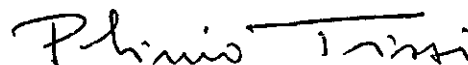


1. Publicação nº <i>INPE-2300-TDL/071</i>	2. Versão	3. Data <i>Jan., 1982</i>	5. Distribuição <input type="checkbox"/> Interna <input checked="" type="checkbox"/> Externa <input type="checkbox"/> Restrita
4. Origem <i>DEE</i>	Programa <i>TELECOMUNICAÇÕES ESPACIAIS</i>		
6. Palavras chaves - selecionadas pelo(s) autor(es) <i>TELECOMUNICAÇÕES POR SATÉLITE ATENUAÇÃO POR CHUVAS DISPONIBILIDADE DE ENLACES</i>			
7. C.D.U.: <i>621.391</i>			
8. Título <i>ESTUDO DA DISPONIBILIDADE DE ENLACES DE TELECOMUNICAÇÃO POR SATÉLITES SUJEITOS A ATENUAÇÃO POR CHUVAS</i>		<i>INPE-2300-TDL/071</i>	10. Páginas: <i>73</i>
			11. Última página: <i>B.10</i>
			12. Revisada por
9. Autoria <i>Jânio Kono</i>			<i>Aydano Carleial</i> <i>Aydano Barreto Carleial</i>
			13. Autorizada por
Assinatura responsável		<i>Jânio Kono</i>	<i>Parada</i> <i>Nelson de Jesus Parada</i>
14. Resumo/Notas <i>Este trabalho apresenta 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-espaco e espaco terra. O coeficiente de correlação entre as duas densidades marginais é um parâmetro livre na formulações apresentada. O cálculo da disponibilidade de enlace é feito por integração numérica da densidade conjunta, na região do plano que corresponde a comunicação satisfatórias. O método é aplicado ao caso de uma rede 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, uma diferença de aproximadamente 2 dB entre os valores mínimos da relação portadora/ruido (C/N); disponível para 99,8% do tempo, quando se variou o coeficiente de correlação entre 0 e 1.</i>			
15. Observações <i>Tese de Mestrado em Telecomunicações Espaciais, aprovada em 25 de março de 1981.</i>			



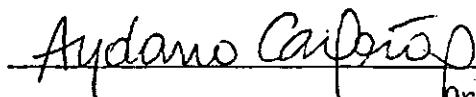
Aprovada pela Banca Examinadora  
em cumprimento dos requisitos exigidos  
para a obtenção do Título de Mestre em  
Eletrônica e Telecomunicações

Dr. Plínio Tissi



Presidente

Dr. Aydano Barreto Carleial



Orientador

Eng. Mauro Soares de Assis, MSc.



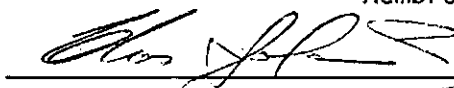
Membro da Banca  
-convidado-

Dr. Carlos Eduardo Santana



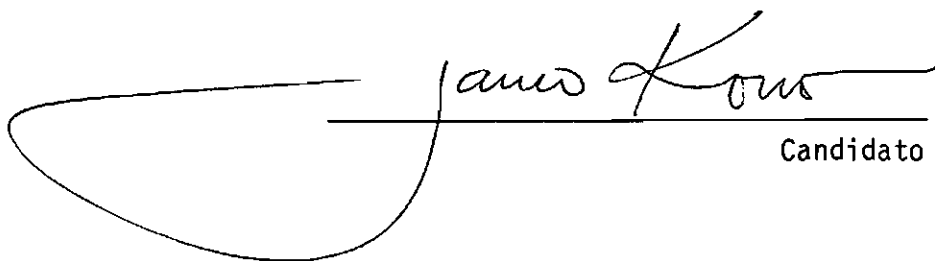
Membro da Banca

Dr. Clóvis Solano Pereira



Membro da Banca

Jânio Kono



Candidato

São José dos Campos, 25 de março de 1981

## INDICE

	<u>Pág.</u>
ABSTRACT .....	<i>iv</i>
LISTA DE FIGURAS .....	<i>v</i>
LISTA DE TABELAS .....	<i>vi</i>
<u>CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO</u> .....	1
<u>CAPÍTULO II - FORMULAÇÃO BÁSICA</u> .....	5
2.1 - Modelo de enlace de telecomunicações por satélite .....	5
2.2 - Distribuição de probabilidade da atenuação por chuvas ...	10
<u>CAPÍTULO III - MÉTODO DE CÁLCULO DE DISPONIBILIDADE</u> .....	27
3.1 - Método numérico .....	27
3.2 - Estudo para modelo linear de enlace .....	30
<u>CAPÍTULO IV - RESULTADOS E CONCLUSÕES</u> .....	33
4.1 - Sistema com canal singelo por portadora (SCPC) .....	34
4.2 - Sistema com portadora única por repetidor .....	44
4.3 - Comentários finais .....	52
<u>AGRADECIMENTOS</u> .....	55
<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u> .....	57
APÊNDICE A - CARACTERÍSTICAS DO REPETIDOR	
APÊNDICE B - PROGRAMAS DE COMPUTAÇÃO	

## ABSTRACT

*This work 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 is 14/12 GHz taken as an example, a difference of approximately 2 dB was found between minimum values of available carrier-to-noise ration (C/N) for 99,8% of the time when the correlation coefficient was varied between 0 and 1.*

## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
I.1 - Configuração básica de um enlace de telecomunicações por satélite .....	1
II.1 - Modelo de enlace de telecomunicações por satélite .....	6
II.2 - Distribuição de probabilidade de taxas de precipitação .	13
II.3 - Gráfico da atenuação específica .....	15
II.4 - Distribuição de probabilidade de atenuação por chuvas, em Belém .....	18
III.1 - Região S no plano $a_1 \times a_2$ .....	28
III.2 - Subdivisão da Região S .....	30
IV.1 - Curvas $C/N = \text{constante}$ no plano $a_1 \times a_2$ , em enlace entre estações com características do tipo A .....	36
IV.2 - Curvas de disponibilidade em função da relação $C/N$ , para enlace entre estações do tipo A .....	37
IV.3 - Curvas $C/N = \text{constante}$ no plano $a_1 \times a_2$ , em enlace entre estações com características do tipo B .....	38
IV.4 - Curvas de disponibilidade em função da relação $C/N$ , para enlace entre estações com características do tipo B ....	39
IV.5 - Curvas $C/N = \text{constante}$ no plano $a_1 \times a_2$ , em enlace entre estações com características do tipo C .....	40
IV.6 - Curvas de disponibilidade em função da relação $C/N$ , para enlace entre estações com características do tipo C ....	41
IV.7 - Curva de $C/N = 4 \text{ dB}$ no plano $r_1 \times r_2$ , para estação do tipo A .....	43
IV.8 - Curvas de $C/N = 4 \text{ dB}$ no plano $r_1 \times r_2$ , para enlaces de ida e volta .....	44
IV.9 - Curvas $C/N = \text{constante}$ no plano $a_1 \times a_2$ , para enlace entre estações com características do tipo D .....	46
IV.10 - Curvas de disponibilidade em função da relação $C/N$ , para enlace entre estações com características do tipo D .....	47
IV.11 - Curvas $C/N = \text{constante}$ no plano $a_1 \times a_2$ , para enlace entre estações com características do tipo E .....	48
IV.12 - Curvas de disponibilidade em função da relação $C/N$ , para enlaces entre estações características do tipo E .....	49
IV.13 - Curvas $C/N = \text{constante}$ no plano $a_1 \times a_2$ , em enlace entre estações com características do tipo F .....	50
IV.14 - Curvas de disponibilidade em função da relação $C/N$ , para enlaces entre estações com características do tipo F ....	51

## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
II.1 - Parâmetros da distribuição log-normal de chuvas .....	12
II.2 - Valores de $\alpha$ e $\beta$ para 11,5 e 14,2 GHz .....	14
II.3 - Distribuição conjunta da probabilidade de ocorrência de chuvas .....	19
IV.1 - Características do satélite .....	33

## CAPÍTULO I

### INTRODUÇÃO

Um enlace de telecomunicações por satélite pode ser representado simplificada<sup>mente</sup> pela Figura I.1, que mostra a estação terrena transmissora, o satélite (que funciona como um repetidor ativo) e a estação terrena receptora.

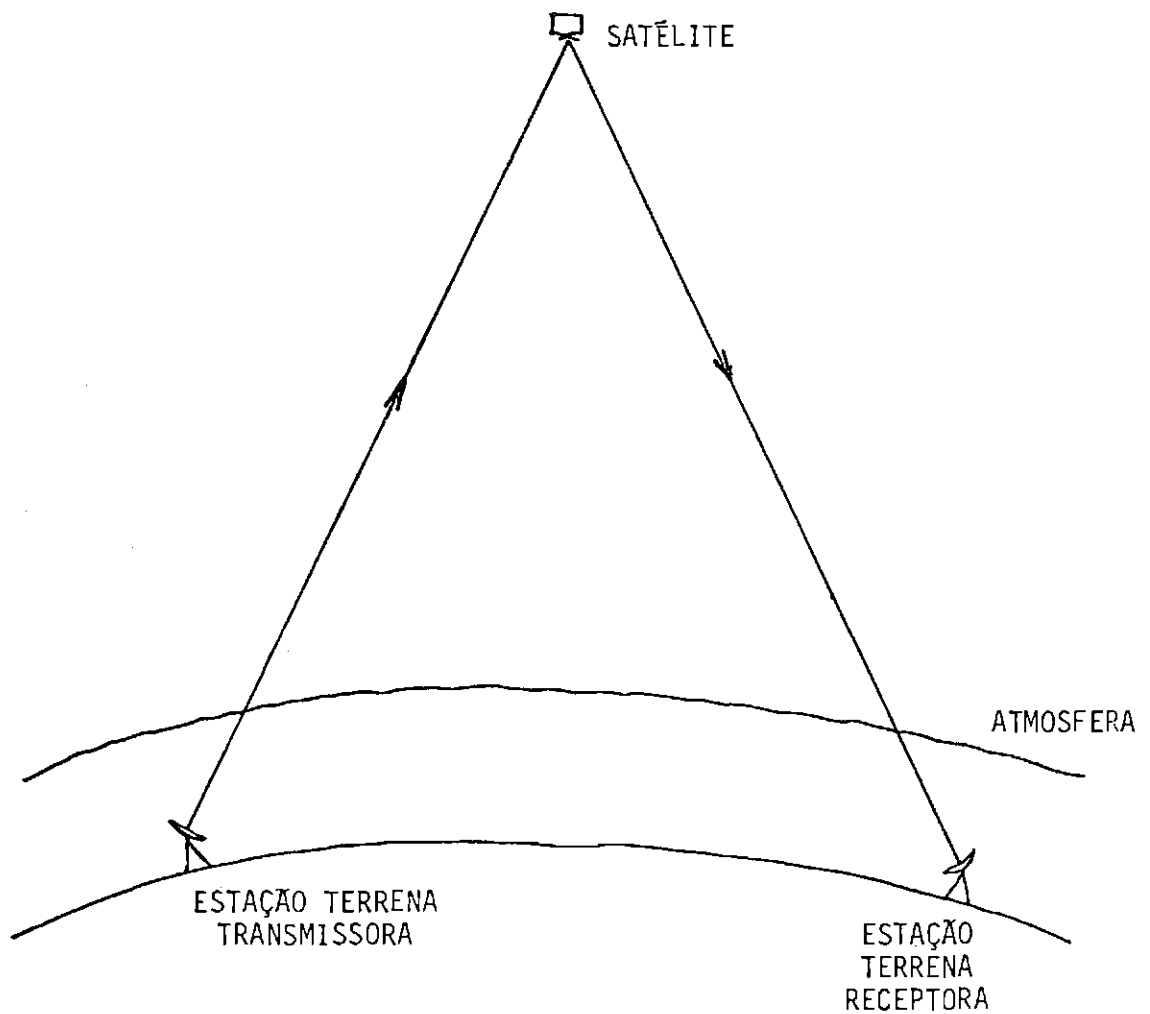


Fig. I.1 - Configuração básica de um enlace de telecomunicações por satélite.



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 frequências, 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 vizinhanças dos pontos de transmissão e de recepção. Abrange uma gama de valores bastante alta; por exemplo, na frequência de 14 GHz, com ângulo de elevação de  $30^{\circ}$ , o valor da atenuação por chuvas varia de zero dB (com céu limpo), acerca 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 constantes a sensibilidade do receptor e a potência transmitida pelo satélite), pode-se avaliar a importância do conhecimento das distribuições de probabilidade das atenuações nos lances de transmissão e de recepção, no projeto de um sistema de telecomunicações por satélite.

O método usualmente empregado para calcular a disponibilidade, ou 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 mais rigorosa, incluindo em 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 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, aliás, até bem recentemente, o caso de todos os enlaces por satélite.

Neste trabalho calcula-se a disponibilidade de enlaces, 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 possa obter e comparar os resultados dos métodos citados acima, variando-se o coeficiente de correlação de 0 a 1. Obtêm-se 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.

## CAPÍTULO II

### FORMULAÇÃO BÁSICA

#### 2.1 - MODELO DE ENLACE DE TELECOMUNICAÇÕES POR SATÉLITE

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, apresentam-se 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 (ver Apêndice A). Na Figura II.1, apresenta-se o modelo de enlace para um canal, através do qual desenvolver-se-ão equações para o cálculo da relação sinal/ruído (Carleial e Kono, 1978). Na Figura II.1, a translação de frequências foi omitida por simplicidade.

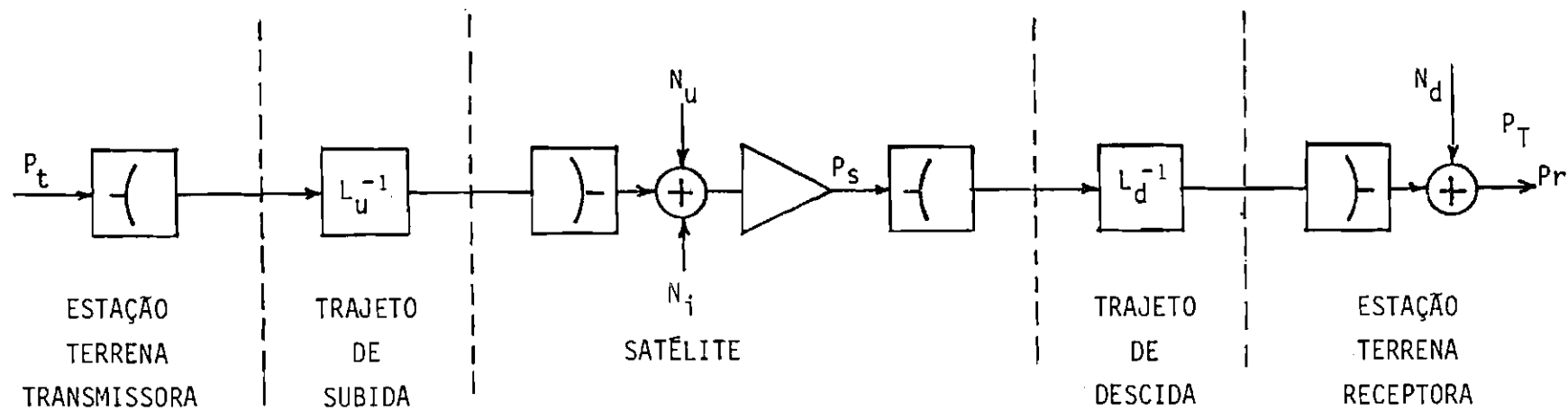


Fig. II.1 - Modelo de enlace de telecomunicações por satélite.

Na Figura II.1, 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 frequência 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 do lance de descida isolado, incluindo o ruído adicional causado pelo meio absorvente.

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

No modelo da Figura II.1, os valores de  $N_i$  e  $H$  são funções do nível total de potência na entrada do repetidor. No caso de um Sistema com Canal Singelo por Portadora (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 re

petidor, 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 ( $H$ ) variam com as perdas no lance de subida ( $L_u$ ).

Nas equações do modelo, apresentadas a seguir,  $G$  indica ganhos de antenas;  $L$ , perdas;  $\lambda$  comprimentos de onda;  $D$ , distâncias;  $T$ , 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 Potência Efetiva Isotropicamente Irradiada (EIRP) da estação terrena transmissora, é definida por:

$$E_t = G_{tu} \cdot P_t$$

A densidade de fluxo de potência (por unidade de área) na antena do satélite, devida a essa portadora, é dada por:

$$\phi_c = \frac{E_t}{4 \pi D_u^2 L_u}$$

A potência de sinal na entrada da antena transmissora do satélite é dada por:

$$P_s = \left[ \frac{E_t G_{su}}{L_u} \left( \frac{\lambda_u}{4 \pi D_u} \right)^2 + N_i + N_u \right] H,$$

onde  $H$  é o ganho de potência do repetidor, que depende do ponto de operação.

A EIRP do satélite é dada, então, por:

$$E_s = P_s \cdot G_{sd}$$

A potência de sinal, captada pela antena da estação terrena receptora,  $\bar{P}_r$  é:

$$\bar{P}_r = \frac{E_s G_{td}}{L_d} \left( \frac{\lambda_d}{4 \pi D_d} \right)^2 + N_d ,$$

e a relação sinal/ruído do enlace  $\bar{C}$  é dada por:

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

onde  $k$  é a constante de Boltzman, e  $B$  é a largura de faixa do canal. A temperatura de ruído  $T_d$  é calculada através das expressões:

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

e

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

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 média 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 (incluindo 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.

A equação II.1 pode ser utilizada em cálculos de disponibilidade, porque em enlaces de comunicação existe, em geral, uma cor

respondência direta entre a qualidade do sinal demodulado e a relação sinal/ruído; isto é, para uma qualidade de sinal especificada existe uma relação sinal/ruído mínima (que depende da técnica de modulação e codificação empregada), acima da qual a especificação é satisfeita. Conhecendo-se, então, a distribuição de probabilidades da relação sinal/ruído, pode-se determinar a disponibilidade de vários tipos de sistema.

## 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, e englobam perdas por erros de apontamento das antenas e perdas de propagação.

O erro de apontamento de uma antena não rastreadora de estação terrena pode ser visto como tendo duas componentes: uma "estática" (erro inicial, devido à impossibilidade de acertar a direção exata do feixe) e uma aleatória, devido ao vento ou a outras perturbações. Uma terceira fonte de erro (periódica) decorre do movimento do satélite. As perdas devidas a erros de apontamento podem ser estimadas dados a precisão de apontamento, o diâmetro das antenas da estação terrena e a frequência utilizada. Há também um "erro de apontamento" da antena do satélite, que geralmente pode ser considerado fixo (devido ao não-alinhamento) para feixes largos ( $\sim 4^\circ$  ou mais).

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 et Toscer, 1975).

A atenuação causada pela atmosfera, sem chuvas, depende da frequência utilizada e do ângulo de elevação da estação terrena, e não está sujeita a grandes variações no tempo. A atenuação causada por chuvas abrange uma larga gama de variação, e a distribuição de probabilidades pode ser obtida com boa aproximação, a partir da distribuição de probabilidade da taxa de precipitação da chuva, nas vizinhanças da estação terrena.

