

1 INTRODUÇÃO

1.1. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Novos sistemas sem fio de banda larga.

Nos últimos anos tem-se observado um acelerado crescimento na demanda por redes de comunicações de múltiplos serviços, tais como voz, áudio, vídeo e especialmente dados a alta velocidade para, por exemplo, o tráfego de Internet e aplicações multimídia. Uma das alternativas mais rápidas e econômicas para prover estes serviços são os sistemas de acesso sem fio de banda larga.

Os sistemas sem fio de banda larga, conhecidos como sistemas BWA (*Broadband Wireless Access*) [1-3], têm como principais vantagens sobre seus análogos com fios, o curto tempo de implantação (aproximadamente 10% menos do tempo necessário para sistemas com fio), o rápido retorno do investimento (inclusive, durante a implantação do sistema), menores custos de manutenção, gerenciamento e operação, assim como uma grande flexibilidade que permite, entre outras coisas, que sejam reinstalados em nova áreas com um custo de reinstalação bastante baixo. Adicionalmente, alguns desses sistemas BWA, como os sistemas celulares de terceira geração, oferecerão também mobilidade global, tornando possíveis as comunicações em “qualquer lugar”, a “qualquer tempo” e para “qualquer serviço”.

Diversos sistemas BWA tem sido implementados ou estão em desenvolvimento [1-4]. Parte deles opera nas bandas de frequência ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) de 2,4 GHz e 5 GHz e nas bandas de frequência UNII (*Unlicensed National Information Infrastructure*) de 5 GHz e nas faixas designadas para serviços móveis celulares. Entretanto, os sistemas BWA de maior largura de faixa, como o LMDS e o MVDS operam nas bandas de frequência acima de 20 GHz, nas quais outros aspectos de propagação relacionados à atenuação e despolarização por chuvas devem ser considerados.

Na Tabela 1.1 são resumidas as principais características dos principais sistemas BWA [3].

Tabela 1 Características dos Sistemas BWS.

Sistema	Frequência (GHz)	Taxa de transmissão (Mbps)	Cobertura (km)
Sistemas 3G	2 (típica)	< 2	Múltipla
Bluetooth	2,4 (ISM)	< 1	0,010
HiperLAN/2	5 (ISM/UNII)	6 - 54	0,030 – 0,150
WiFi	2,4 e 5	11 - 54	0,030 – 0,150
MMDS	2,6	37	< 60
LMDS	28	155 - 1000	< 8
MVDS	40 (típica)	200	< 1,5

Especificamente, nas faixas de frequência objeto do presente trabalho, os sistemas LMDS (*Local Multipoint Distribution System*) [3,5-6] operam, originalmente, na faixa 28 GHz, com uma banda original de 1,3 GHz designada pela FCC nos EUA. Também são conhecidos pelo acrônimo LMCS (*Local Multipoint Communications Systems*), patentado no Canadá. No Brasil a ANATEL designou uma banda total de 3,3 GHz para estes sistemas, subdividida em faixas de 500 MHz e 75 MHz. Inicialmente implementado para a distribuição de TV analógica, o sistema LMDS é uma solução conveniente para atender à demanda por serviços de banda larga, tais como áudio, vídeo, dados a alta velocidade e aplicações multimídia, incluindo aplicações médicas e de videoconferência.

O sistema LMDS baseia-se numa topologia celular, com células cujos raios variam tipicamente de 2 a 10 km, e antenas setorizadas nas ERBs, sendo típica a utilização de quatro setores de 90°. Para minimizar os efeitos de interferência utiliza-se polarizações alternadas entre setores vizinhos, tal como pode ser observado na Fig. 1. As antenas das unidades de usuário são altamente diretivas, com ganhos na ordem dos 33 dBi.

Devido à elevada frequência de operação, o desempenho e a cobertura de sistemas LMDS é seriamente afetada pela presença de chuva nos diferentes enlaces do sistema. A Fig. 2 mostra um exemplo típico da variação do raio de

células dependendo da região climática, definida pelo ITU-R (*International Telecommunications Union-Radio*), onde o sistema opera [6].

