

1 Introdução

A comunicação com satélites não geoestacionários (NGEO) veio cobrir as deficiências do sistema geoestacionários (GEO) relativas ao elevado atraso de transmissão, à falta de cobertura das latitudes polares e à dificuldade de se obter visada direta com os satélites a partir das altas latitudes, onde os ângulos de elevação são muito baixos, inferiores a 20 graus. Vários tipos de órbitas foram propostos para aplicações em comunicações, tais como as órbitas baixas, onde se destacam as órbitas polares, órbitas médias e órbitas altamente elípticas. Estes sistemas oferecem cobertura contínua porque utilizam uma constelação de satélites. A altitude da órbita é determinada para satisfazer uma série de requisitos impostos pela visibilidade, potência do satélite e tamanho da antena, tempo de propagação do sinal e por problemas decorrentes da existência dos cinturões de radiação de Van Allen.

Por apresentarem características próprias no que diz respeito à configuração e forma de operação, o uso dos sistemas NGEO faz surgir um novo conjunto de desafios tecnológicos e questões relativas ao planejamento dos sistemas. O objetivo deste trabalho de tese é o estudo da propagação nos sistemas de órbita baixa (*Low Earth Orbit*, LEO), que despertaram o interesse comercial para a exploração de serviços móveis por satélite, tipicamente as comunicações móveis pessoais.

A mobilidade dos satélites em relação à superfície terrestre traz um novo aspecto de propagação a ser estudado. Os enlaces de alimentação entre as estações terrenas (*gateways*) e os satélites, através dos quais é passado todo o complexo conjunto de informações de gerenciamento da constelação além do tráfego de usuários, operam em faixas de frequências sujeitas à influência dos efeitos da chuva. O novo desafio é descrever o comportamento da atenuação quando a posição do enlace é variante no tempo. O sistema de antenas rastreia os satélites da constelação visíveis no céu, estabelecendo um critério para a recepção dos

sinais. O satélite emite continuamente uma sinalização para controle de posicionamento por terra, chamado sinal de *beacon*, cuja tradução é farol. Então o sistema de controle do rastreamento procura alinhar o feixe da antena com a direção do *beacon* do satélite, caracterizando desta forma a mobilidade do enlace.

Os efeitos de chuva em enlaces satélite já foram pesquisados extensivamente e diversos modelos de previsão de atenuação em enlaces fixos, apontados para satélites geoestacionários (GEO), foram propostos [1,2,3]. As modelagens desenvolvidas para os climas temperados e seus resultados não são satisfatórios quando aplicados a estações localizadas em regiões de clima tropical e equatorial. O principal objetivo do trabalho proposto é o desenvolvimento de modelos para a previsão dos efeitos da atenuação por chuvas em enlaces satélite, tanto fixos, GEO, como móveis, LEO, que apresentem boa precisão para estações nestas regiões. Como base para a modelagem será utilizado o banco de dados de medidas de atenuação e chuva em diversos estados situados em regiões climáticas distintas realizadas no Brasil entre 1987 e 1999.

A motivação para a modelagem da previsão de atenuação em enlaces LEO decorre da necessidade de estudos dos efeitos de propagação neste tipo de sistema. A UIT-R (União Internacional das Telecomunicações – Setor de Radiocomunicação) apresenta um modelo de previsão para enlaces NGeo pioneiro que se baseia na determinação da atenuação através de um modelo GEO em diversos ângulos de elevação, cuja percentagem de tempo correspondente deve ser ponderada com a percentagem de tempo que um satélite da constelação LEO fica visível em cada um destes ângulos. Este modelo pressupõe o conhecimento prévio do movimento da constelação, que permita a obtenção do histograma dos ângulos de elevação do satélite que está mais alto no céu.

A verificação do efeito da chuva em enlaces móveis com satélites LEO deverá incluir a variação temporal do ângulo de elevação do enlace no desenvolvimento do modelo LEO de previsão de atenuação. Será realizada uma conversão que considera a variação dos ângulos de elevação de modo a gerar novas séries temporais simuladas da atenuação nestes enlaces. O procedimento de conversão da atenuação será validado a partir de dados existentes de medidas simultâneas com dois ângulos de elevação num mesmo local. Uma vez validado o modelo de conversão, as séries temporais simuladas serão utilizadas no

desenvolvimento do método de previsão e calcula-se a distribuição cumulativa da atenuação.

No Capítulo 1 é apresentada uma consideração dos sistemas satélite N GEO e feita uma descrição de seus serviços e aplicações. Menciona-se a faixa de frequência utilizada nos enlaces de alimentação que operam acima de 10 GHz, faixa sujeita à atenuação por chuvas. Como parte do escopo do trabalho foi feita uma investigação sobre o rastreamento dos satélites N GEO e são descritos dois tipos. A questão da atenuação por chuvas e a modelagem da estrutura da chuva são abordados para apresentação dos fundamentos dos modelos de previsão que serão utilizados neste trabalho.