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

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

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

Na equação acima:

$M_r$  - 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.

$$\operatorname{erfc}(x) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad \text{- função erro complementar.}$$

A função densidade de probabilidade (pdf) da taxa de precipitação é dada por:

$$f_r(r) = \frac{dP(R \leq r)}{dr} = (1 - P_0)\delta(r) + P_0 \frac{e^{-\frac{(\ln r - \ln M_r)^2}{2S_r^2}}}{\sqrt{2\pi} S_r r} \quad (II.5)$$

Analisando-se os dados estatísticos disponíveis da taxa de precipitação de duas cidades brasileiras (Rio de Janeiro e Belém), situadas em regiões de clima tropical e equatorial, respectivamente (Assis e Salles, 1971), verificou-se que as distribuições da taxa de precipitação são, de fato, aproximadamente log-normais. A Figura II.2 apresenta, 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 apresentados na Tabela II.1.

TABELA II.1

PARÂMETROS DA DISTRIBUIÇÃO LOG-NORMAL DE CHUVAS

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

Todos os dados de taxa de precipitação coletados referem-se 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.

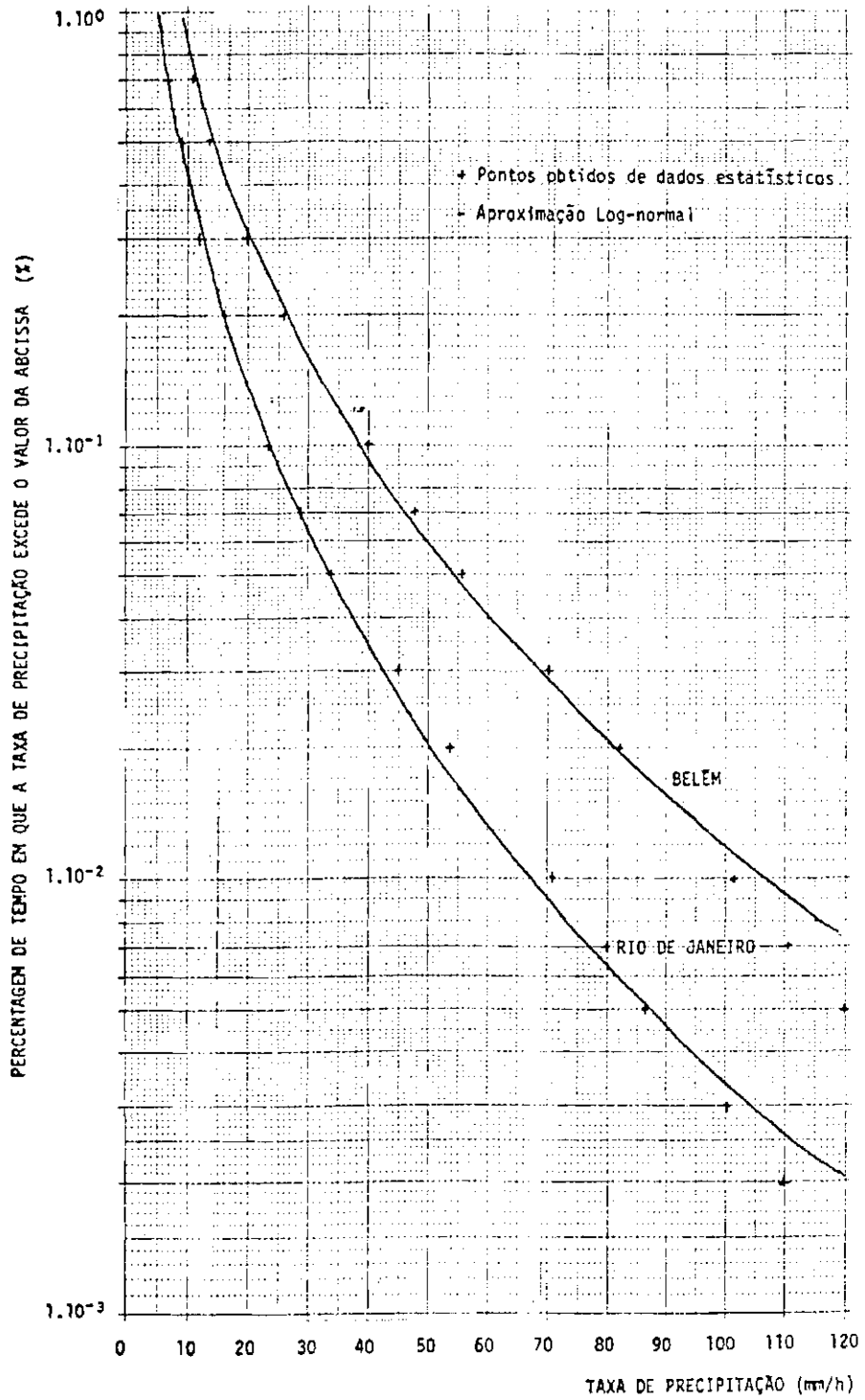


Fig. II.2 - Distribuição de probabilidade de taxas de precipitação.

É bastante difícil calcular teoricamente a atenuação causada pela chuva, que depende entre outros fatores do tamanho, número, forma, orientação, etc., das gotas de chuva. Entretanto, descobriu-se que existe uma relação empírica simples entre a taxa de precipitação e a atenuação específica, por unidade de distância (Lin et alii, 1980; Olsen et alii, 1978), que é:

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

onde  $\bar{A}$  é a atenuação específica (dB/km), e  $\alpha$ ,  $\beta$  são as constantes positivas, que dependem da frequência do sinal e do tempo de integração do pluviômetro. Os valores de  $\alpha$  e  $\beta$  para as frequências de 11,5 e 14,2 GHz estão resumidos na Tabela II.2 (Lin et alii, 1980).

TABELA II.2

VALORES DE  $\alpha$  E  $\beta$  PARA 11,5 E 14,2 GHz

f(GHz)	$\alpha$	$\beta$
11,5	$1,75 \cdot 10^{-2}$	1,21
14,2	$3,42 \cdot 10^{-2}$	1,15

A Figura II.3 mostra um gráfico da atenuação específica em função da taxa de precipitação, para as frequências de 11,5 e 14,2 GHz.

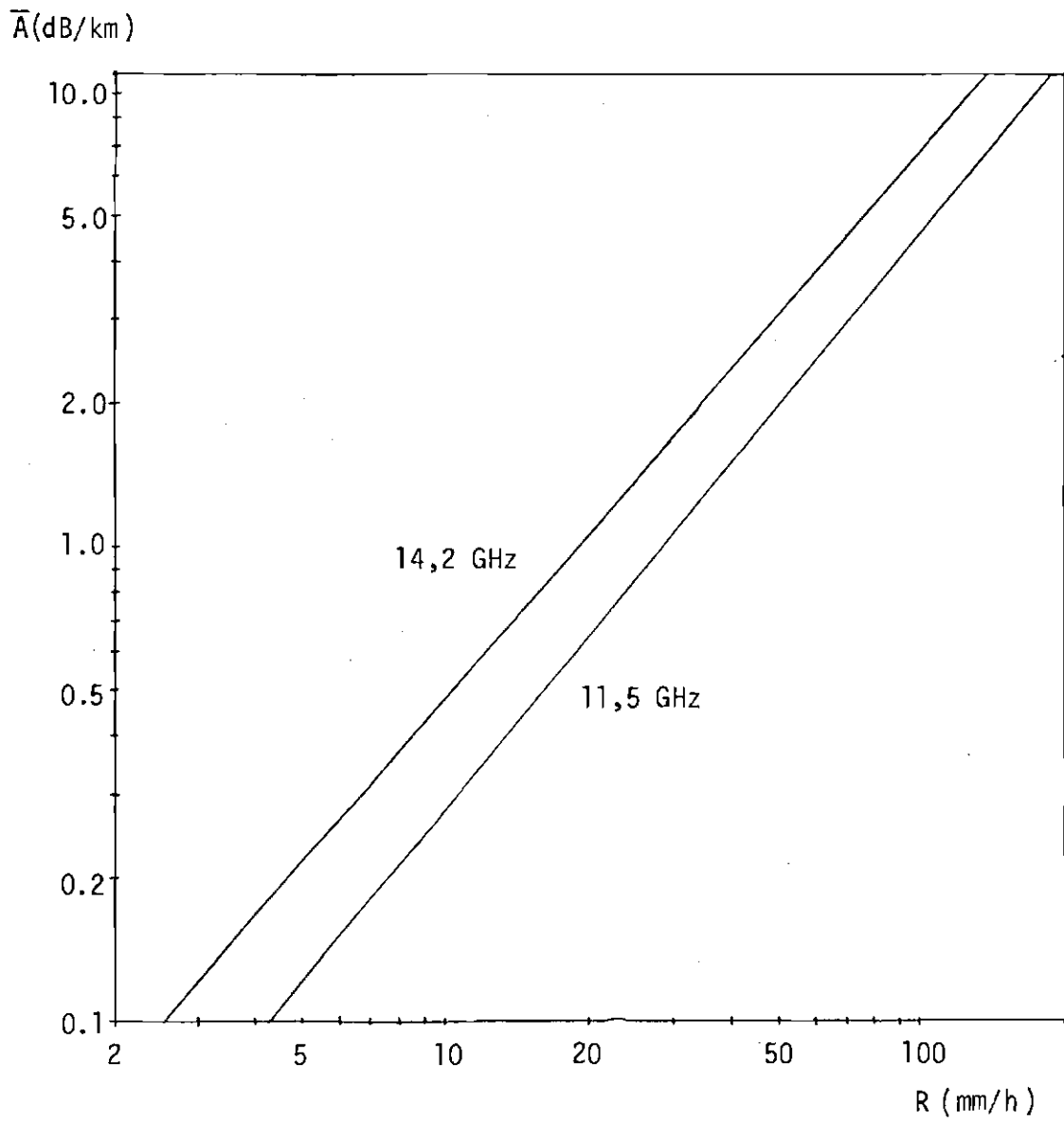


Fig. II.3 - Gráfico da atenuação específica.

A função densidade de probabilidade da atenuação específica pode ser determinada a partir das Equações II.5 e II.6. A Relação II.6 é monotônica crescente, logo:

$$P(\bar{A} \leq \bar{a}) = P(R \leq r_0) , \quad (II.7)$$

onde  $r_0 = \left(\frac{\bar{a}}{\alpha}\right)^{1/\beta}$

A pdf da atenuação específica é dada por:

$$f_{\bar{A}}(\bar{a}) = \frac{d P(\bar{A} \leq \bar{a})}{d\bar{a}} ,$$

usando-se a Equação II.7:

$$f_{\bar{A}}(\bar{a}) = \frac{d P(R \leq r_0)}{d\bar{a}} = \frac{f_R(r_0)}{\alpha \beta r_0^{\beta-1}} , \quad \bar{a}, r_0 > 0 ,$$

donde resulta, usando-se a Equação II.5, que:

$$f_{\bar{A}}(\bar{a}) = (1 - P_0)\delta(\bar{a}) + \frac{P_0}{\sqrt{2\pi} \beta S_r \bar{a}} e^{-\frac{1}{2\beta^2 S_r^2} \left[ \ln \bar{a} - \ln \alpha M_r^\beta \right]^2} ,$$

ou seja,  $f_{\bar{A}}(\bar{a})$  também é log-normal e pode ser escrita como

$$f_{\bar{A}}(\bar{a}) = (1 - P_0)\delta(\bar{a}) + \frac{P_0}{\sqrt{2\pi} S_{\bar{a}} \bar{a}} e^{-\frac{1}{2 S_{\bar{a}}^2} \left[ \ln \bar{a} - \ln M_{\bar{a}} \right]^2} , \quad (II.8)$$

onde:  $M_{\bar{a}} = \alpha M_r^\beta$

e  $S_{\bar{a}} = \beta S_r$

A atenuação total num lance, causada pela chuva, é:

$$A = \bar{A} \cdot \ell ,$$

onde  $\ell$  é o comprimento do trajeto de propagação sujeito a chuvas.

Pode-se mostrar que a distribuição de A também é log-normal, ou seja:

$$f_A(a) = (1 - P_0)\delta(a) + \frac{P_0}{\sqrt{2\pi} S_a a} e^{-\frac{1}{2 S_a^2} [\ell \ln a - \ell \ln M_a]^2}, \quad (II.9)$$

onde:  $M_a = \ell M_{\bar{a}}$

e  $S_a = S_{\bar{a}}$

A Figura II.4 mostra um gráfico com as distribuições de atenuação por chuva, para as frequências de 11,5 e 14,2 GHz em Belém, considerando-se o comprimento do trajeto sujeito a chuvas (para ângulo de elevação da antena da estação terrena de 30°) igual a 4,5 km (CCIR, 1974).

A Equação II.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. Para este cálculo, a função densidade de probabilidade conjunta das atenuações, nos lances de subida e descida, é necessária. 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. Por exemplo, em boa parte do Brasil, a passagem de uma frente fria, ou sua permanência sobre uma região como frente estacionária, é por vezes associada à precipitação simultânea de chuvas mais ou menos intensas sobre área bastante extensa.

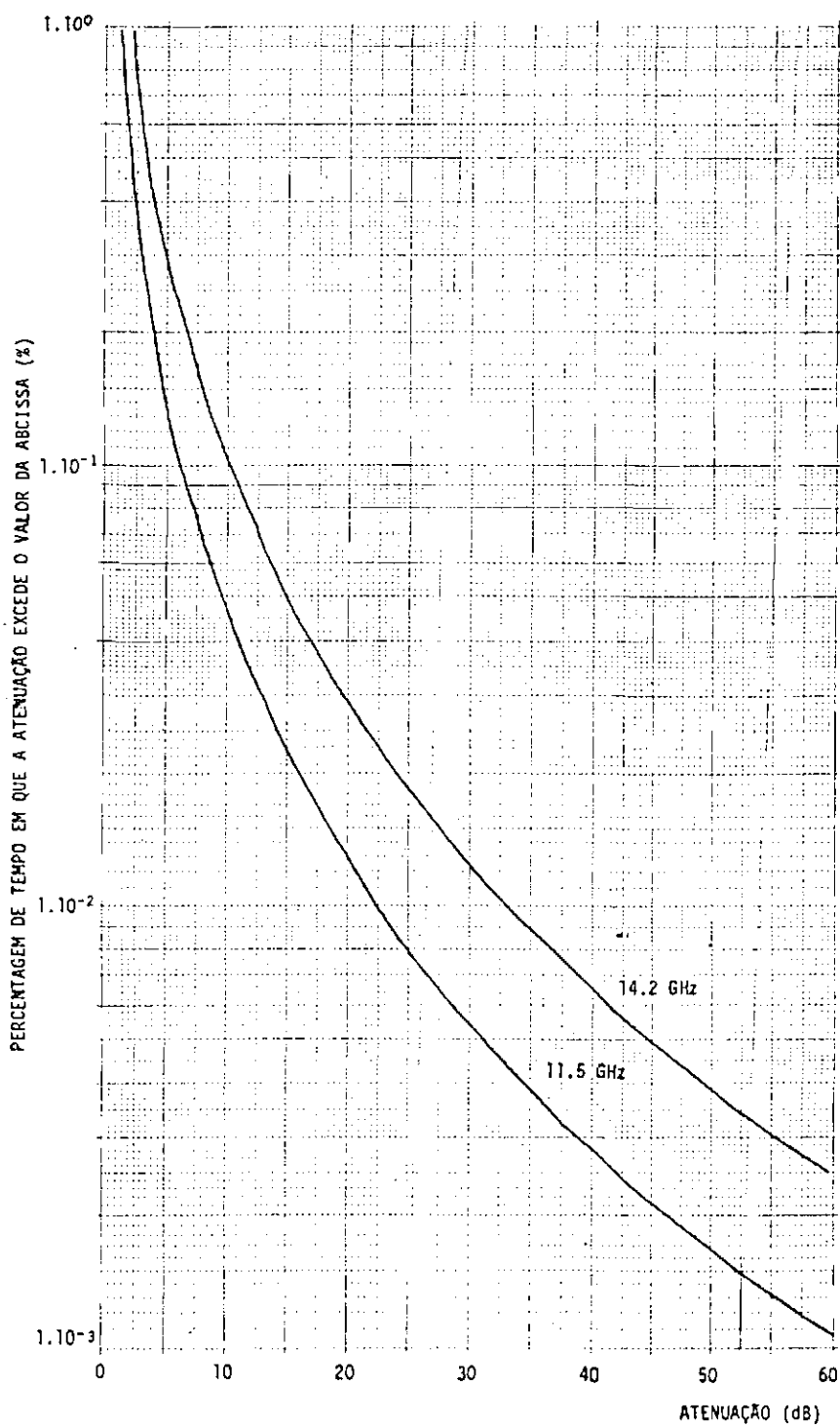


Fig. II.4 - Distribuição de probabilidade de atenuação por chuvas, em Belém.



O restante desta seção é dedicado à busca de uma função densidade de probabilidade conjunta, na qual o coeficiente de correlação é um parâmetro variável.

Dados dois locais, que serão indicados pelos índices 1 e 2, nos quais a probabilidade de ocorrência de chuvas é  $P_1$  e  $P_2$ , pode-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.

A Tabela II.3 ilustra a distribuição conjunta da probabilidade de ocorrência de chuvas.

TABELA II.3

DISTRIBUIÇÃO CONJUNTA DA PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE CHUVAS

		LOCAL 1	
		não chove	chove
LOCAL 2	{ não chove	$P_{00}$	$P_{10}$
	chove	$P_{01}$	$P_{11}$

As probabilidades acima estão relacionadas entre si da seguinte forma:

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

Pode-se escrever que:

$$p_{00} = 1 - P_1 - P_2 + p_{11}$$

$$p_{10} = P_1 - p_{11}$$

$$p_{01} = P_2 - p_{11}$$

Das equações acima, pode-se deduzir que os limites de  $p_{11}$  são:

$$\max(0, P_1 + P_2 - 1) \leq p_{11} \leq \min(P_1, P_2).$$

Definindo-se as variáveis aleatórias indicadoras,  $X_1$  e  $X_2$ , através de:

$$X_i = 0 \text{ se não chove em } i, \quad i = 1, 2;$$

$$X_i = 1 \text{ se chove em } i, \quad i = 1, 2.$$

O coeficiente de correlação entre  $X_1$  e  $X_2$  (Papoulis, 1965) é:

$$r_1 = \frac{E[(X_1 - \bar{X}_1)(X_2 - \bar{X}_2)]}{\sqrt{E[(X_1 - \bar{X}_1)^2]E[(X_2 - \bar{X}_2)^2]}} = \frac{p_{11} - P_1 \cdot P_2}{\sqrt{P_1(1 - P_1)P_2(1 - P_2)}} \quad (\text{II.11})$$

onde  $\bar{X}_1$  e  $\bar{X}_2$  são os valores médios de  $X_1$  e  $X_2$ , respectivamente.

