

CÁLCULO DE SISTEMA RÁDIO ENLACE DIGITAL

**ENGENHARIA
TELECOMUNICAÇÕES**



UNIVERSIDADE SANTA CECÍLIA

UNISANTA

Prof : Hugo Santana Lima
Santana@unisanta.br

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVOS DE PROJETO EM UM ENLACE DIGITAL	1
1.2. RECOMENDAÇÃO DO ITU PARA ENLACE REAL	1
1.2.1. G.821	2
1.2.2. G.826	2
2. PARÂMETROS DO SISTEMA E DO EQUIPAMENTO	3
2.1. PLANO DE FREQUÊNCIAS	3
2.2. MODULAÇÃO	3
2.3. POTÊNCIA DE RÚIDO TÉRMICO (P_{RT})	3
2.4. C/N TEÓRICO PARA $TEB = 10^{-6}$	3
2.5. DEGRADAÇÃO DA C/N PELO EQUIPAMENTO	4
2.6. ATENUAÇÃO NO CIRCUITO DE RAMIFICAÇÃO (A_{RMF})	4
2.7. POTÊNCIA DE TRANSMISSÃO (PT)	5
2.8. POTÊNCIA LIMAR RECEPÇÃO LIMAR PARA $TEB = 10^{-3}$ (P_{RL})	5
3. PARÂMETROS DO ENLACE	5
4. DIMENSIONAMENTO DO ENLACE	6
4.1. GANHO DAS ANTENAS	6
4.2. ATENUAÇÃO NO CABO DA ESTAÇÃO (A_C)	6
4.3. ATENUAÇÃO NO ESPAÇO LIVRE (A_E)	6
4.4. DEGRADAÇÃO POR INTERFERÊNCIA E OBSTÁCULOS ($A_I + A_O$)	6
4.4.1. DEGRADAÇÕES POR INTERFERÊNCIA (A_I)	7
4.4.2. DEGRADAÇÃO POR OBSTÁCULOS (A_O)	7
4.5. ATENUAÇÃO TOTAL LÍQUIDA (A_T)	7
4.6. NÍVEL DE RECEPÇÃO NOMINAL (P_{RN})	8
4.7. PROBABILIDADE DE INTERRUPTÃO DEVIDO A FADING (10^{-3})	8
4.7.1. CÁLCULO DA MARGEM PARA FADING PLANO	9
4.8. INDISPONIBILIDADE DEVIDO A CHUVA	13
4.9. INDISPONIBILIDADE DEVIDO AO EQUIPAMENTO	14
4.10. INDISPONIBILIDADE TOTAL	14
4.11. MARGENS DO SISTEMA INSTALADO	15
5. EXEMPLO DE CÁLCULO DE RÁDIO ENLACE	15

1. INTRODUÇÃO

No módulo que se segue, veremos a metodologia de cálculo de desempenho do sistema de Média capacidade.

O parâmetro de comparação (objetivo) a ser atingido constitui-se de uma probabilidade. Esta probabilidade é chamada pelo ITU-R de Porcentagem de Tempo de Interrupção de um sistema disponível.

Por sistema disponível, entendemos, um sistema em funcionamento normal. Por outro lado, sistema indisponível é definida pelo ITU-R da seguinte maneira:

“ Um período de indisponibilidade inicia quando a taxa de erro de bit (TEB) em cada segundo é pior que 1×10^{-3} por um período de 10 segundos consecutivos. Estes dez segundos são considerados tempo indisponível. O período de indisponibilidade termina quando a TEB em cada segundo é melhor que 1×10^{-3} por um período de dez segundos consecutivos. Estes dez segundos são considerados tempo disponível.”

A taxa de erro de bit é definida como a razão entre o número de bits errados e o número total de bits transmitidos em um dado intervalo de tempo.

É claro que a disponibilidade de um sistema deve ser máxima. Isto é, a porcentagem de tempo de interrupção de um sistema deve ser mínima durante seu funcionamento.

1.1. OBJETIVOS DE PROJETO EM UM ENLACE DIGITAL

O objetivo a ser atingido, recomendado pelo ITU-R, segue o exposto na REC G821 / G826 que é uma probabilidade chamada de: Porcentagem de Tempo de Interrupção de um sistema Disponível.

1.2. RECOMENDAÇÃO DO ITU PARA ENLACE REAL

O critério de qualidade é fixado em função do perfil do enlace. São definidos os seguintes tipos de enlace:

a)Local-Grade: Corresponde ao circuito de acesso ao usuário. Compreende os sistemas operando entre as dependências do usuário e a central local, que operam normalmente a baixas taxas de transmissão.

b)Medium-Grade: Cobre os primeiros 1250Km do enlace. Corresponde aos sistemas operando a partir das centrais locais e se estendendo pela parte nacional da conexão

c)High-Grade: Corresponde ao restante do percurso do circuito hipotético de referência. Compreende os sistemas de longa distância (nacional ou internacional), operando normalmente em médias ou altas taxas de transmissão.

