

Capítulo 5

Equacionamento de um Enlace Via Satélite em Condição Geo-Estacionária

5.1. Introdução

O cálculo de um enlace via satélite é bastante próximo do cálculo de um enlace de rádio terrestre, pois é afetado por quase todos os efeitos impostos pelo meio de propagação. No entanto, as distâncias envolvidas é que se diferenciam, trazendo algumas diferenças e particularidades.

No enlace terrestre toda a propagação da onda eletromagnética é realizada na troposfera, fazendo com que o enlace seja afetado por todos os efeitos geo-climáticos e por propagação em múltiplos percursos.

Por este motivo, os desvanecimentos são muito elevados, principalmente para frequências de operação na faixa de *SHF*. Sendo assim, uma das etapas mais extensas e detalhadas nos enlaces terrestre é a determinação das margens de desvanecimento e das técnicas de diversidade, que devem ser implementadas na estrutura para fazer o enlace confiável.

Em contrapartida as distâncias são muito menores, exigindo muito menos potência dos rádios e permitindo a operação com baixas taxas de erro, mesmo operando com modulações de ordem elevada. Além disso, nos enlaces terrestres os repetidores trabalham com regeneração e códigos de correção de erro, ferramentas utilizadas apenas em condições especiais para repetidores orbitais.

Nos enlaces via satélite as distâncias envolvidas são muito grandes, ocorrendo em maior parte no espaço, com percursos relativamente pequenos nas camadas atmosféricas. Esta condição resulta em atenuações por espaço livre muito altas, exigindo valores elevados de ganho da antena e da potência de transmissão. Além disso, as distâncias que o sinal propaga dentro da troposfera são pequenas, trazendo duas características de grande importância.

A primeira está ligada à condição de que o desvanecimento plano é muito pequeno, podendo ser desconsiderado para todas as faixas de frequência. A segunda está relacionada à atenuação por chuva, que, para banda *C*, pode ser desconsiderada e, para as bandas *X*, *K*, *Ku* e *Ka*, serão muito menores se comparadas aos valores obtidos em enlaces terrestres.

Ao trafegar pela ionosfera, ocorre a rotação na polarização das ondas eletromagnéticas e refrações, que são significativas apenas para frequências até a faixa de *UHF*, não afetando os enlaces na condição geo-estacionária.

Como as abrangências territoriais dos satélites são muito grandes, a utilização dos mesmos ocorre nas mais diferentes formas, para atender os mais variados tipos de serviços.

Por este motivo, o satélite deve ser um repetidor orbital que ofereça a maior versatilidade possível, no intuito de atender diferentes tecnologias de transmissão empregadas em telecomunicações.

Sendo assim, não é possível contar com processamentos sofisticados do sinal que será repetido, não existindo nas operações comerciais o uso de regeneração baseada em codificações.

Dentro deste contexto, o satélite funciona apenas como uma estrutura que amplifica o nível do sinal recebido e o retransmite com outra frequência em direção a uma estação de recepção terrestre. Esta forma totalmente aberta e não atrelada a nenhum padrão de modulação e codificação, traz maior versatilidade de uso ao satélite, mas em contrapartida, faz do mesmo uma estrutura totalmente dependente das condições de enlace, operadas pelas estações terrenas.

Por este motivo, no projeto do enlace via satélite serão levados em consideração os níveis corretos de trabalho tanto para transmissão e recepção, bem como as

características não lineares do *transponder*, para que as distorções provocadas pelo mesmo estejam dentro das condições necessárias para boa operação.

5.2. Parâmetros de desempenho para atendimento dos enlaces

Qualquer enlace de rádio analógico ou digital é calculado em função dos parâmetros de qualidade criados para o bom atendimento. No caso dos enlaces analógicos, a qualidade do sinal, no ponto final, é medida através da relação sinal/ruído S/N (*Signal/Noise*), que varia de acordo com o tipo de serviço e que pode ser representada pela equação (5.1):

$$\left(\frac{S}{N}\right) = f\left(\frac{C}{N}\right) \quad (5.1)$$

O mesmo ocorre com a transmissão na concepção digital, que terá o desempenho medido pela taxa de erro de *bit* BER (*Bit Error Rate*) que é inversamente proporcional à relação entre a energia de *bit* e a energia de ruído (E_b/N_0), como apresentado pela equação (5.2). Como o *bit* é transportado pela portadora, existe a relação entre a potência da portadora e a energia de bit, como mostrado na equação (5.3):

$$BER = f\left(\frac{1}{E_b/N_0}\right) \quad (5.2)$$

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right) = \left(\frac{C}{N}\right) \cdot \left(\frac{R}{B}\right) \quad (5.3)$$

Onde R é a taxa de transmissão [*bps*]; B é a banda do canal ou a largura de faixa ocupada pela portadora modulada [*Hz*].

Analisando (5.1) e (5.3) conclui-se que, tanto na condição analógica como na digital, o enlace estará atrelado à relação portadora/ruído (C/N). Por este motivo, o dimensionamento do enlace estará baseado nesta relação. No Anexo II, estão apresentados os desempenhos das modulações mais empregadas em comunicação via satélite.

A intenção do Anexo II é abordar as principais modulações em comunicação via satélite através dos principais parâmetros utilizados nos cálculos de enlaces.

5.3. Relação portadora/ruído no enlace via satélite

A relação portadora/ruído total de um enlace via satélite, pode variar em função do nível da portadora sob análise, do nível de ruído, do nível dos produtos de intermodulação gerados pelo satélite e por interferências de outros enlaces de rádio ou satélite.

A Figura (5.1) ilustra um enlace via satélite, que permite apresentar de forma mais adequada o equacionamento do enlace.

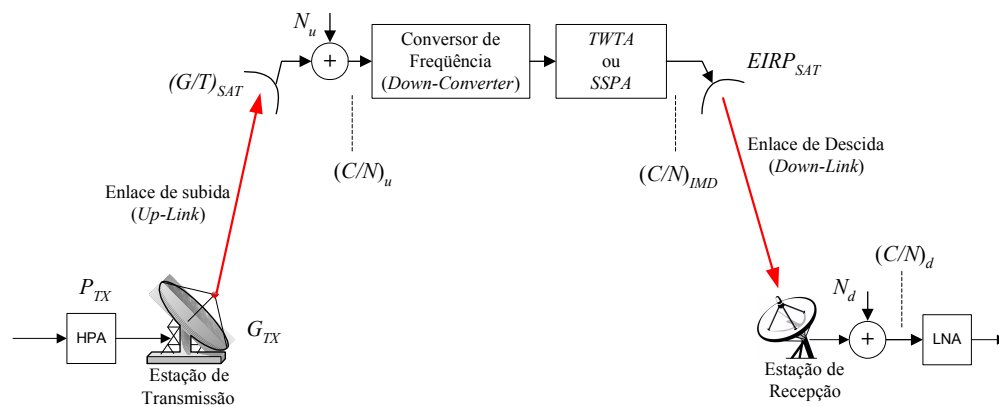


Figura 5.1. Enlace via satélite.

No enlace geral, tem-se dois pontos de recepção. O primeiro deles, no satélite, quando se analisa o enlace de subida. No enlace de descida, o ponto de recepção se encontra na estação terrena receptora. Normalmente, é nestes dois pontos que ocorre a geração de ruído térmico.

