

3 Metodologias para Análise de Desempenho

As metodologias para análise de desempenho utilizadas no desenvolvimento deste trabalho, são as dadas pela Recomendação do ITU-T G.826 e as Recomendações do ITU-R F. 1092-1, F. 695, F.1093-1 e P.530-10.^{9,10,11,12,13} A escolha destas recomendações em detrimento de outras metodologias deveu-se ao fato das mesmas serem quase que universalmente aceitas em função de acordos internacionais. O conteúdo destas recomendações é resumido a seguir.

- A Recomendação G.826 trata das definições dos parâmetros e objetivos de desempenho e qualidade para uma ligação digital internacional com taxa de bit constante em ou acima da taxa primária (2Mbps).
- A Recomendação F.1092-1 trata das definições dos objetivos de qualidade para uma ligação digital internacional com taxa de bit constante em ou acima da taxa primária (2Mbps transportado por um sistema rádio digital que pode fazer parte da porção internacional de uma via hipotética de referência com 27500 km).
- A Recomendação F. 695 trata das definições dos objetivos de disponibilidade para enlaces rádio digital fazendo parte de um circuito do tipo alto desempenho (*high grade*) dentro de uma rede digital de serviços integrados.
- A Recomendação P.530-10 trata das definições dos dados de propagação e métodos de predição requeridos para o projeto de sistemas rádio terrestres em visada direta.
- A Recomendação F.1093-1 trata dos efeitos da propagação por multipercursos no projeto e operação de sistemas rádio digitais com visada direta.

As recomendações, bastante extensas e abrangentes, foram estudadas em detalhe. A seguir é apresentado resumo dos principais itens necessários para o desenvolvimento do trabalho, extraídos das recomendações.

3.1. Recomendação ITU-T G.826

Essa recomendação define o significado e a metodologia dos indicadores de qualidade e monitoração de desempenho quanto a erros nos sistemas digitais de longa distância com taxa de transmissão constante em e acima de 2Mbps. Os objetivos são independentes do meio físico que suporta o circuito. A recomendação é baseada no conceito de medidas de blocos, usando códigos detectores de erro inerentes à via que está sendo testada. Isso simplifica as medidas realizadas com o sistema em operação.

As vias podem ser baseadas na Hierarquia Digital Plesiócrons (PDH), na Hierarquia Digital Síncrona (SDH) ou em alguma outra rede de transporte baseada em células, portanto essa recomendação é a única necessária para o projeto de desempenho quanto a erros (qualidade) de redes de transporte em ou acima da taxa primária.

Os objetivos de desempenho são aplicados para cada direção da via. Os valores aplicam-se a toda a extensão da via de referência hipotética com 27500km. Essa via pode incluir fibra óptica, sistemas rádio digitais, cabo metálico e sistemas de transmissão via satélite.

3.1.1. Camadas da Rede de Transporte

A recomendação especifica o desempenho quanto a erro de vias em uma dada camada de transporte. Dois casos são previstos:

- Redes de transporte PDH e SDH
- Conexões de Modo de Transferência Assíncrono (ATM)

Neste trabalho a recomendação será aplicada a uma rede de transporte puramente SDH, sem a utilização de células ATM.

A alocação do desempenho por toda a extensão da via ou circuito é baseada na distância e na complexidade da via.

3.1.2. Definição e medidas dos blocos

Um bloco é um conjunto de bits consecutivos associados a via(circuito), cada bit pertencendo a uma e somente um bloco. Bits consecutivos podem não ser contínuos no tempo.

A tabela 2 especifica a faixa recomendada para o número de bits dentro de cada bloco nas várias taxas de bits até 160 Mbit/s.

Taxa Mbit/s	1.5 a 5	>5 a 15	>15 a 55	>55 a 160
Bits/bloco	800 – 5000	2000-8000	4000-20000	6000-20000
ESR	0.04	0.05	0.075	0.16
SESR	0.002	0.002	0.002	0.002
BBER	2×10^{-4}	2×10^{-4}	2×10^{-4}	2×10^{-4}

Tabela 2: Bits/bloco, ESR, SESR e BBER para várias taxas de transmissão

Cada bloco é monitorado através do uso de um Código Corretor de Erros (Error Detection Code - EDC), normalmente por Paridade de Bits Intercalados (Bit Interleaved Parity) ou Check por Redundância Cíclica (Cyclic Redundancy Check). Os bits do EDC são fisicamente separados do bloco ao qual eles se aplicam.

Nenhum EDC específico é dado na definição genérica, mas é recomendado que para o propósito de monitoração em serviço, os projetos futuros deverão estar equipados com um EDC com a capacidade de detectar um evento de erro com uma probabilidade superior a 90%, assumindo uma distribuição de erro de Poisson. Códigos como CRC-4 e BIP-8 são exemplos de EDCs normalmente utilizados que preenchem os requisitos da Recomendação.

3.1.3. Parâmetros e eventos de desempenho quanto a erros

Para o propósito da Recomendação são definidos os seguintes eventos:

- Bloco com erro (Errored block – EB): Um bloco em que um ou mais bits estão errados.

- Segundo errado (Errored second – ES): Um período de um segundo com um ou mais blocos errados ou no mínimo um defeito. Um defeito para equipamentos com a hierarquia SDH são eventos relevantes que ocorrem no equipamento e que determinam a mudança de desempenho da via. Como exemplo de defeitos aplicáveis a vias de alta ordem (VC-3, VC-4 ou AU-4) no equipamento local, temos o HP UNEQ, que significa a falta de um equipamento (não equipado), o HP TIM, que significa um descasamento do identificador de traço, o AU LOP, que significa a perda do ponteiro da unidade administrativa e, finalmente, o AU AIS, que significa sinal de indicação de alarme. Para o equipamento distante, temos apenas o HP RDI, que significa indicação de defeito remoto.
- Segundo severamente errado (Severely errored second – SES): Um período de um segundo que contenha pelo menos 30% de blocos com erros, ou pelo menos um defeito. SES é um subconjunto do ES.
- Bloco de fundo com erro (Background block error – BBE): Um bloco com erro que não ocorre durante um SES.

