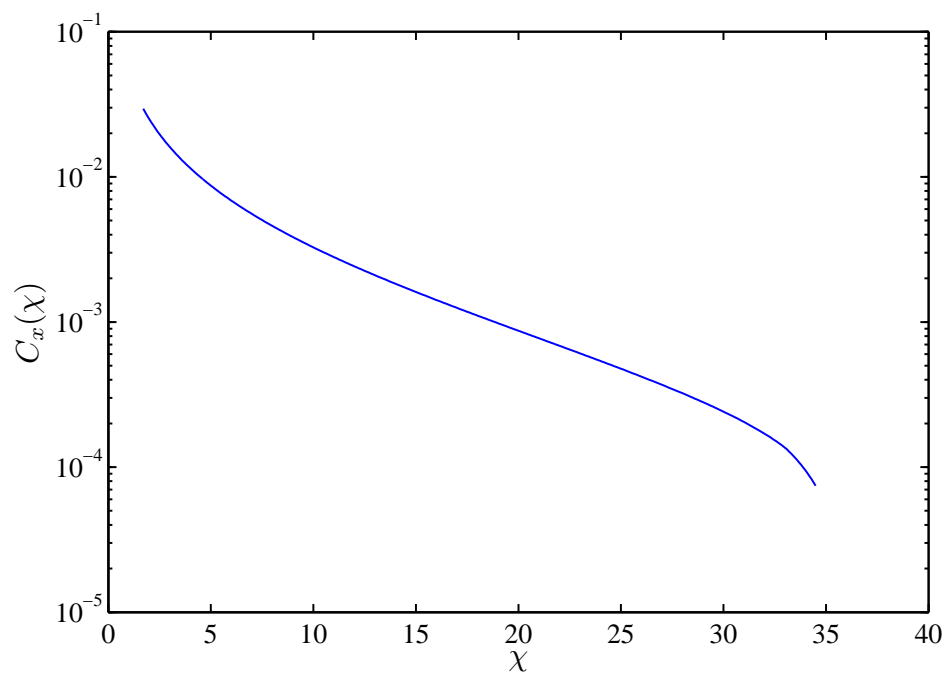
$$C_x(\chi) \Big|_{\chi=A_P} = p_w \quad , \quad (4-8)$$

variando-se A_P de $-\infty$ a $+\infty$.

Note que essa FDPC só é válida para X no intervalo

$$I_x = [1,7 \quad , \quad 34,5] \text{ dB} \quad (4-9)$$

A Figura 4.1 apresenta a Função Distribuição de Probabilidade Cumulativa de x ($C_x(X)$) para latitude de $20^\circ S$ e longitude de 300° .

Figura 4.1: Função Distribuição Cumulativa de x para latitude de $20^\circ S$ e longitude de 300°

Interferência Externa: três sistemas HEO com Estrutura Orbital A

Neste caso, a função densidade de probabilidade ($p_y(\gamma)$) e a função distribuição de probabilidade cumulativa ($C_y(\gamma)$) da degradação y , obtidas a partir dos resultados de [13], são as apresentadas na Figura 4.2. O azimute escolhido tem valor igual a 359° .

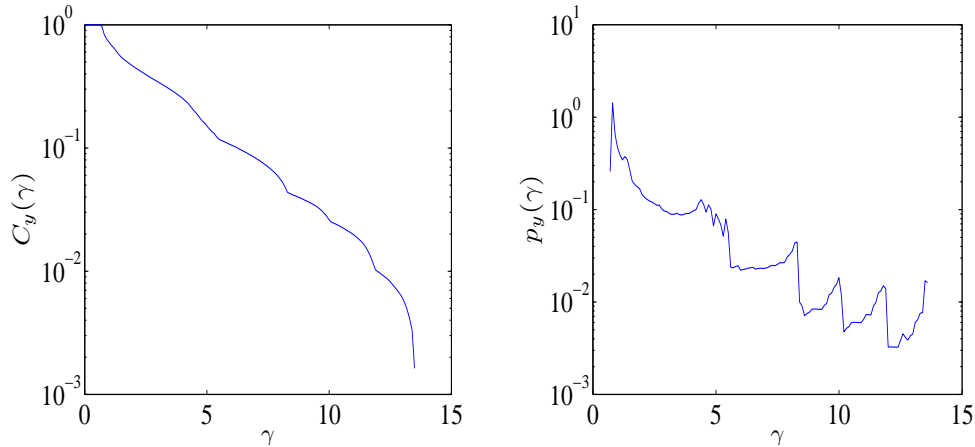


Figura 4.2: Função Densidade de Probabilidade ($p_y(\gamma)$) e Função Distribuição de Probabilidade Cumulativa ($C_y(\gamma)$) de y para latitude de $20^\circ S$ e longitude de 300° (Estrutura orbital A)

O comportamento estatístico da degradação z , representado por sua FDPC é determinado por (3-56). Como mencionado no Capítulo 3, pelo conhecimento parcial da FDPC da variável x , a FDPC de z $C_z(\Gamma)$ é conhecido apenas no intervalo I_z . Para o caso específico destas coordenadas e da interferência gerada por satélites com Estrutura A, tal intervalo é igual a

$$I_z = [15, 3 \quad , \quad 35, 2] \text{ dB} \quad (4-10)$$

A FDPC da variável aleatória z é ilustrada na Figura 4.3

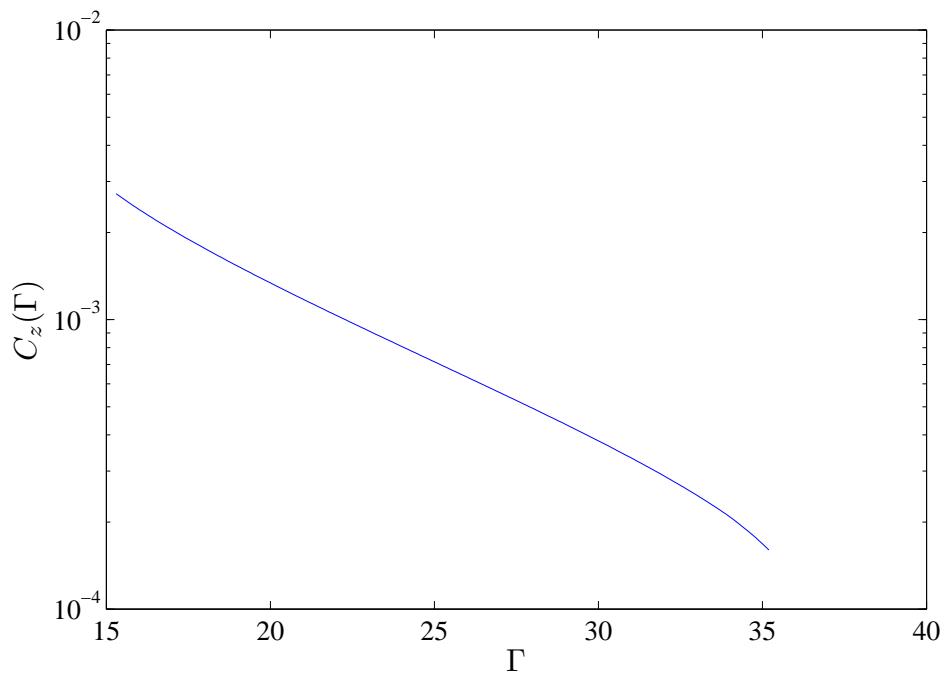


Figura 4.3: Função Distribuição Cumulativa de z para latitude de $20^\circ S$ e longitude de 300° (Estrutura orbital A)

As FDPCs das variáveis r_{eb} , r_{es} , r_{ses} e r_{bbe} foram determinadas a partir dos relacionamentos em (3-22), (3-11), (3-12) e (3-14) para os dois cenários aqui considerados (chuva e chuva com interferência). Em cada cenário, foram consideradas as modulações QPSK e QAM-128. Essas FDPCs foram determinadas para diferentes valores de $(E_b/N_0)_{cs[dB]}$. As FDPCs correspondentes aos valores $(E_b/N_0)_{cs[dB]} = 39$ dB e $(E_b/N_0)_{cs[dB]} = 49$ dB são ilustradas nas Figuras 4.4 e 4.5, respectivamente.

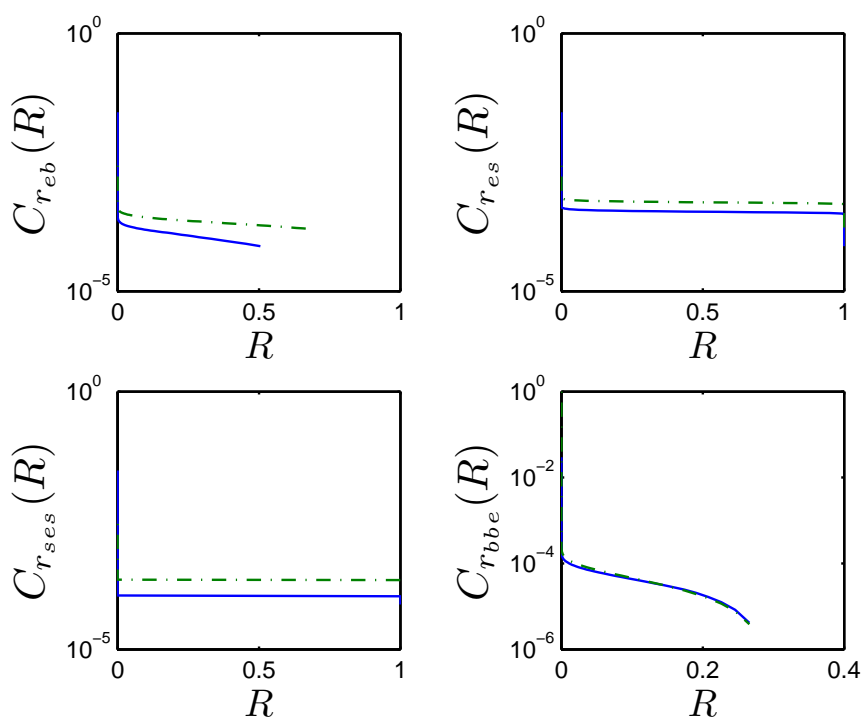


Figura 4.4: FDPC das variáveis aleatórias r_{eb} , r_{es} , r_{ses} e r_{bbe} para latitude de $20^\circ S$, longitude de 300° (Estrutura orbital A e modulação QPSK) e $(E_b/N_0)_{cs[dB]} = 39$ dB (curva sólida : chuva, curva tracejada : chuva e interferência)

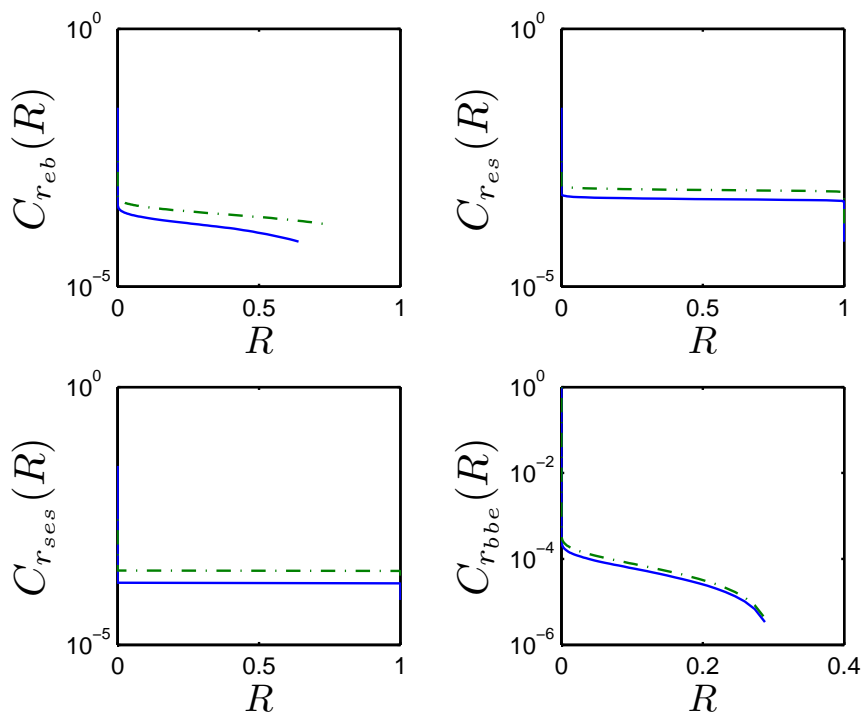


Figura 4.5: FDPC das variáveis aleatórias r_{eb} , r_{es} , r_{ses} e r_{bbe} para latitude de $20^\circ S$, longitude de 300° (Estrutura orbital A e modulação QAM-128) e $(E_b/N_0)_{cs[dB]} = 49$ dB (curva sólida : chuva, curva tracejada : chuva e interferência)

As Figuras 4.6 a 4.9 apresentam curvas dos limitantes inferiores e superiores para as estimativas dos parâmetros de desempenho de erro, em função de $(E_b/N_0)_{CS[dB]}$ para as modulações QPSK e QAM-128. Estas figuras permitem uma avaliação da folga entre os limitantes de cada estimativa, bem como uma comparação entre os valores dos diferentes parâmetros de desempenho de erro.

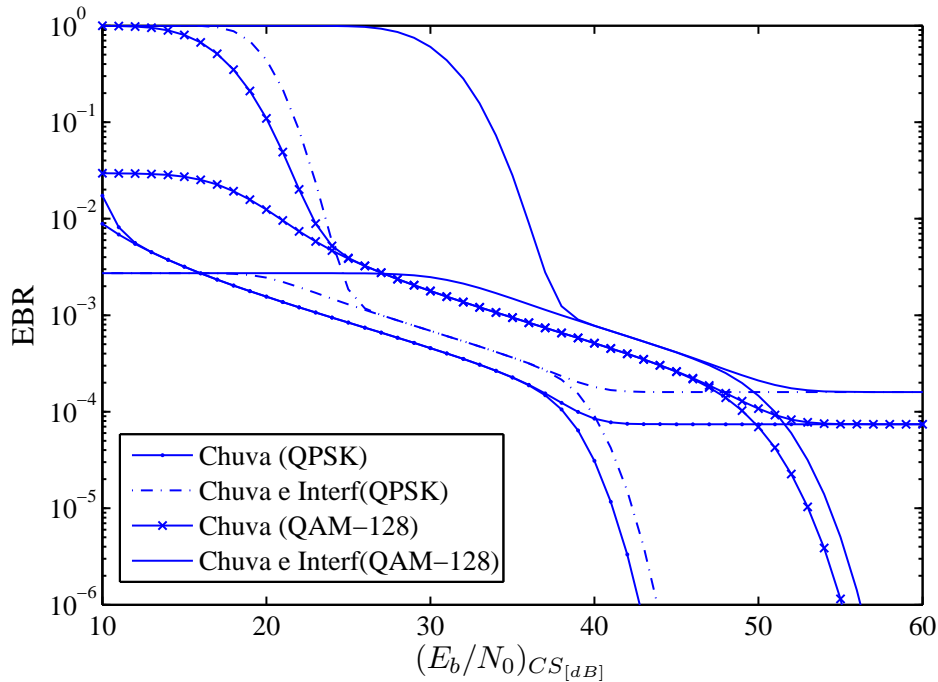


Figura 4.6: Taxa de bloco errado para latitude de $20^\circ S$ e longitude de 300° e Estrutura orbital A

Pela Figura 4.7 observa-se que, para garantir um valor de $ESR=2 \times 10^{-3}$, a margem de $(E_b/N_0)_{CS[dB]}$ na presença de chuva e interferência deve ser 4 dB acima da margem referente a situação onde a chuva é a única fonte de degradação do sinal e observa-se ainda que a margem para modulação QAM-128 deve ser 13 dB acima da margem para modulação QPSK. Da mesma forma, pela Figura (4.8), é possível verificar que, para manter um valor de $SESR=2 \times 10^{-4}$, o acréscimo na margem de $(E_b/N_0)_{CS[dB]}$ é de 3 dB quando se comparam os cenários na presença de chuva e na presença de chuva e interferência. Quando são consideradas as modulações QPSK e QAM-128, esta diferença de margem é de 11 dB.

