MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-11433-PUD/139

CÁLCULO DE ENLACE PARA SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO DIGITAL VIA SATÉLITE

Luciano Barros Cardoso da Silva
Marco Antonio Chamon

INPE
São José dos Campos
2004

RESUMO

Com o intuito de se determinar a viabilidade de um sistema espacial, torna-se necessário o levantamento de todos os parâmetros inerentes a um enlace via satélite. Esses parâmetros podem ser considerados positivos ao sistema, como o ganho das antenas ou a potência do transmissor, ou podem agir como perturbações, naturais ou não, que atenuam o enlace analisado. Todos os parâmetros necessários para o levantamento da relação característica de um enlace (relação sinal/densidade de ruído espectral), estão descritos e exemplificados no documento, a fim de se levantar a margem que caracteriza a viabilidade do sistema.

LINK ANALISYS FOR DIGITAL SYSTEMS VIA SATELLITE

ABSTRACT

In order to determine the viability of a spatial system, it is necessary to obtain all parameters existents in a link via satellite. These parameters can be considered positives to the system, like antenna gain or transmitter power, or can behave like a disturbance attenuating the link. All parameters necessary to characterize the “carrier-to-noise ratio” in a link will be described in this document to determine the margin of the system, characterizing the system viability.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO **7**

CAPÍTULO 2 INTRODUÇÃO TEÓRICA **9**

2.1 Parâmetros da Antena 9
2.1.1 Ganho 9
2.1.2 Ângulo de Meia –Potência (Θ_{3db}) 10
2.1.3 Polarização 12

2.2 Potência Transmitida e Recebida 13
2.2.1 EIRP 13
2.2.2 Densidade do Fluxo de Potência 13
2.2.3 Potência Recebida 14

2.3 Perdas 14
2.3.1 Perda Atmosférica 16
2.3.2 Efeito da Chuva 17
2.3.3 Perda nos Equipamentos de Transmissão e Recepção 21
2.3.4 Desalinhamento das Antenas 21
2.3.5 Perda por Polarização 22

2.4 Ruído 23
2.4.1 Temperatura de Ruído 24
2.4.2 Temperatura de Ruído da Antena 24
2.4.3 Temperatura de Ruído do Receptor 27
2.4.4 Perdas no Sistema de Recepção 28

2.5 Relação Sinal / Ruído (C/N) 29
2.5.1 Figura de Mérito (G/T) 30

2.6 Comunicação Digital 31
2.6.1 Relação entre EB/N_0 E C/N_0 32

CAPÍTULO 3 EXEMPLO DE ENLACES **35**

3.1 Exemplos 35

3.2 Relação Sinal / Ruído Total $(C/N_0)_T$ 47

3.3 Conclusões sobre os Enlaces 47

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS **49**

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O desempenho referente a um enlace de comunicação via satélite pode ser caracterizado em duas partes: a primeira refere-se ao enlace de RF propriamente dito, ou seja, o cálculo da **Relação Sinal / Ruído (*C/N_o*)** do sistema analisado. Já a segunda parte da análise refere-se ao desempenho do canal e ao número de canais disponíveis em função da relação ***C/N_o*** do enlace.

O levantamento da relação Sinal/Ruído (C/N_o) depende de diversos fatores, tanto positivos, como a Potência do Transmissor ou o Ganho das Antenas, quanto negativos, como as diversas perturbações ou atenuações (naturais ou não) ocorrentes em um enlace de RF, tais como chuva, atenuação atmosférica, desalinhamento entre as antenas, descasamento de polarizações etc.

Já a segunda parte da análise descrita acima se caracteriza quanto ao tipo de modulação (BPSK, QPSK etc.) ou quanto ao tipo de técnica de múltiplo acesso empregada no sistema.

Para sistemas digitais, calcula-se ainda a relação Energia de bit / Densidade Espectral de Potência ***E_b/N_0***, que tem uma importante função na análise do desempenho e confiabilidade do sistema, tendo relação direta com a probabilidade de erro de bit (*BER*), normalmente especificada pelo usuário.

Dependendo das características do sistema de comunicação, o enlace pode ainda ser classificado em: **Uplink**, referente ao enlace de subida, onde a Estação Terrena transmite o sinal ao satélite; e **Downlink**, referente ao enlace de descida, onde o satélite transmite o sinal à Estação Terrena.

Todas essas considerações feitas e toda a teoria estudada estarão descritas no decorrer do documento.

CAPÍTULO 2

INTRODUÇÃO TEÓRICA

Como dito anteriormente temos como principal objetivo em uma análise de enlace a Relação Sinal Ruído (C/N_0). A equação que caracteriza essa relação está mostrada abaixo:

$$(C/N_0) = (EIRP)\ (1/L)\ (G/T)\ (1/K)\ \text{(Hz)} \tag{2.1}$$

A forma de obtenção e os critérios necessários para o equacionamento do problema serão descritos no decorrer do documento.

2.1 Parâmetros da Antena

As antenas podem ser consideradas como um dos principais parâmetros na análise de um sistema de comunicação, devido ao fato de seu ganho possuir relação direta na determinação da potência do Receptor.

2.1.1 Ganho

Para definirmos o ganho de uma antena, é necessário o conhecimento da teoria sobre antenas **isotrópicas**. A fonte pontual **isotrópica** é aquela que irradia uniformemente em todas as direções através do espaço que a circunda. Esse espaço é considerado sem perda.

Embora a fonte **isotrópica** não seja realizável na prática, estudá-la proporciona conhecimento de utilidade em projetos das antenas reais.

O ganho de uma antena caracteriza-se pela potência irradiada (ou recebida), em uma dada direção, em relação à potência irradiada (ou recebida) por uma antena **isotrópica**, ambas alimentadas pela mesma potência.

O ganho é máximo na direção de máxima irradiação, e para uma antena parabólica é dado por:

$$G_{\max} = \eta \cdot \left(\frac{\pi \cdot D}{\lambda} \right)^2 = \eta \cdot \left(\frac{\pi \cdot D \cdot f}{c} \right)^2 \tag{2.2}$$

Quando expresso em *dBi*, ou seja, dB em relação à antena isotrópica, a expressão torna-se:

$$G_{\max} = 10 * \log\left[\eta \cdot \left(\frac{\pi \cdot D}{\lambda}\right)^2\right] = 10 * \log\left[\eta \cdot \left(\frac{\pi \cdot D \cdot f}{c}\right)^2\right] \tag{2.3}$$

onde:

η = Eficiência global da Antena

D = Diâmetro da Antena [m]

f = Freqüência de Operação [Hz]

λ = Comprimento de Onda [m]

c = Velocidade da luz [m/s].

A eficiência global η da antena é produto de vários fatores tais como: eficiência de iluminação η_i, eficiência *spill-over* η_s, eficiência de superfície de chegada η_f, perdas por descasamento de impedância (ôhmica) η_z etc. Essa eficiência global é dada por:

$$\eta = \eta_i \cdot \eta_s \cdot \eta_f \cdot \eta_z \cdots \tag{2.4}$$

No total, a eficiência η, para o caso de uma antena parabólica, demonstrada acima como o produto de vários fatores, encontra-se tipicamente entre 55 e 75% (Bousquet et al., 1993).

De um modo mais geral, define-se uma área efetiva da antena (também chamada *abertura*) como sendo a área A_{eff} tal que o ganho da antena pode ser escrito como sendo:

$$G = \frac{4\pi \cdot A_{eff}}{\lambda^2} = \frac{4\pi \cdot f^2 \cdot A_{eff}}{c^2} \tag{2.5}$$

2.1.2 Ângulo de Meia –Potência (θ_{3dB})

O ângulo de meia potência θ_{3dB} corresponde ao ângulo entre a direção de ganho máximo e a direção pela qual esse ganho cai pela metade, ou seja, *– 3 dB* como mostrado na Figura (2.1):

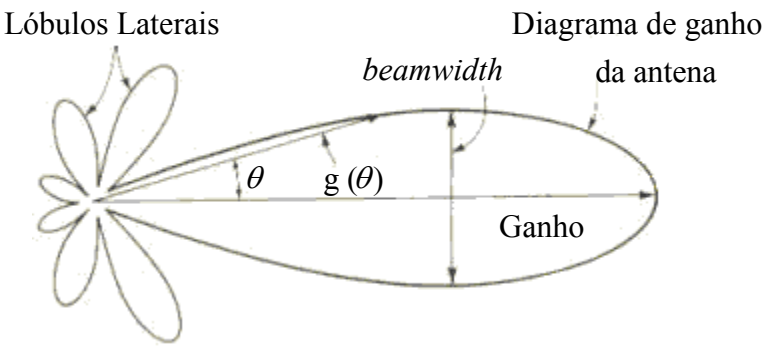

FIGURA 2.1- Ângulo de Meia-Potência.

FONTE: Gagliard (1984, p. 88).

A largura de feixe (*beamwidth*) da antena é normalmente definida como duas vezes o ângulo de meia potência θ_{3dB} e corresponde aproximadamente à região iluminada pela antena.

A largura de feixe (expressa em graus) é proporcional a λ/D, multiplicada por um coeficiente que depende da lei de iluminação escolhida, mas que tipicamente situa-se em torno de 70 (Bousquet et al., 1993).

$$\theta_{beam} = 2\theta_{3dB} = 70\frac{\lambda}{D} = 70\frac{c}{f \cdot D} \tag{2.6}$$

Para ângulos pequenos, podemos utilizar uma aproximação gaussiana do diagrama da antena e calcular o ganho numa direção desejada (θ) da seguinte maneira:

$$G(\theta) = G_{\max} - 3 \cdot \left(\theta / \theta_{3dB} \right)^2 = G_{\max} - 12 \cdot \left(\theta / \theta_{beam} \right)^2 \tag{2.7}$$

Levando-se em conta o fato de que o ganho da antena aumenta proporcionalmente ao quadrado da freqüência de operação (f) e ao tamanho da antena, concluímos que as antenas tornam-se mais diretivas quando operam em freqüências mais altas. Quando a freqüência é fixa, torna-se necessário aumentar seu diâmetro de forma a atingir o ganho desejado.

