

## Introdução

O grande desenvolvimento experimentado pelas comunicações baseadas em tecnologias sem fio, tais como comunicação móvel celular e redes de comunicação de alta velocidade, entre outras, tem gerado uma forte demanda pelo crescimento e melhoramento constante dos sistemas. A comunicação, onipresente, é um dos paradigmas da nossa sociedade.

Tal proliferação tem criado uma série de demandas, tais como o constante aumento das taxas de transmissão e recepção e cobertura. O aumento das taxas é um produto da largura de banda utilizada, recurso este escasso e caro. A ampliação da cobertura exige grandes investimentos e inversões de capital, na medida em que são necessárias novas instalações físicas.

Esforços de pesquisa e desenvolvimento têm sido tomados com o objetivo de melhorar os fatores citados acima, visando benefícios na eficiência espectral, e no planejamento e dimensionamento da cobertura, para um melhor aproveitamento da banda disponível e melhor caracterização e modelagem do enlace de comunicação. Um bom conhecimento do canal de propagação é essencial na caracterização do enlace, na medida em que provê o prestador de serviços de dados de predições confiáveis, possibilitando o melhor dimensionamento e evitando custos inerentes à disposição do serviço.

O estudo da dispersão e desvanecimento dos sinais eletromagnéticos associados a ambientes com vegetação é um tema pouco estudado no mundo [2], de relevância crescente, pois existe um interesse maior na criação e manutenção de ambientes com vegetação.

Nos modelos usuais de propagação, que são amplamente utilizados por prestadores de serviço de telecomunicações em seus projetos, tais como os modelos: Okumura-Hata, Ikegami, Walfisch-Bertoni, Hata-Cost231 e Ibrahim-Parsons, a influência da vegetação na perda do sinal no percurso não é considerada em suas equações. O que existe em termos de modelagem para o efeito da vegetação é específico para um determinado tipo de vegetação, em geral de climas temperados [3].

O interesse na faixa UHF de 700 MHz se dá por ser uma banda que vem sendo utilizada em outros países para o uso de novas tecnologias de comunicação, devido as suas ótimas características de propagação [4], o que proporciona economia de energia na irradiação do sinal destinado a prover cobertura. A energia elétrica é um importante insumo na indústria de telecomunicações e a adoção desta banda no Brasil para a implantação dos novos sistemas 4G, pode vir a ser viabilizada em função da crescente demanda observada.

A proposta é desenvolver um modelo de predição para a perda de potência do sinal em faixa estreita, devido à passagem do sinal sobre espaços com variados graus de vegetação em sua morfologia e propor um modelo matemático de predição mais adequado ao ambiente brasileiro, o que é uma poderosa ferramenta no projeto de enlaces ponto-a-ponto e ponto-área.

Para tanto, foi feita uma extensa campanha de medições do sinal eletromagnético na faixa de interesse, utilizando algumas das metodologias adotadas por Matos e Siqueira [3] e Dal Bello [4]. Foram consideradas quatro situações, caracterizadas pela morfologia da área:

- a) Linha de árvores (configuração habitual de vegetação em ruas, usualmente paralelas aos prédios, com a vegetação disposta na calçada);
- b) Pequena floresta cobrindo uma grande área bem definida no interior de cidades (como ocorre em parques);
- c) Floresta relativamente grande, cobrindo completamente uma área;
- d) Espécimes isolados. Uma árvore isolada.

Os *sites* de medição consistiram de rotas previamente estabelecidas, localizadas no Inmetro, em Xerém, Duque de Caxias, zona metropolitana do Rio de Janeiro- RJ e no Jardim Botânico e uma propriedade rural com floresta em Belém, PA, mostrados nas figuras (A- D).

Os dados dos serão analisados e processados para a extração dos parâmetros desejados, que serão utilizados para obtenção de um modelo de perda de propagação em ambientes vegetados para a faixa de frequências entre 700 MHz e 800 MHz e posteriormente comparados a modelos de predição já utilizados.



Figura A - Vegetação com morfologia tipo A (Vila de Americano, Belém - PA).



Figura B - Vegetação com morfologia tipo B (Jardim Botânico, Belém - PA ).