No Capítulo 2 são apresentados dois novos modelo de previsão de atenuação por chuvas para enlaces satélite fixos GEO. O primeiro é baseado no banco de dados de medidas de atenuação e chuva mundial da UIT-R. O segundo é feito para o clima brasileiro, sendo modelado somente com os dados brasileiros do banco de dados. O primeiro modelo é testado com dois métodos de previsão da UIT-R, o modelo atual e o anterior a este.

O Capítulo 3 tem como objetivo a validação das fórmulas de conversão de atenuação necessárias para a simulação de medidas de atenuação em ângulos de elevação do enlace diferentes da medida original. A validação é feita empregando-se as medidas simultâneas de atenuação feitas com radiômetros em dois ângulos de elevação. A idéia é aplicar a conversão às medidas em um ângulo de elevação para o outro ângulo e verificar se está coerente com a medida. Foi desenvolvido um programa em *Matlab* para a leitura das séries temporais de atenuação e chuva, conversão dos valores de atenuação e cálculo da distribuições cumulativas.

O Capítulo 4 apresenta o estudo da teoria da mecânica orbital que rege o movimento dos satélites. O objetivo é caracterizar o ângulo de elevação variante no tempo para aplicação na fórmula de conversão desenvolvida no capítulo anterior. São desenvolvidos programas em *MatLab* para manipulação dos dados da constelação Globalstar, utilizados para esta caracterização. O programa de conversão é estendido para incluir o caso orbital, que resultará na simulação de medidas dinâmicas de atenuação. Do estudo da estatística do ângulo de elevação obteve-se um modelo para obtenção do histograma dos ângulos em função da latitude do local.

O Capítulo 5 apresenta os resultados da simulação e o modelo LEO de previsão de atenuação baseando-se na metodologia da UIT-R para o cálculo da estatística de longo termo da atenuação.

O Capítulo 6 reúne as conclusões e apresenta sugestões de continuidade de para trabalhos futuros.

1.1. Sistemas Satélite Não Geoestacionários

Uma das questões mais importantes consideradas na década de 60 era sobre qual seria a melhor órbita para um satélite de comunicações. Os sistemas de média altitude tinham a vantagem do baixo custo de lançamento, *payloads* maiores e menor tempo de propagação do que os sistemas geoestacionários, localizados a cerca de 36000 km de altitude. A desvantagem era a necessidade do rastreamento da órbita e operações de transferência entre satélites.

O uso da órbita geoestacionária foi sugerida inicialmente por Artur C. Clarke [4] nos anos 40 – órbita no plano equatorial e período sincronizado com a rotação da Terra. Apesar da conveniência, foram consideradas suas limitações devido aos grandes atrasos de propagação e elevado custo e complexidade do lançamento. A vantagem desta órbita é proporcionar a cobertura de quase toda a Terra com apenas 3 satélites. Não há necessidade de *handover* e o rastreamento é usado apenas para correção das pequenas perturbações orbitais.

O uso de satélites de comunicação em órbitas baixas é conhecido desde o início da era espacial. No entanto, quando os satélites GEO (geoestacionários) entraram em operação, causaram impacto devido à maior simplicidade de suas estações terrenas, estabelecendo seu lugar no mercado. Entretanto um satélite GEO não cobre a Terra totalmente, e para manter a comunicação global é necessário a interligação com outro satélite através das estações terrenas. O atraso causado por este roteamento complexo dos sinais é uma das razões que estimularam o surgimento de uma nova geração de sistemas satélite. O tráfego de voz exige que o satélite GEO empregue técnicas sofisticadas, como cancelamento de eco, para minimizar os efeitos do atraso de tempo na conversação. O tempo de propagação no percurso ida até o satélite GEO e volta à estação terrena é tipicamente 500 ms, ou 250 ms por lance, enquanto que para o satélite em órbita baixa (*Low Earth Orbit*, LEO) o tempo é aproximadamente 20 ms. Outro problema é a falta de cobertura nas altas latitudes devido à geometria do sistema, limitado a 81° de latitude.

Uma das mais sérias limitações na comunicação com satélites GEO é a necessidade de transmissores e receptores potentes devido à grande distância entre o satélite e o usuário. Este fato impede que o sistema GEO ofereça serviços de

comunicações pessoais através de um terminal portátil e pequeno como aqueles utilizados nos sistemas celulares.

A tendência geral nos sistemas satélite tem sido a simplificação da estrutura da estação terrena, e em particular no serviço móvel, a redução dos terminais. A miniaturização destes viabiliza os sistemas móveis de alta capacidade almejados no mercado [5]. O ponto chave para a simplificação dos terminais reside no tamanho das células que formam a área de cobertura do satélite: quanto mais estreito for o feixe elementar que produz estas células, menor será a potência requerida no terminal, e este poderá ser mais simples e mais barato. Várias soluções foram propostas para reduzir ao máximo a dimensão do feixe elementar, e entre elas o uso de constelações de satélites em órbita baixa LEO ou média (*Medium Earth Orbit*, MEO). Eles têm a vantagem de formar pequenos feixes no solo, de aproximadamente 100 km de raio, tendo a bordo antenas com dimensões aceitáveis. Como exemplo o feixe elementar dos satélites Iridium tem 300 km de raio [5A].