2.1.3 Polarização

A onda irradiada por uma antena possui uma componente de campo elétrico e outra de campo magnético. Estas duas componentes são ortogonais e perpendiculares em relação à direção de propagação da onda. Por convenção, a polarização da onda é definida pela direção do campo elétrico (Bousquet et al., 1993).

Em geral, a direção do campo elétrico não é fixa e sua amplitude não é constante. Durante um período, a projeção do vetor campo elétrico (*E*) em um plano perpendicular à direção de propagação da onda descreve em geral uma elipse, dando origem à polarização elíptica. A Figura (2.2) a seguir descreve o fenômeno:

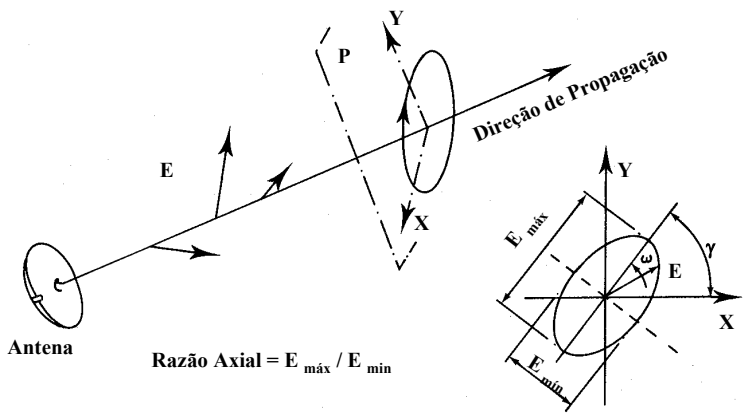

FIGURA 2.2- Polarização elíptica.

FONTE: Bousquet et al. (1993, p. 19).

A polarização elíptica possui três características principais:

- Direção de Rotação – diz respeito à direção de propagação, direita ou esquerda;

- Razão Axial (*AR*) – trata-se da relação entre o maior e o menor eixo da elipse. Ou seja, se *AR = 1 (0 dB)* a polarização é chamada *circular*, se *AR = 0 (ou ∞)* a polarização é tida como linear;

$$AR = \left(E_{\max} / E_{\min} \right) \tag{2.8}$$

- Inclinação da elipse (γ).

2.2 Potência Transmitida e Recebida

2.2.1 EIRP

A densidade de potência irradiada por uma antena isotrópica alimentada por uma fonte RF de potência P_t é dada por $\frac{P_t}{4\pi}$, que representa, na realidade, uma densidade de potência por unidade de ângulo sólido (esfero-radianos).

Em uma direção onde o valor do ganho da transmissão é G_t, essa relação torna-se:

$$\frac{G_t P_t}{4\pi} \tag{2.9}$$

O produto $G_t P_t$ é chamado *Potência Irradiada Isotrópica Equivalente* (***EIRP***), expressa em watts (W). Quando expresso em decibéis, esse valor é normalmente indicado *dBi*, com o índice *i* referindo-se a uma antena isotrópica ideal.

2.2.2 Densidade do Fluxo de Potência

Admitindo-se uma antena receptora com área efetiva A (área que captura a potência incidente sobre a antena) situada a uma distância R da antena transmissora temos uma potência recebida dada por:

$$P_r = \frac{G_t P_t}{4\pi} \frac{A}{R^2} = \Phi A \ \text{(W)} \tag{2.10}$$

A grandeza Φ, expressada em (W/m^2), é chamada *Densidade de Fluxo de Potência*.

$$\Phi = \frac{G_t P_t}{4\pi \ R^2} \tag{2.11}$$

2.2.3 Potência Recebida

Como visto anteriormente, a antena receptora com área efetiva A_{eff}, localizada a uma distância R da antena transmissora, recebe uma potência dada pela Eq. (2.10).

Conforme a Eq. (2.5), a área equivalente de uma antena receptora pode ser expressa em função de seu ganho de recepção G_r por meio da seguinte expressão:

$$A_{eff} = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_r \ (\mathrm{m}^2) \tag{2.12}$$

Conclui-se então que a potência recebida em watts (W) pode ser expressa como:

$$P_r = \frac{P_t G_t}{4\pi \cdot R^2} \frac{\lambda^2}{4\pi} G_r = \left(P_t G_t\right) \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi \cdot R}\right)^2 \cdot G_r \tag{2.13}$$

2.3 Perdas

Seguindo a definição de Potência Recebida *(P_r)* expressa acima, ainda podemos definir a Perda em Espaço Livre (L_{FS}), sendo esta a taxa entre a potência recebida e a potência transmitida entre duas antenas isotrópicas. A perda L_{FS} é definida por:

$$L_{FS} = \left(\frac{4\pi \cdot R}{\lambda}\right)^2 \tag{2.14}$$

Um parâmetro necessário para esse cálculo é a determinação da distância real entre a antena e o satélite. Para o caso da análise de um satélite geoestacionário, esse cálculo é trivial, visto que esse tipo de satélite possui distância constante pelo fato de se localizar sobre a linha de Equador, girando na mesma velocidade angular da Terra.

Para os outros casos utiliza-se o modelo indicado nas figuras a seguir, onde são mostradas as projeções geométricas necessárias para o cálculo da distância (Pritchard et al., 1993).

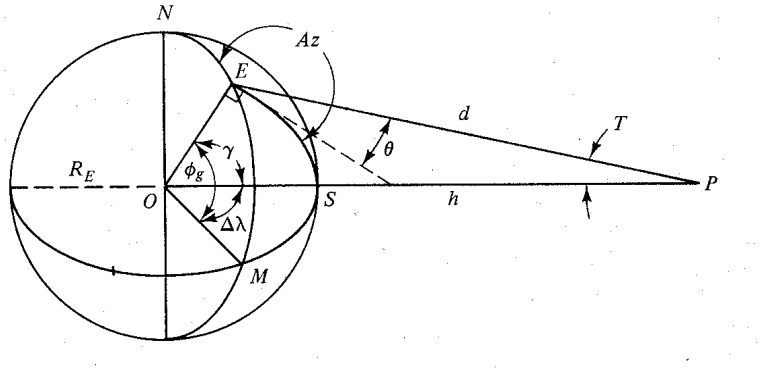

FIGURA 2.3 – Distância do Satélite 3D.

FONTE: Pritchard et al. (1993, p.98).

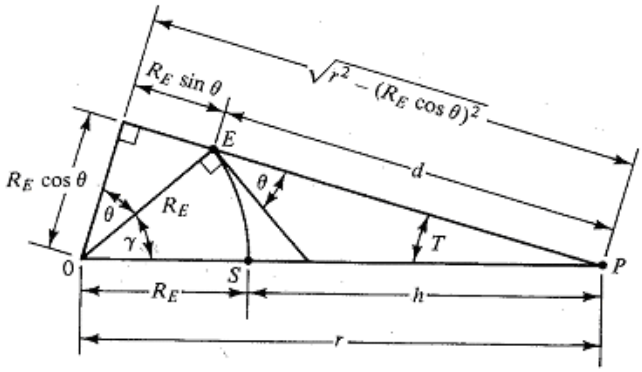

FIGURA 2.4 – Distância do Satélite.

FONTE: Pritchard et al.(1993, p.100).

Tomando a distância real *d*, em função do ângulo de elevação da antena da estação terrena e da altura *h* do satélite no nadir (90º de elevação), chega-se à seguinte expressão (Pritchard, 1993):

$$d = \sqrt{(R_e + h)^2 - (R_e \cos\theta)^2} - R_e \operatorname{sen}\theta \qquad (2.15)$$

onde

Re = Raio da Terra ≈ 6378,173 km

h = Altura do Satélite (nadir)

θ = Ângulo de elevação da Antena

Apesar da Perda em Espaço Livre (L_{FS}) ser altamente significativa no cálculo do enlace, na prática deve-se levar em conta outras perdas adicionais no sistema, as quais serão descritas a seguir.

2.3.1 Perda Atmosférica

A Terra é rodeada por diferentes tipos de substâncias, tais como gases, átomos livres, água na forma de vapor etc. Essas substâncias, capturadas pelo campo gravitacional terrestre, espalham-se até uma altitude em torno de 650 quilômetros, constituindo a Atmosfera Terrestre.

A densidade dessas partículas diminui com a altitude. As partículas superiores da atmosfera (ionosfera) absorvem e refletem grande quantidade de energia proveniente do sol. Quando absorvida, essa energia é re-irradiada em todas as direções pela ionosfera, ionizando os átomos atmosféricos, gerando assim, em sua parte superior, uma banda de elétrons livres ao redor da Terra, os quais interagem diretamente com algum campo eletromagnético passante (Gagliard, 1984).

A Figura (2.5) abaixo mostra o comportamento desse tipo de perda em função da freqüência:

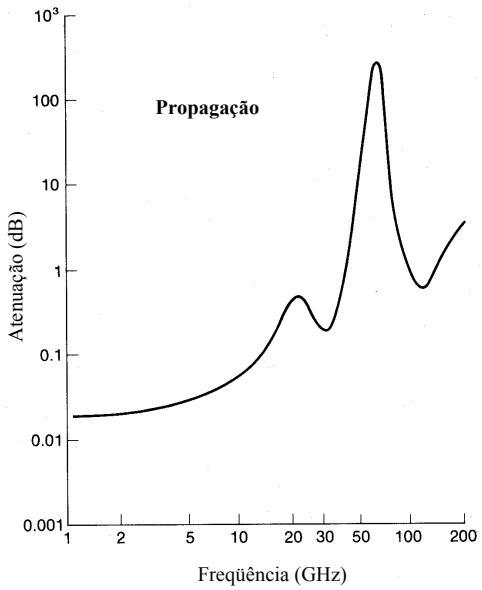

FIGURA 2.5 – Atenuação Atmosférica

FONTE: Gagliard (1984, p. 95)

No geral, o efeito desse tipo de atenuação na potência recebida pode ser caracterizado pela adição de uma perda suplementar a L_{FS}, denominada perda atmosférica L_A. Assim, a perda combinada é dada por:

$$L = L_{FS} \cdot L_A \tag{2.16}$$

2.3.2 Efeito da Chuva

Um importante efeito atmosférico a ser considerado em um enlace via satélite é a chuva. Gotas de água dispersas na atmosfera interagem com a radiação, causando atenuação. Os efeitos da chuva tornam-se mais severos quando os comprimentos de onda se aproximam do tamanho da gota de água (Gagliard, 1984). De um modo geral, quanto mais alta a freqüência de operação, maior será a atenuação.

