

1. Publicação nº <i>INPE-2239-PRE/025</i>	2. Versão	3. Data <i>Out., 1981</i>	5. Distribuição <input type="checkbox"/> Interna <input checked="" type="checkbox"/> Externa <input type="checkbox"/> Restrita
4. Origem <i>DEE</i>	Programa <i>ETCOMS</i>		
6. Palavras chaves - selecionadas pelo(s) autor(es) <i>TELECOMUNICAÇÕES POR SATÉLITE ATENUAÇÃO POR CHUVAS</i>			
7. C.D.U.: <i>621.391</i>			
8. Título <i>INPE-2239-PRE/025</i> <i>ESTUDO DA DISPONIBILIDADE DE ENLACES DE TELECOMUNICAÇÕES POR SATÉLITE SUJEITOS A ATENUAÇÃO POR CHUVAS</i>		10. Páginas: <i>44</i>	
9. Autoria <i>Janio Kono</i> <i>Aydano Barreto Carleial</i>		11. Última página: <i>41</i>	
		12. Revisada por <i>Colla</i> <i>Naila Hoelz Colla</i>	
Assinatura responsável <i>Janio Kono</i>		13. Autorizada por <i>Parada</i> <i>Nelson de Jesus Parada</i> <i>Diretor</i>	
14. Resumo/Notas <i>Apresenta-se um modelo para enlaces de telecomunicações por satélite sujeitos a atenuação por chuvas, com equações parametrizadas que descrevem a densidade de probabilidade conjunta das atenuações nos lances terra-espaço e espaço-terra. O coeficiente de correlação entre as duas densidades marginais é um parâmetro livre na formulação apresentada. O cálculo da disponibilidade do enlace é feito por integração numérica da densidade conjunta na região do plano que corresponde a comunicações satisfatórias. O método é aplicado ao caso de uma rede de estações terrenas de pequena capacidade que se comunicam através de um satélite e fazem múltiplo acesso por divisão de frequências, com canal singelo por portadora (SCPC); e ao caso de um enlace no qual toda a faixa do transponder do satélite é ocupada por uma única portadora. Os resultados mostram que o valor do coeficiente de correlação pode ser importante no projeto de enlaces. Para um exemplo de sistema SCPC em 14/12 GHz, encontrou-se uma diferença de aproximadamente 2 dB entre os valores mínimos da relação portadora/ruído (C/N) disponível 99,8% do tempo, fazendo variar o coeficiente de correlação entre 0 e 1.</i>			
15. Observações <i>Apresentado na 33ª Reunião Anual da SBPC, em Salvador, Bahia de 08 a 15 de julho de 1981.</i>			

ABSTRACT

This report presents a model for satellite telecommunication links subject to attenuation by rain. The model has parameterized equations describing the joint probability density of the attenuations in the earth-to-space and space-to-earth paths. The correlation coefficient between the two marginal densities is a free parameter in the formulation given. Link availability is calculated by numerical integration of the joint density over the region of the plane that corresponds to satisfactory communications. The method is applied to the case of a network of low-capacity earth stations that communicate through a satellite using frequency-division multiple access with a single channel per carrier (SCPC); and to the case of a link where the entire bandwidth of the satellite transponder is occupied by a single carrier. The results show that the value of the correlation coefficient may be important in link design. For an SCPC system in 14/12 GHz taken as an example, a difference of approximately 2 dB was found between minimum values of available carrier-to-noise ratio (C/N) for 99.8% of the time when the correlation coefficient was varied between 0 and 1.

ÍNDICE

	<u>Pág.</u>
ABSTRACT	<i>iv</i>
LISTA DE FIGURAS	<i>v</i>
1. <u>INTRODUÇÃO</u>	1
2. <u>MÉTODO DE CÁLCULO DA DISPONIBILIDADE</u>	3
2.1 - Modelo de enlace de telecomunicações por satélite	3
2.2 - Distribuição de probabilidade da atenuação por chuvas ...	6
2.3 - Cálculo da disponibilidade	17
3. <u>RESULTADOS E CONCLUSÕES</u>	20
3.1 - Enlaces SCPC	21
3.2 - Enlaces com portadora única por transponder	31
3.3 - Comentários finais	32
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1 - Enlace de comunicações por satélite	2
2 - Modelo matemático simplificado de um enlace de comunicação por satélite	8
3 - Distribuição de probabilidade de taxas de precipitação	10
4 - Distribuição de probabilidade da atenuação por chuvas em Belém	13
5 - A região S	19
6 - Curvas C/N = constante do plano $a_1 \times a_2$, em enlace entre estações com características do tipo A	23
7 - Curvas de disponibilidade em função da relação C/N, para enlace entre estações do tipo A	24
8 - Curvas C/N = constante no plano $a_1 \times a_2$, em enlace entre estações com características do tipo B	25
9 - Curvas de disponibilidade em função da relação C/N, para enlace entre estações com características do tipo B	26
10 - Curvas C/N = constante no plano $a_1 \times a_2$, em enlace entre estações com características do tipo C	27
11 - Curvas de disponibilidade em função da relação C/N, para enlace entre estações com características do tipo C	28
12 - Curva de C/N = 4 dB no plano $R_1 \times R_2$, para estações do tipo A	30
13 - Curvas de C/N = 4 dB no plano $R_1 \times R_2$, para enlaces de ida e volta	31
14 - Curvas C/N = constante no plano $a_1 \times a_2$, para enlace entre estações com características do tipo D	34
15 - Curvas de disponibilidade em função da relação C/N, para enlace entre estações com características do tipo D	35
16 - Curvas C/N = constante no plano $a_1 \times a_2$, para enlace entre estações com características do tipo E	36
17 - Curvas de disponibilidade em função da relação C/N, para enlace entre estações com características do tipo E	37
18 - Curvas C/N = constante no plano $a_1 \times a_2$, para enlace entre estações com características do tipo F	38
19 - Curvas de disponibilidade em função da relação C/N, para enlace entre estações com características do tipo F	39

1. INTRODUÇÃO

Um enlace de telecomunicações por satélites pode ser representado simplifadamente pela Figura 1, que mostra a estação terrena transmissora, o satélite (que funciona como um repetidor ativo) e a estação terrena receptora.

Uma especificação importante em um sistema de telecomunicações por satélite é a disponibilidade, percentagem de tempo na qual se deseja que o sistema mantenha um dado desempenho mínimo. Esse tipo de especificação é necessário porque a intensidade do sinal que chega ao receptor em um enlace de telecomunicações varia aleatoriamente no tempo de acordo com as condições do meio de propagação. No projeto de um sistema, é necessário, então, prover uma margem para acomodar perdas que efetivamente ocorrem, além daquelas decorrentes da propagação no espaço livre. Essa margem, que é função da disponibilidade especificada, deve ser bem dimensionada, pois uma margem insuficiente leva o sistema a apresentar desempenho inadequado em uma percentagem de tempo maior que a especificada, enquanto uma margem excessiva encarece desnecessariamente o sistema.

Na maior parte da faixa de frequência prevista para utilização em telecomunicações por satélite, o efeito de propagação mais importante é a atenuação do sinal causada pelas chuvas. Essa atenuação é função da frequência utilizada e da taxa de precipitação nas vizinhaças dos pontos de transmissão e recepção. Abrange uma gama de valores bastante alta: por exemplo, na frequência de 14 GHz, com ângulo de elevação de 30° , o valor da atenuação por chuvas varia de zero dB (com céu limpo) a cerca de 15 dB (com chuva de 60 mm/h), atingindo valores ainda maiores com chuvas mais intensas. Considerando-se que cada 3 dB de aumento na margem para perdas de propagação corresponde a um aumento de 41% no diâmetro da antena da estação receptora (supondo-se que a sensibilidade do receptor e a potência transmitida pelo satélite são constantes), pode-se avaliar a importância de conhecimento da distribuição de probabilidade das atenuações nos lances de transmissão e recepção, no projeto de um sistema de telecomunicações por satélite.

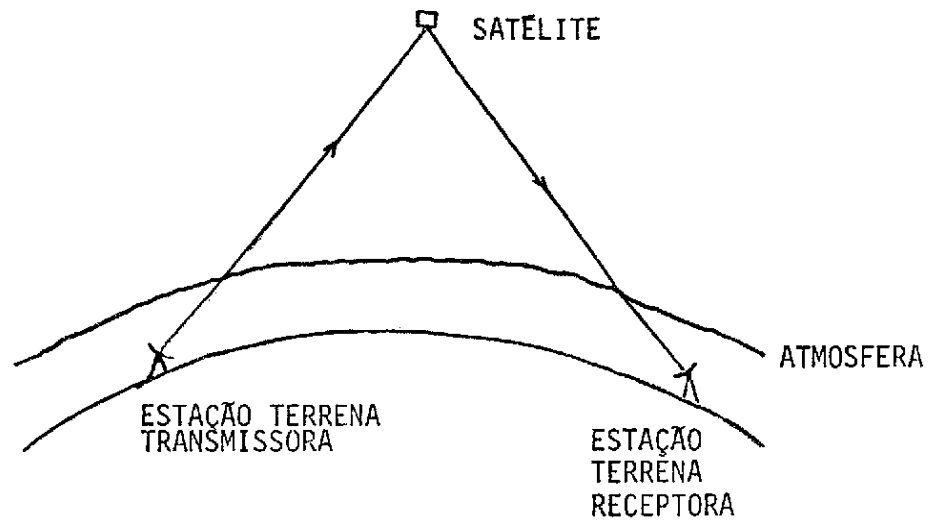


Fig. 1 - Enlace de telecomunicações por satélite

O método usualmente empregado para determinar a margem necessária a um enlace de telecomunicações por satélite é um método aproximado, onde se considera implicitamente que as atenuações nos lances de transmissão e recepção são fortemente correlacionadas. Bantin e Lyons (1978) calcularam a disponibilidade de uma forma diferente e bem mais rigorosa, incluindo no seu modelo probabilístico as perdas decorrentes dos erros de apontamento das antenas devidos ao vento e os efeitos da cintilação ionosférica e troposférica. Entretanto, Bantin e Lyons consideraram estatisticamente independentes as perdas associadas ao trajeto de subida (terra-satélite) e ao trajeto de descida (satélite-terra), o que é uma hipótese justificável quando os pontos de transmissão e recepção estão separados por uma distância suficientemente grande. Este era, até bem recentemente, o caso de todos os enlaces por satélite.

Neste trabalho calcula-se a disponibilidade utilizando-se uma função parametrizada, que descreve aproximadamente a densidade de probabilidade conjunta das atenuações nos lances de transmissão e recepção. Nessa função, o coeficiente de correlação entre as atenuações é um parâmetro livre, de modo que se podem obter e comparar os resultados dos métodos citados acima variando-se o coeficiente de correlação de 0 a 1. São obtidos resultados para os enlaces de um sistema de múltiplo acesso por divisão de frequência (FDMA) com canal singelo por portadora (SCPC), e de um sistema em que uma única portadora ocupa toda a faixa do repetidor.

2. MÉTODO DE CÁLCULO DA DISPONIBILIDADE

2.1 - MODELO DE ENLACE DE TELECOMUNICAÇÕES POR SATELITE

Nesta seção, apresenta-se um modelo de enlace aplicável aos satélites de comunicação atuais que utilizam frequências na faixa de 4 a 30 GHz e repetidor não-regenerativo com amplificador a válvula de ondas progressivas (TWT). Para o modelo considerado são apresentadas equações que fornecem a relação sinal/ruído (C/N) do enlace em função dos parâmetros.

Um repetidor de satélite é constituído basicamente de um misturador que translada a frequência do sinal de entrada e de um amplificador a TWT, que fornece a potência de saída necessária. O amplificador a TWT tem característica não-linear de potência, introduz desvio relativo de fase, e gera ruído de intermodulação quando várias portadoras são amplificadas simultaneamente. Na Figura 2 é apresentado o modelo de enlace para um canal, através do qual serão desenvolvidas equações para o cálculo da relação sinal/ruído (Carleial e Kono, 1978).

Por simplicidade, a translação de frequência foi omitida na Figura 2. Os símbolos têm as seguintes definições:

- P_t - potência de sinal da portadora considerada, entregue à antena da estação terrena transmissora.
- P_s - potência de sinal e ruído, na faixa de frequências da portadora considerada, entregue à antena transmissora do satélite.
- P_r - potência de sinal e ruído, na faixa de frequência da portadora considerada, captada pela antena da estação terrena receptora.
- L_u - perdas no lance de subida.
- L_d - perdas no lance de descida.
- H - ganho do amplificador não-linear.
- N_u - potência de ruído térmico do lance de subida.
- N_i - potência de ruído de intermodulação no satélite.
- N_d - potência de ruído térmico de lance de descida isolado, incluindo o ruído adicional causado pelo meio absorvente.

Nas definições acima, as potências referem-se sempre à faixa de frequências da portadora considerada no enlace, e as perdas L_u e L_d englobam perdas de propagação e perdas devidas a erros de apontamento das antenas.

Na Figura 2 os valores de N_i e H são funções do nível total de potência na entrada do repetidor. No caso de um sistema SCPC com

centenas de portadoras, as perdas que afetam isoladamente um enlace SCPC não alteram substancialmente a potência total à entrada do repetidor, de modo que para o enlace considerado o modelo é aproximadamente linear. Quando o sistema é constituído de uma só portadora que ocupa toda a faixa do repetidor, a potência de ruído de intermodulação (N_i) é nula, enquanto a potência total na entrada do repetidor e, conseqüentemente, o ganho do amplificador a TWT variam com as perdas no lance de subida (L_d).