O desempenho quanto a erros só deve ser avaliado durante o período em que a via está disponível. O critério de entrada e saída no estado de indisponibilidade é definido pra os casos abaixo:

- Critério para uma única direção: Um período de indisponibilidade começa no início de dez eventos consecutivos de SES. Esses dez segundos são considerados como um período de indisponibilidade. Um novo período de disponibilidade começa no início de dez novos segundos consecutivos sem eventos de SES. Esses dez novos segundos são considerados parte de um período de disponibilidade.
- Critério para uma via bidirecional: Um via bidirecional está no estado de indisponibilidade se uma direção ou ambas as direções estiverem no estado de indisponibilidade.
- Critério para uma via unidirecional: É o mesmo critério definido para uma única direção.

A partir da obtenção dos eventos, são definidos os parâmetros de desempenho:

- Razão de segundos errados (Errored second ratio – ESR): É a razão entre o total de ES medidos e o total de segundos no estado de disponibilidade, durante um intervalo fixado para a medição.
- Razão de segundos severamente errados (Severely errored seconds ratio – SESR): É a razão entre o total de SES medidos e o total de segundos no estado de disponibilidade, durante um intervalo fixado para a medição.
- Razão de blocos de fundo com erro (Background blocks errored ratio – BBER): É a razão entre o total de BBE medidos e o total de blocos no estado de disponibilidade, durante um intervalo fixado para a medição. A contagem do total de blocos deverá excluir todos os blocos durante os períodos de SES.

3.1.4. Objetivos de desempenho quanto a erros (qualidade)

A tabela 2 especifica os objetivos ponta a ponta para uma via hipotética de referência com 27500km, em termos dos parâmetros definidos na seção 2.1.4. Uma via digital internacional operando com taxas a partir de 2Mbit/s, deverá atender a todos os objetivos definidos para cada um dos parâmetros. A via deixa de atender aos requisitos de desempenho quanto a erros, se qualquer um dos objetivos não for alcançado. O período sugerido para avaliação da via quanto ao desempenho é de um mês.

3.1.5. Divisão dos objetivos ponta a ponta da via

A metodologia de divisão, distribuição dos objetivos totais da via (circuito), especifica os níveis de desempenho esperados para as porções, partes nacional e internacional que compõem o circuito de referência hipotético com 27500 km.

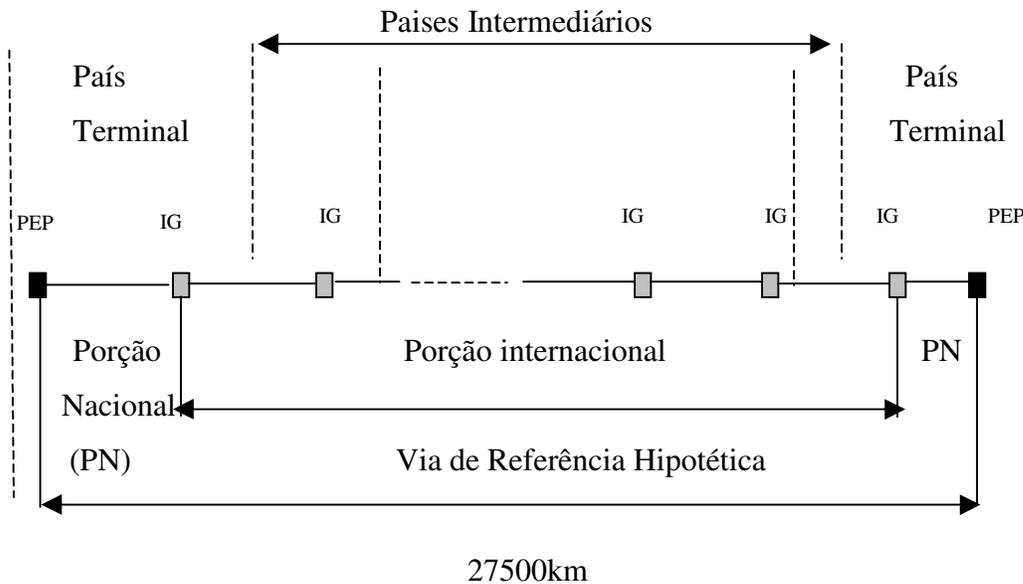


Figura 11: Circuito de referência hipotético com 27500 Km

PEP = Ponto Terminal da Via

IG = Gateway Internacional

Para o propósito da Recomendação, a fronteira entre as porções nacionais e internacionais é definida como sendo um Gateway Internacional, que normalmente corresponde a um *cross – connect*, a um multiplex de alta ordem ou a uma central de comutação (N-ISDN ou B-ISDN). IGs são sempre equipamentos terrestres que ficam fisicamente residentes no país terminal ou intermediário.

Os IGs estão localizados nos países intermediários para permitir o cálculo do comprimento total da porção internacional da via e dessa forma ser possível deduzir-se a alocação global dos objetivos.

A metodologia de alocação aplica-se a cada parâmetro definido em 3.1.4. e leva em consideração tanto o comprimento como a complexidade da via internacional. Todas as vias deverão ser analisadas para encontrar a alocação dos objetivos descritos nos próximos parágrafos. Se a alocação total exceder 100%, significa que o desempenho da via poderá ser inferior aos objetivos definidos na tabela 2, ou seja, não atende aos objetivos propostos.

Portanto a alocação de uma parte percentual para a porção nacional, dos objetivos totais definidos na tabela 2, deverá ser feita da seguinte forma:

- Para cada porção nacional é alocado um bloco fixo permitido de até 17,5% dos objetivos totais (ponta a ponta) da via internacional. Além disso, uma alocação baseada na distância deverá ser adicionada a permissão por bloco. A distância da rota aérea entre o PEP e o IG, deverá ser determinada e multiplicada por um fator de rota apropriado. Esse fator é especificado como sendo 1,5, quando a rota aérea for inferior a 1000km e 1,25, quando a rota aérea for maior ou igual a 1200km. Quando a rota aérea tiver uma distância entre 1000km e 1200km, considerar a distância da rota como sendo 1500km
- Quando a porção nacional incluir lances via satélite, a alocação total por bloco para a porção nacional será de 42% dos objetivos ponta a ponta definidos na tabela 2. A alocação de 42% substitui completamente a alocação baseada na distância e a alocação por bloco de 17,5% definida anteriormente para a porção nacional.

3.2. Recomendação F. 1092-1

Essa recomendação estabelece objetivos para o desempenho de sistemas rádio digitais, que fazem parte da porção internacional de 27500 km da via de referência hipotética, operando numa taxa maior ou igual a 2Mbits/s, de tal forma que esses sistemas estejam em concordância com os objetivos de desempenho ponta a ponta, especificados na recomendação G.826.