A intensidade da precipitação é medida através da taxa de queda da chuva R expressada em *mm/h*. A estatística de precipitação temporal é obtida através da distribuição da probabilidade cumulativa, a qual indica a porcentagem de tempo no ano *p(%)* durante o qual um dado valor da taxa de queda da chuva R_p (mm/h) é excedido (usualmente o valor adotado em uma análise é de $p = 0{,}01\%$, o que corresponde a aproximadamente 53 minutos por ano). Na Europa, por exemplo, pode-se considerar uma taxa de chuva $R_{0,01}$ em torno de 30 mm/h, enquanto em regiões equatoriais temos $R_{0,01}$ = 120 mm/h (Bousquet et al., 1993).

A Figura (2.6) e a Tabela (2.1) abaixo mostram as taxas de chuva (*mm/h)* presente nas diversas regiões climáticas do globo:

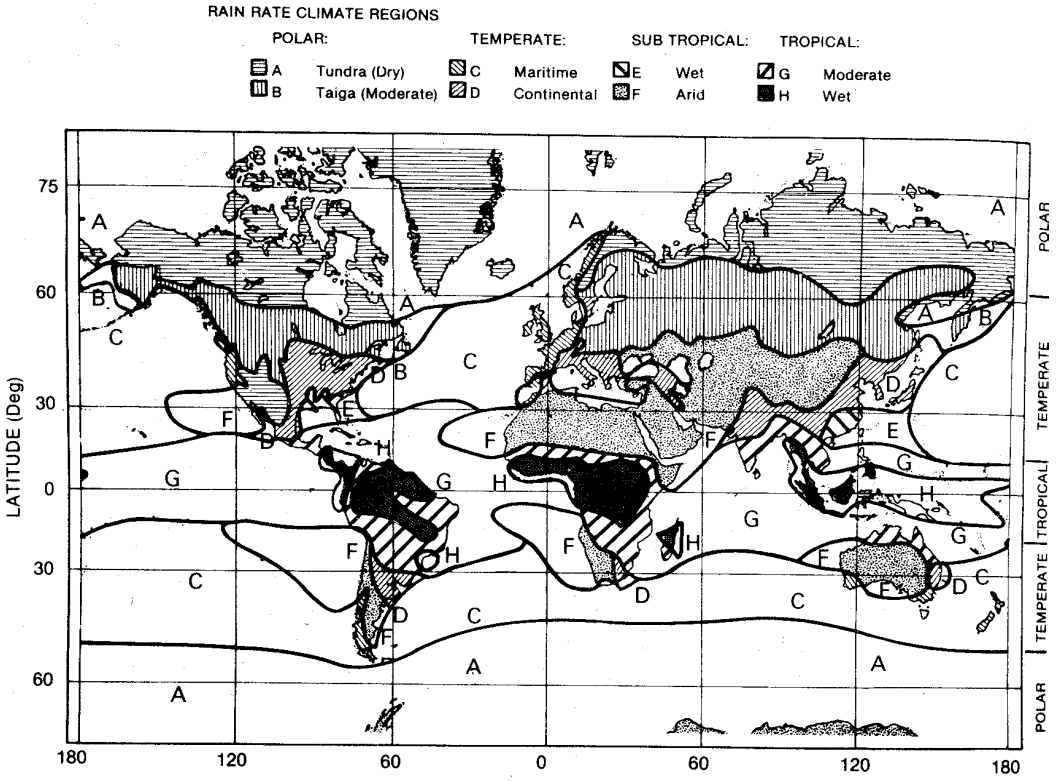

FIGURA 2.6- Regiões climáticas – NASA.

FONTE: Pritchard et al. (1993, p.286).

TABELA 2.1 – Taxas de chuva.

Porcentagem do Ano	Regiões Climáticas da Chuva										Minutos por Ano	Horas por Ano
	A	B	C	D_1	D_2	D_3	E	F	G	H		
0,001	28	54	80	90	102	127	164	66	129	251	5,3	0,09
0,002	24	40	62	72	86	107	144	51	109	220	10,5	0,18
0,005	19	26	41	50	64	81	117	34	85	178	26	0,44
0,01	15	19	28	37	49	63	98	23	67	147	53	0,88
0,02	12	14	18	27	35	48	77	14	51	115	105	1,75
0,05	8	9,5	11	16	22	31	52	8,0	33	77	263	4,38
0,1	6,5	6,8	72	11	15	22	35	5,5	22	51	526	8,77
0,2	4,0	4,8	4,8	7,5	9,5	14	21	3,8	14	31	1052	17,5
0,5	2,5	2,7	2,8	4,0	5,2	7,0	8,5	2,4	7,0	13	2630	43,8
1,0	1,7	1,8	1,9	2,2	3,0	4,0	4,0	1,7	3,7	6,4	5260	87,66
2,0	1,1	1,2	1,2	1,3	1,8	2,5	2,0	1,1	1,6	2,8	10520	175,3

FONTE: Pritchard et al. (1993, p.285).

2.3.2.1 Modelo de Atenuação da Chuva

O valor da atenuação decorrente da chuva A_{rain} é dado pelo produto da atenuação específica γ_R (dB/km) e o comprimento do percurso efetivo da onda na chuva L_E (km).

$$A_{rain} = \gamma_R L_E \tag{2.17}$$

O valor de γ_r depende da freqüência e da intensidade r_p (mm/h) da chuva. O resultado é um valor de atenuação que, em média, não é excedido mais do que a porcentagem de tempo p. a determinação de A_{rain} é feita da seguinte maneira (Dissanayake et al.,2002):

1-) Cálculo da altitude da chuva h_r (km);

$h_r = 5$ se 0< latitude <23º

$h_R = 5-0{,}075(latitude-23)$ se latitude ≥ 23º (2.18)

2-) Cálculo inclinação do percurso na chuva;

$$L_S = \frac{h_R - h_S}{\operatorname{sen} E} \quad (\text{para } E > 5^o) \tag{2.19}$$

onde h_S é a altura (km) da estação terrena em relação ao nível do mar.

3-) Cálculo de $r_{0,01}$, fator de redução para *0,01%* do tempo, o qual leva em conta a heterogeneidade da chuva.

$$r_{0,01} = \frac{1}{1 + (L_S / L_0)\cos E} \tag{2.20}$$

onde $L_0 = 35\exp(-0{,}015 R_{0,01})$.

4-) Cálculo de L_E.

$$L_E = L_S \cdot r_{0,01} \tag{2.21}$$

5-) Determinação (por meio de gráfico ou tabela de precipitação) de $R_{0,01}$, média anual excedida 0,01% do tempo na região geográfica onde a estação terrena está localizada.

6-) Determinação de γ_R usando o nomograma da figura (2.7), em função $R_{0,01}$ e da freqüência. No caso de polarização circular da onda, a média do valor obtido de atenuação em cada plano caracteriza o parâmetro.

7-) Finalmente, a atenuação causada pela chuva é dada por:

$$A_{rain}(p = 0{,}01) = \gamma_R L_E \tag{2.22}$$

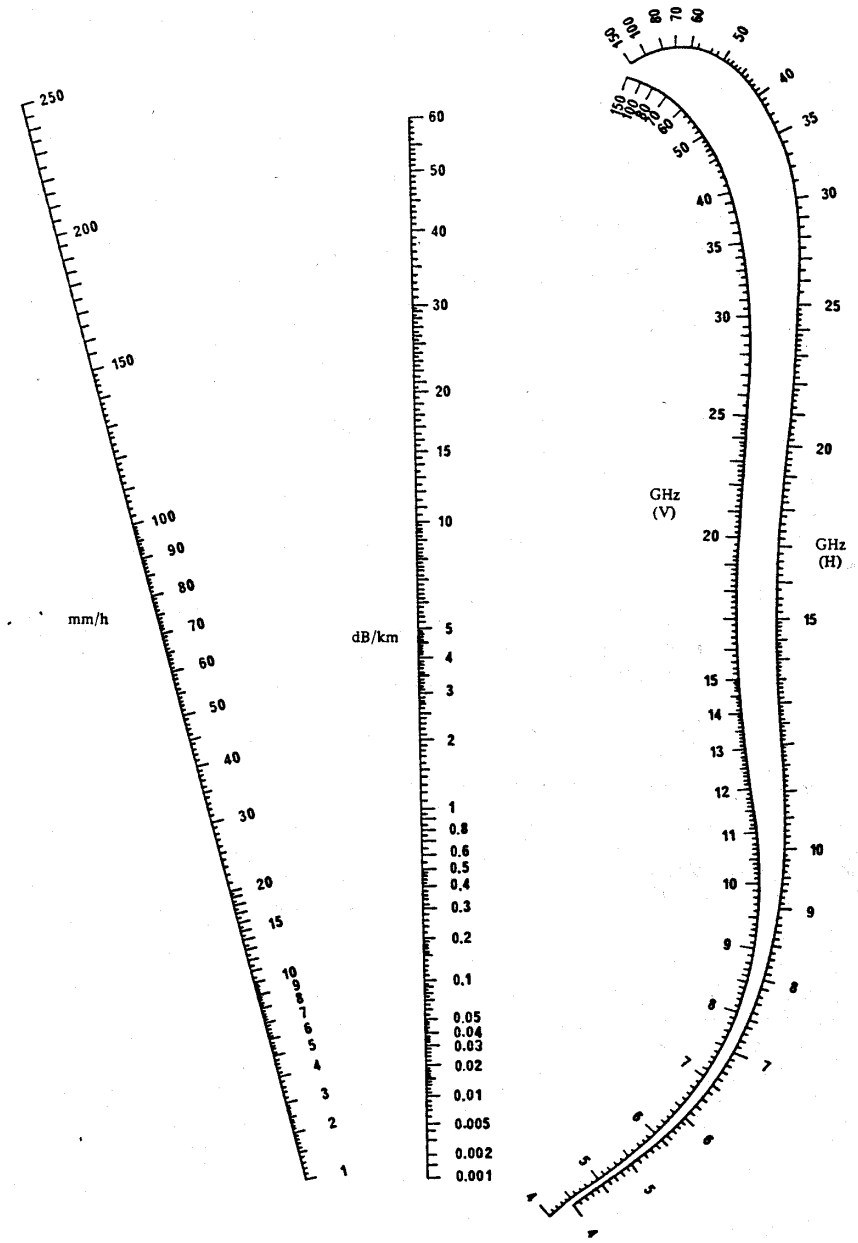

FIGURA 2.7– Nomograma de atenuação pela chuva –CCIR R 721.