Nas equações do modelo apresentadas a seguir, G indica ganhos de antenas, L indica perdas, λ indica comprimentos de onda, D indica distâncias da estação terrena ao satélite, T indica temperaturas de ruído; e os subscritos u , d , s e t referem-se, respectivamente, ao lance de subida, ao lance de descida, ao satélite e às estações terrenas.

A relação sinal/ruído do enlace é dada por

$$\frac{C}{N} = \frac{E_t G_{su}}{L_u \cdot k \cdot B} \left(\frac{\lambda_u}{4\pi D_u} \right)^2 \left[T_u + T_i + \frac{T_d L_d}{H G_{sd} G_{td}} \left(\frac{4\pi D_d}{\lambda_d} \right)^2 \right]^{-1} \quad (1)$$

onde k é a constante de Boltzmann; B é a largura de faixa do canal; e E_t é a potência efetiva isotropicamente irradiada (EIRP) da estação terrena transmissora.

A temperatura de ruído T_d é calculada através das expressões:

$$T_d = \frac{T_a}{L_g} + \frac{L_g - 1}{L_g} T_g + T_r \quad (2)$$

$$T_a = \frac{T_{cos}}{L_{atm}} + \frac{L_{atm} - 1}{L_{atm}} \cdot T_{atm} + T_{sol} \quad (3)$$

onde T_a é a temperatura de ruído da antena; L_g é o fator de atenuação por perdas no trajeto de microondas desde o alimentador da antena até a entrada do amplificador de baixo ruído (LNA); T_g é a temperatura física equivalente desse trajeto; T_r é a temperatura de ruído do receptor; T_{cos} é a temperatura de ruído de fontes cósmicas, L_{atm} (parcela de L_d) é o fator de atenuação pela atmosfera (incluído o efeito de chuvas); T_{atm} é a temperatura física média equivalente do meio atmosférico que causa a atenuação; T_{sol} é a contribuição em temperatura de ruído que vem do solo.

2.2 - DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE DA ATENUAÇÃO POR CHUVAS

Nesta seção apresenta-se uma função paramétrica que descreve aproximadamente a densidade de probabilidade conjunta das perdas nos lances de subida e descida.

As perdas L_u e L_d foram definidas como as existentes no trajeto entre a antena da estação terrena transmissora e a antena do satélite e entre esta última e a antena da estação terrena receptora, respectivamente. Tais perdas englobam perdas por erros de apontamento das antenas e perdas de propagação. Esta última parcela é discutida a seguir.

Existem vários efeitos que causam as perdas de propagação, os quais são mais ou menos significativos, dependendo das características do enlace considerado. Na maior parte da faixa de frequências atualmente utilizada ou com utilização prevista para telecomunicações por satélite, os efeitos mais significativos são a atenuação do sinal causada pela atmosfera e a atenuação causada pelas chuvas. Apenas em frequências abaixo de 3 GHz, o efeito da ionosfera torna-se importante, enquanto em frequências acima de 40 GHz é necessário considerar também a cintilação troposférica (Crane, 1977; Pares e Toscer, 1975).

A atenuação causada pela atmosfera sem chuvas depende da frequência utilizada e do ângulo de elevação da estação terrena, e não

estã sujeita a grandes variações no tempo. Já a atenuação causada por chuvas abrange uma larga gama de variação. Sua distribuição de probabilidades pode ser obtida com boa aproximação a partir da distribuição de probabilidades da taxa de precipitação da chuva nas vizinhanças da estação terrena.

A análise de muitos conjuntos de dados de taxa de precipitação e de atenuação por chuvas mostrou que, para um dado lugar, as distribuições a longo prazo da taxa de precipitação e da atenuação por chuvas são aproximadamente log-normais (Lin, 1973, Lin, 1975; Lin et alii, 1980). A equação que descreve a distribuição log-normal da taxa de precipitação é

$$P(R \geq r) = \frac{P_0}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{\ln r - \ln M_r}{\sqrt{2} S_r} \right] \quad (4)$$

para $0 < r < \infty$ e $P_0 = 1 - P(R = 0)$

Na Equação 4 tem-se:

M_r - valor mediano de R, durante ocorrência de chuva.

S_r - desvio padrão de $\ln R$, durante ocorrência de chuva.

P_0 - probabilidade de ocorrência de chuva.

$$\operatorname{erfc}(x) = -\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt, \text{ função erro complementar.}$$

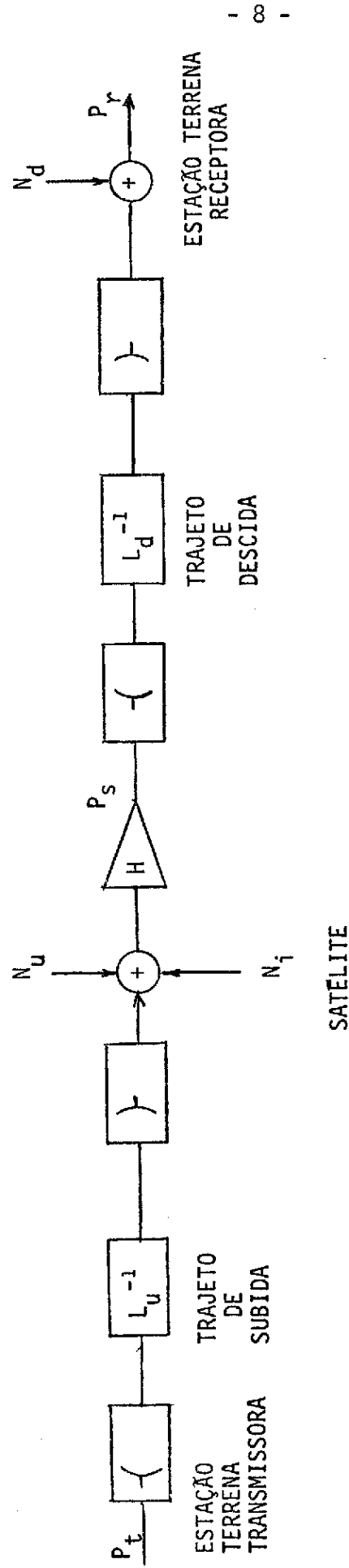


Fig. 2 - Modelo matemático simplificado de um enlace de comunicação por satélite

Analisando-se dados estatísticos disponíveis de taxa de precipitação de duas cidades brasileiras (Rio de Janeiro e Belém), situadas em regiões de clima tropical e equatorial (Assis e Salles, 1971) verificou-se que as distribuições de taxa de precipitação são, de fato, aproximadamente log-normais. A Figura 3 mostra, para as duas cidades, pontos das distribuições medidas experimentalmente e as aproximações log-normais. Os valores de P_0 , M_r e S_r para as duas cidades são os seguintes:

	P_0	M_r	S_r
Belém	0.044	3.3	1.23
Rio de Janeiro	0.042	2.1	1.23

Todos os dados de taxa de precipitação coletados se referem a valores médios em intervalos de 5 minutos. O intervalo de tempo de integração do pluviômetro é um dado importante porque as taxas de precipitação altas ocorrem em espaços de tempo curtos, de modo que um intervalo de tempo de integração grande tende a suavizar os picos de taxas de precipitação.

A distribuição de probabilidade da atenuação por chuvas em um lance pode ser obtida através das seguintes relações:

$$\bar{A} = \alpha R^\beta \quad (6)$$

onde \bar{A} é a atenuação específica (dB/km) e α , β são constantes positivas que dependem da frequência do sinal, e

$$A = \bar{A} \cdot \ell \quad (7)$$

onde A é a atenuação por chuvas num lance e ℓ é o comprimento do trajeto sujeito a chuvas.

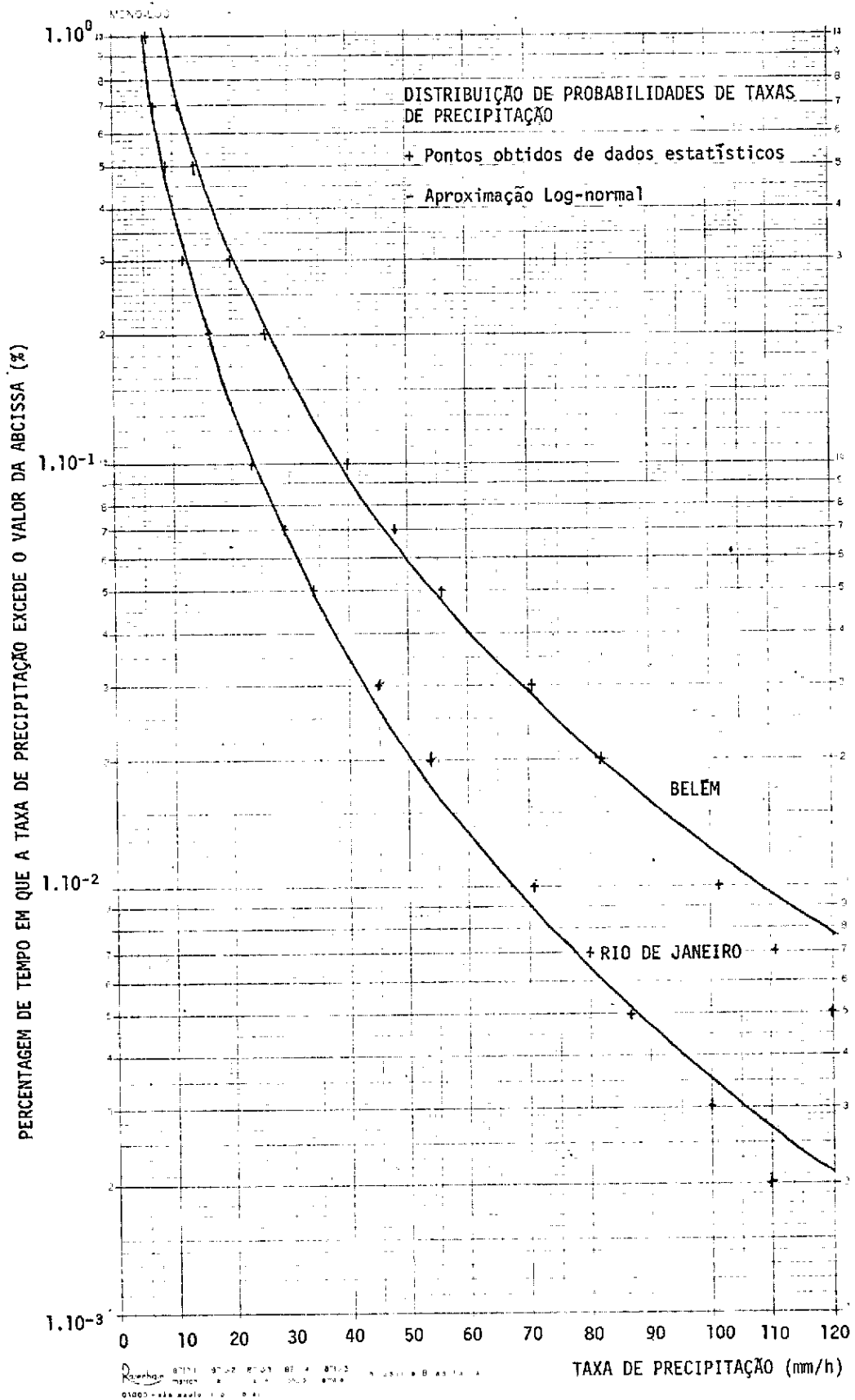


Fig. 3 - Distribuição de probabilidade de taxas de precipitação

A distribuição de A também é log-normal e é dada por

$$f_A(a) = (1 - P_0) \delta(a) + \frac{P_0}{\sqrt{2\pi} S_a a} e^{-\frac{1}{2S_a^2} [\ln a - \ln M_a]^2} \quad (8)$$

onde

$$M_a = \alpha M_r^\beta$$

e

$$S_a = \beta S_r.$$

A Figura 4 mostra as distribuições de atenuações por chuva para as frequências de 12 e 14 GHz em Belém, considerando-se o comprimento do trajeto sujeito a chuva (para ângulo de elevação da antena da estação terrena de 30^0) igual a 4.5 km (CCIR, 1974).

A Equação 8 dá a função densidade de probabilidade marginal da atenuação por chuva no lance de subida ou descida; isto, porém, não é suficiente para o cálculo da disponibilidade. É necessária, para o cálculo, a função densidade de probabilidade conjunta das atenuações nos lances de subida e descida. Se as atenuações nos dois lances são independentes, a função densidade de probabilidade conjunta é o produto das funções densidade de probabilidade marginais. Entretanto, a hipótese de independência não pode ser feita a priori se os pontos de transmissão e recepção estão separados por distâncias pequenas.

Dados dois locais, que serão indicados pelos índices 1 e 2, nos quais a probabilidade de ocorrência de chuvas é P_1 e P_2 , podem-se definir as seguintes probabilidades:

P_{00} - probabilidade de não chover em 1 e 2;

P_{10} - probabilidade de chover em 1 e não chover em 2;

P_{01} - probabilidade de não chover em 1 e chover em 2;

P_{11} - probabilidade de chover em 1 e 2;

As probabilidades acima estão relacionadas entre si da seguinte forma:

$$\begin{aligned} P_{00} + P_{10} + P_{01} + P_{11} &= 1 \\ P_{10} + P_{11} &= P_1 \\ P_{01} + P_{11} &= P_2 \end{aligned} \quad (9)$$

Sejam x_1 e x_2 variáveis aleatórias indicadoras de ocorrência de chuvas, definidas por

$x_i = 0$ se não chover em i , $i = 1, 2$

$x_i = 1$ se chover em i , $i = 1, 2$.

