

**LIGA DE ENSINO DO RIO GRANDE DO NORTE
FACULDADE NATALENSE PARA O DESENVOLVIMENTO DO RN
ESPECIALIZAÇÃO EM REDES DE COMPUTADORES**

JOSÉ HAROLDO CAVALCANTE DE MORAIS

MODELOS DE PROPAGAÇÃO INTERNA PARA REDES 802-11

**NATAL/RN
2010**

JOSÉ HAROLDO CAVALCANTE DE MORAIS

MODELOS DE PROPAGAÇÃO INTERNA PARA REDES 802-11

Monografia apresentada ao curso de
Especialização em Redes de Computadores da
Faculdade Natalense para o Desenvolvimento
do Rio Grande do Norte como requisito parcial
para a obtenção do título de Especialista em
Redes de Computadores.

Orientador:

Prof. Dr. Antônio Luiz Pereira de S. Campos

**NATAL/RN
2010**

Catálogo na Publicação – Biblioteca da FARN
Setor de Processos Técnicos

Morais, José Haroldo Cavalcante de
Modelos de propagação interna para redes 802-11 / José Haroldo
Cavalcante de Moraes. – Natal: FARN, 2010.
47f.

Orientador: Antônio Luiz Pereira de S. Campos (Dr.)
Monografia (Especialista em Redes de Computadores) – Faculdade
Natalense para o Desenvolvimento do Rio Grande do Norte.

1. Redes de Computadores – Monografia. 2. Propagação Interna –
Monografia. 3. Ondas eletromagnéticas – Monografia I. Título.

RN/FARN/BC

CDU 004(063)

**LIGA DE ENSINO DO RIO GRANDE DO NORTE
FACULDADE NATALENSE PARA O DESENVOLVIMENTO DO RN
ESPECIALIZAÇÃO EM REDES DE COMPUTADORES**

José Haroldo Cavalcante De Moraes

MODELOS DE PROPAGAÇÃO INTERNA PARA REDES 802-11

Monografia apresentada e aprovada em 19 de agosto de 2010, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros.

Antônio Luiz Pereira de S. Campos, Dr.
Orientador

Aluizio Ferreira da Rocha Neto, M. Sc.
Membro examinador

Natal/RN, _____ de _____ de _____

RESUMO

Este projeto tem como ênfase o estudo da propagação eletromagnética em ambientes indoor. Ascendências como as equações de Maxwell, Farad, Ampère e teoremas de Gauss e Stokes resultam nas equações de ondas eletromagnéticas.

Com o desprendimento dessas ondas eletromagnéticas encontram-se discernimentos de velocidades de propagação, índices de refração, formas de propagação, propagações terrestres: modelo físico, modelo estatístico, ou seja, um estudo apurador entre ondas e propagações eletromagnéticas.

Energias envolvidas que dependerão, basicamente, da natureza da superfície, das propriedades do material e da frequência da onda atuante.

Perdas encontradas que podem ser representadas por reflexão, difração e espalhamento.

Sintetizando, neste projeto reúnem-se definições, conhecimentos e aplicações ligadas ao fator das propagações eletromagnéticas em ambientes definidos e como conclusão tem-se uma aplicação em exercício com modelos empíricos e determinísticos de propagações em redes 802-11.

Palavras-chave: Ondas eletromagnéticas, Propagações indoor.

ABSTRACT

This project has an emphasis on the study of electromagnetic propagation in indoor environments. Ancestries as Maxwell's equations, Farad, Ampere and Gauss and Stokes theorems result in the equations of electromagnetic waves.

With the detachment of these electromagnetic waves are insights velocity of propagation, refractive indices, forms of propagation, terrestrial propagation: physical model, statistical model, ie a refined study between electromagnetic waves and spreads.

Energies involved which depend essentially on the nature of the surface material properties and wave frequency active. Found that losses can be represented by reflection, diffraction and scattering.

In summary, this project meet definitions, knowledge and applications related to the factor of electromagnetic propagation in environments that are defined and how it has completed an application to exercise with empirical models and deterministic propagation networks 802-11.

Key-words: Electromagnetic waves, Spreads indoor.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	OBJETIVOS	9
1.1.1	<i>Objetivos Específicos</i>	9
1.2	JUSTIFICATIVA	10
2	REFERENCIAL TEÓRICO	11
2.1	ELETROMAGNETISMO	11
2.1.1	<i>Ondas Eletromagnéticas</i>	11
2.1.2	<i>Equações de Maxwell e Ondas</i>	12
2.2	PROPAGAÇÃO ELETROMAGNÉTICA	16
2.2.1	<i>Velocidade de Propagação</i>	16
2.2.2	<i>Índice de Refração</i>	17
2.2.3	<i>Comprimento de onda</i>	17
2.2.4	<i>Polarização das ondas</i>	18
2.2.5	<i>Formas de Propagação</i>	18
2.2.6	<i>Propagação no Espaço Livre</i>	19
2.2.7	<i>Propagação Terrestre: Modelo Físico</i>	20
2.2.8	<i>Reflexão</i>	20
2.2.9	<i>Difração</i>	22
2.2.10	<i>Difração por Gume de Faca</i>	23
2.2.11	<i>Zonas de Fresnel</i>	24
2.2.12	<i>Propagação Terrestre: Modelo Estatístico</i>	25
2.2.13	<i>Propagação em Ambientes Indoor</i>	27
2.3	RECEPÇÃO E TRANSMISSÃO SEM FIO	29
2.3.1	<i>Sensibilidade de Recepção</i>	29
2.3.2	<i>Faixa de Cobertura</i>	29
2.3.3	<i>Efeito Doppler</i>	30
2.3.4	<i>Ruído</i>	31
2.3.5	<i>Antenas</i>	31
2.3.6	<i>Tipos de antenas</i>	31
2.3.7	<i>Diagrama de Radiação</i>	33
2.3.8	<i>Radiação Isotrópica</i>	33
2.3.9	<i>Diretividade</i>	34
2.3.10	<i>Ganho e Eficiência</i>	34
2.3.11	<i>Equação de Friis</i>	35
2.3.12	<i>Linha de Visada Direta</i>	36
2.3.13	<i>Antenas Inteligentes</i>	36
2.4	TECNOLOGIA 802-11	37
2.5	PADRÕES DE EQUIPAMENTOS 802-11	37
2.6	MODELOS DE NORMAS DE PROPAGAÇÃO PARA CÁLCULOS INDOOR	39
2.6.1	<i>Modelo ITU-R P.1238-1</i>	39
2.6.2	<i>Modelo One Slope</i>	40
3	APLICAÇÃO INDOOR WLAN	42
3.1	PARÂMETROS OBTIDOS NA PRÁTICA DO PROJETO	42
3.2	MODELO DETERMINÍSTICOS DE PREDIÇÃO DE SINAIS DE PROPAGAÇÃO	44
3.3	CÁLCULOS COM MODELOS EMPÍRICOS E DETERMINÍSTICOS:	45
4	CONCLUSÃO	46
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47