FONTE: Bousquet et al. (1993, p. 48).

2.3.3 Perda nos Equipamentos de Transmissão e Recepção

Entre o transmissor e a antena, em função de cabos e outros elementos de conexão, temos outro fator de perdas ôhmicas, L_{FTX}. A potência P_T, na entrada da antena, é dada por:

$$P_T = P_{TX} / L_{FTX} \tag{2.23}$$

Analogamente, a perda L_{FRX} encontra-se entre a antena e o receptor. A potência do sinal P_{RX}, na entrada do receptor, é dada por:

$$P_{RX} = P_R / L_{FRX} \tag{2.24}$$

A Figura (2.8) abaixo mostra esse tipo de perda tanto no transmissor quanto no receptor.

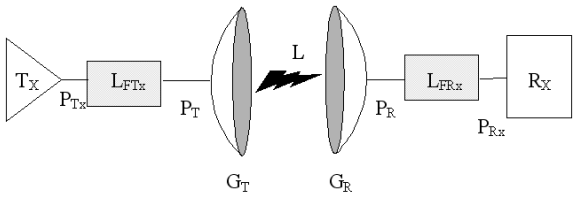

FIGURA 2.8– Perdas no transmissor e receptor.

2.3.4 Desalinhamento das Antenas

Essa perda refere-se ao alinhamento imperfeito das antenas de transmissão e recepção. Varia em função dos ângulos de desalinhamento na transmissão α_t e na recepção α_r, como observa-se na Figura (2.9) a seguir:

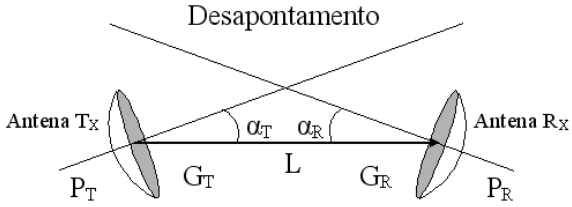

FIGURA 2.9– Desalinhamento entre as Antenas.

Admitindo-se uma aproximação gaussiana para pequenos ângulos, como indicado na seção 2.1.2, Eq (7), temos:

$$L_T = 3\left(\alpha_T / \theta_{3dB} \right)^2 \tag{2.25}$$

$$L_R = 3\left(\alpha_R / \theta_{3dB} \right)^2 \tag{2.26}$$

onde essas perdas já estão expressas em dB.

2.3.5 Perda por Polarização

Esse tipo de perda caracteriza-se pelo descasamento das polarizações entre a antena receptora e a onda recebida.

Vários fatores podem ocasionar essa perda, tais como alterações na onda decorrentes de sua propagação na atmosfera ou imperfeições nas antenas transmissora e receptora.

Essa perda pode ser calculada a partir do ângulo γ entre os dois planos de polarização, no caso de polarizações lineares.

$$L_{POL} = \cos\gamma \tag{2.27}$$

Para o caso de polarização elíptica, além do ângulo entre os planos das elipses, é necessário considerar a forma das mesmas, expressa em termos da razão axial. Em uma análise de pior caso, podemos supor que $\gamma = 90^o$ e escrever a perda de polarização L_{POL} em função da razão axial das antenas de transmissão e recepção. Essa perda é expressa por (Fordham & Brazil, 1964):

$$L_{AXIAL} = \frac{1}{2} + \frac{2.r_1.r_2}{(1+r_1^2).(1+r_2^2)} - \frac{(1-r_1^2).(1-r_2^2)}{2.(1+r_1^2).(1+r_2^2)} \tag{2.28}$$

Onde:

r_1 = razão axial da antena transmissora;

r_2 = razão axial da antena receptora.

Considerando todas as perdas apresentadas, podemos definir uma nova expressão para a potência do sinal na entrada do receptor como sendo:

$$P_{RX} = \frac{P_{TX} G_T}{L_T L_{FTX}} \frac{1}{L_{FS} L_A} \frac{G_R}{L_R L_{FRX} L_{POL}} \text{ (W)} \tag{2.29}$$

2.4 Ruído

Juntamente com o campo proveniente da fonte transmissora, uma antena receptora também coleta outras formas de energia eletromagnética presentes. Esse outro tipo de radiação aparece como interferência, ou ruído, mascarando assim o sinal desejado vindo do transmissor. As principais causas desses indesejáveis campos são radiações oriundas de fontes galácticas e cósmicas, ou re-irradiações atmosféricas (cf. seção 2.3.1). Também devem ser consideradas as interferências originadas de outros transmissores.

Além de coletado pela antena, o ruído também pode ser gerado internamente, ou seja, dentro da eletrônica do próprio receptor.

As contribuições de todas essas fontes de interferências combinadas geram o nível total de ruído presente no sistema de recepção. Esse parâmetro estabelece a relação de potência transmitida necessária para superar o ruído total ocorrente no receptor, coletando assim um nível suficiente de sinal na recepção e garantindo a confiabilidade de recepção do sistema.

O modelo de ruído comumente usado é o **Ruído Branco**, para o qual a densidade de potência espectral N_0 (W/Hz) é constante na banda de freqüência envolvida. A potência equivalente do ruído N (W) medida na largura de banda B_N (Hz) é obtida por:

$$N = N_0 B_N \text{ (W)} \tag{2.30}$$

Fontes reais de ruído nem sempre têm uma densidade de potência espectral constante, porém esse modelo torna-se conveniente para a representação de um ruído real observado em uma largura de banda limitada (Bousquet et al., 1993).

2.4.1 Temperatura de Ruído

O nível de ruído presente na entrada do receptor pode ser representado por uma *Temperatura de ruído*. Trata-se da temperatura equivalente efetiva que uma fonte de ruído externa teria para produzir o mesmo nível de ruído no receptor. Em termos dessa temperatura equivalente de ruído, a densidade espectral de ruído N_0 pode ser escrita como

$$N_0 = kT \text{ (W/Hz)} \tag{2.31}$$

onde k é a constante de Boltzman (1,38 x 10^{-23} W/Hz-K).

Pontos individuais no sistema são caracterizados por uma Temperatura de Ruído T_N. Esta temperatura é aquela na qual um resistor passivo produz uma potência de ruído igual àquela disponível no ponto em questão a uma freqüência específica.

2.4.2 Temperatura de Ruído da Antena

A temperatura de ruído da antena pode ser considerada como um exemplo especial, trata-se da temperatura de um resistor tendo o mesmo ruído disponível de saída que o medido nos terminais da antena. Esse parâmetro acaba dependendo de muitos fatores, tais como a temperatura física do meio ou o ruído proveniente do espaço. Esse valor pode também depender do ângulo de elevação da antena, das condições de propagação (chuva) etc.

Dois casos devem ser considerados:

ENLACE DE SUBIDA (*uplink*) - antena do satélite

O ruído capturado pela de recepção no satélite antena origina-se da Terra e do espaço. Quando vista do espaço, a Terra apresenta uma temperatura de re-irradiação de aproximadamente 300 K [Gagliard, 1984].

ENLACE DE DESCIDA (*downlink*) - antena da estação terrena

O ruído capturado pela antena de recepção no foco origina-se do céu e da radiação vinda da Terra. Em condições de tempo limpo (*clear sky*), em freqüências acima de 2 GHz, a maior contribuição vem de regiões não-ionizadas da atmosfera.

A contribuição do ruído celeste (*sky noise*) é dada por:

$$T_{SKY} = \frac{1}{4\pi}\iint T_b(\theta,\varphi)\cdot G(\theta,\varphi)\ d\theta\ d\varphi \text{ (K)} \qquad (2.32)$$

Onde

$T_b\,(\theta,\varphi)$ = Temperatura do brilho de um corpo radiante na direção (θ,φ);

$G\,(\theta,\varphi)$ = Ganho da antena na direção (θ,φ).