Sendo assim, a primeira relação portadora/ruído é medida no ponto de recepção do satélite, resultando no $(C/N)_u$ (*Up-Link Carrier/Noise*). Ao trafegar um sinal pelo satélite, este, além de acrescentar ruído térmico gerado pelo próprio *transponder*, também oferece, em sua saída, produtos de intermodulação significativos, principalmente se a operação é feita com mais de uma portadora na técnica *FDMA*, resultando na relação portadora/ruído de intermodulação $(C/N)_{IMD}$. Ao final do enlace, no último *link*, tem-se a geração de ruído, no ponto de recepção, o que caracteriza uma nova relação portadora/ruído de descida $(C/N)_d$ (*Down-Link Carrier/Noise*).

Estas três parcelas serão responsáveis por quantificar a degradação da qualidade em cada estágio do enlace. O cálculo final da relação portadora/ruído será afetado

por estes três valores parciais, como apresentado na equação (5.4). O desenvolvimento desta equação se encontra no Apêndice D¹.

$$\left(\frac{C}{N}\right)_T = \left[\left(\frac{C}{N}\right)_u^{-1} + \left(\frac{C}{N}\right)_d^{-1} + \left(\frac{C}{N}\right)_{IMD}^{-1} \right]^{-1} \quad (5.4)$$

5.3.1. Análise do enlace de subida

A relação portadora/ruído de subida $(C/N)_u$ pode ser calculada através da análise de enlace ponto a ponto, para determinação da potência de recepção no satélite e da equação de ruído $N=KTB$ [W], resultando na equação (5.5).

$$\left(\frac{C}{N}\right)_u [dB] = EIRP_u - \sum A_u + \left(\frac{G}{T}\right)_{SAT} - 10 \cdot \log(K \cdot B) \quad (5.5)$$

onde $EIRP_u$ é a potência efetivamente radiada, da estação transmissora terrena [dBW]; $\sum A_u$ é o somatório de todas as atenuações existentes no enlace de subida [dB]; $(G/T)_{SAT}$ é o fator de mérito da estrutura de recepção do satélite [dB/K] (Anexo III) e $K=1,38 \times 10^{-23}$ [J/K] é a constante de Boltzman.

A potência de transmissão é definida em função da forma como irá operar o satélite. Se o enlace trabalha com uma única portadora sem múltiplo acesso, o sistema pode operar na saturação. Desta forma, o nível de saturação pode ser obtido através dos fabricantes de satélite, que oferecem o diagrama de recepção para toda região coberta pelo repetidor orbital. Este diagrama é denominado *foot-print* e é oferecido tanto para condição de recepção, como para transmissão, como será abordado ao longo deste capítulo.

Na Figura 5.2 é apresentado o *foot-print* do fluxo de potência que leva o *transponder* à saturação. Através do mapa é possível obter os valores para todas as localidades cobertas pelo satélite^{2,3}. Com este dado é possível calcular a potência da estação terrena transmissora, na intenção de explorar o máximo nível admitido na recepção do satélite em operação, que resultará no maior valor de $(C/N)_u$. A equação (5.6) relaciona o fluxo de saturação do satélite com a potência efetivamente radiada pela estação terrena de transmissão, em condição de céu claro. Temos:

$$\Psi_{SAT} = \frac{P_{TX} \cdot G_{TX}}{4\pi \cdot d^2} = \frac{EIRP_u}{4\pi \cdot d^2} \quad (5.6)$$

onde Ψ_{SAT} é o fluxo de saturação do satélite [W/m^2]; P_{TX} é a potência de transmissão da estação terrena [W]; G_{TX} é o ganho da antena de transmissão da estação terrena; d é a distância entre a estação terrena e o satélite [m].

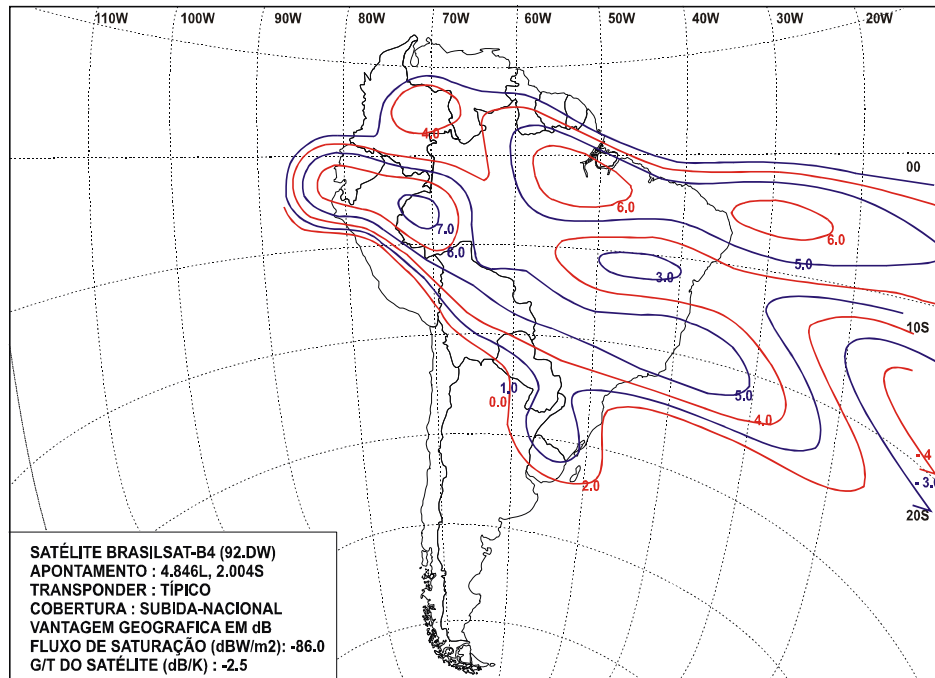


Figura 5.2. Mapa de cobertura do satélite Brasilsat B4 com indicação do fluxo de saturação dos transponders.

Se o satélite opera com nível de recepção que o leva à saturação, em sua saída a potência de transmissão também será máxima, como apresentado na Figura 5.3. No entanto, quando a operação ocorre com múltiplas portadoras, como na técnica *FD-MA*, não é possível operar com a máxima potência, pois deve-se levar em consideração os produtos de intermodulação gerados pelo efeito de não linearidade dos *transponders*. Analisando a equação (4.31), verifica-se que o efeito da intermodulação pode ser minimizado, se a amplitude das portadoras diminuírem, resultando em valores de $(C/N)_{IMD}$ maiores. Esta condição nos leva à percepção de que o valor da relação portadora/ruído parcial deve ser muito bem trabalhado, pois este pode apresentar comportamento antagônico, como é o caso das relações $(C/N)_u$ e $(C/N)_{IMD}$, quando se trabalha com várias portadoras em um mesmo *transponder*.

