

7

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

7.1.

CONCLUSÕES

O estudo e análise detalhados dos efeitos da atenuação por chuvas em enlaces rádio que operam em frequências superiores a 10 GHz é de capital importância para o apropriado planejamento e dimensionamento dos sistemas de comunicações sem fio de banda larga que operam nestas frequências.

O impacto da propagação em condições de chuva no desempenho destes sistemas é determinado aplicando-se modelos que permitem prever o comportamento estatístico da atenuação resultante. O presente trabalho trata da previsão das distribuições cumulativas de probabilidades da atenuação por chuvas em um enlace terrestre, da atenuação diferencial por chuvas entre dois enlaces convergentes e da duração de eventos de atenuação por chuvas em um enlace, além de sua duração média.

Com relação à distribuição cumulativa da atenuação em um enlace, o teste dos modelos de previsão com melhor desempenho encontrados na literatura utilizando a base de dados do ITU-R e resultados de medidas realizadas no Brasil mostrou que o modelo de atualmente recomendado pelo ITU-R, em que pese suas conhecidas limitações, continua sendo o mais apropriado para aplicação em termos globais. Assim, embora a média dos erros observada para os modelos Australiano e de Crane apresente um melhor comportamento, os desvios padrão correspondentes são elevados de tal forma que o modelo do ITU-R apresenta um desempenho geral, caracterizado pelo valor RMS do erro, superior ao destes métodos. Entretanto, considerando que este desempenho é ainda insatisfatório, foi desenvolvido neste trabalho um modelo (modelo Pérez-Mello) que, além de apresentar um desempenho significativamente superior, elimina duas limitações importantes do modelo do ITU-R: utiliza a distribuição completa da atenuação por chuvas em lugar de fórmulas de extrapolação a partir de um valor ($A_{0,01}$)

calculado a partir de um único ponto da distribuição ($R_{0,01}$) e apresenta bom desempenho para regiões de clima tropical.

É importante ressaltar que na região central da faixa de percentagens de tempo consideradas, o desvio padrão dos erros aproximou-se de 20%, valor considerado um limitante inferior para o desempenho possível de métodos de previsão devido à variabilidade ano a ano do comportamento da precipitação.

Além, o teste de validade mostrou que o modelo Pérez-Mello apresenta um bom desempenho em quase todas as faixas de comprimentos de enlace, frequência e latitudes, consideradas na análise, especialmente, nas faixas típicas correspondentes aos sistemas LMDS e MVDS.

Para a atenuação diferencial por chuvas foram desenvolvidos dois modelos (modelo 1 e modelo 2). Concluiu-se que os principais parâmetros que afetam o comportamento estatístico da atenuação diferencial são os comprimentos dos enlaces e o ângulo entre eles. É possível obter uma boa precisão na previsão utilizando estes parâmetros e as atenuações totais dos enlaces envolvidos como dados de entrada de um modelo empírico (modelo 1). Alternativamente, é possível modelar a atenuação diferencial utilizando a distribuição de Weibull com parâmetros dependentes dos comprimentos dos enlaces e do ângulo entre eles. Este segundo modelo (modelo 2) apresenta desempenho ligeiramente inferior ao primeiro mas tem a vantagem de independência das atenuações individuais cujo erro de previsão afetará o desempenho do modelo 1.

Os modelos para a previsão da atenuação diferencial por chuvas apresentam erros RMS da ordem de 40%, mais elevados do que os alcançados no caso do modelo desenvolvido para previsão da atenuação total. Isto se deve, em grande parte, ao conjunto relativamente mais reduzido de enlaces utilizado no desenvolvimento. É importante ressaltar também que o modelo foi ajustado com dados de apenas duas regiões tropicais. O desenvolvimento de um modelo de aplicação geral irá depender da disponibilidade de dados de outras regiões climáticas.

Quanto ao modelamento da duração de eventos, a distribuição de Weibull mostrou-se uma excelente função de aproximação para as distribuições medidas individuais. Nos poucos casos tratados na literatura, principalmente relacionados a enlaces satélite, utiliza-se a distribuição log-normal. O ajuste dos parâmetros da distribuição produziu modelos (modelos DEC-PM y DEC-PM modificado) com

erros RMS inferiores a 25%, um bom resultado. Novamente, o modelo apresenta a limitação de ter sido desenvolvido a partir de uma base de dados de regiões tropicais e o desenvolvimento de um modelo de aplicação geral irá depender da disponibilidade de dados de outras regiões climáticas.

A aplicação dos modelos desenvolvidos ao planejamento de sistemas LMDS mostrou que os raios de célula para regiões tropicais são significativamente inferiores aos previstos pelo modelo do ITU-R. Entretanto, o resultado mais importante obtido diz respeito à previsão da degradação da relação sinal-interferência quando da ocorrência de eventos de chuva. Os modelos desenvolvidos permitem o cálculo da distribuição de probabilidades da relação sinal-interferência, normalmente desconsiderada no dimensionamento de sistemas que é realizado apenas para as condições de céu claro. Finalmente, foi introduzido um novo conceito de disponibilidade, associado à probabilidade de que uma determinada duração máxima de eventos individuais não seja excedida.

7.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como uma continuação do presente trabalho recomenda-se a criação de uma base de dados da atenuação por chuvas mais ampla, acrescentando medidas que tem sido realizadas em diversas partes do mundo e cujos resultados podem ser obtidos através de uma pesquisa ampla da literatura técnica. Obviamente, uma outra forma de estender a base de dados utilizada neste trabalho é a realização de mais de medidas da atenuação por chuvas.

Neste trabalho foram desenvolvidos apenas modelos empíricos. Também é sugerido o desenvolvimento de um modelo para a previsão da atenuação por chuvas com embasamento mais físico. Modelos deste tipo existem na literatura mas apresentam desempenho bem inferior ao dos modelos empíricos aqui analisados e desenvolvidos. Especificamente, sugere-se o desenvolvimento de um modelo baseado num princípio similar ao utilizado no modelo de ITU-R, mas supondo células bidimensionais para a obtenção do fator de redução de percurso.

Quanto à atenuação diferencial por chuvas, é necessária a realização de medidas em um maior conjunto de enlaces, não apenas no Brasil mas em outras regiões com características climáticas distintas, para estender a validade dos

modelos aqui desenvolvidos a uma faixa mais ampla de comprimentos de enlaces, frequências de operação e climas. Também é recomendável tentar diminuir o número de parâmetros ajustados no modelo 2. Sugere-se também, o estudo de um modelo de atenuação diferencial por chuvas com base física.

Similar recomendação aplica-se também para o caso da duração de eventos de chuva. Novamente aqui, o desenvolvimento de modelos semi-empíricos com maior embasamento físico é altamente desejável. É importante ainda o modelamento da duração de intervalos entre eventos, que pode fornecer novos critérios de dimensionamento de enlaces ponto-multiponto de faixa larga.

O estudo dos efeitos da atenuação por chuvas em sistemas de rádio acesso em banda larga foi aqui introduzido de forma apenas exploratória. A formalização e extensão deste estudo de modo a prover metodologias de planejamento para estes sistemas, incluindo considerações sobre alocação de recursos, bem como o desenvolvimento de métodos para a previsão da probabilidade de cobertura de área, são tópicos de pesquisa relevantes e promissores.