O coeficiente de correlação entre x_1 e x_2 é (Papoulis, 1965):

$$r_1 = \frac{E[(x_1 - \bar{x}_1)(x_2 - \bar{x}_2)]}{\sqrt{E[(x_1 - \bar{x}_1)^2] E[(x_2 - \bar{x}_2)^2]}} = \frac{P_{11} - P_1 \cdot P_2}{\sqrt{P_1(1-P_1)P_2(1-P_2)}} \quad (10)$$

onde \bar{x}_1 e \bar{x}_2 são os valores médios de x_1 e x_2 , respectivamente.

Para determinar os limites de variações de r_1 , pode-se supor, sem perda de generalidade, que $P_1 \leq P_2$. Então conclui-se que

$$r_1 \leq \sqrt{\frac{P_1(1-P_2)}{P_2(1-P_1)}} \leq 1. \quad (11)$$

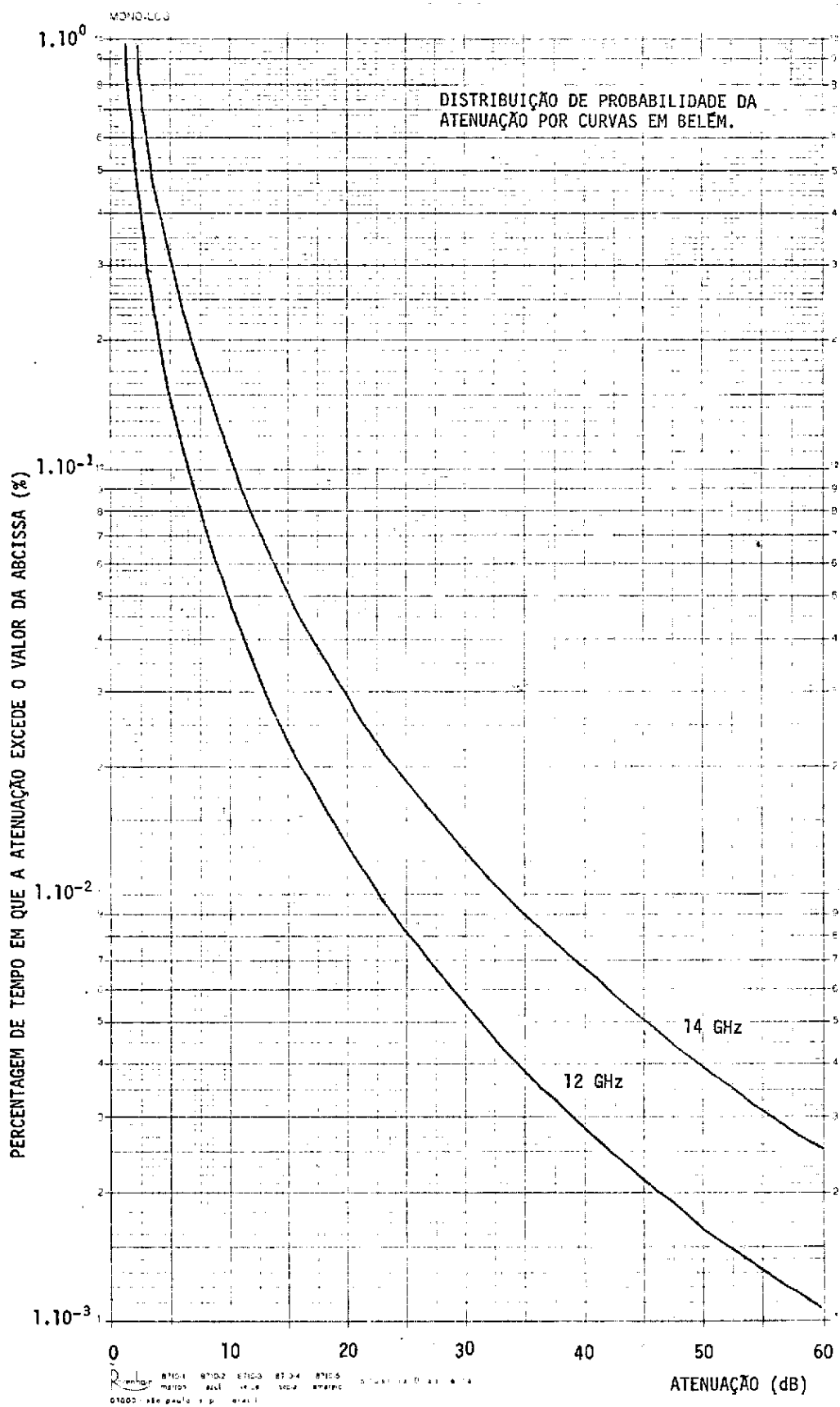


Fig. 4 - Distribuição de probabilidade da atenuação por chuvas em Belém

Na prática devem ser muito raros, se existirem, os pares de localidades com correlação negativa para a ocorrência de chuvas. Por isto nos exemplos de cálculo apresentados na Seção 4 considera-se

$$r_1 \geq 0.$$

Agora, denominando-se x a taxa de precipitação no local 1 e y a taxa de precipitação no local 2, a função densidade de probabilidade conjunta de x e y pode ser escrita como

$$f(x,y) = p_{00} \delta(x) \delta(y) + p_{10} \delta(y) \phi_1(x) + p_{01} \delta(x) \phi_2(y) + p_{11} \phi_3(x, y, r_2) \quad (12)$$

onde

$$\phi_1(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} S_x} \exp \left[-\frac{\ln^2(x/M_x)}{2 S_x^2} \right] \quad (13)$$

$$\phi_2(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} S_y} \exp \left[-\frac{\ln^2(y/M_y)}{2 S_y^2} \right] \quad (14)$$

$$\phi_3(x,y,r_2) = \frac{1}{2\pi S_x S_y \sqrt{1-r_2^2}} \exp \left\{ -\frac{1}{2(1-r_2^2)} \left[\frac{\ln^2(x/M_x)}{S_x^2} - 2r_2 \frac{\ln(x/M_x)\ln(y/M_y)}{S_x S_y} + \frac{\ln^2(y/M_y)}{S_y^2} \right] \right\}. \quad (15)$$

Nas Equações 13, 14 e 15, M_x , M_y são os valores medianos de x e y , enquanto S_x e S_y são os desvios padrões de $\ln x$ e $\ln y$, respectivamente, durante a ocorrência de chuvas.

Na equação 2 foi introduzido um novo coeficiente de correlação, r_2 , que é a correlação entre os valores das taxas de precipitação, supondo-se que chove simultaneamente nos dois pontos. A consideração dessa correlação parece ser razoável porque entre dois pontos bem próximos um do outro, além da correlação associada aos eventos de ocorrência ou não-ocorrência de chuvas, cujo valor deverá ser próximo da unidade, deve existir também uma correlação positiva entre os próprios valores de taxas de precipitação. Intuitivamente pode-se conjecturar que com o aumento da distância entre os dois pontos, r_2 deve cair para zero mais rapidamente do que r_1 .

A função $f(x, y)$ é não negativa e pode-se mostrar que sua integral no primeiro quadrante vale 1. As suas densidades marginais

$$f_x(x) = \int_0^{\infty} f(x,y) dy = (1 - P_1) \delta(x) + P_1 \phi_1(x) \quad (16)$$

$$f_y(y) = \int_0^{\infty} f(x,y) dx = (1 - P_2) \delta(y) + P_2 \phi_2(y) \quad (17)$$

são log-normais.

Verifica-se ainda que, se $r_1 = r_2 = 0$, $f(x, y) = f(x) f(y)$, ou seja x e y são independentes; se $r_1 = r_2 = 1$ (possível somente se $P_1 = P_2$), a densidade conjunta toma uma forma impulsiva no plano, sendo $f(x, y) = 0$ para todo par (x, y) que não esteja na linha descrita por

$$\frac{\ln(x/M_x)}{S_x} = \frac{\ln(y/M_y)}{S_y} . \quad (18)$$

A função densidade de probabilidade conjunta das atenuações a_1 e a_2 é obtida a partir de $f(x, y)$ utilizando-se as Relações 6 e 7. Sendo

$$a_1 = \ell_1 \alpha_1 x^{\beta_1} \quad (19)$$

$$a_2 = \ell_2 \alpha_2 y^{\beta_2} \quad (20)$$

onde se recorda que α_i e β_i são parâmetros que dependem das frequências utilizadas, e ℓ_i são os comprimentos dos trajetos com chuva para $i=1,2$, obtêm-se a densidade conjunta

$$f(a_1, a_2) = p_{00} \delta(a_1) \delta(a_2) + p_{10} \delta(a_2) \phi_1(a_1) + p_{01} \delta(a_1) \phi_2(a_2) + p_{11} \phi(a_1, a_2, r_2), \quad (21)$$

onde

$$\phi_1(a_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} S_1 a_1} \exp(-A_1^2/2) \quad (22)$$

$$\phi_2(a_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} S_2 a_2} \exp(-A_2^2/2) \quad (23)$$

$$\phi_3(a_1, a_2, r_2) = \frac{1}{2\pi S_1 S_2 a_1 a_2 \sqrt{1-r_2^2}} \exp \left[-\frac{1}{2(1-r_2^2)} (A_1^2 - 2 r_2 A_1 A_2 + A_2^2) \right] \quad (24)$$

$$M_1 = \ell_1 \alpha_1 M_x^{\beta_1} \quad M_2 = \ell_2 \alpha_2 M_y \quad (25)$$

$$S_1 = \beta_1 S_x \quad S_2 = \beta_2 S_y \quad (26)$$

$$A_1 = \ln(a_1/M_1)/S_1 \quad A_2 = \ln(a_2/M_2)/S_2 \quad (27)$$

2.3 - CÁLCULO DA DISPONIBILIDADE

O método simples comumente utilizado no cálculo de enlaces de telecomunicações por satélite envolve apenas as distribuições de probabilidade marginais das atenuações. Para uma disponibilidade previamente especificada determinam-se, nas duas distribuições marginais, os mínimos valores de atenuação que não são excedidos durante a percentagem de tempo de interesse. Calcula-se, em seguida, a relação sinal/ruído, aplicando esses valores na Equação do enlace (1). Este método simples corresponde a considerar a correlação entre as duas atenuações igual à unidade, no caso em que a probabilidade de ocorrência de chuvas é a mesma nos pontos de transmissão e de recepção ($P_1 = P_2$). Quando $P_1 \neq P_2$, pode-se ainda dizer que o método supõe implicitamente uma correlação forte entre as duas atenuações. A principal vantagem deste método aproximado é a determinação simples e direta dos parâmetros do sistema a partir da disponibilidade especificada.

Um método de cálculo mais rigoroso foi sugerido por Lyons (1974), que obteve uma expressão para a densidade de probabilidade da relação sinal/ruído a partir de uma equação semelhante à Equação 1. A expressão obtida é resolvida numericamente, com auxílio de computador. Bantin e Lyons (1978) usaram esse método para obter a distribuição de probabilidade da atenuação adicional, ou seja, aquela que ocorre no enlace além da atenuação mínima encontrada em condições ideais. Bantin e Lyons consideraram como causas de atenuação adicional (aleatória), além da chuva, as cintilações troposférica e ionosférica e os erros de apontamento das antenas causadas pelo vento. Entretanto, consideraram independentes as parcelas de atenuação devidas a chuvas nos lances de subida e descida, bem como as demais.

No presente trabalho, verificou-se também a impossibilidade de resolver o problema do cálculo da disponibilidade de forma inteiramente analítica. No novo método de cálculo, descrito a seguir, faz-se numericamente a integração da densidade de probabilidade conjunta das atenuações.

Sendo a_1 e a_2 os valores (expressos em dB) das atenuações por chuva nos lances de subida e de descida, respectivamente, o método consiste em determinar para a relação sinal/ruído de interesse, $(C/N)_0$, a região S do plano $a_1 \times a_2$ onde C/N excede $(C/N)_0$, e calcular a integral de $f(a_1, a_2)$ nessa região. Constata-se facilmente pela relação entre C/N e as atenuações (Equação 1) que S é uma região simplesmente conexa do primeiro quadrante do plano, a qual contém a origem e é contígua aos eixos coordenados (Figura 5). A fronteira de S é a linha obtida com $C/N = (C/N)_0$ na Equação 1.

A disponibilidade é dada então por

$$P_d = \int \int_S f(a_1, a_2) da_1 da_2 \quad (28)$$

Substituindo-se na Expressão 28, $f(a_1, a_2)$ pela sua Expressão 21, tem-se

$$P_d = p_{11} \int \int_S \delta(a_1) \delta(a_2) da_1 da_2 + p_{10} \int \int_S \delta(a_1) \phi_1(a_1) da_1 da_2 + \\ + p_{01} \int \int_S \delta(a_1) \phi_2(a_2) da_1 da_2 + p_{11} \int \int_S \phi_3(a_1, a_2, r_2) da_1 da_2 \quad (29)$$

donde vem, se a região S existir,

$$P_d = p_{00} + p_{10} \int_0^{a_{10}} \phi_1(a_1) da_1 + p_{01} \int_0^{a_{20}} \phi_2(a_2) da_2 + \\ + p_{11} \int \int_S \phi_3(a_1, a_2, r_2) da_1 da_2 \quad (30)$$

As integrais simples da Expressão 30 são calculadas pela sub-rotina SIMINT, e a integral dupla da última parcela é calculada pela sub-rotina DBLINT, ambas disponíveis no computador Burroughs B-6800 do INPE.