A Figura 5.3 apresenta a curva que relaciona o fluxo de potência de entrada com a potência de saída, no satélite. Nesta curva, pode-se definir o termo *Back-off*, para entrada e para saída, como sendo a diferença em [dB] entre o valor máximo e o valor nominal de operação. As equações (5.7) e (5.8) ilustram, matematicamente, esta condição⁴:

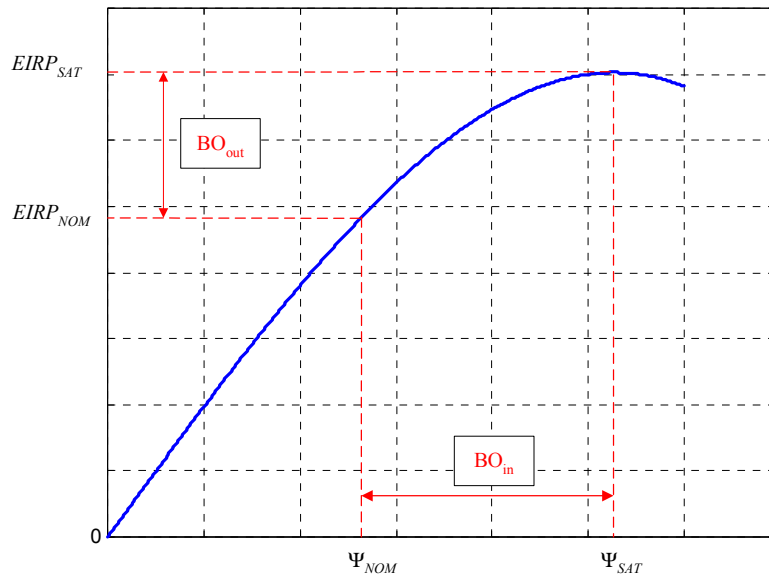


Figura 5.3. Curva que relaciona o fluxo de potência de entrada com a potência de saída do satélite.

$$BO_{in} [dB] = \Psi_{SAT} - \Psi_{NOM} \quad (5.7)$$

$$BO_{out} [dB] = EIRP_{SAT} - EIRP_{NOM} \quad (5.8)$$

A Figura 5.4 explicita a equação (5.4), apresentando os valores parciais das relações portadora/ruído e o valor total.

Na figura 5.4, pode-se ainda verificar que o melhor valor da relação portadora/ruído não é obtido com valores máximos das relações parciais e, sim, em uma condição intermediária de todas elas. Por este motivo, em cálculos para enlaces com múltiplas portadoras empregando a técnica *FDMA*, é importante considerarmos um *Back-off*, na equação dos links de subida e descida (*up-link* e *down-link*), respectivamente.

Baseando-se na equação (4.31), pode-se obter a equação (5.9) que demonstra o valor da relação $(C/N)_{IMD}$ em função do BO_{in} .

$$\left(\frac{C}{N}\right)_{IMD} = \frac{\left| K_1 - \frac{1}{2} \cdot K_3 \cdot \frac{(\Psi_{SAT} \cdot G_{RX-SAT})}{10^{(0,1 \cdot BO_{in})}} \cdot [9 + 3!(N-2)] \right|}{\left| \frac{1}{2} \cdot K_3 \cdot \frac{(\Psi_{SAT} \cdot G_{RX-SAT})}{10^{(0,1 \cdot BO_{in})}} \cdot \sum_{n=1}^{(N-1)} 3 \cdot n \right|} \quad (5.9)$$

Onde G_{RX-SAT} é o ganho da antena de recepção do satélite.

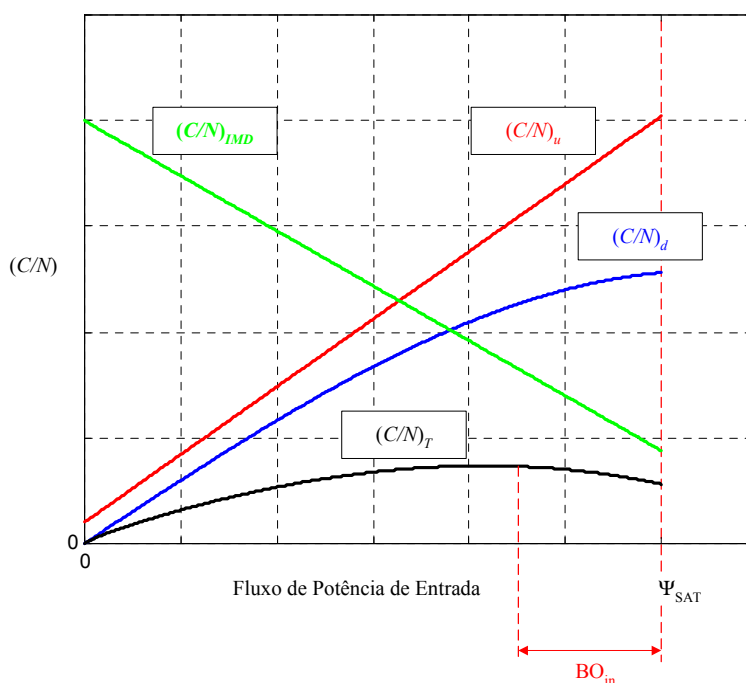


Figura 5.4. Comportamento da relação portadora/ruído total e das componentes parciais.

Outro fator de grande importância na análise do enlace de subida é fator de mérito de recepção do satélite $(G/T)_{SAT}$, que é apresentado pelos operadores dos satélites, em função da coordenada geográfica das localidades atendidas, na forma de tabela ou através de um *foot-print*, como apresentado na Tabela 5.1 e na Figura 5.5⁵.

Os valores de $(G/T)_{SAT}$ são muito menores do que os praticados pelas estações terrenas de recepção. Esta característica deve-se a duas condições de grande relevância para operação dos satélites.

A primeira é a dimensão das antenas receptoras, que são sempre pequenas devido à própria dimensão dos satélites e a segunda está atrelada aos altos valores de temperatura a que estão submetidos os satélites. No entanto, este fator não será de forma alguma limitante, pois pode ser compensado através da escolha da antena utilizada na estação terrena de transmissão e da potência com que a mesma irá operar.

Tabela 5.1. Valores de $(G/T)_{SAT}$ para as capitais da região sudeste (Brasilsat B4)

Cidade (Estado)	Latitude ($^{\circ}S$)	Longitude ($^{\circ}O$)	(G/T) Típico [dB/K]
Belo Horizonte (MG)	19,92	49,93	2,70
Boa Vista (RR)	-2,82	60,67	2,40
Brasília (DF)	15,78	47,91	2,20
Rio de Janeiro (RJ)	22,90	43,23	2,00

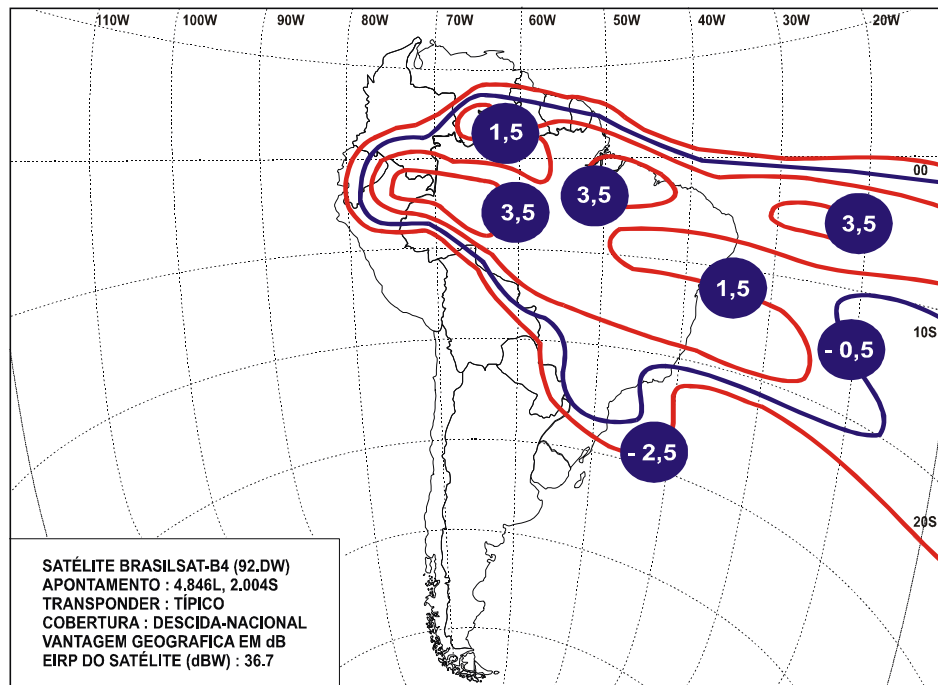


Figura 5.5. Mapa de cobertura do satélite Brasilsat B4 com indicação dos valores de $(G/T)_{SAT}$, ao longo de toda sua área de cobertura.

