

RADIODIFUSÃO DE TVAD POR SATÉLITE

CONSIDERAÇÕES SOBRE A FREQUÊNCIA DO ENLACE DE DESCIDA

Mauro S. Assis
 EMBRATEL - Departamento de Desenvolvimento de Recursos Humanos
 Rua da Assembléia, 10 - Sala 2201
 20.011 - Rio de Janeiro - RJ

Leandro R. Maciel
 IME - Seção de Eletricidade
 Praça General Tibúrcio, 80
 22.290 - Rio de Janeiro - RJ

RESUMO

Este trabalho discute o problema da frequência de transmissão no enlace de descida de um sistema de radiodifusão de TVAD por satélite. Embora diversas faixas de frequências estejam atribuídas a este serviço entre 10 e 100 GHz, por motivos técnicos relacionados principalmente à atenuação por chuva, a análise aqui desenvolvida é restrita às faixas de 12 e 23 GHz. Nas áreas caracterizadas por valores elevados da taxa de precipitação, como é o caso das regiões tropicais e equatoriais, os resultados mostram claramente ser a faixa de 12 GHz a mais apropriada. É importante também ressaltar que, apesar do estudo estar voltado para a radiodifusão de TVAD por satélite, as conclusões obtidas são aplicáveis, de um modo geral, a qualquer sistema do tipo ponto-área como, por exemplo, o serviço móvel terrestre por satélite.

1. INTRODUÇÃO

Entre agosto e outubro deste ano (1988) será realizada, sob os auspícios da União Internacional de Telecomunicações (UIT), a Segunda Sessão da Conferência Administrativa Mundial de Radiocomunicações para Uso da Órbita de Satélites Geoestacionários (CAMR - ORB 88). Um dos itens da agenda desta Conferência se refere à questão da faixa de frequência a ser usada para o serviço de radiodifusão por satélite (SRS) no caso de televisão de alta definição (TVAD). De acordo com o Regulamento de Radiocomunicações as faixas disponíveis para este serviço são: 12 GHz; 23 GHz; 42 GHz e 85 GHz. Considerando que problemas relativos ao desenvolvimento tecnológico e à propagação na troposfera limitam significativamente as faixas de 42 e 85 GHz, o presente trabalho pretende discutir a possibilidade de utilização das outras duas (12 e 23 GHz).

A escolha da faixa de frequência mais adequada para o SRS está intimamente ligada à atenuação por chuva. Conforme será visto, este efeito afeta de modo significativo o dimensionamento do enlace de descida (enlace de radiodifusão). A estimativa da atenuação por chuva será feita através do modelo atualmente adotado pelo CCIR[1]. A adoção deste modelo se justifica por sua simplicidade matemática e pelo fato de ser o único aceito de modo quase que universal. Entretanto, suas restrições quando aplicado em regiões tropicais e equatoriais serão também aqui discutidas.

2. CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

A escolha da frequência da portadora em um enlace radioelétrico está fortemente associada à largura de faixa do canal a ser transmitido. No caso de TVAD, dependendo do tipo de modulação (analógica ou digital) e do grau de compressão da faixa em banda base, a largura do canal de RF pode variar de 24 a 120 MHz. Alguns valores típicos publicados na literatura técnica sobre o assunto são listados a seguir [2]:

| | Sistema de faixa estreita | Sistema de faixa larga |
|------------------------|------------------------------|--------------------------------------|
| Tipo de modulação | FM | FM 4 PSK 8 PSK 16 QAM |
| Largura de faixa (MHz) | 24-27 | 42-58 105-120 70-80 52,5-60 |

Na faixa de 12 GHz o SRS foi planejado de modo distinto nas Regiões 1 (Europa e África), 2 (Américas) e 3 (Ásia e Oceania) da UIT. A situação existente é a seguinte:

Região 1 - 11,7 a 12,5 GHz com canais de 27 MHz;

Região 2 - 12,2 a 12,7 GHz com canais de 24 MHz (em alguns casos é permitido o uso de canais de 27 MHz);

Região 3 - 11,7 a 12,2 GHz com canais de 27 MHz.