Considera-se, nessa recomendação, que os sistemas rádio digitais podem ser usados tanto em países intermediários quanto em países terminais da via hipotética de 27500km.

A ligação rádio terrestre utilizada para a obtenção dos dados de desempenho para essa dissertação de mestrado foi projetada para atender aos objetivos mais restritivos especificados nessa recomendação.

Segundo a F.1092-1 os objetivos de desempenho deverão ser baseados tanto na alocação de distância como na alocação do país, quando são consideradas as características do país onde está situada, conforme especificado na G.826.

Para cada direção do tronco rádio, conjunto de lances rádio que interligam as duas pontas do sistema rádio, fica estabelecido que a alocação dos objetivos de desempenho deverá ser composta por:

- A. Uma alocação baseada na distância de 1% para cada 500 km, e;
- B. Uma alocação baseada no país de no mínimo 2% por país intermediário ou 1% por país terminal

Com base no especificado acima fica estabelecido para a alocação baseada no país, as seguintes determinações:

- Um valor constante (de até o valor máximo dado em A e B) deverá ser aplicado ao tronco rádio com um comprimento L maior que:
 - Um comprimento de referência, L_{ref} , para países intermediários
 - A metade do comprimento de referência, L_{ref} , para países terminais
- Uma fração do valor constante, proporcional ao comprimento L , deverá ser aplicado ao tronco rádio com comprimento L igual ou menor que:
 - Um comprimento de referência, L_{ref} , para países intermediários
 - A metade do comprimento de referência, L_{ref} , para países terminais

O valor do comprimento de referência L_{ref} , foi provisoriamente estabelecido na F.1092-1 como sendo de 1000km, e foi escolhido para cobrir a distância entre as fronteiras extremas da maioria dos países. Entretanto, o Brasil é um país de dimensão quase continental e baseado nessa particularidade, L_{ref} foi definido com sendo de 4500km (valor provisório), pela empresa operadora dos troncos rádio por ela implantados no Brasil.

Um valor mínimo, L_{min} para o comprimento L ficou sob estudo. Entretanto a empresa operadora do tronco rádio sob estudo, definiu um valor provisório para L_{min} como sendo de 100km.

A tabela 3 abaixo apresenta os valores dos objetivos de desempenho definidos na F. 1092-1. Esses objetivos deverão ser aplicados a cada uma das direções de um tronco rádio de comprimento L , pertencente a porção

internacional da via de referência hipotética de 27500km com taxa constante de bits maior ou igual a 2Mbits/s.

Taxa (Mbit/s)	1,5 a 5	5 a 15	>15 a 55	>55 a 160
ESR	$0,04x(F_L+B_L)$	$0,05x(F_L+B_L)$	$0,075x(F_L+B_L)$	$0,16x(F_L+B_L)$
SESR	$0,002x(F_L+B_L)$	$0,002x(F_L+B_L)$	$0,002x(F_L+B_L)$	$0,002x(F_L+B_L)$
BBER	$2 \times 10^{-4} \times (F_L+B_L)$			

Tabela 3: Objetivos de desempenho definidos na Recomendação ITU-R F.1092

Fator de alocação de distância : $F_L = 0,01 \times L/500$, $L(\text{km})$

Fator de acréscimo por bloco:

- Para países intermediários $B_L = B_R \times 0,02 \times (L/L_{ref})$ para $L_{min} < L \leq L_{ref}$ e $B_L = B_R \times 0,02$ para $L > L_{ref}$
- Para países terminais $B_L = B_R \times 0,01 \times (L/L_{ref}/2)$ para $L_{min} < L \leq L_{ref}/2$ e $B_L = B_R \times 0,01$ para $L > L_{ref}/2$

O taxa de acréscimo por bloco, B_R terá um valor maior que zero e menor ou igual a 1.

Baseado nas definições acima e na determinação da empresa operadora desse tronco em que ele atendesse a situação mais restritiva dos objetivos de desempenho foram estabelecidos os seguintes valores que foram aplicados na definição dos objetivos de desempenho do tronco:

- $F_L = 0,01 \times L/500$ para $L > L_{min}$
- $F_L = 0,01 \times L_{min}/500$ para $L \leq L_{min}$
- $B_L = 0,01 \times (L/L_{ref})$ para $L_{min} < L \leq L_{ref}$
- $B_L = 0,01 \times (L_{min}/L_{ref})$ para $L \leq L_{min}$
- $B_L = 0,01$ para $L > L_{ref}$

onde B_R foi escolhido como sendo igual 0,5, $L_{min} = 100\text{km}$ e $L_{ref} = 4500\text{km}$.

A aplicação desses valores no cálculo dos objetivos de SESR para o tronco CBA-GNA é apresentada abaixo:

$$\text{SESR} = 0,002 \times (F_L + B_L)$$

$$F_L = 0,01 \times (L/500) \text{ e } B_L = 0,01 \times (L/4500)$$

Como o comprimento total deste tronco é $L = 870 \text{ Km}$, temos $SESR = 38,66 \times 10^{-6}$. Este é o valor do objetivo de desempenho determinado para o tronco CBA-GNA e que deveria ter sido atendido quando foi realizado o projeto do tronco.

3.3.Recomendação ITU-R F.695

Objetivos de disponibilidade para enlaces rádio digital que fazem parte de um circuito de alto grau dentro de uma Rede Digital de Serviços Integrados (RDSI).

Esta Recomendação estabelece que:

1. Que os objetivos de disponibilidade apropriados a um enlace rádio digital verdadeiro que faça parte de um circuito de alto grau pertencente a uma RDSI, com um comprimento L de enlace, entre 280km e 2500km, deverá ser:

$$A = 100 - (0,3 \times L/2500) \%$$

onde “A” é a disponibilidade do enlace rádio digital.

Esta disponibilidade deverá ser avaliada por um período de tempo suficientemente longo para ser estatisticamente válida. Este período deverá ser provavelmente superior a um ano.

2. Que na estimativa da indisponibilidade deverão ser incluídas todas as causas estatisticamente previsíveis, não intencionais, resultante do equipamento rádio, de fontes de alimentação, de propagação, de interferências, de equipamentos auxiliares e de atividades humanas. Deverá ser considerado também, na estimativa da indisponibilidade, o tempo médio para restauração (MTTR – Medium Time to Repair).

O MTTR é o tempo total compreendido entre o início de uma interrupção de tráfego até a sua completa restauração, incluindo o tempo gasto na detecção da interrupção, o tempo de viagem gasto para chegar ao local do problema e o tempo gasto no local para restabelecer o tráfego.