A UIT designou como N GEO os satélites que não estão em órbita geoestacionária, e portanto têm movimento em relação a um usuário fixo na superfície da Terra. Esta denominação compreende os satélites LEO, com altura de órbita até 1500 km, os MEO, com alturas até 20000 km e os satélites HEO (*Highly Elliptical Orbit*), com órbitas elípticas com altura de apogeu até 40000 km. Os sistemas LEO podem ser classificados conforme sua dimensão, que caracteriza o serviço oferecido. Os *Little LEO* concentram-se em prover serviços de dados, como transmissão de mensagens (*e-mail*, *paging*) e acesso limitado à Internet [6]. Os nichos de mercado importantes incluem comunicação remota de dados, rastreamento digital (mercado de gerenciamento de transportes), monitoramento ambiental e o *SCADA* (Controle de Supervisão e Aquisição de Dados), um sistema que fornece monitoramento remoto de empreendimentos isolados tais como minas e refinarias de petróleo.

Os sistemas Big LEO e MEO representam o lado verdadeiramente atraente da nova tecnologia via satélite, uma vez que estes sistemas prometem serviços de telefonia em tempo real de alcance global [7]. Para oferecer cobertura mundial eles operam como uma rede de satélites que se move simultaneamente recebendo e distribuindo chamadas telefônicas entre usuários, estações terrenas e mesmo

entre satélites, embora o uso de enlaces intersatelitais torne o sistema mais complexo.

Entre os principais competidores desta categoria estão a Globalstar, ICO e Iridium. A empresa Globalstar teve parte de seu controle acionário vendida para a ICO Global Communications, que atualmente está configurando sua constelação de órbita média para fornecer um serviço global de voz e dados [7A]. O Iridium está operando nos Estados Unidos e implantou um *gateway* no Havaí para uso restrito do Departamento de Defesa [7B]. O operador TELEDESIC não se encaixa tecnicamente na classificação anterior. Assim como os Big LEO, o sistema oferecerá serviços de voz, dados e fax, mas seu objetivo é o mercado da computação, com o foco na capacidade de transferência de dados em alta velocidade e não tanto na telefonia móvel [8].

A Globalstar é um sistema baseado em uma constelação de 48 satélites LEO com 8 planos orbitais, 6 satélites por plano. A constelação oferece 100% de cobertura simples entre $\pm 70^\circ$ de latitude, e 100% de cobertura dual ou superior na faixa de 25° a 50° de latitude. Será empregada a diversidade de percurso para lidar com bloqueio e sombreamento, podendo ser usados até 3 satélites para completar e manter a comunicação [9]. Um satélite permanece visível por aproximadamente 15 minutos [10]. Sua proposta é oferecer comunicações de voz, dados/fax digitais através de pequenos terminais celulares de baixa potência com antenas omnidirecionais. O sistema Globalstar pretende oferecer ampla variedade de serviços telefônicos, abrangendo desde viajantes em negócios globais até a instalação de barracas com telefonia fixa nas comunidades rurais [11].

Além dos serviços já mencionados de voz e dados, outra tendência recente é o desenvolvimento dos serviços interativos banda larga, como o acesso de alta velocidade à Internet, videoconferência e videotelefonia, telemedicina, que podem atingir casas ou escritórios em qualquer lugar do planeta. Devido à grande cobertura geográfica e relativo baixo custo – em particular em áreas com baixas e médias densidades populacionais – e velocidade de instalação, os sistemas satélite terão o papel principal na oferta de acesso mundial aos serviços em banda larga interativos mais modernos. Enquanto satélites GEO e N GEO vão ocupar posições complementares no mundo multimídia, em particular as constelações de satélites LEO constituirão um meio muito eficiente de prover serviços interativos. Devido ao baixo tempo de propagação no percurso ida e volta até o satélite, os sistemas

LEO oferecerão performance similar àquelas da rede terrestre, permitindo então o uso de protocolos, padrões e aplicações comuns aos sistemas já existentes.

1.2. Alocação de Frequências

Nos sistemas LEO os enlaces de alimentação entre as estações terrenas controladoras (*gateways*) e os satélites operam em faixas de frequências sujeitas à atenuação por chuvas. Estes enlaces são assim chamados porque rastreiam o movimento dos satélites e são responsáveis pelo tráfego entre estes e a rede terrestre local. A Tabela de Alocação de Frequências das Regulações Rádio (RR, Article S5) [12] relaciona as frequências utilizadas para aplicações para o serviço móvel (MSS – *Mobile Satellite Service*) e serviço fixo (FSS – *Fixed Satellite Service*) dos sistemas N GEO, dividindo as alocações para o MSS na faixa abaixo de 3 GHz e para o FSS na faixa acima de 10 GHz. Nesta faixa o espectro é alocado para enlaces de alimentação dos *Big LEO*, tipicamente nas banda Ku (12-18 GHz), banda K (18-27 GHz) e banda Ka (27-40 GHz).