As definições acima dizem respeito ao circuito hipotético de referência do ITU-R. Para circuitos reais não há uma demarcação definida entre as partes Medium-Grade e High-Grade. Na prática, tem sido considerado High-Grade todos os circuitos constituídos de enlaces de alta capacidade, independentemente de seu comprimento.

Vale observar que em um sistema com vários enlaces é recomendável que as recomendações sejam aplicadas a cada enlace que compõe a rota. Isto garante a qualidade para todos os usuários do sistema e garante automaticamente o cumprimento da recomendação para todo circuito.

Os objetivos de performance de TEB são definidos abaixo para enlaces reais conforme Recomendações do ITU-R:

Eventos de $TEB \geq 10^{-3}$ com duração inferior a 10 segundos, medidos com tempo de integração de 1 segundo, não devem ocorrer (em qualquer mês) com porcentagem superiores aos limites abaixo:

1.2.1. G.821

	Objetivo (%)	Indisponibilidade (%)
HIGH GRADE	$0,054 \cdot L / 2500$	$0,3 \cdot L / 2500$
MEDIUM GRADE		
- CLASS 1 (280 Km)	0,006	0,033
- CLASS 2 (280 Km)	0,0075	0,05
- CLASS 3 ($L \leq 50$ Km)	0,002	0,05
- CLASS 4 (50 Km)	0,005	0,1
LOCAL GRADE	0,015	Em estudo

Obs.: L é o comprimento do enlace.

Como resultado final, No projeto de sistema é calculado a margem de Fading (FFM) que é utilizada para calcular a probabilidade de interrupção devido a Fading que será somada a outras probabilidades de interrupção (chuva, equipamento). Essa probabilidade total de interrupção é comparada com a Recomendação do ITU-R e finalmente é calculada a margem do Sistema sobre o ITU-R.

1.2.2. G.826

HRP \ TAXA (Mbps)		1,5 a 5	5 a 15	15 a 55	55 a 160	160 a 3500
Porção Internacional	ESR 10^{-6}	$0,04 \cdot (FL+BL)$	$0,05 \cdot (FL+BL)$	$0,075 \cdot (FL+BL)$	$0,016 \cdot (FL+BL)$	Em estudo
	SESR 10^{-4}	$0,002 \cdot (FL+BL)$	$0,002 \cdot (FL+BL)$	$0,002 \cdot (FL+BL)$	$0,002 \cdot (FL+BL)$	$0,002 \cdot (FL+BL)$
Porção Nacional	ESR 10^{-6}	$0,04 \cdot X$	$0,05 \cdot X$	$0,075 \cdot X$	$0,016 \cdot X$	Em estudo
	SESR 10^{-4}	$0,002 \cdot X$	$0,002 \cdot X$	$0,002 \cdot X$	$0,002 \cdot X$	$0,002 \cdot X$

Redes	X	Observação
Longa Distância	$A1 + 0,01 \times \frac{[L]}{500}$	$0,01 < A1 \leq 0,02$
Curta Distância	B	$0,075 < B \leq 0,085$
Acesso	C	$0,075 < C \leq 0,085$

L =Comprimento total arredondado para o múltiplo mais próximo de 500Km.

2. PARÂMETROS DO SISTEMA E DO EQUIPAMENTO

2.1. PLANO DE FREQUÊNCIAS

O plano de frequência adotado é aquele da prática ANATEL.

Através do plano de frequência utilizado, sabemos qual é a faixa de frequência que será utilizada como frequência de transmissão.

Esse valor de frequência é utilizado, por exemplo, na atenuação no espaço livre (A_e) que depende da frequência de transmissão e da distância do enlace.

2.2. MODULAÇÃO

O tipo de modulação utilizado nos rádios digitais podem variar: 4PSK, 16QAM, 64QAM ou 128 QAM e também será utilizada no cálculo da largura de faixa (banda) do sinal transmitido.

2.3. POTÊNCIA DE RUÍDO TÉRMICO (P_{RT})

A largura de faixa do sinal transmitido é calculada pela fórmula:

$$B = \frac{VT}{\log_2 M} \quad [\text{MHz}]$$

onde M = número de níveis da modulação.

VT = taxa de bits com o estufamento.