Para determinar os limites de variação de  $r_1$ , pode-se supor, sem perda de generalidade, que:

$$P_1 \leq P_2 .$$

Então, da Equação II.11 conclui-se que:

$$p_{11} \leq P_1$$

e

$$r_1 \leq \sqrt{\frac{P_1(1-P_2)}{P_2(1-P_1)}} \leq 1 \quad (\text{II.12})$$

Nota-se que, o limitante superior de  $r_1$  só é igual à unidade, se  $P_1=P_2$ .

Para o limite inferior de  $r_1$  há dois casos:

(i) Se  $P_1 + P_2 \leq 1$ , então:

$$p_{11} \geq 0$$

e

$$r_1 \geq -\sqrt{\frac{P_1 P_2}{(1-P_1)(1-P_2)}} \quad (\text{II.13})$$

Nota-se, neste caso, que o limitante inferior de  $r_1$  é menor ou igual a zero, sendo nulo se  $P_1$  ou  $P_2$  for nulo. Por outro lado, o limitante vale -1 (seu mínimo valor possível) quando:

$$P_1 + P_2 = 1$$

(ii) Se  $P_1 + P_2 > 1$ , então:

$$p_{11} \geq P_1 + P_2 - 1$$

e

$$r_1 \geq -\sqrt{\frac{(1-P_1)(1-P_2)}{P_1 P_2}} \quad (\text{II.14})$$

Nota-se, neste caso, que o limitante é nulo se  $P_1$  ou  $P_2$  é unitário.

Para exemplificar, considere-se dois valores de  $r_1$ :

Se  $r_1 = 0$ ,

$$p_{00} = (1 - P_1)(1 - P_2)$$

$$p_{10} = P_1(1 - P_2)$$

$$p_{01} = (1 - P_1)P_2$$

$$p_{11} = P_1 P_2.$$

Neste caso, os eventos de ocorrência de chuva são independentes.

Se  $r_1 = 1$  (isto é possível se  $P_1 = P_2 = P$ ),

$$p_{00} = 1 - P$$

$$p_{10} = 0$$

$$p_{01} = 0$$

$$p_{11} = P$$

Neste caso, a probabilidade de chover num local e não chover no outro é nula.

Embora  $r_1$  possa ser negativo teoricamente, na prática de vem ser raros, se existirem, pares de localidades com correlação negativa, para a ocorrência de chuvas. Por isto nos exemplos de cálculo do Capítulo IV considera-se apenas  $r_1 \geq 0$ .

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 das taxas de precipitação, nos locais 1 e 2, pode ser escrita como:

$$f(x,y) = p_{00} f(x,y|x=0, y=0) + p_{10} f(x,y|x > 0, y=0) + \\ + p_{01} f(x,y|x=0, y > 0) + p_{11} f(x,y|x > 0, y > 0) , \quad (II.15)$$

onde as pdf condicionais são do tipo:

$$f(x,y|x=0, y=0) = \delta(x) \delta(y) \quad (II.16)$$

$$f(x,y|x > 0, y=0) = \delta(y) \gamma_1(x) \quad (II.17)$$

$$f(x,y|x=0, y > 0) = \delta(x) \gamma_2(y) \quad (II.18)$$

$$f(x,y|x > 0, y > 0) = \gamma_3(x,y,r_2) , \quad (II.19)$$

onde  $\delta(x)$  é a função impulso e  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  e  $\gamma_3$  são as funções reais positivas.

Na equação II.19 foi introduzido um coeficiente de correlação  $r_2$ , que é a correlação entre os valores das taxas de precipitação, supondo-se que chova simultaneamente nos dois pontos. A consideração parece ser razoável, porque entre dois pontos bem próximos um do outro, além da correlação associada dos eventos de ocorrência ou não de chuvas, cujo valor deverá ser próximo da unidade, deve existir também uma correlação positiva entre os valores das taxas de precipitação. Intuitivamente, pode-se conjecturar que, com o aumento da distância entre dois pontos,  $r_2$  deve cair para zero mais rapidamente do que  $r_1$ .

As funções  $\gamma_1(x)$ ,  $\gamma_2(y)$  e  $\gamma_3(x,y,r_2)$  devem satisfazer certas condições, para que a função  $f(x,y)$  seja uma função densidade de probabilidade conjunta, e as funções densidade de probabilidade marginais sejam da forma da Equação II.9. Uma solução encontrada, que satisfaz as condições acima citadas, é:

$$\gamma_1(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} S_x} \exp \left[ - \frac{\ln^2(x/M_x)}{2 S_x^2} \right] \quad (II.20)$$

$x > 0$

$$\gamma_2(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} S_y} \exp \left[ -\frac{\ln^2(y/M_y)}{2 S_y^2} \right] \quad (II.21)$$

$y > 0$

e

$$\gamma_3(x,y,r_2) = \frac{1}{2\pi S_x S_y \sqrt{1-r_2^2}} \exp \left\{ -\frac{1}{2(1-r_2^2)} \left[ \frac{\ln^2(x/M_x)}{S_x^2} - 2r_2 \frac{\ln(x/M_x) \ln(y/M_y)}{S_x S_y} + \frac{\ln^2(y/M_y)}{S_y^2} \right] \right\} \quad (II.22)$$

onde  $M_x$ ,  $M_y$  são os valores medianos de  $x$  e  $y$ , e  $S_x$  e  $S_y$ , os desvios padrões de  $\ln x$  e  $\ln y$ , respectivamente, durante a ocorrência de chuvas.

Pode-se verificar facilmente que as funções não-negativas  $\gamma_1(x)$ ,  $\gamma_2(y)$  e  $\gamma_3(x,y,r_2)$  de fato são densidades de probabilidade, isto é:

$$\int_0^{\infty} \gamma_1(x) dx = \int_0^{\infty} \gamma_2(y) dy = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \gamma_3(x,y,r_2) dx dy = 1, \quad (II.23)$$

e que  $\gamma_1(x)$  e  $\gamma_2(y)$  são as densidades marginais de  $\gamma_3(x,y,r_2)$ , pois:

$$\int_0^{\infty} \gamma_3(x,y,r_2) dx = \gamma_2(y)$$

$$\int_0^{\infty} \gamma_3(x,y,r_2) dy = \gamma_1(x)$$

A função  $f(x,y)$  também é não-negativa e, usando-se a Equação II.2, mostra-se que:

$$\int_0^{\infty} \int_0^{\infty} f(x,y) dx dy = 1$$

e das Equações II.24, calculam-se as pdfs marginais:

$$f_x(x) = \int_0^{\infty} f(x,y) dy = (1 - P_1) \delta(x) + P_1 \gamma_1(x)$$

e

$$f_y(y) = \int_0^{\infty} f(x,y) dx = (1 - P_2) \delta(y) + P_2 \gamma_2(y),$$

que são log-normais.

Verifica-se 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:

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

Através das Relações II.6, pode-se obter a função densidade conjunta das atenuações,  $a_1$  e  $a_2$ , a partir da função densidade conjunta das taxas de precipitação. Sendo  $a_1, \alpha_1, \beta_1, \ell_1$  e  $a_2, \alpha_2, \beta_2, \ell_2$  os valores da atenuação por chuvas, dos parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  e do comprimento do trajeto sujeito a chuvas, nos pontos 1 e 2 respectivamente, tem-se:

$$a_1 = \ell_1 \alpha_1 x^{\beta_1}$$

$$a_2 = \ell_2 \alpha_2 y^{\beta_2}$$

e a função densidade conjunta

$$f(a_1, a_2) = p_{00} \delta(a_1) \delta(a_2) + p_{10} \delta(a_2) \gamma_1(a_1) + \\ + p_{01} \delta(a_1) \gamma_2(a_2) + p_{11} \gamma_3(a_1, a_2, r_2), \quad (\text{II.26})$$

onde

$$\gamma_1(a_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} S_1 a_1} \exp \left[ - \frac{\ln^2(a_1/M_1)}{2 S_1^2} \right]$$

$$\gamma_2(a_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} S_2 a_2} \exp \left[ - \frac{\ln^2(a_2/M_2)}{2 S_2^2} \right]$$

$$\gamma_3(a_1, a_2, r_2) = \frac{1}{2 \pi S_1 S_2 \sqrt{1-r_2^2} a_1 a_2} \exp \left\{ - \frac{1}{2(1-r_2^2)} \cdot \right.$$

$$\left. \left[ \frac{\ln^2(a_1/M_1)}{S_2^2} - \frac{2 r_2 \ln(a_1/M_1) \ln(a_2/M_2)}{S_1 S_2} + \frac{\ln^2(a_2/M_2)}{S_2^2} \right] \right\}$$

e

$$M_1 = \ell_1 \alpha_1 M_x^{\beta_1}$$

$$S_1 = \beta_1 S_x$$

$$M_2 = \ell_2 \alpha_2 M_y^{\beta_2}$$

$$S_2 = \beta_2 S_y$$



## CAPÍTULO III

### MÉTODO DE CÁLCULO DE DISPONIBILIDADE

#### 3.1 - MÉTODO NUMÉRICO

Nesta seção, descreve-se o método utilizado para obter a distribuição de probabilidades da relação sinal/ruído (C/N), usando-se a Equação II.1 e a função densidade de probabilidade conjunta das atenuações, dada pela Equação II.25.

O método normalmente utilizado em cálculo de enlaces resulta numa distribuição aproximada para a relação sinal/ruído calculada a partir das distribuições marginais de atenuação. Para uma disponibilidade especificada, determinam-se, nas duas distribuições marginais, os valores de atenuação mínimos, que não são excedidos durante a percentagem de tempo especificada, e calcula-se a relação sinal/ruído, aplicando-se esses valores de atenuação na Equação do enlace II.1. Esse método de cálculo corresponde a considerar a correlação entre as duas distribuições igual à unidade, quando a probabilidade de ocorrência de chuvas for a mesma nos pontos de transmissão e de recepção ( $P_1=P_2$ ); caso contrário, é ainda um cálculo aproximado que supõe implicitamente uma forte correlação entre as distribuições. A grande vantagem deste método em relação aos que se desceve a seguir é que, a partir de uma disponibilidade especificada, pode-se determinar de maneira simples e direta os parâmetros do sistema, necessários para atingir uma dada relação sinal/ruído, com a referida disponibilidade.

A distribuição de probabilidade da relação sinal/ruído é calculada de uma forma mais rigorosa por Lyons (1974), que desenvolve uma expressão para a função densidade de probabilidade da relação sinal/ruído, a partir de uma equação correspondente à Equação II.1. A expressão obtida por Lyons (1974) é resolvida numericamente com auxílio de computador. Bantin e Lyons (1978) usam esse método para obter a distribuição de probabilidade da atenuação adicional, que ocorre em um enlace (além da atenuação mínima que ocorreria em condições ideais); ou

seja, a diferença entre o valor máximo possível de  $C/N$  e o valor de  $C/N$  na presença de atenuações. Bantín e Lyons incluíram entre as atenuações e perdas adicionais (aleatórias), além dos efeitos da chuva, os efeitos da cintilação ionosférica e troposférica e dos erros de apontamento das antenas, causados pelo vento; entretanto, as atenuações por chuvas nos lances de subida e descida (bem como as demais atenuações e perdas aleatórias) foram consideradas independentes.

No presente trabalho, verificou-se, também, a impossibilidade de resolver o problema analiticamente; escolheu-se então um método numérico para o cálculo da disponibilidade. Sendo  $a_1$  e  $a_2$  os valores (expressos em dB) das atenuações por chuva nos lances de subida e descida, respectivamente, o método consiste em determinar, para a relação sinal/ruído de interesse,  $(C/N)_0$ , a região  $S$  do plano  $a_1 \times a_2$ , na qual  $C/N$  ultrapassa  $(C/N)_0$ , e calcular a integral da função densidade de probabilidade  $f(a_1, a_2)$  (Equação II.25) sobre a região. Constata-se facilmente pela relação entre  $C/N$  e as atenuações que  $S$  é uma região simplesmente conexa do primeiro quadrante do plano, que contém sua origem e é contígua aos eixos. O limite da região  $S$  é a linha obtida com  $(C/N) = (C/N)_0$ , na Equação II.1. A Figura III.1 apresenta a região  $S$  no plano  $a_1 \times a_2$ .

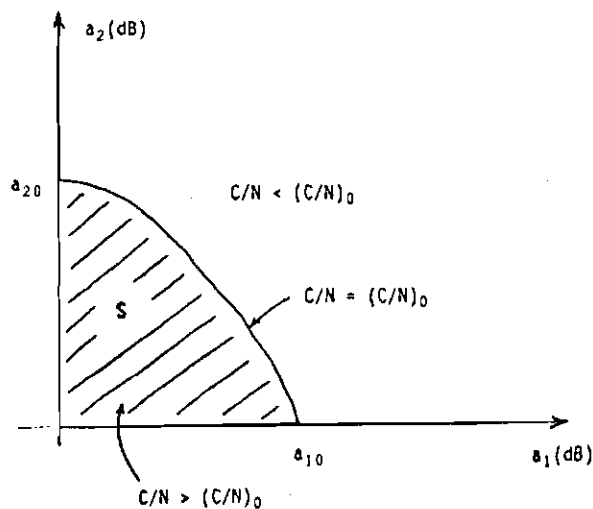


Fig. III.1 - Região  $S$  no plano  $a_1 \times a_2$

Então, a disponibilidade é dada por:

$$P_d = \iint_S f(a_1, a_2) da_1 da_2$$

Substituindo-se  $f(a_1, a_2)$  pela expressão da Equação II.25, tem-se:

$$P_d = p_{11} \iint_S \delta(a_1)\delta(a_2)da_1 da_2 + p_{10} \iint_S \delta(a_2)\gamma_1(a_1)da_1 da_2 +$$

$$+ p_{01} \iint_S \delta(a_1)\gamma_2(a_2)da_1 da_2 + p_{11} \iint_S \gamma_3(a_1, a_2, r_2)da_1 da_2,$$

donde vem, se a região S existir, que:

$$P_d = P_{00} + P_{10} \int_0^{a_{10}} \gamma_1(a_1)da_1 + p_{01} \int_0^{a_{20}} \gamma_2(a_2)da_2 +$$

$$+ p_{11} \iint_S \gamma_3(a_1, a_2, r_2) da_1 da_2 \tag{III.1}$$

As integrais simples da expressão acima são calculadas, usando-se a sub-rotina SIMINT, disponível no computador Burroughs B - 6800 do INPE. A integral dupla da última parcela é calculada, usando-se a sub-rotina DBLINT, também disponível no computador do INPE. a sub-rotina DBLINT, entretanto, calcula apenas integrais duplas sobre regiões retangulares, de modo que, para o cálculo da integral, a região S teve que ser subdividida em pequenos retângulos, como mostra a Figura III.2.

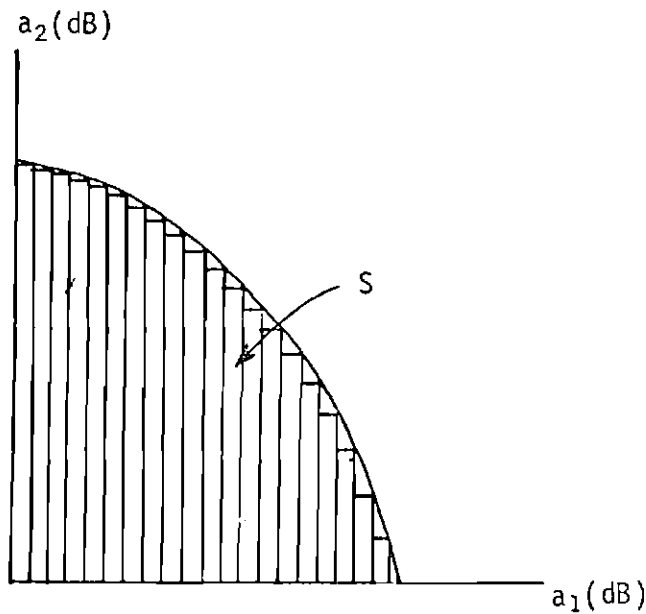


Fig.III.2 - Subdivisão da Região S

No capítulo seguinte são mostrados os resultados de cálculo de disponibilidade para dois tipos de sistema. Os detalhes do programa de computação são mostrados no Apêndice B.

### 3.2 - ESTUDO PARA MODELO LINEAR DE ENLACE

No caso de um sistema SCPC, para o qual o modelo de enlace da Figura II.1 pode ser considerado linear ( $T_i$  e  $H$  constantes), pode-se desenvolver uma expressão simples para a pdf, do inverso da relação sinal/ruído. A relação N/C pode ser escrita, a partir da Equação II.1, da seguinte forma:

$$n'_C = (k_1 + k_2 a'_2) a'_1, \quad (\text{III.2})$$

onde  $k_1$  e  $k_2$  são constantes positivas, função dos parâmetros do sistema;  $a'_1$  e  $a'_2$  são fatores de atenuação por chuva nos lances de subida e descida, respectivamente;  $n'_C$ ,  $a'_1$  e  $a'_2$  são fatores, cujos respectivos valores expressos em dB são  $n_C$ ,  $a_1$  e  $a_2$ .

Na Equação III.2, nota-se que  $n'_C$  cresce monotonicamente com  $a'_1$ , logo:

$$P(n'_c \leq \beta' | a'_2 = \alpha') = P(a'_1 \leq \frac{\beta'}{k_1 + k_2 \alpha'} | a'_2 = \alpha')$$

Então:

$$\begin{aligned} f_{n'_c}(\beta' | a'_2 = \alpha') &= \frac{\partial P(n'_c \leq \beta' | a'_2 = \alpha')}{\partial \beta'} = \\ &= f_{a'_1}(\gamma' | a'_2 = \alpha') \frac{\partial \gamma'}{\partial \beta'} = f_{a'_1}(\gamma' | a'_2 = \alpha') \frac{1}{k_1 + k_2 \alpha'}, \end{aligned}$$

onde

$$\gamma' = \frac{\beta'}{k_1 + k_2 \alpha'}$$

Tem-se então:

$$\begin{aligned} f_{n'_c}(\beta') &= \int_1^{\infty} f_{n'_c}(\beta' | a'_2 = \alpha') \cdot f_{a'_2}(\alpha') d\alpha' = \\ &= \int_1^{\infty} \frac{f_{a'_1 a'_2}(\gamma', \alpha')}{k_1 + k_2 \alpha'} d\alpha' \end{aligned} \quad (III.3)$$

Na Equação III.3, a pdf conjunta  $f_{a'_1 a'_2}(\alpha', \gamma')$  tem como argumentos os fatores de atenuação, enquanto a pdf conjunta da Equação II.25 tem como argumentos os fatores expressos em dB. A transformação de variáveis pode ser feita pela relação:

$$f_{a_1 a_2}(x, y) = \frac{dx'}{dx} \cdot \frac{dy'}{dy} f_{a'_1 a'_2}(x', y'), \quad (III.4)$$

porque a relação entre  $x'$  e  $x$ , e entre  $y'$  e  $y$  é monotônica crescente. Usando-se a Equação III.4 na Equação III.3 e mudando-se a variável de integração, resulta:

$$f_{n'_c}(\beta) = \int_0^{\infty} f_{a_1 a_2} \left( 10 \log \frac{\beta'}{k_1 + k_2 \alpha'}, \alpha \right) d\alpha, \quad (III.5)$$

onde  $\alpha$  e  $\beta$ , respectivamente, são os valores de  $\alpha'$  e  $\beta'$  expressos em dB.