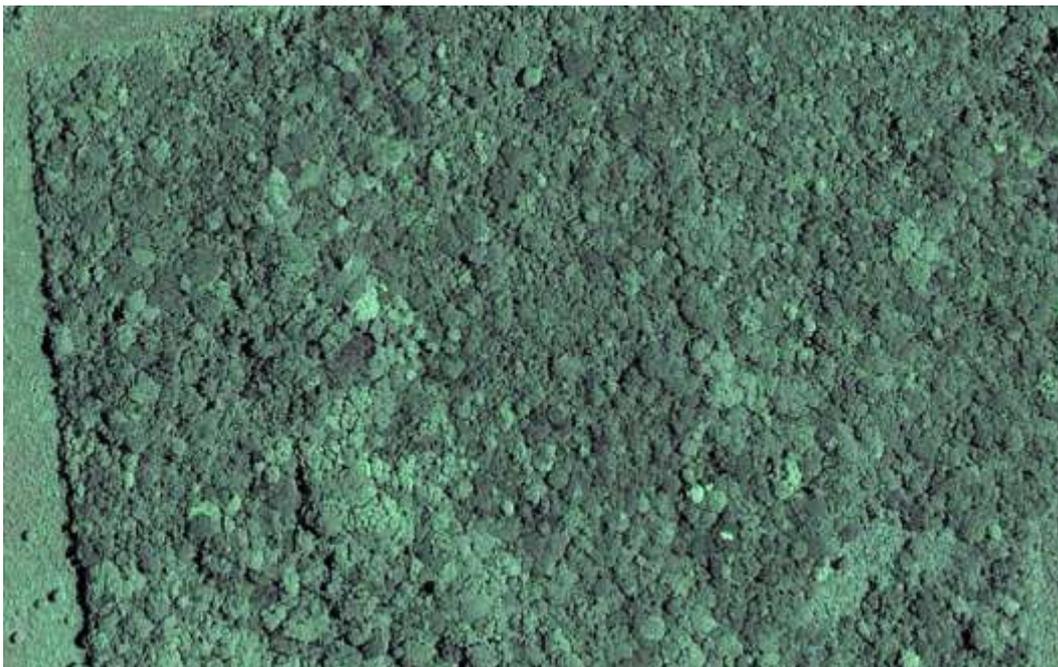


Figura C - Vegetação com morfologia tipo C (Vila de Americano, Belém - PA).



Figura D - Vegetação com morfologia tipo D (Vila de Americano, Belém - PA).

## Breve Histórico das Comunicações Sem Fio

A primeira previsão de existência de ondas eletromagnéticas foi feita em 1864, pelo físico escocês James C. Maxwell (1831-1879). Ele conseguiu provar, teoricamente, que uma perturbação eletromagnética devia se propagar no vácuo com uma velocidade igual à da luz.

A primeira verificação experimental foi realizada por Heinrich Hertz (1857-1894), em 1887. Hertz produziu ondas eletromagnéticas por meio de circuitos oscilantes, que depois foram detectadas por meio de outro circuito sintonizado na mesma frequência.

O Marquês Guglielmo Marconi (1874-1937), inventou em 1896 o primeiro sistema prático de telegrafia sem fios (TSF) [1]. Marconi baseou-se em estudos apresentados em 1897 por Nicola Tesla (1856-1943) para, em 1899, realizar a primeira transmissão pelo canal da mancha e posteriormente sobre o atlântico norte.

O pioneiro sistema móvel da polícia de Detroit, implantado em 1921, operando próximo à frequência de 2 MHz, foi um grande sucesso tecnológico para a época. Em meados dos anos trinta os enlaces de radiocomunicação e sistemas de rádio de *broadcast* (emissoras de rádio) já eram bastante utilizados mundo afora.

Os primeiros sistemas desenvolvidos para a utilização em florestas foi desenvolvido durante a segunda guerra mundial, para o uso das forças armadas americanas, no teatro de operações do Pacífico, composto por muitas ilhas com densa vegetação. Nos anos cinquenta, a televisão tornou-se um fenômeno de massa, transformando-se em um dos eletrodomésticos de maior penetração nos lares até os dias de hoje.