5.3.2. Análise do enlace de descida

O enlace de descida pode ser analisado da mesma forma que o de subida, com a inversão dos pontos de transmissão e recepção. No enlace de subida, o ponto de transmissão era a estação terrena e o ponto de recepção o satélite. Nesta nova condi-

ção, o ponto de transmissão é o satélite e a estação de recepção se encontra em terra, o que resulta na equação (5.10).

$$\left(\frac{C}{N}\right)_d [dB] = EIRP_{SAT} - BO_{OUT} - \sum A_d + \left(\frac{G}{T}\right)_d - 10 \cdot \log(K \cdot B) \quad (5.10)$$

Onde $EIRP_{SAT}$ é a potência de transmissão do satélite [dBw], na condição de saturação; $\sum A_d$ é o somatório de todas as atenuações existentes do enlace em [dB]; $(G/T)_d$ é o fator de mérito da estrutura de recepção da estação terrena [dB/K] (Anexo III).

Da mesma forma que no *up-link*, os operadores de satélites também oferecem um diagrama de cobertura, com os níveis das potências de transmissão do repetidor orbital, para todas as localidades atendidas. O *foot-print* de descida pode ser visualizado na Figura 5.6².

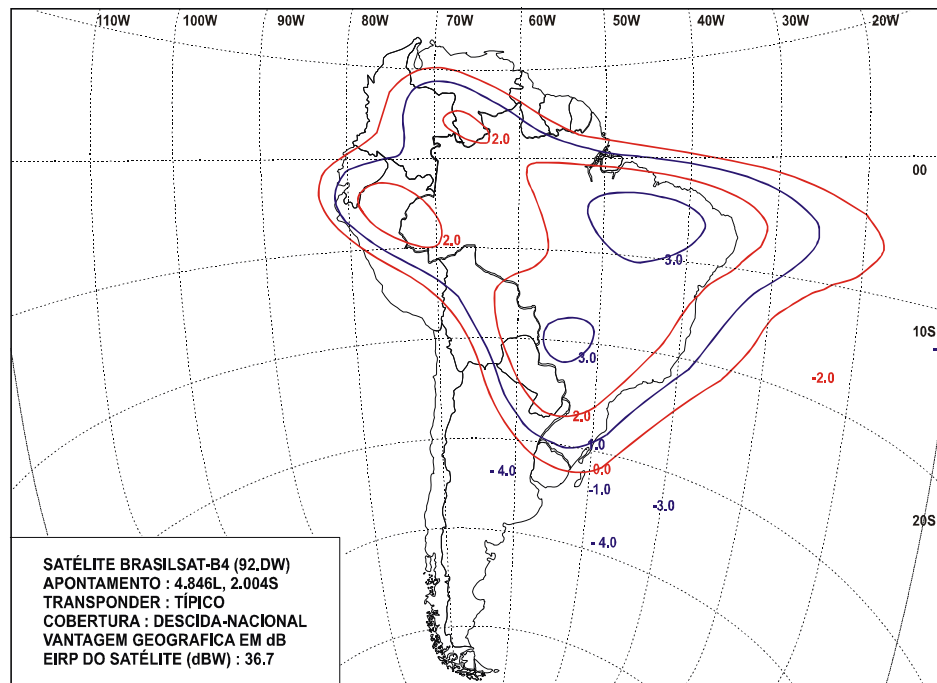


Figura 5.6. Mapa de cobertura do satélite Brasilsat B4 com indicação dos valores de $EIRP_{SAT}$, para o enlace de descida.

O BO_{out} depende do BO_{in} , praticado no enlace de subida, e das características do *transponder* do satélite. A partir de (4.31) obtém-se a equação (5.11), que possibilita atrelar as variações de potência no *up-link* com as resultantes no *down-link*.

$$BO_{OUT} = 10^{(0,05 \cdot BO_{in})} \cdot \left| \frac{K_1 - \frac{1}{2} \cdot K_3 \cdot (\Psi_{SAT} \cdot G_{RX-SAT}) \cdot [9 + 3!(N-2)]}{K_1 - \frac{1}{2} \cdot K_3 \cdot \frac{(\Psi_{SAT} \cdot G_{RX-SAT})}{10^{(0,1 \cdot BO_{in})}} \cdot [9 + 3!(N-2)]} \right| \quad (5.11)$$

Através das equações (5.5), (5.9), (5.10) e (5.11) é possível determinar a melhor condição de operação para o enlace, considerando todas as portadoras com a mesma amplitude.

5.4. Atenuações nos enlaces via satélite

Neste tópico serão abordadas as atenuações presentes em um enlace via satélite, que podem ser divididas em dois grupos básicos. É importante ressaltar que, nestes enlaces, não existe obstrução por obstáculos, contando sempre com visada direta entre os pontos de transmissão e recepção.

O primeiro grupo está relacionado com o meio de propagação e as condições de radiação, resultando no cálculo das atenuações por espaço livre, por desapontamento, por erro de polarização e por chuva.

O segundo grupo leva em consideração as atenuações em componentes empregados nas estações de transmissão e recepção, tais como: conectores, cabos, *flanges* de conexão, guias de onda e outros.

5.4.1. Atenuação por espaço livre

A atenuação por espaço livre deve-se ao fato de o sinal sofrer dispersão ao longo do percurso de propagação, pela própria natureza de radiação dos elementos utilizados na transmissão. Além disso, na recepção, a área efetiva das antenas é finita, captando apenas parte da energia da frente de onda. Sendo assim, o nível de recepção será muito menor que o de transmissão e a relação entre os mesmos caracterizará a atenuação em espaço livre, como apresentado na equação (5.12)⁶:

$$A_e = \frac{P_{TX}}{P_{RX}} \cong \frac{f^2 \cdot d^2}{1754,6} \quad (5.12)$$

onde A_e é a atenuação por espaço livre [dB]; P_{TX} é a potência de transmissão [W]; P_{RX} é a potência na recepção [W]; f é a frequência de operação do enlace [MHz]; d é a distância do enlace [Km].

Na escala logarítmica tem-se:

$$A_e \cong 34,44 + 20 \cdot \log f + 20 \cdot \log d \quad (5.13)$$

5.4.2. Atenuação por desapontamento de antenas

Nos enlaces de subida e descida, sempre existem duas antenas, sendo uma delas da estação terrena e a outra da estação orbital. Estas antenas podem ficar desapontadas, pois o satélite está sujeito a pequenas variações orbitais.

Todo e qualquer desapontamento é acompanhado de atenuação devido à redução de ganho da antena, na radial deslocada da direção de máximo. A forma como ocorre a variação de ganho foi abordada no Capítulo 2, através da equação (2.11).