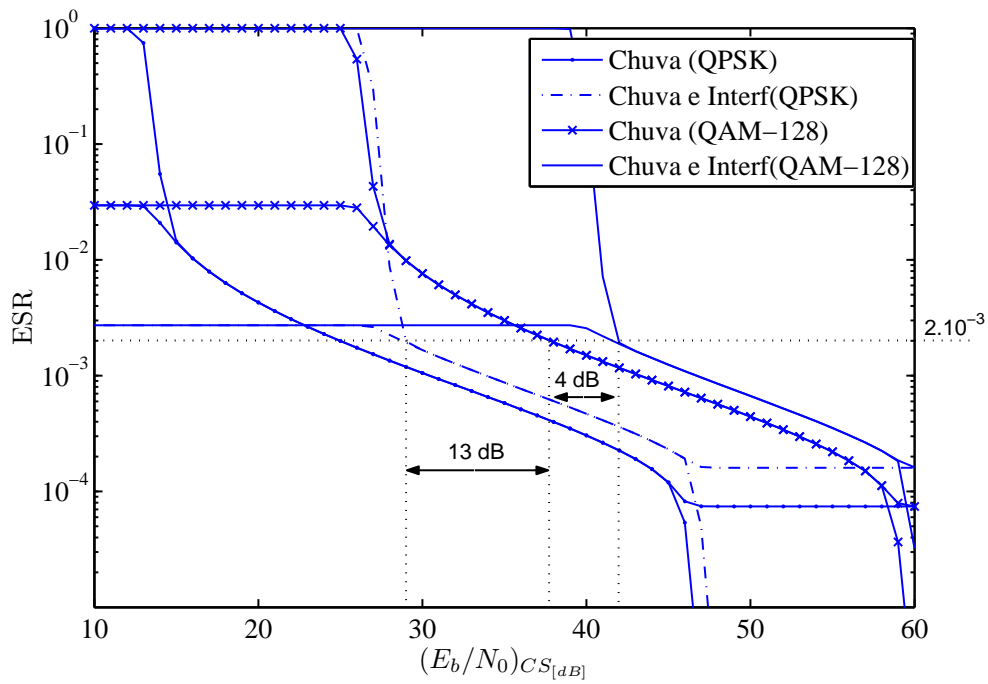


Figura 4.7: Taxa de segundo errado para latitude de $20^{\circ}S$ e longitude de 300° e Estrutura orbital A

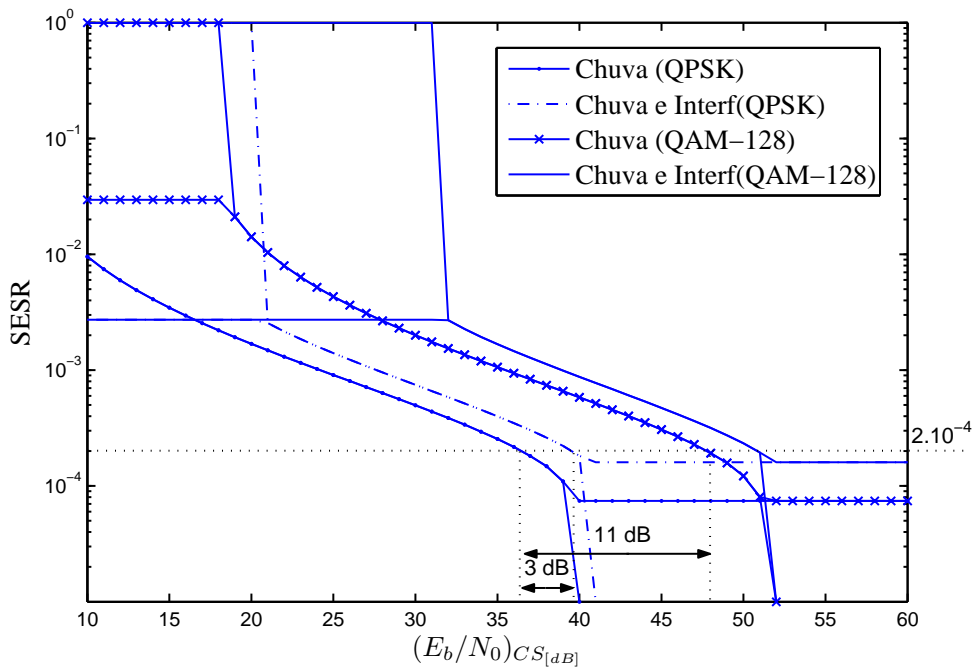


Figura 4.8: Taxa de segundo severamente errado para latitude de $20^{\circ}S$ e longitude de 300° e Estrutura orbital A

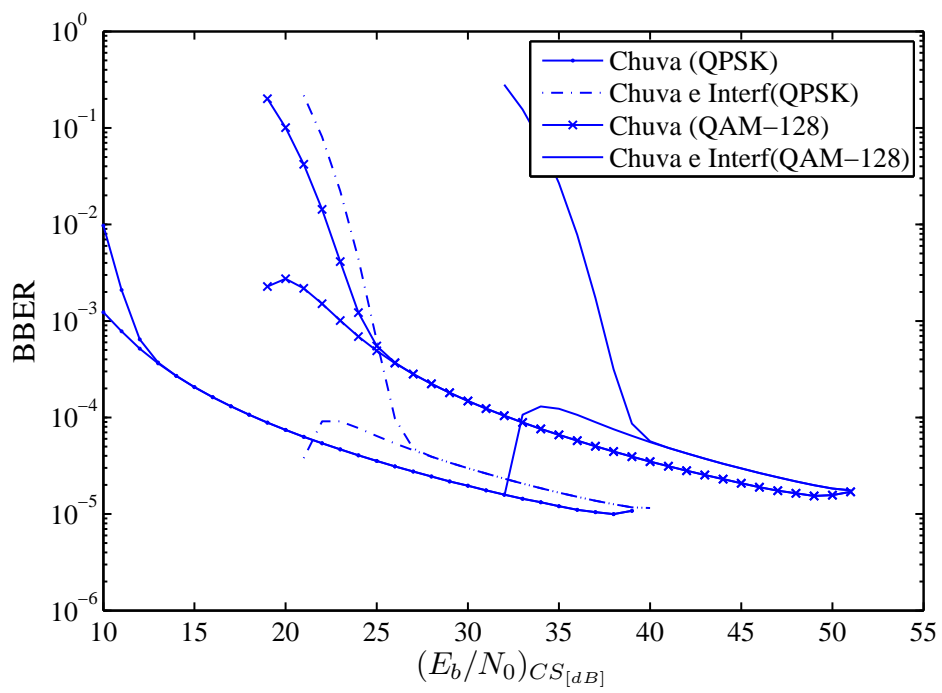


Figura 4.9: Taxa de bloco errado de fundo para latitude de 20°S e longitude de 300° e Estrutura orbital A

Interferência Externa: três sistemas HEO com Estrutura Orbital B

A função densidade de probabilidade ($p_y(\gamma)$) e a função distribuição de probabilidade cumulativa ($C_y(\gamma)$) da degradação y devida a interferências geradas por satélites com estrutura orbital B estão ilustradas na Figura 4.10. O azimute escolhido tem valor igual a 138° .

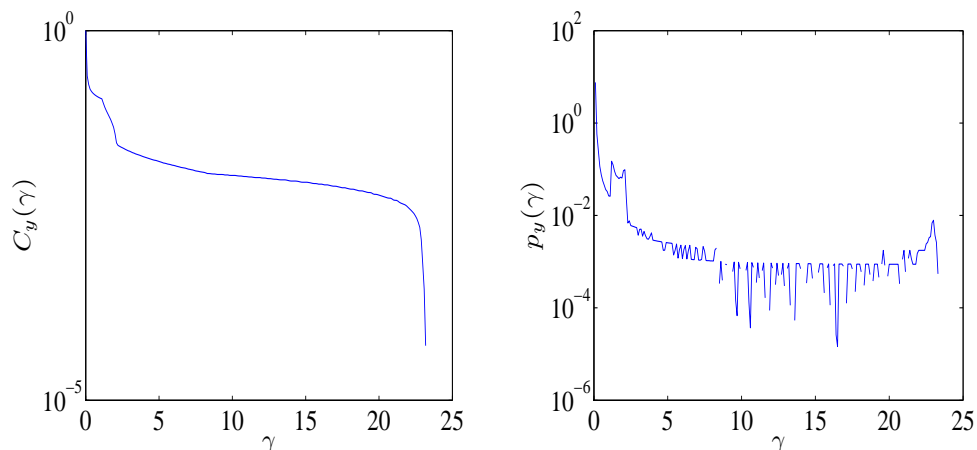


Figura 4.10: Função Densidade de Probabilidade ($p_y(\gamma)$) e Função Distribuição Cumulativa ($C_y(\gamma)$) de y para latitude de $20^\circ S$ e longitude de 300° (Estrutura orbital B)

O intervalo $I_z(\Gamma)$ da FDPC do fator de degradação z para esta situação é igual a

$$I_z = [25, 34, 6] \text{ dB} \quad (4-11)$$

A FDPC da variável aleatória z é ilustrada na Figura 4.11.

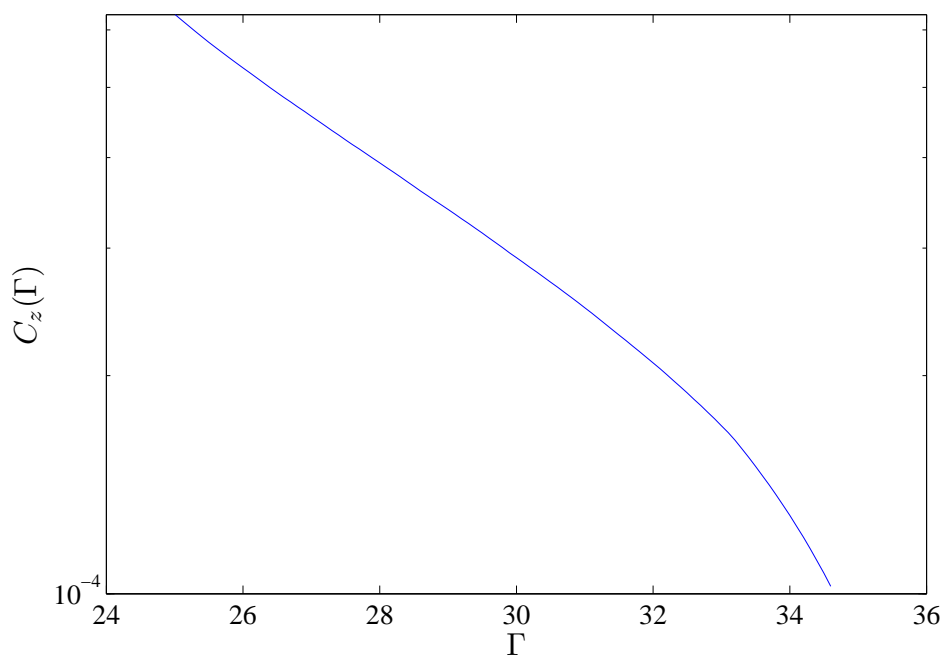


Figura 4.11: Função Distribuição Cumulativa de z para latitude $20^\circ S$ e longitude 300° (Estrutura orbital B)

As Figuras 4.12 e 4.13 ilustram as FDPCs das variáveis r_{eb} , r_{es} , r_{ses} e r_{bbe} para $(E_b/N_0)_{cs[dB]} = 39$ dB e $(E_b/N_0)_{cs[dB]} = 49$ dB, respectivamente.

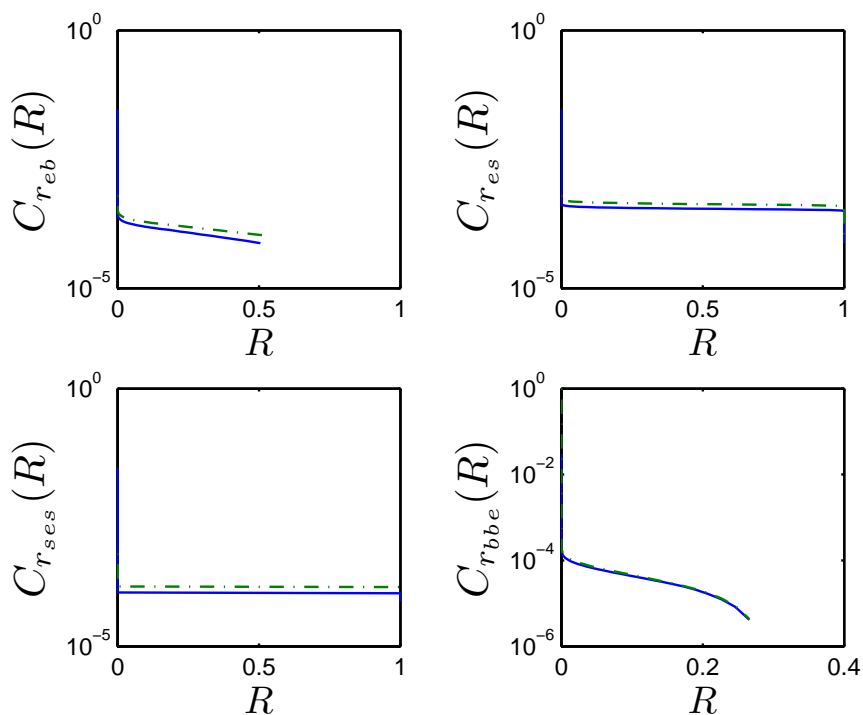


Figura 4.12: FDPC das variáveis aleatórias r_{eb} , r_{es} , r_{ses} e r_{bbe} para latitude $20^\circ S$, longitude 300° (Estrutura orbital B e modulação QPSK) e $(E_b/N_0)_{cs[dB]} = 39$ dB (curva sólida : chuva, curva tracejada : chuva e interferência)

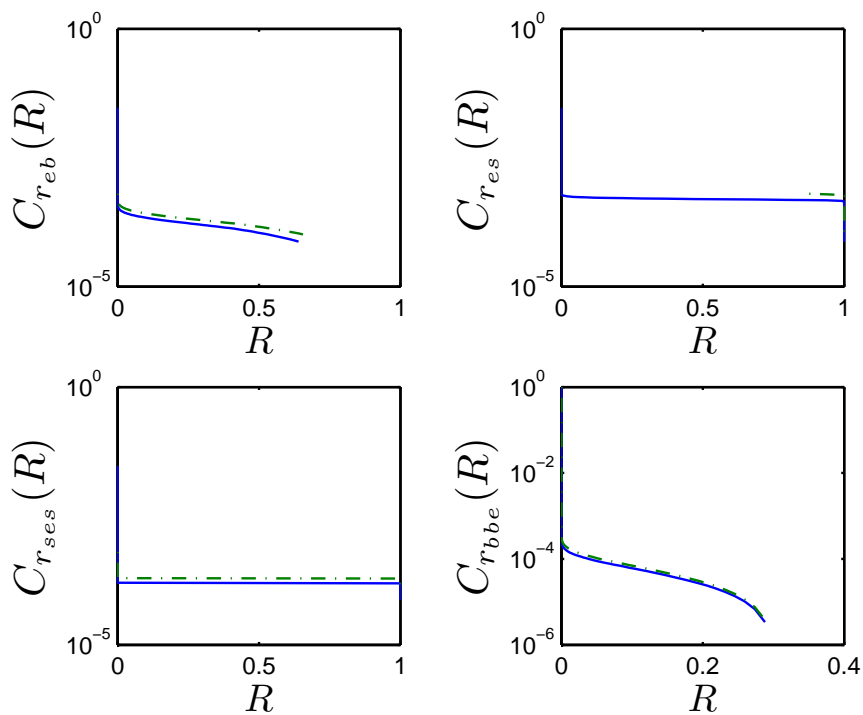


Figura 4.13: FDPC das variáveis aleatórias r_{eb} , r_{es} , r_{ses} e r_{bbe} para latitude $20^\circ S$, longitude 300° (Estrutura orbital B e modulação QAM-128) e $(E_b/N_0)_{cs[dB]} = 49$ dB (curva sólida : chuva, curva tracejada : chuva e interferência)

As Figuras numeradas de 4.14 a 4.17 apresentam as curvas dos limitantes inferiores e superiores em função de $(E_b/N_0)_{CS[dB]}$.