Conforme será visto a seguir a faixa de 12 GHz tem a vantagem de uma menor atenuação por chuva. Entretanto, as diferenças acima destacadas dificultam o estabelecimento do serviço em base mundial. Cumpre ainda ressaltar que, até o momento, a única experiência sobre transmissão de TVAD por satélite foi realizada no Japão, na frequência de 12 GHz, com um canal de 27 MHz de largura[2].

O problema mais crítico da faixa de 23 GHz se refere à atenuação por chuva. De acordo com o relatório 564-3 do CCIR[1], a atenuação em 23 GHz é da ordem de 3 vezes superior ao valor (em dB) correspondente à faixa de 12 GHz. Adicionalmente há que levar em conta também a absorção pelo vapor d'água, a qual pode atingir valores razoavelmente elevados no caso de enlaces com pequenos ângulos de elevação. Por ou-

tro lado, existe ainda o inconveniente da faixa de 23 GHz não estar atribuída ao SRS na Região 1. A grande vantagem desta faixa é a possibilidade de transmitir TVAD em faixa larga, ou seja, com canais de 40 a 120 MHz e modulação analógica ou digital.

3. PROBLEMAS RELACIONADOS COM A PROPAGAÇÃO DA ENERGIA

A atenuação por chuva e a absorção atmosférica constituem os principais fatores que limitam o desempenho dos sistemas de comunicações que operam em frequências acima de 10 GHz. Estes problemas serão considerados neste texto através dos modelos adotados pelo CCIR e constantes da documentação relativa à Comissão de Estudos 5 (Propagação em Meios Não Ionizados).

3.1 Absorção Atmosférica

A faixa de 12 GHz não chega a ser afetada de modo significativo pela absorção atmosférica. Para ângulos de elevação superiores a 10° esta absorção não chega a 0,5 dB. Entretanto, o mesmo não acontece na faixa de 23 GHz, onde há um máximo de absorção nas vizinhanças de 22,3 GHz devido à ressonância molecular do vapor d'água. De acordo com o relatório 719-2 do CCIR [3], a atenuação causada pelo vapor d'água pode ser estimada através de,

$$A_w(\text{dB}) = \frac{h_w \gamma_w}{\sin \theta} \quad \text{para } \theta \geq 10 \quad (1)$$

onde

$$h_w = 2,2 + \frac{3}{(f-22,3)^2 + 3} + \frac{1}{(f-183,3)^2 + 1} + \dots$$

$$\dots + \frac{1}{(f-323,8)^2 + 1} \quad (\text{km});$$

$$\gamma_w = 0,067 + \frac{3}{(f-22,3)^2 + 7,3} + \frac{9}{(f-183,3)^2 + 6} + \dots$$

$$\dots + \frac{3}{(f-323,8)^2 + 10} \quad f^2 \rho \cdot 10^{-4} \quad (\text{dB/km});$$

θ - ângulo de elevação;

f - frequência em GHz;

ρ - densidade de vapor d'água em g/m^3 .

A Figura 1 mostra curvas da absorção atmosférica em função do ângulo de elevação para as faixas de 12 e 23 GHz.

3.2 Atenuação por Chuvas

A distribuição espacial não uniforme da taxa de precipitação constitui o principal fator de imprecisão no cálculo da atenuação causada pela chuva. A maioria dos modelos propostos para avaliar este efeito procura

contornar este problema estabelecendo uma relação empírica entre os valores da taxa de precipitação e da atenuação ultrapassados em uma dada percentagem de tempo. Em que pese a simplicidade deste procedimento, há o inconveniente de uma dependência crítica entre os resultados obtidos e as características climáticas da região onde foram feitas as medidas experimentais que suportam o estudo. O modelo atualmente adotado pelo CCIR [1] e utilizado neste trabalho enquadra-se nesta situação, pois foi estruturado a partir de um amplo programa experimental realizado na Europa e complementado com dados provenientes dos Estados Unidos e do Japão. Neste contexto, é imediato concluir da melhor adequação deste modelo para regiões temperadas.