Não parece ser possível resolver analiticamente a integral da Equação III.5, se a pdf conjunta for dada pela Equação II.25. Entretanto, a Equação III.5 pode ser simplificada, notando-se, através dos resultados de cálculos do Capítulo IV, que o limite da região da integração  $S$  é praticamente uma linha reta. A Equação III.5 tem, então, a seguinte forma aproximada:

$$f_{n_c}(\beta) = \int_0^{\infty} f_{a_1 a_2}(k_3 - k_4 \alpha, \alpha) d\alpha, \quad (\text{III.6})$$

onde  $k_3$  e  $k_4$  são constantes.

Mesmo a integral da Equação III.6 não parece ser solucionável analiticamente, para a pdf conjunta da Equação II.25; entretanto, ela pode ser útil, se a pdf conjunta puder ser aproximada por outra função que seja integrável.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS E CONCLUSÕES

Neste capítulo, apresentam-se os resultados de cálculo de disponibilidade de enlaces, usando-se o método apresentado no Capítulo III e a pdf conjunta da Equação II.25, para dois tipos de sistema: um sistema com múltiplas portadoras FDMA/SCPC, e um com portadora única por repetidor.

As características de segmento espacial, utilizadas nos cálculos, estão resumidas na Tabela IV.1 e no Apêndice A.

TABELA IV.1

#### CARACTERÍSTICAS DO SATÉLITE

- Frequências	14/12 GHz
- Longitude aproximada	70° 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 <sup>2</sup>
- Ganho da antena receptora	30 dB
- Relação ganho/temperatura de ruído térmico. (1),(2)	- 2 dB/K
- Largura de faixa do repetidor	36 MHz

(1) Valor correspondente ao centro do feixe de radiação

(2) Repetidor saturado por portadora única

(3) Valor nominal, ajustável na otimização de enlaces.

#### 4.1 - SISTEMA COM CANAL SINGELO POR PORTADORA (SCPC)

Os exemplos apresentados nesta seção referem-se a enlaces entre duas estações de um sistema de múltiplo acesso por divisão de frequências (FDMA), com canal singelo por portadora (SCPC) e com portadoras ativadas por voz. As características gerais do sistema, utilizadas nos cálculos, são:

- FDMA/SCPC com 800 canais por repetidor de 36 MHz (separação entre canais de 45 kHz);
- largura de faixa equivalente de ruído branco, e largura de faixa útil para o sinal, em um canal SCPC, igual a 38 kHz.

Considerou-se que todas as estações terrenas componentes da rede tinham as mesmas características de potência transmitida por canal, temperatura de ruído do receptor e diâmetro de antena. Fizeram-se cálculos para os três tipos de estações terrenas, com as seguintes características:

- A - antena com diâmetro de 2,4 m;  
transmissor com potência de 1W/canal;  
receptor com temperatura de ruído de 300K.
- B - antena com diâmetro de 3,0 m;  
transmissor com potência de 1W/canal;  
receptor com temperatura de ruído de 300K.
- C - antena com diâmetro de 2,4 m;  
transmissor com potência de 2W/canal;  
receptor com temperatura de ruído de 300K.

Os cálculos foram feitos para a situação de plena carga, definida como aquela em que estão em uso todos os 800 canais do repetidor, levando-se em conta um fator de atividade global de 0,5, ou seja, 400 portadoras transmitidas simultaneamente pelo repetidor. Esta é a pior situação possível, porque o recuo de entrada do repetidor (ver Apêndice A), considerado constante neste caso, é mínimo e, consequentemente, na Equação II.1,  $T_i$  é máximo e  $H$  é mínimo. Nos cálculos, consi



dera-se também que as estações terrenas estão localizadas nos extremos da área coberta pelo satélite.

A suposição de que o ponto de operação do repetidor é constante pode parecer contraditória, uma vez que se estuda o efeito de correlação positiva entre as atenuações, em locais diferentes. Entretanto, como a diferença de recuo na entrada do repetidor é bastante difícil de ser calculada (exigindo o conhecimento de dados estatísticos de extensões de área onde pode ocorrer precipitação simultânea, além da distribuição específica das estações sobre o território), essa suposição foi utilizada, e se justifica, porque supor o ponto de operação constante corresponde a fazer cálculos para o pior caso possível, em que há precipitação apenas nas duas estações terrenas do enlace considerado.

A Figura IV.1 apresenta, para o caso de rede composta por 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 IV.2, apresenta-se, para o mesmo caso, um gráfico com 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 IV.3 e IV.4 correspondem, respectivamente, às Figuras IV.1 e IV.2, para o caso de rede composta de estações do tipo B. As Figuras IV.5 e IV.6 correspondem, respectivamente, às Figuras IV.1 e IV.2, para o caso de rede composta de estações terrenas do tipo C.

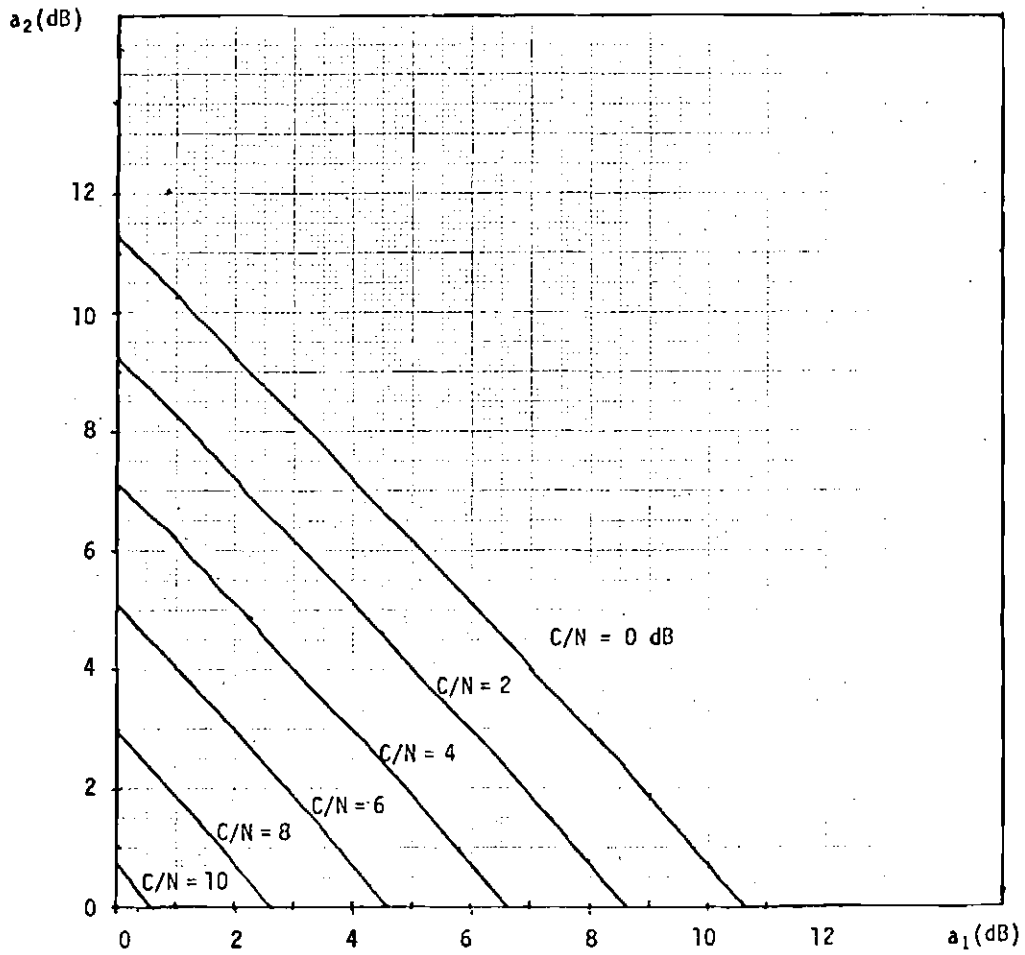


Fig. IV.1 - Curvas  $C/N =$  constante no plano  $a_1 \times a_2$ , em enlace entre estações com características do tipo A

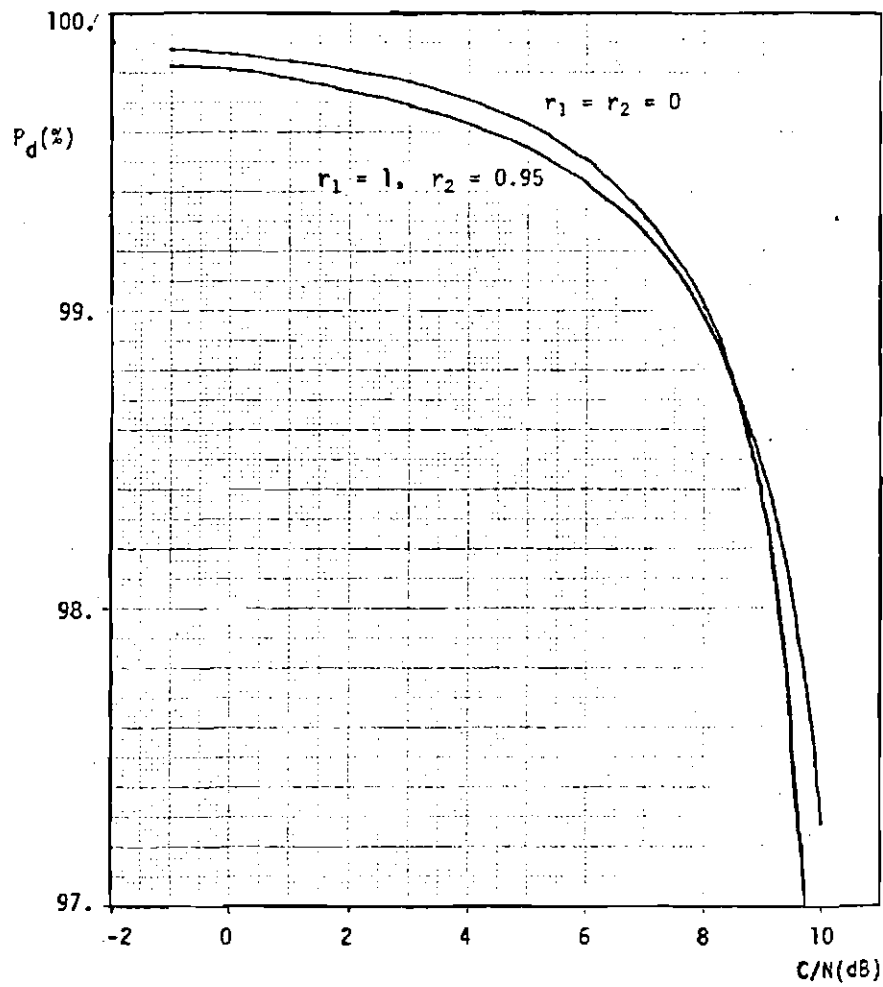


Fig. IV.2 - Curvas de disponibilidade em função da relação C/N, para enlace entre estações do tipo A

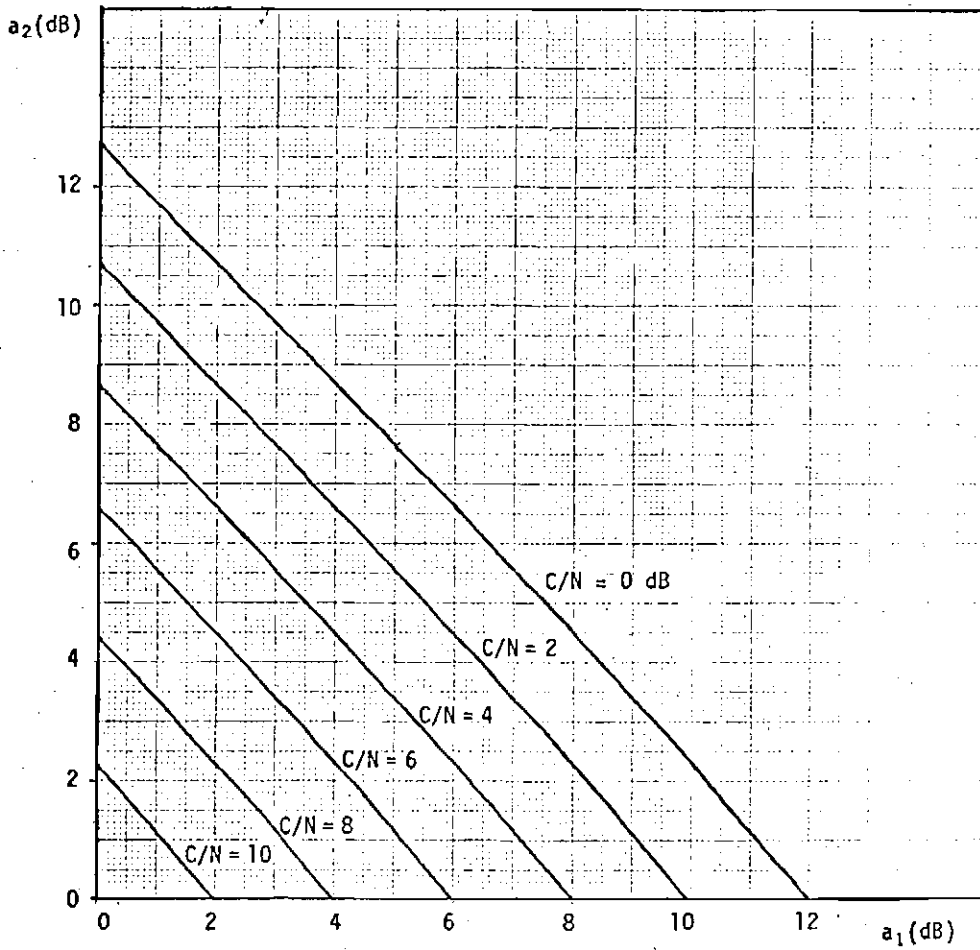


Fig. IV.3 - Curvas  $C/N = \text{constante}$  no plano  $a_1 \times a_2$ , em enlace entre estações com características do tipo B

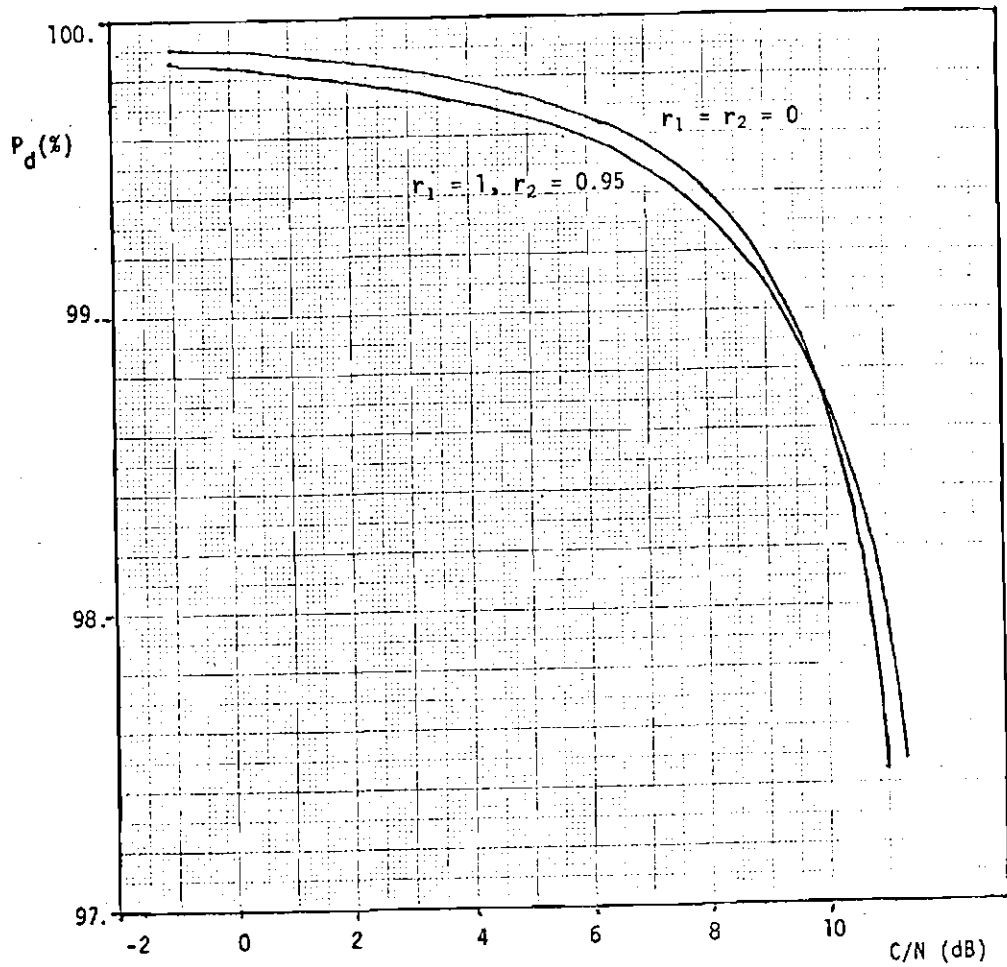


Fig. IV.4 - Curvas de disponibilidade em função da relação C/N, para enlace entre estações com características do tipo B

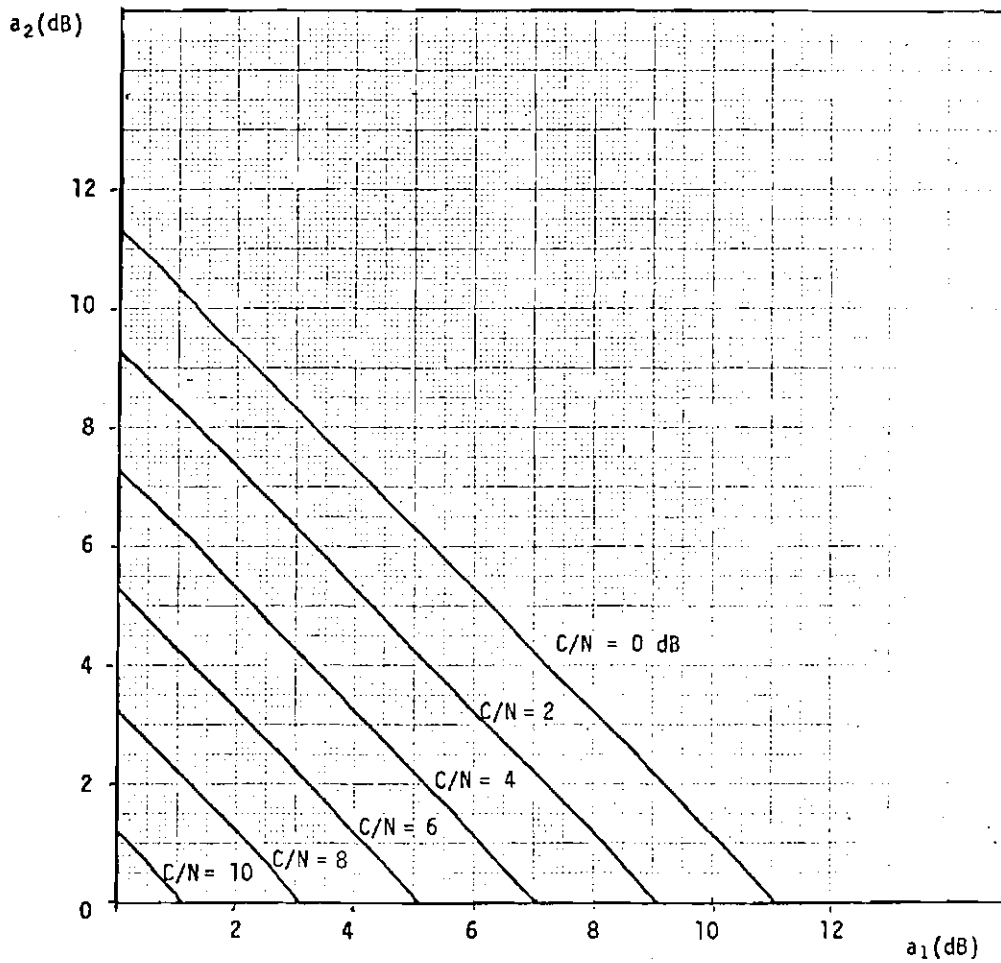


Fig. IV.5 - Curvas  $C/N =$  constante plano  $a_1 \times a_2$ , em enlace entre estações com características do tipo C