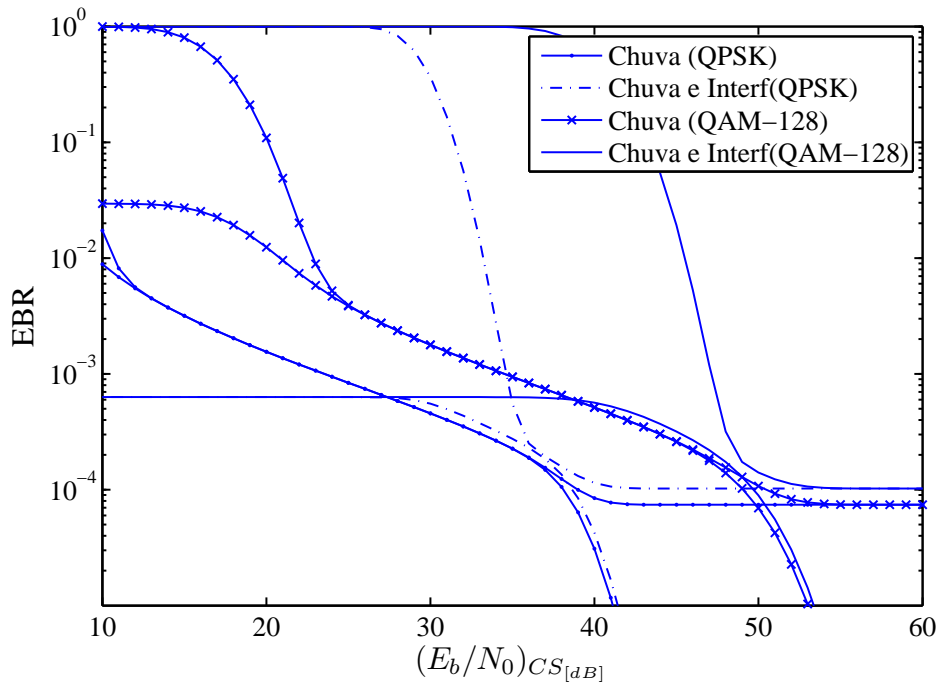


Figura 4.14: Taxa de bloco errado para latitude $20^\circ S$ e longitude 300° e Estrutura orbitl B

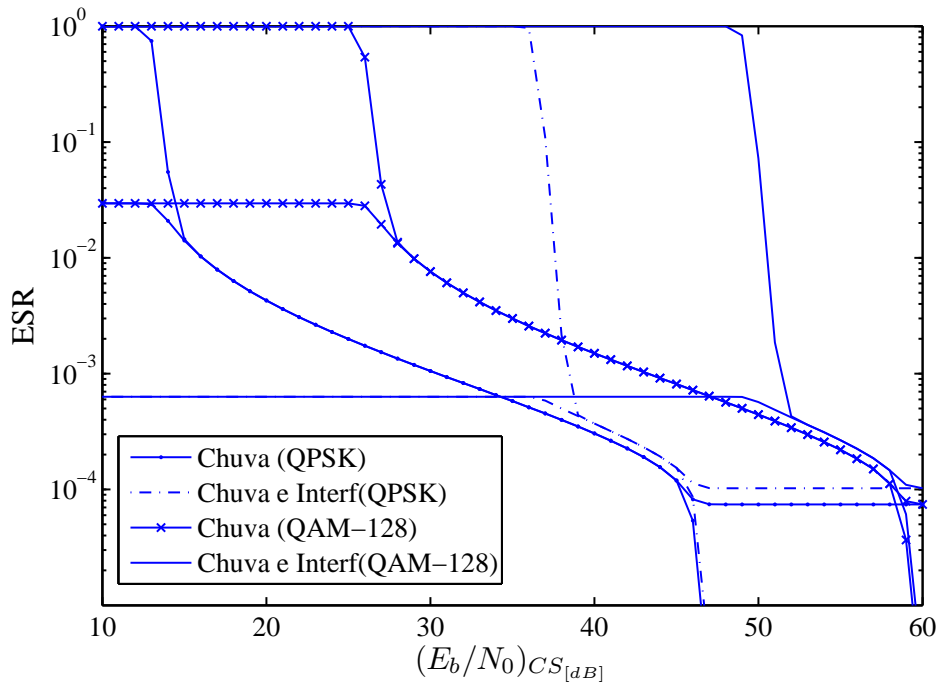


Figura 4.15: Taxa de segundo erro para latitude $20^\circ S$ e longitude 300° e Estrutura orbitl B

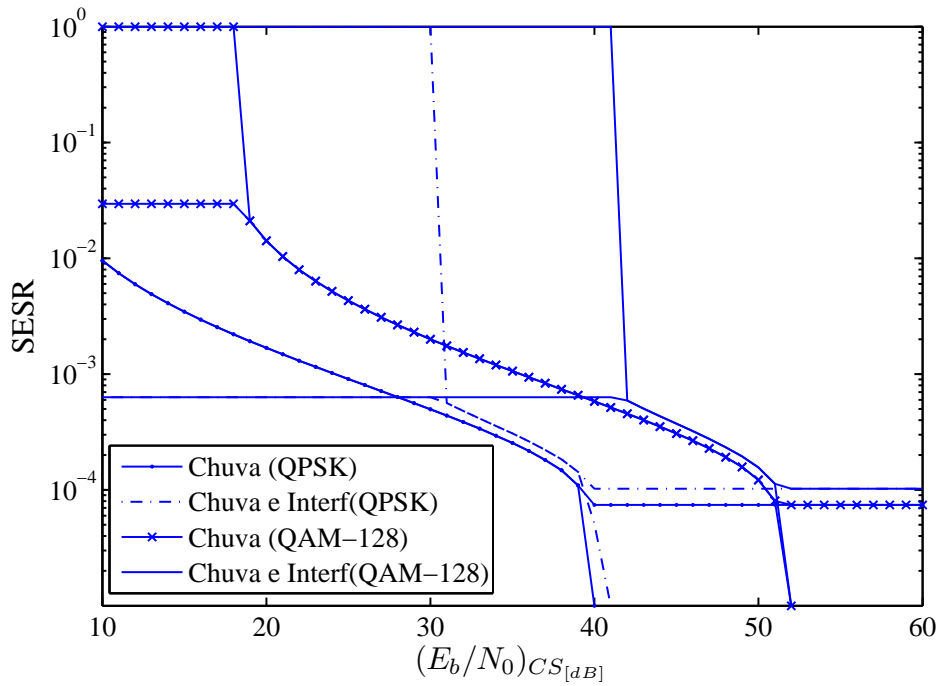


Figura 4.16: Taxa de segundo severamente errado para latitude $20^\circ S$ e longitude 300° e Estrutura orbitl B

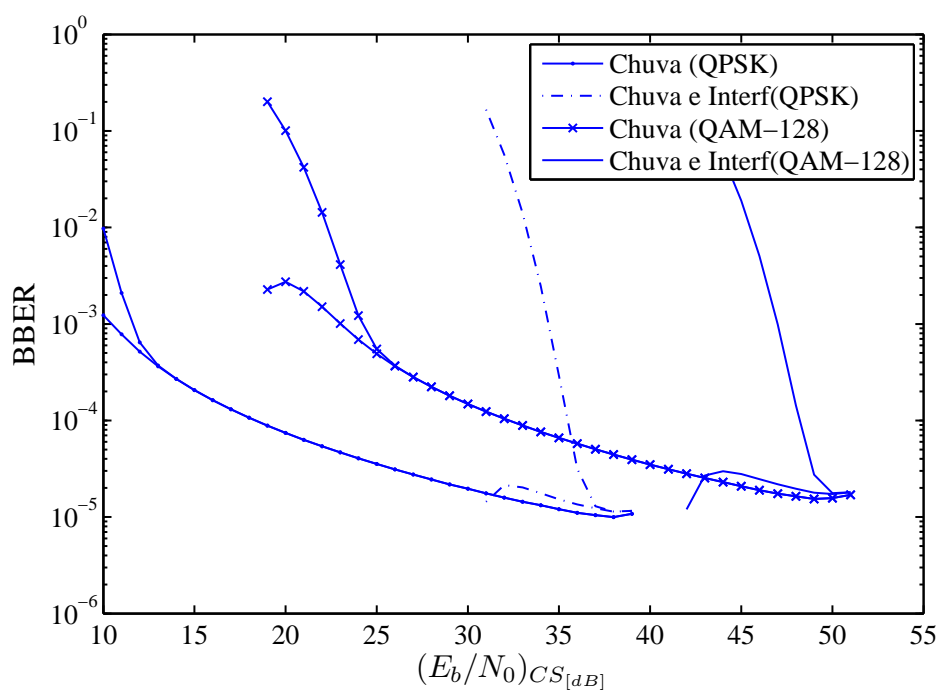


Figura 4.17: Taxa de bloco errado de fundo para latitude $20^{\circ}S$ e longitude 300° e Estrutura orbitl B

4.2

Caso 2: Receptor localizado na latitude 0°

A longitude escolhida para este caso foi 310°. Os valores da taxa chuva $R_{0,01}$ e da atenuação $A_{0,01}$ excedidos por 0,01% do período referente a um ano para estas coordenadas são iguais a

$$R_{0,01} = 100 \text{ mm/h} \quad (4-12)$$

$$A_{0,01} = 30,81 \text{ dB} \quad (4-13)$$

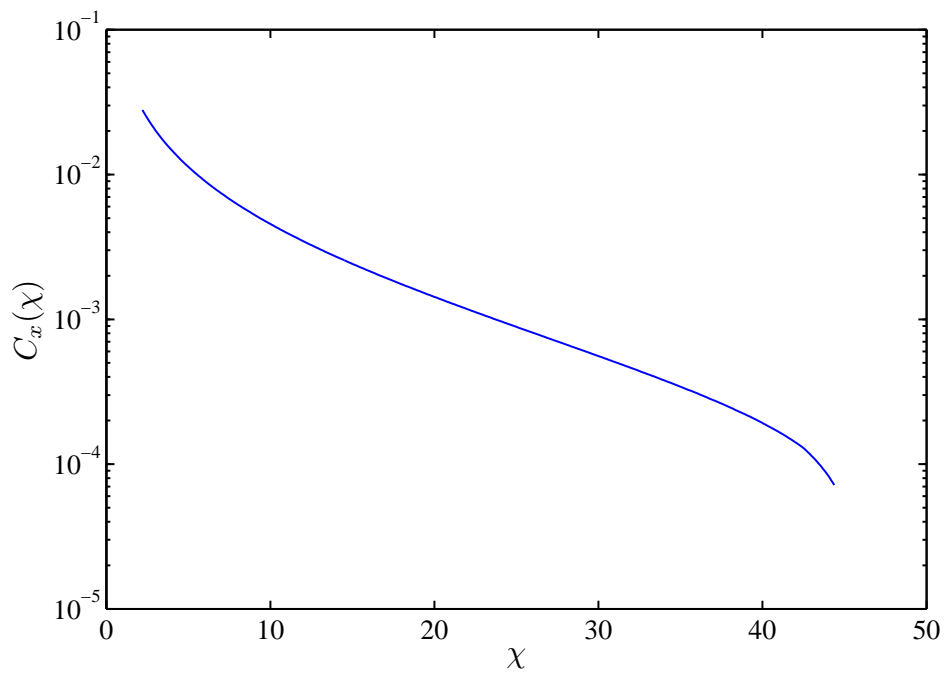
Os valores A_P de atenuação (em dB) excedidos durante a percentagem P são determinados por

$$A_P = 2,157P^{-(0,855+0,139\log_{10}(P))} \quad , 10^{-3} \leq P \leq 1 \quad (4-14)$$

O intervalo I_x para estas coordenadas é igual a

$$I_x = [2,2 \text{ , } 44,4] \text{ dB} \quad (4-15)$$

A Figura 4.18 apresenta a Função Distribuição de Probabilidade Cumulativa de x ($C_x(X)$) para este Caso.

Figura 4.18: Função Distribuição Cumulativa de x para latitude de 0° e longitude de 310°

Interferência Externa: três sistemas HEO com Estrutura Orbital A

A Figura 4.19 ilustra a função densidade de probabilidade ($p_y(\gamma)$) e a função distribuição de probabilidade cumulativa ($C_y(\gamma)$) da degradação y para este caso específico. O azimute escolhido tem valor igual a 334° .

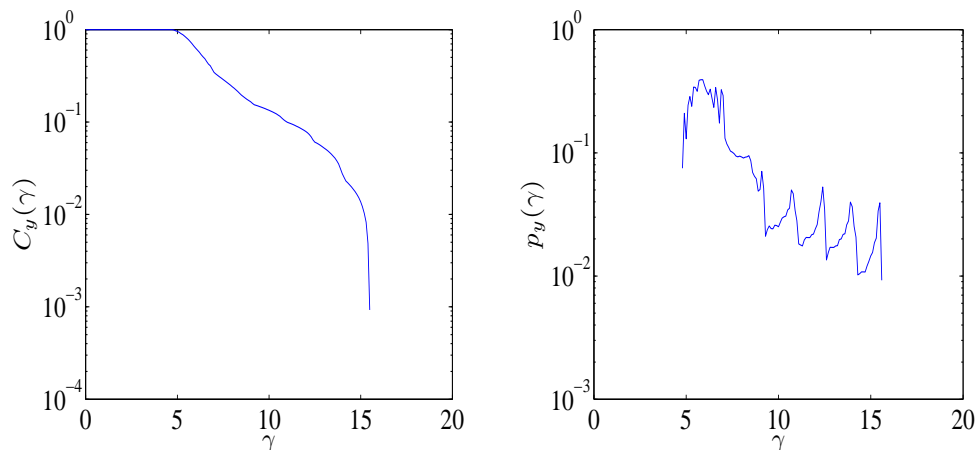


Figura 4.19: Função Densidade de Probabilidade ($p_y(\gamma)$) e Função Distribuição Cumulativa ($C_y(\gamma)$) de y para latitude de 0° e longitude de 310° (Estrutura orbital A)

O intervalo I_z , no qual a FDPC de z é conhecida, tem valor igual a

$$I_z = [17,8 \quad , \quad 49,2] \text{ dB} \quad (4-16)$$

A FDPC da variável aleatória z é ilustrada na Figura 4.20

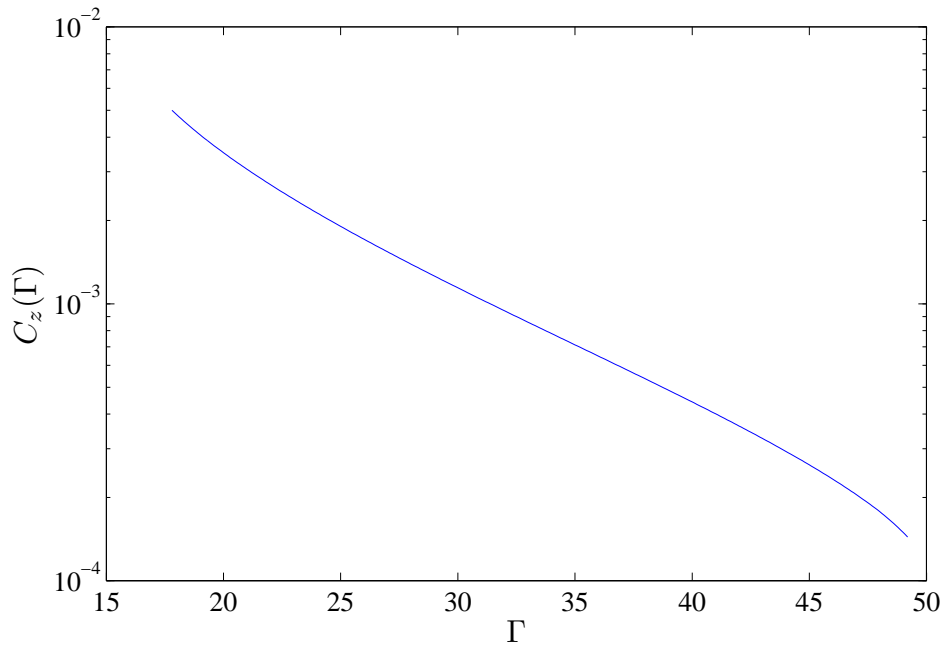


Figura 4.20: Função Distribuição Cumulativa de z para latitude 0° e longitude 310° (Estrutura orbital A)

As FDPCs das variáveis r_{eb} , r_{es} , r_{ses} e r_{bbe} correspondentes a $(E_b/N_0)_{cs[dB]} = 39$ dB e $(E_b/N_0)_{cs[dB]} = 49$ dB para os dois cenários e para as duas modulações considerados estão apresentadas nas Figuras 4.21 e 4.22.