Lista de Figuras

Figura 1: Onda eletromagnética.....	17
Figura 2: Polarização de ondas.....	18
Figura 3: Geometria aplicada no desenvolvimento do processo de reflexão.....	21
Figura 4: Aplicação do princípio de Huygens.....	23
Figura 5: Geometria utilizada na determinação do campo difratado.....	24
Figura 6: Aplicação da geometria do Elipsóide de Fresnel.....	25
Figura 7: Sinais reais e imaginários numa distribuição Rayleigh.	26
Figura 8: Sinais reais e imaginários numa distribuição Rice.....	27
Figura 9: Geometria para o cálculo do Efeito Doppler.....	30
Figura 10: Casos com aplicação do efeito Doppler.	30
Figura 11: Antena log-periódica.....	32
Figura 12: Antena dipolo.....	32
Figura 13: Monopólos de Patches elípticos.....	32
Figura 14: Antena quase-Yagi de microfita.....	32
Figura 15: Antena helicoidal.....	32
Figura 16: Exemplo de irradiação de antena.....	33
Figura 17: Topologia do Projeto CAV.....	42
Figura 18: Exemplos de sinais na recepção.....	44

1 INTRODUÇÃO

Torna-se imprescindível a percepção do meio de transmissão quando a matéria é propagação eletromagnética principalmente quando se objetiva realizar planejamentos de coberturas e desempenhos de radiações eletromagnéticas em projetos. Nos sistemas *wireless* o meio de propagação é o canal rádio, cujas características e efeitos sobre as informações trafegadas são de naturezas complexas, impossibilitando uma análise completamente determinística, sugerindo assim a utilização de dados experimentais.

Medições indicam que as flutuações de pequena escala e de larga escala do sinal em torno do seu valor médio variam de acordo com as distribuições de Rayleigh, Rice e lognormal, respectivamente. A partir das medições, também é possível se determinar uma generalização a variação de potência do sinal devido ao movimento de pessoas no ambiente ou ao atravessar obstáculos fixos, como paredes, pisos, vidros, corredores, móveis etc.

Todos estes parâmetros são importantes para a construção de um modelo de propagação de sinais nas faixas de frequências (2,4 e 5,2 GHz) em ambientes fechados.

1.1 OBJETIVOS

O atual projeto define características de propagações eletromagnéticas como também preceitua os modelos de propagação indoor atribuindo definições, parâmetros e aplicações.

1.1.1 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral, as seguintes etapas foram seguidas:

- Descrever as características sobre ondas eletromagnéticas;
- Descrever equações de: Maxwell e Ondas eletromagnéticas;
- Especificar as formas de propagações;
- Apresentar os modelos de propagações;
- Descrever os resultados obtidos (trabalho de campo) em medições indoor.

1.2 JUSTIFICATIVA

Muitos são os equipamentos com tecnologia wireless, por isso é um bom momento para desfrutar de seus benefícios. Além disso, os dispositivos necessários para realizar este projeto se tornaram bastantes comuns e fáceis de encontrá-los. As vantagens de se criar uma rede wireless não são novidades. Afirmar que as redes sem fio estão se tornando cada vez mais populares devido a sua capacidade e baixo custo também não é surpresa.

Atualmente a grande maioria das redes wireless permite plena conectividade e atende aos padrões e normas dos organismos internacionais. Isto significa que, uma vez utilizando equipamentos padronizados, uma rede indoor poderá ser interconectada com redes de cabeamento convencional sem maiores problemas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 ELETROMAGNETISMO

2.1.1 Ondas Eletromagnéticas

As ondas eletromagnéticas são ondas formadas pela combinação dos campos magnético e elétrico que se propagam no espaço perpendicularmente um em relação ao outro e na direção de propagação da energia. James Clerk Maxwell, físico escocês.

No espaço, ou no vácuo, apenas as ondas eletromagnéticas podem se propagar entre dois pontos. Na atmosfera, tanto as ondas eletromagnéticas como as acústicas podem se propagar, embora as primeiras o façam com maiores vantagens. Essas vantagens fazem com que as ondas eletromagnéticas dominem completamente o panorama dos sistemas de comunicações sem fio. Os fenômenos nos quais intervêm tanto a corrente elétrica como o campo magnético, são denominados de fenômenos eletromagnéticos.

São três os fenômenos eletromagnéticos básicos:

- Se uma corrente elétrica fluir por um condutor será criado, ao redor do mesmo, um campo magnético (o condutor produzirá um campo magnético, como se fosse um ímã);
- Se um condutor percorrido por uma corrente elétrica for colocado dentro de um campo magnético, ficará sujeito a uma força;
- Se um condutor fechado for colocado em um campo magnético, de modo que a superfície determinada pelo condutor seja atravessada pelo fluxo magnético, a variação do fluxo induzirá no condutor uma corrente elétrica.

A teoria básica da corrente alternada estabelece que um campo variável, que resulta do fluxo de uma corrente alternada em um circuito, induz uma voltagem em um condutor colocado dentro do campo. Na realidade, a voltagem é induzida ainda que não haja condutor no campo. Esta voltagem induzida no espaço é, de fato, um campo elétrico. Desta forma, um campo magnético cria no espaço um campo elétrico variável. Este campo elétrico, por sua vez, produz uma corrente de deslocamento que gera um campo magnético, o qual, por seu turno, cria um campo elétrico, e assim por diante.

O processo mediante o qual estes campos se induzem mutuamente denomina-se indução eletromagnética. A combinação de campos é denominada campo eletromagnético. Em um campo de irradiação eletromagnética, as linhas do campo elétrico se fecham sobre si

mesmas, não estando unidas a cargas elétricas; e as linhas do campo magnético não estão relacionadas à corrente em um condutor. Os campos são verdadeiramente independentes, como se houvessem sido liberados no espaço. Há, portanto, uma idéia de movimento no processo, sendo esta propagação denominada onda eletromagnética.

2.1.2 Equações de Maxwell e Ondas

Conforme (Kraus – Carver), [7] o desenvolvimento das equações de Maxwell como generalidades das relações do circuito envolvem tanto o raciocínio indutivo como o físico. Isto não implica que a obtenção seja rigorosa. As equações justificam-se pelo fato de que as conclusões baseadas nelas mostraram em inúmeros casos estar em excelente harmonia com a experimentação, da mesma forma que as relações do circuito mais primitivo justificam-se dentro do seu domínio mais restrito pela excelente harmonia das conclusões, nelas baseadas, com a experimentação. Talvez mereça ser lembrado o fato de que as equações de Maxwell não tiveram aceitação geral durante muitos anos após sua postulação (1873). As equações do rotacional de Maxwell significavam que os campos magnéticos e elétricos variando com o tempo no espaço vazio eram interdependentes, sendo um campo elétrico variável capaz de gerar um campo magnético e vice-versa. A conclusão disto é que o campo eletromagnético variando no tempo propagaria a energia através do espaço vazio com a velocidade da luz e, mais ainda, que a luz é de natureza eletromagnética. As ondas de rádio eram desconhecidas na época e isto foi a quinze anos antes de Hertz (1888) demonstrar que as ondas eletromagnéticas eram possíveis como foi predito por Maxwell.