Quando as antenas terrestres são de pequeno porte, a variação da posição orbital do satélite não resulta em variações tão elevadas de ganho. No entanto, quando se trabalha com antenas de grande porte, é extremamente importante a utilização de sistemas de rastreamento, para que a comunicação seja mantida em toda e qualquer condição de operação.

Com auxílio da Figura 5.7 e, a partir da equação (2.11), as perdas por apontamento nos dois extremos do enlace podem ser calculadas através das equações (5.14) e (5.15)⁷:

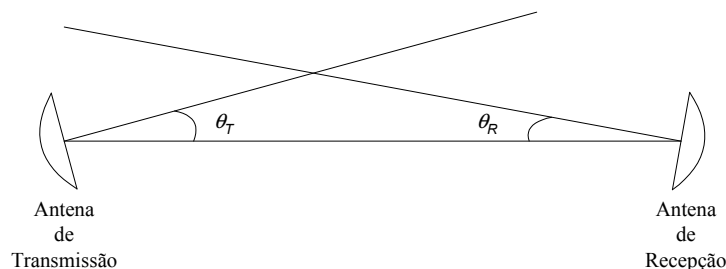


Figura 5.7. Geometria do link, para análise da perda por apontamento.

$$A_{A-TX} = 12 \cdot \left(\frac{\theta_T}{\theta_{3dB}} \right)^2 \quad (5.14)$$

$$A_{A-RX} = 12 \cdot \left(\frac{\theta_R}{\theta_{3dB}} \right)^2 \quad (5.15)$$

onde A_{A-TX} é a atenuação por apontamento na antena de transmissão [dB]; A_{A-RX} é a atenuação por apontamento na antena de recepção [dB]; θ_T é o ângulo entre a reta que liga os dois extremos do enlace e a radial de máximo do diagrama de radiação da antena de transmissão ($^\circ$); θ_R é o ângulo entre a reta que interliga os dois extremos do enlace e a radial de máximo do diagrama de radiação da antena de recepção ($^\circ$).

As variações orbitais dos satélites são acompanhadas e corrigidas pelas estações de controle das operadoras de terra, que são responsáveis em manter estas variações na posição orbital, dentro de limites impostos por normas internacionais. A ITU-R S.1064-1 determina que um enlace com satélite geo-estacionário admita variações máximas na condição de operação do satélite que não ultrapasse $0,2^\circ$ de desvio em suas coordenadas. A recomendação permite que durante os procedimentos de correção da posição orbital este valor atinja, no máximo, $0,3^\circ$.

Com estes valores pode-se calcular as perdas por desapontamento, levando em consideração o ganho e as características das antenas envolvidas no enlace⁸.

5.4.3. Atenuação por erros de polarização

A perda por erro entre a polarização da onda e o posicionamento da antena, deve ser levada em consideração, pois afeta, principalmente, as estações que trabalham com transmissão e recepção simultâneas.

Ao trafegar pela ionosfera, a onda eletromagnética sofre uma rotação nos vetores de campo elétrico e magnético, chamada de *Rotação de Faraday*, alterando a polarização da onda. O ângulo de rotação é inversamente proporcional ao quadrado da frequência de operação, como pode ser visualizado na Tabela 5.2. Além disso, o sentido de giro é o mesmo para enlaces de subida ou descida⁷.

Tabela 5.2. Comportamento da ionosfera ao longo do espectro.

Efeito	Dependência	Frequência.					
		0,1GHZ	0,25GHZ	0,5GHZ	1GHZ	3GHZ	10GHZ
Rotação de Faraday	$1/f^2$	30 rotações	4,8 rotações	1,2 rotações	108°	12°	1.1°

Para estações que trabalham em apenas um sentido, ou seja, somente como transmissora ou como receptora, este erro pode ser solucionado com a rotação do sistema de iluminação da antena. No entanto, para sistemas que operam com transmissão e recepção de forma simultânea, esta solução não se aplica, pois, se for solucionado o problema para transmissão, a diferença se agrava para recepção e vice-versa. Com a equação (5.16) e com os valores da Tabela 5.2, percebe-se que, para frequências em Banda C e Banda Ku, as perdas por polarização devido à *Rotação de Faraday*, irão variar de $0,2dB$ a $0,0016dB$. Para as bandas mais elevadas este efeito pode ser desconsiderado^{9,7}. Estas perdas são estimadas por:

$$A_{POL} = -20 \cdot \log(\cos \xi) \quad (5.16)$$

onde A_{POL} é a atenuação por polarização [dB]; ξ é o erro de polarização devido a *Rotação de Faraday* [°].

Nos casos onde a onda eletromagnética possui polarização circular e é recebida por uma antena de polarização linear, ou vice-versa, a perda por erro de polarização deve ser considerada igual a $3dB$.

5.4.4. Atenuação por chuva

Para comunicação via satélite, um dos fatores de grande importância é o cálculo de atenuação por chuva, para bandas de frequência que ultrapassam 10GHz. A atenuação por chuva é influenciada por vários fatores e, dentre eles, cabe destacar:

- ❑ A frequência de operação do enlace;
- ❑ A taxa pluviométrica da localidade onde está instalada a estação;
- ❑ A polarização da onda eletromagnética;
- ❑ A posição geográfica da estação terrena;
- ❑ A posição geográfica do satélite.

5.4.4.1. Cálculo do fator de atenuação

A atenuação por chuva tem seu cálculo iniciado através do fator de atenuação para o enlace, como apresentado na equação (5.17)¹⁰:

$$\gamma_R = k(R_{0,01})^\alpha \quad (5.17)$$

onde: $R_{0,01}$ é a taxa pluviométrica da estação para 0,01% da média anual; k e α são coeficientes numéricos dados pelas equações (5.18) e (5.19) destacadas abaixo:

$$k = [k_H + k_V + (k_H - k_V) \cos^2 \theta \cos 2 \tau] / 2 \quad (5.18)$$

$$\alpha = [k_H \alpha_H + k_V \alpha_V] / 2k + (k_H \alpha_H - k_V \alpha_V) \cos^2 \theta \cos 2 \tau / 2k \quad (5.19)$$

onde: θ é o ângulo de elevação da antena da estação terrena; τ é o ângulo de polarização da onda com relação à direção horizontal.

Sabe-se que o ângulo $\tau = 45^\circ$ quando a polarização é circular. Para encontrar os valores de k e α , através das equações (5.18) e (5.19), deve-se obter, inicialmente, as componentes vertical e horizontal, como proposto nas equações (5.20) e (5.21).

$$\log k = \sum_{j=1}^3 \left(a_j \exp \left[- \left(\frac{\log f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] \right) + m_k \log f + c_k \quad (5.20)$$

$$\alpha = \sum_{i=1}^4 \left(a_i \exp \left[- \left(\frac{\log f - b_i}{c_i} \right)^2 \right] \right) + m_\alpha \log f + c_\alpha \quad (5.21)$$

onde: f é a frequência de operação em (GHz) e os parâmetros: a , b , c , m_k , c_k , m_α e c_α são apresentados através das Tabelas (5.3) e (5.4) como coeficientes empíricos para obtenção dos valores de k e α nas polarizações vertical e horizontal, que aqui serão representados por: K_H (ou K_V) e α_H (ou α_V), respectivamente.

Tabela 5.3. Coeficientes empregados nas equações (5.20) e (5.21) para polarização horizontal.