O desenvolvimento da tecnologia, ocorrido no início dos anos sessenta, proporcionou um rápido desenvolvimento aos sistemas de radiocomunicações e frequências acima de 450 MHz se tornaram comuns. Com a participação dos Estados Unidos na guerra do Vietnam, a pesquisa sobre telecomunicações em florestas foi estimulada pelo exército dos EUA.

A análise do desvanecimento em enlaces de rádio foi estudada com maior intensidade neste período, usando modelos estatísticos. Clarke [11] pesquisou o comportamento estatístico em ondas eletromagnéticas planas, originadas por múltiplas reflexões, percursos e difrações. Suzuki [12] caracterizou, estatisticamente, o desvanecimento em termos do multipercurso e sombreamento.

Nas últimas décadas, novas tecnologias de telecomunicações revolucionaram a forma como as pessoas se comunicam. Os destaques foram os sistemas celulares, que possuem uma engenhosa arquitetura de reuso da banda empregada, de forma modular, o que torna fácil a expansão do sistema, mesmo com recursos limitados.

O estudo das características de propagação dos sinais eletromagnéticos continua sendo motivo de pesquisas e novas distribuições de probabilidade estão continuamente sendo propostas, para uma melhor modelagem dos ambientes de propagação.

## **Objetivos**

Compreender os fatores que influenciam a propagação de ondas eletromagnéticas em um meio proporciona melhor caracterização do problema e, conseqüentemente, um eficiente modelo de predição da perda do sinal (MPPS). No planejamento de enlaces de comunicação os MPPS's são usados para estimar a qualidade do sinal e sua intensidade na área ou local em que precisa estar presente.

O caso da propagação sobre terrenos com vegetação apresenta desafios à obtenção de um bom MPPS, na medida em que depende não apenas do terreno, construções e ocupação, mas do tipo de vegetação, densidade, grau de umidade dos vegetais, entre outros. Vogel e Goldhirsh [13] demonstraram que uma única árvore pode atenuar em mais de 10 dB o campo recebido nas proximidades, o que é um significativo sombreamento na cobertura.

O trabalho está concentrado na caracterização da perda de propagação em ambientes vegetados na faixa UHF de 700 MHz a 800 MHz, em banda estreita. Para isso serão tomados modelos típicos de vegetação sobre os quais as ondas eletromagnéticas se propagam (morfologias):

- a) Linha de árvores (como dispostas na calçada);
- b) Pequena floresta cobrindo uma área definida no interior de cidades (bosques, parques, praças arborizadas, etc.);
- c) Floresta relativamente grande;
- d) Árvore isolada.

Será realizada extensa campanha de medições para aquisição dos parâmetros necessários em sites que apresentam as morfologias vegetais acima:

- *Site 1* (morfologia A), linha de árvores plantadas em intervalos regulares, na vila de Americano, região metropolitana em Belém-PA;
- *Site 2* (morfologia A), linha de árvores plantadas no Inmetro em Xerém, Duque de Caxias, região metropolitana do Rio de Janeiro - RJ;
- *Site 3* (morfologia B), o Jardim Botânico de Belém, PA. Com alta densidade vegetal delimitada pela cidade;
- *Site 4* (morfologia C), mata na vila de Americano, região metropolitana de Belém com grande quantidade de mata nativa preservada, típica floresta equatorial, com alta densidade vegetal e ocupando uma grande área, sem ocupação urbana;
- *Site 5* (morfologia D), árvores isoladas, sem construções próximas, na vila de Americano, região metropolitana em Belém-PA.

Os parâmetros de interesse, que serão extraídos dos dados adquiridos são:

- Os valores da atenuação da propagação na faixa de frequência UHF de 700 MHz a 800 MHz;
  - A dependência da perda de sinal com a morfologia vegetal presente no terreno;
  - A dependência da atenuação com a altura da antena de transmissão e a recepção fixa a 1,5 metros do solo. Os casos estudados serão:
- Caso 1 - Antena transmissora na mesma altura do receptor, a 1,5 metros do solo;
- Caso 2 - Antena transmissora posicionada a 6 metros da linha do solo;
- Caso 3 - Antena transmissora na altura de 12 metros da linha do solo.