1.3. Sistema de Rastreamento de Satélites

Neste trabalho destaca-se a necessidade do entendimento do sistema de rastreamento utilizado nos sistema N GEO para a caracterização do ângulo de elevação do enlace variante no tempo. Este movimento deverá ser inserido no processo de transformação das medidas de atenuação fixas em dinâmicas. Serão destacados dois tipos que ilustram os pontos necessários para a implementação da conversão, o rastreamento programado [13] e o rastreamento automático em *loop* fechado [13].

O rastreamento consiste em manter o feixe da antena na direção do satélite durante seu movimento no céu. As decisões relacionadas com a instalação da antena e procedimento de rastreamento dependem da largura de feixe em relação ao movimento aparente do satélite. O critério determinante é a variação do ganho da antena com o desalinhamento. Para os satélites em órbitas inclinadas N GEO o

movimento do satélite causa variação do ângulo de elevação cuja extensão em torno do zênite varia conforme o tipo da órbita, número de satélites no sistema e localização da área de serviço.

No rastreamento programado o sistema de controle da orientação da antena conhece os valores correspondentes de ângulo de azimute e elevação a cada instante. Eles são atualizados sucessivamente considerando o movimento aparente do satélite previsto nos cálculos. O apontamento é feito em *loop* aberto, ou seja, sem determinação do erro gerado pela diferença entre a direção real do satélite e a direção desejada a cada instante. Este tipo de rastreamento é usado principalmente para antenas na estação terrena com razão λ/D grande (Esta razão determina a largura de feixe de meia potência através da relação $\theta_{3dB} = 70 \frac{\lambda}{D}$, onde λ é o comprimento de onda e D o diâmetro da antena) em relação à extensão do movimento do satélite, ou que têm largura de feixe suficientemente grande, onde muita precisão de apontamento não é necessária. Se esta for necessária, o que ocorre quando a razão λ/D é pequena, o rastreamento programado é usado com satélites NGE0 para posicionar inicialmente a antena em uma região do céu onde o satélite vai aparecer, mantendo a partir deste momento a recepção do *beacon* pelo sistema de rastreamento em *loop* fechado.

O rastreamento automático em *loop* fechado é utilizado com antenas com razão λ/D pequena em relação à extensão do movimento do satélite. O rastreamento preciso é obtido com o alinhamento contínuo da direção da antena à direção do *beacon*. A precisão depende do método utilizado para determinar a direção de chegada do sinal de *beacon*, do desvio entre a direção de chegada e a direção real do satélite – causado por mudança na direção de propagação – e a eficácia do sistema de controle da realimentação. Junto com a elevada precisão, a vantagem deste procedimento é sua autonomia, uma vez que a informação de rastreamento não vem do próprio sistema, e sim das variações do nível do sinal recebido.

1.4. Atenuação por Chuvas

Na faixa de frequências de microondas acima de 10 GHz a transmissão de sinais através da troposfera está sujeita às influências do meio de propagação. A troposfera é camada inferior da atmosfera e nela se desenvolvem os processos meteorológicos. Esta camada é instável em termos de temperatura e umidade, com a frequente ocorrência de correntes verticais que causam a condensação, formação de nuvens e precipitação.

Os principais fatores capazes de influenciar a energia em propagação na troposfera são a absorção por gases atmosféricos e a atenuação por hidrometeoros existentes, como a chuva, neve, nevoeiro e nuvens. No primeiro caso parte da energia em propagação é absorvida pelas moléculas de oxigênio e vapor d'água para alterar seus níveis de energia. Na baixa atmosfera esta absorção é crítica para o oxigênio em torno da frequência de 60 GHz, e para o vapor d'água em torno de 22.3 GHz. Em frequências afastadas destes picos de absorção a influência dos gases atmosféricos reduz-se bastante, e então a atenuação por hidrometeoros, particularmente a chuva, passa a desempenhar papel dominante no dimensionamento de enlaces, onde o objetivo é prover a qualidade do sinal na recepção mesmo em condições críticas no percurso de propagação. A atenuação por chuvas consiste na absorção e espalhamento da energia propagante pelas partículas de água existentes no meio. As gotas de chuva comportam-se como um meio dielétrico dissipativo para o campo elétrico incidente, absorvendo energia ou espalhando-a em diversas direções. As dimensões da gota tornam-se comparáveis ao comprimento de onda do sinal propagante nas frequências acima de 10 GHz.