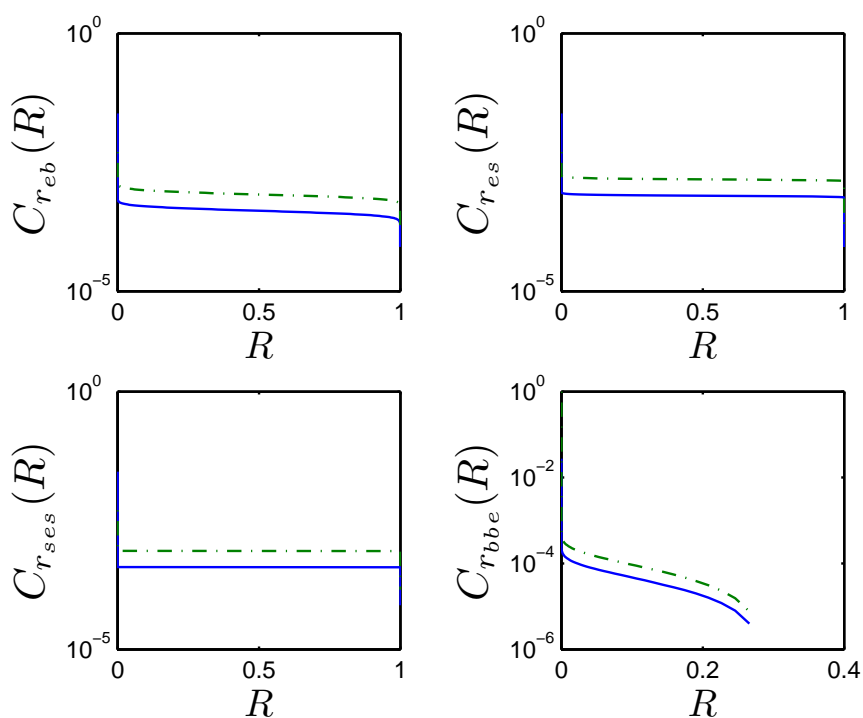


Figura 4.21: FDPC das variáveis aleatórias r_{eb} , r_{es} , r_{ses} e r_{bbe} para latitude 0° , longitude 310° (Estrutura orbital A e modulação QPSK) e $(E_b/N_0)_{cs[dB]} = 39$ dB (curva sólida : chuva, curva tracejada : chuva e interferência)

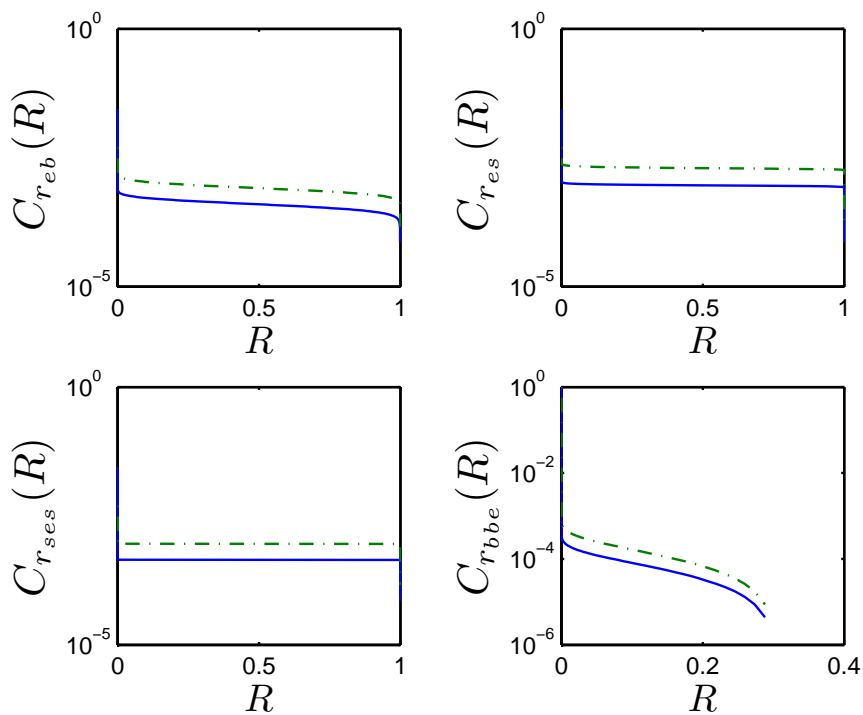


Figura 4.22: FDPC das variáveis aleatórias r_{eb} , r_{es} , r_{ses} e r_{bbe} para latitude 0° , longitude 310° (Estrutura orbital A e modulação QAM-128) e $(E_b/N_0)_{cs[dB]} = 49$ dB (curva sólida : chuva, curva tracejada : chuva e interferência)

As Figuras numeradas de 4.23 a 4.26 apresentam os limitantes para os parâmetros de desempenho de erro em função de $(E_b/N_0)_{CS[dB]}$.

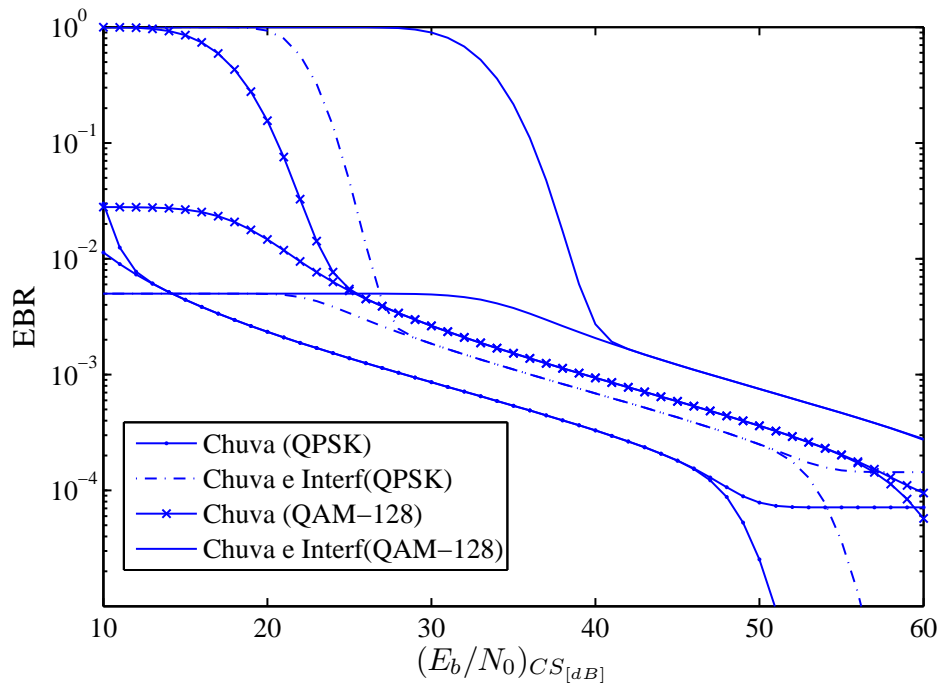


Figura 4.23: Taxa de bloco errado para latitude 0° e longitude 310° e Estrutura orbital A

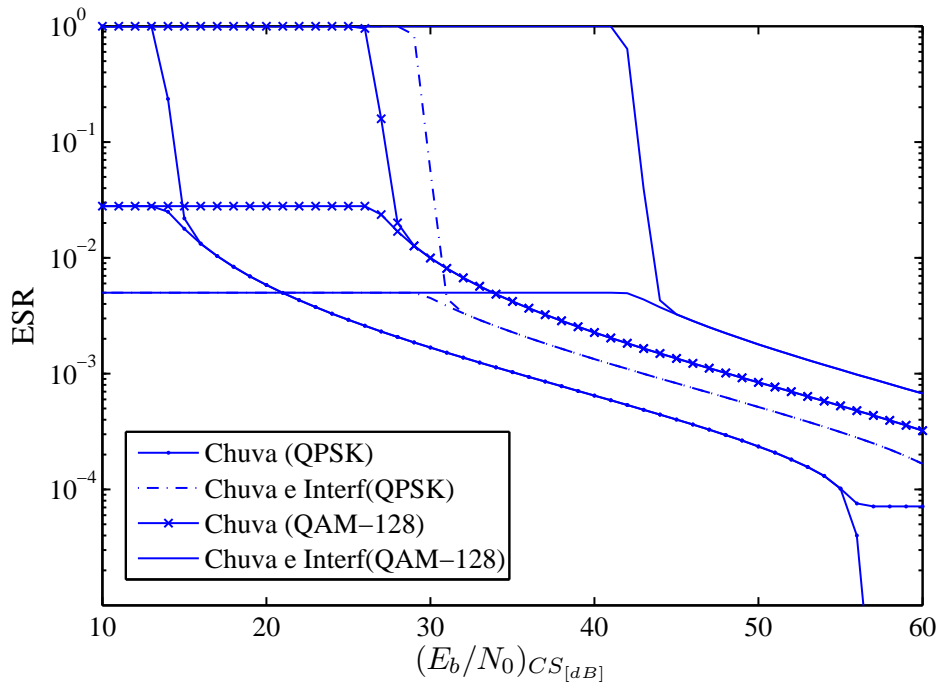


Figura 4.24: Taxa de segundo erro para latitude 0° e longitude 310° e Estrutura orbital A

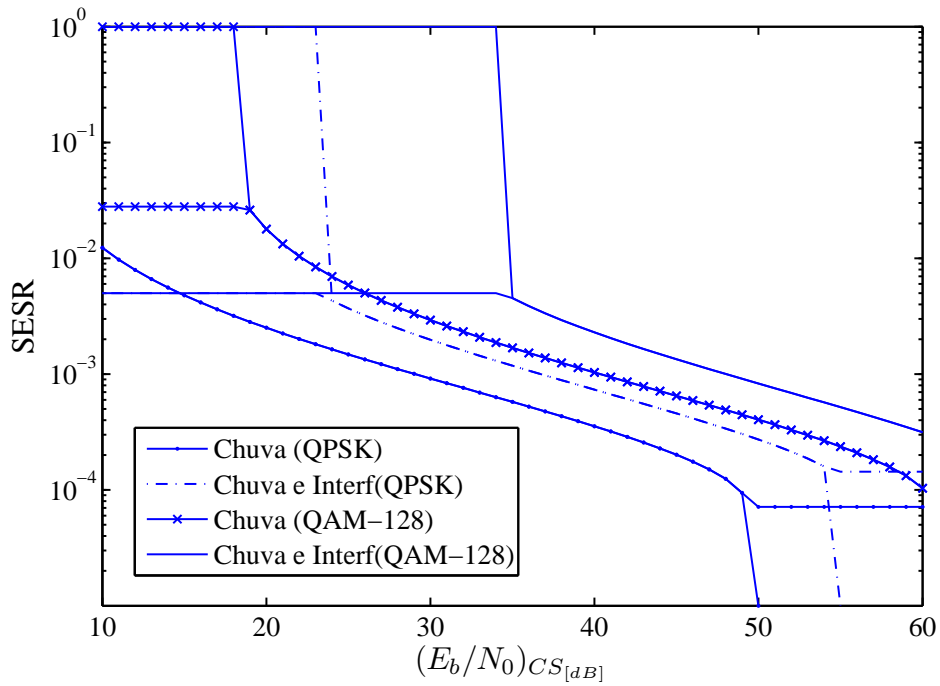


Figura 4.25: Taxa de segundo severamente errado para latitude 0° e longitude 310° e Estrutura orbital A

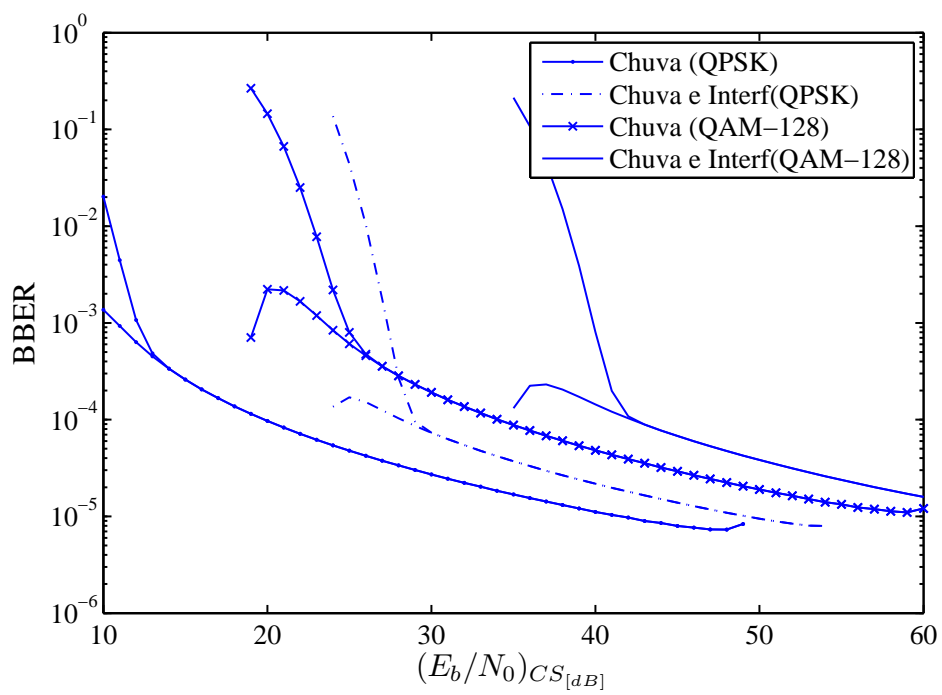


Figura 4.26: Taxa de bloco errado de fundo para latitude 0° e longitude 310° e Estrutura orbital A

Interferência Externa: três sistemas HEO com Estrutura Orbital B

A função densidade de probabilidade ($p_y(\gamma)$) e a função distribuição de probabilidade cumulativa ($C_y(\gamma)$) da degradação y para este caso estão ilustradas na Figura 4.27. O azimute escolhido tem valor igual a 155° .

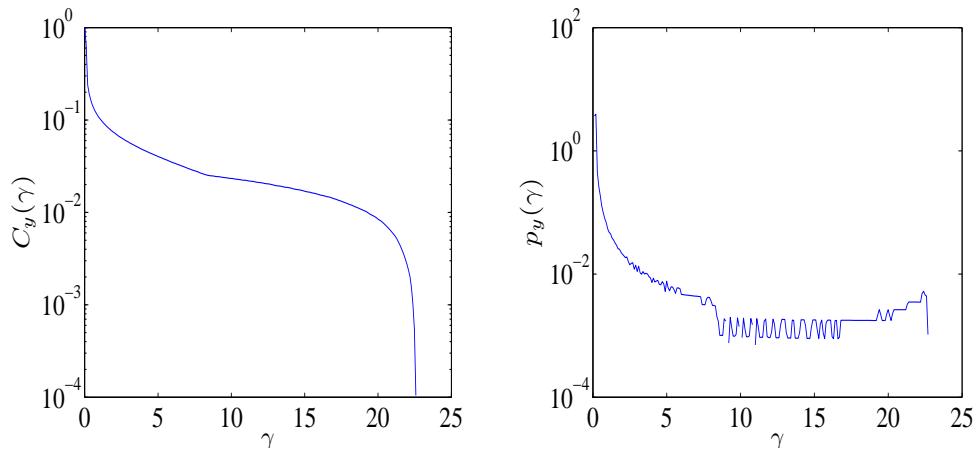


Figura 4.27: Função Densidade de Probabilidade ($p_y(\gamma)$) e Função Distribuição Cumulativa ($C_y(\gamma)$) de y para latitude de 0° e longitude de 310° (Estrutura orbital B)

O intervalo $I_z(\Gamma)$ da FDPC do fator de degradação z para este caso é igual a

$$I_z = [24,9 \text{ , } 44,5] \text{ dB} \quad (4-17)$$

A FDPC da variável aleatória z é ilustrada na Figura 4.28.

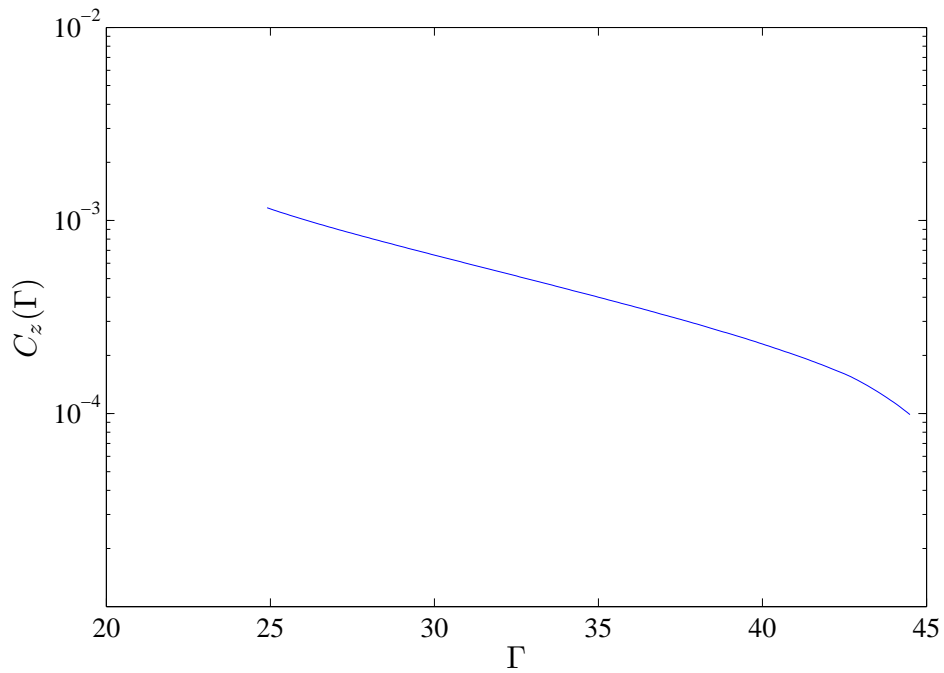


Figura 4.28: Função Distribuição Cumulativa de z para latitude 0° e longitude 310° (Estrutura orbital B)

As Figuras 4.29 e 4.30 ilustram as FDPCs das variáveis r_{eb} , r_{es} , r_{ses} e r_{bbe} para $(E_b/N_0)_{cs[dB]} = 39$ dB e $(E_b/N_0)_{cs[dB]} = 49$ dB, respectivamente.

