

# 1

## Introdução

### 1.1

#### Motivação

O desenvolvimento de tecnologias novas para comunicação sem fio nos últimos 20 anos, como os sistemas rádio celulares, as redes de acesso sem fio em banda larga e os sistemas de comunicação via satélite de baixa órbita, vem permitindo a ampliação e convergência das redes e a criação de novos serviços, inclusive de comunicação multimídia. Estes serviços demandam uma capacidade cada vez maior das redes sem fio em termos de taxa de transmissão.

Em que pese o desenvolvimento, em paralelo, de técnicas de modulação, de acesso e de compressão cada vez mais eficientes, a demanda por maior largura de banda para os sistemas é inevitável, o que implica o uso de frequências cada vez mais elevadas.

Assim, os sistemas de comunicação via satélite originalmente desenvolvidos predominantemente para a banda C, a partir dos anos 90, passaram a utilizar e, fortemente, as bandas Ku e Ka. Estas bandas, além de representarem novas faixas de espectro disponível, permitem o uso de antenas de pequeno diâmetro em estações de usuários individuais nos sistemas ponto-multiponto.

No caso de sistemas terrestres, as frequências superiores a 10 GHz passaram a ser utilizadas fortemente em enlaces de acesso de pequeno comprimento em áreas urbanas, para prover conexões de transporte para estações rádio base em sistemas celulares, ou mesmo para sistemas ponto-multiponto de distribuição de vídeo e acesso à Internet, como o sistema LMDS (Local Multipoint Distribution Service). Os sistemas Wi-Max (Worldwide Interoperability for Microwaves Access) baseados nos padrões IEEE 802.16, que serão fortemente utilizados em redes de acesso metropolitanas e rurais em banda larga, estão sendo certificados e implementados, inicialmente, na faixa de frequências de 2 a 11 GHz. Entretanto, numa próxima fase, serão utilizados também na faixa de 10 a 66 GHz, com capacidade muito mais elevada.

Sendo a chuva o principal efeito de propagação limitante do alcance e da disponibilidade de sistemas rádio operando em frequências acima de 10 GHz, a perspectiva de crescente utilização de sistemas de transporte ponto-a-ponto e sistemas de acesso sem fio ponto-multiponto em banda larga, operando em frequências cada vez mais elevadas, enfatiza a necessidade do desenvolvimento de novos modelos, mais precisos e consistentes, para a previsão do comportamento estatístico da atenuação por chuvas.

## 1.2

### Resumo do Problema

Embora existam diversos modelos propostos na literatura para previsão da atenuação em enlaces terrestres ou em enlaces via satélite, todos eles foram desenvolvidos com base, predominantemente, em resultados de medidas realizadas em climas temperados do hemisfério Norte. Em função disso apresentam um desempenho que pode ser considerado sofrível, na melhor das hipóteses, quando aplicados a regiões de clima tropical e equatorial, sujeitas a regimes de chuva mais severos.

Os modelos aplicáveis na prática são semi-empíricos, utilizando a distribuição cumulativa de probabilidades da taxa de precipitação na região do enlace para prever a distribuição correspondente da atenuação. Parte destes modelos, incluindo aquele atualmente recomendado pelo UIT-R, utiliza apenas o valor de taxa de precipitação excedida em uma percentagem de tempo, tipicamente 0,01%, para prever a atenuação excedida durante este mesmo tempo. O valor calculado é utilizado como base para a extrapolação do restante da distribuição.

Outra limitação encontrada na maioria dos modelos é a falta de consistência entre os modelos de previsão para os casos terrestre e via satélite, normalmente derivados pelo ajuste de funções independentes para diferentes conjuntos de dados sem levar em conta que, embora as geometrias sejam distintas, um mesmo efeito físico se aplica aos dois casos. É desejável dispor de modelos que, além de apresentar baixo erro de previsão quando testados contra os resultados disponíveis de medidas em enlaces reais, utilizem como base para a previsão a distribuição da taxa de precipitação em toda a faixa de percentagens de tempo de interesse, e não

apenas em um ou dois pontos. Além disso é desejável que haja consistência entre os modelos para os casos terrestre e via satélite.