1.4.1. Atenuação específica

A atenuação de uma onda que atravessa um meio com chuva é obtida pela soma das contribuições individuais das gotas que compõem este meio. Considerando que as gotas têm dimensões diferentes, a atenuação específica é calculada pela integração das contribuições de cada gota [14], onde é considerada a seção reta de espalhamento e absorção de uma gota e o número de gotas por

unidade de volume. Para aplicações práticas a relação entre a atenuação específica γ [dB/km] e a taxa de precipitação R [mm/h] é proposta por Olsen et al [15], como se segue:

$$\gamma = kR^\alpha \quad (\text{dB/km}) \quad (1.1)$$

A determinação dos parâmetros k e α está tabelada na Recomendação UIT-R P.838-1 [16,17] para frequências até 55 GHz.

Uma vez estabelecida a equação que relaciona a atenuação específica γ com a taxa de precipitação R , o passo seguinte é o cálculo da atenuação em um determinado percurso L [km]. Se a taxa de precipitação fosse constante ao longo do percurso, a atenuação seria dada por:

$$A = \gamma L \quad (\text{dB}) \quad (1.2)$$

Como a intensidade de chuva varia no percurso, a atenuação é obtida através da integração da atenuação específica ao longo do percurso que atravessa a estrutura da chuva. Por sua vez, a atenuação específica é função da taxa de precipitação ao longo do percurso

$$A = \int_0^L kR^\alpha(l) dl \quad (\text{dB}) \quad (1.3)$$

onde l é o comprimento medido a partir da antena ao longo do enlace e L é o comprimento do enlace que atravessa a estrutura da chuva.

1.4.2. Modelagem da estrutura da chuva

A estrutura espacial da chuva consiste em um conjunto de gotas d'água que se estende horizontalmente por alguns quilômetros e cujo limite superior é chamado de altura de chuva. A célula de chuva é formada por um núcleo onde ocorre a precipitação mais intensa e seu diâmetro é inversamente proporcional à taxa de precipitação. O tempo de vida das células individuais de chuva intensa é geralmente baixo, entre 10 e 20 minutos; no entanto chuvas intensas podem

persistir por mais tempo porque se observa uma tendência de formação de novas células de chuva adjacentes a células existentes. A estrutura da chuva é então dita variante no tempo e no espaço porque as gotas dividem-se ao cair e espalham-se conforme a direção dos ventos. O comportamento temporal pôde ser observado em medidas de pluviômetros que apresentaram pequenos intervalos de chuva intensa dentro de longos períodos de chuva fraca. A variação espacial é bem observada em medidas com radares meteorológicos que mostram pequenas áreas com altas taxas de precipitação no interior de áreas extensas onde ocorre chuva fraca.

A medida de atenuação por chuvas implica no conhecimento da quantidade de chuva no percurso de propagação. A variação aleatória temporal e espacial da chuva e a dificuldade em quantificar o número de gotas existentes no percurso fez surgir o conceito de estruturas equivalentes de chuva. A modelagem da estrutura da chuva, necessária para a previsão de atenuação, pode ser feita definindo-se o comprimento equivalente da célula de chuva, utilizando então um modelo simplificado da célula de chuva para levar em conta a variação espacial de sua estrutura.

Para efeito do cálculo da atenuação a célula de chuva real, não uniforme horizontal e verticalmente, pode ser representada por uma célula equivalente de comprimento efetivo L_o e altura efetiva h_r , conforme a Figura 1. Estes parâmetros são, em geral, modelados em função da taxa de precipitação.