A influência da parte referente a propagação na concepção dos objetivos de disponibilidade é considerada nas Recomendações ITU-R F.1093 e ITU-R P.530.

O valor de 0,3 utilizado no cálculo dos objetivos de disponibilidade, é um valor provisório e é reconhecido que, na prática, o valor selecionado deverá estar entre 0,1 e 0,5. A escolha de um valor específico dentro dessa faixa depende da distribuição ótima do tempo de falha entre as várias causas possíveis, que podem não ser as mesmas quando as condições locais abaixo, entre outras, são consideradas:

- propagação;
- tamanho geográfico;
- distribuição da população;
- organização da manutenção aplicada pela empresa operadora do enlace rádio.

A Embratel adotava na época do projeto do tronco rádio CBA-GNA que o valor limite da disponibilidade para um sistema rádio digital do tipo longa distância, era o indicado na Recomendação ITU-R F.695, assumindo uma indisponibilidade de 0,2% para o circuito de referência de 2500 km.

O tronco CBA-GNA opera com 3 canais de rádio frequência (RF) ativos, equiprováveis quanto a falha, e com um canal de proteção (sistema 3+1).

Dessa forma os valores do objetivo de disponibilidade para o tronco CBA-GNA, com 870 km de comprimento total será:

$$A = 100 - (0,2 \times 870/2500) = 99,930 \%$$

Entretanto, para calcularmos a disponibilidade de uma única RF, devemos saber a sua prioridade em relação as demais.

Considerando que a RF utilizada em nosso estudo (RF 1), tenha prioridade 1, que a RF 2 tenha prioridade 2 e que a RF 3 tenha prioridade 3, a indisponibilidade da RF 1 será calculada utilizando a equação abaixo:

$$P_1 = [(a + 1) / (N + 1) \times 0,2 \times L / 2500]$$

A disponibilidade será dada por $A = 1 - P_1$ onde:

P = Percentagem de tempo de interrupção de um canal de prioridade 1.

a = Número de canais com prioridade 1

N = Número máximo de canais principais operando com um canal de proteção ($N = 7$ para as faixas de 6 GHz e 8 GHz)

L = comprimento do tronco rádio.

Portanto o valor da disponibilidade da RF 1 acima definida para o tronco CBA – GNA será igual a 99,987%.

3.4.Recomendação ITU-R F. 1093-1

Esta Recomendação trata dos efeitos da propagação por multipercursos no projeto e operação de sistemas rádio digital com visada direta.

A primeira parte dessa Recomendação explica o papel do desvanecimento multipercurso como o fator de propagação dominante para sistemas rádio digital operando em frequências abaixo de 10 GHz. As seções intermediárias discutem o papel das técnicas de diversidade e de equalização adaptativa na redução das degradações do canal. Finalizando, a predição de desempenho do sistema é tratada na parte final da Recomendação.

3.4.1.Considerações sobre a Propagação

As condições de propagação variam de mês a mês e de ano a ano, e a probabilidade de ocorrência dessas condições pode variar muito.

Portanto, o ideal é fazer um experimento por um período de 3 a 5 anos antes de tirar uma conclusão definitiva sobre a propagação em uma determinada região. Entretanto nem sempre isso é possível.

A partir dos dados de propagação foi possível concluir que uma ligação rádio bem projetada, não sujeita a desvanecimento por difração ou reflexões na superfície, tem como fator dominante do seu desempenho a propagação por multipercursos, quando operando em uma frequência abaixo de 10GHz. Acima de 10 GHz os efeitos da precipitação dominam os objetivos de disponibilidade dos sistemas.

Portanto os efeitos da chuva contribuem principalmente para a indisponibilidade dos sistemas rádio, enquanto que os efeitos da propagação por multipercursos são determinantes quanto a qualidade, desempenho quanto a erros, dos sistemas rádio.

Os efeitos da propagação devido a precipitação tendem a não ser dispersivos em frequência, enquanto que a propagação por multipercursos causada pelas camadas da troposfera podem ser. Isso pode causar distorção severa nos sinais que transportam a informação.

3.4.2. Contramedidas aos efeitos da propagação

Existem duas contramedidas normalmente utilizadas para combater a distorção por propagação: técnicas de diversidade e equalização adaptativa ao canal, que tentam combater a atenuação e a distorção causada pelo meio de propagação. A eficiência da contramedida ao desvanecimento é expressa em termos de um fator de melhora que é a razão entre o tempo de falha observado para um sistema sem a contramedida pelo tempo observado com a contramedida operando.

Ressalta-se que tempo de falha é um termo genérico que indica o tempo em que a taxa de erro de um sistema excede uma taxa de erro de bit limite para a boa operação do sistema (sistema operando com boa qualidade).

3.4.3. Cálculo das probabilidades de falhas.

Em sistemas digitais os períodos de falha são causados pela distorção da forma de onda devido ao desvanecimento seletivo em frequência, interferência e ruído térmico.

O período total de falha vai depender da contribuição dos três casos. Existem vários métodos para o cálculo do período de falha dos sistemas digitais que serão discutidos nas próximas seções.

Os parâmetros de entrada típicos desses métodos incluem:

- ◆ Comprimento do lance
- ◆ Frequência de operação
- ◆ Padrão de radiação da antena
- ◆ Coeficiente de rugosidade do terreno
- ◆ Liberação da via (lance)
- ◆ Zona climática

Uma outra entrada para alguns dos métodos de predição é utilizar um modelo de propagação por multipercursos. Os mais utilizados são:

- ◆ Modelos de raios
- ◆ Modelos polinomiais no domínio da frequência
- ◆ Modelos paramétricos

Para sistemas rádio digital, diferentemente dos sistemas analógicos, um aumento na margem de desvanecimento do sistema não irá melhorar o seu desempenho se o desvanecimento por multipercurso já tiver provocado o fechamento do diagrama de olho do sistema, ou seja, se a taxa de erro de bits já tiver ultrapassado o valor da taxa de erro máxima permitida (limite da taxa de erro).

Portanto aumentar a potência do transmissor não pode ser empregado como único meio de fazer o sistema rádio digital alcançar as suas exigências quanto a falhas.

Três abordagens tem sido usadas no desenvolvimento de métodos para predição de desempenho: Métodos de margem de desvanecimento, métodos da curva de assinatura e métodos que usam a distorção linear de amplitude (LAD).