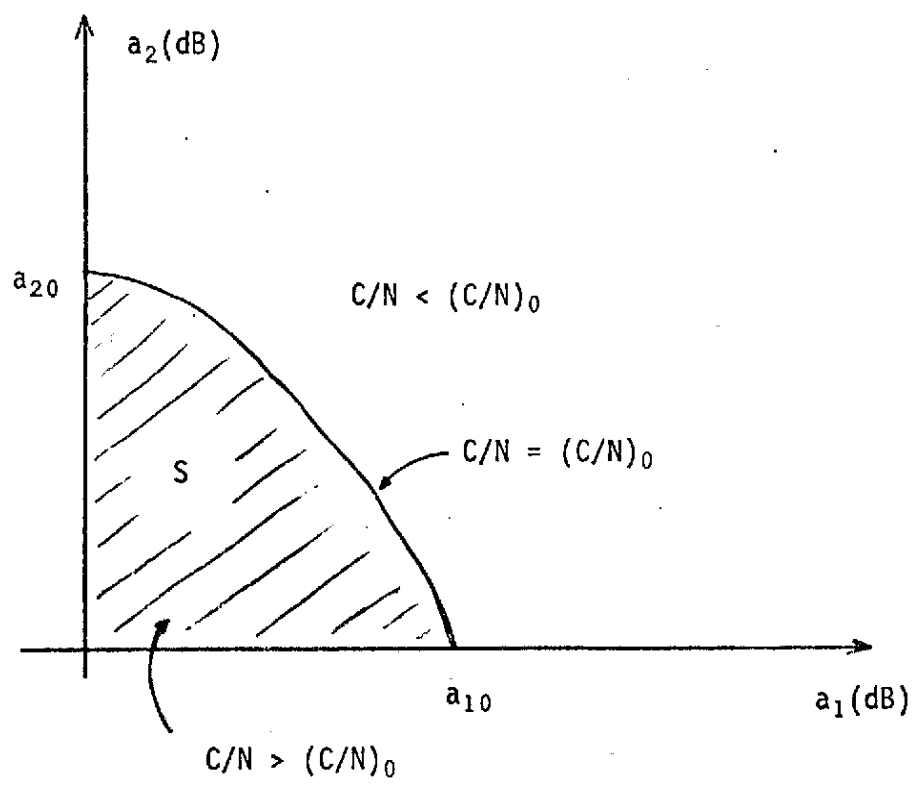


Fig. 5 - A região S

3. RESULTADOS E CONCLUSÕES

São apresentados nesta seção resultados do cálculo da disponibilidade de alguns enlaces, tomados como exemplos, usando-se o método introduzido na Seção 2. As características hipotéticas do satélite (segmento espacial) utilizadas nos cálculos estão listadas na Tabela 1.

TABELA 1

CARACTERÍSTICAS DO SATÉLITE

Frequências	14/12 GHz
Longitude aproximada	70 ^o Oeste
Ganho da antena transmissora (1)	29 dB
EIRP (1), (2)	49 dBW
Densidade de fluxo necessária à saturação (1), (2), (3)	-84 dBW/m ²
Ganho da antena receptora	30 dB
Relação ganho/temperatura de ruído térmico (1), (2)	- 2 dB/K
Largura de faixa do repetidor	36 MHz

Notas:

- (1) Valor correspondente ao centro do feixe de radiação.
- (2) Repetidor saturado por portadora única.
- (3) Valor nominal, ajustável quando da otimização de enlaces.

3.1 - ENLACES SCPC

Os primeiros exemplos a serem apresentados referem-se a enlances entre duas estações terrenas de um sistema de múltiplo acesso por divisão de frequências (FDMA) com canal singelo por portadora (SCPC). O sistema considerado tem 800 canais, com portadoras ativadas pela voz e separação de 45 kHz entre portadoras adjacentes, ocupando assim um transponder do satélite, cuja largura útil é 36 MHz nas faixas de 14 e 12 GHz. A largura de faixa útil para cada canal SCPC, bem como a largura de faixa equivalente de ruído branco que o afeta, é de 38 kHz. Todas as estações terrenas do sistema têm antenas idênticas, utilizam receptores com a mesma temperatura de ruído e transmitem a mesma potência por canal SCPC. Entretanto, foram consideradas, para os cálculos, três hipóteses diferentes para o conjunto dessas características, a saber:

- A - antena com diâmetro de 2,4 m;
transmissor com potência de 1 W por canal;
receptor com temperatura de ruído de 300 K.

- B - antena com diâmetro de 3,0 m;
transmissor com potência de 1 W por canal;
receptor com temperatura de ruído de 300 K.

- C - antena com diâmetro de 2,4 m;
transmissor com potência de 2 W por canal;
receptor com temperatura de ruído de 300 K.

Os cálculos foram feitos para a situação de plena carga, quando estão em uso todos os 800 canais, mas com um fator de atividade de 0,5, de modo que apenas 400 portadoras são transmitidas simultaneamente pelo transponder. Com respeito ao ponto de operação do transponder, esta situação é a pior possível, pois o recuo ("back off") de entrada é mínimo e, conseqüentemente, T_i é máximo e H é mínimo na Equação 1. Outra hipótese pessimista feita nos cálculos é a de que as duas estações terrenas envolvidas no enlace considerado estão no contorno extremo da área servida pelo satélite.

A suposição implícita de que o ponto de operação do transponder é fixo e independente da ocorrência de chuvas nos locais de duas estações que participam do enlace pode parecer contraditória, uma vez que se estuda aqui justamente o efeito de correlações entre precipitações em locais diferentes: uma correlação alta entre as ocorrências e intensidades das chuvas sobre toda a área servida pelo satélite levaria a flutuações não desprezíveis no ponto de operação, pois as chuvas atenuariam simultaneamente grande número de portadoras SCPC transmitidas para o satélite. Entretanto, é bastante difícil levar em conta uma variação estatística do recuo do transponder em função da ocorrência de precipitações nos dois pontos extremos do enlace, pois isto exigiria incorporar ao modelo hipóteses adicionais sobre a distribuição espacial das chuvas e a localização geográfica de todas as estações terrenas sobre a área de serviço. Considerar o ponto de operação fixo justifica-se por ser reconhecidamente pequena a correlação das chuvas que incidem sobre pontos muito separados ou áreas extensas e, também, porque fazendo-se o cálculo nas condições de "céu limpo" (ausência de chuvas em toda a área, exceto nos extremos do enlace), está-se fazendo a hipótese mais pessimista.

A Figura 6 mostra, para o caso da rede composta de estações do tipo A, curvas de C/N constante no plano $a_1 \times a_2$, que delimitam as regiões de integração para o cálculo de disponibilidade referida a esses valores de relação C/N. Na Figura 7 apresenta-se, para o mesmo caso, duas curvas de disponibilidade em função da relação C/N para um enlace entre duas localidades hipotéticas, ambas com regime de chuvas igual ao de Belém. Uma das curvas aplica-se ao caso de correlação nula entre chuvas nos lances de subida e descida ($r_1 = r_2 = 0$). A outra curva corresponde ao caso de forte correlação positiva entre as precipitações ($r_1 = 1$, $r_2 = 0.95$).

As Figuras 8 e 9 correspondem respectivamente, às Figuras 6 e 7, para o caso de rede composta de estações do tipo B. As Figuras 10 e 11 correspondem, respectivamente, às Figuras 6 e 7, para o caso de rede composta por estações terrenas do tipo C.

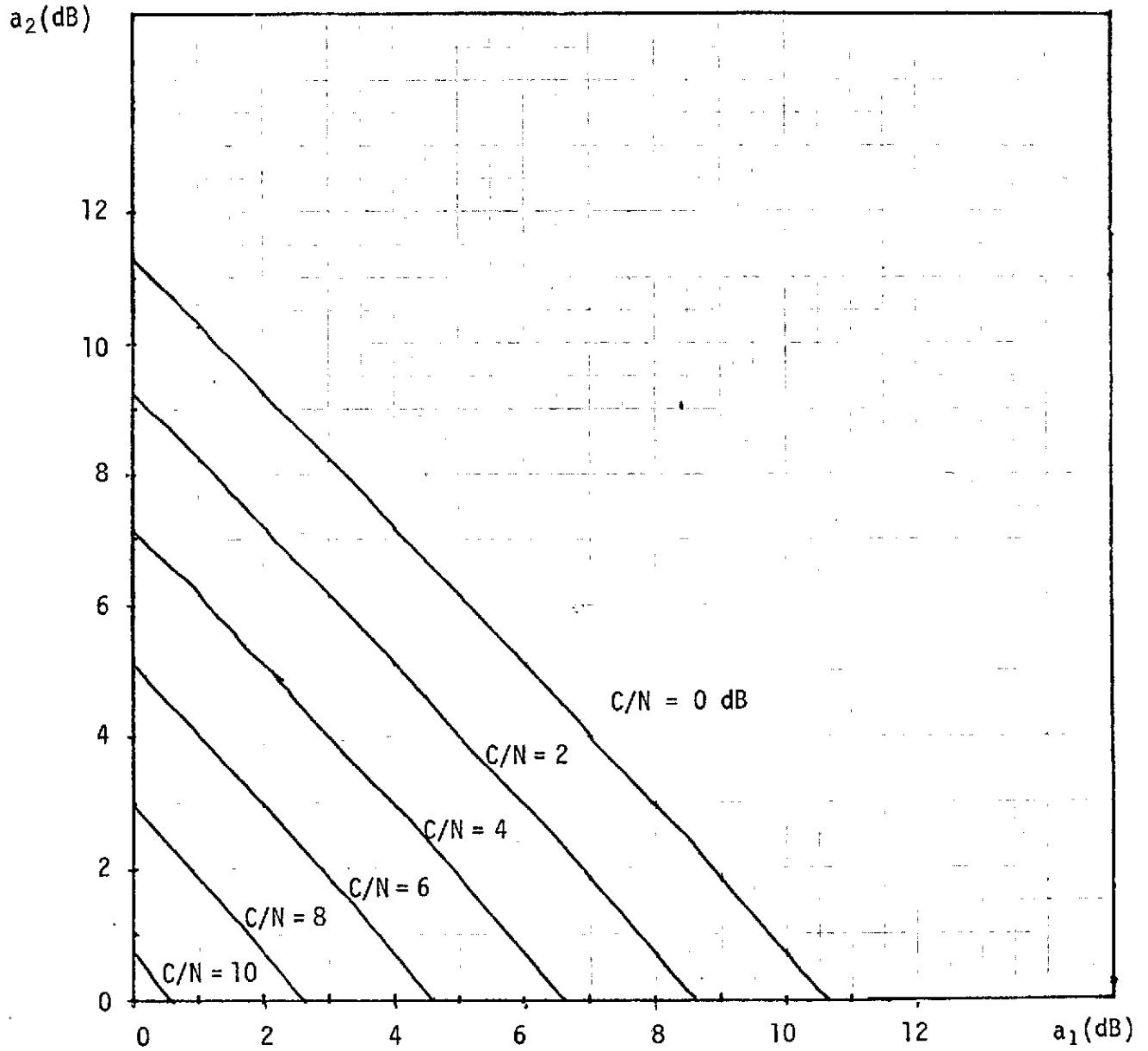


Fig. 6 - Curvas $C/N =$ constante no plano $a_1 \times a_2$, em enlace entre estações com características do tipo A

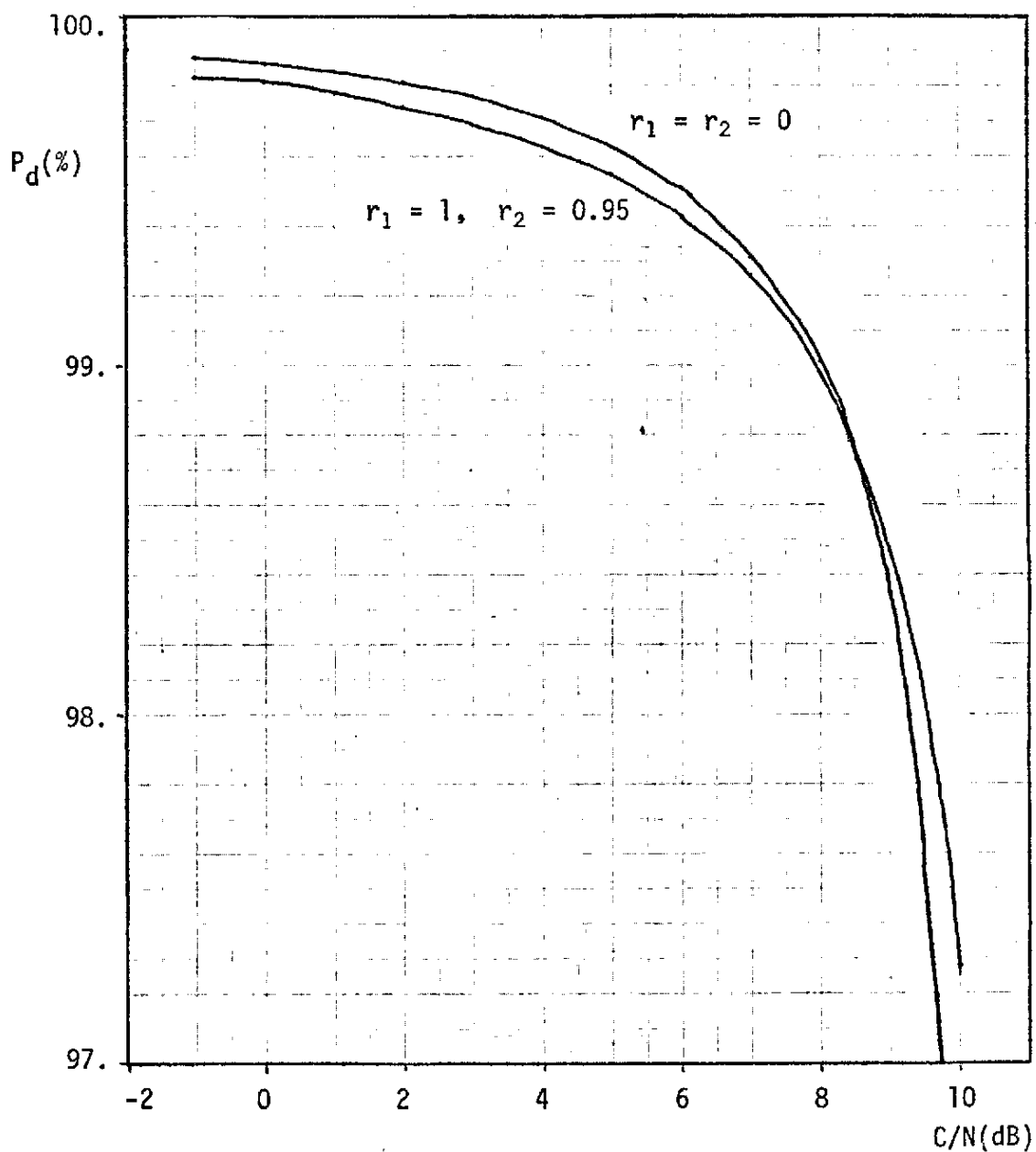


Fig. 7 - Curvas de disponibilidade em função da relação C/N , para enlace entre estações do tipo A