Na prática, somente a parte do céu na direção da visada da antena contribui para a integral, visto que o ganho tem alto valor somente naquela direção. Consequentemente, a contribuição dessa temperatura pode ser dada em função da temperatura de brilho, da freqüência e do ângulo de elevação, como mostra a Figura (2.10) abaixo:

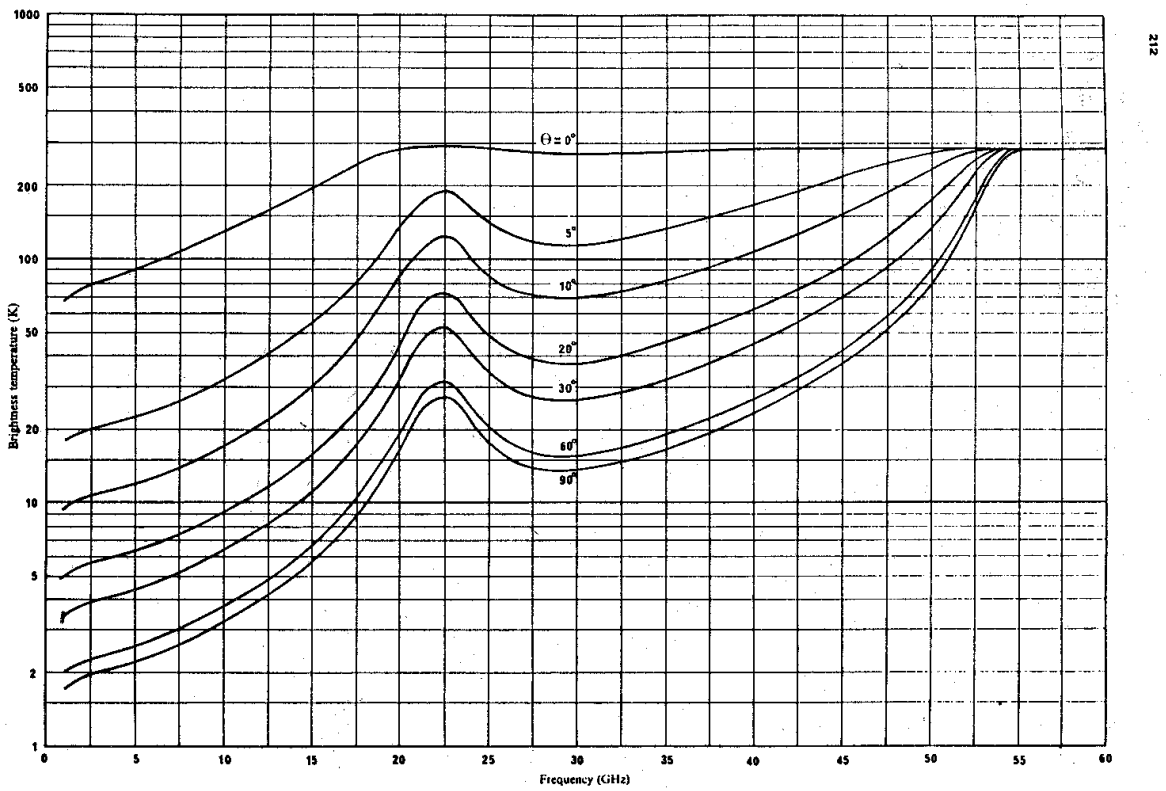

FIGURA 2.10- Temperatura do Céu.

FONTE: Bousquet et al. (1993, p. 36).

Já a radiação proveniente do solo ao redor da estação terrena é capturada tanto pelos lóbulos laterais quanto pelo lóbulo principal da antena receptora, em particular quando o ângulo de elevação é muito pequeno, gerando assim uma temperatura de ruído do solo T_G. Uma aproximação muito usada nesse caso é mostrada abaixo, em função do ângulo de elevação da antena (Bousquet et al., 1993):

T_G = 150 K para *Elev* = 0º

T_G = 50 K para 0º < *Elev* < 10º

T_G = 10 K para 10º < *Elev* < 90º

Por fim, conclui-se que a temperatura de ruído da antena para o enlace de descida é dada por:

$$T_A = T_{SKY} + T_G \text{ (K)} \tag{2.33}$$

Já em condições de **chuva**, a temperatura de ruído da antena aumenta, visto que a presença de formações meteorológicas, como nuvens e chuva, constitui uma camada absorvente e emissiva de energia. Nesse caso, a temperatura de ruído da antena é dada por:

$$T_A = \frac{T_{SKY}}{A_{RAIN}} + T_m \cdot \left(1 - \frac{1}{A_{RAIN}}\right) + T_G \text{ (K)} \tag{2.34}$$

onde

A_{RAIN} = Atenuação da chuva;

T_m = Temperatura termodinâmica da precipitação (geralmente entre 260K e 280K).

Apesar de atenuar a temperatura celeste "T_{SKY}", a presença das precipitações gera sua própria temperatura de ruído "T_m", aumentando assim a temperatura total da antena.

Essa análise pode ser feita de maneira análoga em qualquer sistema de temperatura de ruído (vide 2.4.4).

A Figura (2.11) a seguir mostra as contribuições da temperatura de ruído na estação terrena nas condições de céu limpo e chuva.

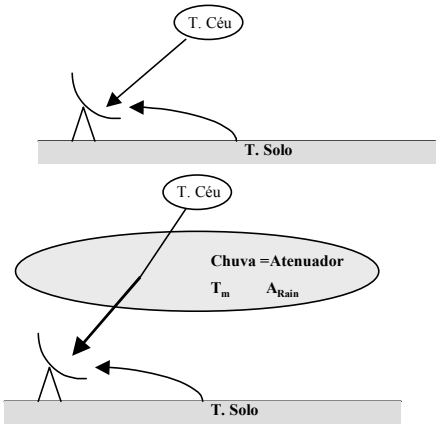

FIGURA 2.11- Temperatura de ruído no enlace de descida.

Conclui-se, então, que os três principais fatores para a determinação da temperatura de ruído da antena são:

- Freqüência;
- Ângulo de Elevação;
- Condições atmosféricas.

2.4.3 Temperatura de Ruído do Receptor

Todo componente operando a uma temperatura superior ao zero absoluto gera ruído, devido à agitação térmica. Assim, o sinal que atravessa uma cadeia de recepção tem sua relação sinal/ruído degradada por esse ruído gerado internamente. Considere a figura a seguir, onde está esquematizado um receptor de RF constituído de um amplificador de baixo ruído, um misturador e um amplificador de FI. Estão também indicados os parâmetros básicos de ganho e ruído em cada elemento.

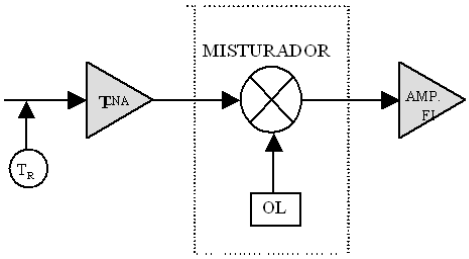

FIGURA 2.12- Receptor.

Pode-se demonstrar que a temperatura de ruído equivalente na entrada do receptor T_R pode ser expressa como:

$$T_R = T_{LNA} + {T_{MX}}/{G_{LNA}} + {T_{IF}}/{G_{LNA}G_{MX}} \quad \text{(K)} \qquad (2.35)$$

Exemplo:

Amplificador de Baixo Ruído (*LNA*): T_{LNA} = 150 K, G_{LNA} = 50 dB (=10^5)

Misturador: T_{MX} = 850 K, G_{MX} = -10 dB (L_{MX} = 10 dB)

Amplificador IF: T_{IF} = 400 K, G_{IF} = 30 dB

Tem-se, portanto $T_R = 150 + {850}/{10^5} + {400}/{10^5 \cdot 10^{-1}} = 150K$

Conclui–se, então, que o alto ganho do *LNA* limita a temperatura de ruído do receptor T_R para a T_{LNA}.

2.4.4 **Perdas no sistema de Recepção**

A Figura (2.13) a seguir mostra o exemplo de um equipamento de recepção, consistindo de uma antena conectada a um receptor. A conexão gera uma perda, a qual encontra-se a temperatura termodinâmica T_F (aproxima-se para $T_0 = 290\ K$). Essa perda introduz uma atenuação L_{FRX} no sinal, a qual corresponde a um ganho $G_{FRX} = 1/L_{FRX}$. A Temperatura de ruído pode ser determinada nos seguintes pontos (Bousquet et al., 1993):

- saída da antena, antes da perda na conexão, T1;
- entrada do Receptor, após a perda, T2.

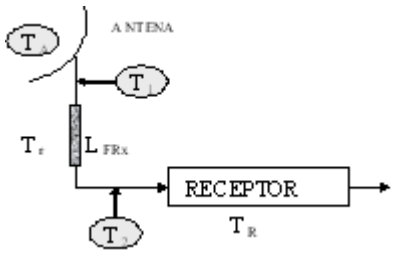

FIGURA 2.13- Ruído do sistema.

A temperatura T_1, na saída da antena, é a soma da temperatura de ruído da antena T_A e temperatura de ruído do subsistema, constituído pela conexão e pelo receptor em cascata. A temperatura de ruído do sistema é dada por:

$$T_1 = T_A + (L_{FRX} - 1) \cdot T_F + T_R / G_{FRX} \quad \text{(K)} \tag{2.36}$$

Considerando agora a entrada do receptor, este ruído deve ser atenuado pelo fator L_{FRX}. Substituindo G_{FRX} por $1/L_{FRX}$ obtém-se uma nova temperatura T_2

$$T_2 = T_1 \cdot G_{FRX} = \frac{T_1}{L_{FRX}} = T_A / L_{FRX} + T_F \cdot \left(1 - 1/L_{FRX}\right) + T_R \quad \text{(K)} \tag{2.37}$$

A duas temperaturas não são iguais, mas a análise da relação sinal/ruído do sistema pode ser feita em qualquer dos dois pontos, desde que se considere os correspondentes valores de sinal e de ruído para aquele ponto. A contribuição do ruído em um sistema é determinada pela temperatura de ruído em um dado ponto (usualmente na entrada do receptor), e é obtida através da soma de todas as contribuições geradas internamente ao sistema.

2.5 Relação Sinal / Ruído (*C/N*)

A relação sinal/ruído representa a magnitude relativa do sinal recebido em relação ao ruído presente na entrada do receptor. A relação entre a potência de sinal recebido e a densidade espectral do ruído é caracterizada por C / N_0 expressa em *Hz*. É obtida a partir da potência do

sinal recebido e da temperatura de ruído do sistema (vide seção 2.4), sendo independente da banda.