Não há garantia de que as equações de Maxwell sejam exatas. Todavia, com base na precisão de medições experimentais, elas parecem ser exatas e, portanto podemos considerá-las como tal.

Juntamente com as equações de Maxwell algumas outras relações fundamentais são de muita importância quando se lida com problemas eletromagnéticos. Entre estas podemos mencionar a lei de Ohm em um ponto:

$$\boxed{J = \sigma E} \quad (2.1)$$

A relação de continuidade

$$\boxed{\nabla \cdot J = -\frac{\partial \rho}{\partial t}} \quad (2.2)$$

As relações de forças

(2.3)

$$\begin{aligned} F &= qE \\ dF &= (l \times B)dl \end{aligned}$$

E as relações constitutivas entre E e D e entre B e H dadas por

(2.4)

$$D = \epsilon E = \epsilon_0 E + P$$

(2.5)

$$B = \mu H = \mu_0 (H + M)$$

As equações de Maxwell, **no caso especial do espaço livre**, onde as densidades de corrente J e de carga ρ são nulas, as equações se reduzem a uma forma mais simples. Na forma diferencial as equações são:

$$\nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2.6)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2.7)$$

$$\nabla \cdot D = 0 \quad (2.8)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2.9)$$

Se admitirmos que **os campos variem harmonicamente com o tempo**, as equações de Maxwell podem ser expressas de outra forma especial.

Assim, se **D** variar com o tempo como em

$$D = D_0 e^{j\omega t} \quad (2.10)$$

Então

$$\frac{\partial D}{\partial t} = j\omega D_0 e^{j\omega t} = j\omega D \quad (2.11)$$

Quando se faz a mesma suposição para $\mathbf{B}$, as equações de Maxwell na forma diferencial reduzem-se a:

$$\nabla \times \mathbf{H} = (\sigma + j\omega\epsilon)\mathbf{E} \quad (2.12)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega\mu\mathbf{H} \quad (2.13)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (2.14)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.15)$$

Desenvolvimento geral da onda eletromagnética conforme “Kraus – Carver” [7].

Neste capítulo tratamos das ondas planas (propagando-se na direção x). A equação de onda foi desenvolvida para este caso especial, obtendo-se soluções apropriadas. Será dado um desenvolvimento mais geral da equação de onda e será mostrado que numa onda plana ela se reduz às expressões obtidas anteriormente.

As equações em rotacional de Maxwell são:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \sigma \mathbf{E} + \epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (2.16)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (2.17)$$

Aplicando o rotacional em (2.17) e introduzindo o valor de $\nabla \times \mathbf{H}$ dado por (2.16), tem-se

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = -\mu \frac{\partial (\nabla \times \mathbf{H})}{\partial t} = -\mu \frac{\partial}{\partial t} \left(\sigma \mathbf{E} + \epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right) \quad (2.18)$$

Mas, por meio de uma identidade vetorial, válida apenas em coordenadas retangulares, o lado esquerdo de (2.18) pode ser expresso como

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = \nabla (\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E} \quad (2.19)$$

Igualando (2.19) e (2.18) e observando que no espaço sem carga livre $(\nabla \cdot \mathbf{E}) = 0$, obtemos

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu\epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} + \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (2.20)$$

Com a suposição da variação harmônica do campo com o tempo, (2.20) reduz-se a

$$\nabla^2 \mathbf{E} = (-\omega^2\mu\epsilon + j\omega\mu\sigma)\mathbf{E} = \gamma^2 \mathbf{E} \quad \text{ou} \quad \nabla^2 \mathbf{E} - \gamma^2 \mathbf{E} = 0 \quad (2.21)$$

De acordo com (2.19), podemos escrever também

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) + \gamma^2 \mathbf{E} = 0 \quad (2.22)$$

As equações (2.20) a (2.22) são vetoriais da onda em $\mathbf{E}$. Em (2.20) o tempo está explícito, ao passo que nas outras três ele está implícito, supondo-se uma variação harmônica com o tempo. Estas equações de onda incorporam todas as quatro equações de Maxwell. As duas equações em rotacional são o ponto de partida da equação de onda, e (2.20) a (2.22) satisfazem-nas. As duas equações em divergência também são satisfeitas.

Numa onda plana viajando na direção x , com $\mathbf{E}$ na direção y ($\mathbf{E} = \gamma E_y$), a equação (2.20) reduz-se a

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = \mu\epsilon \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2} + \mu\sigma \frac{\partial E_y}{\partial t} \quad (2.23)$$

Se $\sigma = 0$,

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = \mu\epsilon \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2} \quad (2.24)$$

Que é a mesma obtida para um meio sem perdas. Estas são as equações escalares de onda.

Se $\mathbf{E}$ não variar com o tempo, ($\mathbf{E}$ estático)

$$\nabla^2 \mathbf{E} = 0 \quad (2.25)$$

Se $\mathbf{E}$ for função harmônica do tempo, torna-se

$$(2.26)$$

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = -\omega^2 \mu\epsilon E_y + j\omega\mu\sigma E_y$$

Que é a mesma:

$$(2.27)$$

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} - \gamma^2 E_y = 0$$

Onde:

- D** --é o vetor deslocamento ou densidade de fluxo (C/m^2);
- ρ** --é a densidade volumétrica de carga (C/m^3);
- B** --é o vetor indução magnética ($Wb/m^2 = 10^4$ Gauss no sistema CGS);
- H** --é o vetor campo magnético (A/m);
- J** --é o vetor densidade de corrente (A/m^2);
- E** --é o vetor campo elétrico (V/m);
- ϵ** --é a permissividade do meio (F/m);
- ϵ_0** --é a permissividade no vácuo ($10^{-9}/36\pi Fm^{-1}$);
- σ** --é a matriz condutividade ($1/\Omega m$);
- μ** --é a permeabilidade (Wb/Am).