A potência de ruído térmico será utilizada por exemplo no cálculo da potência de Recepção Limiar e o cálculo é dado por:

$$P_{RT} = \left(10 \times \text{LOG} \frac{K \times T \times B}{1.10^{-3}} \right) + F \quad [\text{dBm}]$$

onde: K = constante de Boltzman $1,38 \times 10^{-23} \text{ J}^\circ\text{K}$

T = temperatura ambiente 300°K

B = banda de transmissão (Hz)

F = Figura de ruído (dB)

No cálculo do KTBF considera-se apenas o ruído Térmico do equipamento.

A figura de ruído é definida como sendo a relação entre a relação sinal ruído de entrada (RSR_E) pela relação sinal ruído de saída (RSR_S). Esta relação é normalmente maior que 1 devido ao ruído térmico gerado nos primeiros estágios do receptor, está é uma característica inerente ao equipamento.

2.4. C/N TEÓRICO PARA $TEB = 10^{-6}$

A relação C/N teórico também é utilizada para se calcular a potência de recepção limiar. Estas são constantes para cada tipo de modulação e são tiradas do gráfico de $TEB \times C/N$ teórico, visto na figura 2.1.

Então do gráfico C/N X TEB temos que para uma modulação QPSK, uma TEB de 10^{-3} corresponde a uma C/N teórica igual a 10 dB. Adota-se (cada fabricante) como margem de segurança devido a imperfeições do sistema, um valor acima desse mencionado, já que a curva teórica não condiz com a realidade prática do equipamento.

Sendo assim o valor da C/N para TEB = 10^{-6} Tomado é de 14 dB (baseado na curva prática) da C/N X TEB.

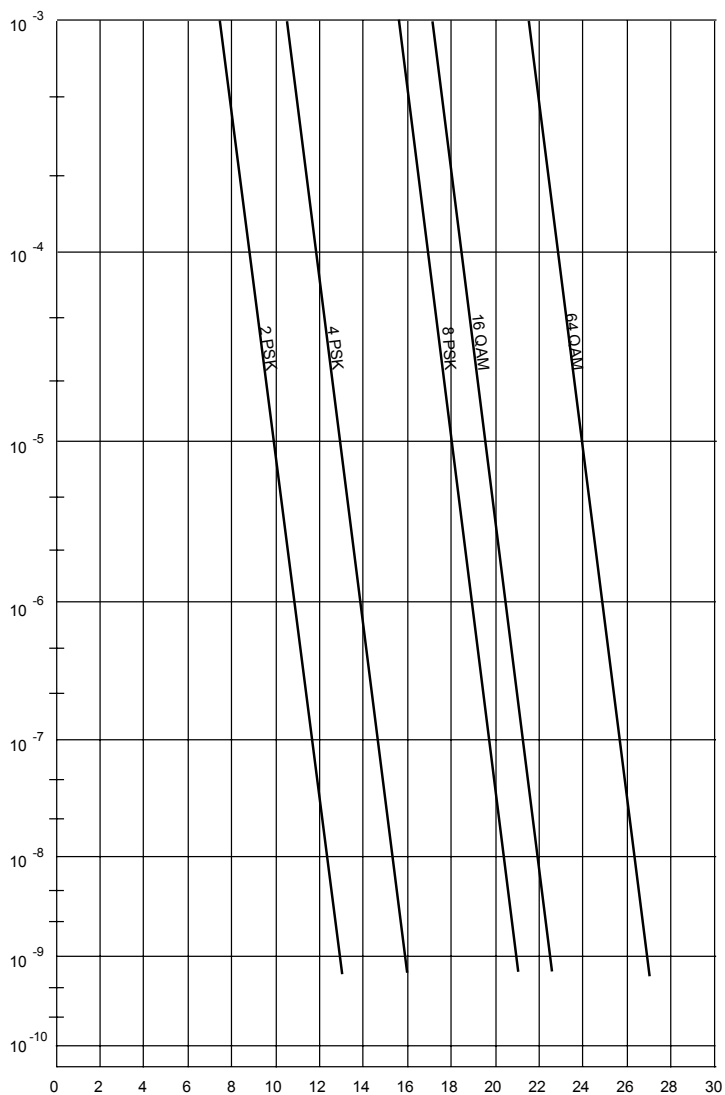


Figura 2.1 TEB x C/N (Detecção coerente com Codificação Diferencial)

2.5. DEGRADAÇÃO DA C/N PELO EQUIPAMENTO

Já está incluído devido as considerações feita no item 2.4.

2.6. ATENUAÇÃO NO CIRCUITO DE RAMIFICAÇÃO (A_{RMF})

A atenuação total do circuito de ramificação (inclui TX e RX). Esse valor é medido na prática e será utilizado para calcular a atenuação total líquida.

2.7. POTÊNCIA DE TRANSMISSÃO (PT)

Esse parâmetro será utilizado no cálculo do nível de recepção nominal.