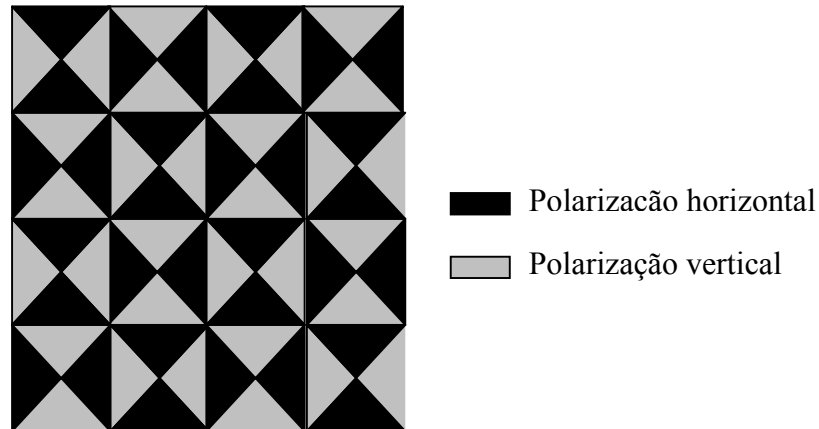


Figura 1 Técnica de polarização alternada no sistema LMDS.

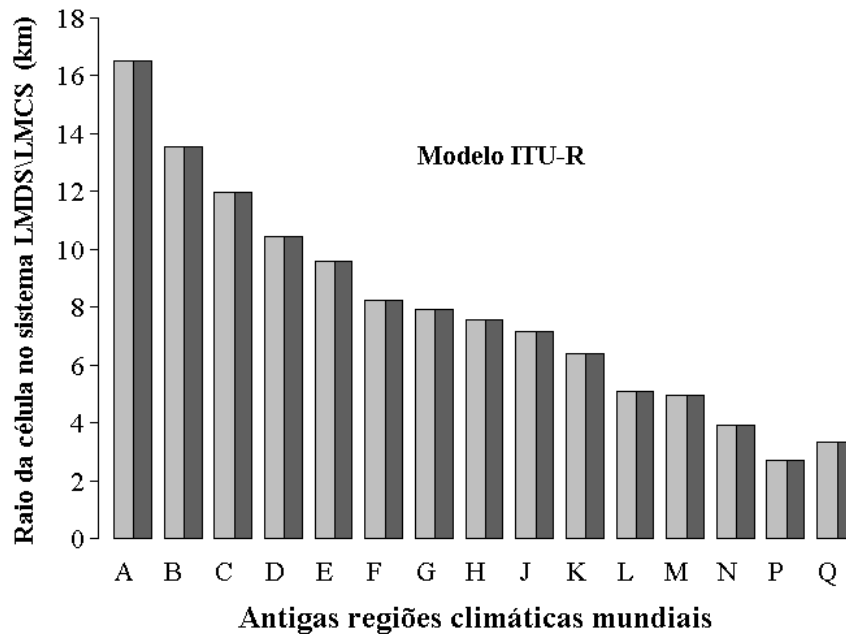


Figura 2 Variação de raio de uma célula com a chuva, no sistema LMDS.

Por outro lado, os sistemas MVDS (*Multipoint Video Distribution Service*) [3,7-8] existentes atualmente são baseados na transmissão analógica FM (*Frequency Modulation*) e geralmente operam na faixa de 40 GHz para transmissão analógica de TV por assinatura. Com uma largura de banda de 2 GHz, o sistema MVDS é capaz de suportar 60 canais digitais com uma largura de 33 MHz cada.

O desempenho e a cobertura do sistema MVDS também são significativamente limitados pela atenuação por chuva. Em contrapartida, sua grande largura de banda é uma vantagem atraente, pois também permitirá a implementação de diversos serviços de banda larga. Com este objetivo, e seguindo os passos do LMDS, estão sendo desenvolvidos sistemas MVDS bidirecionais digitais compatíveis com a técnica de compressão de vídeo MPEG2.

Os sistemas MVDS também podem ser implementados em frequências inferiores a 40 GHz, como por exemplo, 2,5 GHz, 12 GHz e 28 GHz, mas com uma menor largura de banda.

Atenuação por chuvas.

Como mencionado, a ocorrência de eventos de chuva em enlaces rádio que operam em faixa de frequências superiores a 10 GHz afeta drasticamente o desempenho e a cobertura do sistema. Isso deve-se ao fato de, nessas frequências, o comprimento de onda do sinal ser da mesma ordem de grandeza do tamanho das gotas de água, provocando um forte aumento na atenuação sinal, devido à absorção e espalhamento da energia que se propaga através do meio preenchido com estas gotas. Assim, dado que o dimensionamento e planejamento desses sistemas são fortemente dependentes da atenuação produzida pela chuva, torna-se de especial importância a utilização de modelos para a previsão deste efeito, a fim de poder determinar, da forma mais precisa possível, seu impacto no sistema.