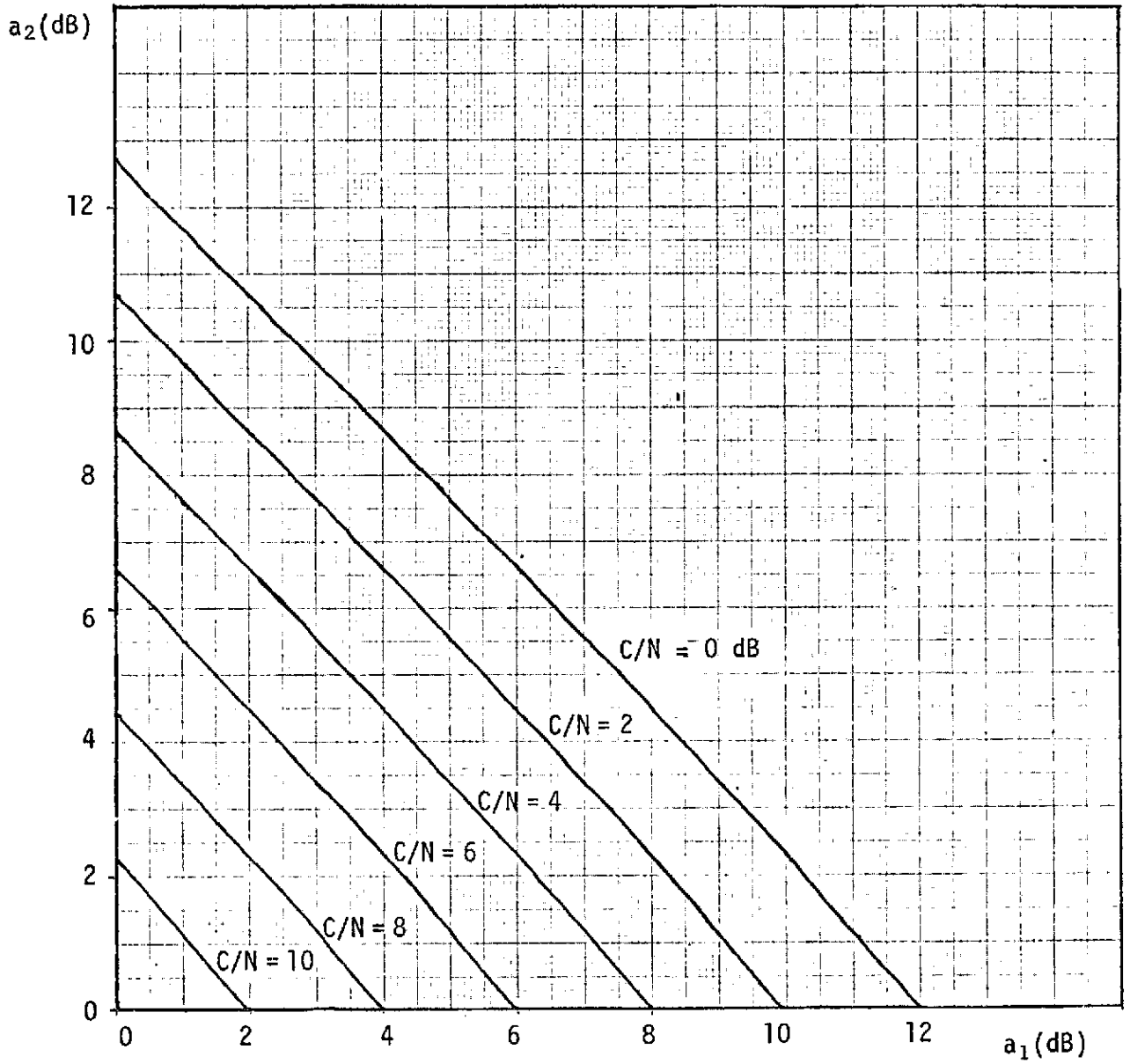


Fig. 8 - Curvas $C/N =$ constante no plano $a_1 \times a_2$, em enlace entre estações com características do tipo B

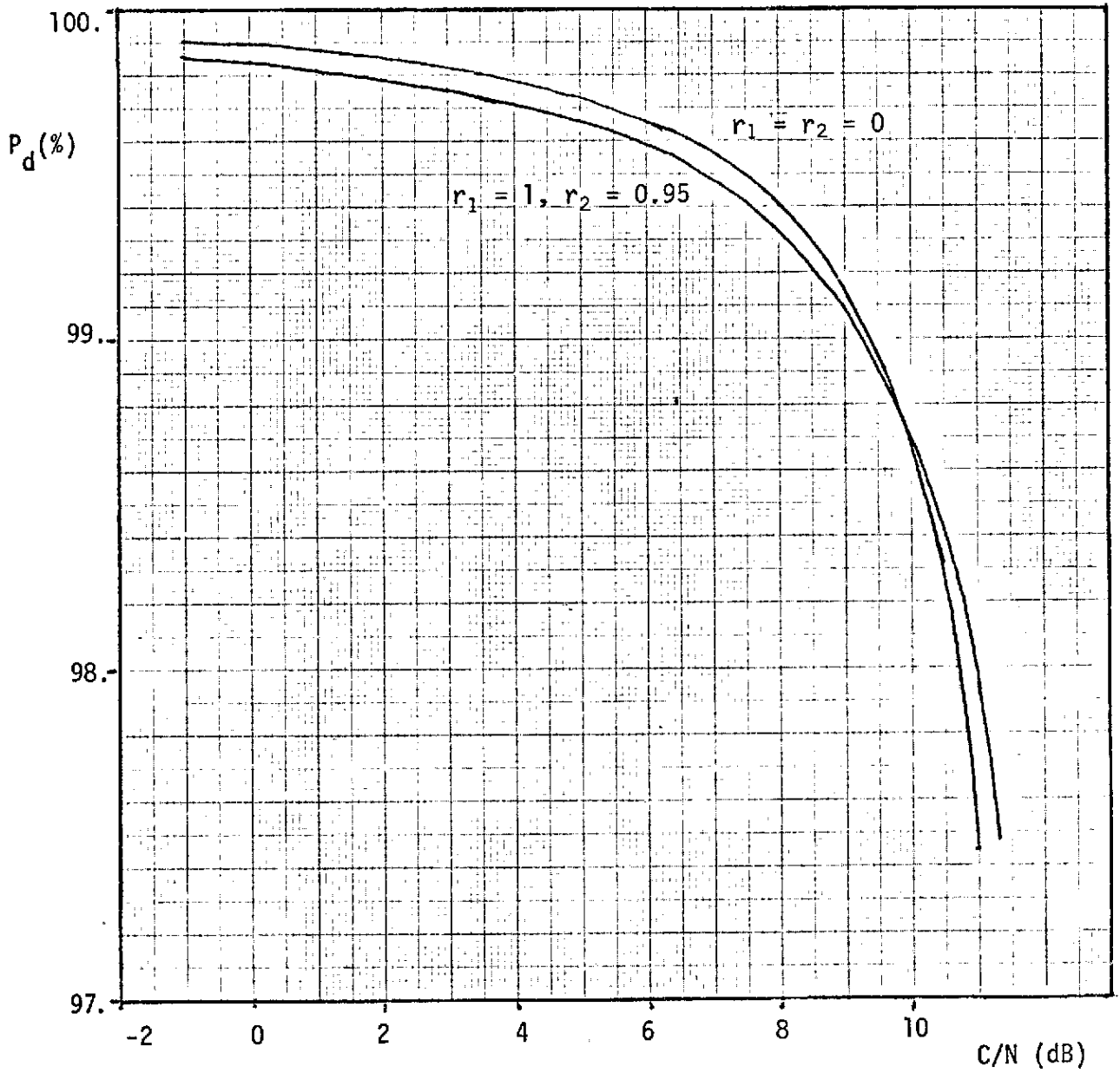


Fig. 9 - Curvas de disponibilidade em função da relação C/N, para enlace entre estações com características do tipo B

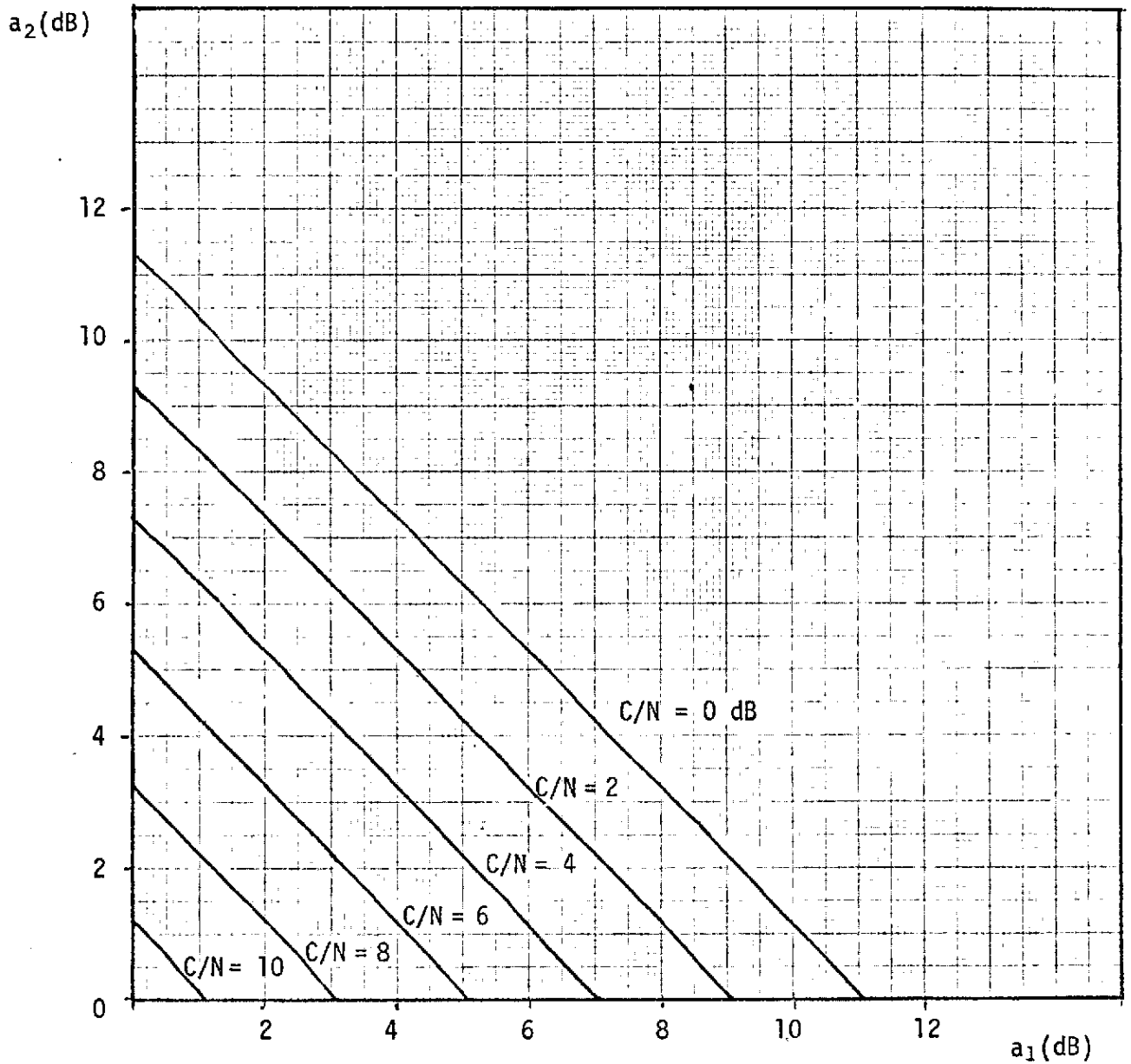


Fig. 10 - Curvas $C/N =$ constante no plano $a_1 \times a_2$, em enlace entre estações com características do tipo C