A Recomendação ITU-R P.530 utiliza um método baseado na curva de assinatura. Portanto somente esse método será avaliado nessa dissertação.

3.4.3.1. Métodos da Curva de Assinatura

A assinatura pode ser medida aproximando o desvanecimento verdadeiro por um simulador de dois raios.

O modelo simplificado de dois raios tem a seguinte função de transferência:

$$H(w) = a [1 - b \exp(-j(w - w_0)\tau)]$$

onde um raio direto de amplitude unitária e um raio de amplitude “b”, atrasado de τ é assumido, sendo “a” um fator de escala.

A profundidade do desvanecimento, o ponto de “notch” do desvanecimento, está afastado da frequência central do canal e tem uma profundidade $B = -20 \log \lambda$ com $\lambda = 1 - b$.

A assinatura é então a plotagem do valor crítico B_c , como uma função de f_0 na taxa de erro de falha.

Embora o valor de 6,3ns para τ tem sido usado por várias administrações e a distribuição estatística associada para b e f_0 foi determinada a partir de estudos de um grande número de eventos de desvanecimento, a assinatura às vezes é medida usando outros valores de τ .

Desvanecimentos com fase não mínima podem ser considerados pela equação de $H(w)$ através de valores negativos do atraso τ .

Alguns métodos de cálculo de falha assumem τ como sendo uma variável contínua e aleatória. Portanto, nesses casos, regras de escalonamento são necessárias para estimar a variação de $bc(\tau)$ com τ . Diferentes regras de escalonamento para $bc(\tau)$ foram propostas. A regra linear, aplicável somente para pequenos atrasos, indica que a altura em comprimento de onda (λ) é proporcional a τ . Regras de escalonamento mais precisas também podem ser aplicadas.

A largura da assinatura $W(f_0)$ permanece praticamente constante em relação ao atraso, exceto para o caso quando o atraso se aproxima de zero, quando $W(f_0)$ dobra para $\tau/2$.

3.4.3.2.Cálculo de falha usando a assinatura

A probabilidade de falha por desvanecimento por multipercurso, P , pode ser calculada através da probabilidade de falha devido a desvanecimento seletivo, P_s , e da probabilidade de falha devido ao ruído térmico, P_f , usando a fórmula abaixo:

$$P = (P_s^{\alpha/2} + P_f^{\alpha/2})^{\alpha/2}$$

onde $\alpha = 1, 5 \dots 2$.

P_f é igual a probabilidade da margem de desvanecimento plano do sistema ser excedida e pode ser calculada usando a Recomendação ITU-R P.530. Os efeitos de sinais interferentes podem ser considerados como uma redução equivalente da margem do sistema.

Vários métodos que usam o conceito da assinatura para calcular P_s foram publicados. O método recomendado pela Recomendação ITU-R P. 530 é baseado no método B, que será o estudado.

Nesse método P_s é dado pelo produto da probabilidade de desvanecimento por multipercurso, η , pela probabilidade de falha por interferência intersimbólica durante o desvanecimento por multipercurso, $P_{s/mp}$.

$$P_s = \eta \times P_{s/mp}$$

Para o método B, temos $\alpha = 2$, logo $P = P_s + P_f$.

A probabilidade de desvanecimento por multipercurso, η , pode ser teoricamente relacionado ao fator de ocorrência de desvanecimento profundo P_o dado na Recomendação ITU-R P.530-10.

Uma regra empírica simplificada é aplicada para expressar η como:

$$\eta = 1 - \exp [-0,2 \times P_o^{0,75}]$$

Utiliza-se a seguinte relação empírica para o cálculo de τ_m , válida para lances (vias) sem reflexões significantes na superfície:

$$\tau_m = \tau_{mo} \times (D/50)^n$$

onde $1,3 \leq n \leq 1,5$ e τ_{mo} é o atraso médio relativo para uma via padrão com 50km de comprimento.

O valor τ_m caracteriza a severidade do desvanecimento. O método ‘B’ assume uma distribuição exponencial do atraso levando a um valor de $\tau_{mo} = 0,7$ ns.

O método ‘B’, assim como outros métodos (A, C e D), usam a assinatura para expressar o efeito das características do equipamento (tipo de modulação, fator de roll – off e equalização) na probabilidade de falha. Entretanto a forma como as assinaturas são aplicadas diferem de método para método.

No método ‘B’, especificamente, o efeito das características do equipamento é expresso através do valor do parâmetro de sistema normalizado kn , onde este parâmetro é avaliado pela assinatura medida do sistema.

Usando uma aproximação retangular para a assinatura, kn será dado por:

$$kn = (T^2 \times W \times \lambda_a) / \tau_r$$

onde:

T é o período do sistema em baud (ns)

W é a largura da assinatura em GHz

λ_a é a média da assinatura (linear) $\lambda_c(f) = 1 - b_c(f)$

τ_r é o atraso de referência para λ_a (ns).

A tabela 4 abaixo mostra valores de kn para receptores sem equalização adaptativa. O uso de equalizadores transversais de banda básica adaptativos melhora o desempenho do sistema reduzindo o valor de kn por cerca de 1/10 dos valores da tabela 4.

Método de Modulação	Kn
64 – QAM	15,4
16 – QAM	5,5
8 – PSK	7,0
4 – PSK	1,0

Tabela 4: Valores de kn para vários métodos de modulação, sem equalizadores.

Quando é utilizada a assinatura normalizada, o método ‘B’ leva ao seguinte valor de $P_{s/mp}$:

$$P_{s/mp} = 2,16 \times kn \times (2 \times \tau_m^2) / T^2$$

$$P_{s/mp} = 4,32 \times kn \times \tau_m^2 / T^2$$

3.5.Recomendação ITU-R P.530-10

Esta Recomendação trata dos dados de propagação e dos métodos de predição de desempenho necessários para o projeto de sistemas terrestres com visada direta.

A Recomendação considera que para o projeto de sistemas terrestres com visada direta é necessário ter dados e métodos de predição de desempenho apropriados a propagação. Estes métodos foram desenvolvidos para permitir a predição de alguns dos parâmetros de propagação mais importantes que afetam o planejamento dos sistemas rádio terrestre com visada direta e foram testados pela comparação dos resultados calculados com os dados reais medidos. Os resultados mostraram a boa precisão do método de predição de desempenho que provou ser compatível com a variabilidade natural do fenômeno da propagação, sendo adequado para a aplicação em planejamento de sistemas rádio digitais.