Uma considerável quantidade de modelos para a previsão da atenuação de chuvas, assim como de trabalhos científicos-técnicos relacionados com o tema, aparecem na literatura técnica. Os modelos que têm mostrado melhor desempenho quando aplicados a enlaces terrestres são o modelo de ITU-R (Recomendação P.530-10) e o modelo de Crane. Recentemente foi submetido ao ITU-R (Documento 3M/38-E, de ITU-R) uma variante do método atualmente recomendado, denominada aqui modelo Australiano e que também apresenta um desempenho comparável ao dos demais citados.

O modelo ITU-R aparece como o modelo oficial para a previsão da atenuação por chuvas, cuja fácil implementação adicionada à razoável precisão que oferece para uma significativa quantidade de lugares no mundo, constituem-se em suas principais vantagens. Entretanto, apresenta também algumas sérias

limitações, como o fato da utilização de apenas um valor de taxa de precipitação, o valor excedido em 0,01% do tempo ($R_{0,01}$), para caracterizar o regime de chuvas na região de interesse e a pouca precisão quando aplicado a climas equatoriais e tropicais como os existentes no Brasil.

O modelo Australiano é uma ligeira variante do modelo de ITU-R, obtida através da incorporação de medidas realizadas na Austrália, apresentando essencialmente as mesmas desvantagens.

O modelo de Crane utiliza a distribuição completa da atenuação por chuvas mas foi baseado num conjunto de dados experimentais de poucas regiões climáticas e apresenta precisão limitada quando aplicado globalmente.

Um modelo adicional, denominado CETUC-98, é também analisado neste trabalho. É um modelo de fácil implementação e apresenta excelentes resultados para o clima tropical do sudeste do Brasil para o qual foi desenvolvido mas, para outros tipos de climas, oferece resultados pouco precisos.

A necessidade de conseguir um modelo de atenuação por chuvas que ofereça uma boa precisão na maior quantidade de lugares do mundo possível, seja de fácil implementação e supere a limitação inerente à utilização da taxa de precipitação referida a apenas uma percentagem de tempo, foi uma das motivações do presente trabalho.

Uma outra motivação muito importante é a procura de uma solução para um problema que até agora tem sido muito pouco abordado na literatura existente. Esse problema é o da previsão da atenuação diferencial por chuvas em enlaces convergentes, de especial importância no cálculo da interferência em sistemas ponto-multiponto que operam em frequências superiores a 10 GHz. Praticamente não existe, até agora, nenhuma abordagem sólida do assunto na literatura técnica, seja para climas temperados ou climas equatoriais e tropicais.

A terceira motivação do presente trabalho é um outro problema que também não tem sido abordado para regiões equatoriais e tropicais. Trata-se do modelamento da duração de eventos de chuva, de especial interesse para determinar a influência do comportamento dinâmico da chuva no planejamento e dimensionamento de sistemas de banda larga.

1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO

Os objetivos definidos para este trabalho foram:

- a) Análise dos dados de medidas de atenuação por chuvas no Brasil para gerar distribuições cumulativas de probabilidade da atenuação em enlaces individuais.
- b) Análise de dados de medidas de atenuação por chuvas em enlaces convergentes no Brasil, para gerar as distribuições cumulativas da atenuação diferencial.
- c) Análise de dados de medidas de atenuação por chuvas no Brasil, para gerar as distribuições cumulativas da duração e número de eventos de chuva.
- d) Análise de dados de medidas de taxa de precipitação no Brasil, para gerar as distribuições cumulativas utilizadas na previsão da atenuação.
- e) Desenvolvimento de um modelo global para previsão da atenuação por chuvas em enlaces operando em frequências superiores a 10 GHz, utilizando as distribuições cumulativas da atenuação por chuvas dos enlaces do Brasil em conjunto com as distribuições contidas na base oficial de dados do ITU-R.
- f) Desenvolvimento de modelos de previsão da atenuação diferencial por chuvas, para climas tropicais e equatoriais, utilizando as distribuições cumulativas da atenuação diferencial por chuvas dos enlaces convergentes medidas do Brasil.
- g) Desenvolvimento de um modelo de previsão da duração de eventos de chuvas, para climas tropicais e equatoriais, utilizando as distribuições cumulativas da duração de eventos de chuva medidas no Brasil.
- h) Desenvolvimento de um modelo de previsão da duração média de eventos de chuvas, para climas tropicais e equatoriais, utilizando as distribuições cumulativas da duração e número de eventos de chuva medidas no Brasil.
- i) Ilustrar a aplicação dos resultados obtidos no planejamento e dimensionamento de sistemas LMDS.