Em regiões tropicais e equatoriais os dados experimentais são escassos e obtidos em sua maioria por medidas de radiometria, o que implica em uma limitação dos níveis de atenuação que podem ser observados. Entretanto, há evidências de que em latitudes inferiores a 30° o modelo CCIR superestima o cálculo da atenuação. Por este motivo, a Comissão de Estudos 5 do CCIR sugeriu que, em latitudes inferiores a 20°, a atenuação estimada pelo citado método (em dB) fosse reduzida de um terço. Mais recentemente, o relatório do CCIR para a CAMR - ORB 88 propôs uma interpolação linear para latitudes entre 20° e 30° [2]. Tais procedimentos procuram compensar as deficiências do modelo CCIR quando aplicado em baixas latitudes. No entanto, a falta de um modelo mais adequado para estas regiões gera um importante ponto de controvérsia que será destacado a seguir.

O cálculo da atenuação usando o modelo CCIR depende basicamente da taxa de precipitação ultrapassada em 0,01% de um ano médio para uma dada localidade ($R_{0,01}$). A atenuação específica (γ) para esta taxa é dada por,

$$\gamma \quad (\text{dB/km}) = k [R_{0,01} \text{ (mm/h)}]^\alpha \quad (2)$$

onde k e α são coeficientes que dependem da frequência e da polarização. Para as faixas de frequência de interesse neste trabalho,

12 GHz

23 GHz

Polarização vertical:

$$k_v = 0,0168 \text{ e } \alpha_v = 1,200; \quad k_v = 0,094 \text{ e } \alpha_v = 1,049;$$

Polarização horizontal:

$$k_h = 0,0188 \text{ e } \alpha_h = 1,217; \quad k_h = 0,1028 \text{ e } \alpha_h = 1,075;$$

e para polarização circular,

$$k = \frac{k_h + k_v}{2}; \quad \alpha = \frac{k_h \alpha_h + k_v \alpha_v}{2k}$$

O cálculo do nível de atenuação ultrapassado em 0,01% do tempo ($A_{0,01}$) é feito a partir de (2) e com o auxílio da Figura 2. Tem-se então,

$$A_{0,01} = \gamma L_S r \quad (\text{dB}) \quad (3)$$

onde

$$L_S = \frac{h_r - h_o}{\text{sen } \theta} \text{ (km)} ; r = \frac{1}{1 + 0,045 L_G} ; L_G = L_S \cos \theta \text{ (km)}$$

$$h = \begin{cases} 4 \text{ km} & \text{para } 0^\circ < \phi < 36^\circ \\ 4 - 0,075 (\phi - 36) & \text{para } \phi \geq 36^\circ \end{cases} \text{ altura da chuva}$$

ϕ e h_o são, respectivamente, a latitude e a altura da estação terrena.

Para uma percentagem de tempo p qualquer, a atenuação correspondente (A_p) é dada por,

$$A_p = 0,12 A_{0,01} p^{-(0,546 + 0,043 \log p)} \text{ (dB)} \quad (4)$$

No caso de radiodifusão por satélite é usual empregar no dimensionamento o valor da atenuação excedida em uma percentagem p_w do pior mês. Neste caso, a percentagem de tempo anual (p) relativa a p_w é obtida através de [1],

$$p = 0,3 p_w^{1,15} \quad (5)$$

Ilustrando a aplicação do modelo CCIR, a Figura 3 apresenta curvas da atenuação ultrapassada em 1% do pior mês, para um ângulo de elevação de 30° , em função da latitude da estação terrena, a qual é suposta ao nível do mar ($h_o = 0$). Os valores de $R_{0,01}$ usados nestas curvas foram 95 e 145 mm/h que correspondem, respectivamente, a valores típicos dos climas tropical e equatorial. A observação desta figura mostra um aumento da atenuação para latitudes entre 20° e 30° . Entretanto, é de se esperar que, mantido constante o valor do ângulo de elevação, a atenuação excedida em uma dada percentagem de tempo diminua progressivamente com o aumento da latitude, pois nesta situação, conforme pode ser observado na Figura 4, há uma redução gradativa da taxa de precipitação.