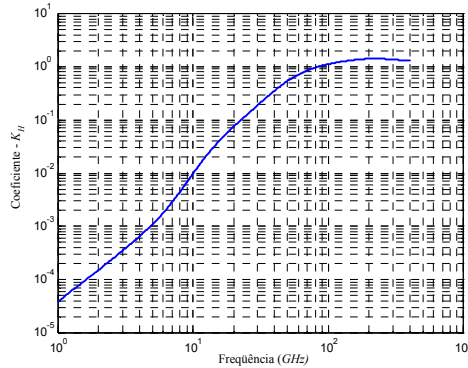
	a	b	c		m_k	c_k	m_α	c_α
$j=1$	0.3364	1.1274	0.2916	$j=1$	1.9925	-4.4123	0	0
2	0.7520	1.6644	0.5175	2				
3	-0.9466	2.8496	0.4315	3				
$i=1$	0.5564	0.7741	0.4011	$i=1$	0	0	-0.08016	0.8993
2	0.2237	1.4023	0.3475	2				
3	-0.1961	0.5769	0.2372	3				
4	-0.02219	2.2959	0.2801	4				

As Figuras 5.8 (a), 5.8 (b), 5.9 (a) e 5.9 (b) apresentam os gráficos, de K_H , K_V , α_H e α_V em função da frequência, respectivamente, Através destes gráficos, visualiza-se o comportamento de cada fator e obtém-se informações aproximadas com uma maior rapidez.

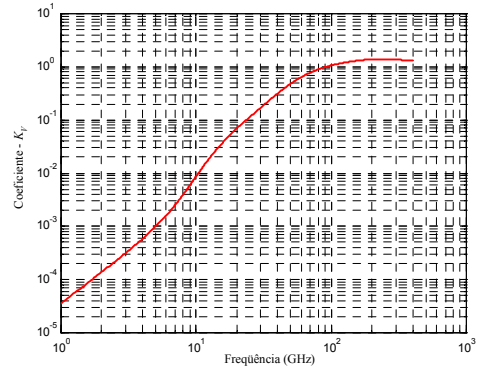
Tabela 5.4. Coeficientes empregados nas equações (5.20) e (5.21) para polarização vertical.

	a	b	c
$j = 1$	0.3023	1.1402	0.2826
2	0.7790	1.6723	0.5694
3	-1.0022	2.9400	0.4823
$i = 1$	0.5463	0.8017	0.3657
2	0.2158	1.4080	0.3636
3	-0.1693	0.6353	0.2155
4	-0.01895	2.3105	0.2938

	m_k	c_k	m_α	c_α
$j = 1$				
2	1.9710	-4.4535	0	0
3				
$i = 1$				
2	0	0	-0.07059	0.8756
3				
4				



(a)



(b)

Figura 5.8. (a) K_H em função da frequência; (b) K_V em função da frequência.

É importante ressaltar que as equações (5.20) e (5.21) consideram apenas os dados de grande abrangência no estudo do enlace, enquanto as equações (5.18) e (5.19) trabalham com variáveis ligadas a particularidades da estação terrena e da forma de propagação do sinal.

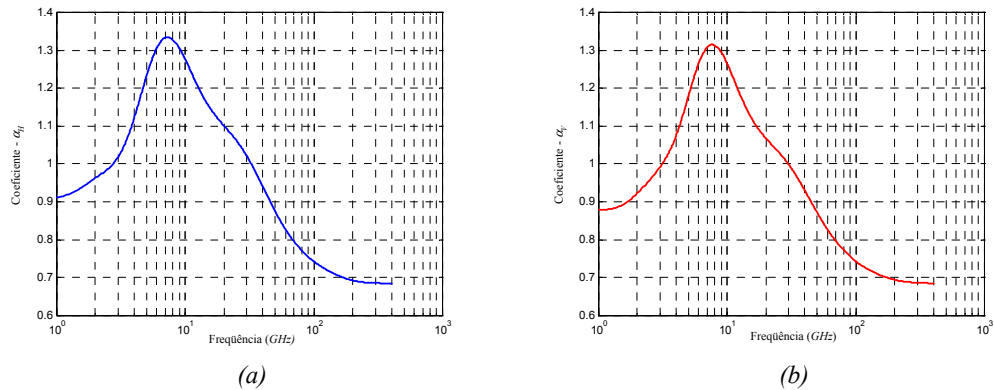


Figura 5.9. (a) α_H em função da frequência; (b) α_V em função da frequência.

5.4.4.2. Cálculo da atenuação por chuva no enlace via satélite

Com o fator de atenuação apresentado na equação (5.17), pode-se calcular a atenuação oferecida por um dado enlace, se a distância percorrida pela onda, sob a célula de chuva, for devidamente estimada. Esta condição é apresentada na equação (5.22):

$$A_{0,01} = \gamma_R L_E \quad (5.22)$$

onde: $A_{0,01}$ é a predição de atenuação excedida para 0,01% da média anual da taxa pluviométrica; L_E é o comprimento efetivo percorrido pela onda, dentro da condição de chuva.

A análise do percurso da onda dentro da célula de chuva pode ser visualizada através da Figura 5.10, que apresenta as principais dimensões a serem analisadas no enlace.

A altura da chuva h_R com relação ao nível do mar pode ser calculada através da recomendação ITU-R P.839-3. Esta norma é acompanhada de um mapa internacional que apresenta a altura inicial da chuva para todas as localidades em diversas partes do globo terrestre. Estes dados também podem ser obtidos de forma tabelada pela ITU¹¹.

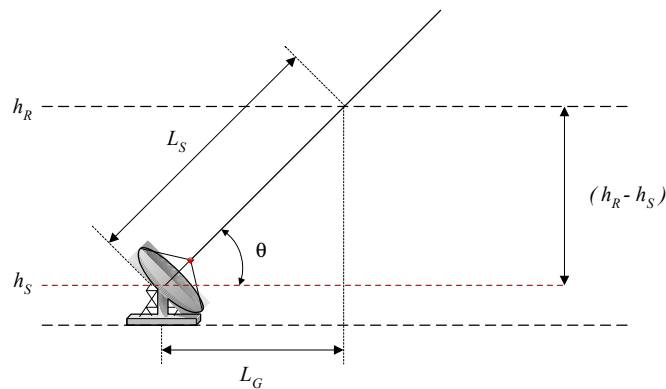


Figura 5.10. Representação esquemática do enlace entre a estação terrestre e a estação orbital.

No entanto, para o Brasil existe um estudo mais detalhado desta medida, realizado pelo Centro de Estudos em Telecomunicações da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (*CETUC - PUC/RJ*)¹², que permite a determinação da altura da chuva, como demonstrado pela equação (5.23):

$$h_R = 3,8 \cdot [1 + e^{(-0,1 \cdot R_{0,01})}] \quad (5.23)$$

Pode-se visualizar através do gráfico da Figura 5.11, que a altura da chuva tende a se manter constante a partir de taxas pluviométricas superiores a 80[mm/h]. Os resultados do *CETUC*, foram obtidos considerando-se várias localidades no Brasil.