2.8. POTÊNCIA LIMIAR RECEPÇÃO LIMIAR PARA $TEB = 10^{-3}$ (P_{RL})

A potência de recepção limiar pode ser calculada pela fórmula:

$$P_{RL} = P_{RT} + C/N (10^{-6}) \text{ [dBm]} \quad (2.3)$$

onde:

P_{RT} = Potência de ruído térmico [dBm].

C/N = dado tabela [dB].

3. PARÂMETROS DO ENLACE

Os parâmetros necessários para o cálculo são:

- Comprimento do enlace (d) : O comprimento do enlace é dado em Km e é usado no cálculo da atenuação no espaço livre;
- Altura das antenas nas estações A e B: A altura das antenas é dada em metros e por exemplo é utilizada para o cálculo do comprimento do guia de RF utilizados na estações;
- Comprimento do guia de onda de cada estação;
- Tipo de guia da estação A e B : Normalmente o tipo EWP77-77.
- Perda por metro no guia de cada estação: Esse valor é dado em dB/m e se relaciona com o tipo de guia utilizado. Esse valor será utilizado para cálculo da atenuação total provocada pelo guia de onda;
- Diâmetro da antena de cada estação: normalmente é dado em metros.

Note que esse é um parâmetro variável que pode ser definido de acordo com as necessidades de projeto, isto é, deve-se definir o diâmetro da antena prevendo um não, desperdício de potência, ou seja, tentar evitar ao máximo usar potência de transmissão maior do que a necessária, pois assim estaríamos saturando os amplificadores de recepção e seríamos obrigados a utilizar atenuadores na saída de RF. Ou seja, o nível de recepção não deve ser maior que o nível de saturação que gira por volta de -15 dBm.

4. DIMENSIONAMENTO DO ENLACE

Neste item definiremos as recomendações do ITU-R para probabilidade de interrupção do sistema. Se após calculada a margem de Fading Plano (FFM) e em consequência as probabilidade de interrupção devido a Fading (10^{-3} e 10^{-6}), estas últimas forem menores do que as probabilidades recomendadas pelo ITU-R, consideramos que o sistema estará dentro das normas estipuladas para um sistema disponível (sistema em funcionamento normal).

Caso não se obtenha esses valores, um novo cálculo deve ser feito, variando alguns parâmetros tais como: Potência de transmissão, ganho das antenas, utilização de algumas contramedidas para evitar que possivelmente possam existir perdas por interferências, por obstáculos e etc.

Cabe lembrar que o uso desses parâmetros deve ser feito com o objetivo também de não se ultrapassar o nível de saturação que é de -15 dBm.

4.1. GANHO DAS ANTENAS

$$G_{\text{total}} = G_A + G_B \quad [\text{dB}]$$

onde: G_A = ganho da antena na estação A (dBi).
 G_B = ganho da antena na estação B (dBi).

4.2. ATENUAÇÃO NO CABO DA ESTAÇÃO (A_C)

A atenuação no cabo da estação é dada por:

$$A_C = \text{perda no cabo/m} \times L_C \quad [\text{dB}]$$

onde: A_C = Atenuação no cabo (dB/m)
 L_C = comprimento do cabo (m)

Esse parâmetro é utilizado no cálculo da atenuação total líquida.

4.3. ATENUAÇÃO NO ESPAÇO LIVRE (A_E)

A atenuação no espaço livre é dada pela fórmula abaixo:

$$A_e = 92,4 + 20 \log (f \times d) \quad [\text{dB}]$$

onde:

A_e = Atenuação no espaço livre [dB]
 f = frequência em [Ghz]
 d = distância em [Km]

Esse parâmetro é utilizado para cálculo da atenuação total líquida.

4.4. DEGRADAÇÃO POR INTERFERÊNCIA E OBSTÁCULOS ($A_I + A_O$)

Além de todas as atenuações que já foram consideradas, há ainda mais dois tipos de degradações que são verificadas no equipamento e descontadas do nível de recepção nominal antes da verificação da Margem de Fading para considerações de desvanecimento no sistema, ou melhor, para as considerações de probabilidade de interrupção devido a Fading, que será analisada nos próximos itens.

Os dois tipos de degradações mencionadas são:

- Degradação por interferência
- Degradação por obstáculos

4.4.1. Degradações por Interferência (A_I)

Os fatores a serem levados em conta no dimensionamento do sistema são divididos em 2 grupos : fixos e variáveis.

a) Fatores fixos: Os fatores fixos são aqueles independentes das condições de propagação, sendo divididos em dois tipos:

- Devido ao eco, que está relacionado com o comprimento dos cabos (altura da antena + comprimento dentro da estação) e VSWR das antenas e equipamento.
- Devido à interferência co-canal, em enlaces onde o sinal indesejado percorre o mesmo trajeto do sinal desejado.

b) Fatores variáveis: Os fatores variáveis são aqueles que dependem das condições de propagação. A degradação do sinal é variável no tempo, sendo necessário dimensionar o sistema de tal forma que os valores fixados pelo ITU-R sejam satisfeitos.