No caso do clima equatorial esta contradição é apenas aparente, pois taxas da ordem de 140 a 160 mm/h em 0,01% do tempo, em geral, não acontecem para latitudes superiores a 20° . No clima tropical, entretanto, o mesmo não ocorre, uma vez que taxas de 80 a 100 mm/h são observadas entre 30° e 40° de latitude. Provavelmente, este comportamento é explicado pelo fato da redução de 1/3 aplicada em latitudes inferiores a 20° ser uma correção aceitável apenas para o clima equatorial. No caso do clima tropical, talvez seja necessário uma outra solução que permita uma transição suave para o clima temperado em função do aumento da latitude. Considerando não haver, no momento, dados que permitam responder a esta questão, uma alternativa é fixar um nível máximo de atenuação a ser usado como referência no dimensionamento dos enlaces. Este procedimento, embora apresente um certo grau de arbitrariedade, compensa, pelo menos em parte, a imprecisão do modelo usado no cálculo da atenuação. Para a faixa de 12 GHz sugere-se neste trabalho a adoção de um nível igual a 9 dB. Este valor constitui um limite razoável para os climas tropical e equatorial desde que o ângulo de elevação da estação terrena não seja inferior a 30° . O mesmo raciocínio leva a um nível máximo de 16 dB para a faixa de 23 GHz, porém com um ângulo de elevação mínimo de 40° .

4. DIMENSIONAMENTO

A equação do enlace de descida em uma ligação por satélite é dada por:

$$C/N = \text{eirp} - L_{FS} + G/T - 10 \log kB - A_g - A_r - L_u - L_a \quad (6)$$

onde

C/N - relação portadora-ruído mínima aceitável (dB);

eirp - potência equivalente isotropicamente irradiada pelo satélite (dBW);

L_{FS} - atenuação de espaço livre;

G/T - fator de mérito do receptor (dB/K);

G - ganho da antena receptora (dB);

T - temperatura de ruído do receptor (K);

k - constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K);

B - largura de faixa do canal (Hz);

A_g - absorção atmosférica (dB);

A_r - atenuação por chuva (dB);

L_a - perdas adicionais nos guias, filtros etc. (dB);

L_u - perda equivalente à contribuição do ruído do enlace de subida (dB);

A parcela relativa à atenuação por chuva, por seu comportamento aleatório, constitui o ponto crítico de (6). Entretanto, uma vez fixado o valor máximo de A_r , pelo menos para fins de planejamento, fica resolvida esta parte do problema. Resta ainda considerar a dependência da temperatura de ruído do receptor com o valor de A_r . Este efeito atua basicamente na temperatura de ruído da antena (T_a) que, no caso de uma estação terrena, pode ser estimada por [4],

$$T_a = T_o - T_d \times 10^{-\frac{A_r + A_g}{10}} \text{ (K)} \quad (7)$$

onde

T_o - temperatura ambiente de referência (290 K);

T_d - diferença entre T_o e a temperatura de ruído da antena em condições de céu claro (tipicamente 240 K).

Quanto à temperatura de ruído do receptor (T) tem-se [2],

$$T = \alpha T_a + (1-\alpha) T_o + (n-1) T_o \text{ (K)} \quad (8)$$

onde $\alpha = 10^{-\frac{L_a}{10}}$ e $n = 10^{-\frac{F}{10}}$, sendo F o fator de ruído do receptor em dB.