Resumindo, são apresentados resultados teórico-experimentais da propagação na faixa de interesse, em áreas com vegetação das classes A, B, C e D que serão caracterizados de forma estatística e comparados aos principais MPPS's utilizados, e será proposto um MPPS que possua melhor aderência aos resultados práticos obtidos das medições.

## **Estrutura do trabalho**

Este trabalho está apresentado de forma a facilitar a compreensão dos tópicos necessários ao desenvolvimento do mesmo. Primeiramente são abordados temas gerais sobre o problema e, nos capítulos seguintes, de forma mais específica, os temas relevantes, de forma a introduzir os conceitos gradativamente, de forma didática.

Após a introdução, no capítulo I, foi abordada a formulação do problema, onde estão descritas as abordagens e peculiaridades da propagação sobre áreas vegetadas. Em seguida, no capítulo II, foram tratados aspectos gerais sobre propagação de ondas eletromagnéticas, abordando temas pertinentes à compreensão do trabalho.

No capítulo III, estão descritos modelos de predição importantes e bastante utilizados e citados em outros trabalhos. O capítulo IV descreve importantes modelos específicos sobre o tema, que foram utilizados como comparação ao modelo obtido.

O capítulo V descreve o *setup* de medições (*hardware*) com o detalhamento de todos os equipamentos utilizados e suas características, assim como a configuração utilizada nas campanhas de medições. No capítulo VI, estão descritos em detalhes os sites de medição e o arranjo adotado em cada caso da campanha de medições.

No capítulo VII, foram descritas as metodologias adotadas para captura e tratamento dos dados coletados em campo.

O capítulo VIII trata da análise dos resultados encontrados em campo e seu relacionamento com a distância, frequência e estatísticas de erro para todas as morfologias. No final do capítulo, foi feito um estudo exclusivo sobre espécimes isolados e a perda em proximidade com uma árvore. No capítulo IX foi proposto um modelo geral de perda sobre ambientes vegetados. No capítulo X está a conclusão do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

# 1

## Propagação, ambientes e vegetação

### 1.1

#### Considerações

Um sistema de radiocomunicação opera ,basicamente, pela propagação de energia entre o transmissor e o receptor. A onda sofre espalhamento e atenuação à medida que se desloca pelo ambiente.

Segundo Bertoni [14], os ambientes usuais de propagação em terra são divididos segundo sua morfologia entre: urbano, suburbano e rural. Áreas urbanas são definidas como sendo dominadas por altos prédios, com grande ocupação dos terrenos, ambiente típico do centro de grandes cidades. Áreas suburbanas são caracterizadas pela predominância de baixos edifícios e zonas residenciais, com poucos prédios altos. Zonas rurais são definidas pela baixa ocupação da área, com residências e pequenos prédios bastante espaçados entre si. É difícil estipular limites precisos para cada área, em geral elas se interpenetram e se misturam no ambiente, formando por vezes uma zona de transição, onde pode-se detectar a presença de características próprias de cada área. No âmbito deste trabalho essa tipificação adotada é aceitável, na medida em que serão tomadas áreas para medição com características bem definidas, e longe de zonas de transição. Ainda que possam haver características de outras áreas de propagação, serão pequenas e desprezadas, assim, para motivos práticos pode-se caracterizar as áreas vegetadas dentro de cada setor.

De acordo com Parsons e Gardner [15], é possível definir com boa precisão um sinal de radiocomunicação por dois fatores: a média do sinal recebido e a variação em torno da média.

Em ambientes construídos, as edificações provocam espalhamento e consequente variação do sinal, o que torna difícil o cálculo de sua média. As consecutivas reflexões e difrações tornam o valor do campo bastante variável, mesmo em pequenos intervalos de espaço. Podem-se caracterizar as árvores de forma semelhante, agindo como espalhadores e atenuando o sinal.

Conforme Jao [16] é possível considerar a vegetação como um conjunto aleatoriamente distribuído de diferentes espécies vegetais, de variadas dimensões, que atuam como espalhadores de energia, e se as estatísticas desses espalhadores puderem ser conhecidas, o ambiente pode ser adequadamente caracterizado.