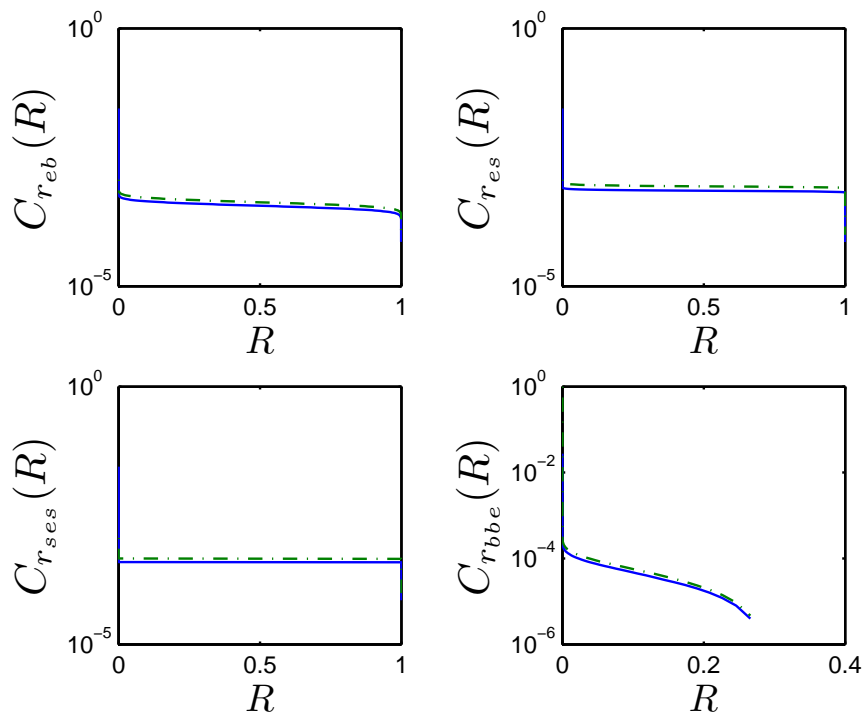


Figura 4.29: FDPC das variáveis aleatórias r_{eb} , r_{es} , r_{ses} e r_{bbe} para latitude 0° , longitude 310° (Estrutura orbital B e modulação QPSK) e $(E_b/N_0)_{cs[dB]} = 39$ dB (curva sólida : chuva, curva tracejada : chuva e interferência)

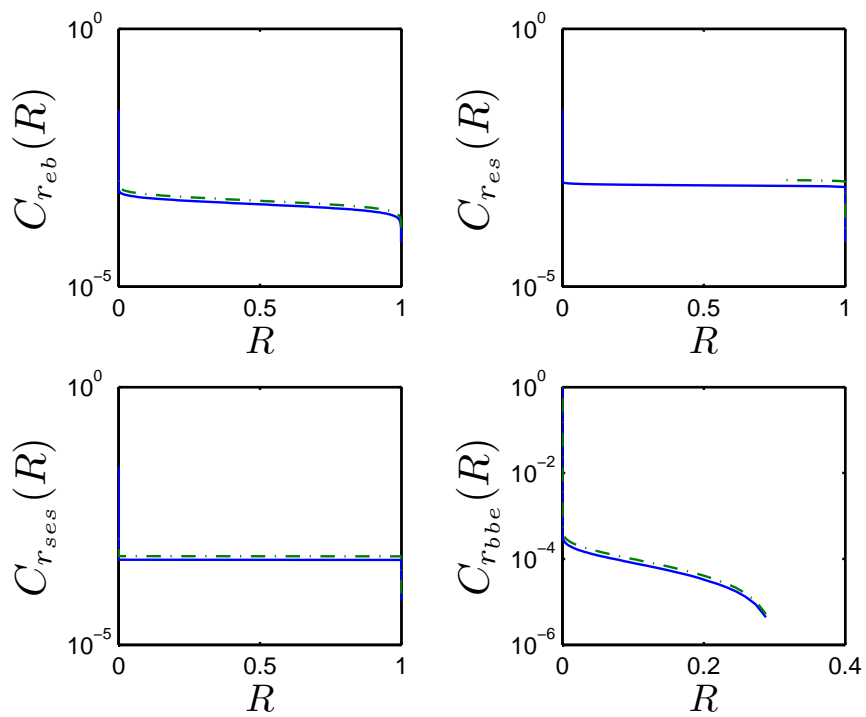


Figura 4.30: FDPC das variáveis aleatórias r_{eb} , r_{es} , r_{ses} e r_{bbe} para latitude 0° , longitude 310° (Estrutura orbital B e modulação QAM-128) e $(E_b/N_0)_{cs[dB]} = 49$ dB (curva sólida : chuva, curva tracejada : chuva e interferência)

As Figuras numeradas de 4.31 a 4.34 apresentam as curvas dos limitantes inferiores e superiores em função de $(E_b/N_0)_{CS[dB]}$.

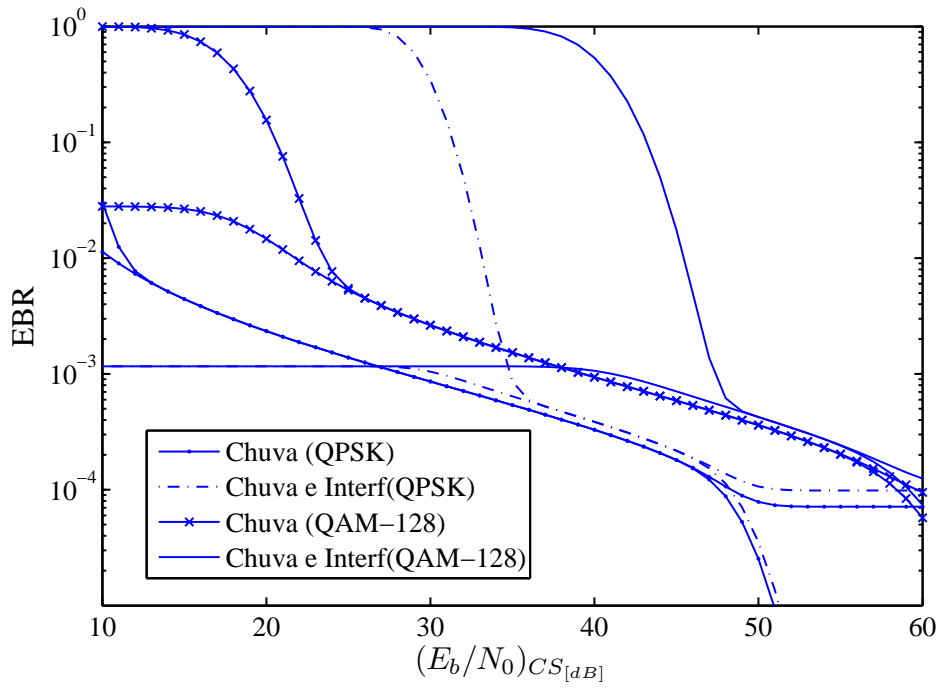


Figura 4.31: Taxa de bloco errado para latitude 0° e longitude 310° e Estrutura orbital B

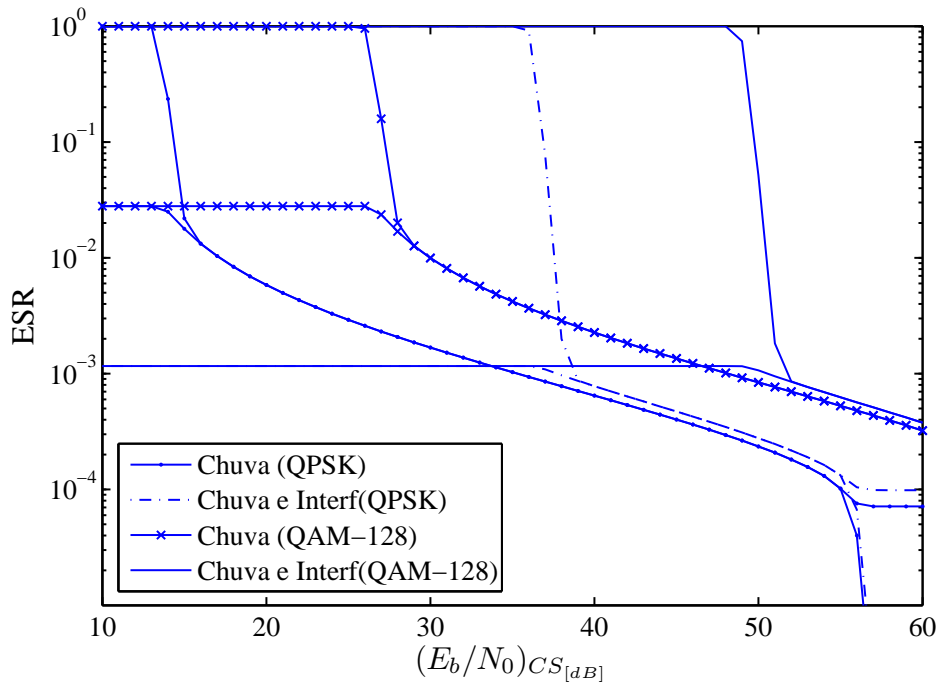


Figura 4.32: Taxa de segundo erro para latitude 0° e longitude 310° e Estrutura orbital B

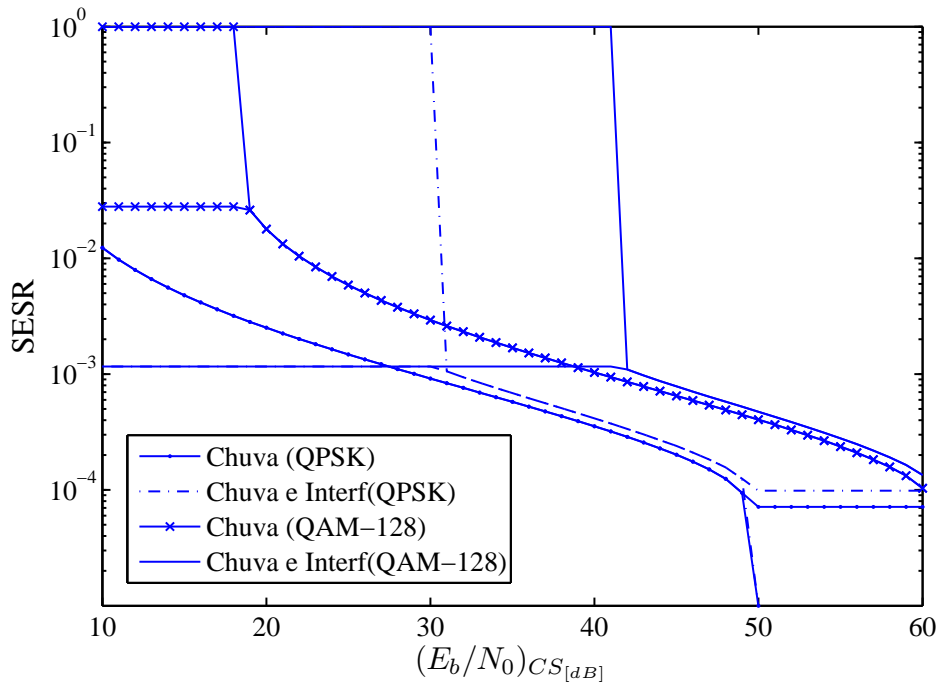


Figura 4.33: Taxa de segundo severamente errado para latitude 0° e longitude 310° e Estrutura orbital B

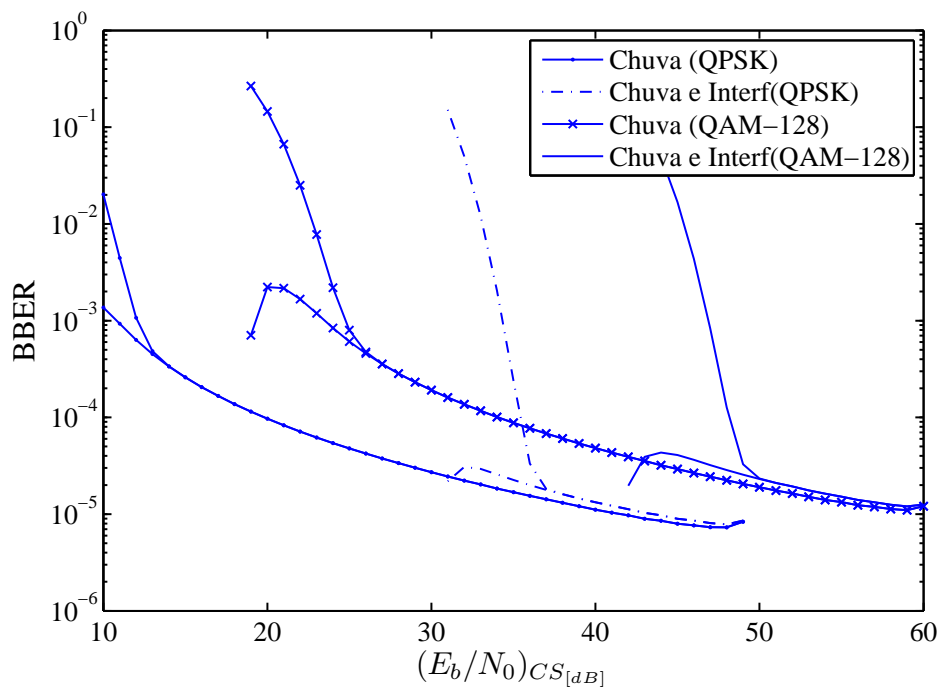


Figura 4.34: Taxa de bloco errado de fundo para latitude 0° e longitude 310° e Estrutura orbital B

4.3

Caso 3: Receptor localizado na latitude $20^\circ N$

Para latitude $20^\circ N$, a longitude escolhida foi 77° . Para estas coordenadas, foram calculados os valores da taxa chuva $R_{0,01}$ e da atenuação $A_{0,01}$ excedidos por 0,01% do período referente a um ano. Estes valores são iguais a

$$R_{0,01} = 60 \text{ mm/h} \quad (4-18)$$

$$A_{0,01} = 23,93 \text{ dB} \quad (4-19)$$

Com base nestes dados, são determinados os valores de atenuação A_P (em dB) excedidos durante a percentagem de tempo P por

$$A_P = 1,675P^{-(0,855+0,139\log_{10}(P))} \quad , 10^{-3} \leq P \leq 1 \quad (4-20)$$

O intervalo I_x para este caso é igual a

$$I_x = [1,7 \text{ , } 34,5] \text{ dB} \quad (4-21)$$

A Figura 4.35 apresenta a Função Distribuição de Probabilidade Cumulativa de x ($C_x(X)$) para este Caso.

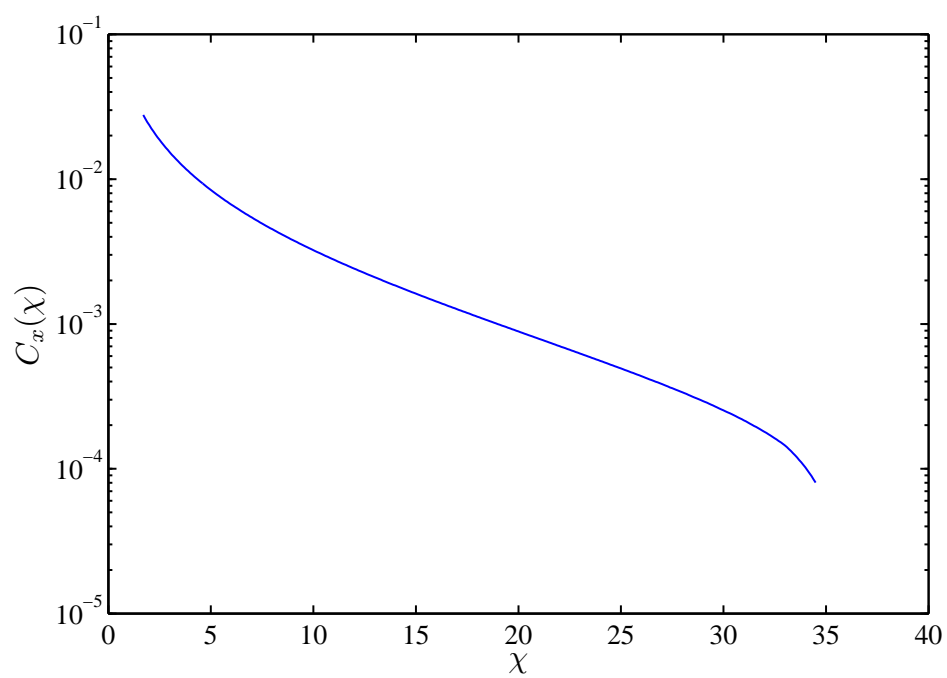


Figura 4.35: Função Distribuição Cumulativa de x para latitude de $20^\circ N$ e longitude de 77°

Interferência Externa: três sistemas HEO com Estrutura Orbital A

Para este caso específico, a função densidade de probabilidade ($p_y(\gamma)$) e a função distribuição de probabilidade cumulativa ($C_y(\gamma)$) da degradação y são as ilustradas na Figura 4.36. O azimute escolhido tem valor igual a 34° .