Com base nos parâmetros da Tabela I será a seguir desenvolvido um exemplo de dimensionamento do enlace de descida nas faixas de 12 e 23 GHz. Este exemplo terá por objetivo discutir os possíveis valores da eirp do satélite e do ganho da estação receptora terrena em função das dimensões da área a ser coberta. Assim, usando os parâmetros da Tabela I em (6), (7) e (8), é imediato mostrar que na borda da área de serviço tem-se,

TABELA I

PARÂMETROS TÍPICOS DAS FAIXAS DE 12 e 23 GHz

| Frequência (GHz) | 12 | 23 |
|------------------------|-----------|----------------------|
| Tipo de modulação | Analógico | Analógico ou Digital |
| C/N mínima (dB) | 14 | 17 |
| L_{FS} (dB) | 205,6 | 211,9 |
| B (MHz) | 24 | 54 |
| $10 \log k$ (dBW/Hz K) | -228,6 | -228,6 |
| F (dB) | 2,5 | 4,0 |
| A_g (dB) | 0,2 | 1,2 |
| A_r (dB) | 9 | 16 |
| L_a (dB) | 1 | 1 |
| L_u (dB) | 0,5 | 0,5 |

(a) Faixa de 12 GHz

$$e_{irp} + G = 105,3 \text{ dBW}$$

(b) Faixa de 23 GHz

$$e_{irp} + G = 127,9 \text{ dBW}$$

Admitindo que a antena receptora tenha 1 metro de diâmetro e eficiência de iluminação igual a 65%, chega-se aos seguintes valores para a eirp do satélite na borda da área de serviço,

$$e_{irp} = 65,2 \text{ dBW (12 GHz);}$$

$$e_{irp} = 82,4 \text{ dBW (23 GHz).}$$

O ganho da antena transmissora do satélite (G) depende da área a ser coberta pelo feixe do satélite (área de serviço), isto é,

$$G_s = 44,4 - 10 \log \theta_1 - 10_2 \log \theta_2 \quad (\text{dB}) \quad (9)$$

onde θ_1 e θ_2 são os eixos em graus da elipse de cobertura. A partir de (9) pode-se formular as hipóteses listadas na Tabela II, as quais permitem chegar à potência de transmissão do satélite (P_s). A observação desta tabela mostra que, no caso da faixa de 12 GHz, apenas as hipóteses (c) e (d) apresentam valores de potências compatíveis com as possibilidades técnicas atuais. Tais valores, inclusive, se ajustam ao planejamento do SRS realizado em 1983 para a Região 2 [5]. Pode-se então aproveitar os resultados deste planejamento como referência para um futuro serviço de radiodifusão de TVAD por satélite no Brasil. Neste contexto, a Figura 5 mostra a cobertura do Brasil por total de 8 (oito) feixes associados às posições orbitais a seguir discriminadas:

| Posição orbital | Áreas de serviço | Ângulo mínimo de elevação |
|-----------------|------------------|---------------------------|
| 81 W | 1-2 | 41 |
| 74 W | 6-7-8 | 60 |
| 64 W | 3-4-5 | 56 |

No que diz respeito à faixa de 23 GHz, o problema é bem mais complexo. O valor da eirp do satélite para esta faixa descarta a possibilidade de uma solução do tipo mostrado na Figura 5. É claro que uma análise mais detalhada da questão pode indicar alternativas para contornar a dificuldade acima. Por exemplo, reduzindo o limite máximo da atenuação por chuva ou dividindo a área de serviço em feixes estreitos. Entretanto, é importante também avaliar o efeito de tais soluções na redução da confiabilidade e no aumento do custo do sistema. Uma solução tecnicamente correta pode não ser compatível com a operacionalidade e comercialização do serviço.