A potência do sinal recebido na entrada do receptor é dada pela Eq. (28) e a temperatura equivalente de ruído pode ser obtida a partir da Eq. (36). Dessa forma, podemos expressar a relação Sinal/Ruído como:

$$C/N_0 = \frac{\left(P_{TX}G_T / L_T L_{FTX}\right)\left(1/L_{FS}L_A\right)\left(G_R / L_R L_{FRX} L_{POL}\right)}{k \cdot \left[T_A / L_{FRX} + T_F\left(1 - 1/L_{FRX}\right) + T_R\right]} \text{ (Hz)} \qquad (2.38)$$

que também pode ser escrita como:

$$C/N_0 = (EIRP) \cdot \left(1/L\right) \cdot \left(G/T\right) \cdot \left(1/k\right) \text{ (Hz)} \qquad (2.39)$$

2.5.1 Figura de Mérito (G/T)

A Eq. (2.39) para C/N_0 introduz três fatores:

- a *EIRP*, caracterizada pelo equipamento de transmissão;
- a perda no espaço livre e devida à atmosfera ($1/L = 1/L_{FS}L_A$);
- a relação *G/T* (ganho do receptor / temperatura de ruído) que caracteriza o equipamento de recepção. Esta relação é denominada como *figura de mérito* do equipamento de recepção[1].

Essa terceira relação varia em função da temperatura de ruído da antena T_A e da temperatura equivalente de ruído do receptor T_R.

[1] Nessa equação deve-se notar que as perdas relativas ao transmissor estão incluídas na EIRP e as perdas relativas ao receptor estão embutidas no ganho da antena receptora. Não estão explicitamente mencionadas as perdas de polarização L_{POL} que, a rigor, é devida a ambas as antenas, e as perdas devido à chuva, que devem ser incluídas nas perdas devido ao meio.

2.6 Comunicação Digital

Enquanto os primeiros sistemas de satélite utilizavam comunicações analógicas, os satélites atuais tendem definitivamente à prática das comunicações digitais. Nesse tipo de comunicação, os sinais de informação são inicialmente convertidos para uma seqüência de bits que, em seguida, modulam uma portadora de RF. No receptor, o sinal de RF é demodulado, os bits são recuperados e o sinal original é regenerado. Enquanto as comunicações analógicas buscam preservar a forma do sinal de informação, maximizando a relação C/N_0, a comunicação digital busca transmitir os bits o mais precisamente possível. Portanto, o desempenho em sistemas digitais é usualmente medido em termos da probabilidade que uma dada fonte de transmissão de bits ser recuperada corretamente no receptor (probabilidade de erro de bit). A principal vantagem da comunicação digital é que os bits podem ser transmitidos relativamente sem erros, empregando uma potência de transmissão menor que a requerida em sistemas analógicos de operação. Para satélites, a comunicação digital tem a vantagem adicional das formas de onda transmitidas, que podem ser cuidadosamente controladas em termos de amplitude e freqüência espectral, de modo a simplificar o hardware do satélite (Gagliard, 1984).

A taxa na qual os bits são gerados *(número de bits por segundo)* no transmissor é um importante parâmetro nos sistemas digitais. A partir dessa taxa obtemos a duração de cada bit transmitido pela relação:

$$T_b = 1/R_b \tag{2.40}$$

onde:

T_b = duração do bit *(s)*

R_b = taxa de transmissão (bits por segundo)

A partir disso obtemos a importante relação para sistemas digitais E_b / N_0.

2.6.1 Relação entre Eb/N_0 e C/N_0

Assim como na relação C/N_0, a energia de bit requerida E_b em relação à densidade de ruído N_0 (E_b/N_0) é um importante parâmetro de análise e comparação do desempenho de sistemas digitais.

As equações abaixo demonstram a simples relação existente entre as duas taxas:

$$E_b = CT_b = C\left(1/R_b \right) \tag{2.41}$$

$$N_0 = N/B_w \tag{2.42}$$

$$E_b/N_0 = \frac{CT_b}{N/B_w} = \frac{C/R_b}{N/B_w} = CB_w/NR_b \tag{2.43}$$

$$E_b/N_0 = CB_w/NR_b \tag{2.44}$$

Onde:

E_b = Energia do bit

N_0 = Densidade espectral de ruído

N = Potência do ruído

C = Potência recebida

B_w = largura de banda efetiva

R_b = Taxa de bits transmitidos

A partir dessa relação podemos estipular a margem de um sistema digital a partir da probabilidade de erro de bit (*BER*) desejada. Esse parâmetro caracteriza estatisticamente a

fração de bits transmitidos com erro em um sistema digital. Nota-se que quanto maior a precisão do sistema (menor BER) maior a relação Eb/N_0 requerida.

A Figura (2.14) abaixo mostra essa relação de acordo com as diferentes formas de codificação existentes, a fim de minimizar a relação E_b/N_0 requerida, dando uma maior margem e confiabilidade ao sistema. Essa margem pode ser definida como sendo a diferença entre a relação Eb/N_0 efetivamente disponível no sistema (Eb/N_0 real) e a relação Eb/N_0 mínima necessária (Eb/N_0 requerida) para se atingir a taxa de erro de bits especificada.

$$\text{Margem} = {E_b}/{N_0}\ real - {E_b}/{N_0}\ req \qquad (2.45)$$

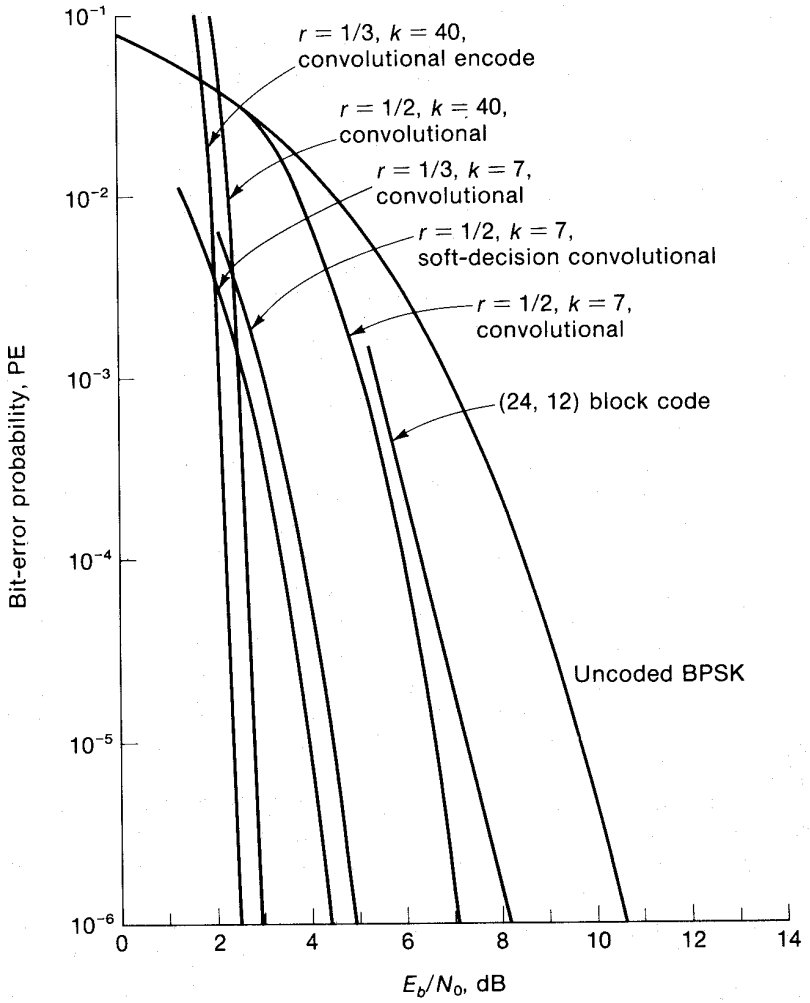

FIGURA 2.14- Eficiência em Potência.

FONTE: Gagliard (1984, p. 64).

CAPÍTULO 3

EXEMPLO DE ENLACES

3.1 Exemplos

Seja um enlace bidirecional (Uplink e Downlink), em banda KU, envolvendo uma estação terrena e um satélite *geoestacionário*, este localizado à distância de aproximadamente 40000 km, considerando uma elevação ($E=10^o$) da antena da estação. Os dados do enlace são mostrados abaixo:

Freqüência de subida (*Uplink*) : f_U = 14 GHz

Taxa de Bits (*Uplink*) : R_b = 77 Mbps

Freqüência de descida (*Downlink*): f_D = 12 GHz

Taxa de Bits (*Downlink*) : R_b = 36 Mbps

BER = 10^{-6}

Serão considerados quatro casos distintos:

- *Exemplo 1- UPLINK*

Estação Terrena

Potência do Transmissor : P_{tx} = 100 W

Perda entre o transmissor e antena: L_{FTX} = 0,5 dB

Diâmetro da Antena : D = 7 m

Eficiência da Antena : η = 0,6

Erro máximo de apontamento : α = 0,1º

Ângulo de Elevação da Antena: $E = 10^o$

Satélite

Feixe de abertura na recepção: θ_{3dB} = 2º

Eficiência da Antena: η = 0,55

Figura de Ruído do Receptor: F = 3 dB

Perda entre antena e o receptor: L_{FRX} = 1 dB

Temperatura termodinâmica da conexão: T_F = 290 K

Temperatura de Ruído da Antena: T_A = 290 K

Atenuação Atmosférica: L_A = 0,3 dB (valor típico de atenuação na freqüência e ângulo de elevação em questão)

A Figura (3.1) abaixo ilustra a geometria do enlace:

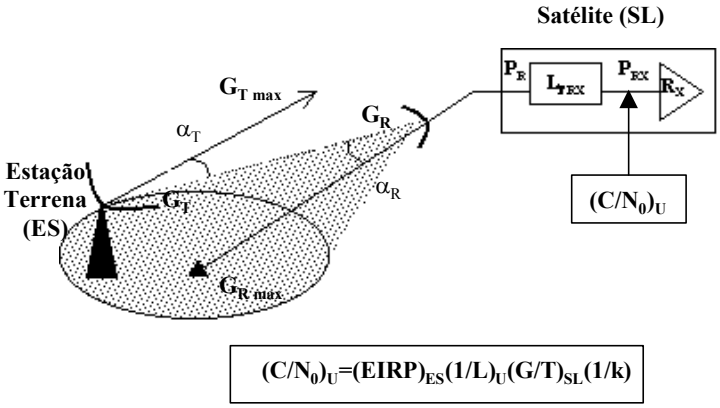

FIGURA 3.1– Geometria Uplink.