- Interferência de outros enlaces.
- Interferência de Sistemas Satélite.
- Interferência devido a ruído ambiental.

4.4.2. Degradação por obstáculos (A_o)

Dependendo do perfil do relevo obtido através de cartas especiais desenhadas com a curvatura da terra para o valor de raio equivalente adequado e dependendo também das alturas dadas, podemos ter esse tipo de degradação no sinal transmitido.

Esse parâmetro depende também de como será disposta a poligonal de rotas. Fica então a critério do projetista se é necessário o uso de estações repetidoras em pontos críticos ou não. Outra possibilidade é se no local da estação já foi definido ou não a altura da antena, pode-se então variar esse parâmetro eliminando a degradação causada por obstáculos.

O importante é que se aceita a possibilidade de termos este tipo de atenuação dependendo das condições do enlace, quanto a distância, interferência, etc, tendo como normas para $K=4/3$ a 1ª zona de Fresnell totalmente livre de obstáculos ou para $K=2/3$ a 1ª zona de Fresnell com 60% de desobstrução.

Como podemos perceber este cálculo é feito da mesma forma que é feito para os rádios Analógicos e este valor é considerado no cálculo da Margem de Fading do sistema.

4.5. ATENUAÇÃO TOTAL LÍQUIDA (A_T)

A atenuação total líquida é dada por:

$$A_T = A_e + A_{rmf} + A_{CA} + A_{CB} - G_{total} \quad [\text{dB}]$$

A_{el} = atenuação do espaço livre (dB)

A_{rmf} = atenuação no circuito de ramificação (dB)

A_{CA} = atenuação no cabo de RF da estação A (dB)

A_{CB} = atenuação no cabo de RF da estação B (dB)

G_{total} = ganhos das antenas de transmissão e recepção (dB)

Esse parâmetro é utilizado para o cálculo do nível de recepção nominal.

4.6. NÍVEL DE RECEPÇÃO NOMINAL (P_{RN})

o nível de recepção nominal é dado por:

$$P_{RN} = P_T - A_T \quad [\text{dBm}]$$

onde:

P_{RN} = nível de recepção nominal (dBm)

P_T = potência de transmissão (dBm)

A_T = atenuação total líquida (dB)

Esse parâmetro é utilizado para o cálculo da margem de Fading do sistema.

4.7. PROBABILIDADE DE INTERRUPÇÃO DEVIDO A FADING (10^{-3})

Descreveremos a seguir o cálculo da probabilidade (em porcentagem ao final) da TEB exceder o valor recomendado, para um tempo de integração de um segundo.

Como vimos no módulo de propagação as causas de interrupção devido às condições de um enlace podem ser três. Resumidamente:

a) Desvanecimento Plano - devido à diminuição do sinal (atenuação por chuva, atenuação por obstáculo, atenuação devido a dutos) tudo se passa como se o ruído aumentasse, (ruído térmico e ruído interferente, como canais adjacentes, outras rotas, etc.).

b) Desvanecimento por Multivias (seletivo) - devido à diferença de percurso entre raios de um mesmo feixe, ocorrerá na recepção a interferência inter-simbólica que distorce o sinal recebido devido à diferença de amplitude e de fase entre o sinal principal e os "atrasados".

c) Desvanecimento Plano - aumento de ruído interferente produzido pela degradação da XPD devido às multivias.

A probabilidade total de interrupção pode ser calculada pela dedução das probabilidades de ocorrências dos três fatores acima.

Baseado em grande quantidade de dados já coletados, foram definidas fórmulas de estimativas para os sistemas analógicos.

No caso dos fatores (a) e (c) poderemos utilizar os resultados já obtidos para sistemas analógicos, no cálculo de sistema de rádios digitais.

Por outro lado como a modulação digital é bem diferente da analógica, sendo que os sinais de modulação digital se espalham por uma banda bem maior, nestes sistemas frequentemente ocorre interrupção devido ao fator (b), mesmo que a potência total da banda não tenha sido muito atenuada por este desvanecimento.

Devido aos sistemas digitais serem recentes, o ITU-R ainda não definiu nenhum método de cálculo de probabilidade e ocorrência do fator (b) a ser recomendado.

Entretanto, já existem quatro métodos propostos por organizações de telecomunicações, os quais são:

- a) Método da assinatura pelo atraso-fixo.
- b) Método de assinatura pelo fator -K.
- c) Método da assinatura normalizada.
- d) Método LAD.