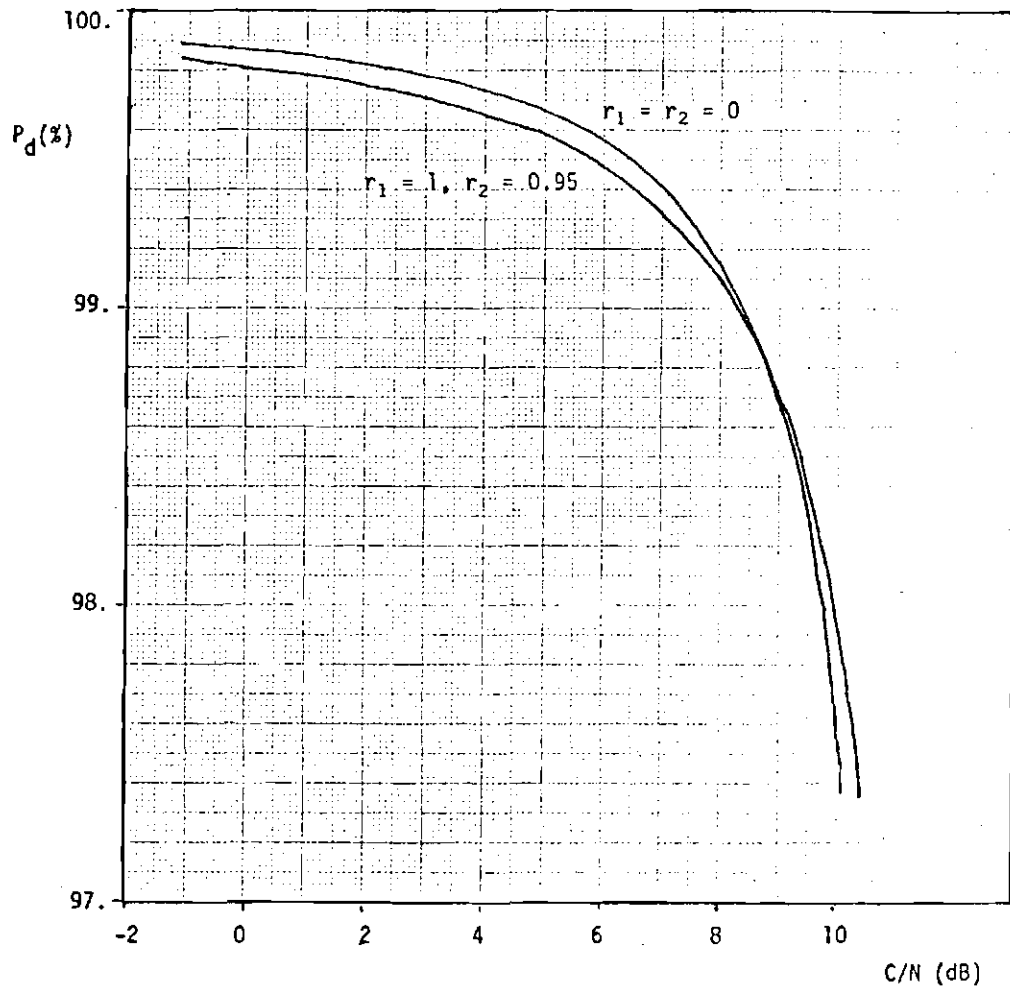


Fig. IV.6 - Curvas de disponibilidade em função da relação  $C/N$ , para enlace entre estações com características do tipo  $\bar{C}$

Observando-se as figuras referentes aos três casos, pode-se notar alguns fatos interessantes. Nas Figuras IV.1, IV.3 e IV.5, nota-se que as linhas que delimitam as regiões S no plano  $a_1 \times a_2$  são aproximadamente retas. Nas Figuras IV.2, IV.4 e IV.6, nota-se que a diferença existente entre as curvas de correlação nula e de forte correlação torna-se importante, quando a disponibilidade é elevada. Na Figura IV.2 por exemplo, para a disponibilidade de 99,8% há uma diferença de aproximadamente 2 dB entre os valores de relação C/N, que são superados nessa percentagem de tempo. Outra maneira de notar a importância da diferença entre os resultados é pela comparação entre os tempos em que o sistema fica indisponível. Para C/N = -1, a percentagem de tempo indisponível é de 0,12%, no caso não correlacionado, e de 0,17%, no caso de forte correlação, existindo, portanto, uma diferença de quase 50% entre os tempos.

Outro fato interessante é o cruzamento entre as curvas, que aparece nas Figuras IV.2, IV.4 e IV.6, Isto pode ser explicado intuitivamente, lembrando-se que enquanto no caso de forte correlação ( $r_1 = 1$ ) as chuvas ocorrem simultaneamente nos pontos de transmissão e recepção, no caso não-correlacionado, a ocorrência de chuvas simultâneas é rara, porque a probabilidade marginal de ocorrência de chuvas é pequena. Então, considerando-se a forma da região de integração S, pode-se notar que, quando a margem do enlace para atenuação é grande, a probabilidade dessa margem ser superada com atenuação nos dois lances tende a ser maior do que com atenuação em cada lance, separadamente. Por outro lado, se a margem do enlace for pequena e puder ser facilmente superada com atenuação em um só lance, o caso não-correlacionado tende a ser mais pessimista, porque nele a probabilidade de ocorrência de chuvas em pelo menos um dos lances é maior.

Em sistemas de comunicação de voz, particularmente no caso do sistema SCPC estudado, é interessante calcular a disponibilidade de um circuito constituído de um enlace de ida e de volta. A percentagem de tempo em que um circuito fica indisponível é limitada superiormente pela soma das percentagens de tempo de indisponibilidade de cada um dos enlaces (de ida e de volta), e é limitada inferiormente pela maior dessas percentagens. Entretanto, é de se esperar, neste caso, uma gran



de chance dos dois enlaces ficarem indisponíveis simultaneamente. Faz-se aqui o estudo de um caso particular, para ilustrar o problema.

Usando a Equação II.24, pode-se obter a curva da Figura IV.7, que corresponde à curva de  $C/N = 4$  da Figura IV.1, com taxas de precipitação em lugar de atenuações nos eixos. Na região  $S_r$  da Figura IV.7, 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 Figura IV.7, em relação à reta  $R_1=R_2$ . A Figura IV.8 apresenta essas duas linhas e a região  $S_c$ , na qual os dois enlaces, de ida e de volta, estão disponíveis. A disponibilidade do circuito é dada, então, pela integral da função densidade conjunta das taxas de precipitação sobre a região  $S_c$ . Pode-se notar que há uma importante superposição entre as regiões de disponibilidade dos enlaces de ida e de volta, justamente na região do plano em que a densidade conjunta assume valores mais elevados.

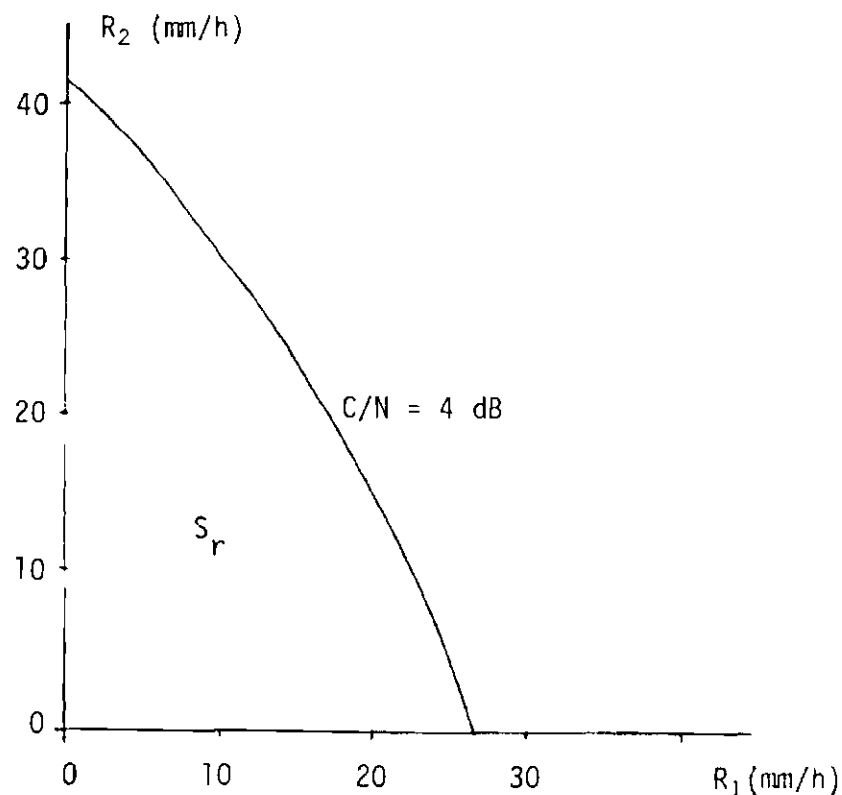


Fig. IV.7 - Curva de  $C/N = 4$  dB no plano  $r_1 \times r_2$ , para estações do tipo A.

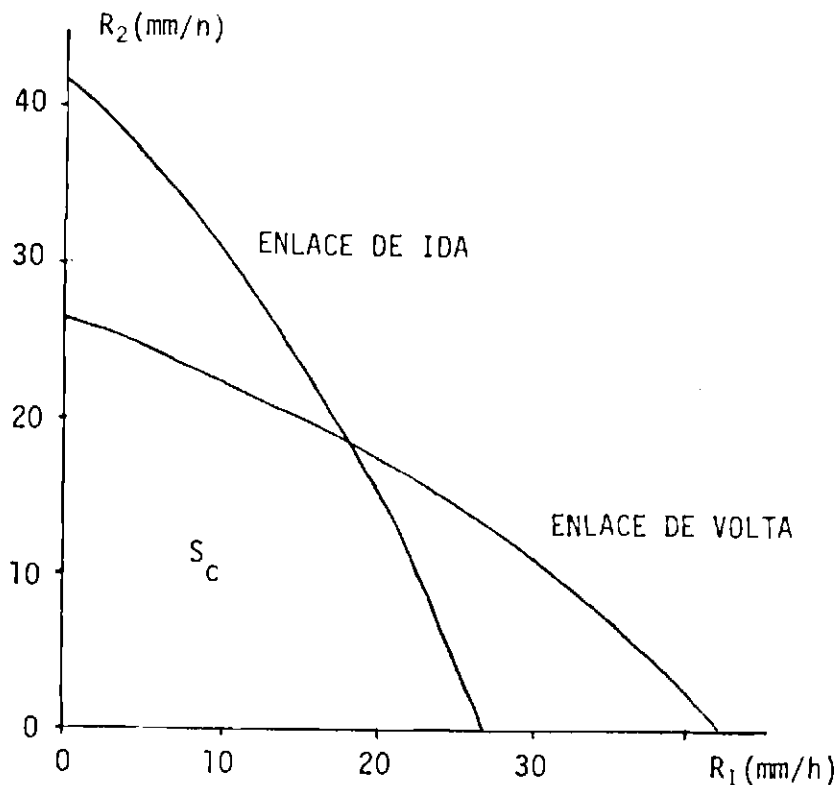


Fig. IV.8 - Curvas de  $C/N = 4$  dB no plano  $r_1 \times r_2$ , para enlaces de ida e de volta.

#### 4.2 - SISTEMA COM PORTADORA ÚNICA POR REPETIDOR

Os exemplos apresentados nesta seção referem-se a enlaces, nos quais uma sã portadora ocupa toda a faixa do repetidor. Este caso pode ocorrer em transmissão de televisão por satélite, bem como em telefonia. Fizeram-se cálculos para os tres 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 300K.

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

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

As Figuras IV.9 e IV.10 correspondem, respectivamente, às Figuras IV.1 e IV.2, para um enlace entre duas estações do tipo D; as Figuras IV.11 e IV.12 correspondem, respectivamente, às Figuras IV.1 e IV.2, para um enlace entre duas estações com características do tipo E; as Figuras IV.13 e IV.14 correspondem respectivamente, às Figuras IV.1 e IV.2, para um enlace entre duas estações com características do tipo F.

Observando-se as figuras referentes aos três últimos exemplos (estações do tipo D, E e F), nota-se algumas diferenças marcantes em relação às aquelas dos três primeiros exemplos. Nas Figuras IV.9, IV.11 e IV.13, nota-se que as linhas que delimitam as regiões S no plano  $a_1 \times a_2$  são bastante recurvadas. Isto se deve ao fato do repetidor estar operando perto da saturação, onde a variação de potência na saída é pequena em relação à variação de potência na entrada. Como consequência da mudança na forma das regiões S, nota-se, nas Figuras IV.10, IV.12 e IV.14, que a diferença existente entre as curvas de correlação nula e de forte correlação torna-se pequena, quando a disponibilidade é elevada. A forma tomada pelas regiões S favorece o sistema, quando há forte correlação entre as atenuações nos lances de subida e de descida.

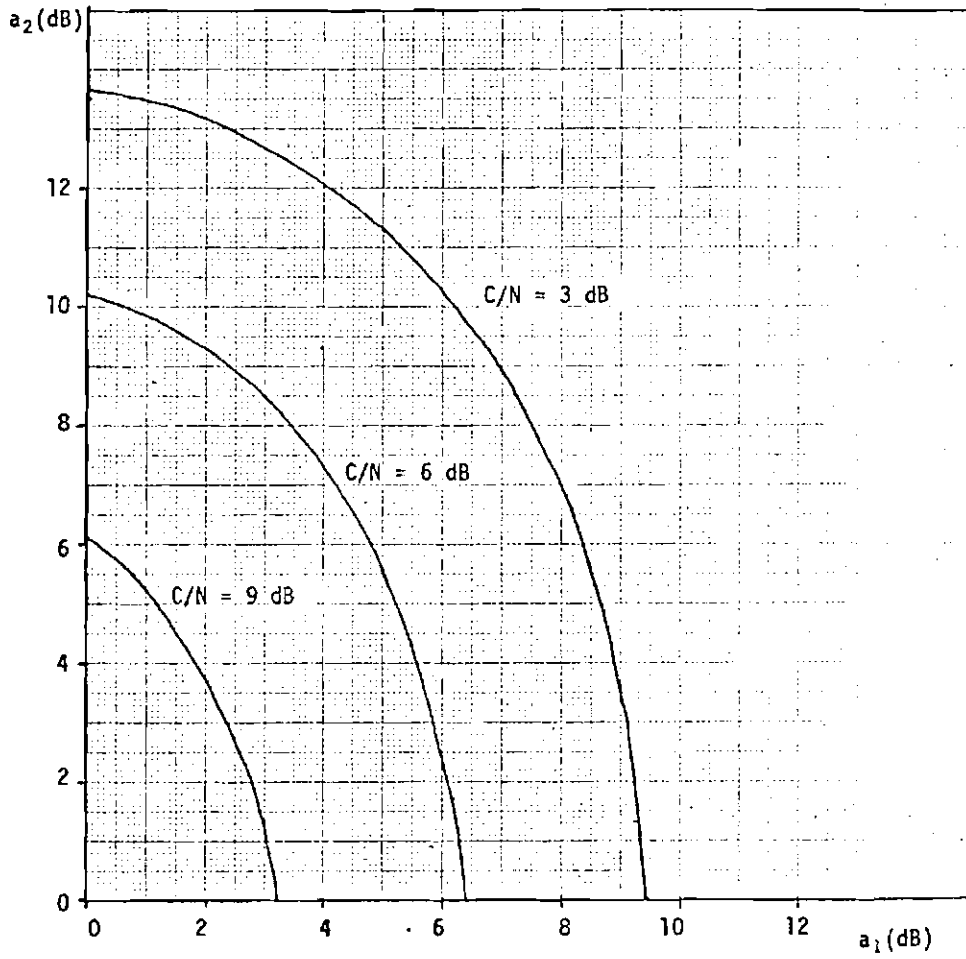


Fig. IV.9 - Curvas  $C/N = \text{constante}$  no plano  $a_1 \times a_2$ , para enlace entre estações com características do tipo D

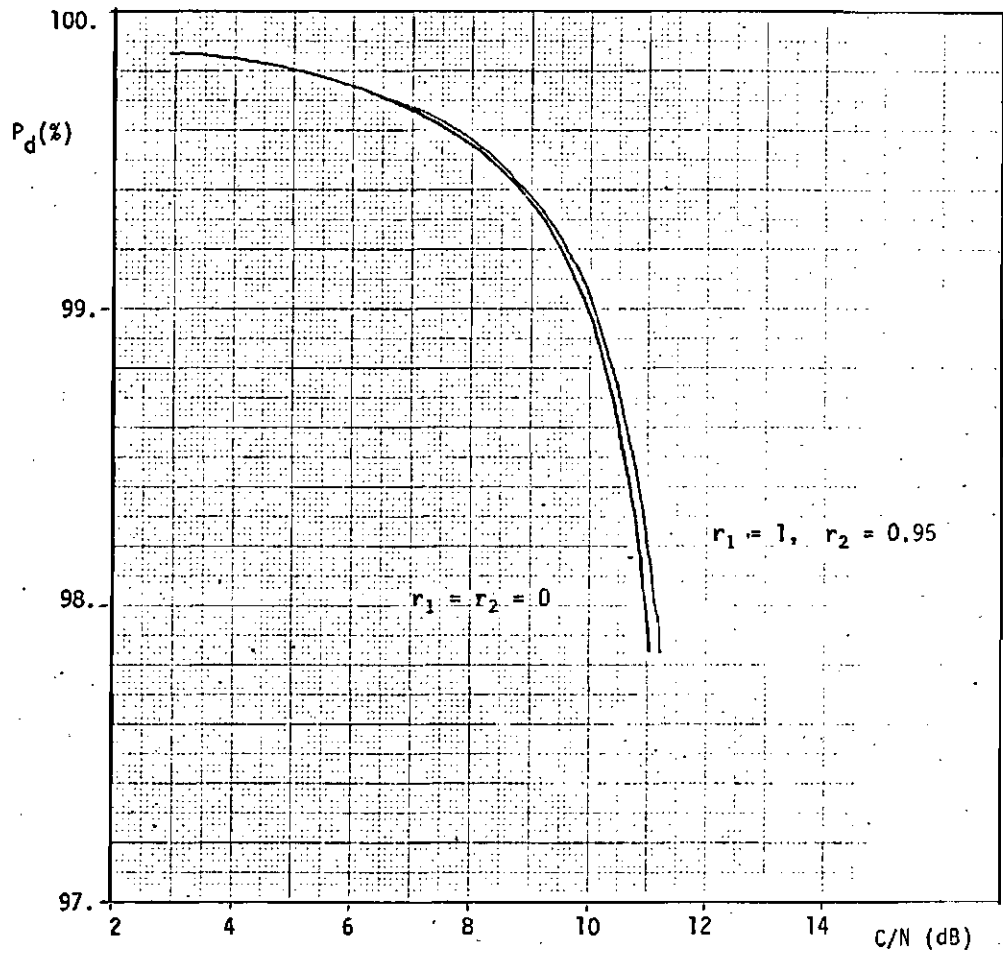


Fig. IV.10 - Curvas de disponibilidade em função da relação  $C/N$ , para enlace entre estações com características do tipo D