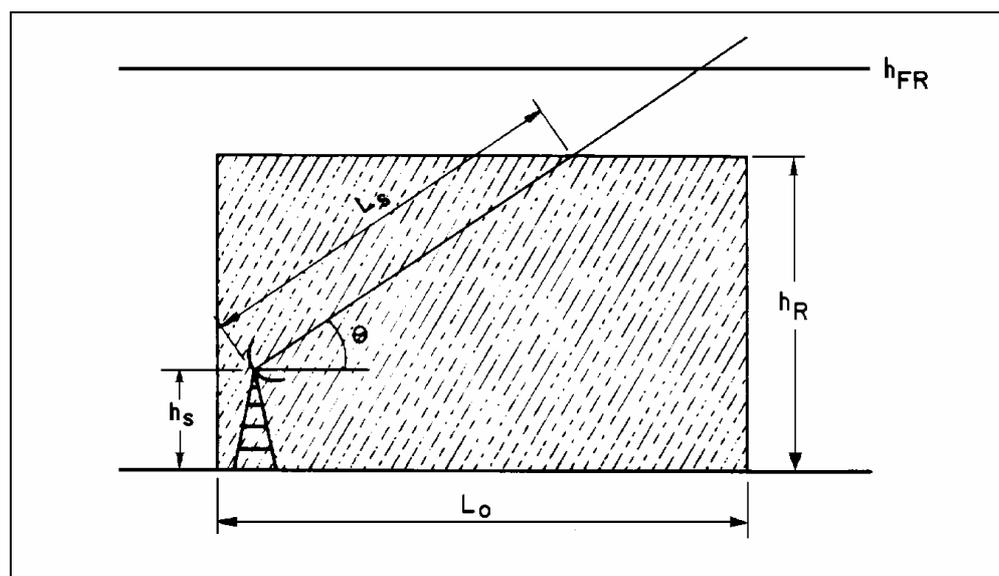


Figura 1 – Célula de chuva equivalente

1.4.3. Modelos de previsão de atenuação da UIT-R e CETUC

O procedimento para previsão de atenuação de chuva em percursos inclinados adotado pela UIT-R, na Recomendação 618-7 [1], atualmente em vigor, e na anterior, Recomendação 618-4 [2] é baseado na estimativa da atenuação excedida em 0.01% do tempo ($A_{0,01}$), a partir da taxa de chuva excedida na mesma percentagem de tempo ($R_{0,01}$). Uma expressão empírica nos dois métodos é utilizada para extrapolar o valor estimado para outras percentagens de tempo, para se obter a distribuição completa de atenuação. A diferença entre os dois métodos está no cálculo do comprimento efetivo do enlace. No método antigo tratava-se apenas de um fator de redução horizontal, enquanto que no modelo atual há também o fator de ajuste vertical, contabilizado para 0.01% do tempo. Apresentam-se os detalhes que fundamentam estes modelos, uma vez que suas premissas são adotadas também no desenvolvimento do modelo Cetuc de previsão de atenuação.

Estes métodos baseiam-se em duas premissas básicas:

- a estrutura espacial da chuva pode ser modelada por uma célula de chuva equivalente de taxa de chuva uniforme, cuja seção reta no plano do percurso é um retângulo de comprimento L_o e altura h_r - h_s ;
- a seção retangular da célula de chuva equivalente pode assumir qualquer posição no enlace com a mesma probabilidade.

A atenuação é obtida da integração da atenuação específica γ ao longo do percurso L , conforme equação (1.3). O comprimento dentro da célula de chuva equivalente onde a taxa de precipitação R é uniforme é denominado comprimento efetivo (L_{eff}). A integral pode então ser reescrita na forma:

$$A = \int_0^{L_{eff}} kR^\alpha dl = kR^\alpha L_{eff} \quad [\text{dB}] \quad (1.4)$$

O comprimento efetivo é função da geometria e da taxa de precipitação pontual R . Como todas as possíveis posições da célula de chuva em relação ao

enlace são consideradas equiprováveis, L_{eff} se torna o comprimento médio do percurso inclinado no interior da célula equivalente, $\langle L \rangle$. L_{eff} é então dado pela soma de todas as possíveis posições da célula em relação ao enlace, dada pela integral de $L(x)$, dividida pelo tamanho do trecho percorrido pela célula, dado por $L_o + L_s \cos \theta$.

$$L_{eff} = \langle L \rangle = \frac{1}{L_o + L_s \cos \theta} \int_{-L_o}^{L_s \cos \theta} L(x) dx \quad [\text{km}] \quad (1.5)$$

Existem duas soluções que devem ser analisadas, que são os casos em que $L_o \geq L_s \cos \theta$ e $L_o < L_s \cos \theta$, quando o comprimento da célula pode conter ou não a projeção do percurso inclinado L_s . Este percurso atravessa a borda superior da célula, conforme a Figura 1.

O deslocamento da célula de chuva sobre o enlace tem como referência o lado esquerdo da célula, ilustrada na Figura 2. O sentido do deslocamento é na direção crescente do eixo.

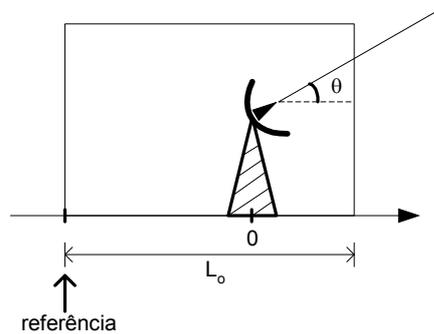


Figura 2 – Geometria do deslocamento da célula de chuva

Para a solução do caso $L_o \geq L_s \cos \theta$ a integral em (1.5) deve ser calculada em três intervalos, conforme as posições relativas da célula de chuva em relação ao enlace. A equação de (1.5) pode ser escrita como:

$$\int_{-L_o}^{L_s \cos \theta} L(x) dx = I_1 + I_2 + I_3 \quad (1.6)$$

Os intervalos de cada integral I_i onde $i = 1,2,3$ são ilustrados na Figura 3, que representa o deslocamento da célula para a direita.

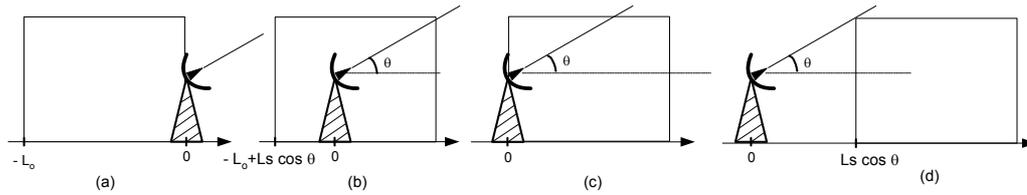


Figura 3 – Posições relativas da célula em relação ao enlace no caso $L_o \geq L_s \cos \theta$

No intervalo I_1 os limites de integração são dados pela posição relativas da célula nas situações (a) e (b) da Figura 3, no intervalo I_2 os limites estão nas situações (b) e (c) e no intervalo I_3 os limites estão entre (c) e (d).