TABELA II

EXEMPLOS DE DIMENSIONAMENTO PARA A FAIXA DE 12 E 23 GHz

| Hipótese | $\theta_1 \times \theta_2$ | G (dB) | P_s (W) | |
|----------|----------------------------|----------|-----------|--------|
| | | | 12 GHz | 23 GHz |
| a | $4^\circ \times 4^\circ$ | 32,3 | 1950 | 102000 |
| b | $3^\circ \times 3^\circ$ | 34,9 | 1071 | 56000 |
| c | $2^\circ \times 2^\circ$ | 38,4 | 480 | 25000 |
| d | $1^\circ \times 1^\circ$ | 44,4 | 120 | 6300 |

5. CONCLUSÕES

Apesar das dificuldades associadas ao problema da atenuação por chuva, a faixa de 12 GHz é, sem dúvida, a mais adequada para as regiões tropicais e equatoriais. Os resultados mostram a viabilidade de um serviço compatível com o planejamento do SRS nesta faixa. Os inconvenientes desta solução se referem à impossibilidade do serviço ser realizado em base mundial e à operação com sistema de banda estreita (24 ou 27 MHz), caso seja aproveitada a canalização do referido planejamento. A faixa de 23 GHz, embora permita uma solução única para as três regiões da UIT com transmissão em banda larga, é praticamente inviável para países de baixa latitude e grande extensão territorial.

Por outro lado, não obstante o presente trabalho ter sido dirigido para a radiodifusão de TVAD por satélite, os resultados obtidos podem ser aplicados a outros serviços do tipo ponto-área. Esta conclusão é uma referência importante na análise do emprego adequado das frequências acima de 10 GHz em comunicações via satélite. O problema aqui reportado não é tecnicamente crítico para enlaces ponto-a-ponto. Quando for este o caso, o uso de diversidade de sítio possibilita manter a confiabilidade dentro dos padrões desejados, mesmo quando o enlace estiver submetido a um valor elevado de atenuação por chuva [6]. Esta solução, entretanto, requer um estudo econômico cuidadoso devido ao custo envolvido na duplicação do número de estações terrenas.

6. REFERÊNCIAS

1. CCIR, "Propagation data and prediction methods required for Earth-space telecommunication systems", Relatório 564-3, XVI Assembléia Plenária, Dubrovnik (1986).
2. CCIR, "Report to second session of WARC-ORB", Genebra (1988).
3. CCIR, "Attenuation by atmospheric gases", Relatório 719-2, XVI Assembléia Plenária, Dubrovnik (1986).
4. CCIR, "Broadcasting-satellite service (Sound and Television)", volumes X e XI - 2ª parte, Genebra (1982).
5. CARR - RADSAT83 - Relatório da Delegação Brasileira, SAI - SG - Ministério das Comunicações, dezembro (1983).
6. Graminho, M. R. C. e M. S. Assis, "Atenuação por Chuva e Diversidade de Sítio", Anais do 4º Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, Rio de Janeiro, setembro (1986).