3.5.1.Conceitos básicos

Vários efeitos devem ser considerados no projeto de sistemas de enlaces rádio terrestres com visada direta, incluindo:

- Desvanecimento por difração que provoca a obstrução do lance rádio por obstáculos no terreno sob condições adversas de propagação.
- Atenuação devido a gases na atmosfera
- Desvanecimento devido ao multipercurso na atmosfera ou por espalhamento do feixe (comumente chamado de desfocalização) associado a camadas com refratividade anormal
- Desvanecimento devido ao aumento do multipercurso provocado por reflexão na superfície
- Atenuação devido a precipitação ou a partículas sólidas na atmosfera
- Variação do ângulo de chegada no receptor e do ângulo de lançamento (saída) no transmissor devido a refração.
- Redução da discriminação de polarização cruzada em condições de multipercurso e precipitação.
- Redução do sinal devido ao desvanecimento seletivo em frequência e ao atraso durante a propagação por multipercurso.

O principal objetivo dessa recomendação é apresentar um método de predição simples para os efeitos de propagação que devem ser considerados na maioria dos sistemas rádios fixos com visada direta, junto com informações sobre suas faixas de validade.

Com exceção da interferência resultante da redução na discriminação de polarização cruzada (XPD), esta recomendação se preocupa somente com os efeitos que ocorrem no sinal desejado.

Cabe ressaltar que o termo “pior mês” usado nesta Recomendação é equivalente ao termo “qualquer mês”.

3.5.2. Perda por Propagação

A perda por propagação, em sistemas terrestres com visada direta, relativa a perda por espaço livre é a soma das diferentes contribuições abaixo relacionadas:

- Atenuação devido a gases na atmosfera
- Desvanecimento por difração devido a obstrução total ou parcial do lance rádio
- Desvanecimento devido a multipercurso, espalhamento do feixe e cintilação.
- Atenuação devido a variação do ângulo de chegada ou partida.
- Atenuação devido a precipitação.
- Atenuação devido a tempestade de areia e poeira.

Cada uma destas contribuições tem suas próprias características em função da frequência, comprimento do lance rádio e localização geográfica.

O sistema rádio terrestre sob análise, tronco rádio digital CBA-GNA, opera na faixa de 6GHz baixa e não possui nenhum lance obstruído ou difratado. Portanto, o principal fenômeno responsável pelo desempenho quanto a erros desse sistema é o desvanecimento provocado por multipercurso, que será o único fenômeno analisado nessa dissertação.

3.5.2.1.Desvanecimento devido a multipercurso e mecanismos relacionados

Vários mecanismos de desvanecimento que ocorrem em condições normais da atmosfera, condições de ar claro ou limpo, causadas por camadas extremamente refrativas, devem ser consideradas no planejamento de enlaces rádio com alguns quilômetros de comprimento.

Abaixo relacionamos alguns desses principais mecanismos:

- Espalhamento do feixe (desfocalização)
- Desacoplamento da antena
- Multipercurso na superfície e multipercurso na atmosfera

A maioria desses mecanismos pode ocorrer sozinho ou em combinação com outros.

Uma forma particularmente severa de desvanecimento é o seletivo em frequência que ocorre quando há espalhamento do feixe do sinal direto combinado com um sinal refletido na superfície, produzindo o desvanecimento por multipercurso.

No item seguinte será apresentado um método para predição da distribuição do desvanecimento em uma única frequência (faixa estreita), durante a ocorrência de desvanecimentos longos e profundos para o mês com a pior média. Este método é válido para qualquer parte do mundo, não faz uso do perfil do lance rádio e pode ser usado para o planejamento inicial, licenciamento e projeto dos sistemas rádio.

3.5.2.1.1.Método para pequenas percentagens de tempo (desvanecimentos muito profundos)

Passo 1: Estimar o fator geoclimático k para a média do pior mês do ano através do uso de dados de desvanecimento da área de interesse, se estes dados estiverem disponíveis.

Se dados medidos de k não forem disponíveis, e um projeto detalhado de um enlace rádio está em desenvolvimento, estimar o fator geoclimático para a média do pior mês fazendo:

$$K = 10^{(-3,9 - 0,003 \times dN1)} S_a^{-0,42} \quad (1)$$

onde $dN1$ é o gradiente de refratividade nos 65 metros mais baixos da atmosfera não excedido por 1% no ano e ‘Sa’ é o coeficiente de rugosidade da área do terreno.

$dN1$ é fornecido em uma grade a cada $1,5^0$ de latitude e longitude e seus dados estão disponíveis em forma tabulada pelo Bureau de Radiocomunicação (BR), desde que tenhamos as coordenadas geográficas da localização das estações rádio do tronco digital.

Sa é definido como o desvio padrão das alturas do terreno em metros, dentro de uma área de 110km x 110km com 30s de resolução. Dados do terreno estão disponíveis na internet em endereço fornecido pelo BR.

Se for necessária a obtenção rápida do valor de K, uma forma de cálculo com razoável precisão pode ser obtida da equação abaixo:

$$K = 10^{(-4,2 \times -0,0029 \times dN1)} \quad (2)$$

Passo 2: Das altitudes das antenas transmissoras (h_e) e receptoras (h_r) acima do nível do mar, calcular a magnitude da inclinação do lance rádio, $|\epsilon_p|$ (mrad) de:

$$|\epsilon_p| = |h_r - h_e|/d$$

onde d é o comprimento do lance rádio em km.

Passo 3: Para aplicações em projetos detalhados de ligações rádio, calcular a percentagem de tempo P_w que um desvanecimento de profundidade A (dB) é excedido na média para o pior mês, fazendo:

$$P_w = k \times d^{3,2} \times (1 + |\epsilon_p|)^{-0,97} \times 10^{[0,032f - 0,00085h_l - (A/10)]} \quad (3)$$

Onde f é a frequência em GHz, h_l é a altitude da menor antena(a menor entre h_r e h_e) e k é o fator geoclimático dado na equação (1).

Para aplicações rápidas, calcular a percentagem de tempo P_w que um desvanecimento profundo A (dB) é excedido na média do pior mês, utilizando:

$$P_w = k \times d^{3,0} \times (1 + |\epsilon_{pl}|)^{-1,2} \times 10^{[0,033f - 0,001hl - (A/10)]} \quad (4)$$

onde k agora é obtido da equação (2).

Po é igual a Pw fazendo A = 0dB na equação (3), para cálculos precisos, e na equação (4), utilizada para cálculos simplificados.