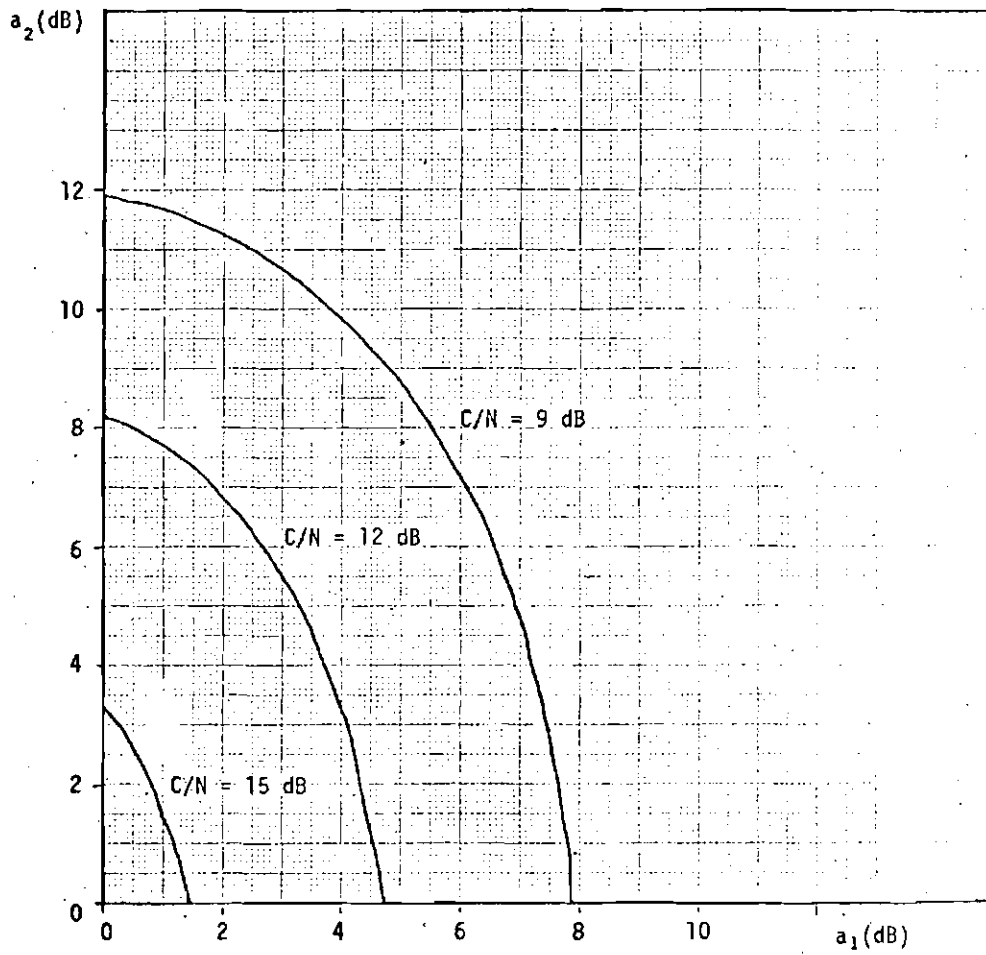


Fig. IV.11 - Curvas  $C/N = \text{constante}$  no plano  $a_1 \times a_2$ , para enlace entre estações com características do tipo E

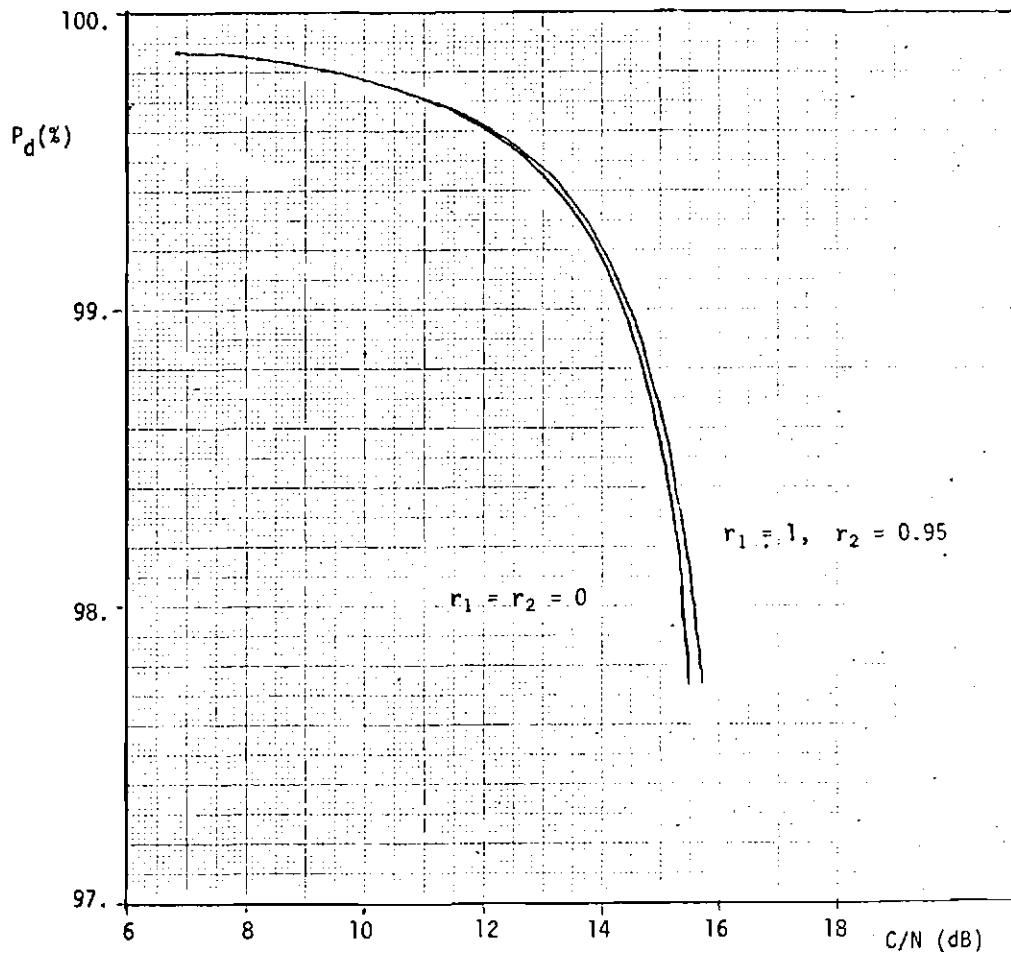


Fig. IV.12 - Curvas de disponibilidade em função da relação  $C/N$ , para enlaces entre estações características do tipo E

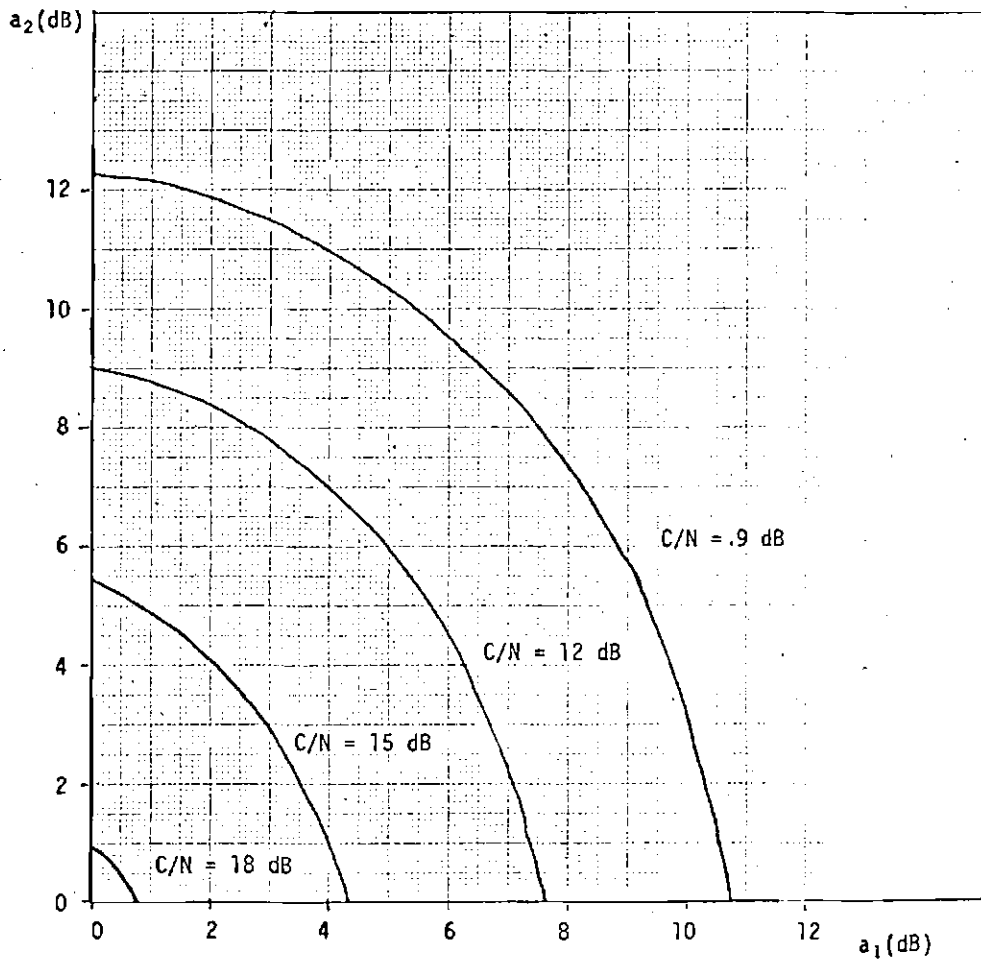


Fig. IV.13 - Curvas  $C/N = \text{constante}$  no plano  $a_1 \times a_2$ , em enlace entre estações com características do tipo F



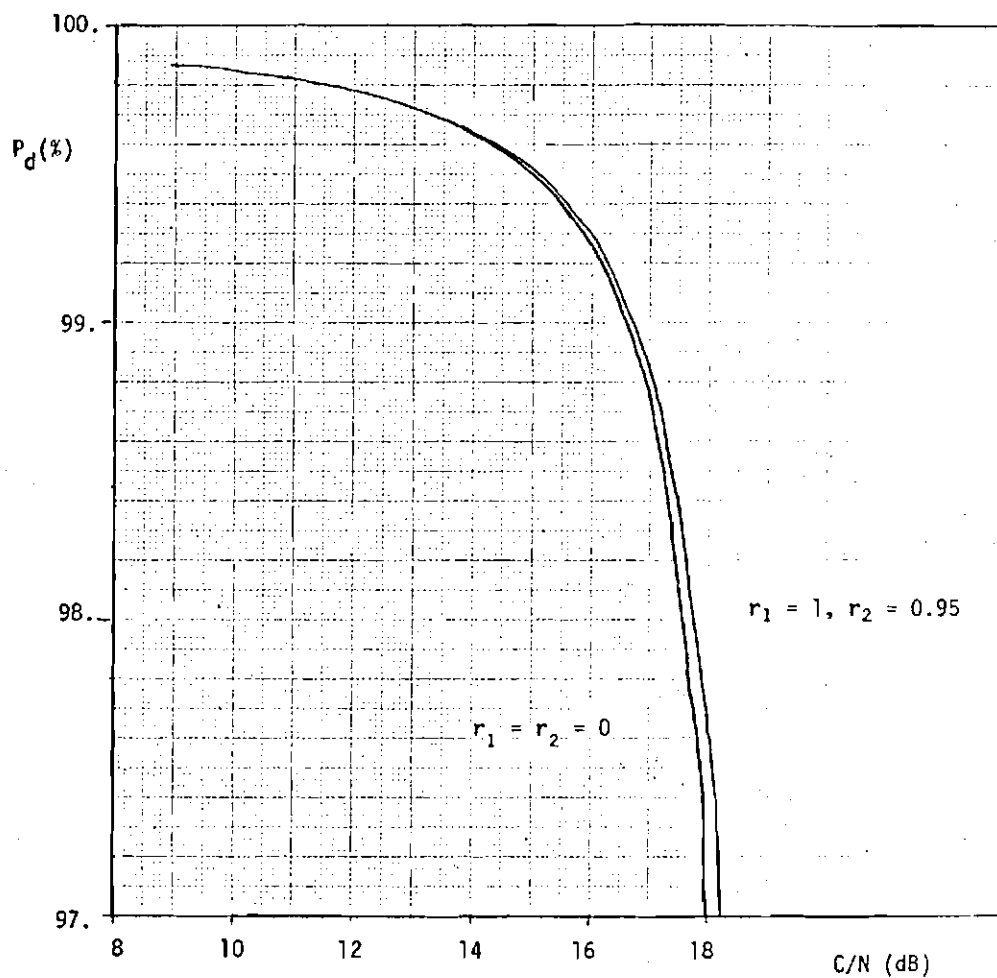


Fig. IV.14 - Curvas de disponibilidade em função da relação  $C/N$ , para enlaces entre estações com características do tipo F

#### 4.3 - COMENTÁRIOS FINAIS

Deve-se observar que, na obtenção da distribuição da atenuação a partir da distribuição das taxas de precipitação, o comprimento do trajeto sujeito a chuvas,  $\ell$  (Equação II.24), foi considerado constante (função apenas do ângulo de elevação da estação terrena).

Como consequência disto, a distribuição das atenuações se torna pessimista para atenuações fortes, porque células de chuva intensa são bastante limitadas em extensão, interceptando apenas trecho do trajeto sujeito a chuvas, principalmente em ângulos de elevação pequenos. Este problema foi considerado por Lin et alii (1980), que apresentaram uma fórmula empírica de um fator de correção para  $\ell$  em função da taxa de precipitação, obtida através de medidas simultâneas de taxa de precipitação e atenuação por chuvas, em um dado local. De acordo com essa fórmula há uma redução de aproximadamente 15% no valor de  $\ell$ , em relação ao seu valor em taxas de precipitação baixas, para taxas de precipitação de 100 mm/h. Isto torna os resultados pessimistas nos casos onde a região de integração S (Figura III.1) inclui valores de atenuação correspondentes a taxas de precipitação altas.

Deve-se lembrar, entretanto, que o aspecto comparativo dos resultados obtidos neste trabalho continua válido e que, como Lin et alii (1980) constataram que a distribuição da atenuação continua aproximadamente log-normal, a consideração do fator de correção acarretaria numa mudança nos valores dos parâmetros da distribuição log-normal. É importante notar que este problema não existiria, se dados estatísticos correspondentes a medidas diretas da atenuação no enlace considerado fossem disponíveis, em lugar de dados estatísticos de precipitação.

Deve-se observar também que os resultados obtidos neste trabalho referem-se a disponibilidade a longo prazo. A disponibilidade do enlace no mês do ano no qual há maior pluviosidade será, então, menor que a calculada neste trabalho. Não se conhece ainda a existência de dados que permitam calcular a disponibilidade no pior mês.

Diante dos resultados obtidos, pode-se dizer que, para o caso de sistema SCPC, o conhecimento da distribuição conjunta das atenuações é importante no cálculo da disponibilidade de um enlace. Não se conhece a existência de dados que possam ser utilizados na obtenção dessas distribuições conjuntas. Alguns tipos de experiências que poderiam ser úteis são, por exemplo, medidas simultâneas da taxa de precipitação e da atenuação em diversos ângulos de elevação e em diversos locais com diferentes regimes de chuvas. Medidas simultâneas, em locais diferentes, de atenuação ou de taxa de precipitação, e monitoração da relação C/N de um enlace fornecem dados que podem ser utilizados na determinação da correlação existente entre as atenuações das duas localidades. Esses e outros dados dessa natureza seriam úteis para verificarse realmente a pdf conjunta da Equação II.25 é uma boa aproximação, e quais os valores de  $r_1$  e  $r_2$  que devem ser utilizados nos cálculos.

## AGRADECIMENTOS

Ao Aydano Barreto Carleial que propôs o trabalho e muito auxiliou no seu desenvolvimento.

Aos muitos outros que de alguma forma colaboraram no trabalho.

## 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.
- AZEVEDO, C.A. *Multiportadoras FDM/FM por transponder*. Rio de Janeiro, CETUC, 1975.
- 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, Ago. 1978. (INPE 1348-NTE/130).
- CRANE, R.K. Prediction of the effects of rain on satellite communications systems. *Proceedings of IEEE*, 65(3):456-474, Mar. 1977.
- INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, INTERNATIONAL RADIO CONSULTATIVE COMMITTEE (ITU-CCIR). Propagation data required for space telecommunications systems. In: PLENARY ASSEMBLY, 13., Geneva, 1974, v.5, p. 249-256, Geneva, ITU, 1975.
- LIN, S.H. A method for calculating rain attenuation distributions on microwave paths, *Bell System Technical Journal*, 54(6):1051-1086, Jul. 1975.
- \_\_\_\_\_ Statistical behaviour of rain attenuation, *Bell System Technical Journal*, 52(4):557-581, Apr. 1973
- 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, Feb. 1980.
- LYONS, R.G. Combined effects of up- and down-link fading through a power-limiting satellite repeater, *IEEE Transaction on Communications*, 22(3):350-354, Mar. 1974.
- OLSEN, R.L.; ROGER, D.V.; HODGE, D.B. The  $aR^b$  relation in the calculation of rain attenuation. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 26(2):318-329, Mar. 1978.

PAPOULIS, A. *Probability, random variables, and stochastic processes.*  
Tokyo, McGraw-Hill, 1965.

PARES, J.; TOSCAR, V. *Les systemes de telecommunications par  
satellites.* Paris, Masson, 1975.