Uma outra questão, pouco abordada na literatura, é a da atenuação diferencial observada em enlaces terrestres convergentes, devido à não uniformidade espacial da distribuição de chuvas. A atenuação diferencial pode comprometer a relação sinal ruído na recepção em sistemas ponto-multiponto, sendo sua caracterização e a previsão de seu comportamento estatístico de grande importância para o planejamento destes sistemas.

### 1.3

#### Objetivos do Trabalho

A partir destas considerações, os objetivos foram definidos e atingidos neste trabalho foram:

- a) A realização de medições de taxa de precipitação e atenuação por chuvas em enlaces rádio terrestres convergentes em sítios de regiões tropicais, de modo a complementar os bancos de dados de medidas existentes;
- b) Processamento e análise dos dados das medidas de atenuação, para gerar as distribuições cumulativas de probabilidade da atenuação individual em cada enlace e diferencial entre pares de enlaces;
- c) Análise dos dados de medidas de taxa de precipitação, para gerar as distribuições cumulativas de probabilidade utilizadas na previsão da atenuação;
- d) Desenvolvimento de modelos semi-empíricos globais para previsão da atenuação por chuva, que utilizem a distribuição completa de taxa de precipitação medida para a faixa de percentagens do tempo de 0,1 a 0,001% e sejam consistentes para casos de enlaces terrestres e via satélite.
- e) Desenvolvimento de modelos com estas mesmas características utilizando as distribuições estimadas de taxa de precipitação recomendadas pelo UIT-R com base em dados da Organização Meteorológica Mundial.

- f) Teste comparativos do desempenho dos modelos de previsão desenvolvidos frente aos principais modelos empíricos existentes na literatura técnica.
- g) Revisão do modelo desenvolvido anteriormente pelo CETUC para previsão da atenuação diferencial por chuvas em enlaces terrestres, considerando os novos dados obtidos neste trabalho.

## 1.4

### Organização do Trabalho

Em seqüência a este capítulo introdutório, o capítulo 2 apresenta uma revisão dos conceitos básicos e modelos necessários para o cálculo da atenuação por chuvas, incluindo os modelos teóricos bem estabelecidos para caracterizar os efeitos de absorção e espalhamento pelas gotas de chuva através da atenuação específica, e as Recomendações do UIT-R para obtenção das distribuições cumulativas de probabilidade da taxa de precipitação em regiões nas quais não se dispõe de medidas.

No capítulo 3 são revistos os principais modelos empíricos propostos na literatura para previsão da atenuação por chuvas em enlaces terrestres e via satélite. São apresentadas as características gerais, parâmetros de entrada e equações de cálculo destes modelos.

A descrição das medidas realizadas em enlaces terrestres em Brasília e no Rio de Janeiro, para complemento do banco de dados anteriormente disponível, é apresentada no capítulo 4. É feita uma descrição detalhada do experimento, do processo de tratamento e análise de dados e são apresentados os resultados obtidos. O capítulo apresenta ainda informações sobre as características gerais dos enlaces que compõem os bancos de dados do UIT-R de medidas de atenuação por chuvas e taxa de precipitação em enlaces terrestres e via satélite que, juntamente com as medidas realizadas neste trabalho, foram utilizados para o desenvolvimento dos modelos de previsão.

O capítulo 5 apresenta o desenvolvimento dos modelos propostos neste trabalho para o cálculo para a previsão da atenuação por chuvas em enlaces terrestres e via satélite. Para validar os modelos são apresentadas análises dos

erros de previsão dos modelos propostos e comparações com resultados dos modelos descritos no capítulo 3.

Por fim, o capítulo 6 apresenta as conclusões deste trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

O Apêndice A apresenta tabelas com os resultados das medidas realizadas e, o Apêndice B, o desenvolvimento da expressão do fator de redução de percurso para enlaces terrestres, considerando uma geometria bi-dimensional.

Os Anexos 1 e 2 complementam, com maior grau de detalhe, a descrição dos modelos teóricos para cálculo da atenuação específica e a validação de sua expressão empírica apresentados no capítulo 2.

As características detalhadas dos enlaces componentes do banco de dados utilizado para ajuste dos modelos, incluindo os bancos de dados do UIT-R, as medidas realizadas neste trabalho e medidas anteriores no Brasil, são apresentadas no Anexo 3.