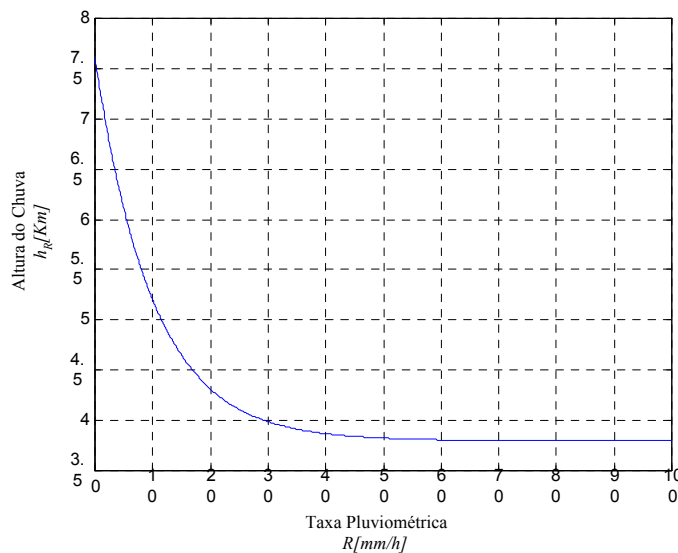


Figura 5.11. Altura efetiva da chuva, com relação ao nível do mar em função da taxa pluviométrica.

A recomendação *ITU-R P.618-8* possibilita a determinação da dimensão L_S , considerando o ângulo de elevação $\theta < 5^\circ$ ou $\theta > 5^\circ$. No entanto, neste trabalho a equação (5.24) destaca apenas os valores de L_S para $\theta > 5^\circ$, pois esta é a condição típica de operação dos enlaces via satélite na concepção *Geo-Estacionária*, ou seja⁹:

$$L_S = \frac{(h_R - h_s)}{\sin \theta} \quad (5.24)$$

onde: h_S é a altura da estação terrena com relação ao nível do mar. Cabe salientar que, se: $h_R - h_S$ for menor ou igual a zero, a atenuação por chuva, para qualquer porcentagem de tempo é igual a zero.

Na Figura 5.10, tem-se a projeção de L_S , chamada de dimensão L_G , que pode ser calculada através da equação (5.25).

$$L_G = L_S \cos \theta \quad (5.25)$$

Devido ao caráter aleatório do deslocamento da célula de chuva ao longo do trajeto do sinal e a variação da dimensão da célula de chuva em função da intensidade, deve-se calcular o valor do fator de redução horizontal, para 0,01% do tempo, como demonstrado na equação (5.26):

$$r_{0,01} = \frac{1}{1 + 0,78 \sqrt{\frac{L_G \gamma_R}{f}} - 0,38 (1 - e^{-2L_G})} \quad (5.26)$$

O fator de ajuste vertical/temporal para 0,01% pode ser obtido através da equação (5.27):

$$v_{0,01} = \frac{1}{1 + \sqrt{\sin \theta} \left(31 (1 - e^{-(\theta/(1+\chi))}) \sqrt{\frac{L_R \gamma_R}{f^2}} - 0,45 \right)} \quad (5.27)$$

O valor de L_R é calculado em função do parâmetro: $\zeta = \tan^{-1} \left(\frac{h_R - h_s}{L_G r_{0,01}} \right)$

- Se satisfizer: $\zeta > \theta$, temos que: $L_R = \frac{L_G r_{0,01}}{\cos \theta}$;
- Se satisfizer: $\zeta < \theta$, temos que: $L_R = \frac{(h_R - h_s)}{\sin \theta}$;
- Para latitude da estação terrena φ tem-se:
 $|\varphi| < 36^\circ \Rightarrow x = 36 - |\varphi| (^{\circ})$; $|\varphi| > 36^\circ \Rightarrow x = 0 (^{\circ})$;

Finalmente, o comprimento efetivo percorrido pela onda, sob a célula de chuva, é descrito pela equação (5.28):

$$L_E = L_R v_{0,01} \quad (5.28)$$

Os cálculos das atenuações por chuva nas bandas K_u e K_a são de grande importância para os enlaces de comunicação via satélite. No entanto, em banda C as atenuações em detrimento da chuva não assumem valores significativos. Por este motivo, é bastante comum os feixes dos satélites que cobrem as regiões tropicais e equatoriais operarem, preferencialmente, em banda C , principalmente quando o diagrama de cobertura é por zona ou global.

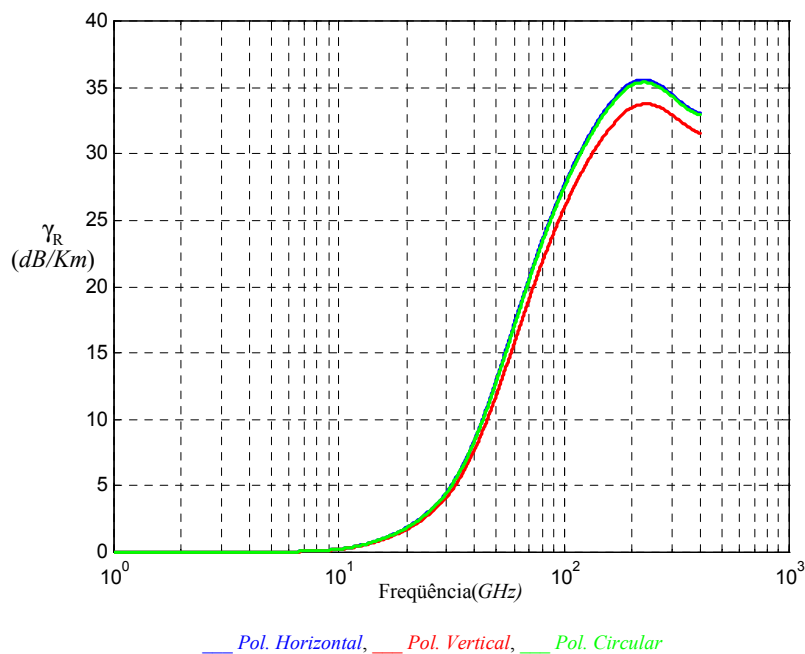


Figura 5.12. Fator de atenuação (γ_R) em função da frequência.

A Figura 5.12 apresenta a variação do fator de atenuação em função da frequência, considerando a taxa pluviométrica fixa em $100 [mm/h]$ e o ângulo de elevação da estação terrena igual a 50° . Pode-se visualizar que o valor se intensifica, consideravelmente, a partir de $10 [GHz]$.

Nas regiões tropicais e equatoriais os valores da taxa pluviométrica variam entre 95 e $145 [mm/h]$, enquanto em regiões de clima temperado, os valores se encontram entre 19 e $42 [mm/h]$, de acordo com a recomendação *ITU-R P.837-4¹³*.

Esta condição confirma a dificuldade de operação em banda K_u utilizando-se coberturas globais em regiões com maiores índices de precipitação. A Figura 5.13 apresenta a variação do fator de atenuação em função da taxa pluviométrica, considerando que a frequência se mantém constante em $12 [GHz]$, o ângulo de elevação da estação terrena é igual a 50° com a polarização horizontal.