## APÊNDICE A

### CARACTERÍSTICAS DO REPETIDOR

A potência e o desvio relativo de fase, na saída de uma válvula de ondas progressivas (TWT) de um repetidor (transponder) de satélite, são funções não-lineares da potência de entrada. Como consequência, quando várias portadoras são amplificadas pelo mesmo repetidor, surgem produtos de intermodulação. Se as portadoras forem regularmente espaçadas, os produtos de intermodulação caem sobre as próprias frequências das portadoras, sendo que um número maior de produtos cai sobre as portadoras localizadas perto do centro da faixa do repetidor. Neste caso, a relação portadora/ruído de intermodulação total do repetidor,  $C/N_i$ , depende essencialmente do nível de potência na entrada do repetidor em relação ao nível de saturação. A relação entre as potências recebidas pelo repetidor, na condição de saturação e na condição efetiva de operação, é denominada recuo de entrada ("input back off"). A cada recuo de entrada corresponde um recuo de saída ("output back off"), que é a relação entre as potências emitidas pelo repetidor saturado e no ponto de operação. A condição de saturação é convencionalmente definida com toda potência concentrada em uma só portadora, condição em que não há intermodulação.

As Figuras A.1 e A.2 apresentam as características de um amplificador TWT, típico do satélite INTELSAT IV, fornecidas pela EMBRA TEL (Azevedo, 1975). A Figura A.1 mostra o recuo de saída em função do recuo de entrada, para uma portadora única e para um grande número de portadoras. A Figura A.2 mostra a relação  $C/N_i$  total do repetidor em função do recuo de entrada.

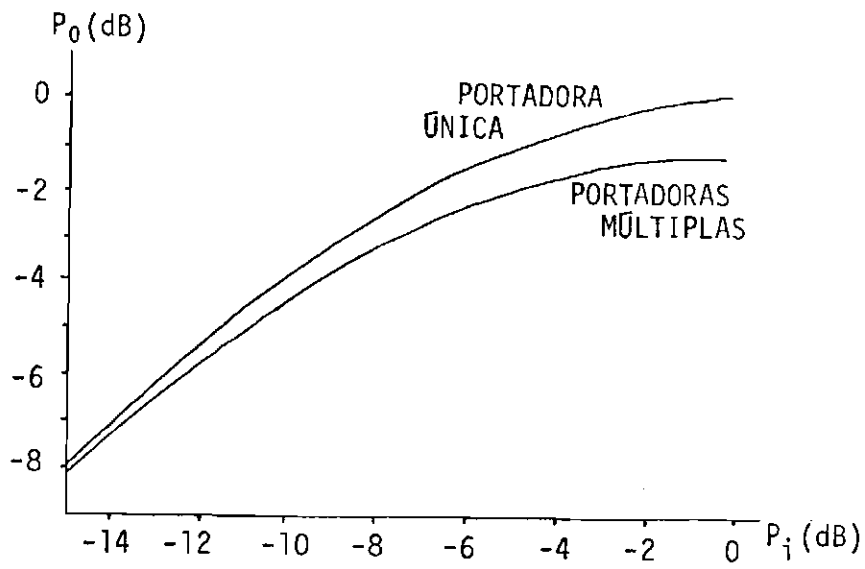


Fig. A.1 - Recuo de potência de saída em função do recuo de potência de entrada.

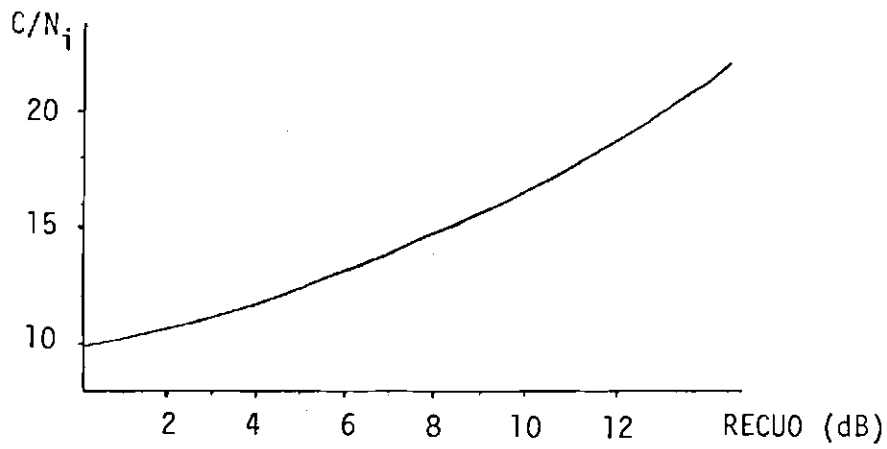


Fig. A.2 - Relação portadora/ruído de intermodulação em função do recuo de potência de entrada.



## APENDICE B

### PROGRAMAS DE COMPUTAÇÃO

```

$SET AUTODIAG
$BIND = FROM RUTINAS/FORTRAN/NUMERALS/
$RESET FREE
FILE 5(KIND=DISK,TITLE="DESTA",FILETYPE=7)
REAL/LAU, LAUL, LAD, LAJL, LCU, LCUJ, LCUJ, LCUL, LCUL, LCML, LCML, LCML
REAL/LREFL, LREF, LTO, YC, LATL, LAT, LUL, LG
COMMON/POF/PCY, RIX, SRX, PRX
COMMON/OPUF/PCU, XMU, SRU, PCU, RMD, SRU, PRU, R2
FAT(X)= 10.+(X/1.)
PAR(X)= 10.+ALOG10(X)
C
C ESTE PROGRAMA CALCULA A DISPONIBILIDADE DE UM ENLACE ENTRE DUAS
C ESTACOES DE UMA REDE DE MULTIPLO ACESSO POR DIVISAO DE FREQUENCIA
C (FDMA) COM CANAL SINGELO POR PORTADORA, COM PORTADORAS ATIVADAS
C POR VOZ.
C SAO DADOS DE ENTRADA DO PROGRAMA : OS PARAMETROS DO SISTEMA; OS
C OS PARAMETROS DA ESTACAO TERRENA; OS PARAMETROS DO SATELITE; AS
C DISTRIBUICOES DE PROBABILIDADE MARGINAIS DE ATENUACAO POR CHUVAS;
C E O FATOR DE CORRELACAO EXISTENTE ENTRE AS DISTRIBUICOES.
C
C FUNCAO FAT TRANSFORMA DB EM DECIMAL
C FUNCAO PAR TRANSFORMA DECIMAL EM DB
C BTZ = CONSTANTE DE BOLTZMAN
C RD = REQUISITOS DE ANTENA DE ESTACAO TERRENA
C GA = GANHOS DE ANTENAS
C EP = EIRP
C TREC = TEMPERATURA DE RUÍDO DO RECEPTOR DA ESTACAO
C PUT = POTENCIA ENREGUE A ANTENA DA ESTACAO
C DIAM = DIAMETRO DA ANTENA DA ESTACAO TERRENA
C F = FREQUENCIAS
C BWS = BANCA DO REPETIÇÃO
C TCDS = TEMPERATURA DE RUÍDO COSMICO
C U = ATENUACOES
C LT = PERDA TOTAL EM UM LANCE (PROPAGACAO + APONTAMENTO)
C LAT = PERDA POR ASSORCAO ATMOSFERICA
C TAT = TEMPERATURA DO MEIO ATMOSFERICO ABSORVENTE
C LC = ATENUACAO CAUSADA POR CHUVAS
C LG = PERDAS NO TRAJETO ENTRE A ANTENA E O LNA DA ESTACAO
C TG = TEMPERATURA DO TRAJETO ENTRE A ANTENA E O LNA
C TS = TEMPERATURA DE RUÍDO CAPTADA DO SOLO
C LA = PERDAS ENTRE A ANTENA DA ESTACAO E A DO SATELITE
C CNR = RELACAO SINAL/RUIDO
C B = BANCA DO CANAL CONSIDERADO
C PC = PROBABILIDADE DE OCORRENCIA DE CHUVAS
C RM, SR = PARAMETROS DA DISTRIBUICAO LOG-NORMAL
C R1 = FATOR DE CORRELACAO ENTRE OCORRENCIA DE CHUVAS
C R2 = FATOR DE CORRELACAO ENTRE TAXAS DE PRECIPITACAO
C WL = COMPRIMENTOS DE ONDA
C PRA = PROB DE NAO CHOVER EM U E D
C PRH = PROB DE CHOVER EM U E NAO CHOVER EM D
C PRC = PROB DE CHOVER EM D E NAO CHOVER EM U
C PRD = PROB DE CHOVER EM U E D
C TU = TEMPERATURA DE RUÍDO TERMICO DO SATELITE
C PT1 = PARCELA DE DISPONIBILIDADE COM CHUVAS EM U E D
C PT2 = PARCELA DE DISPONIBILIDADE COM CHUVA EM U, SOMENTE
C PT3 = PARCELA DE DISPONIBILIDADE COM CHUVA EM D, SOMENTE
C PT4 = PARCELA DE DISPONIBILIDADE SEM CHUVAS EM U OU D
C DIV = NUMERO DE FAIXAS POR US DE LCU

```

C ERRO - ERRO RELATIVO DA INTEGRAL DUPLA  
C FLRC - FLUXO POR CANAL RECEBIDO PELA SATELITE  
C H - GANHO EM POTENCIA DO REPETIDOR  
C BDI - BACK-OFF DE ENTRADA  
C BDD - BACK-OFF DE SAIDA  
C NC - NUMERO DE CANAIS DO SISTEMA SCPC  
C ATIV - FATOR DE ATIVIDADE  
C LREF - FATOR DE CORRECAO PARA PERDAS DE APONTAMENTO DAS ANTENAS  
C DAS ESTACOES E DO SATELITE PARA TODU O CONJUNTO DE LIGACOES  
C TERRA-SATELITE DA REDE  
C

C TERMINACOES DAS VARIAVEIS:  
C U - REFERE-SE AO LANCE DE SUBIDA  
C R - REFERE-SE A VALOR NO CENTRO DO FEIXE DE RADIACAO  
C L - REFERE-SE A VALORES EM UD  
C S - REFERE-SE A SATELITE  
C T - REFERE-SE A ESTACOES TERRENAS  
C

PI= ARCS(-1.)  
BTZ= 1.38E-23

C LEITURA DE DADOS  
C READ(5,10) DIV, ERRO  
10 READ(5,10) NC, ATIV, RDU, RUD, LREF  
FORMAT(2F10.0)  
READ(5,10) GASURL, GASUL, GASURL, GASDL  
READ(5,10) EPSL, TSLS, FLSL  
READ(5,10) TREC, POT, DIAM  
READ(5,20) DU, DD, DMEQ  
READ(5,20) FUR, FDR, FU, FD, BWS  
20 FORMAT(7E10.0)  
READ(5,10) TCNS, LATL, TAT, LGL, TG, TS, LAUL, LAUL  
READ(5,10) CNRL, B, DCN  
READ(5,10) PCU, RCU, SRU, PCU, RMD, SRU, R1, R2

C VARIAVEIS AUXILIARES  
C WLU= 3.E8/FU  
WLD= 3.E8/FD  
WLU= 3.E8/FUR  
WLD= 3.E8/FDR  
CANAT= NC\*ATIV  
GTS= FAT(GTSL)  
CNR= FAT(CNPL)  
GASU= FAT(GASUL)  
GASUR= FAT(GASURL)  
GASD= FAT(GASDL)  
LREF=FAT(LREFL)  
LAU= FAT(LAUL)  
LAT=FAT(LATL)  
LG=FAT(LGL)  
LAD= FAT(LAGL)  
FLS= FAT(FLSL)  
TU= GASUR/GTS

C CALCULO DE PROBABILIDADES CONJUNTAS DE OCORRENCIA DE CHUVAS  
C PRD1=(R1+SQRT(PCU\*(1.-PCU)+PCD\*(1.-PCD))+PCU\*PCD)  
PRD=PRD1\*100.  
PRA1=(1.-PCU-PCD+PRD1)  
PRA=PRD1\*100.  
PRR1=(PCU-PRD1)  
PRR=PRR1\*100.

```

      PRC1=(PCD*PRD1)
      PRC=PRC1+100.
C
C   VARIÁVEIS AUXILIARES NO CÁLCULO DA TEMPERATURA DE RUÍDO DA ESTACAO.
      TA=(TCOS+IAT*(LAT-1.))/(LAT*LG)
      TC=TAT/LG
      TR=TREC+TS/LG+TR*(LG-1.)/LG
C
C   CÁLCULO DE PARÂMETROS DA ESTACAO TERRENA
      GATUR=(PI*DIAM/HLUR)**2*RDU
      EPTR= POT*GATUR
C
C   CÁLCULO DO PONTO DE OPERACAO DO REPETIDOR
      FLPC= EPTR/(4*PI*DUED**2)/LAU
      FLRC= FLPC*CANAT/LREF
      GATU=(PI*DIAM/HLU)**2*RDU
      EPT= POT*GATU
      GATD=(PI*DIAM/HLU)**2*RDU
      BDI= FLS/FLRC
      BDD=FBD(BDI)
      CN0IL=FCNI(BDI)
      B0IL= PAR(BDI)
      B0DL= PAR(BDD)
      PENT= FLRC*GASUR*HLU**2/(4*PI)
      PSAIL= EPSL-B0DL -GASDL
      H=FAT(PSAIL)/PENT
      CNR= FAT(CN0IL -PAR(H*BS))
      TI=(FLS*HLUR**2*G(SUR))/(CNIX*801*4.*PI*BTZ*BS)
      HL= PAR(H)
      EPTL= PAR(EPT)
      GATDL= PAR(GATD)
      GATUL= PAR(GATU)
C
C   CÁLCULO DA DISPONIBILIDADE PARA VARIOS VALORES DE CNR
      DO 200 N=1,50
      CNRL=CNRL+JCN
      CNR= FAT(CNRL)
      WRITE(6,90) CNRL
90  FORMAT(/,/,10X, " *** CNR=" ,F4.1, " ***")
80  FORMAT(/,5X, " LCU " ,5X, " LCU " , 5X, "PARC " , 5X, "ACUM" ,/)
      PT1=0.
      PT2=0.
      PT3=0.
      TIT=0.
C
C   CÁLCULO DO LCN MÁXIMO ( LCN= 0 DB)
      LCUL=0.
      LTU= FAT(LCUL+LAUL)
      TDLD= (EPT*HLU**2*GASU/(16*PI**2*DU**2*BTZ*B*LTU*CNR)-TU-TI)*
      *(H*GASD*HLU**2*GATD)/(16*PI**2*DU**2)
      LCN= (TDLU*LAD+TC-LAD+TA)/(TC+TR)*LAD)
      IF(LCN.LE.1.) GO TO 250
      LCNUL= PAR(LCN)
C
C   CÁLCULO DA REGIÃO DE INTEGRAÇÃO
      DO 100 J=1, 5000
      LCUL= (2.*J-.999)/(2.*DIV)
      DLG= 1./(2.*DIV)
      LTU= FAT(LCUL+LAUL)
      TDLD= (EPT*HLU**2*GASU/(16*PI**2*DU**2*BTZ*B*LTU*CNR)-TU-TI)*
      *(H*GASD*HLU**2*GATD)/(16*PI**2*DU**2)

```

```

LCD= (TDLU+LAD*TC-LAU*TA)/((TC+TR)*LAU)
IF(J.EQ.1.AND.LCD.LE.1) GO TO 250
IF(LCD.LE.1.) GO TO 150
LCUL= PAR(LCD)
IF(J.EQ.1) WRITE(6,00)
IF(LCUL.LT.0LC) GO TO 100
C
C   CALCULO DA INTEGRAL DUPLA NUMA FAIXA
PT0= DBLINT(.0001, LCUL, LCUL+DLC, LCUL+DLC, ERRO)
PT1= PT1+PT0
100 WRITE(6,110) LCUL, LCUL, PT0, PT1
110 FORMAT(12(1X, F9.3))
C
C   CALCULO DO LCU MAXIMO (LCD= 0.03)
150 LCUL=LCUL-1./NIV
180 LCUL=LCUL+.001
LTU= FAT(LCUL+LAUL)
TDLU= (EPT*WLU**2+GASU/(16*PI**2*DU**2+BTZ*3*LTU+CNR)-TU-TI)*
*(H*GASD*WLU**2+GATD)/(16*PI**2*DU**2)
LCD= (TDLU+LAD*TC-LAU*TA)/((TC+TR)*LAD)
IF(LCD.LT.1.) GO TO 190
GO TO 180
190 LCMUL=LCUL
C
C   CALCULO DA INTEGRAL SOBRE O EIXO LCU
PCX= PCU
RMX= RMU
SRX= SRU
PRX= PRU
IF(PRX.EQ.0.) GO TO 191
PT2= SIMINT(.001, LCMUL, 1.E-04)
C
C   CALCULO DA INTEGRAL SOBRE O EIXO LCU
191 PCX=PCU
RMX= RMU
SRX= SRU
PRX= PRU
IF(PRX.EQ.0.) GO TO 192
PT3= SIMINT(.001, LCMUL, 1.E-04)
C
C   DISPONIBILIDADE
192 IIT= PT1+PT2+PT3+PRA
WRITE(6,111) PCU, RMU, SRU, PCU, RMU, SRU
111 FORMAT(/4X, "PCU=", F5.3, 3X, "RMU=", F4.2, 3X, "SRU=", F4.2,
* 2X, "PCU=", F5.3, 3X, "RMU=", F4.2, 3X, "SRU=", F4.2)
WRITE(6,112) R1, R2, PRA, PRU, PRC, PRD
112 FORMAT(/5X, "R1=", F4.2, 3X, "R2=", F4.2, 3X, "PRA=", F5.2, 2X,
* "PRU=", F5.2, 2X, "PRC=", F5.2, 2X, "PRD=", F5.2)
WRITE(6,113) NC, ATIV, LREFL, RUU, RDU
113 FORMAT(/, 5X, "NC=", OP(4), 3X, "ATIV=", F3.1,
* 3X, "LREF=", F3.1, 3X, "RUU=", F4.1, 3X, "RDU=", F4.1)
WRITE(6,114) GASUL, GASURL, EPSL, GTSL, FLSL
114 FORMAT(/5X, "GASU=", F4.1, 3X, "GASU=", F4.1, 3X, "ES=", F4.1,
* 3X, "GTS=", F4.1, 3X, "FLS=", F5.1)
WRITE(6,115) FU, FJ, BNS, B
115 FORMAT(/5X, "FU=", E8.2, 2X, "FJ=", E8.2, 2X, "BNS=", E8.2, 2X, "B=",
* E8.2)
WRITE(6,115) POT, TREC, DIAM, EPTL, GATUL, GATDL
115 FORMAT(/5X, "POT=", F4.1, 3X, "TRX=", F4.0, 2X, "DM=", F5.2,
* 3X, "ET=", F4.1, 3X, "GTU=", F4.1, 3X, "GTD=", F4.1)
WRITE(6,119) DU, UD, DMED
```

```

119  FORMAT(/5X,
*      "DU=","1PE3.2,3X,"DU=","E3.2,3X,"UM=","E3.2)
      WRITE(6,121) TCDS,(AT,TJ,TS,LAFL,LGL
121  FORMAT(/5X,"TCDS=","F3.0,3X,"TAGM=","F4.0,3X,"TGD=","F4.0,
*      3X,"TSOL=","F3.0,3X,"LATD=","F3.1,3X,"LGD=","F3.1)
      WRITE(6,116) HNIL, BDU, HL, TI, TU
116  FORMAT(/5X, "ROI=","F4.1,3X,"BDU=","F4.1,3X," H=","F5.1,
*      3X, " TI="," 14, 3X, " TU=","14)
      WRITE(6,117) LAUL,LADL, DIV, ERRO
117  FORMAT(/5X,"LAU=","F4.1,3X,"LAU=","F4.1,3X,"NOV=","14,3X,
*      "ERR=","1PE3.1)
      WRITE(6,122) LCMUL, LCMUL, CNRL
120  FORMAT(/4X,"LCMU=","F5.2,2X,"LCMU=","F5.2,2X, "CNR=","F5.1)
200  WRITE(6,100) PT1, PT2, PT3, PRA, IIT
160  FORMAT(/4X,"PT1=","F5.2,3X,"PT2=","F5.2,3X,"PT3=","F5.2,
*      3X,"PT4=","F5.2,3X,"TOTAL=","F5.2)
      GO TO 300
250  WRITE(6,200)
260  FORMAT(/"  SISTEMA NAO ATINGE A CNR DAUA")

300  STOP
      END

      FUNCTION F(X)
C
C      FUNCAO DENSIDADE DE PROBABILIDADE MARGINAL
COMMON/PDF/PC, RM, SR, PR
PI= ARCS(-1.)
F= PR*EXP(-(ALOG(X/RM)/SR)**2/2)/(X*SR*SQRT(2*PI))
RETURN
END
      FUNCTION FF(Y,X)
C
C      FUNCAO DENSIDADE DE PROBABILIDADE CONJUNTA
COMMON /JPDF/PCD, RMD, SRU, PCD, RMD, SRD, PRD, R2
PI= ARCS(-1.)
FF= PRD*EXP(-((ALOG(X/RMD)/SRU)**2-2*R2*(ALOG(X/RMD)/SRU)*
*(ALOG(Y/RMD)/SRD)+(ALOG(Y/RMD)/SRD)**2)/(2*(1.-R2**2)))/
/(2*PI*SRU*SRD*SQRT(1.-R2**2))*X*Y)
RETURN
END

      FUNCTION FB0(X)
C
C      FUNCAO QUE APROXIMA A CURVA BACK-OFF DUF*IN
IF(X.GT.1.0.AND.X.LE.2.5) FB0=1.37+.06*(X-1)**1.0
IF(X.GT.2.5) FB0=1.07+.17*X
RETURN
END

      FUNCTION FCNI(X)
C
C      FUNCAO QUE APROXIMA A CURVA CNI * BNI
FCNI=84.2+8.*ALOG10(X)
RETURN
END