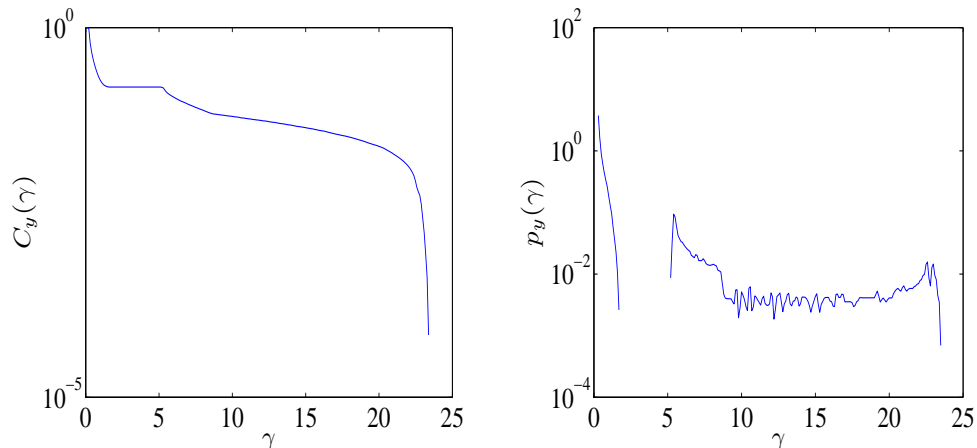


Figura 4.36: Função Densidade de Probabilidade ($p_y(\gamma)$) e Função Distribuição Cumulativa ($C_y(\gamma)$) de y para latitude de $20^\circ N$ e longitude de 77° (Estrutura orbital A)

O intervalo I_z no qual a FDPC de z é conhecida tem valor igual a

$$I_z = [25, 2 \quad , \quad 34, 8] \text{ dB} \quad (4-22)$$

A FDPC da variável aleatória z é ilustrada na Figura 4.37

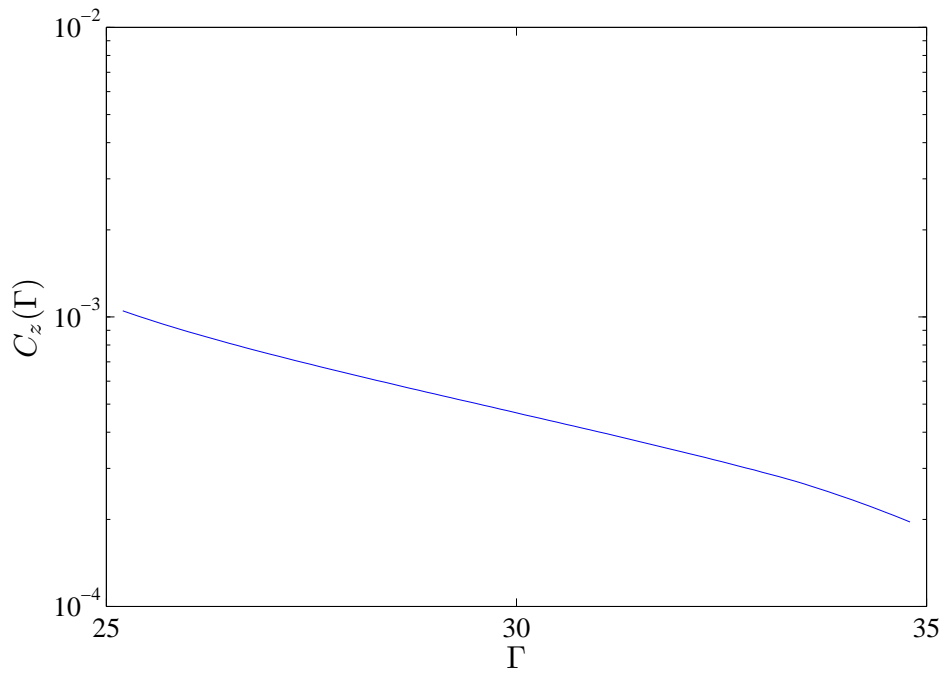


Figura 4.37: Função Distribuição Cumulativa de z para latitude $20^\circ N$ e longitude 77° (Estrutura orbital A)

As FDPCs das variáveis r_{eb} , r_{es} , r_{ses} e r_{bbe} correspondentes a $(E_b/N_0)_{cs[dB]} = 39$ dB e $(E_b/N_0)_{cs[dB]} = 49$ dB para os dois cenários e para as duas modulações considerados estão apresentadas nas Figuras 4.38 e 4.39.

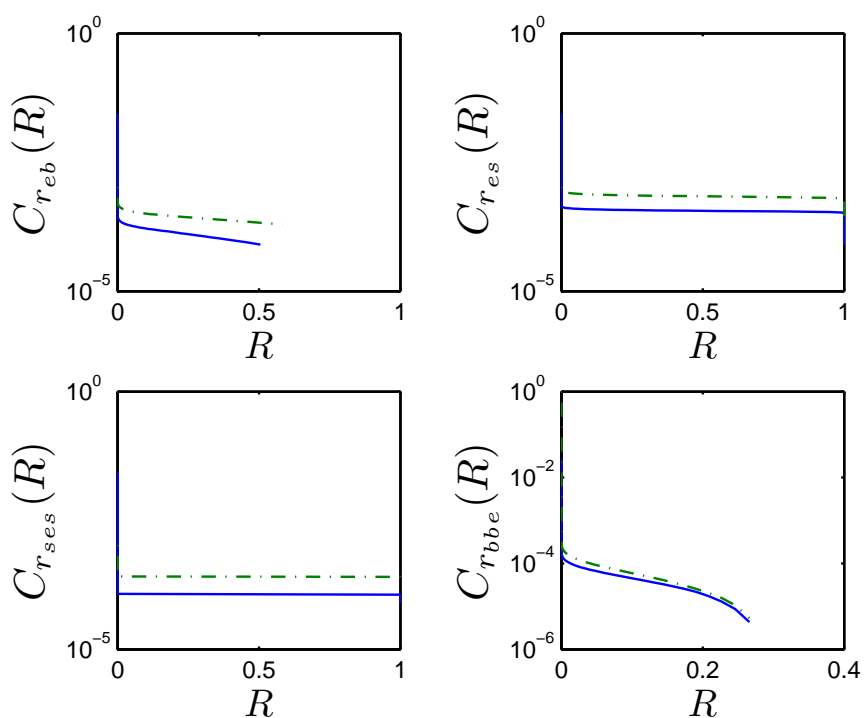


Figura 4.38: FDPC das variáveis aleatórias r_{eb} , r_{es} , r_{ses} e r_{bbe} para latitude $20^\circ N$, longitude 77° (Estrutura orbital A e modulação QPSK) e $(E_b/N_0)_{cs[dB]} = 39$ dB (curva sólida : chuva, curva tracejada : chuva e interferência)

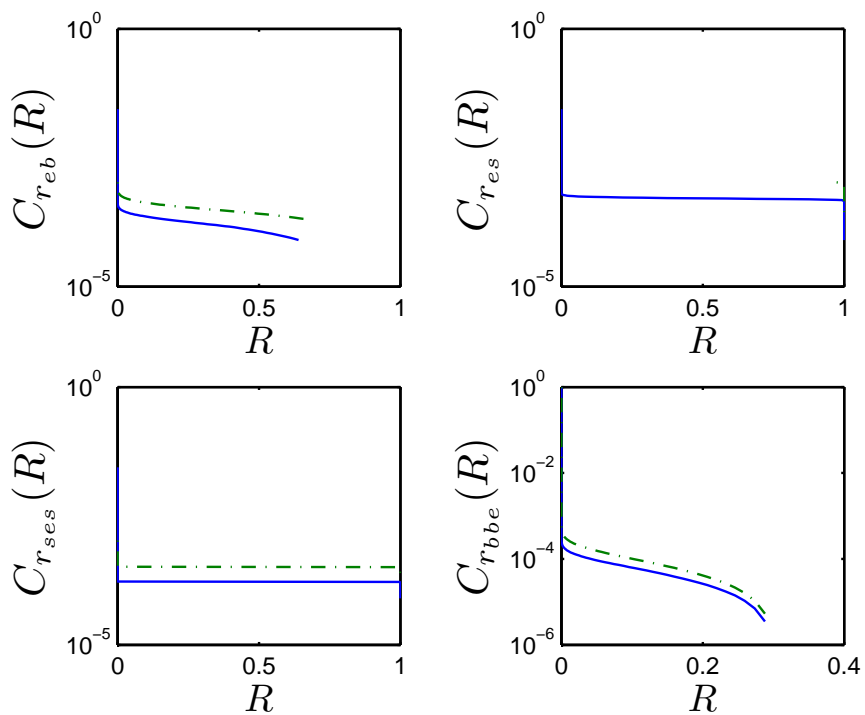


Figura 4.39: FDPC das variáveis aleatórias r_{eb} , r_{es} , r_{ses} e r_{bbe} para latitude $20^\circ N$, longitude 77° (Estrutura orbital A e modulação QAM-128) e $(E_b/N_0)_{cs[dB]} = 49$ dB (curva sólida : chuva, curva tracejada : chuva e interferência)

As Figuras numeradas de 4.40 a 4.43 apresentam os limitantes para os parâmetros de desempenho de erro em função de $(E_b/N_0)_{CS[dB]}$.

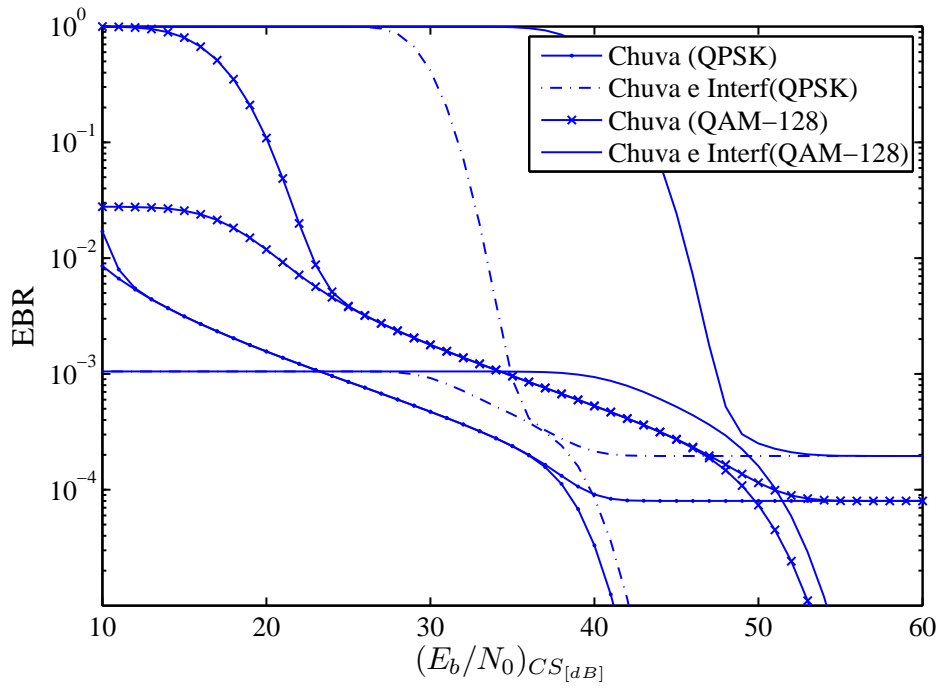


Figura 4.40: Taxa de bloco errado para latitude $20^\circ N$ e longitude 77° e Estrutura orbital A

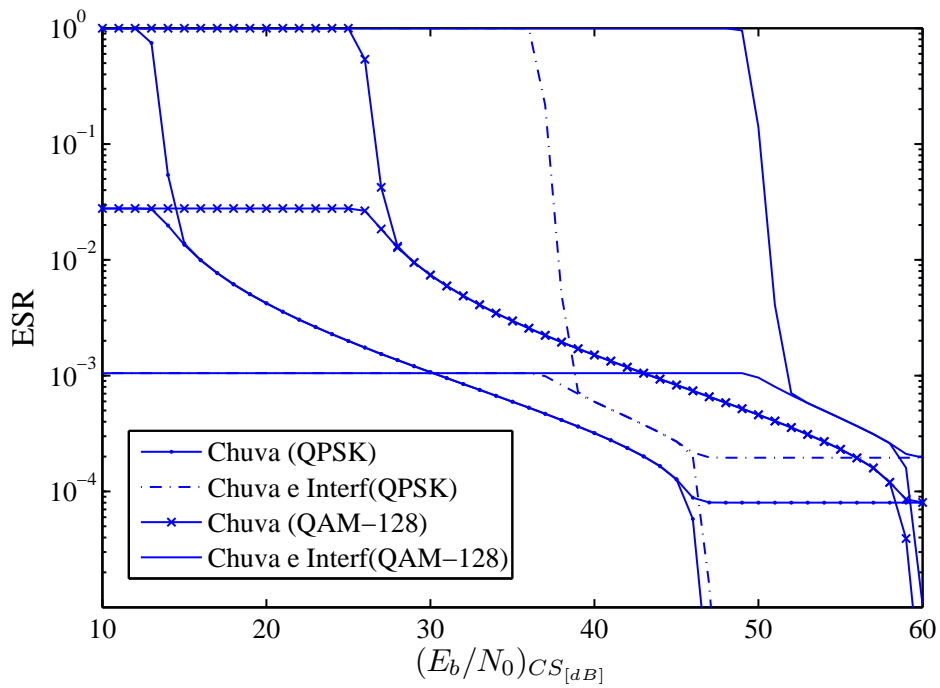


Figura 4.41: Taxa de segundo errado para latitude $20^\circ N$ e longitude 77° e Estrutura orbital A

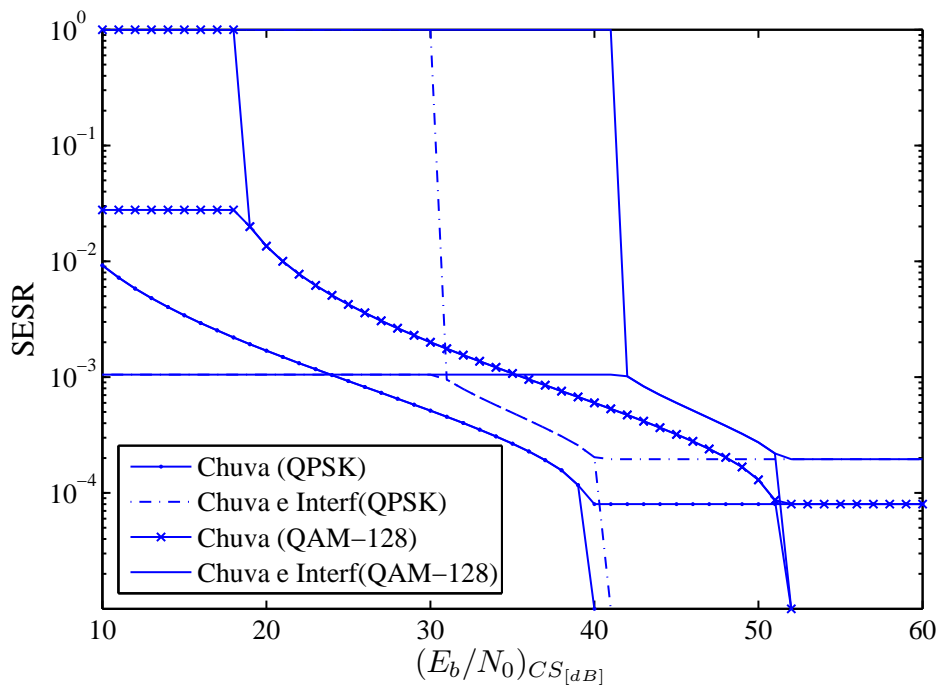


Figura 4.42: Taxa de segundo severamente errado para latitude $20^\circ N$ e longitude 77° e Estrutura orbital A

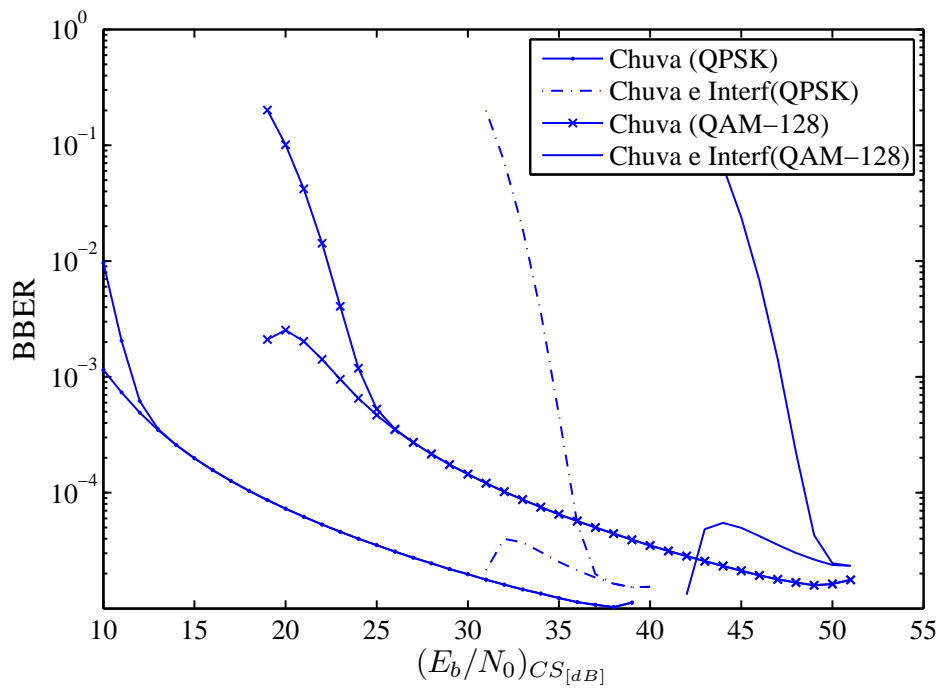


Figura 4.43: Taxa de bloco errado de fundo para latitude $20^\circ N$ e longitude 77° e Estrutura orbital A

Interferência Externa: três sistemas HEO com Estrutura Orbital B

A Figura 4.44 ilustra a função densidade de probabilidade ($p_y(\gamma)$) e a função distribuição de probabilidade cumulativa ($C_y(\gamma)$) da degradação y para este caso. O azimute escolhido tem valor igual a 41° .