Os nomes dados aos métodos acima apresentados, não estão genericamente definidos e são usados aqui por conveniência e melhor clareza.

O cálculo da probabilidade total de interrupção, leva em conta os três fatores (a), (b) e (c) apresentados no início deste item 2.

Os fatores (a) e (c) correspondem ao cálculo da probabilidade denominada P_n e P_F (probabilidade de interrupção devido a desvanecimento plano).

O fator (b) corresponde ao cálculo da probabilidade P_D (probabilidade de ocorrência de interrupção devido à desvanecimento seletivo).

A probabilidade total de interrupção de um sistema rádio digital é dada pela equação abaixo:

$$P_T = P_D + P_F + P_N \quad [\%]$$

Passaremos agora ao cálculo das probabilidades de interrupção separadamente. Para isso devemos encontrar alguns valores que serão utilizados no cálculo destas probabilidades.

4.7.1. CÁLCULO DA MARGEM PARA FADING PLANO

A margem para fading plano (FFM) é obtida através da diferença entre os valores de C/N para $TEB = 10^{-3}$ e o valor de C/N total. C/N total leva em conta a C/N térmico e as C/I de interferência. Como o ruído térmico provocado pelo equipamento é muito maior do que o ruído interferente podemos, para rádios de baixa e média capacidade, desprezar a parcela C/I de interferência. Para esta situação podemos calcular a FFM a partir da diferença entre o nível de recepção nominal e o nível de limiar para $TEB = 10^{-3}$.

Para o cálculo em questão levaremos em conta o fator C/I interferente, para que possamos atingir o maior grau de confiabilidade possível.

As fórmulas e valores utilizadas no cálculo de FFM são as seguintes:

- Cálculo de C/N térmico:

$$C/N \text{ térmico} = P_{RN} - P_{RT} \text{ [dB]}$$

onde: P_{RN} = Potência de recepção nominal [dBm]
 P_{RT} = Potência de ruído térmico [dBm]

- Cálculo de C/N total:

$$C/N_{total} = -10 \times \log \left[10^{\frac{-C/N_{térmico}}{10}} + 10^{\frac{-C/I_{sistemas}}{10}} + 10^{\frac{-C/I_{satélite}}{10}} + 10^{\frac{-C/I_{ambiental}}{10}} \right]$$

Dados: C/I de outros sistemas = 60 dB
 C/I sistemas de satélite = 100 dB
 C/I ruído ambiental = DADO

- Cálculo de C/N para $TEB = 10^{-3}$ (com degradação)

$$C/N_{c/deg. radiação} = -10 \times \log \left[10^{\frac{-C/N_{ts/deg. radiação}}{10}} - 10^{\frac{-C/N_{intermodulação}}{10}} - 10^{\frac{-C/N_{interferência}}{10}} - 10^{\frac{-C/N_{eco}}{10}} \right]$$

Dados : C/N s/ degradação (item 2.4)

C/N de intermodulação	= 40 dB
C/N de eco	= 60 dB
C/N de interferência (fixo)	= 60 dB

Finalmente o cálculo para a Margem de Fading plano é:

$$FFM = C/N_{total} - C/N_{c/ degradação} \quad [dB]$$

4.7.1.1. PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE FADING PLANO/SELETIVO

O modelo utilizado se baseia nas REC. ITU-R PN. 530-5 (método 1). Este método utiliza um fator geoclimático K_1 e outros fatores como distância, frequência e inclinação do enlace para cálculo da probabilidade de ocorrência de Fading. O parâmetro geoclimático K_1 depende do clima e do terreno existente na região em estudo, sendo por este motivo, objeto de estudo no local, cujo valor se altera de enlace para enlace.

A inclinação do enlace pode ser calculada pela fórmula:

$$|\varepsilon\rho| = \frac{|L_{AA} - L_{AB}|}{d} \quad [\text{mrad}]$$

onde: L_{AA} = Altura da estação A (m).
 L_{AB} = Altura da estação B (m).
 d = distância (m)

O modelo seguido neste cálculo segue exposto abaixo:

$$Pw = K_1 \times f^{0,89} \times d^{3,6} \times (1 + |\varepsilon\rho|)^{-1,4} \quad [\%]$$

onde : Pw = probabilidade ocorrência de fading plano (em %)
 K_1 = parâmetro geoclimático.
 f = frequência central de operação (Ghz)
 d = distância do enlace (Km)
 $|\varepsilon\rho|$ = inclinação do enlace (mrad)

Probabilidade de ocorrência de Fading Seletivo:

$$ETA = \left[1 - e^{-0,2 \times \left(\frac{PW}{100} \right)^{0,75}} \right] \times 100 \quad [\%]$$