2.2 PROPAGAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

2.2.1 Velocidade de Propagação

A velocidade de propagação ou velocidade de fase, para um ponto de fase constante de uma onda progressiva em um meio dielétrico ideal é uma constante. Isto implica que t e r devem variar juntos, de modo que:

$$(k \cdot r - \omega t) = cte \quad (2.28)$$

Derivando (2.28) em relação ao tempo, temos

$$k \cdot dr/dt - \omega = 0 \quad (2.29)$$

Agrupando e substituindo pelo valor de $[K = \omega\sqrt{\mu\epsilon}]$, obtém-se a velocidade de fase (considerando o vetor k ao longo do eixo z):

$$V_{fase} = V_f = dr/dt = \omega/kz = 1/(\mu\epsilon)^{1/2} \quad (2.30)$$

Esta velocidade é uma característica do meio sendo dependente das constantes μ e ϵ . No espaço livre (vácuo) a V_f é aproximadamente igual a 300.000 km/s (Kraus, 1986):

$$V_f = 1/(\mu_0\epsilon_0)^{1/2} = c \quad (2.31)$$

Onde c é a velocidade da luz no vácuo. Cada meio dielétrico ideal está caracterizado por ter um valor específico de sua velocidade de fase. Se este valor é relacionado com a velocidade da luz no vácuo, temos uma velocidade de fase relativa ou fator de velocidade (Puliafito, 1987):

$$V_{rel} = vf / c = (\mu_s \epsilon_s)^{1/2} / (\mu \epsilon)^{1/2} = 1 / (\mu_r \epsilon_r)^{1/2} \quad (2.32)$$

Nos meios ferromagnéticos $\mu_r = 1$, então a velocidade de fase relativa é:

$$V_{rel} = 1 / (\epsilon_r)^{1/2} \quad (2.33)$$

2.2.2 Índice de Refração

Na ótica, o índice de refração η é definido como o valor inverso da velocidade de fase relativa p. isto é, Kraus – Carver [7]

$$\eta = \frac{1}{p} = \frac{1}{v/c} = \frac{c}{v} = (\mu_r \epsilon_r)^{1/2} \quad (2.34)$$

Nos meios não ferrosos, μ_r está muito próximo da unidade de modo que

$$\eta = (\epsilon_r)^{1/2} \quad (2.35)$$

2.2.3 Comprimento de onda

É a distância de um ponto de uma onda (A) ao ponto correspondente da onda seguinte (I), conforme ilustra a figura 1,

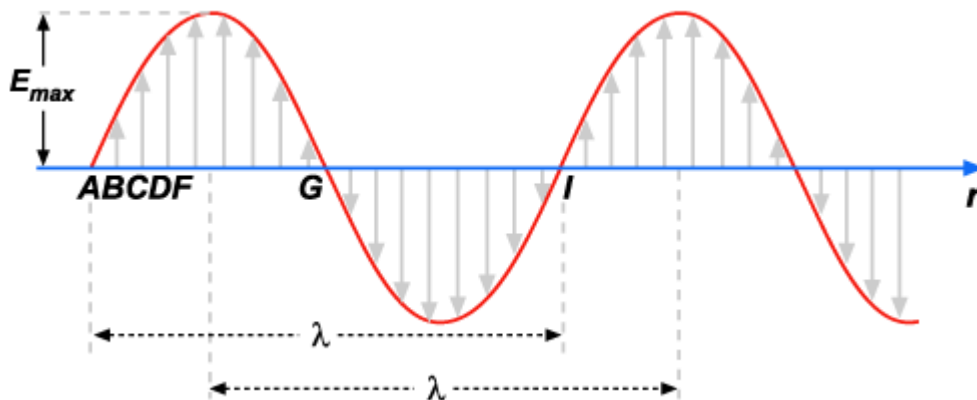


Figura 1- onda eletromagnética

Chama-se **período** da onda eletromagnética ao intervalo de tempo necessário para a onda caminhar um comprimento de onda.

Sabemos que a velocidade de uma onda eletromagnética no vácuo é de $3 \times 10^8 \text{ m/s}$, assim, após um segundo, a primeira onda emitida estará a distância de $3 \times 10^8 \text{ m}$, e atrás dela estarão

enfileiradas “f” outras ondas, sendo “f” a frequência de emissão, ou seja, o número de ondas ou ciclos por segundo, Sanches C.A [5]

Onde

$$\lambda(m) = \frac{v}{f} = \frac{300}{f(MHz)} = vT \quad (2.36)$$

2.2.4 Polarização das ondas

A polarização de uma onda eletromagnética é a direção das linhas de força do seu campo elétrico, Figura 2

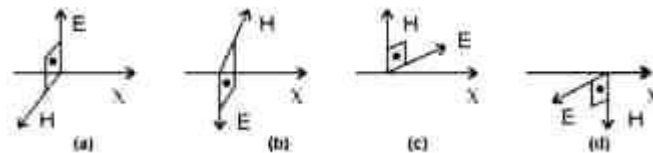


Figura 2(a, b, c, d) - polarizações de ondas

Toda onda eletromagnética tem uma componente de campo elétrico (E) e uma componente de campo magnético (H), que é normalmente perpendicular uma a outra e ambas as componentes são perpendiculares à direção de propagação. A orientação do vetor (E) é usada para definir a polarização da onda, ou seja, se o campo elétrico está orientado perpendicularmente a superfície da terra, a onda está verticalmente polarizada e se ele está paralelo à superfície da terra, a polarização é horizontal. Às vezes o campo (E) gira com o tempo e neste caso é dito que ele está polarizado circularmente. Sanches C.A [5]

2.2.5 Formas de Propagação

Para estudar os efeitos das perdas por propagação de sinais utilizam-se modelos que representam o espaço físico por onde as ondas eletromagnéticas trafegam.

Existem dois tipos de modelos de propagação, os modelos determinísticos e os modelos estatísticos.

Os modelos determinísticos levam em conta o modelo físico exato do meio de propagação. Conseqüentemente, para qualquer situação, a geometria do meio tem de ser levada em consideração. Esse método fornece as estimativas mais confiáveis do

comportamento da propagação, sendo por isso complexo do ponto de vista computacional. Haykin, S.M [2]

Os modelos estatísticos assumem uma forma de abordagem empírica, medindo as características da propagação em uma enorme variedade de meios e desenvolvendo-se então em um modelo baseado nas estatísticas medidas para uma classe específica de meios. Esses modelos são mais fáceis de descrever e usar, mas não apresentam resultados tão exatos quanto os modelos determinísticos. Haykin, S.M [2]

2.2.6 Propagação no Espaço Livre

O método de propagação baseando-nos unicamente no campo elétrico e considerando “o meio linear, no qual todas as distorções podem ser caracterizadas pela atenuação ou superposição de diferentes sinais”. Haykin, S.M [2]

Conforme (REGO, C.G) [4], a densidade de potência transmitida é igual:

$$S_T = \frac{P_T G_T(\theta, \varphi)}{4\pi r^2} \left[\text{W/m}^2 \right] \quad (2.37)$$

E a potência média recebida é determinada conhecendo-se a área equivalente de abertura da antena receptora (A_{ef}):

$$P_R = S_T A_{ef} \text{ [W]} \quad (2.38)$$

$$A_{ef} = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_R(\theta, \varphi) \text{ [m}^2\text{]} \quad (2.39)$$

Desta forma, podemos escrever

$$P_r = P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 G_t(\theta, \varphi) G_r(\theta, \varphi) \text{ [W]} \quad (2.40)$$

Onde:

- P_t – Potência média transmitida;
- P_r – Potência média recebida;
- G_t – Ganho da antena transmissora;
- G_r – Ganho da antena receptora.