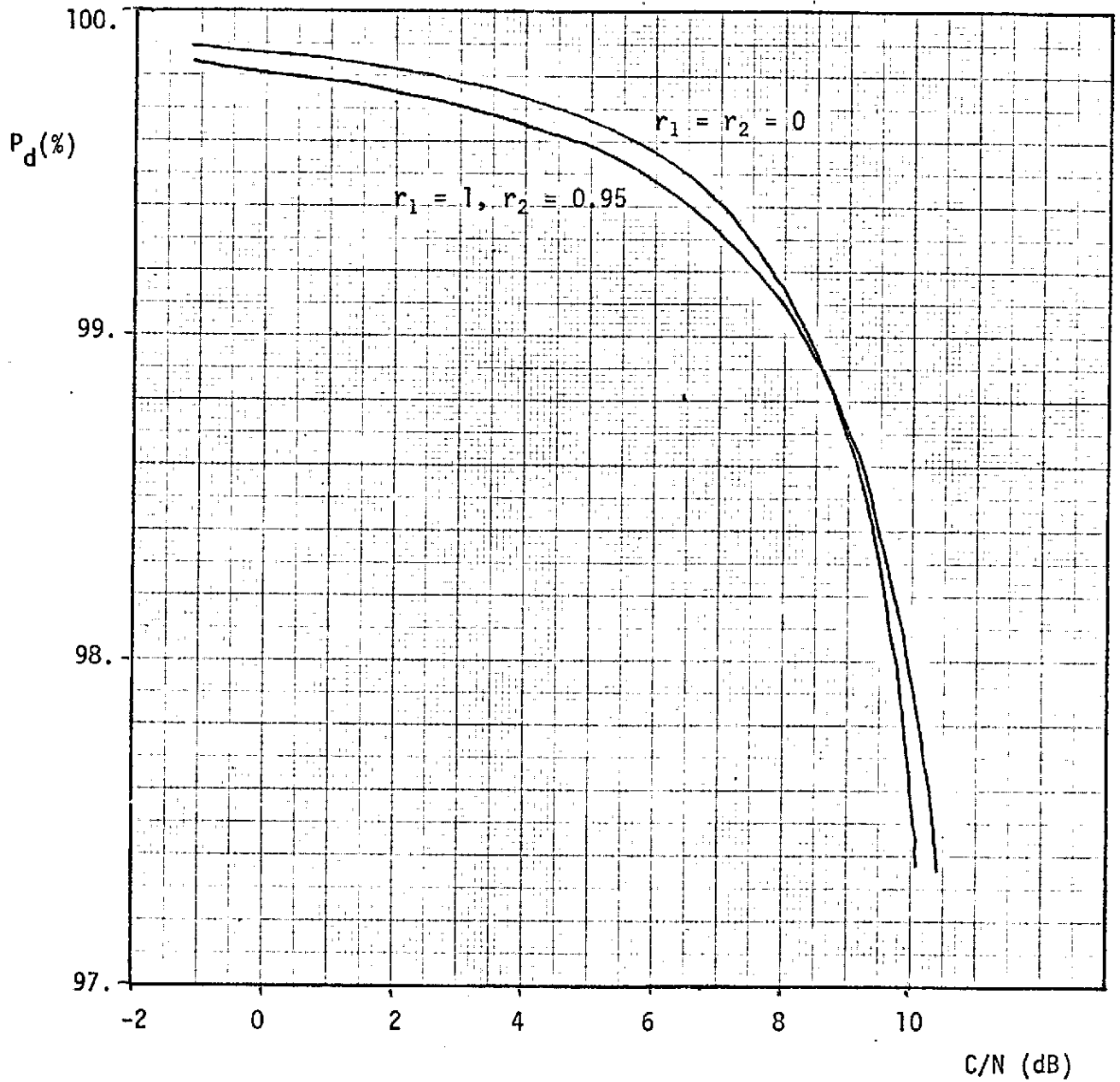


Fig. 11 - Curvas de disponibilidade em função da relação C/N , para enlace entre estações com características do tipo C

Observando-se as figuras referentes aos três casos, podem-se notar alguns fatos interessantes. Nas Figuras 6, 8 e 10, nota-se que as linhas que delimitam as regiões S no plano $a_1 \times a_2$ são aproximadamente retas. Nas Figuras 7, 9 e 11, nota-se que a diferença existente entre a curva de correlação nula e a de forte correlação torna-se importante quando a disponibilidade exigida é elevada. Na Figura 7, por exemplo, para a disponibilidade de 99.8% há uma diferença de aproximadamente 2 dB entre os valores de C/N que são superados nessa percentagem de tempo. Outra maneira de notar a diferença entre os resultados é comparar os tempos em que o sistema fica indisponível. Para C/N = -1 dB, a percentagem de tempo indisponível é de 0,12% no caso não correlacionado, e de 0,17% no caso de forte correlação; existe, portanto, uma diferença de quase 50%.

Outro fato interessante é o cruzamento das curvas nas Figuras 7, 9 e 11. Isto pode ser explicado intuitivamente lembrando que, enquanto no caso de forte correlação as chuvas ocorrem simultaneamente nos pontos de transmissão e recepção, no caso de correlação nula a ocorrência de chuvas simultâneas é rara, porque a probabilidade marginal de ocorrência de chuvas é pequena. Ora, quando se exige alta disponibilidade a margem do enlace é grande, de sorte que essa margem raramente é excedida sem que haja chuvas suficientemente intensas e simultâneas nas estações transmissora e receptora. Por outro lado, quando a disponibilidade exigida é moderada, a margem do enlace é pequena, mais facilmente superável com a ocorrência de chuva em qualquer um dos lances (ou em ambos). Este último evento ocupa maior fração do tempo no caso de correlação nula.

Em sistemas de comunicação bidirecional de voz, é interessante calcular a disponibilidade do circuito completo, constituído de um enlace de ida e outro de volta. A percentagem do tempo em que o circuito fica indisponível é limitada superiormente pela soma das percentagens de tempo de indisponibilidade dos dois enlaces, e inferiormente pela maior dessas percentagens. Entretanto, é de se esperar que o limite inferior esteja mais próximo da realidade, uma vez que os dois enlaces tendem a ficar indisponíveis simultaneamente. Faz-se aqui o estudo de um caso particular para ilustrar o problema.

Usando-se as Equações 19 e 20, pode-se obter a curva da Figura 12, que corresponde à curva de $C/N = 4$ dB da Figura 6 com taxas de precipitação em lugar de atenuações nos eixos. Na região S_r da Figura 12 a relação sinal/ruído é maior que 4 dB. No caso do exemplo de sistema SCPC apresentado neste trabalho, onde as estações são idênticas, a região na qual a relação C/N é maior que 4 dB no enlace de volta é limitada por uma linha simétrica à linha da Figura 12 em relação à reta $R_1 = R_2$. A Figura 13 mostra as duas linhas e a região S_c , na qual ambos os enlaces estão disponíveis. A disponibilidade do circuito de voz é dada então pela integral da densidade de probabilidade conjunta das taxas de precipitação sobre a região S_c . Pode-se notar que há uma grande superposição entre as regiões de disponibilidade dos enlaces de ida e volta, justamente na região do plano em que a densidade conjunta assume valores mais elevados.

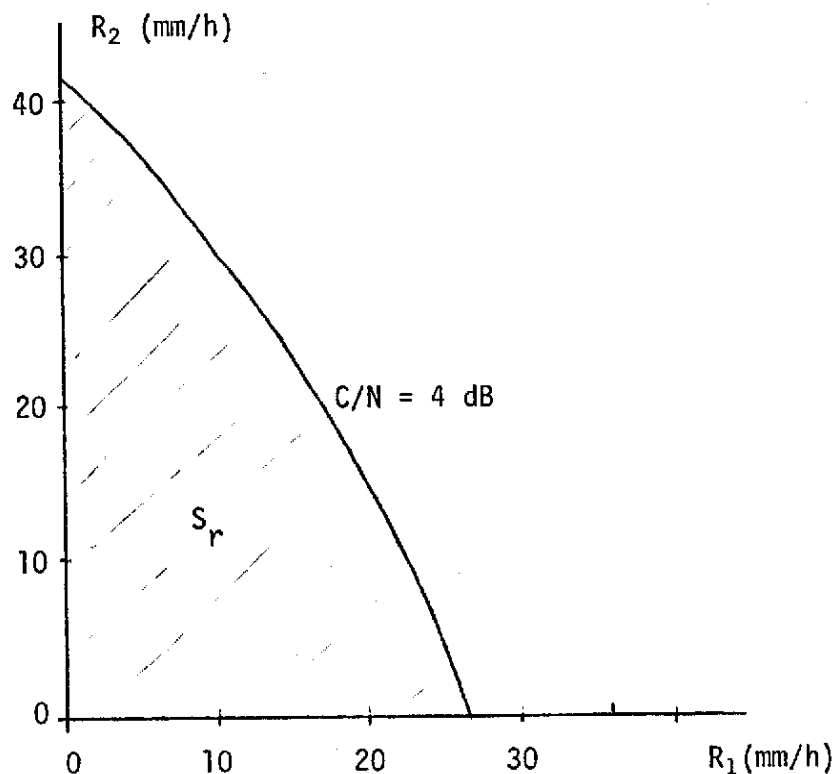


Fig. 12 - Curva de $C/N = 4$ dB no plano $R_1 \times R_2$, para estações do tipo A

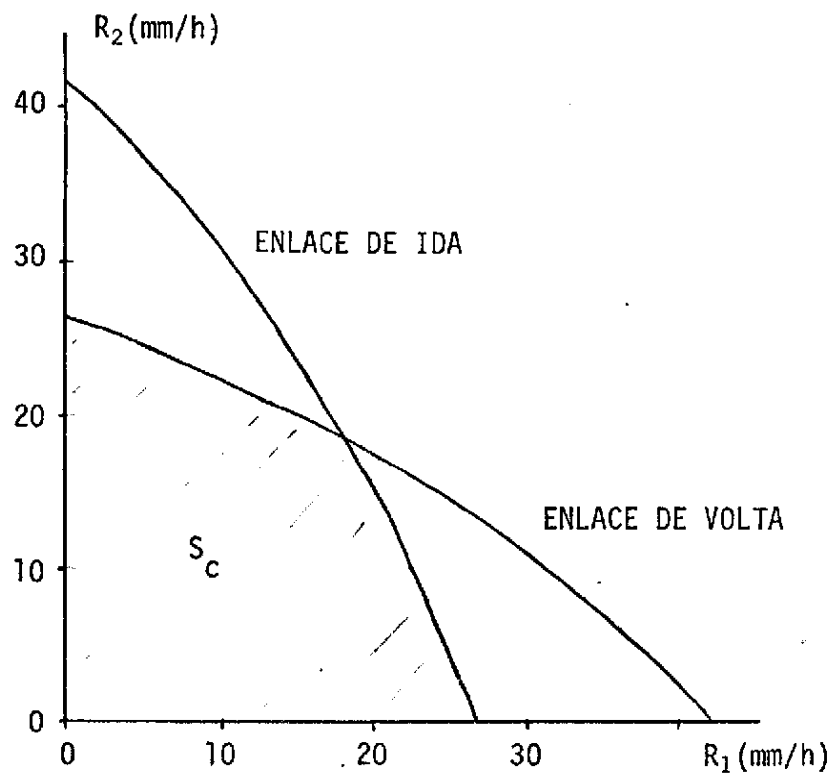


Fig. 13 - Curvas de $C/N = 4$ dB no plano $R_1 \times R_2$, para enlaces de ida e volta

3.2 - ENLACES COM PORTADORA ÚNICA NO TRANSPONDER

Os exemplos seguintes se referem a enlaces nos quais uma só portadora ocupa toda a faixa do transponder. Este caso pode ocorrer em transmissão de televisão por satélites, bem como em telefonia com multiplex de canais. Foram feitos cálculos para três tipos de estações terrenas, com as seguintes características:

- D - antena com diâmetro de 6 m;
- transmissor com potência de 50 W;
- receptor com temperatura de ruído de 300 K.

E - antena com diâmetro de 10 m;
transmissor com potência de 50 W;
receptor com temperatura de ruído de 300 K.

F - antena com diâmetro de 10 m;
transmissor com potência de 100 W;
receptor com temperatura de ruído de 300 K.

As Figuras 14 e 15 correspondem, respectivamente, às Figuras 6 e 7 para o enlace entre duas estações terrenas do tipo D. Da mesma forma, as Figuras 16 e 17 aplicam-se ao caso de estações do tipo E, e as Figuras 18 e 19 aplicam-se ao caso de estações do tipo F. Observando-se estas seis figuras, notam-se algumas diferenças marcantes em relação aos exemplos anteriormente examinados de sistemas SCPC. Nas Figuras 14, 16 e 18, as linhas de C/N constante no plano $a_1 \times a_2$ são bastante recurvadas. Isto se deve ao fato de estar o transponder do satélite operando próximo à saturação, condição em que é pequena a relação entre variações na potência de saída e variações na potência de entrada. Como consequência desta mudança de forma das regiões S, nota-se nas Figuras 15, 17 e 19 que as curvas para correlação nula e para correlação alta praticamente coincidem na região de alta disponibilidade. A forma tomada pelas regiões S favorece o sistema quando há correlação forte entre as atenuações nos lances de subida e de descida.