Neste trabalho optou-se por analisar os efeitos dos vegetais em áreas com pouca ou nenhuma edificação, com o intuito de identificar com maior intensidade o efeito da vegetação, em detrimento de outros fatores presentes e impactantes na propagação.

## 1.2

### Tipificação

Existe uma grande diversidade de ambientes com vegetação, o que torna sua caracterização complicada. Neste estudo, serão discutidos quatro tipos de configurações de zonas com vegetação, que são bem representativos como possíveis percursos de sinais eletromagnéticos. Sabe-se que à medida que uma onda de rádio se propaga em espaços vegetados ela sofre desvanecimento. Segundo Vogel e Goldhirsh [13], que fizeram experimentos na faixa de frequência de 800 MHz o sinal sofre atenuação de até 2 dB a cada metro de percurso em vegetação arbórea. Devido à baixa atenuação de gramíneas e arbustos baixos, os esforços de caracterização neste trabalho serão concentrados sobre ambientes arborizados, que apresentam a maioria da biomassa vegetal presente em espaços onde há boa concentração de árvores.

Foram abordados os casos de ocorrência de árvores em uma linha (usualmente plantadas nas calçadas), uma pequena floresta ou bosque (densidade vegetal variável em função da ocupação e das espécies, tipicamente como em um parque, limitado dentro da cidade), uma floresta de grandes dimensões (grande densidade de ocupação e variadas espécies, cobrindo totalmente uma área) e árvores isoladas.

A metodologia de tipificação da área será uma forma simplificada da adotada por Kafaru [17], onde a área sob análise é dividida em quadrículas de 500 X 500 m e então são determinadas características morfológicas da área, tais como o número de edifícios, área da base dos prédios, o percentual da área construída, as ondulações do terreno e as áreas cobertas por vegetação. Dal Bello [3] estendeu a idéia para uma apreciação mais abrangente sob o aspecto da vegetação no ambiente.

Propõe-se aqui o estudo da influência da vegetação na propagação de ondas UHF na faixa de interesse, assim a análise intensiva dos outros fatores que influenciam a propagação, tais como a morfologia predial e dados do terreno, que são citados nos trabalhos dos dois autores não serão utilizados. A quadrícula adotada, de onde se tomarão os dados relativos às morfologias vegetais será de 50m x 50m para os casos de pequenas florestas e matas fechadas, e no caso de linhas de árvores serão tomados os primeiros 50 metros, a partir do transmissor na linha de propagação.

Todos os sítios escolhidos para a campanha de medições são de terrenos planos, e para efeitos práticos serão tomadas como planas quadrículas onde o desnível entre seu ponto mais alto e seu ponto mais baixo não exceda 10% do valor da aresta da quadrícula (5 m). As medidas serão tomadas a intervalos regulares de distância do transmissor, em rotas predefinidas, de forma a se obter o valor da atenuação da potência à medida que o receptor se afasta do transmissor, ao se propagar o sinal sobre a vegetação.

Para cada rota, o transmissor ficará em uma posição fixa e as medições serão feitas com o auxílio de um GPS para determinação com boa precisão da distância entre o receptor e o transmissor à medida que se afastam. Para melhor caracterização da perda sobre as áreas vegetadas, em cada rota de medição serão tomadas leituras nas frequências de 700 MHz, 750 MHz e 800 MHz, em três casos distintos:

Caso 1 - transmissor e receptor a 1,5 metro do solo (fig. 1.1);

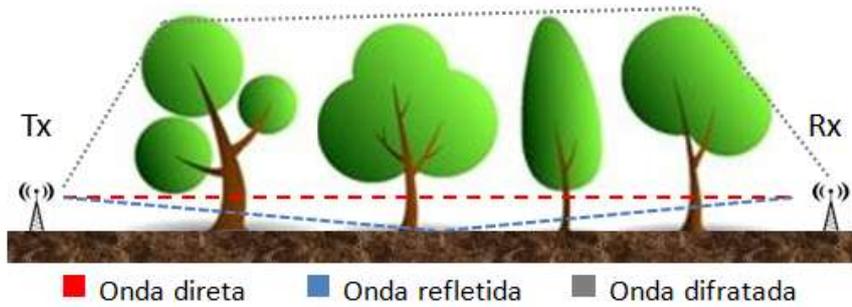


Figura 1.1 - Transmissor e receptor a 1,5 metro do solo.