- λ – Comprimento de onda;
 r – distância;
 θ e φ – Ângulos de elevação e azimute da antena.

2.2.7 Propagação Terrestre: Modelo Físico

Considerando que as comunicações terrestres ocorrem em meios com toda a sorte de obstáculos, como construções, terrenos elevados ou vegetação densa, pode obstruir a linha de visada direta entre as antenas transmissora e receptora. Nesse caso, para que as comunicações aconteçam é necessário confiar na reflexão das ondas eletromagnéticas em vários meios, ou então contar com a difração das ondas ao redor dos objetos ao longo do percurso. Levando em consideração esses modos de propagação adicionais, uma quantidade enorme de percursos possíveis surge entre transmissor e receptor. Para piorar, o receptor geralmente recebe sinais de intensidades diferentes oriundos de diversos percursos. Esse fenômeno é conhecido como propagação multipercurso ou multicaminho. Com muitas ondas chegando na mesma localização, aumenta a possibilidade de ocorrência de interferência construtiva ou destrutiva e conseqüentemente, as propriedades da propagação tornam-se bem diferentes daquelas obtidas quando era considerada propagação em espaço livre. As perdas ocorridas durante a propagação de uma onda eletromagnética podem ser representadas por reflexão, difração e espalhamento. Haykin, S.M [2]

2.2.8 Reflexão

O princípio da Reflexão se resume em: quando uma onda incide de um meio mais denso para um meio menos denso com um ângulo maior ou igual a um ângulo crítico, a onda sofrerá uma reflexão total interna e também será acompanhada por uma onda superficial no meio menos denso. Kraus – Carver [7].

O emprego das ondas eletromagnéticas na sua detecção pode ser gradualmente prejudicado principalmente pelos ecos indesejáveis tais como grandes massas de terra, retorno do mar, aguaceiros e nevascas; fenômenos estes que influenciam nas frequências mais elevadas.

Outra conseqüência da reflexão é o aparecimento de zonas de desvanecimento, quando uma onda de rádio encontra uma superfície, se as condições forem favoráveis ela será

refletida de forma “especular” (espelho), da mesma maneira que ocorre com uma onda luminosa, que também é uma onda eletromagnética, cumprindo-se as Leis:

- 1 – O raio de incidência e o raio de reflexão estão no mesmo plano;
- 2 – O ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão.

A relação entre a intensidade do campo incidente e a do campo refletido denomina-se coeficiente de reflexão.

O fenômeno de reflexão de ondas pode ser observado em uma cuba de ondas colocando-se uma régua com parte acima da superfície da água e deixando-se cair uma seqüência de gotas para produzir ondas sobre essa superfície. Conforme a figura 3, temos:

Seja O, o ponto onde as gotas atingem a superfície da água, originando as ondas, e O', o ponto simétrico a O em relação à superfície da régua onde as ondas se refletem. As ondas refletidas têm forma como se fossem emitidas de O'.

Seja A um ponto qualquer sobre a superfície da régua e AD, um segmento perpendicular à superfície da régua em A.

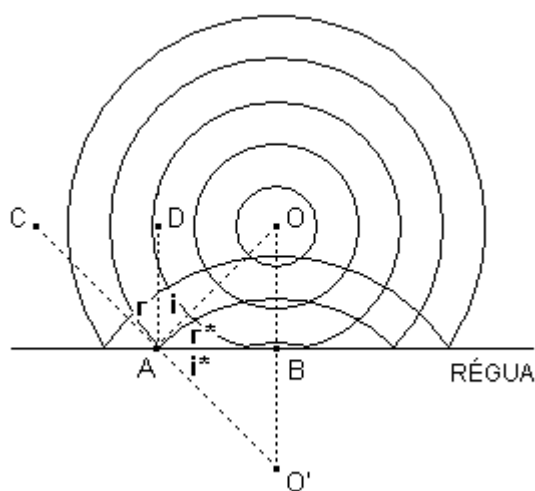


Figura 3: Geometria aplicada no desenvolvimento do processo de reflexão.

A linha OA é o raio incidente no ponto A e a linha AC, o correspondente raio refletido. Seja i o ângulo de incidência, r , o ângulo de reflexão, i^* , o ângulo entre a régua e AO' e r^* , o ângulo entre a régua e AO. Como $i + r^* = 90^\circ$ e como $r^* = i^*$, já que os pontos O e O' são simétricos, tem-se: $i + i^* = 90^\circ$ e como $r + i + r^* + i^* = 180^\circ$, com $i + r^* = 90^\circ$ tem-se também: $r + i^* = 90^\circ$.

Comparando-se as duas expressões vem $i = r$, ou seja, o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão.

A superfície terrestre reflete ondas de todas as frequências. As baixas frequências possuem grande penetração e as ondas são muito menos refletidas. Árvores, edifícios, montanhas e outros objetos podem causar reflexões de ondas de rádio. Para as frequências baixas e médias, essas reflexões podem ser desprezadas.

Nas frequências mais altas, ocorrem reflexões pela chuva e por nuvens densas. Também, a onda de rádio de frequência muito alta (VHF), ou superior, pode ser refletida pelos limites bem definidos (frentes) entre massas de ar frias e quentes, quando o ar quente e úmido flui sobre o ar frio mais seco.

Se a superfície entre as massas de ar é paralela à superfície da Terra, as ondas de rádio podem percorrer distâncias muito maiores que as normais.

2.2.9 Difração

A difração é um fenômeno de espalhamento das ondas eletromagnéticas que ocorre toda vez que essas ondas são forçadas a viajar através de pequenas fendas ou pequenos orifícios ou contornam um objeto cuja dimensão é da mesma ordem de grandeza que o seu comprimento de onda. Haykin, S.M [2]

Por trás do obstáculo se formará uma zona de interferência, as ondas se sobrepõem podendo tanto se reforçar ou se anularem, enquanto que a parte desobstruída anterior da onda prossegue em sua direção original. Quando a onda incide nos limites do objeto, curva-se para trás do mesmo, de maneira que uma pequena quantidade de energia é propagada para dentro da zona de sombreamento.

Portanto, difração é a mudança de direção da onda quando a mesma passa junto a um obstáculo. Seu efeito prático é uma diminuição na potência do sinal na área de sombra, e um padrão perturbado numa curta distância fora dessa área sombreada. A difração tem valor máximo quando o comprimento do obstáculo é igual ao comprimento da onda. A quantidade de difração é inversamente proporcional à frequência, sendo maior nas frequências muito baixas.

A difração também é outra forma de encurvamento do feixe, que ocorre quando a onda passa pela borda de um objeto opaco a qual causa uma deflexão da onda na direção do objeto. Assim, por exemplo, ondas de rádio viajando sobre a superfície da Terra sofrem uma difração sobre a sua curvatura, o que, somado à refração faz com que elas se propaguem além do horizonte geográfico.