A geometria envolvida na resolução de I_1 é apresentada na Figura 4.

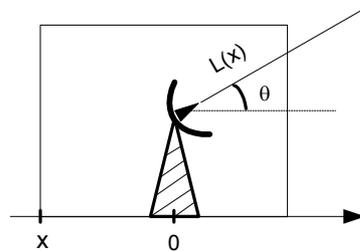


Figura 4 – Geometria da primeira integral

A integral no intervalo I_1 é dada por:

$$I_1 = \int_{-L_o}^{-L_o + L_s \cos \theta} \left(\frac{L_o + x}{\cos \theta} \right) dx = \frac{L_s^2 \cos \theta}{2} \quad (1.7)$$

No intervalo I_2 os limites estão em (b) e (c), e a geometria utilizada está apresentada na Figura 5.

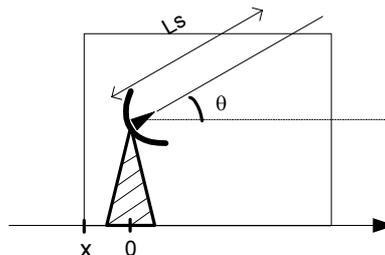


Figura 5 – Geometria da segunda integral

A integral no intervalo I_2 é dada por:

$$I_2 = \int_{-L_o + Ls \cos \theta}^0 Ls \cdot dx = LsL_o - Ls^2 \cos \theta \quad (1.8)$$

Na terceira integral os limites estão em (c) e (d) e a geometria utilizada está apresentada na Figura 6 .

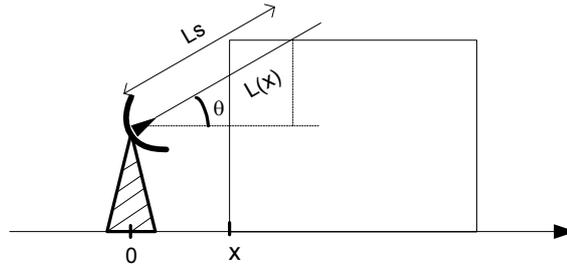


Figura 6 – Geometria da terceira integral

A integral no intervalo I_3 é dada por:

$$I_3 = \int_0^{Ls \cos \theta} \left(Ls - \frac{x}{\cos \theta} \right) \cdot dx = \frac{Ls^2 \cos \theta}{2} \quad (1.9)$$

Reunindo-se os resultados das três integrais de (1.5) obtém-se:

$$\int_{-L_o}^{Ls \cos \theta} L(x) dx = \int_{-L_o}^{-L_o + Ls \cos \theta} \left(\frac{L_o + x}{\cos \theta} \right) dx + \int_{-L_o + Ls \cos \theta}^0 Ls \cdot dx + \int_0^{Ls \cos \theta} \left(Ls - \frac{x}{\cos \theta} \right) dx = LsL_o \quad (1.10)$$

Para a solução do caso $L_o < Ls \cdot \cos \theta$ a integral em (1.5) deve ser calculada em três intervalos, tal como no caso anterior. A Figura 7 ilustra as posições relativas da célula de chuva deste caso.

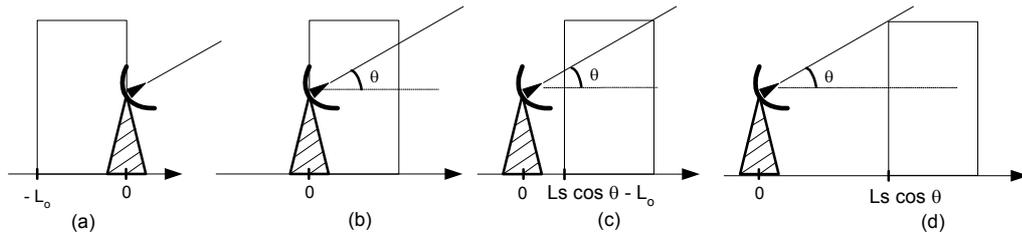


Figura 7 – Posições relativas da célula em relação ao enlace no caso $L_o < L_s \cos \theta$