4.7.1.2. PROBABILIDADE DE INTERRUPTÃO

As probabilidades de interrupção devido a fading plano e seletivo são dadas pelas fórmulas abaixo:

Fading plano:

$$P_n = P_w \times 10^{\frac{-FFM}{10}} \quad [\%]$$

onde : P_n = probabilidade de interrupção devido a fading plano
 FFM = margem para fading plano

Fading seletivo:

A probabilidade de interrupção devido a fading seletivo segue o Método da assinatura normalizada. Este cálculo só é significativo para sistemas de alta ou média capacidade.

$$\tau_m = 0,7 \times \left(\frac{d}{50} \right)^{1,3} \quad [\eta s]$$

$$T_s = \frac{1}{TAXAdeSIMBOLOS} \quad [s]$$

$$P_D = ETA \times 4,3 \times k_1 \times \left(\frac{\tau_m}{T_s} \right)^2 \quad [\%]$$

onde : ETA = probabilidade de ocorrência de fading seletivo
 $k_1 = 1,5$ fator de assinatura (parâmetro de equipamento, depende do tipo de modulação, eficiência dos equalizadores adaptativos e / ou transversal , etc.).

τ_m = retardo médio entre o raio direto e o refletido (modelo de dois raios)

T_s = período de símbolos (ηs) (inverso da taxa de símbolos)

d = distância do enlace (km)

Para se conseguir a probabilidade de interrupção total, ou seja , a **indisponibilidade devido a propagação**, basta somar o resultado das duas equações.

$$P_{total} = P_D + P_N \quad [\%]$$

4.7.1.3. FATORES DE MELHORIA (CONTRAMEDIDAS PARA FADING)

No capítulo anterior estudamos algumas medidas contra desvanecimento. Estas medidas proporcionam uma certa melhoria no que diz respeito as probabilidades de interrupção por fading plano e seletivo. As fórmulas utilizadas nestes cálculos (aplicáveis somente para sistemas (N+1) e (1+1) com D/F) seguem o modelo apresentado na ITU-R, Rec F 1093 e são as seguintes:

- Fading plano:

- Melhoria devido a diversidade de frequência :

$$K_{2F} = e^{\left(-0,9 \times \frac{\Delta F}{1000} \times \tau_M \right)}$$

$$mf = \frac{ETA \times (1 - K2F)}{100}$$

$$P_{N(1+1)} = \frac{\left(\frac{P_{N(1+0)}}{100}\right)^2}{mf} \times 100 \quad [\%]$$

onde: $P_{N(1+1)}$ = probabilidade de interrupção devido a fading plano com a utilização de diversidade de frequência.
 $K2F$ = fator de correlação para diversidade de frequência
 ΔF = espaçamento entre canais de RF (MHZ)
 τ_m = retardo médio (ns)

- Melhoria devido a diversidade de espaço:

Esta melhoria depende, principalmente, do espaçamento vertical entre a antena principal e a antena de diversidade.

$$\lambda = \frac{C}{fc}$$

$$K2S = e^{\left(-4 \times 10^{-6} \times \left(\frac{s}{\lambda}\right)^2\right)}$$

$$ms = \frac{ETA \times (1 - K2S)}{100}$$

$$P_{N(1+0)} / DE = \frac{\left(\frac{P_{N(1+0)}}{100}\right)^2}{ms} \times 100 \quad [\%]$$

onde: $P_{N(1+0)} / DE$ = probabilidade de interrupção devido a desvanecimento plano com div. de espaço.
 $K2S$ = fator de correlação devido a diversidade de espaço
 s = espaçamento entre as antenas (m)
 λ = comprimento de onda (m)
 f_c = frequência central (Hz)
 C = velocidade de propagação da luz no vácuo

Para calcular o fator de melhoria conjunta devido a diversidade de espaço e de frequência basta considerar

$$K_{2FS} = K_{2S} \times K_{2F}$$

E substituir nas fórmulas.

- Fading seletivo:

O procedimento é o mesmo realizado para fading plano, porém, devemos utilizar para os cálculos, P_D (probabilidade de interrupção devido a fading seletivo).

4.8. INDISPONIBILIDADE DEVIDO A CHUVA

Acima da faixa de operação de 10 GHz, as perturbações do sistema são causadas predominantemente por atenuações advindas de precipitações atmosféricas. Este tipo de atenuação é considerado desvanecimento plano, por atuar em uma larga faixa do espectro de RF.