O mecanismo de difração é explicado freqüentemente pelo princípio de **Huygens**, “Todos os pontos em uma frente de onda podem ser considerados como fontes pontuais para produção de ondas eletromagnéticas elementares. Contudo, cada fonte pontual não irradia igualmente em todas as direções, mas favorece a direção da frente de onda”.

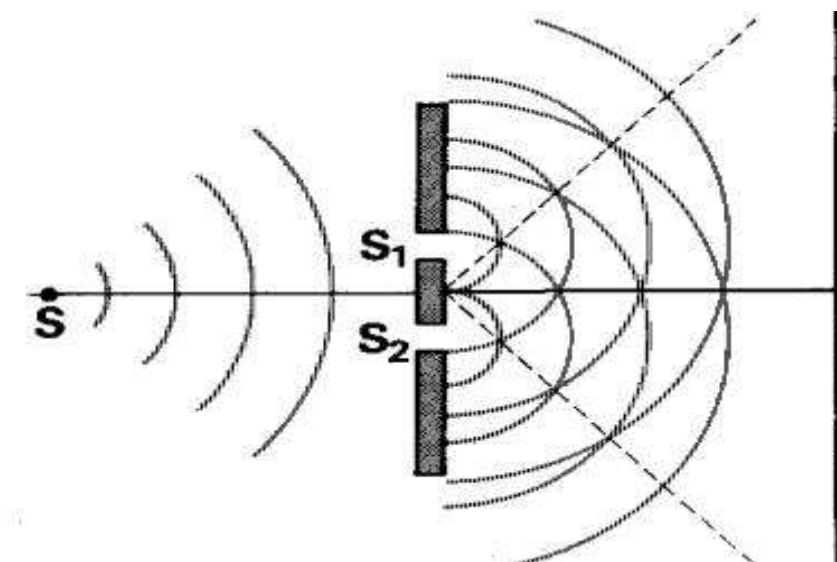


Figura 4 – aplicação do princípio de Huygens

2.2.10 Difração por Gume de Faca

Trata-se do método mais simples para o cálculo do efeito da perda por difração causada por um obstáculo no percurso da onda eletromagnética. O obstáculo é modelado por um semi-plano posicionado transversalmente ao percurso do enlace.

A figura 5 a seguir ilustra a geometria utilizada para a determinação do campo difratado por um obstáculo gume de faca, obstáculo esse de espessura infinitesimal e dimensão infinita na direção transversal à propagação.

É importante observar que não é considerado o efeito da superfície da Terra na determinação desta difração.

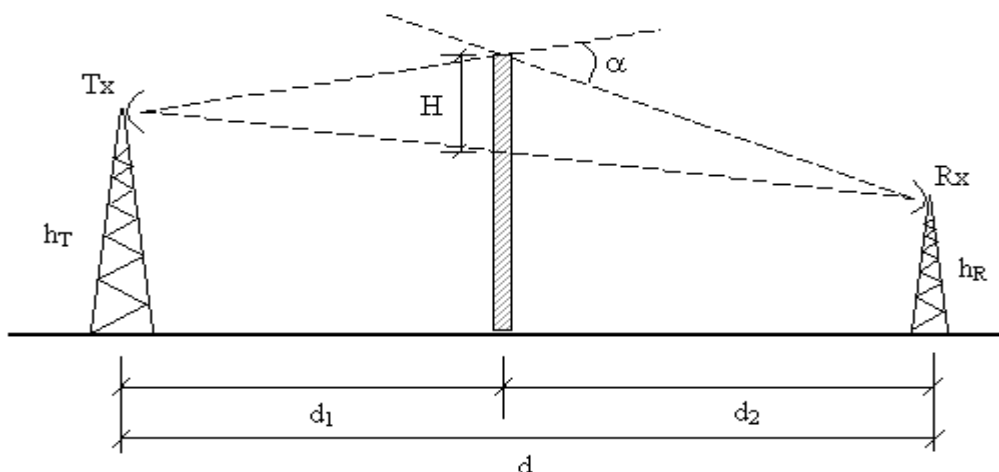


Figura 5: Geometria utilizada na determinação do campo difratado.

2.2.11 Zonas de Fresnel

A teoria de Augustin Jean Fresnel e Gustav Robert Kirchhoff foi desenvolvida inicialmente para explicar a difração da luz em presença de anteparos ou sua propagação através de orifícios de diversos tamanhos. Fresnel estabeleceu que a quantidade de energia transmitida no espaço livre está contida no volume de um elipsóide, cujo tamanho depende do comprimento de onda e da distância entre as antenas receptora e transmissora. Sanches C.A [5]

Pelos cálculos, observa-se que as zonas de Fresnel fornecerão, alternadamente, contribuições correspondentes a interferências construtivas e destrutivas para o campo total. Conforme a figura 6 é possível demonstrar que a área de cada zona é aproximadamente igual, de forma que as contribuições de campo no ponto (O), vindas de cada duas zonas adjacentes, tenderiam a se anular.

Porém, como as distâncias entre os pontos pertencentes a cada zona e o ponto de recepção (O) aumentam progressivamente com o aumento de n , as contribuições das zonas de maior ordem (n maior) tendem a ser menores. Ocorre que a medida que se adiciona as contribuições das várias zonas de Fresnel, o campo resultante, inicialmente com oscilações de maior amplitude, tende a oscilar menos até chegar a um valor final.

Ainda é interessante observar que, se fosse possível obstruir apenas as zonas de ordem par, ou seja, aquelas que geram contribuições correspondentes a interferências destrutivas para o campo da primeira zona de Fresnel ($n = 1$), o campo recebido seria maior que o de espaço livre, onde não há obstrução.

Se agora considerarmos outras posições da frente de onda ao longo da propagação entre as antenas, conclui-se que, se forem unidos os limites de cada zona de Fresnel ao longo de toda a propagação, as figuras formadas serão elipsóides (com as antenas transmissoras e receptoras nos focos), denominados Elipsóides de Fresnel.

A Figura 6 ilustra um elipsóide de Fresnel com n valores: primeiro elipsóide de Fresnel, segundo elipsóide de Fresnel, e assim por diante. Pela forma como são definidos, conclui-se que qualquer ponto situado na superfície de um elipsóide dista do ponto, usando a seguinte equação:

$$R_n = \sqrt{\frac{n\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \quad (2.41)$$

A expressão, acima, fornece o raio de um elipsóide de ordem n a uma distância d_1 da fonte, como ilustrado na Figura 6 a seguir.