3.3 - COMENTÁRIOS FINAIS

Na obtenção da distribuição da atenuação a partir da distribuição da taxa de precipitação de chuva (Seção 2.2), o comprimento ℓ do trajeto, sujeito a chuva, foi considerado constante e independente da intensidade da chuva (função apenas do ângulo de elevação da estação terrena). Esta hipótese é pessimista na medida em que as células de chuva intensa (que causam as grandes atenuações) tendem a ser bastante limitadas em extensão. Este problema foi considerado por Lin et alii (1980), que apresentaram um fator de correção empírico para ℓ , em função da taxa de precipitação. Entretanto, como mostraram esses autores, a distribui

ção probabilística da atenuação continua log-normal após a introdução da correção em ℓ , que acarreta apenas uma alteração nos parâmetros da distribuição. Os resultados apresentados neste trabalho, portanto, não se alteram qualitativamente quando se refina o modelo das células de chuva. Outra maneira de contornar esta questão é utilizar diretamente dados estatísticos de atenuação, em vez de dados de precipitação.

Diante dos resultados obtidos pode-se dizer que, para o caso de sistemas SCPC, o conhecimento da distribuição conjunta das atenuações é importante no cálculo da disponibilidade de um enlace. Não se dispondo ainda de dados estatísticos apropriados à aplicação deste método no Brasil, seria interessante fazer medidas simultâneas da taxa de precipitação e da atenuação para diversos ângulos de elevação em diversos locais do país, vizinhos e afastados entre si, cobrindo diversos regimes de chuvas. Medidas simultâneas, em dois locais diferentes, associadas à monitoração da relação C/N de um enlace, fornecem dados úteis à determinação da correlação existente entre as atenuações correspondentes às duas localidades. Dados dessa natureza serviriam para verificar se realmente a pdf conjunta da Equação 21 é uma boa aproximação, e quais os valores de r_1 e r_2 que devem ser utilizados nos cálculos.

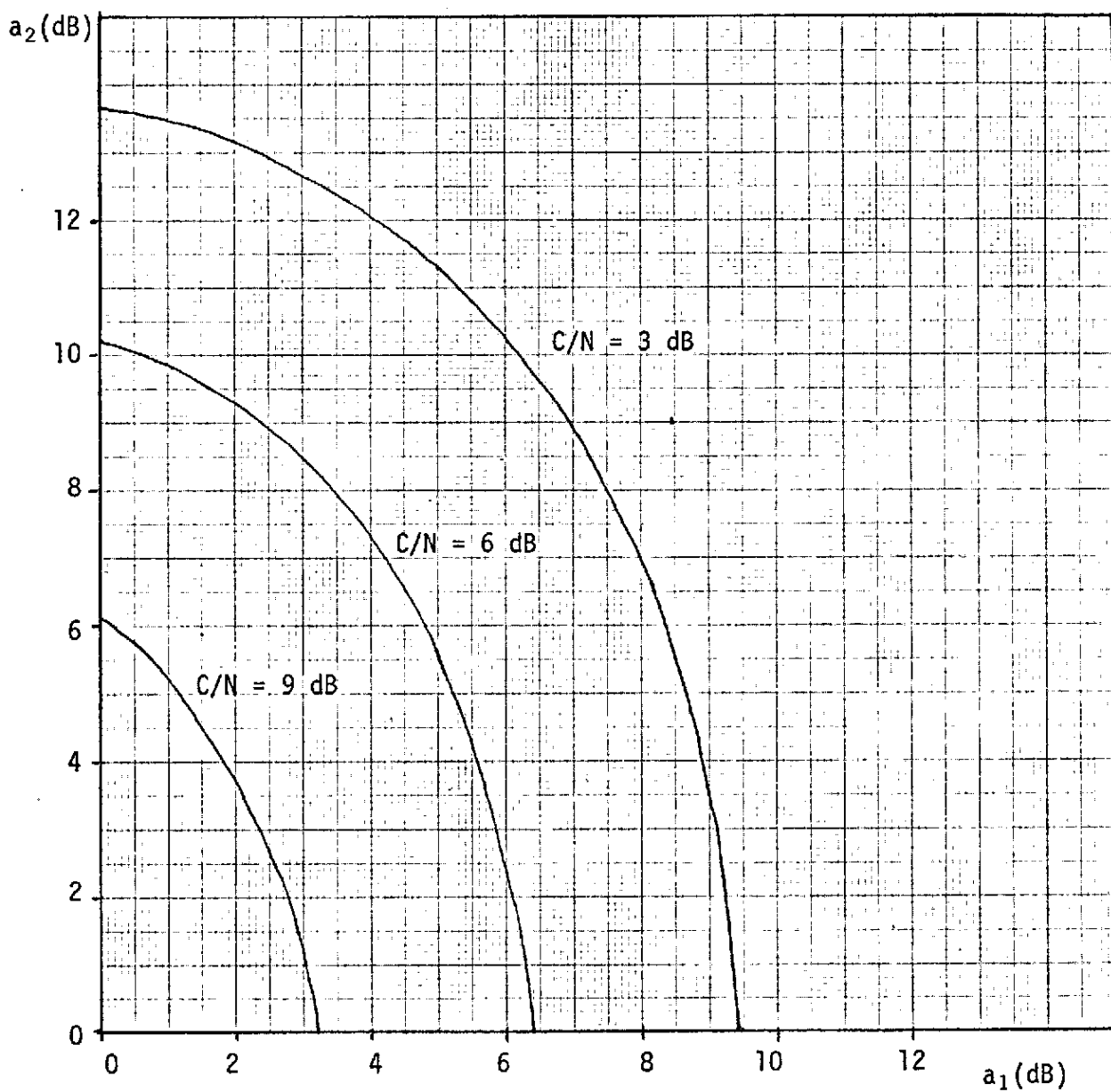


Fig. 14 - Curvas $C/N = \text{constante}$ no plano $a_1 \times a_2$, para enlace entre estações com características do tipo D

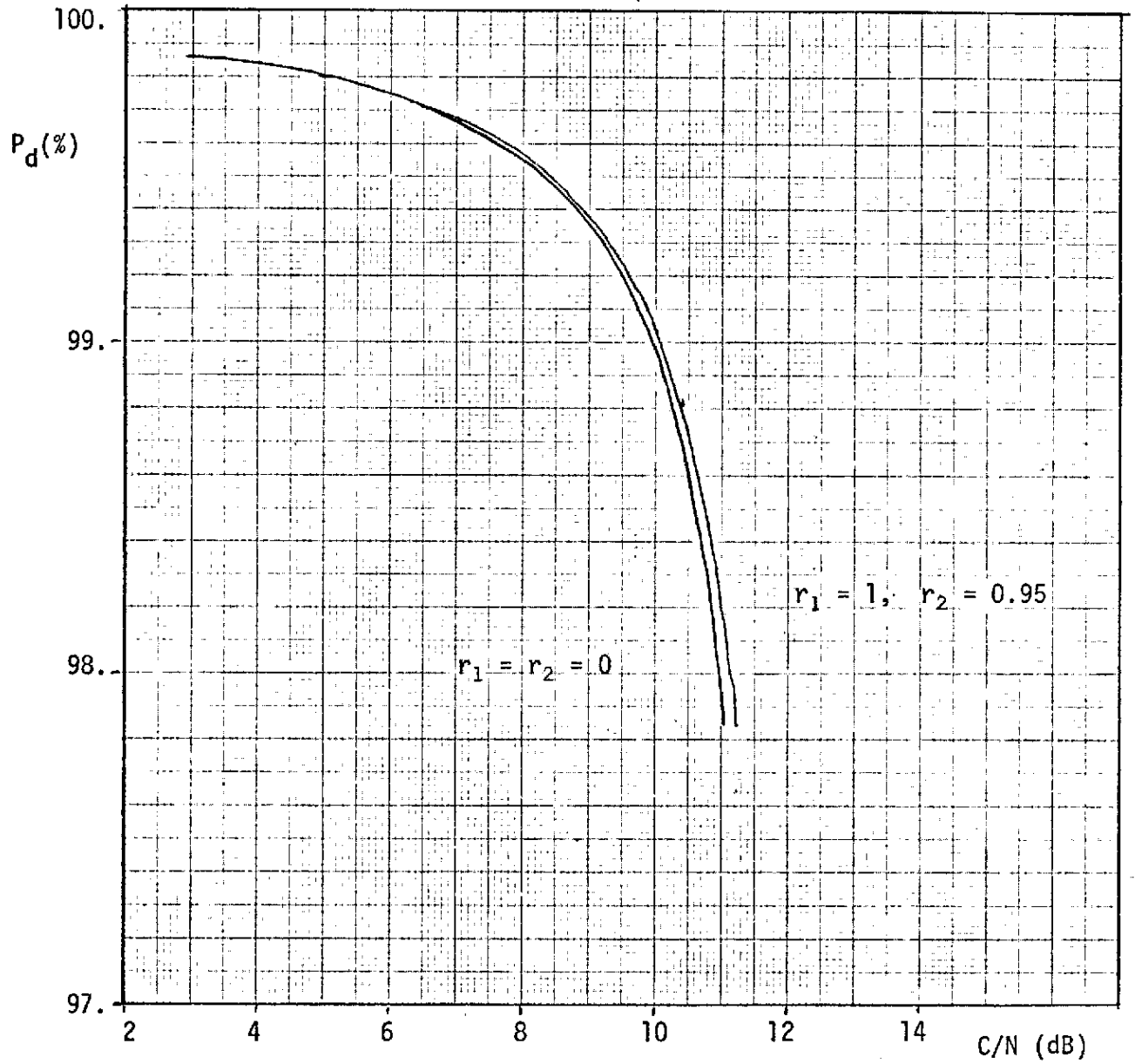


Fig. 15 - Curvas de disponibilidade em função da relação C/N , para enlace entre estações com características do tipo D

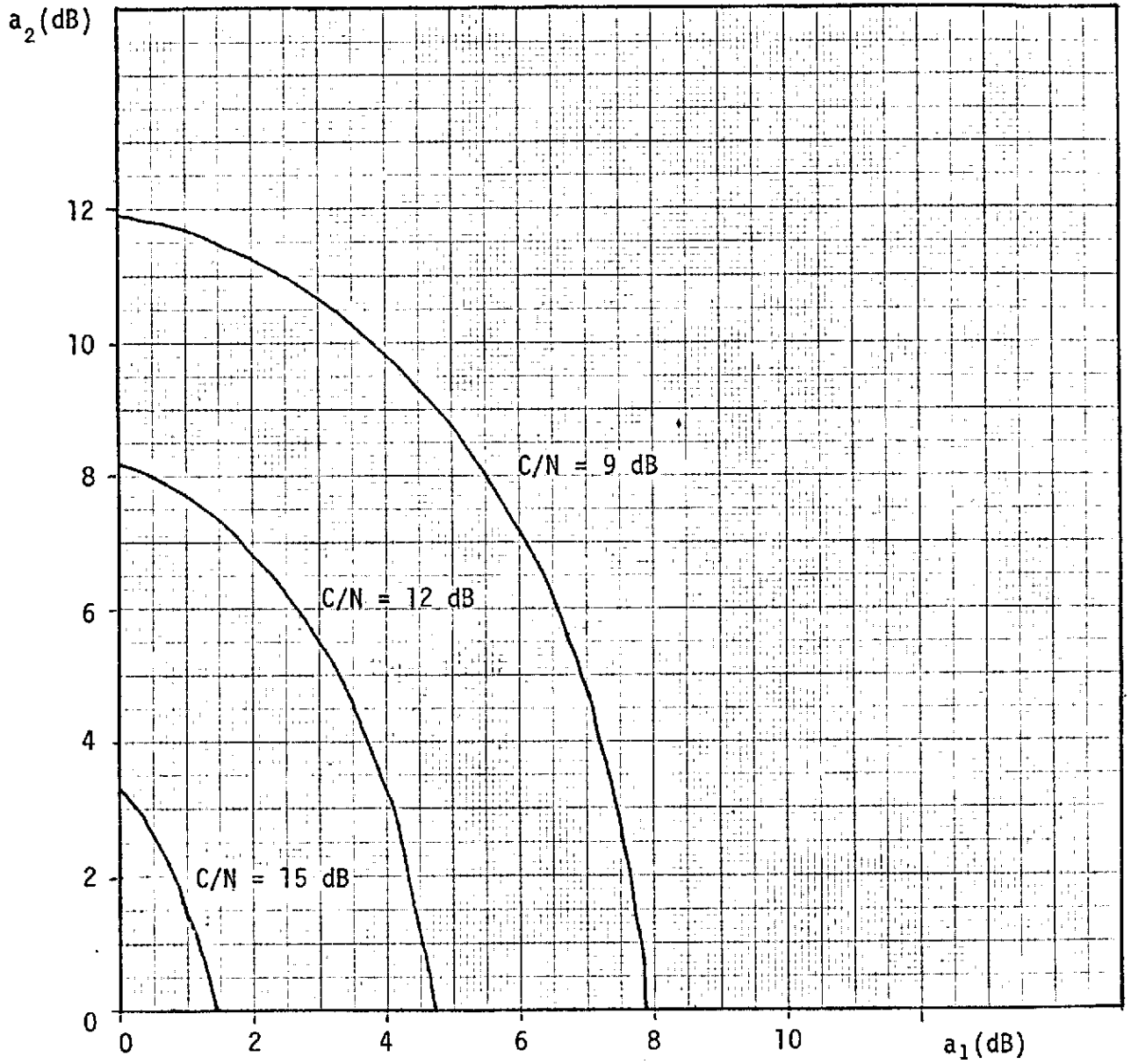


Fig. 16 - Curvas $C/N =$ constante no plano $a_1 \times a_2$, para enlace entre estações com características do tipo E