A integral de (1.5) é dividida em três intervalos. No primeiro caso os limites de integração são ilustrados nas posições (a) e (b) da Figura 7, no segundo caso entre (b) e (c) e no terceiro caso, entre (c) e (d). Utilizando o procedimento aplicado na situação de $L_o \geq L_s \cos \theta$ para a obtenção de $L(x)$ em cada intervalo, obtém-se para a integral de (1.5) a seguinte resolução:

$$\int_{-L_o}^{L_s \cos \theta} L(x) dx = \int_{-L_o}^0 \left(\frac{L_o + x}{\cos \theta} \right) dx + \int_0^{L_s \cos \theta - L_o} L_o dx + \int_{L_s \cos \theta - L_o}^{L_s \cos \theta} \left(L_s - \frac{x}{\cos \theta} \right) dx = L_s L_o \quad (1.11)$$

Verificou-se que nas duas situações o resultado da integral foi o mesmo, $L_s L_o$, mostrando que o comprimento efetivo L_{eff} pode ser calculado para qualquer tamanho de célula. Com a substituição deste resultado na integral de (1.5) tem-se que L_{eff} é dado pela expressão:

$$L_{eff} = \frac{L_s}{1 + \frac{L_s \cos \theta}{L_o}} \quad [\text{km}] \quad (1.12)$$

Assim, a atenuação excedida em 0.01% do tempo ($A_{0.01}$) no enlace satélite é expressa por

$$A_{0.01} = \gamma(R_{0.01}) L_{eff}(R_{0.01}) \quad [\text{dB}] \quad (1.13)$$

onde

$$\gamma(R_{0.01}) = k R_{0.01}^\alpha \quad [\text{dB/km}] \quad (1.14)$$

Como exemplo será citado apenas o modelo UIT-R antigo, devido à sua simplicidade e também por servir de introdução para o modelo Cetuc.

O comprimento efetivo do percurso pode ser rescrito na forma:

$$L_{eff} = L_S \cdot r_{0.01} \quad [\text{km}] \quad (1.15)$$

onde

$$L_S = \frac{h_r - h_s}{\text{sen} \theta} \quad [\text{km}] \quad (1.16)$$

$$r_{0.01} = \frac{1}{1 + \frac{L_S \cos \theta}{L_o(R_{0.01})}} \quad [\text{km}] \quad (1.17)$$

Nas expressões acima h_R é a altura efetiva de chuva, que no método da UIT-R é função da latitude da estação (φ), dada por

$$h_r(\text{km}) = \begin{cases} 5 - 0.075(\varphi - 23) & \text{para } \varphi > 23^\circ \\ 5 & \text{para } 0^\circ \leq \varphi \leq 23^\circ \\ 5 & \text{para } 0^\circ \geq \varphi \geq -21^\circ \\ 5 + 0.1(\varphi + 21) & \text{para } -71^\circ \leq \varphi < -21^\circ \\ 0 & \text{para } \varphi < -71^\circ \end{cases} \quad (1.18)$$

O parâmetro L_o , comprimento efetivo da célula de chuva é função da taxa de chuva excedida em 0.01% do tempo, sendo determinado pela expressão a seguir.

$$L_o(R_{0.01}) = 35 \cdot e^{(-0.015 \cdot R_{0.01})} \quad [\text{km}] \quad (1.19)$$

A previsão da atenuação excedida em percentagens de tempo diferentes de 0.01% é feita por extrapolação a partir desta percentagem, através da seguinte fórmula:

$$A_p = A_{0.01} \cdot 0.12 \cdot p^{-(0.546 + 0.043 \log p)} \quad [\text{dB}] \quad (1.20)$$

Algumas inconsistências foram observadas nestes métodos. O uso de um único ponto da distribuição cumulativa da taxa de precipitação para prover a distribuição cumulativa inteira pode trazer inconvenientes. O modelo apresentará a mesma distribuição de atenuação para duas localidades com diferentes regimes de chuva, caso a taxa de precipitação excedida durante 0.01% do tempo seja a mesma para as duas localidades. Finalmente, ainda que o método tenha apresentado características de exatidão e simplicidade quando utilizado em regiões de clima temperado, os resultados são muito precários quando o método é aplicado em regiões de clima tropical e equatorial.

No modelo de previsão desenvolvido pelo Cetuc é mantido o conceito de célula de chuva equivalente com taxa de precipitação uniforme. A atenuação A_p excedida em uma determinada percentagem de tempo p , é dada por

$$A_p = \gamma_p \cdot L_{eff} \quad [\text{dB}] \quad (1.21)$$

com

$$\gamma_p = k \cdot R_p^\alpha \quad [\text{dB/km}] \quad (1.22)$$

$$L_{eff} = L_S \cdot r_p \quad [\text{km}] \quad (1.23)$$

O comprimento de percurso inclinado e o fator de redução do percurso são dados pelas mesmas expressões do método da UIT-R:

$$L_S = \frac{h_R - h_S}{\text{sen } \theta} \quad [\text{km}] \quad (1.24)$$

$$r_p = \frac{1}{1 + \frac{L_S \cos \theta}{L_0}} \quad [\text{km}] \quad (1.25)$$

As expressões são similares às do método da UIT-R, exceto por serem utilizadas para qualquer percentagem de tempo e não somente para 0.01%. Neste método não é necessário aplicar fórmula de extrapolação de atenuação.