Quando a frequência de transmissão incide em uma gota de chuva, esta causa na frequência um desvio, ou seja, uma atenuação correspondente, que vai depender do valor dessa frequência e da quantidade de chuva. Segundo a recomendação do ITU-R (721-2) obtemos, através de observações, fatores de correções para as frequências de transmissão, levando-se em consideração a polarização (horizontal (α_H, K_H), vertical (α_V, K_V) ou circular) e o ângulo de elevação da antena.

$$K = \frac{K_V + K_H + (K_H - K_V) \times \cos^2 \theta \times \cos 2\tau}{2}$$

$$\alpha = \frac{(K_H \times \alpha_H) + (K_V \times \alpha_V) + (K_H \times \alpha_H - K_V \times \alpha_V) \times \cos^2 \theta \times \cos 2\tau}{2 \times K}$$

onde:

$\tau = 0^\circ$ ou 180° para Polarização Horizontal

$\tau = 90^\circ$ para Polarização Vertical

$\theta =$ Ângulo de Elevação

$K, \alpha =$ Fatores para correção da frequência, levando-se em consideração a forma da gota, temperatura, velocidade da gota e o tamanho da distribuição da chuva.

$R_{0,01} = 95$ Densidade de chuva (mm/h)

Observa-se através deste cálculo que o fator de redução é usado para corrigir o efeito da chuva em todo o enlace, sabendo-se que a probabilidade de ocorrência de chuva em uma pequena parcela do enlace é muito maior que a ocorrência no enlace inteiro.

$$\gamma_R = K * R_{0,01}^\alpha$$

Para o cálculo do comprimento efetivo leva-se em conta a distância do enlace (d) e o fator de redução (R_{ED}). Assim temos:

$$d_0 = 35 \times e^{(-0,015 \times R_{0,01\%})} \quad R_{ED} = \frac{1}{1 + \frac{d}{d_0}} \quad D_{ef} = d \times R_{ED}$$

O cálculo da atenuação leva em conta a atenuação devido a chuva (γ_R) e o comprimento efetivo (D_{EF}). Para cálculo desta atenuação leva-se em conta o fator K, o fator α , e a densidade da chuva ($R_{0,01}$).

$$A_T = D_{ef} \times \gamma_R$$

A probabilidade de ocorrência de interrupção devido ao desvanecimento por chuva é calculada pelas fórmulas:

onde:

$$y = (0,546)^2 - 4 \times 0,043 \times (\text{Log}FFM - \text{Log}A_T - \text{Log}0,12)$$

A fórmula mostra que são levados em conta a margem de desvanecimento plano ou degradação da XPD (FFM) e a atenuação para 0,01% do tempo (A_T).

A margem de desvanecimento plano (FFM) já foi calculada.

Logo a indisponibilidade devido a chuva é dado por:

$$P_f = 10^{\left(\frac{-0,546 + y^{0,5}}{2 \times 0,043}\right)} \quad [\%]$$

4.9. INDISPONIBILIDADE DEVIDO AO EQUIPAMENTO

Porcentagem em que o equipamento fica fora de operação.

$$I_{eq} = \frac{2 \times MTTR}{MTBF} \times 100 \quad [\%]$$

onde: MTBF(1+1) Medium Time Between Failure = Dado

MTTR = Tempo Médio de Reparo = 5 Horas

4.10. INDISPONIBILIDADE TOTAL

A indisponibilidade total é a soma dos efeitos que faz com que o equipamento fique fora de operação; dada pela fórmula:

$$I_T = I_{EQ} + P_f + P_n + P_D \quad [\%]$$

4.11. MARGENS DO SISTEMA INSTALADO

De acordo com as recomendações a indisponibilidade deve ser menor ou igual ao especificado na tabela G821 ou pelo cliente, medida em um ano.

A taxa de erro de bits não deve exceder 1×10^{-3} (por segurança utiliza para 10^{-4}) em mais do que o valor especificado de qualquer mês com tempo de integração de 1 segundo (segundos severamente errados)

Com isso a margem do sistema para disponibilidade, e para qualidade de desempenho pode ser calculada pelas relações abaixo.

A margem para disponibilidade é o quanto mais em dB nós temos referente a indisponibilidade total.

$$\text{Temos então: Margem do Sistema} = 10 \times \text{Log} \left(\frac{I_{\text{recomendação}}}{I_{\text{calculada}}} \right) \text{ [dB]}$$

As constatações práticas efetuadas pela EMBRATEL chegaram a uma margem de 3 a 5dB que estão sendo consideradas para estes sistemas.

A margem do sistema para $TEB 10^{-4}$ (desempenho do sistema) é o quanto mais em dB o valor calculado excede o valor da recomendação do ITU-R. Temos então:

$$\text{Margem do Sistema} = 10 \times \text{Log} \left(\frac{I_{\text{recomendação}} (TEB 10^{-4})}{P_N + P_D} \right) \text{ [dB]}$$

5. EXEMPLO DE CÁLCULO DE RÁDIO ENLACE

Vide planilhas anexas.