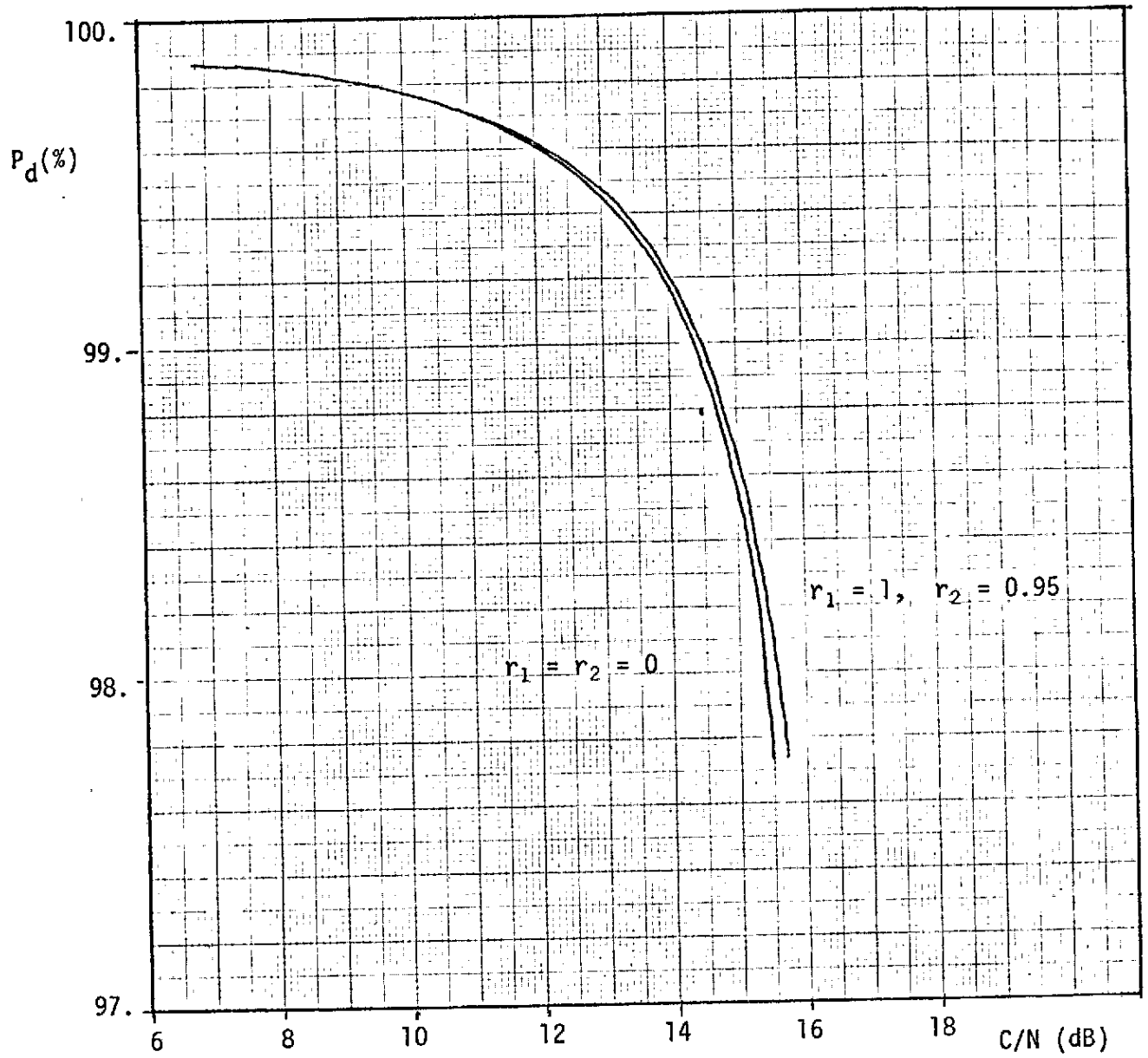


Fig. 17 - Curvas de disponibilidade em função da relação C/N, para enlace entre estações com características do tipo E

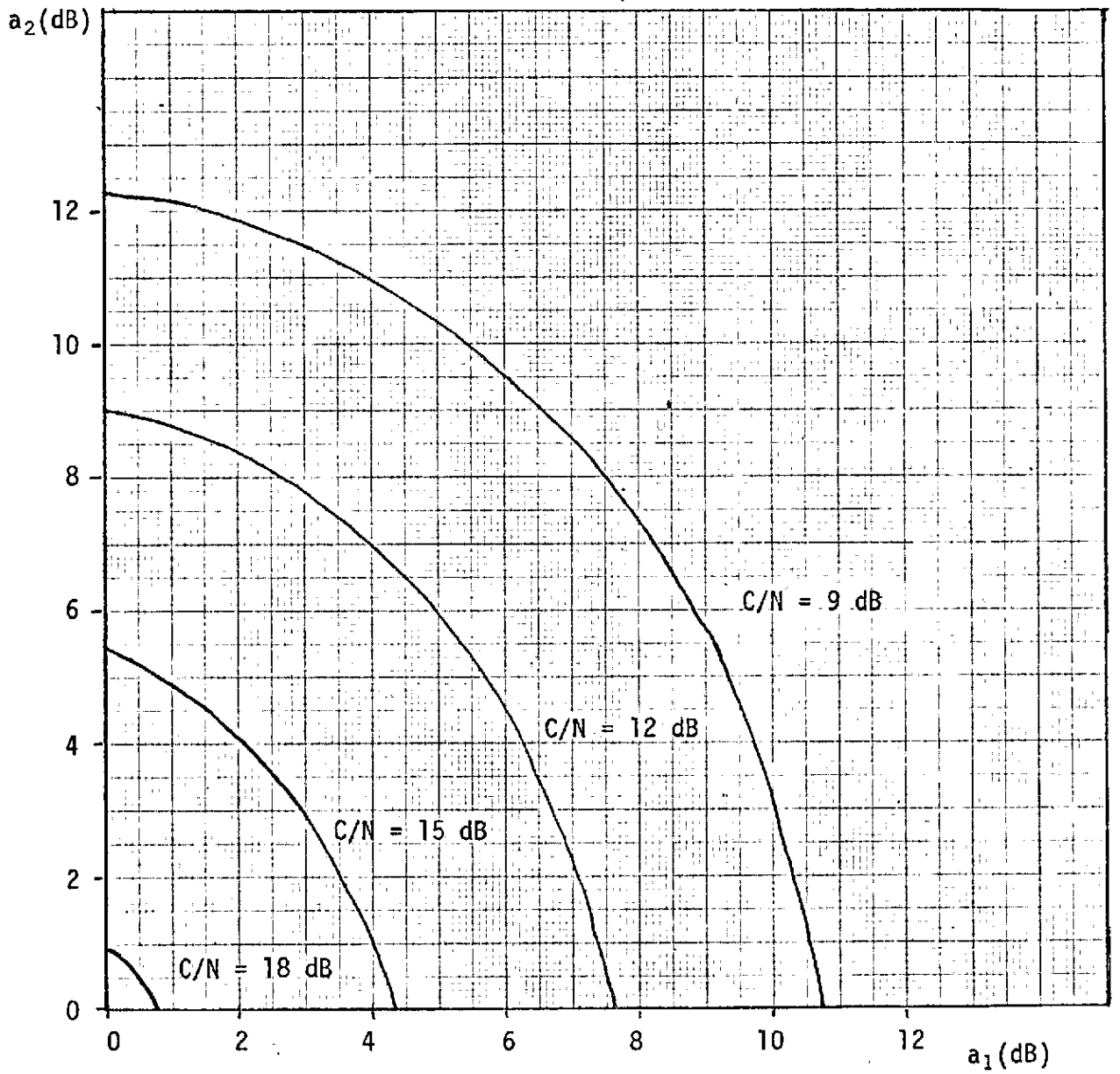


Fig. 18 - Curvas $C/N =$ constante no plano $a_1 \times a_2$, para enlace entre estações com características do tipo F

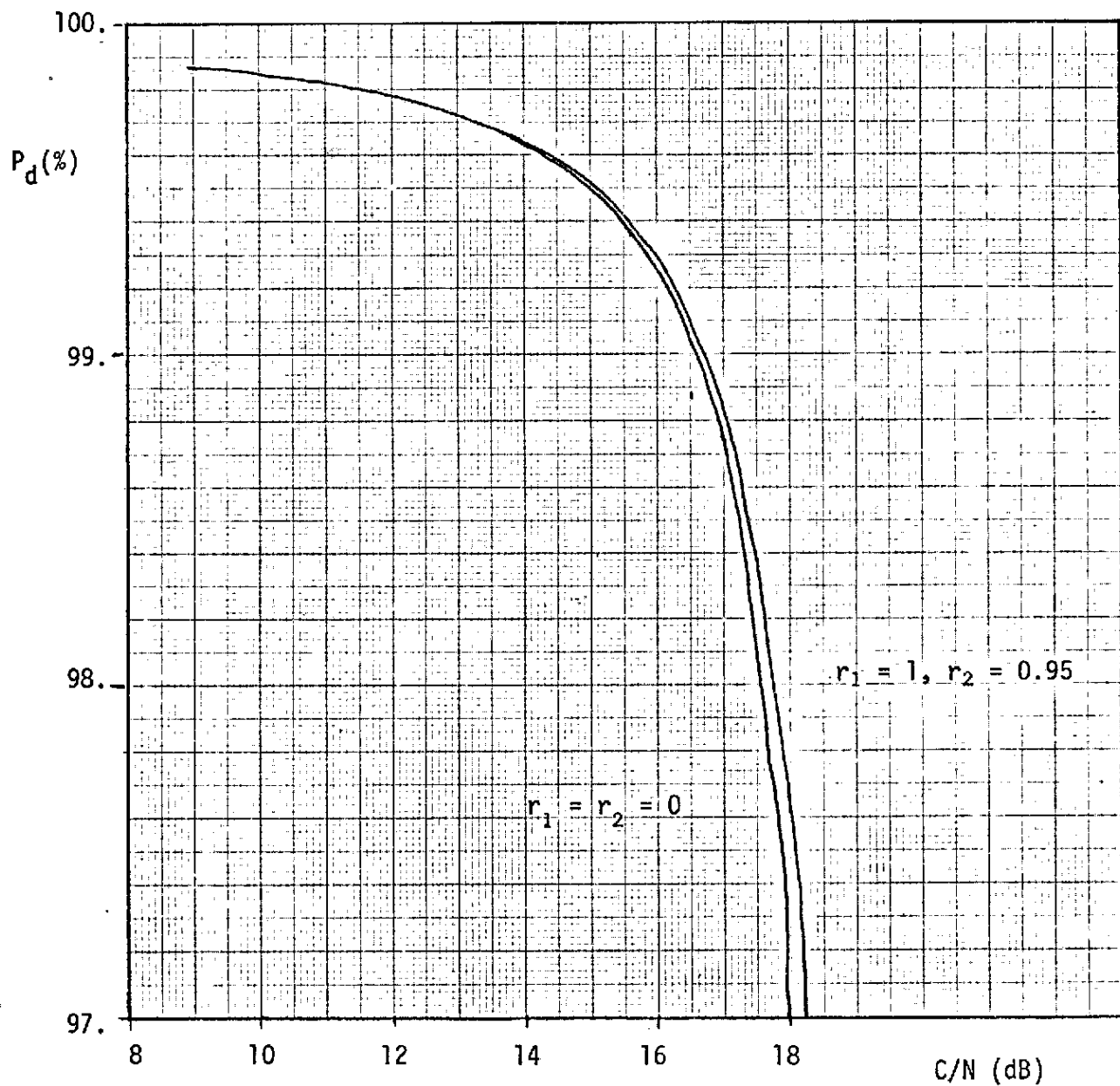


Fig. 19 - Curvas de disponibilidade em função da relação C/N , para enlace entre estações com características do tipo F

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSIS, M.S.; SALLES, A.A. *Some topics on the application of mm waves in tropical and equatorial regions*. Rio de Janeiro, CETUC, 1971.
- BANTIN, C.C.; LYONS, R.G. The evaluation of satellite link availability. *IEEE Transactions on Communications*, 26(6):847-853, Jun. 1978.
- CARLEIAL, A.B.; KONO, J. *Estudo preliminar de enlaces de uma rede de comunicações por satélite*, São José dos Campos, INPE, 1978.
- CCIR Propagation data required for space telecommunications systems. In: C.C.I.R. PLENARY ASSEMBLY, 13, Geneva, 1974. Geneva, ITU, 1975. V5. Report 564.
- CRANE, R.L. Prediction of the effects of rain on satellite communications systems. *Proceedings of the IEEE*, 65(3):456-474, Mar, 1977.
- LIN, S.H. Statistical behaviour of rain attenuation, *Bell System Technical Journal*, 52(4):557-581, Abr, 1973.
- LIN, S.H. A method for calculating rain attenuation distributions on microwave paths. *Bell System Technical Journal*, 54(6):1051-1086, Jul, 1975.
- LIN, S.H.; BERGMANN, H.J.; PURSLEY, M.V. Rain attenuation on earth-satellite paths - summary of 10 year experiment and studies. *Bell System Technical Journal*, 59(2):183-228, Fev, 1980.
- LYONS, R.G. Combined effects of up-and down-link fading through a power-limiting satellite repeater. *IEEE Transactions on Communications*, 22(3):350-354, Mar, 1974.
- PAPOULIS, A. *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*. Tokio, McGraw-Hill, 1965.
- PARES, J.; TOSKER, V. *Les systèmes de telecommunications par satellites*. Paris, Masson, 1975.