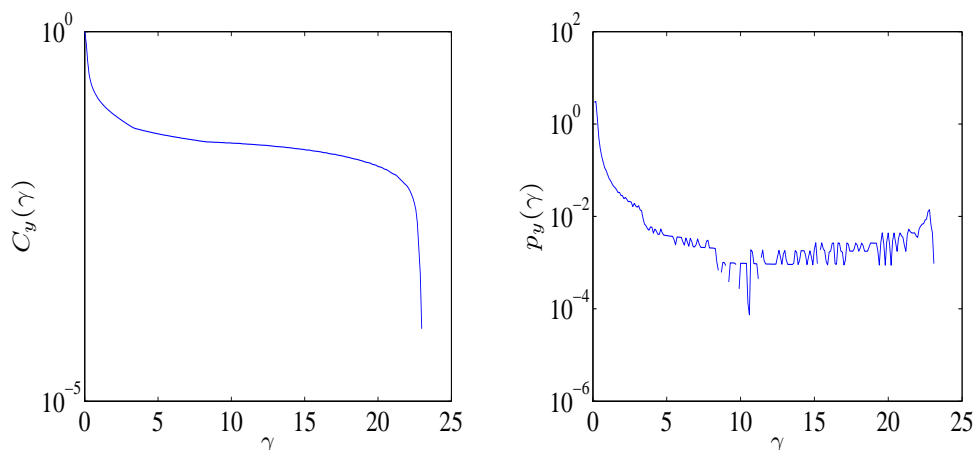


Figura 4.44: Função Densidade de Probabilidade ($p_y(\gamma)$) e Função Distribuição Cumulativa ($C_y(\gamma)$) de y para latitude de $20^\circ N$ e longitude de 77° (Estrutura orbital B)

O intervalo $I_z(\Gamma)$ da FDPC do fator de degradação z para este caso é igual a

$$I_z = [24,8 \quad , \quad 34,6] \text{ dB} \tag{4-23}$$

A FDPC da variável aleatória z é ilustrada na Figura 4.45.

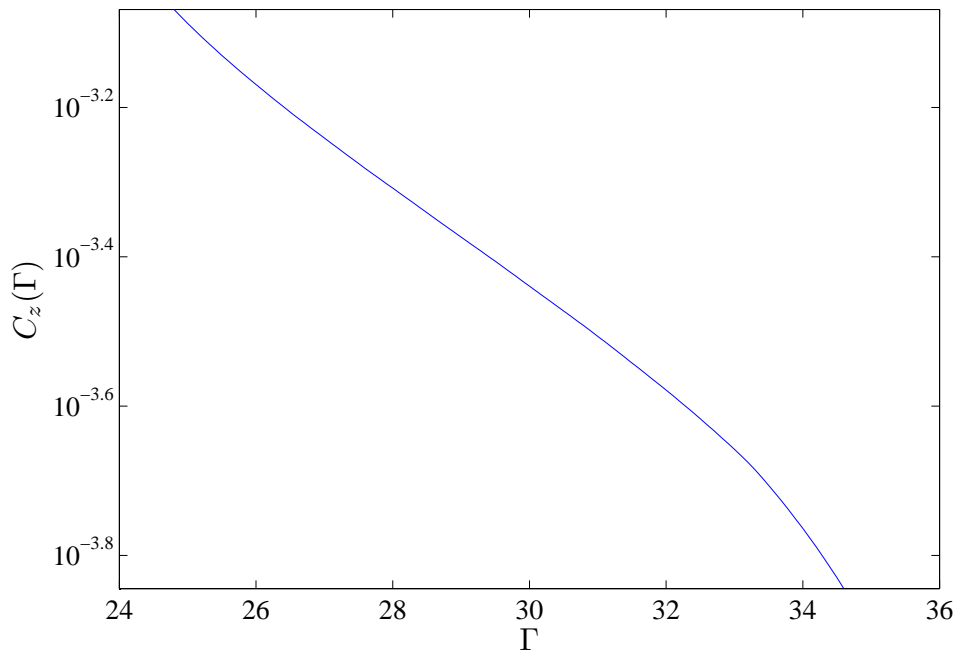


Figura 4.45: Função Distribuição Cumulativa de z para na latitude de $20^\circ N$ e longitude de 77° (Estrutura orbital B)

As Figuras 4.46 e 4.47 ilustram as FDPCs das variáveis r_{eb} , r_{es} , r_{ses} e r_{bbe} para $(E_b/N_0)_{cs[dB]} = 39$ dB e $(E_b/N_0)_{cs[dB]} = 49$ dB, respectivamente.

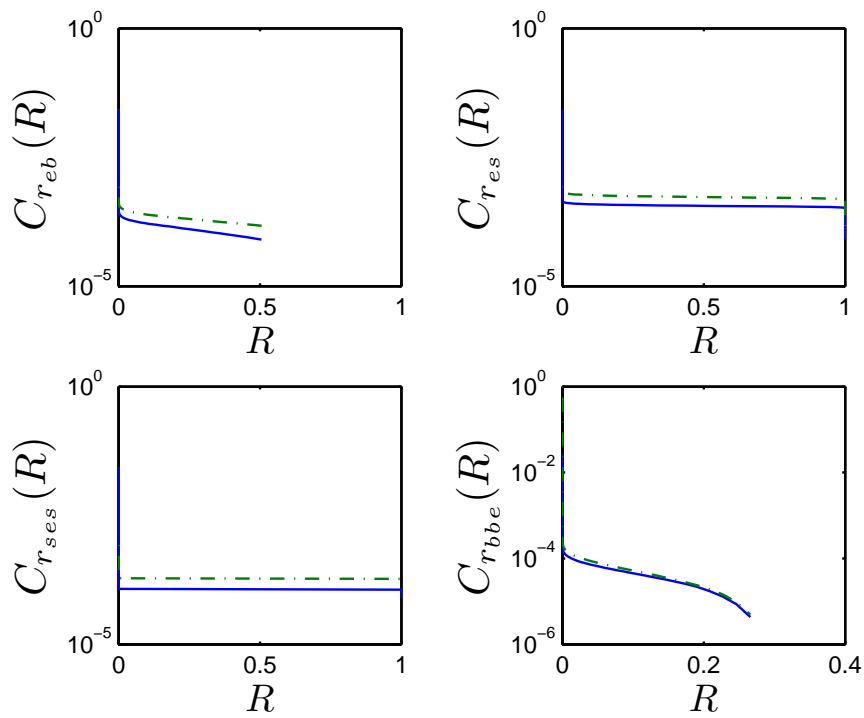


Figura 4.46: FDPC das variáveis aleatórias r_{eb} , r_{es} , r_{ses} e r_{bbe} para latitude $20^\circ N$, longitude 77° (Estrutura orbital B e modulação QPSK) e $(E_b/N_0)_{cs[dB]} = 39$ dB (curva sólida : chuva, curva tracejada : chuva e interferência)

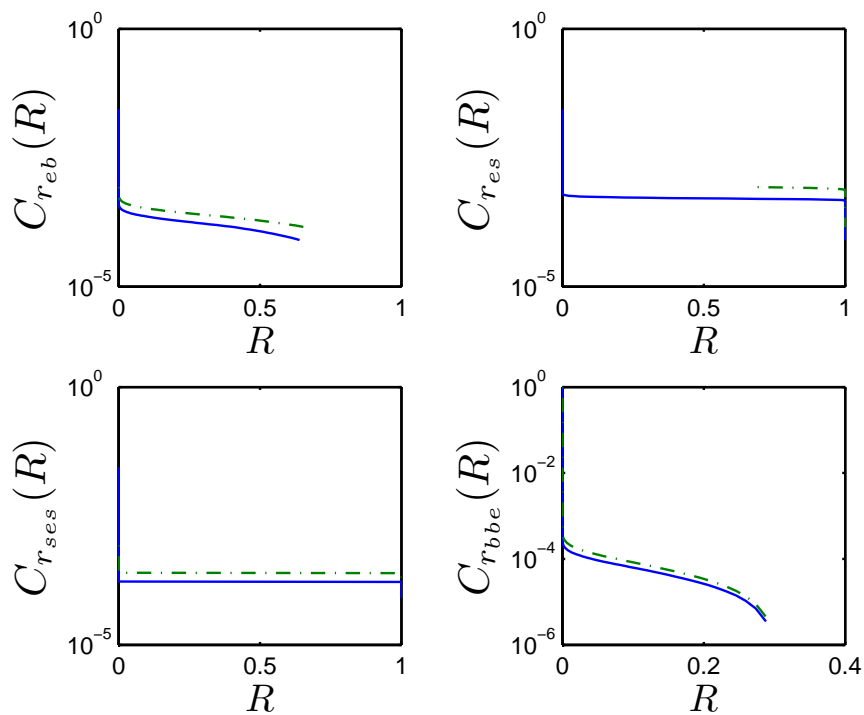


Figura 4.47: FDPC das variáveis aleatórias r_{eb} , r_{es} , r_{ses} e r_{bbe} para latitude $20^\circ N$, longitude 77° (Estrutura orbital B e modulação QAM-128) e $(E_b/N_0)_{cs[dB]} = 49$ dB (curva sólida : chuva, curva tracejada : chuva e interferência)

As Figuras numeradas de 4.48 a 4.51 apresentam as curvas dos limitantes em função de $(E_b/N_0)_{CS[dB]}$.

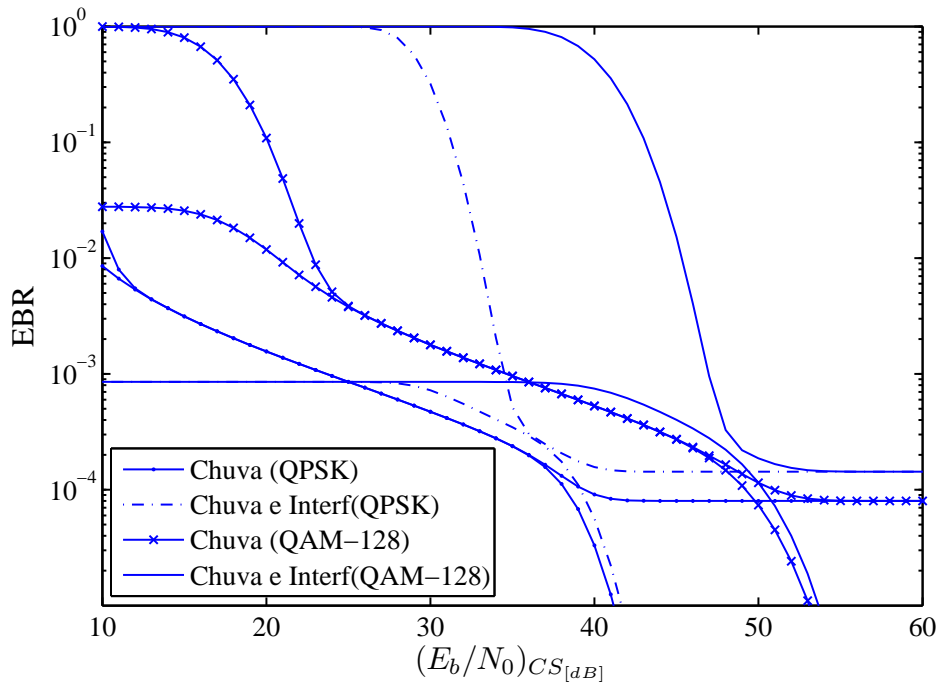


Figura 4.48: Taxa de bloco errado para latitude $20^\circ N$ e longitude 77° e Estrutura orbital B

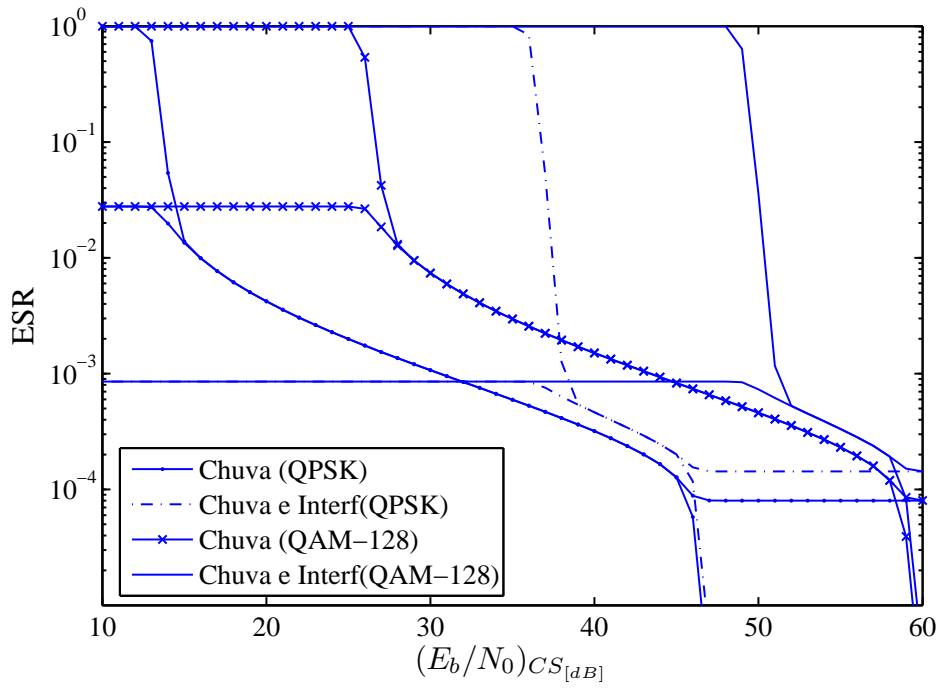


Figura 4.49: Taxa de segundo errado para latitude $20^\circ N$ e longitude 77° e Estrutura orbital B