Caso 2 - transmissor a 6 metros e receptor a 1,5 metro do solo (fig. 1.2);

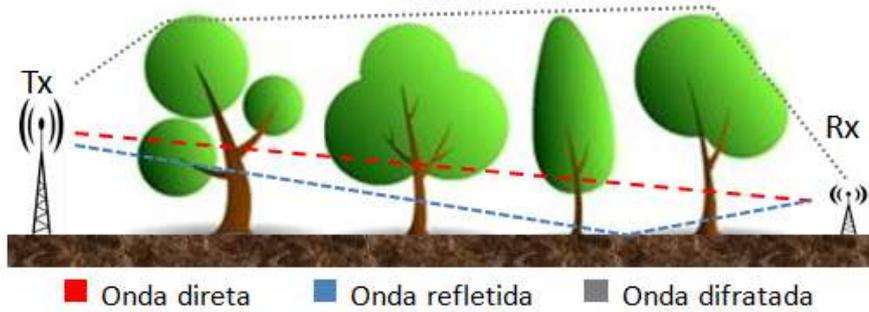


Figura 1.2 - Transmissor a 6 metros e receptor a 1,5 metro do solo.

- Caso 3 - Transmissor a 12 metros e receptor a 1,5 metro do solo (fig.1.3).

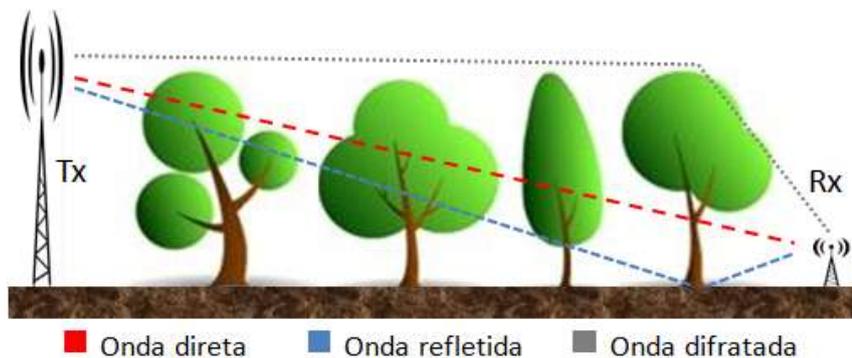


Figura 1.3 - Transmissor e receptor acima da linha média das copas.

A importância da análise destes três casos se dá por serem modelos usuais de enlaces. O primeiro caso seria a hipótese de usuários pessoais comunicando-se em baixo da copa de árvores. O segundo e terceiro casos podem representar o exemplo típico de comunicações móveis celulares, onde uma estação rádio base (ERB) se comunica com um terminal móvel (celular), ilustrando uma clássica comunicação ponto-área.

Utilizando a óptica geométrica e considerando apenas os principais mecanismos de propagação que atuam sobre os três casos propostos, que são: visada direta, reflexão e difração, pode-se supor, no primeiro caso, que grande parte da energia propaga-se abaixo da folhagem. Neste ambiente, os troncos agem como obstáculos que absorvem energia e difratam o sinal [18], e o solo age refletindo parte da energia. No segundo e terceiro casos a propagação da onda ocorre através da folhagem e troncos e sofre espalhamento e atenuação, possibilitando a análise do comportamento do sinal captado em função das estruturas vegetais encontradas.

O sinal, ao se propagar pelas folhagens, sofre espalhamento e atenuação [18]. A faixa de 700 MHz possui comprimento de onda de, aproximadamente, 40 cm, e a quantidade de energia absorvida pelos troncos varia com as dimensões dos mesmos [18], pois ondas eletromagnéticas têm menor possibilidade de transpor obstáculos com dimensões maiores que seu comprimento de onda. Como parâmetros de análise serão tomadas as alturas médias das árvores, diâmetro médio dos troncos e altura do solo até a copa nas quadrículas escolhidas em cada site de medição.