

6 Conclusões

Neste capítulo são reunidas as conclusões do trabalho e apresentadas sugestões para trabalhos futuros, que se baseiam em observações surgidas durante o desenvolvimento e que poderão dar continuidade a esta linha de pesquisa.

Foram desenvolvidos dois novos modelos de previsão de atenuação em enlaces fixos com satélites geoestacionários. O primeiro, denominado modelo Cetuc/BR baseou-se nas medidas de atenuação realizadas no Brasil e apresentou os melhores resultados para regiões tropicais. O segundo, baseado no banco de dados mundial da UIT-R, incluindo as medidas realizadas no Brasil, apresentou melhor desempenho que os modelos da UIT-R quando o erro relativo foi utilizado como variável de erro. Apresentou desempenho semelhante ao dos modelos da UIT-R para percentagens do tempo entre 0.001 % e 0.01% quando a variável de erro da Recomendação 311 é utilizada. Apenas quando esta variável de erro é utilizada para percentagens do tempo acima de 0.01%, de menor importância em aplicações práticas, o novo modelo da UIT-R apresentou desempenho superior ao do modelo aqui desenvolvido.

A fórmula de conversão de atenuação entre diferentes ângulos de elevação desenvolvida neste trabalho foi validada através de testes com medidas de radiômetro simultâneas em ângulos de elevação distintos, 53° e 90°. O primeiro tipo de teste consistiu em fazer a conversão das distribuições cumulativas medidas em um ângulo para o outro ângulo e comparar o resultado com a distribuição medida neste último. O segundo tipo de teste consistiu em aplicar a conversão diretamente às séries temporais medidas de atenuação, obter a distribuição cumulativa correspondente e compará-la com a distribuição medida. Em ambos os casos verificou-se coerência e pequeno erro nas conversões considerando-se validado do procedimento de conversão. A necessidade de realizar operações diretamente nas séries temporais de atenuação e chuva exigiu a construção de uma ferramenta que permitisse a manipulação dos dados medidos, desenvolvida no programa *MatLab*.

A caracterização da variação do ângulo de elevação iniciou-se com o estudo da teoria da mecânica orbital e das equações que descrevem o movimento da órbita do satélite. Na aplicação destas equações foram utilizados os elementos orbitais keplerianos de cada satélite da constelação Globalstar. Como resultado obteve-se a variação do ângulo de elevação para cada satélite para um período de 24 horas. A seguir foi construído um banco de dados dos elementos orbitais keplerianos de todos os satélites da Globalstar para um período de 90 dias, que permite caracterizar o movimento da constelação ao longo do tempo. Considerando-se toda a constelação, que oferece a cobertura contínua, determinou-se a envoltória dos ângulos de elevação de todos os satélites como a caracterização do movimento da antena do enlace de alimentação do *gateway*. Este resultado foi então aplicado através da fórmula de conversão de atenuação às séries temporais, obtendo-se assim a simulação das medidas de atenuação por chuvas no enlace LEO.

O resultado mais relevante foi o desenvolvimento de um método de previsão baseado na ponderação das distribuições cumulativas em valores fixos de ângulos de elevação, no intervalo de ângulos $[0^\circ, 90^\circ)$ em que o satélite é visível, com o histograma de cada um destes ângulos.

A partir dos histogramas foi feita também uma modelagem da função densidade de probabilidade do ângulo de elevação por uma distribuição de Weibull, obtendo-se assim uma forma analítica para a caracterização deste parâmetro. Isto permitiu o desenvolvimento de uma variante do modelo de previsão, que utiliza a função densidade de probabilidade dos ângulos de elevação como ponto de partida para o cálculo da distribuição da atenuação no enlace LEO. Embora o modelo analítico tenha sido apresentado para a constelação Globalstar, o procedimento pode ser estendido para outras constelações de satélites LEO.

Finalmente foi feita a comparação da distribuição obtida pela simulação direta das séries temporais com as distribuições previstas pelos dois métodos propostos. Observou-se que os métodos oferecem resultados bastante satisfatórios para os locais nos quais o método de previsão da atenuação em enlaces fixos também apresenta bons resultados, como é o caso de Mosqueiro, Rio de Janeiro (período 2), Curitiba e Porto Alegre. Nestes casos observa-se apenas que, para percentagens de tempo próximas de 0,001%, os valores simulados são sempre superiores aos previstos. Isto pode, entretanto, ser atribuído à imprecisão na

simulação para baixos ângulos de elevação, nos quais os valores obtidos para o fator de conversão podem ser excessivamente elevados. Nos casos em que a previsão para ângulos de elevação fixos já apresenta resultados insatisfatórios, como é o caso de Rio de Janeiro (período 1) e Recife, os erros observados são refletidos nas distribuições para o caso LEO.

6.1. Sugestões de trabalhos futuros

A etapa de desenvolvimento da fórmula de conversão, mostrada no Capítulo 3, pode incluir outros modelos de previsão de atenuação, principalmente modelos físicos que consideram a estrutura da célula de chuva, como o modelo ExCell.

O modelo proposto baseou-se apenas nas informações da constelação Globalstar. Uma decorrência natural é a avaliação do modelo com outras constelações. O sistema de órbita baixa Iridium possui configuração de órbitas polares, cuja inclinação é cerca de 89° , podendo trazer contribuições interessantes para aumentar a abrangência do modelo.

O uso de outras constelações sugere a modelagem das distribuições dos ângulos de elevação destes sistemas, também com o objetivo de ampliar este conhecimento.

Os procedimentos de simulação aqui desenvolvidos podem ser utilizados para a análise de outros problemas associados à atenuação por chuvas em enlaces satélite LEO ainda não abordados na literatura, como por exemplo, duração e taxa de variação de eventos e ganho de diversidade de sítio.