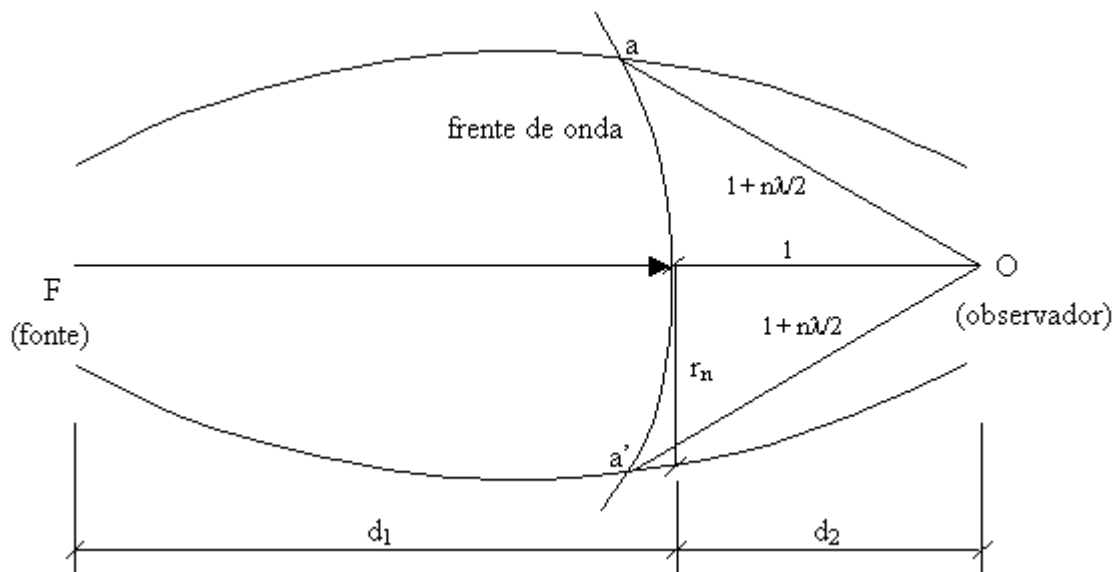


Figura 6: Aplicação da geometria do Elipsóide de Fresnel.

2.2.12 Propagação Terrestre: Modelo Estatístico

2.2.12.1 Desvanecimentos

Desvanecimento é a variação temporal da potência do sinal recebido causada pelas mudanças no meio de transmissão ou no(s) caminho(s), em geral, degradando o sinal que

chega no receptor. Pode ocorrer em um ambiente fixo afetado por mudanças nas condições atmosféricas (ex.: chuva) como também em um ambiente móvel afetado pelas mudanças na localização relativa de vários obstáculos. Exemplos de distribuições com aplicações de desvanecimentos: Rayleigh e Rice [Uso do programa MATLAB]

- **RAYLEIGH** - em cenários de transmissões sem fios, em que o receptor está em movimento relativamente a um transmissor sem uma linha de visada entre as suas antenas, o desvanecimento de Rayleigh é normalmente uma boa aproximação das condições realistas do canal.

Para reproduzir um processo com desvanecimento de Rayleigh é necessário que as amostras estejam correlacionadas.

Desta forma, para simular digitalmente o sinal com desvanecimento de Rayleigh é necessária uma geração eficiente de variáveis aleatórias correlacionadas de Rayleigh.

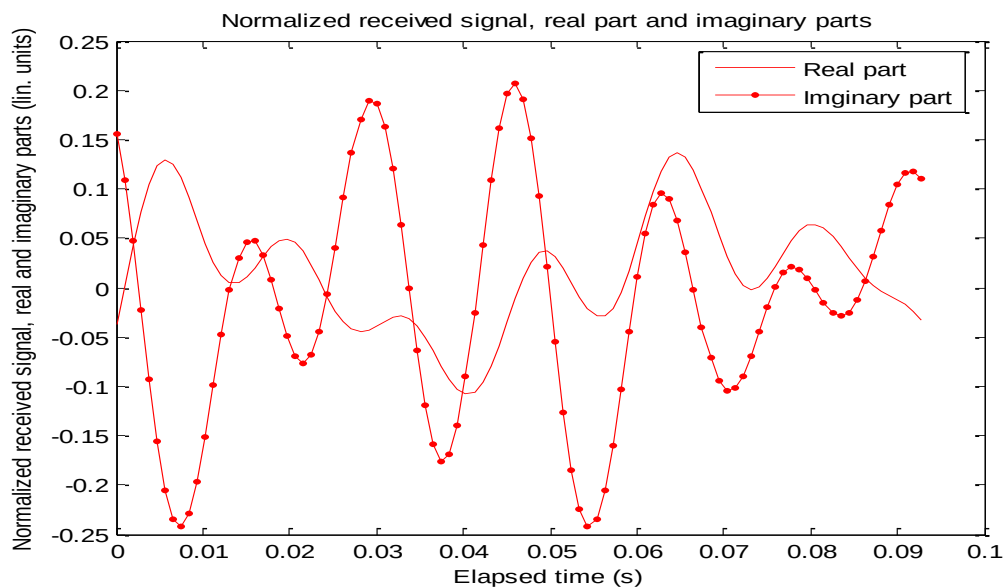


Figura 7: Normalizada apresentando sinais reais e imaginários numa distribuição Rayleigh - Matlab

- **RICEANO** – os percursos refletidos tendem a ser mais fracos do que os percursos diretos e pode modelar a envoltória complexa por onde o termo constante representa o percurso direto e a soma representa toda a coleção de percursos por reflexão.

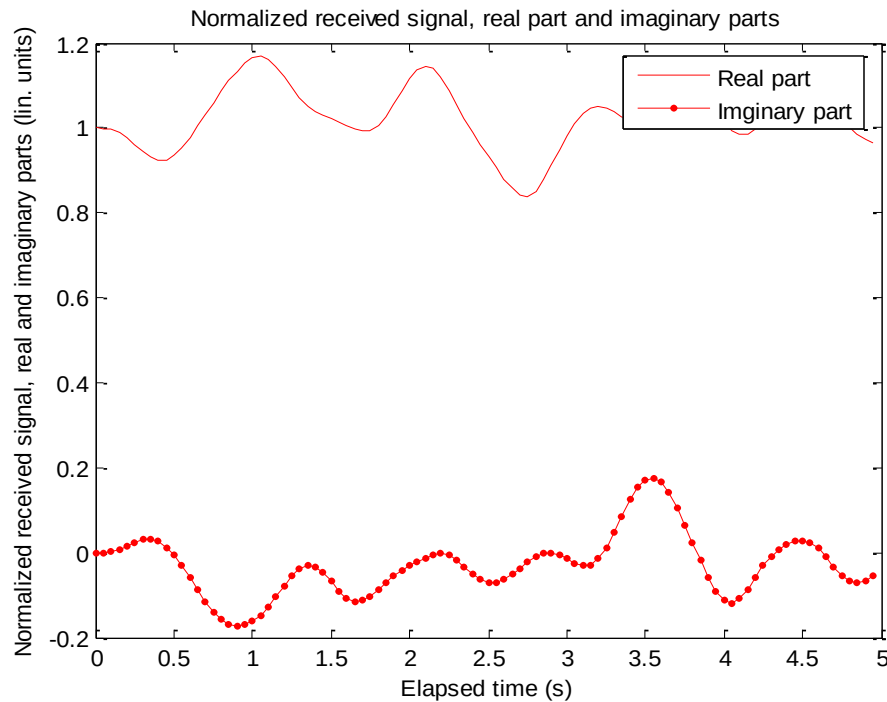


Figura 8: Normalizada apresentando sinais reais e imaginários numa distribuição Rice - Matlab

2.2.13 Propagação em Ambientes Indoor

No que diz respeito à propagação no interior de construções, pode-se destacar duas situações distintas: [Wireless BR – 2010]

- Rádio base no exterior da construção e móvel no interior;
- Rádio base e móvel no interior da construção.