Assim as equações (3) e (4) podem ser reescritas utilizando Po, da seguinte forma:

$$P_w = P_o \times 10^{-A/10} \quad (5)$$

3.5.2.1.2. Predição de falha não seletiva

Está relacionada a limitação que o ruído térmico provoca no desempenho dos sistemas rádio digitais.

A probabilidade de falha, Pns, devido ao componente não seletivo do desvanecimento é dado por:

$$P_{ns} = P_w/100$$

onde Pw (%) é a percentagem de tempo que a margem de desvanecimento plano do sistema A=F(dB), correspondente a uma taxa de erro de bit específica (BER limite ou BER máxima) é excedida na média do pior mês. A margem de desvanecimento plano F(dB), é obtida através dos cálculos do lance rádio e está relacionada ao tipo de equipamento utilizado, levando-se também em consideração possíveis reduções devido a interferência no lance rádio real projetado.

Nesta Recomendação o termo “falha” aqui utilizado é definido como a probabilidade de ocorrer uma taxa de erro maior que um dado valor (taxa de erro limiar ou máxima) permitido para a operação com qualidade do sistema.

3.5.3. Redução da discriminação de polarização cruzada (XPD)

A XPD pode deteriorar o suficiente para causar interferência co-canal e, com menor extensão, interferência no canal adjacente. A redução na XPD que

ocorre durante as condições de ar claro e durante condições de precipitação atmosférica, deve ser considerada.

3.5.3.1. Predição de falha por deterioração de XPD devido a efeitos que ocorrem durante condições de ar claro.

O efeito combinado da propagação multipercurso e o padrão de polarização cruzada das antenas, governam a redução da XPD por pequenas percentagens de tempo. Para calcular o efeito dessas reduções no desempenho das ligações rádio, utiliza-se o seguinte procedimento:

Passo 1: Calcular XPDo

$$\text{XPDo} = \text{XPDg} + 5 \text{ para } \text{XPDg} \leq 35$$

ou

$$\text{XPDo} = 40 \text{ para } \text{XPDg} > 35$$

onde XPDg é a garantia do fabricante do mínimo valor de XPD da antena transmissora e da antena receptora.

Passo 2: Avaliar o parâmetro de atividade do multipercurso (probabilidade de desvanecimento por multipercurso).

$$\eta = 1 - \exp[-0,2x(\text{Po})^{0,75}]$$

onde $\text{Po} = \text{Pw}/100$ é o fator de ocorrência de multipercurso correspondendo a percentagem de tempo Pw (%), que ocorre um desvanecimento com profundidade maior que $A=0\text{dB}$, conforme calculado nas equações (3) e (4).

Passo 3: Determinar $Q = -10\log [k_{xp} \times \eta / \text{Po}]$

onde k_{xp} é igual a 0,7, quando só temos uma antena transmissora (caso do tronco rádio CBA-GNA), ou $k_{xp} = 1 - 0,3 \exp [-4 \times 10^{-6} \times (s_t / \lambda)^2]$, quando se utiliza duas antenas transmissoras.

No caso em que há duas transmissões ortogonalmente polarizadas, utilizando antenas diferentes, st (m) é a separação vertical entre as antenas e λ (m) é o comprimento da onda portadora.

Passo 4: Derivar o parâmetro C:

$$C = XPD_o + Q$$

Passo 5: Calcular a probabilidade de falha P_{xp} devido a polarização cruzada em condições de ar claro de:

$$P_{xp} = P_o \times 10^{\frac{-M_{XPD}}{10}}$$

onde M_{XPD} (dB) é a margem equivalente de XPD para uma BER de referência dada por:

$$M_{XPD} = C - Co/I, \text{ sem XPIC, ou } M_{XPD} = Co/I + XPIF \text{ com XPIC.}$$

onde, Co/I é a relação portadora/interferência para a BER de referência que pode ser avaliada tanto por simulação como por medição.

XPIF é uma medida de laboratório do fator de melhora de polarização cruzada, que fornece a diferença da isolação de polarização cruzada (XPI) medida em um ambiente com uma relação portadora/ruído suficientemente grande (tipicamente 35dB), e com uma BER específica para o sistema, com e sem cancelador de interferência de polarização cruzada (XPIC). Um valor típico para XPIF é cerca de 20dB.

3.5.4. Distorção devido aos efeitos da propagação

A causa principal de distorção em lances rádio com visada direta nas faixas de UHF e SHF é a dependência da amplitude e do retardo de grupo com a frequência durante condições de multipercurso com ar claro. Nos sistemas

analógicos, um aumento na margem de desvanecimento irá melhorar o desempenho do sistema porque o impacto do ruído térmico é reduzido.

Nos sistemas digitais, entretanto, o uso de uma grande margem de desvanecimento não irá ajudar se a causa da redução do desempenho for o desvanecimento seletivo em frequência.

Os métodos de predição de desempenho utilizam modelo com múltiplos raios que integra várias variáveis, tais como o atraso e distribuição de amplitudes, junto com um modelo apropriado aos elementos do equipamento (moduladores, equalizadores, esquemas de correção de erros – FEC e etc).

O método desta Recomendação para a predição de desempenho é o método da assinatura, ou seja, método “B” da Recomendação ITU-R F.1093-1.

A distorção resultante da precipitação é considerada desprezível e insignificante se comparada com o problema da atenuação provocada pela chuva.

3.5.4.1. Predição de falha em sistemas digitais sem proteção

A probabilidade de falha é aqui definida como a probabilidade que a BER seja maior do que uma determinada BER limiar.

Passo 1: Calcular o atraso médio utilizando:

$$\tau_m = 0,7 \times (d/50)^{1,3} \text{ ns}$$

onde d é o comprimento do lance rádio em km.

Passo 2: Calcular o parâmetro de atividade do multipercurso η , conforme passo 2 de 2.5.3.1.

Passo 3: Calcular a probabilidade de falha seletiva fazendo:

$$P_s = 2,15 \times \eta \times \tau_m^2 \times 2\text{kn}/T^2 = 4,30 \times \eta \times \tau_m^2 \times \text{kn}/T^2$$

onde kn é o parâmetro normalizado do sistema que expressa os efeitos das características do equipamento, tais como tipo de modulação, fator de roll-off e tipo de equalizador.

O parâmetro kn é avaliado a partir de medidas de assinatura do sistema e T é o período do símbolo em baud do sistema em ns.