Para calcular a EIRP da Estação Terrena:

$$(EIRP)_{ES} = (P_{TX} G_{T\max} / L_T L_{FTX}) \quad (W)$$

$$P_{TX} = 100W = 20dB \quad (W)$$

$$G_{T\max} = \eta(\pi D f_U / c)^2 = 631{,}9 * 10^3 = 58dBi$$

$$L_T(dB) = 12(\alpha_T / \phi_{3dB}) = 12(\alpha_T D f_U / 70c)^2 = 2{,}61dB$$

$$L_{FTX} = 0{,}5dB$$

Então

$$(EIRP)_{ES} = 20db(W) + 58dB - 2{,}6dB - 0{,}5dB = 75dB(W)$$

Para calcular a atenuação no trajeto de subida:

$$L_U = L_{fs} L_A$$

Com

$$L_{FS} = (4\pi R / \lambda_U)^2 = (4\pi R f_U / c)^2 = 207{,}4dB$$
$$L_A = 0{,}3dB$$

$$L_U = L_{FS} + L_A = 207{,}7dB$$

Para calcular a Figura de Mérito (*G/T*) do satélite:

$$(G/T)_{SL} = (G_{R\max} / L_R L_{FRX} L_{POL}) / [T_A / L_{FRX} + T_F (1 - 1/L_{FRX}) + T_R]$$

Com

$$G_{R\max} = \eta(\pi D / \lambda_U)^2 = \eta(\pi 70 / \phi_{3dB})^2 = 6650 = 38{,}2dBi$$

$$L_R = 12(\alpha_R / \phi_{3dB})$$

Como a Estação Terrena está no limite da área de cobertura de 3dB, $\alpha_R = \theta_{3dB} / 2$ e:

$$L_R = 3dB$$
$$L_{FRX} = 1dB$$
$$L_{POL} = 0dB$$

$$T_A = 290K$$
$$T_F = 290K$$
$$T_R = (F-1)T_0 = (10^{0,3} - 1)290 = 290K$$

Por fim:

$$(G/T)_{SL} = 38,2 - 3 - 1 - 10\log\left[290/10^{0,1} + 290\left(1 - 1/10^{0,1}\right) + 290\right] = 6,6dbK^{-1}$$

Nota-se que quando a temperatura termodinâmica da conexão entre a antena e o receptor do satélite, está próxima da temperatura de ruído da antena, o que é muito freqüente na prática, a temperatura de ruído equivalente na entrada do receptor é:

$$T \cong T_F + T_R = 290 + T_R$$

Para calcular C/N_0 para o UPLINK:

$$(C/N_0)_U = (EIRP)_{ES}(1/L_U)(G/T)_{SL}(1/k) \ (Hz)$$

$$(C/N_0)_U = 75dBW - 207,7dB + 6,6dBk^{-1} + 228,6dbW/HzK = 102,5Hz$$

A Figura (3.2) abaixo mostra os diferentes níveis aos quais a potência assume durante o percurso do sinal:

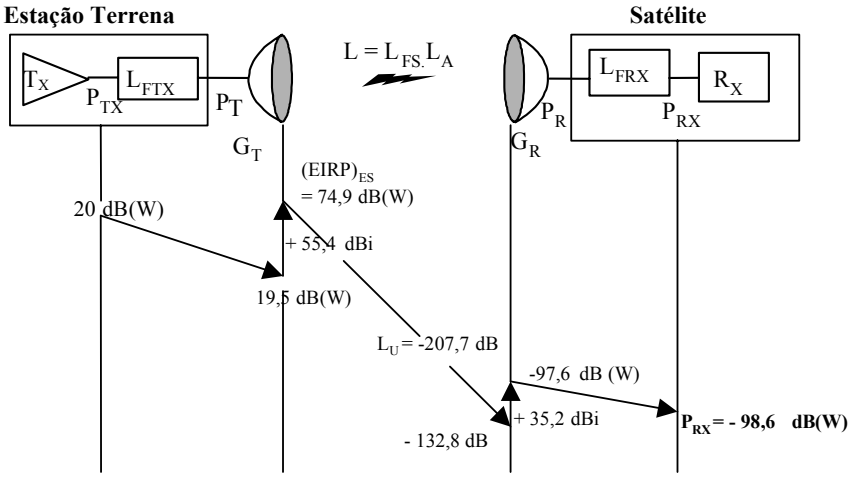

FIGURA 3.2– Níveis de Potência

FONTE: Bousquet et al. (1993, p. 40)

Para calcular E_b/N_0

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{C}{N_0 R_b}$$

$$R_b = 10\log 77.10^6 = 78{,}8dB$$

$$\frac{E_b}{N_0} = 102{,}5 - 78{,}8 = 23{,}7Hz$$

Por fim

$$MARGEM = \frac{E_b}{N_0}real - \frac{E_b}{N_0}req$$

Tomando como base a Figura (2.14), para uma BER de 10^{-6}:

$$\frac{E_b}{N_0}req \cong 10{,}5dB$$

$$MARGEM = 23{,}6 - 10{,}5 = 13.2$$

Embora o enlace apresente uma margem exageradamente alta, essa sofre uma grande degradação decorrente das precipitações atmosféricas, levando-se em conta a freqüência de operação (banda KU), como veremos no item a seguir.

- *Exemplo 2- UPLINK com chuva*

Na presença de chuva, a atenuação na propagação é maior. Esta se soma com a atenuação devido aos gases atmosféricos (0,3 dB). Um valor típico de atenuação devido à chuva, para uma estação terrena situada em um clima temperado (Europa, por exemplo), pode ser dado como:

$$A_{RAIN} = 10dB$$

Esse seria o valor da atenuação, para uma freqüência de 14 GHZ, que não é ultrapassado mais do que 0,01% de tempo da média anual (vide 2.3.2). Então:

$$L_U = 207{,}4dB + 10{,}3dB = 217{,}7dB$$

A nova C/N_0 seria então:

$$\left(C/N_0\right)_U = 75dBW - 217{,}7dB + 6{,}6dBk^{-1} + 228{,}6dbW/HzK = 92{,}5Hz$$

Esse seria o valor da relação $(C/N_0)_U$ para o enlace de subida em 99,99% do tempo (disponibilidade), para uma média anual.

Conseqüentemente:

$$\frac{E_b}{N_0} = 92{,}5 - 78{,}8 = 13{,}7Hz$$

A nova margem será:

$$MARGEM = \frac{E_b}{N_0}real - \frac{E_b}{N_0}req$$

Tomando como base a figura (2.14), para uma BER de 10^{-6}:

$$\frac{E_b}{N_0}req \cong 10{,}5dB$$

$$MARGEM = 13{,}7 - 10{,}5 = 3{,}2$$

- *Exemplo 3- DOWNLINK*

Satélite:

Potência do Transmissor: P_{tx} = 25 W

Perda entre antena e o transmissor: L_{FTX} = 1 dB

Eficiência da Antena: η = 0,55

Feixe de abertura na transmissão: θ_{3dB} = 2º

Estação Terrena:

Figura de Ruído do Receptor: F = 2,2 dB

Perda entre antena e o receptor: L_{FRX} = 0,5 dB

Temperatura termodinâmica da conexão: T_F = 290 K

Diâmetro da Antena : D = 7 m

Eficiência da Antena : η = 0,6

Erro de apontamento máximo : α = 0,1º

Temperatura de Ruído da Solo: T_A = 65 K

Ângulo de Elevação da Antena: $E = 10^o$

A Figura (3.3) a seguir ilustra a geometria do enlace:

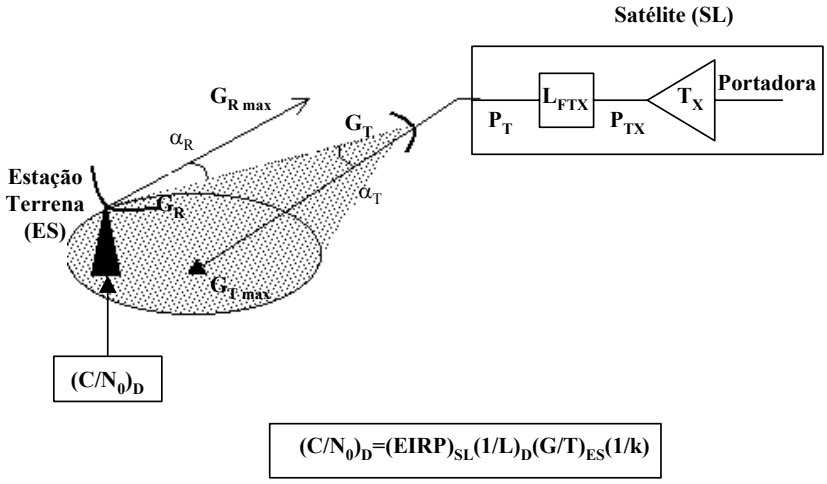

FIGURA 3.3– Geometria Downlink.