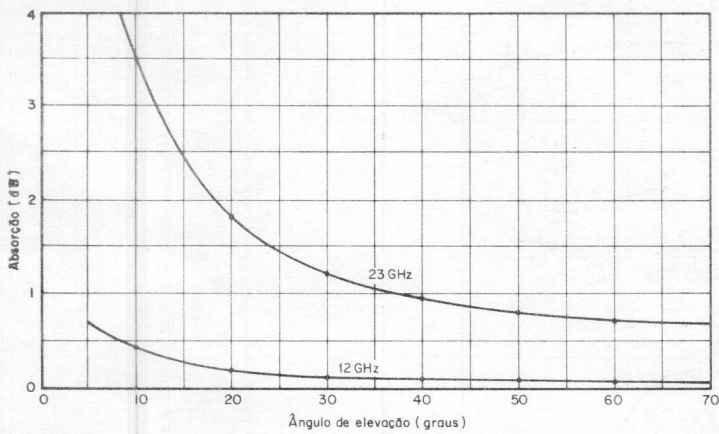


Fig. 1 - Absorção por gases

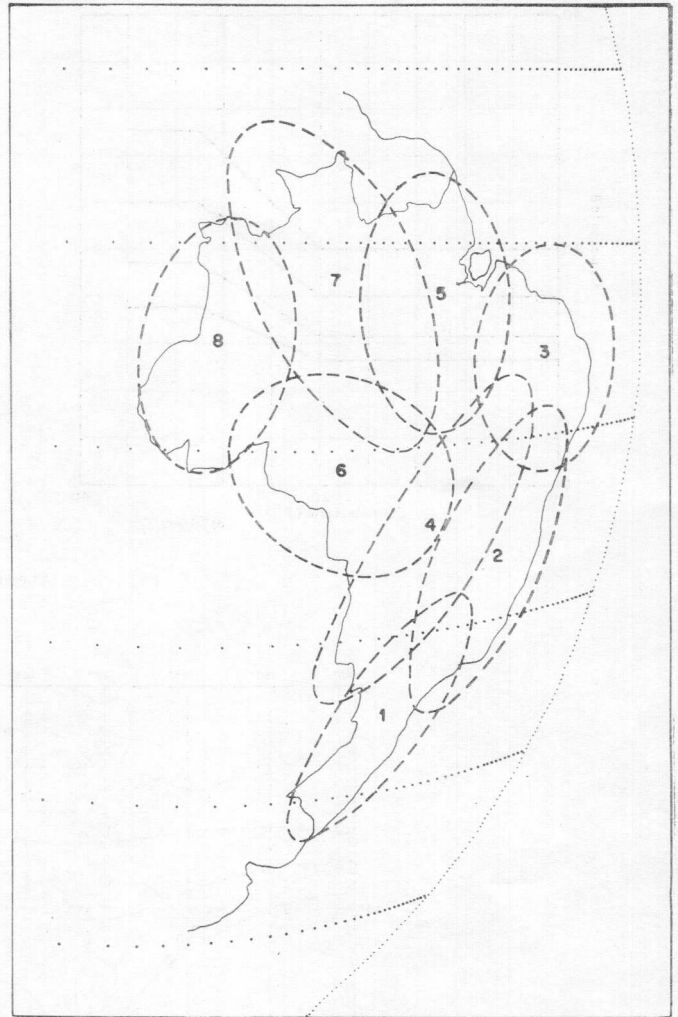


Fig. 5 - Áreas de cobertura para TVAD por satélite

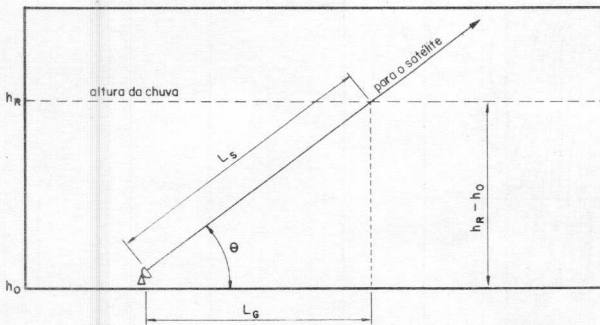
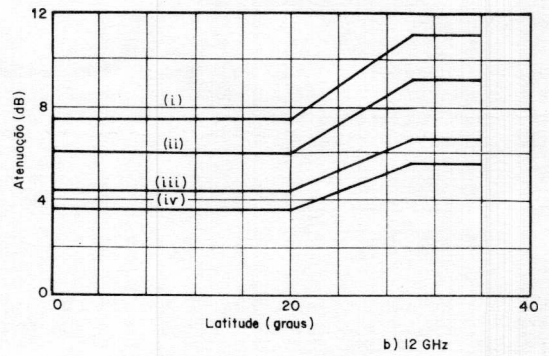
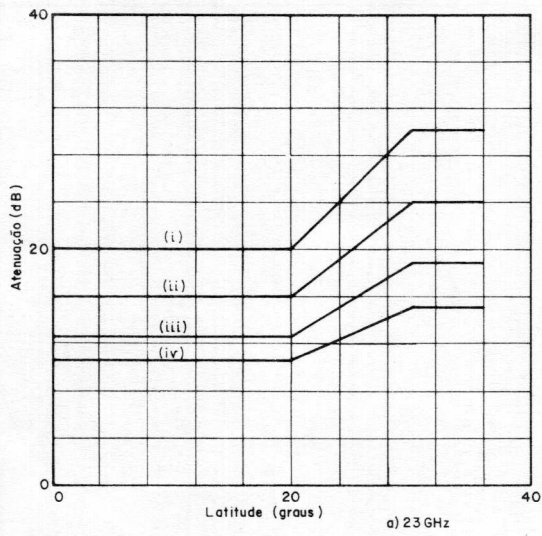