1.3. RESULTADOS OBTIDOS E CONTRIBUIÇÕES DESTE TRABALHO

Foram realizadas análises de dados experimentais de taxa de precipitação e atenuação por chuvas em enlaces convergentes em São Paulo e Brasília. Os dados de São Paulo correspondem a experimentos realizados entre 1994 e 1996. Foram re-editados e re-analisados para a obtenção de distribuições cumulativas de probabilidade de taxa de precipitação, atenuação por chuvas e atenuação diferencial por chuvas. Foram pela primeira vez analisados para a obtenção de distribuições da duração e número de eventos. As mesmas análises foram realizadas para os dados obtidos em Brasília, onde os experimentos foram implementados durante o desenvolvimento deste trabalho.

Com base nos resultados experimentais obtidos no Brasil e na base de dados mundial organizada pelo ITU-R foi desenvolvido um modelo de aplicação global para a previsão da atenuação por chuvas em enlaces terrestres, que mostrou um melhor comportamento do que os modelos de melhor desempenho encontrados na literatura técnica, entre eles o modelo atualmente recomendado pelo próprio ITU-R (Recomendação 530-10).

Foram desenvolvidos também dois modelos para a previsão da atenuação diferencial por chuvas em um par de enlaces convergentes, problema cuja solução é importante para o planejamento dos novos sistemas ponto-multiponto de banda larga e para o qual não se encontram soluções na literatura técnica. O primeiro modelo é baseado nas atenuações totais em cada enlace e apresenta resultados ligeiramente superiores ao segundo quando testado contra os resultados experimentais. O segundo modelo tem como vantagem ser dependente apenas das características dos enlaces no par de enlaces. Ambos os modelos apresentam um bom comportamento nessa previsão.

Foram desenvolvidos ainda modelos para a previsão da duração média e da distribuição cumulativa da duração de eventos de atenuação por chuvas. Há poucos exemplos na literatura técnica do tratamento deste problema para enlaces terrestres e nenhum relativo a resultados obtidos em regiões de clima tropical.

Finalmente, foram apresentados exemplos de aplicações dos modelos desenvolvidos a problemas de dimensionamento e planejamento de sistemas LMDS, notadamente o cálculo de cobertura e o cálculo de interferências. Neste

contexto foi definido um novo critério de dimensionamento baseado em requisitos de duração máxima de eventos de indisponibilidade, adicionalmente ao requisito usual de disponibilidade anual.

1.4. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Em sequência a esta introdução, o capítulo 2 apresenta as bases teóricas para o tratamento do problema da atenuação por chuvas em enlaces operando em frequências superiores a 10 GHz, assim como os principais modelos de previsão da distribuição cumulativa da atenuação. Também são introduzidos os conceitos de atenuação diferencial por chuvas e de número e duração de eventos. Finalmente, é apresentada a distribuição de Weibull, que será utilizada no modelamento da atenuação diferencial por chuvas e da duração de eventos de chuva.

O capítulo 3 consiste na apresentação da base de dados de resultados de medidas de atenuação por chuvas do ITU-R, assim como a descrição de experimentos de medida desta atenuação realizados no Brasil. O capítulo finaliza com a descrição da análise dos dados destes experimentos e dos resultados obtidos para a geração das distribuições cumulativas da atenuação por chuvas, da atenuação diferencial por chuvas e da duração e número de eventos.

O capítulo 4 inicia com a comparação dos dados experimentais disponíveis e os modelos de previsão da distribuição cumulativa da atenuação por chuvas anteriormente descritos. Seguem-se a descrição da metodologia adotada, o desenvolvimento do novo método proposto neste trabalho e os testes deste método contra os resultados experimentais. O capítulo inclui também o desenvolvimento dos métodos para a previsão da atenuação diferencial por chuvas em enlaces convergentes, um dos resultados mais importantes do trabalho.

No capítulo 5 é apresentado o desenvolvimento dos modelos para a previsão da duração média e da distribuição cumulativa de probabilidades da duração de eventos de atenuação por chuvas. Os modelos aí desenvolvidos são também testados contra os resultados de medidas.

O capítulo 6 apresenta os exemplos de aplicação dos modelos desenvolvidos ao planejamento de sistemas LMDS.

No capítulo 7 são apresentadas as conclusões do trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.