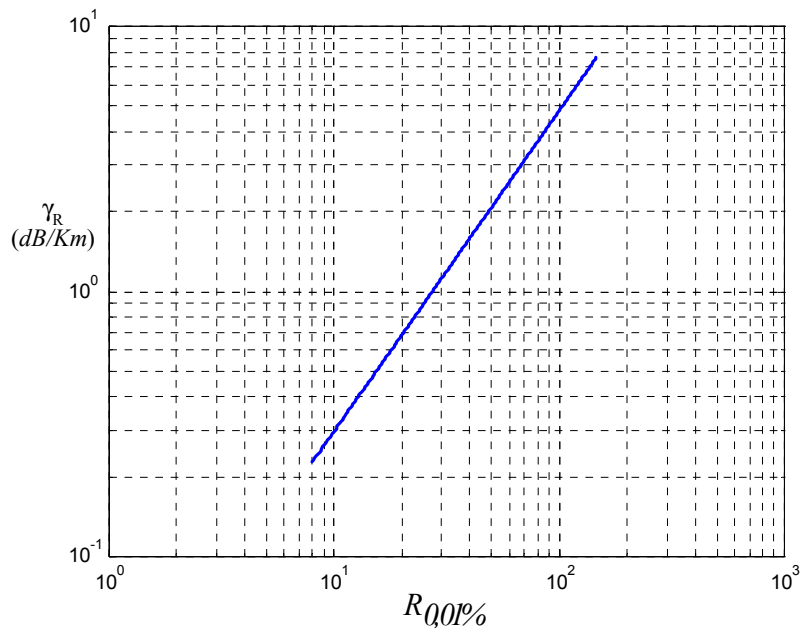


Figura 5.13. Fator de atenuação (γ_R) em função da taxa pluviométrica.

5.4.5. Atenuação de componentes passivos da estação terrena de transmissão

As atenuações oferecidas pelos componentes passivos nas estações transmissoras devem ser consideradas para determinação da potência de transmissão.

Os componentes envolvidos são aqueles utilizados entre a saída do *HPA* e a entrada da antena. Quando a estação trabalha apenas como transmissora, existirão seções de guia de onda e conexões. No entanto, quando o sistema opera com transmissão e recepção na mesma estação, deve-se levar em consideração, as perdas por guias de ondas, conexões e pelo uso do circulador de microondas, que possibilita a utilização de uma só antena para transmissão e recepção. Nas Figuras 5.14 (a) e (b) é possível verificar estas condições.

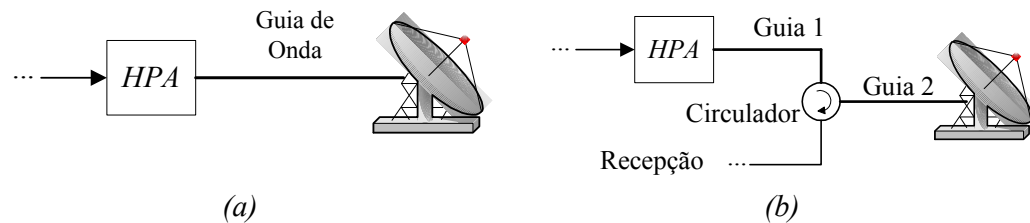


Figura 5.14. (a) Estação utilizada para transmissão; (b) Estação para transmissão e recepção.

5.4.6. Atenuação de componentes passivos da estação terrena de recepção

Na estação receptora se repetem as condições comentadas para a estação de transmissão. Quando a estação funciona apenas para recepção dos sinais, deve-se considerar a perda oferecida por qualquer elemento da linha de transmissão que se encontre entre a antena e o primeiro amplificador de baixo ruído da estrutura. Em estações que apenas recebem o sinal, é bastante comum a instalação direta do *LNA* ao iluminador, para evitar perdas com guias ou cabos coaxiais.

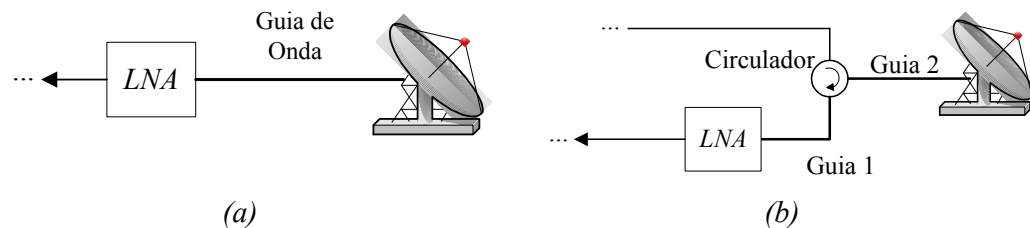


Figura 5.15. (a) Estação utilizada para recepção; (b) Estação para recepção e transmissão.

No entanto, quando a estação trabalha transmitindo e recebendo sinais com a mesma antena, devem ser levadas em consideração as perdas entre o alimentador da

antena e o *LNA*. Nesta condição, existirão seções de guia e o circulador de microondas, como apresentado na Figura 5.15 (b).

Estas perdas não são levadas em consideração no somatório de atenuação do *down-link*, em ambas as condições demonstradas nas Figuras 5.15 (a) e (b), pois são normalmente empregadas para determinação da relação $(G/T)_d$, como pode ser verificado no Anexo III.

5.4.7. Conclusão

Com todas as equações de enlace e com as características do sistema que utilizará o *transponder*, é possível solucionar toda a estrutura de rádio-enlace, obtendo o melhor desempenho possível, sem nenhum tipo de aproximação inadequada que implique em exagero nos parâmetros obtidos como resultados.

Em muitas situações, os enlaces são construídos com margens significativas de ganho de antena e potências de transmissão, para possibilitar manobras práticas em operação, por não levar em consideração todas as características dos *transponders* e do meio, que impactam, consideravelmente, o custo final da estrutura.

Referência Bibliográfica

- ¹ Ha, Tri Ti . *Digital Satellite Communications*. Macmillan Publishing Comp., 1986.
- ² StarOne - Diretoria de operações e engenharia - Gerência de sistemas de comunicações, DOC.: CTS-SISCOM/ENGSIS-02001/00 - *Características do sistema brasileiro de telecomunicações via satélite para projeto técnico de redes de comunicações de dados, voz e vídeo*. (24 de abril de 2002).
- ³ Kuperus, Bart. *Satellite & TV Handbook*. 4th Ed.. Billboard Books - BPI Communications, Inc., 1997.
- ⁴ Pratt, Timothy; Bostian, Charles W.; Allnutt, Jeremy E.; *Satellite Communications*. 2nd Ed.. John Wiley & Sons, 2002.
- ⁵ BRASILSAT B4 Down-link Nacional (Transponder Típico) EIRP(dBw). Disponível em: < <http://www.starone.com.br/starone/satelites2.php> > Acessado em 18 de janeiro de 2004.
- ⁶ Ribeiro, J. A. Justino. *Propagação de ondas eletromagnéticas - Princípios e Aplicações*. INATEL, 2003
- ⁷ Maral, G.; Bousquet, M., *Satellite Communications Systems: Systems, Techniques and Technology*, 4th Ed.. John Wiley & Sons Inc, 2002.
- ⁸ Rec. ITU-R S.1064-1. *Pointing accuracy as a design objective for earthward antennas on board geostationary satellites in the fixed-satellite service*, (1995).
- ⁹ Rec. ITU-R P.618-8. *Propagation data prediction methods for the design of Earth-space telecommunication systems*, (2003).
- ¹⁰ Rec. ITU-R P.838-2. *Specific attenuation model for rain for use in prediction methods*, (2003)
- ¹¹ Rec. ITU-R P.839-3. *Rain height model for prediction methods*, (2001).
- ¹² Fontes, Marlene Sabino et alli. *Medidas radiométricas da atenuação por chuva em regiões tropicais e equatoriais*. Centro de Estudos em Telecomunicações da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (CETUC-PUC-RJ). Junho, 1994.
- ¹³ Rec. ITU-R P.837-4. *Characteristics of precipitation for propagation modeling*, (2003)