```

```
*SET AUTOBIN
$BIN() = FROM ROTINAS/FJHTRANNUMERALS*
$RSET FREE
FILE $(KIND=DISK,TITLE="USINA",FILETYPE=?)
REAL LAU, LAUL, LAD, LAUL, LCU, LCUL, LCO, LCBL, LCMU, LCMU
REAL LTO, LATL, LAT, LGL, LG
COMMON/UPDF/PCX, RAX, SRX, PRX
COMMON/UPDF/PCU, SMU, SRU, PCU, KMD, SRU, PRU, R2
FAT(X)= 10.**((X/10.))
PAR(X)= 10.**ALOG10(X)

C
C ESTE PROGRAMA CALCULA A DISPONIBILIDADE DE UM ENLACE DE COMUNICACAO POR SATELITE, NO QUAL UMA SU PORTADURA OCUPA TODA A FAIXA DO REPETIDOR.
C
C SAO DADOS DE ENTRADA DO PROGRAMA : OS PARAMETROS DAS ESTACOES TERRENAS; OS PARAMETROS DO SATELITE; AS DISTRIBUICOES DE PROBABILIDADE DE ATENUACOES POR CHUVAS E O FATOR DE CORRELACAO EXISTENTE ENTRE AS DISTRIBUICOES.
C
C FUNCAO FAT TRANSFORMA DB EM DECIMAL
C FUNCAO PAR TRANSFORMA DECIMAL EM DB
C BTZ = CONSTANTE DE BOLTZMAN
C RU = RENDIMENTOS DE ANTENA DE ESTACAO TERRENA
C GA = GANHOS DE ANTENAS
C EP = EIRP
C TREC = TEMPERATURA DE RUIDO DO RECEPTOR DA ESTACAO
C POT = POTENCIA ENTREGUE A ANTENA DA ESTACAO
C DIAM = DIAMETRO DA ANTENA DA ESTACAO TERRENA
C F = FREQUENCIAS
C BWS = BANEA DO REPETIDOR
C TCDS = TEMPERATURA DE RUIDO COSMICO
C L = ATENUACOES
C LT = PERDA TOTAL EM UM LANCE (PROPAGACAO + APONTAMENTO)
C LAT = PERDA POR ABSORCAO ATMOSFERICA
C TAT = TEMPERATURA DO MEIO ATMOSFERICO ABSORVENTE
C LC = ATENUACAO CAUSADA POR CHUVAS
C LG = PERDAS NO TRAJETO ENTRE A ANTENA E O LNA DA ESTACAO
C TU = TEMPERATURA DO TRAJETO ENTRE A ANTENA E O LNA
C TS = TEMPERATURA DE RUIDO CAPTADA DO SOLO
C LA = PERDAS ENTRE A ANTENA DA ESTACAO E A DO SATELITE
C CNR = RELACAO SINAL/RUIDO
C B = BANEA DO CANAL CONSIDERADO
C PC = PROBABILIDADE DE OCORRENCIA DE CHUVAS
C RM, SR = PARAMETROS DA DISTRIBUICAO LOG-NORMAL
C R1 = FATOR DE CORRELACAO ENTRE OCORRENCIA DE CHUVAS
C R2 = FATOR DE CORRELACAO ENTRE TAXAS DE PRECIPITACAO
C NL = COMPRIMENTOS DE ONDA
C PRA = PROB DE NAO CHOVER EM U E D
C PRA = PROB DE CHOVER EM U E NAO CHOVER EM D
C PRC = PROB DE CHOVER EM D E NAO CHOVER EM U
C PRD = PROB DE CHOVER EM U E D
C TU = TEMPERATURA DE RUIDO TERMICO DO SATELITE
C PT1 = PARCELA DE DISPONIBILIDADE COM CHUVAS EM U E D
C PT2 = PARCELA DE DISPONIBILIDADE COM CHUVA EM U , SOMENTE
C PT3 = PARCELA DE DISPONIBILIDADE COM CHUVA EM D , SOMENTE
C PT4 = PARCELA DE DISPONIBILIDADE SEM CHUVAS EM U OU D
C DIV = NUMERO DE FAIXAS POR DB DE LCU
C ERRO = ERRO RELATIVO DA INTEGRAL DUPLA
```

```
C      FLRC = FLUXO RECEBIDO PELO SATELITE
C      H = GANHO EM POTENCIA OU REPETIÇÃO
C      BOI = BACK-OFF DE ENTRADA
C      BOO = BACK-OFF DE SAIDA
C
C      TERMINAÇÕES DAS VARIÁVEIS:
C      U = REFERE-SE AO LANCE JE SUBIDA
C      R = REFERE-SE A VALOR NO CENTRO DO FEIXE DE RADIAÇÃO
C      L = REFERE-SE A VALORES EM DB
C      S = REFERE-SE A SATELITE
C      T = REFERE-SE A ESTAÇÕES TERRENAS
C
C      PI= ARCCOS(-1.)
C      BTZ= 1.38E-23
C
C      LEITURA DE DADOS
C      READ(5,10) DIV, ERRO
C      READ(5,10) RDU, RJO
C      10  FORMAT(9F10.0)
C      READ(5,10) GASURL, GASUL, GASURL, GASDL
C      READ(5,10) EPSL, TSL
C      READ(5,10) TREC, PDI, DIAM
C      READ(5,20) DU, DD
C      READ(5,20) FUR, FUR, FU, FD, DWS
C      20  FORMAT(7E10.0)
C      READ(5,10) TCNS, LATL, LAT, LGL, TG, TS, LAUL, LADL
C      READ(5,10) CNRL, PCN
C      READ(5,10) PCU, R4U, SRU, PCU, RMD, SRD, R1, R2
C
C      CALCULO DE VARIÁVEIS AUXILIARES
C      WLU= 3.E8/FU
C      WLD= 3.E8/FD
C      WLUR= 3.E8/FUR
C      WLDL= 3.E8/FDL
C      GTS= FAT(GTSL)
C      CNR= FAT(CNRL)
C      GASU= FAT(GASUL)
C      GASUR= FAT(GASURL)
C      GASD= FAT(GASDL)
C      LAU= FAT(LAUL)
C      LAD= FAT(LADL)
C      LAT=FAT(LATL)
C      LG=FAT(LGL)
C      FLS= FAT(FLSL)
C      TU= GASUR/GTS
C
C      CALCULO DAS PROBABILIDADES CONJUNTAS DE OCORRÊNCIA DE CHUVAS
C      PRD1=(R1*SQRT(PCU*(1.-PCU)+PCD*(1.-PCU))+PCU*PCD)
C      PRD=PRD1*100.
C      PRA1=(1.-PCU-PCD+PRD1)
C      PRA=PRA1*100.
C      PRB1=(PCU-PRD1)
C      PRB=PRB1*100.
C      PRCL=(PCD-PRD1)
C      PRC=PRCL*100.
C
C      VARIÁVEIS AUXILIARES NO CALCULO DA TEMPERATURA DE RUÍDO DA ESTACAO
C      TA=(TCNS+TAT*(LAT-1.))/(LAT*LG)
C      TC=TAT/LG
C      TR=TREC+TS/LG+TG*(LG-1.)/LG
C
```

```
C   PARÂMETROS DA ESTACAO TERRENA
GATU=(PI*DIAM/ALU)**2*RUU
EPT= POF*GATU
GATO= (PI*DIAM/ALU)**2*ROU
EPTL= PAR( EPT)
GATOL= PAR(GATO )
GATUL= PAR(GATU)

C
C   FLUXO DE SATURACAO NECESSARIO
FLS=EPT/(4*PI*DU**2)/LAU
FLSL=PAR(FLS)

C
C   CALCULO DA DISPONIBILIDADE PARA VARIOS VALORES DE CNR
DU 200 K=1,50
CNRL=CNRL+DCN
CNR= FAT(CNRL)
WRITE(6,90) CNRL
90  FORMAT(/,/,10X, "***  CNR=","F4.1,"  ***")
PT1=0.
PT2=0.
PT3=0.
TIT=0.

C
C   CALCULO DO VALOR MAXIMO DE LCD (LCD= 0 DB)
LCUL=0.
LTU= FAT(LCUL+LAUL)
FLRC= EPT/(4*PI*DU**2)/LTU
BDI= FLS/FLRC
BDD=FBD(BDI)
BDIL= PAR(BDI)
BDOL= PAR(BDD)
PENT= FLRC*GASUR*ALU**2/(4*PI)
PSAIL= EPSL-BDIL -GASORL
H=FAT(PSAIL)/PENT
HL= PAR(H)
TDLD= (EPT*ALU**2*GASU/(16*PI**2*DU**2*BTZ*d*LTU*CNR)-TU-TI)*
*(H*GASD*ALD**2*GATD)/(16*PI**2*DU**2)
LCD= (TDLD+LAN*TC-LAU*TA)/((TC+TR)*LAU)
IF(LCD.LE.1.) GO TO 250
LCMDL= PAR(LCD)

C
C   CALCULO DA REGIAO DE INTEGRACAO
DU 100 J=1, 5000
LCJL= (2.*J-.999)/(2.*DIV)
DLC= 1./(2.*DIV)
LTU= FAT(LCJL+LAUL)
FLRC= EPT/(4*PI*DU**2)/LTU
BDI= FLS/FLRC
BDD=FBD(BDI)
BDIL= PAR(BDI)
BDOL= PAR(BDD)
PENT= FLRC*GASUR*ALU**2/(4*PI)
PSAIL= EPSL-BDIL -GASORL
H=FAT(PSAIL)/PENT
HL= PAR(H)
TDLD= (EPT*ALU**2*GASU/(16*PI**2*DU**2*BTZ*B*LTU*CNR)-TU-TI)*
*(H*GASD*ALD**2*GATD)/(16*PI**2*DU**2)
LCD= (TDLD+LAN*TC-LAU*TA)/((TC+TR)*LAU)
IF(J.EQ.1.AND.LCD.LE.1) GO TO 250
IF(LCD.LE.1.) GO TO 150
LCDL= PAR(LCD)
```



```
      IF(J.EQ.1) WRITE(6,80)
80  FORMAT(/5X, " LCU ",5X," LCD ", 5X,"PARTE", 5X,"ACUM",
*       5X,"ROI ",5X," RJO ", 5X," H ",/)
      IF(LCUL.LT.OLC) GO TO 190
C
C   CALCULO DA INTEGRAL DUPLA NUMA FAIXA:
      PTO= DBLINT(.0001, LCUL, LCUL-OLC, LCUL+OLC, ERHO)
C
C   SOMATORIA DAS INTEGRALS NAS FAIXAS
      PT1= PTO
100  WRITE(6,110) LCUL, LCOL, PTO, PT1, ROI, BOOL, KL
110  FORMAT(/12(1X, F9.4))
C
C   CALCULO DE LCU MAXIMO (LCU= 0 DB)
150  LCUL=LCUL-1./DIV
180  LCUL=LCUL+.001
      LTU= FAT(LCUL+LAUL)
      FLRC= EPT/(4*PI*DU**2)/LTU
      BUI= FLS/FLRC
      BUI= FBUI(BUI)
      BOIL= PAR(ROI)
      BOOL= PAR(RJO)
      PENT= FLRC*GASUR*LU**2/(4*PI)
      PSAIL= CPSL-BOOL -GASOKL
      H=FAT(PSAIL)/PENT
      HL= PAR(H)
      TOLD= (EPT*LU**2*GASU/(10*PI**2*DU**2*DTZ*d*LTU+CNR)-TU-TI)*
* (H*GASO*LU**2*GATD)/(10*PI**2*DU**2)
      LCD= (TOLD+LAN+TC-LAU*TA)/((TC+TA)+IAD)
      IF(LCD.LT.1.) GO TO 190
      GO TO 190
190  LCMUL=LCUL
C
C   CALCULO DA INTEGRAL EM LCU (LCU= 0 DB)
      PCX= PCU
      RMX= RMU
      SRX= SRU
      PRX= PRB
      IF(PRX.EQ.0.) GO TO 191
      PT2= SIMINT(.001, LCMUL, 1.E-04)
C
C   CALCULO DA INTEGRAL EM LCD (LCU= 0 DB)
191  PCX= PCU
      RMX= RMU
      SRX= SRU
      PRX= PRC
      IF(PRX.EQ.0.) GO TO 192
      PT3= SIMINT(.001, LCMUL, 1.E-04)
C
C   DISPONIBILIDADE DO ENLACE
192  TIT= PT1+PT2+PT3+PRA
C
      WRITE(6,111) PCU, RMU, SRU, PCU, RMU, SRU
111  FORMAT(/5X, "PCU=", F5.2,2X,"RMU=", F5.2,2X,"SRU=", F5.2,
*       2X,"PCU=", F5.2,2X,"RMD=", F5.2,2X,"SRU=", F5.2)
      WRITE(6,112) R1, R2, PRA, PRB, PRC, PRO
112  FORMAT(/5X, " R1=", F4.2,3X," R2=", F4.2,3X,"PRA=", F4.1,3X,
*       "PRB=", F4.1,3X,"PRC=", F4.1,3X,"PRD=", F4.1)
      WRITE(6,113) ROU, RDD
113  FORMAT(/5X,
*       "ROU=", F4.1,3X,"RDD=", F4.1)
```

```
WRITE(6,114) GASURL, GASORL, EPSL,GTSL, FLSL
114 FORMAT(/5X,"GSD=">F4.1,3X,"GSD=">F4.1,3X,"ES=">F4.1,
* 3X,"GTS=">F4.1,3X,"FLS=">F5.1)
WRITE(6,115)FIH, FJ, BWS, H
115 FORMAT(/5X,"FU=">1PE8.2,2X,"FU=">E8.2,2X,"BWS=">E8.2,2X,"H=">
* E8.2)
WRITE(6,115) PPT, TREC, DIAM, EPTL, GATDL, GATDL
115 FORMAT(/5X,"PPT=">F5.1,3X,"TRX=">F4.0,3X,"DM=">F4.1,
* 3X,"ET=">F4.1,3X,"JTU=">F4.1,3X,"GTD=">F4.1)
WRITE(6,116) TU
116 FORMAT(/5X,"TU=">F5.0)
WRITE(6,117) DU, DD
117 FORMAT(/5X,
* "DU=">1PE8.2,3X,"DD=">E8.2)
WRITE(6,121) TCRS,TAT,TS,TS,LATL,LGL
121 FORMAT(/5X,"TCRS=">F3.0,3X,"TATM=">F4.0,3X,"TSD=">F4.0,
* 3X,"TSDL=">F3.0,3X,"LATD=">F3.1,3X,"LGD=">F3.1)
WRITE(6,117) LAUL,LAUL, DIV, ERRO
117 FORMAT(/5X,"LAU=">F4.1,3X,"LAU=">F4.1,3X,"DIV=">I4,3X,
* "ERR=">1PE5.1)
WRITE(6,120) LCMUL, LCMUL, CNR
120 FORMAT(/4X,"LCMU=">F5.2,2X,"LCMU=">F5.2,2X,"CNR=">F5.1)
200 WRITE(6,100) PT1, PT2, PT3, PRA, FIT
160 FORMAT(/4X,"PT1=">F6.3,2X,"PT2=">F6.3,2X,"PT3=">F6.3,
* 2X,"PT4=">F6.3,2X,"FTAL=">F6.3)
GO TO 300
250 WRITE(6,200)
260 FORMAT(/" SISTEMA NAO ATINGE A CNR DAJA")

300 STOP
END

FUNCTION F(X)
C
C FUNCAO DENSIDADE DE PROBABILIDADE MARGINAL
COMMON/POF/PC, RM, SR, PR
PI= ARCS(-1.)
F= PR*EXP(-(ALOG(X/RM)/SR)**2/2)/(X*SR*SQRT(2*PI))
RETURN
END
FUNCTION FF(Y,X)
C
C FUNCAO DENSIDADE DE PROBABILIDADE CONJUNTA
COMMON /JPOF/PCU, RMU, SRU, PCU, RMD, SRD, PRD, R2
PI= ARCS(-1.)
FF= PRD*EXP(-(ALOG(X/RMU)/SRU)**2-2*R2*(ALOG(X/RMU)/SRU)*
*(ALOG(Y/RMD)/SRD)+(ALOG(Y/RMD)/SRD)**2)/(2*(1.-R2**2)) /
/(2*PI*SRU*SRD*SQRT(1.-R2**2)*X*Y)
RETURN
END

FUNCTION FBQ(X)
C
C FUNCAO QUE APROXIMA A CURVA OUT*IN HACK"OFF
IF(X.GE.1..AND.X.LE.2.) FBQ=1.+11*(X-1.)**1.5
IF(X.GT.2.0) FBQ=0.17*X+0.77
RETURN
END
```