Fig. 2 - Trajeto terra-satélite



i - polarização horizontal ; $R_{0,01} = 145 \text{ mm/h}$
 ii - polarização vertical ; $R_{0,01} = 145 \text{ mm/h}$
 iii - polarização horizontal ; $R_{0,01} = 95 \text{ mm/h}$
 iv - polarização vertical ; $R_{0,01} = 95 \text{ mm/h}$
 $\theta = 30^\circ$

Fig. 3 - Atenuação por chuva

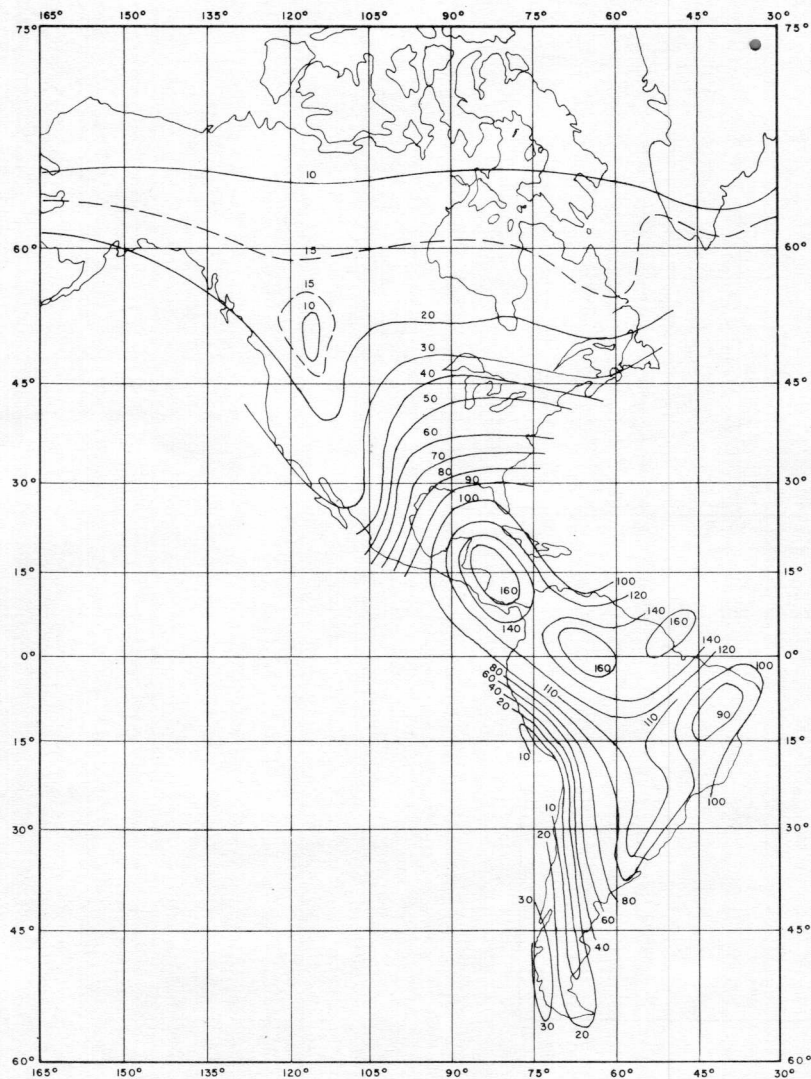


Fig. 4 - Contornos de $R_{0,01}$