Para calcular a *EIRP* da Estação Terrena:

$$(EIRP)_{SL} = (P_{TX} G_{T\max} / L_T L_{FTX})$$

$$P_{TX} = 25W = 14dB(W)$$

$$G_{T\max} = \eta(\pi D/\lambda_D)^2 = \eta(\pi 70/\phi_{3dB})^2 = 0{,}55(\pi 70/2)^2 = 6650 = 38{,}2dBi$$

$$L_T(dB) = 3dB$$

$$L_{FTX} = 1dB$$

Então

$$(EIRP)_{SL} = 14dB(W) + 38{,}2dB - 3dB - 1dB = 48{,}2db(W)$$

Para calcular a atenuação no caminho de subida:

$$L_D = L_{fs} L_A$$

Com

$$L_{FS} = (4\pi R/\lambda_D)^2 = (4\pi R f_D/c)^2 = 4{,}04.10^{20} = 206{,}1dB$$
$$L_A = 0{,}3dB$$

$$L_D = 206{,}1 + 0{,}3 = 206{,}4dB$$

Para calcular a Figura de Mérito (*G/T*) do satélite:

$$(G/T)_{ES} = (G_{R\max}/L_R L_{FRX} L_{POL})/[T_A/L_{FRX} + T_F(1 - 1/L_{FRX}) + T_R] \ (K^{-1})$$

Com

$$G_{R\max} = \eta(\pi D f_U/c)^2 = 464.10^3 = 56{,}7dBi$$

$$L_R = 12(\alpha_R/\phi_{3dB}) = 12(\alpha_R D f_D/70c)^2 = 1{,}9dB$$

$$L_{FRX} = 0{,}5dB$$
$$L_{POL} = 0dB$$

$$T_A = T_{SKY} + T_{GROUND}$$

Tem-se, então

$$T_{SKY} = 20K \text{ (vide FIGURA 2.10)}$$

$$T_{GROUND} = 45K$$

$$T_F = 290K$$
$$T_R = (F-1)T_0 = (10^{0,22} - 1)290 = 191{,}3K$$

Por fim

$$(G/T)_{ES} = 56{,}7 - 1{,}9 - 0{,}5 - 10\log[65/10^{0,05} + 290(1 - 1/10^{0,05}) + 191{,}3] = 29{,}8$$

Para calcular C/N_0 para o DOWNLINK:

$$(C/N_0)_D = (EIRP)_{SL}(1/L_D)(G/T)_{ES}(1/k) \ (Hz)$$

$$(C/N_0)_D = 48{,}2dBW - 206{,}4dB + 29{,}8dBk^{-1} + 228{,}6dBW/HzK = 100{,}2 \ (Hz)$$

A Figura (3.4) a seguir mostra os diferentes níveis de potência durante o percurso do sinal

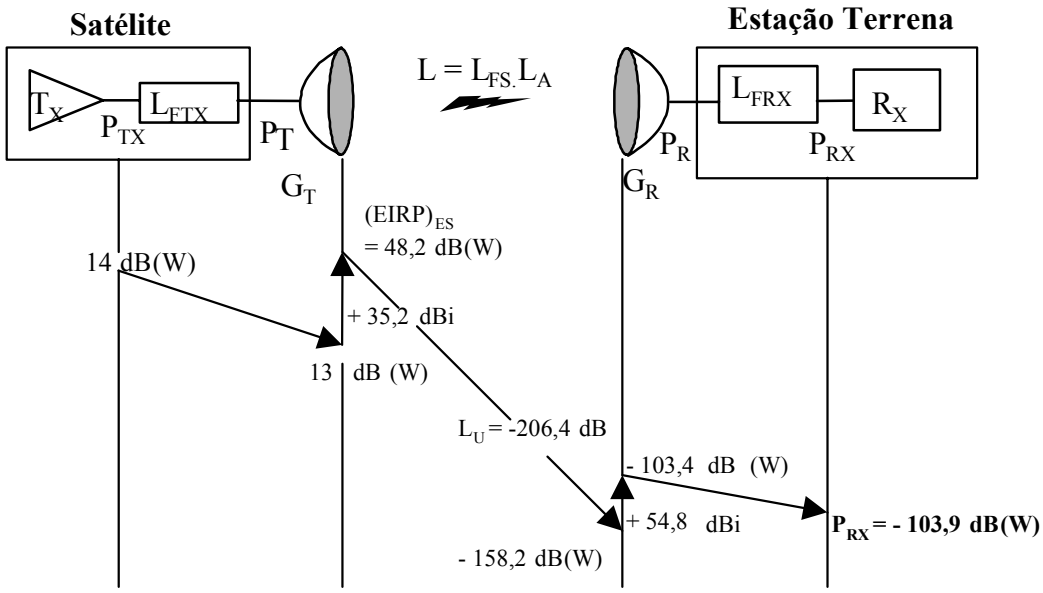

FIGURA 3.4– Níveis de Potência

FONTE: Bousquet et al. (1993, p. 44)

Para calcular E_b/N_0

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{C}{N_0 R_b}$$

$$R_b = 10\log 36.10^6 = 75{,}5dB$$

$$\frac{E_b}{N_0} = 100{,}2 - 75{,}5 = 24{,}7Hz$$

Por fim

$$MARGEM = \frac{E_b}{N_0} real - \frac{E_b}{N_0} req$$

Tomando como base a Figura (2.14), para uma BER de 10^{-6}:

$$\frac{E_b}{N_0} req \cong 10{,}5dB$$

$$MARGEM = 24{,}7 - 10{,}5 = 14{,}2$$

Devido à degradação causada na presença de precipitações, essa alta margem obtida torna-se necessária, resultando em uma cobertura de 99,99% de disponibilidade no enlace.

- *Exemplo 4 - DOWNLINK com chuva*

Uma atenuação $A_{RAIN} = 7\ dB$ representa um valor típico de atenuação da chuva para uma estação terrena situada em um clima temperado (Europa, por exemplo). Esse seria o valor da atenuação, para uma freqüência de 12 GHZ, que não é ultrapassado mais do que 0,01% de tempo da média anual (vide 2.3.2). Então:

$$L_A = 0{,}3dB + 7dB = 7{,}3dB$$
$$L_D = 206{,}1 + 7{,}3 = 213{,}4dB$$

A nova temperatura de ruído da antena é dada por:

$$T_A = T_{SKY} / A_{RAIN} + T_m \left(1 - 1/A_{RAIN}\right) + T_{GROUND}$$

Obtendo-se

$$T_m = 275K$$
$$T_A = 20/10^{0,7} + 275\left(1 - 1/10^{0,7}\right) + 45 = 265K$$

Temos o novo *G/T*

$$(G/T)_{ES} = 56{,}7 - 1{,}9 - 0{,}5 - 10\log\left[2\,65/10^{0{,}05} + 290\left(1 - 1/10^{0{,}05}\right) + 191{,}3\right] = 25{,}7$$

A nova C/N_0 seria, então

$$(C/N_0)_D = 48{,}2dBW - 213{,}4dB + 25{,}7dBk^{-1} + 228{,}6dBW/HzK = 89{,}1$$

Esse seria o valor da relação $(C/N_0)_D$ para o enlace de descida em 99,99% do tempo (disponibilidade), para uma média anual.

Conseqüentemente:

$$\frac{E_b}{N_0} = 89{,}1 - 75{,}5 = 13{,}6Hz$$

A nova margem será:

$$MARGEM = \frac{E_b}{N_0}real - \frac{E_b}{N_0}req$$

Tomando como base a Figura (2.14), para uma BER de 10^{-6}:

$$\frac{E_b}{N_0}req \cong 10{,}5dB$$

$$MARGEM = 13{,}6 - 10{,}5 = 3{,}1$$

3.2 Relação Sinal / Ruído total $(C/N_0)_T$

Podemos agora analisar o comportamento do enlace através da Relação Sinal/Ruído total, ou seja, levando-se em conta os enlaces de subida e descida. Trata-se de um parâmetro muito importante na análise da viabilidade e disponibilidade do sistema. É equacionada por:

$$C/N_0\ total = \frac{1}{\left(C/N_0\right)_U^{-1} + \left(C/N_0\right)_D^{-1}} \tag{3.1}$$

Para o exemplo acima, considerando as precipitações, obtemos:

$$\left(C/N_0\right)_{TOTAL} = \frac{1}{\frac{1}{18.10^8} + \frac{1}{8{,}1.10^8}} = 5{,}6.10^8 = 87{,}4Hz$$

3.3 Conclusões sobre os enlaces

A qualidade do enlace entre um transmissor e um receptor pode ser caracterizada pela relação entre a potência do sinal e a densidade espectral da potência do ruído (C/N_0). Esta relação varia em função do transmissor (*EIRP*), do receptor (figura de mérito *G/T*) e das propriedades do meio de transmissão. Em comunicações via satélite entre duas estações terrenas, dois enlaces devem ser considerados – o enlace de subida (*uplink*), caracterizado pela relação $(C/N_0)_U$, e o enlace de descida (*downlink*), caracterizado pela relação $(C/N_0)_D$. As condições de propagação na atmosfera afetam esses enlaces diferentemente: a chuva reduz o valor da $(C/N_0)_U$ pelo decréscimo da potência recebida; já para o enlace de descida ocorre, além do decréscimo da potência recebida, o aumento da temperatura de ruído do sistema. A degradação resultante pode ser expressa por:

$$\begin{aligned} \Delta\left(C/N_0\right)_U &= \Delta C_U = \left(A_{RAIN}\right)_U \\ \Delta\left(C/N_0\right)_D &= \Delta C_D - \Delta\left(G/T\right) = \left(A_{RAIN}\right)_D + \Delta T \end{aligned} \tag{3.2}$$

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Maral, G; Bousquet, M. **Satellite communication system**. Baffin Lane: Wiley, 1993.

Gagliard, R.; **Satellite communication**. New York: VNR, 1984.

Pritchard, W; Suyderhoud, H; and Nelson, R. **Satellite communication systems engineering**. New Jersey: Prentice Hall, 1993.

Dissanayake, A;. Allnutt J; and Haidara, F. A Prediction Model that Combines Rain Attenuation and Other Propagation Impairments Along Earth-Satellite Paths. **Online journal of space communication**, v. n.12, p. 09-13, Autumn. 2002.

Feher,K. **Digital communication**. New Jersey: Prentice Hall, 1983.

Fordham, D; Brazil, R. Polarization loss for elliptically polarized antennas. **Microwave journal**, dec. 1969.