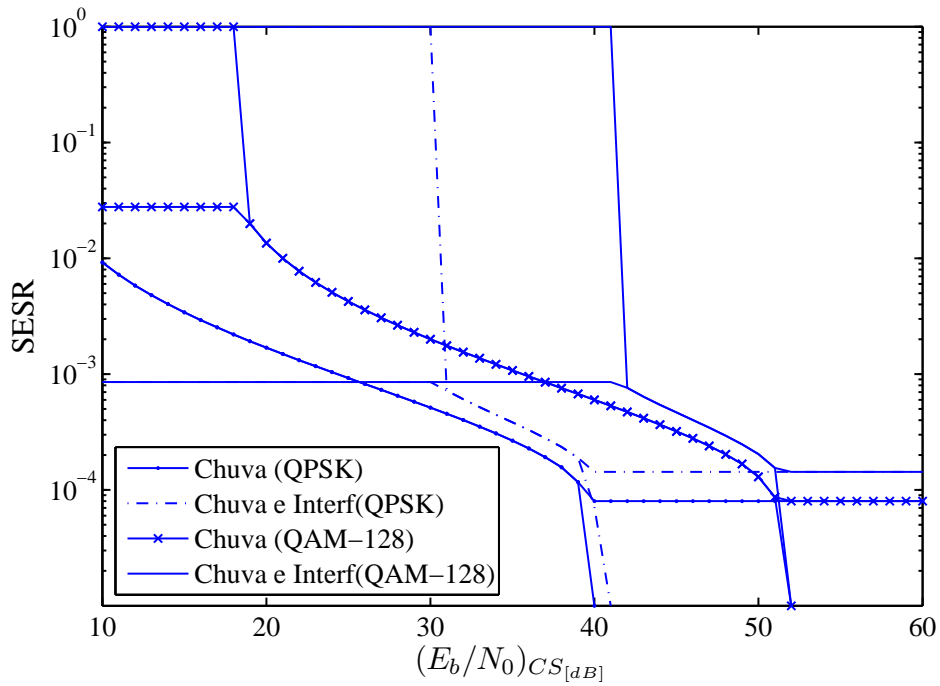


Figura 4.50: Taxa de segundo severamente errado para latitude $20^\circ N$ e longitude 77° e Estrutura orbital B

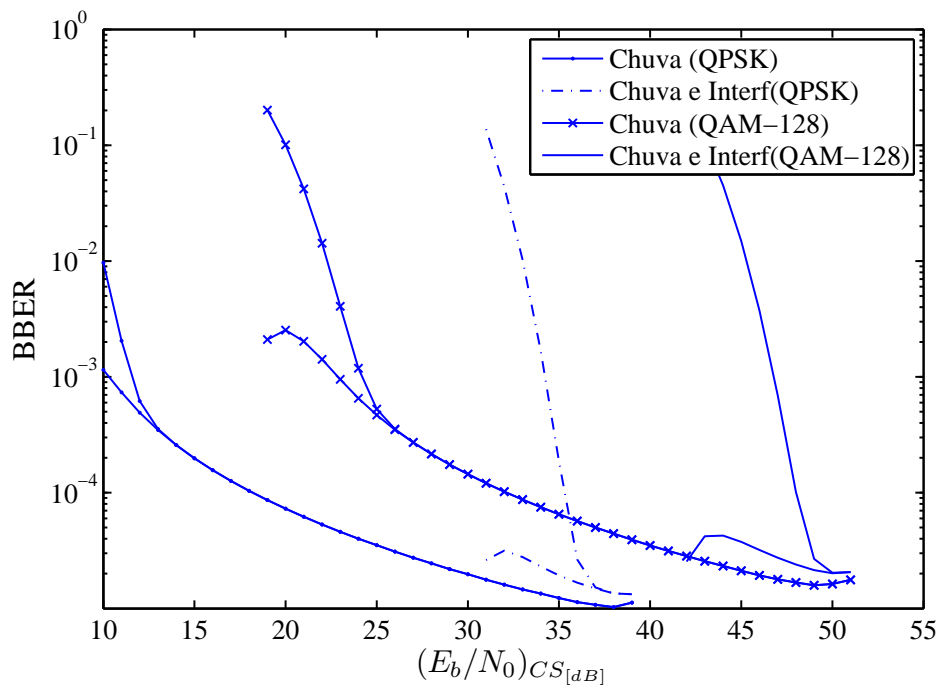


Figura 4.51: Taxa de bloco errado de fundo para latitude $20^\circ N$ e longitude 77° e Estrutura orbital B

5

Conclusões

Neste trabalho, foram estimados os parâmetros de desempenho de erro definidos na Recomendação ITU-T G.826: ESR, SESR e BBER, assim como a taxa de erro de bloco EBR. A modelagem utilizada permite que essas quantidades sejam estimadas pelos valores médios de variáveis aleatórias que representam probabilidades de ocorrência dos seguintes eventos de erro: ES(segundo errado), SES(segundo severamente errado) e EB(bloco errado), assim como a taxa de ocorrência de BBE(bloco errado de fundo).

Pelo método utilizado na estimação desses parâmetros, foi analisado o comportamento de degradações do sinal e determinado seu efeito no desempenho do sistema. Para tanto, foram estabelecidas relações teóricas entre as variáveis aleatórias ligadas aos eventos de erro e a taxa de erro de bit (BER), um parâmetro utilizado em análise de desempenho e cuja relação com a razão (E_b/N_0) entre a energia por bit e o nível espectral do ruído térmico é conhecida e depende da modulação utilizada. Foram determinadas as degradações na razão (E_b/N_0) devidas a chuvas e devidas ao efeito conjunto de chuvas e interferências externas.

Em uma primeira análise, foi considerado o efeito da atenuação devida à chuva nos parâmetros de desempenho de erro. A estatística desta atenuação foi determinada por um procedimento contido na Recomendação ITU-R P.530-11. Por este procedimento, a função distribuição de probabilidade cumulativa é definida somente em um dado intervalo. Neste caso, como apresentado no Apêndice B, os parâmetros de desempenho de erro são determinados como valores entre os limitantes mínimo e máximo do valor esperado das variáveis correspondentes.

Em seguida, foi aplicada a modelagem conjunta apresentada no Capítulo 3. Neste caso, foi analisado o efeito das degradações devidas a chuvas e interferências por satélites de sistemas HEO e foram calculados limitantes para os parâmetros de desempenho na presença destas duas degradações.

Os parâmetros foram estimados para uma gama de valores da razão $(E_b/N_0)_{cs[dB]}$.

Foram geradas, para situações específicas envolvendo enlaces do serviço fixo terrestre e interferência por satélites de sistemas HEO, as curvas dos limitantes

dos parâmetros de desempenho de erro versus $(E_b/N_0)_{cs[dB]}$. Por elas, é possível a comparação entre os limitantes na presença de chuvas e na presença simultânea de chuvas e interferências externas, assim como a comparação destes limitantes para diferentes modulações. Essas curvas permitem ainda a determinação das margens de $(E_b/N_0)_{cs[dB]}$ que garantem os objetivos de desempenho de erro especificados nas Recomendações da ITU, bem como a determinação do acréscimo de margem necessário para obter o desempenho desejado quando se comparam as margens obtidas no cenário onde somente o efeito de chuva é considerado com as margens obtidas para o caso onde o efeito conjunto de chuvas e interferências externas é considerado. Este acréscimo também pode ser determinado para o caso no qual são comparadas as margens para modulações diferentes.

Referências Bibliográficas

- [1] BARCLAY, L. W.. **Propagation of Radiowaves, 2nd Edition**. The Institute of Electrical Engineers.
- [2] ALBUQUERQUE, J. P. D. A.; FORTES, J. M. P. ; FINAMORE, W. A.. **Modelos Probabilísticos em Engenharia Elétrica**. Centro de Estudos em Telecomunicações, PUC-Rio.
- [3] **Error performance of an international digital connection forming part of an integrated services digital network**. Technical Report ,Recomendação ITU-T G.821, 1988.
- [4] SAMPAIO NETO, R.. **Técnicas de modulação/demodulação**. PTTD-Programa de Treinamento em Transmissão Digital, Embratel, 1988.
- [5] MINKIN, V.; VOSCHININ, A.. **Asymptotic method for predicting error performance parameters and objectives for constant bit rate digital paths carried by digital radio-relay systems**. Journal of Radio Electronics, 2000.
- [6] HOWELL, BOB ABD PINE, M.; CHEESEMAN, C.; TAYLOR, H. ; TOMLINSON, J.. **A review of error performance & availability in meeting international obligations based upon ITU recommendations**. (Working Document for the RSSPWG), 2001.
- [7] **End-to-end error performance parameters and objectives for international, constant bit-rate digital paths and connections**. Technical Report , Recomendação ITU-T G.826, 2002.
- [8] **Error performance and availability estimation for synchronous digital hierarchy terrestrial fixed wireless systems**. Technical Report ,Recomendação ITU-R F.1605, 2003.
- [9] **Characteristics of precipitation for propagation modelling**. Technical Report , Recomendação ITU-RP.837-4, 2003.
- [10] **Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems**. Technical Report , Recomendação ITU-RP.530-11, 2005.
- [11] **Specific attenuation model for rain for use in prediction methods**. Technical Report , Recomendação ITU-RP.838-3, 2005.

- [12] **Conversion of annual statistics to worst-month statistics.** Technical Report , Recomendação ITU-R P.841-4, 2005.
- [13] **FORTES, J. M. P.. On the power flux-density limits to protect the fixed service from HEO FSS satellites emissions in the 18 GHz band.** International Journal of Satellite Communications, 2006.

A

Cálculo do valor esperado de uma variável aleatória a partir de sua Função Distribuição de Probabilidade

O valor esperado de uma variável aleatória w é definido por

$$E[w] = \int_{-\infty}^{\infty} W p_w(W) dW \quad (\text{A-1})$$

Onde $p_w(W)$ é a função densidade de probabilidade da variável w .

A probabilidade t da variável aleatória w não exceder um valor W define a Função Distribuição de Probabilidade, $F_w(W)$, de w , ou seja,

$$\begin{aligned} t &= F_w(W) \\ &= \int_{-\infty}^W p_w(\alpha) d\alpha \end{aligned} \quad (\text{A-2})$$

Supondo que w é uma variável aleatória contínua, a inversão da relação em (A-2) permite escrever

$$W = F_w^{-1}(t) \quad (\text{A-3})$$

Considerando-se (A-3), uma mudança na variável de integração em (A-1) conduz a

$$E[w] = \int_{-\infty}^{\infty} W p_w(W) dW = \int_0^1 F_w^{-1}(t) dt \quad (\text{A-4})$$

Note que, na obtenção de (A-4), considerou-se ainda, a partir de (A-2), que

$$dt = F_w'(W)dW = p_w(W)dW \quad (\text{A-5})$$

Considerando-se as propriedades da FDP de uma variável aleatória, é fácil concluir que

$$\int_0^1 F_w^{-1}(t)dt = \int_{-\infty}^0 F_w(W)dW + \int_0^{\infty} (1 - F_w(W))dW \quad (\text{A-6})$$

Tem-se, assim, de (A-6) e (A-4)

$$E[w] = \int_{-\infty}^0 F_w(W)dW + \int_0^{\infty} (1 - F_w(W))dW \quad (\text{A-7})$$

Finalmente, sendo a FDPC de w definida por

$$C_w(W) = 1 - F_w(W) \quad (\text{A-8})$$

tem-se

$$E[w] = \int_{-\infty}^0 (1 - C_w(W))dW + \int_0^{\infty} C_w(W)dW \quad (\text{A-9})$$

B

Limitantes para o valor esperado de variáveis aleatórias não negativas definidas em um intervalo finito, quando a FDPC não é conhecida em todo o intervalo

Como apresentado no Apêndice A, o valor esperado de uma variável aleatória pode ser calculado a partir de sua Função Distribuição de Probabilidade Cumulativa.

Considere uma variável w , que assume valores em um intervalo finito $I = [A_1, A_2]$, onde $A_2 > A_1 \geq 0$.

Neste caso, (A-9) se escreve

$$E[w] = \int_{A_1}^{A_2} C_w(W) dW + A_1 \quad (\text{B-1})$$

No caso de $C_w(W)$ ser conhecida somente num intervalo $[a_1, a_2]$, é correto expressar (B-1) como

$$\begin{aligned} E[w] &= \int_{A_1}^{a_1} C_w(W) + \int_{a_1}^{a_2} C_w(W) dW + \int_{a_2}^{A_2} C_w(W) dW + A_1 \\ &= I_1 + A + I_2 + A_1 \end{aligned} \quad (\text{B-2})$$

Em (B-2), a parcela A é conhecida, ou seja, pode ser determinada pela integral de $C_w(W)$ no intervalo $[a_1, a_2]$. No entanto, as parcelas I_1 e I_2 correspondem aos intervalos onde $C_w(W)$ não é conhecida. Note que os valores mínimos destas parcelas ocorrem quando

$$C_w(W) = \begin{cases} C_w(a_1) & , A_1 \leq W \leq a_1 \\ 0 & , a_2 \leq W \leq A_2 \end{cases} \quad (\text{B-3})$$

enquanto que seus valores máximos são obtidos quando

$$C_w(W) = \begin{cases} 1 & , A_1 \leq W \leq a_1 \\ C_w(a_2) & , a_2 \leq W \leq A_2 \end{cases} \quad (\text{B-4})$$

Os limitantes inferiores e superiores para I_1 e I_2 são, então, dados, respectivamente, por

$$C_w(a_1)(a_1 - A_1) \leq I_1 \leq a_1 - A_1 \quad (\text{B-5})$$

$$0 \leq I_2 \leq C_w(a_2)(A_2 - a_2) \quad (\text{B-6})$$

A partir de (B-5) e (B-6) são obtidos os limitantes inferior e superior do valor esperado da variável w . São eles

Limitante Inferior

$$E[w] \geq C_w(a_1)(a_1 - A_1) + \int_{a_1}^{a_2} C_w(W)dW + A_1 \quad (\text{B-7})$$

Limitante Superior

$$E[w] \leq a_1 + \int_{a_1}^{a_2} C_w(W)dW + C_w(a_2)(A_2 - a_2) \quad (\text{B-8})$$

C

Função Distribuição de Probabilidade Cumulativa da atenuação devido à chuva.

C.1

Estatística anual da atenuação devida à chuva

A estatística da atenuação devido à chuva foi estimada pelo procedimento contido na Recomendação ITU-R P.530-11 que permite determinar os valores de atenuação A_P excedidos por uma percentagem P do tempo de observação em um enlace de comprimento $d(\text{km})$ operando na frequência $f(\text{GHz})$ com polarização especificada.

É determinado, primeiramente, o valor da atenuação $A_{0,01}$, em dB, a ser excedida em 0,01% do tempo. Este valor é calculado por

$$A_{0,01} = \gamma_R d_{eff} \quad (\text{C-1})$$

Onde γ_R é a atenuação específica em dB/km e d_{eff} é a distância efetiva. Esses valores são calculados pelos métodos apresentados a seguir.

Cálculo de γ_R

Pela Recomendação ITU-R P.838-3 [11], a atenuação específica γ_R é calculada por

$$\gamma_R = kR^\alpha \quad (\text{C-2})$$

onde R é a taxa de chuva em mm/h. Os valores de $R_{0,01}$ excedidos por 0,01% do ano médio são encontrados nos mapas da Recomendação ITU-R P.837-4 .

Os valores k e α são calculados por

$$k = [k_V + k_H + (k_H - k_V)\cos^2\theta\cos 2\tau]/2 \quad (\text{C-3})$$

$$\alpha = [k_V\alpha_V + k_H\alpha_H + (k_H\alpha_H - k_V\alpha_V)\cos^2\theta\cos 2\tau]/2k \quad (\text{C-4})$$

Em (C-4), θ é o ângulo de elevação e τ é o ângulo de polarização. As constantes k_V , k_H , α_V e α_H nessa expressão são encontradas nas tabelas da Recomendação ITU-R P.838.3 e dependem da frequência utilizada.

Cálculo de d_{eff}

A distancia efetiva d_{eff} é calculada por

$$d_{eff} = d \frac{1}{1 + \frac{d}{d_0}} \quad (C-5)$$

Para $R_{0,01} \leq 100 \text{ mm/h}$

$$d_0 = 35e^{-0,015R_{0,01}} \quad (C-6)$$

Para latitudes entre $30^\circ S$ e $30^\circ N$, as atenuações A_P a serem excedidas em P % do tempo são calculadas por

$$\frac{A_P}{A_{0,01}} = 0,07P^{-(0,855+0,139\log_{10}P)} \quad (C-7)$$

onde $A_{0,01}$ é dado por (C-1).

A equação acima foi utilizada para determinar a estatística anual da atenuação causada pela chuva e é válida para percentagens P entre 0,001% e 1%.

C.2

Estatística da atenuação devida à chuva para o pior mês

O procedimento apresentado na Seção C.1 deste Apêndice permite determinar a estatística anual para a atenuação devido à chuva. Para o cálculo da estatística relativa ao pior mês, foi utilizado o método da Recomendação ITU-R P.841-4 [12]. Segundo este método, sendo P a percentagem de tempo em que a atenuação A_P é excedida para o período de um ano e P_w a percentagem em que a mesma atenuação é excedida no período relativo ao pior mês, para $P \leq 3\%$, tem-se que

$$P_w = \begin{cases} 12P & , P < \left(\frac{Q_1}{12}\right)^{1/\beta} \\ Q_1 P^{1-\beta} & , \left(\frac{Q_1}{12}\right)^{1/\beta} < P \leq 3 \end{cases} \quad (C-8)$$

onde os parâmetros Q_1 e β , que dependem da região climática, são encontrados nas tabelas da Recomendação ITU-R P.841-4 [12].

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)