As definições do parâmetro de assinatura e as especificações de como obter a assinatura do sistema, são dados na Recomendação ITU-R F.1093.

3.5.5. Técnicas para aliviar os efeitos da propagação por multipercurso

Os efeitos do desvanecimento lento, ou desvanecimento não seletivo em frequência (desvanecimento plano), provocados pelo espalhamento do feixe, e os efeitos do desvanecimento rápido ou seletivo em frequência, provocados por multipercurso, devem ser considerados no projeto de enlaces rádio.

Existem diversas técnicas disponíveis para aliviar esses efeitos, sendo que muitas delas atuam em ambos os desvanecimentos simultaneamente. A mesma técnica normalmente alivia também a redução na discriminação de polarização cruzada.

Elas podem ser categorizadas em técnicas que não requerem algum tipo de diversidade na recepção ou na transmissão, e em técnicas que requerem diversidade.

3.5.5.1. Técnicas com diversidade

Incluem diversidade de espaço, ângulo e frequência.

Cabe esclarecer que o tronco rádio utilizado para coleta de dados de desempenho, tronco CBA-GNA, só utiliza a técnica de diversidade de espaço. Portanto, apenas esse tipo de diversidade será comentado nessa dissertação.

O grau de melhoramento da técnica de diversidade vai depender do quanto são decorrelatados os sinais recebidos pelo sistema de diversidade.

O fator de melhoramento da diversidade, 'I', para um desvanecimento de profundidade A (dB), é definido por:

$$I = P(A)/P_d(A)$$

onde $P_d(A)$ é a percentagem de tempo que um sinal combinado em diversidade sofre o efeito de um desvanecimento superior a A (dB), e $P(A)$ é a percentagem de tempo que um sinal sem proteção é afetado pelo mesmo desvanecimento.

Em sistemas digitais, o fator de melhoramento da diversidade é definido pela razão entre o tempo que ocorreu uma BER maior que uma determinada BER (BER limiar) com e sem diversidade.

O fator de melhoramento para diversidade de espaço para sinais faixa estreita, pode ser estimado por:

$$I = [1 - \exp (-0,04 \times S^{0,87} \times f^{-0,12} \times d^{0,48} \times P_o^{-1,04})] 10^{(A-V)/10} \quad (6)$$

onde: $V = | G_1 \times G_2 |$

A : profundidade do desvanecimento para um lance rádio sem proteção

P_o : fator de ocorrência de multipercurso (%)

S : separação vertical (centro a centro) das antenas receptoras (m)

f : frequência (GHz)

d : comprimento da ligação (km)

G_1 e G_2 : ganho das duas antenas (dBi)

A equação de I é válida em desvanecimentos profundos nos quais as equações de P_w , equações (3) e (4), são válidas.

3.5.5.1.1. Predição de falhas em sistemas digitais usando diversidade de espaço

Nos sistemas com diversidade de espaço utiliza-se, em grande maioria, combinadores de máxima potência. A seguir será apresentado um procedimento que se aplica a estes tipos de combinadores.

Passo 1: Calcular o fator de diversidade do multipercurso, ζ , conforme o passo 2 do item 2.5.3.1.

Passo 2: Calcular o quadrado do coeficiente de correlação não seletivo, k_{ns} , fazendo:

$$k_{ns}^2 = \frac{1 - I_{ns} \times P_{ns}}{\eta}$$

onde a melhora, I_{ns} , pode ser avaliada da equação (6) no item 2.5.5.2, para um desvanecimento com profundidade A (dB), correspondendo a uma margem plana de desvanecimento F (dB) (ver 2.5.2.1.2), e P_{ns} da equação $P_{ns} = P_w/100$.

Passo 3: Calcular o quadrado do coeficiente de correlação seletivo, k_s , de:

$$k_s^2 = 0,8238, \text{ para } r_w \leq 0,5$$

ou

$$k_s^2 = 1 - 0,195 (1 - r_w)^{0,109 - 0,13 \log(1 - r_w)}, \text{ para } 0,5 < r_w \leq 0,9628$$

ou

$$k_s^2 = 1 - 0,3957 (1 - r_w)^{0,5136}, \text{ para } r_w > 0,9628$$

Onde o coeficiente de correlação, r_w , das amplitudes relativas é dado por:

$$r_w = 1 - 0,9746 (1 - k_{ns}^2)^{2,170}, \text{ para } k_{ns}^2 \leq 0,26$$

ou

$$r_w = 1 - 0,6921 (1 - k_{ns}^2)^{1,034}, \text{ para } k_{ns}^2 > 0,26.$$

Passo 4: Calcular a probabilidade de falha não seletiva P_{dns} , de:

$$P_{dns} = P_{ns}/I_{ns}$$

Onde P_{ns} é a probabilidade de falha sem proteção dada por $P_{ns} = P_w/100$.

Passo 5: Calcular a probabilidade de falha seletiva, P_{ds} , de:

$$P_{ds} = \frac{P_s^2}{\eta(1 - k_s^2)}$$

Onde P_s é a probabilidade de falha sem proteção dada por:

$$P_s = 4,30 \times \eta \times \tau_m^2 \times kn/T^2$$

Passo 6: Calcular a probabilidade total de falha, P_d , dada por:

$$P_d = (P_{ds}^{0,75} + P_{dns}^{0,75})^{4/3}$$

3.5.6. Predição total de falha

Calcular a probabilidade total de falha devido aos efeitos de ar claro de:

$$P_t = P_{ns} + P_s + P_{xp}, \text{ sem diversidade}$$

ou

$$P_t = P_d + P_{xp}, \text{ com diversidade}$$

onde $P_t = P \text{ |SES|}$, ou seja, a probabilidade total de falhas devido aos efeitos que ocorrem em condições de ar claro, é igual a probabilidade de ocorrência de segundos severamente errados (SES).

Os métodos de predição de falha dados para sistemas rádio digitais foram desenvolvidos a partir da definição de falha como sendo uma BER acima de um dado valor ($BER \geq 1 \times 10^{-3}$), para permitir que os sistemas alcançassem os requisitos definidos na Recomendação ITU-T G.821. O termo “falha” está separado em desempenho quanto a erros e em disponibilidade. A falha devido aos efeitos que ocorrem em condições de ar claro está fortemente ligada ao desempenho do sistema, enquanto que a falha devido a precipitação está predominante ligada a disponibilidade. Contudo é reconhecido que existirão contribuições para a disponibilidade devido aos efeitos de ar claro e existirão contribuições para o desempenho devido a precipitação.