2.2.13.1 Rádio base no exterior e móvel no interior

O conhecimento das perdas entre um transmissor localizado em ambiente *outdoor* e um receptor *indoor* vem tornando-se cada vez mais importante. Essa importância fica clara quando se analisa as interferências entre sistemas outdoor e indoor que operam nas mesmas faixas de frequências. Nesses casos, espera-se que as perdas de penetração promovam o máximo isolamento de RF possível. O mesmo isolamento é desejado entre sistemas *indoor* operando em edifícios vizinhos, por exemplo. Enfim, é importante que se modele as características de propagação desses sistemas de forma a também considerar a energia que entra e sai de edificações.

Para a predição de propagação em situações desse tipo, modelos de propagação empíricos urbanos não são mais válidos, já esses modelos foram obtidos em grande parte

baseados em dados de medições realizadas em ambientes *outdoors*. Agora, haverá perdas associadas à penetração do sinal no interior do prédio. Essa perda adicional depende de uma série de fatores, entre eles a frequência de transmissão, a distância entre transmissor e receptor, o material de construção do prédio e a natureza dos prédios vizinhos. Dois pesquisadores, Rice e Durant, propuseram duas definições distintas para a perda de penetração em prédios.

Segundo Rice, a perda de propagação é definida como sendo a diferença entre o nível de sinal na rua, em torno do prédio e o nível de sinal no interior do prédio.

A disponibilidade de modelos de predição de propagação ao nível das ruas faz com que a metodologia de Rice seja mais prática, pois se podem extrapolar os métodos de fora para dentro de prédios. Porém, o método de Rice, embora mais prático, é menos realista.

2.2.13.2 Rádio base e móvel no interior

Essa situação é a que se denomina usualmente de propagação *indoor*. A propagação em ambientes *indoor* é governada basicamente pelos seguintes fatores:

- Reflexão em objetos, pisos, tetos e paredes, e difração especialmente nas junções esquinas entre corredores;
- Transmissão por paredes, pisos e outros obstáculos;
- Canalização da energia, especialmente em corredores e para frequências mais altas (devido a múltiplas reflexões);
- Dinâmica do ambiente (movimentação de pessoas e abrir e fechar de portas e janelas) e disposição de objetos.

A atenuação no interior de edifícios pode ser classificada em dois grandes grupos:

- Atenuação de partição, que se subdivide em:
 - *hard*, que é a atenuação devida a componentes da estrutura do edifício (paredes e pisos)
 - e *soft*, que é a atenuação devida às divisórias das salas.
- Atenuação devida aos objetos do ambiente.

Em geral, a atenuação entre andares é considerada através do Fator de Atenuação de Andares (FAF - *Floor Attenuation Factor*).

2.3 RECEPÇÃO E TRANSMISSÃO SEM FIO

2.3.1 Sensibilidade de Recepção

Conforme (Haykin S) [2] o padrão IEEE 802.11a recomenda que o receptor tenha uma figura de ruído mínima de 10 dB. Com base nesse valor, podemos determinar o valor nominal do ruído do receptor;

$$N_0 = FKT_0 \quad (2.42)$$

Ou, se expresso em decibéis,

$$\begin{aligned} N_0 &= 10 \log_{10} F + K(\text{dBm} - \text{sK}^{-1}) + T(\text{dBK}) \\ &= 10 + (-198,6) + 24,6 \\ &= -164 \text{ dBm/Hz} \end{aligned} \quad (2.43)$$

O serviço de 6 Mbps desse padrão usa modulação por deslocamento de fase binária (BPSK). Teoricamente, a modulação BPSK requer uma razão E_b/N_0 igual a 11 dB para funcionar com taxa de erro de bit da ordem de 10^{-6} . Porém, na prática, com uma solução de baixo custo, são esperadas perdas de implementação, consideradas não maiores que 3 dB. Conseqüentemente, na prática, a razão E_b/N_0 requerida é 14 dB.

2.3.2 Faixa de Cobertura

Conforme (Haykin S) [2] os rádios transmissores utilizados nas WLANs de 5GHz devem transmitir 200mW (23 dBm) ou menos para estabelecer o enlace com o serviço de 6 Mbps, o nível de potência deve ser pelo menos -82 dBm onde se obtém um alcance de 116 metros.

Usa-se a seguinte fórmula para se obter essa faixa de cobertura

$$P_R = P_T - 41(\text{dB}) - 31 \log_{10} r \quad (2.44)$$

O equipamento receptor, geralmente um analisador de espectros entre 100 KHz e 6 GHz deverá ser ligado ao transmissor através de cabo coaxial apresentando uma medida de

potencia com valores que estejam abaixo do valor do transmissor devido a perda atribuída ao rendimento do cabo coaxial.

2.3.3 Efeito Doppler

Sempre que há deslocamento relativo entre transmissor e receptor, ocorre um deslocamento em frequência no sinal recebido, denominado efeito Doppler. O nome efeito Doppler é uma referência ao físico austríaco Christian Johann Doppler, que o estudou e descreveu. Variação de frequência e esse fenômeno serão compreendidos da maneira descrita a seguir, com o auxílio da Figura 6.

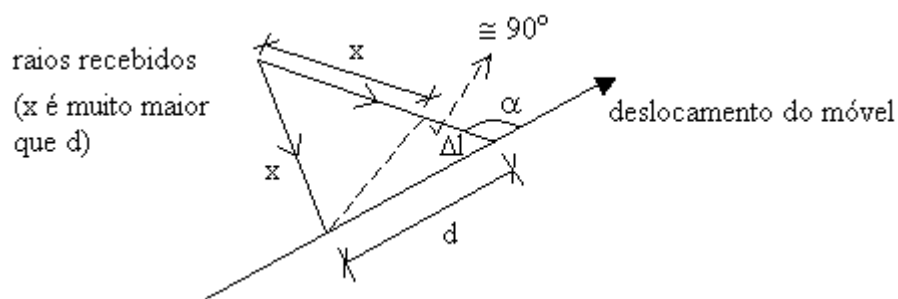


Figura 9: Geometria para o cálculo do Efeito Doppler.

Se um receptor estiver se aproximando da fonte transmissora a frequência recebida é maior. Invertendo os papéis, ou seja, o receptor se afastando do transmissor a frequência recebida é menor. O resultado dessa variação na frequência é conhecido como efeito Doppler.

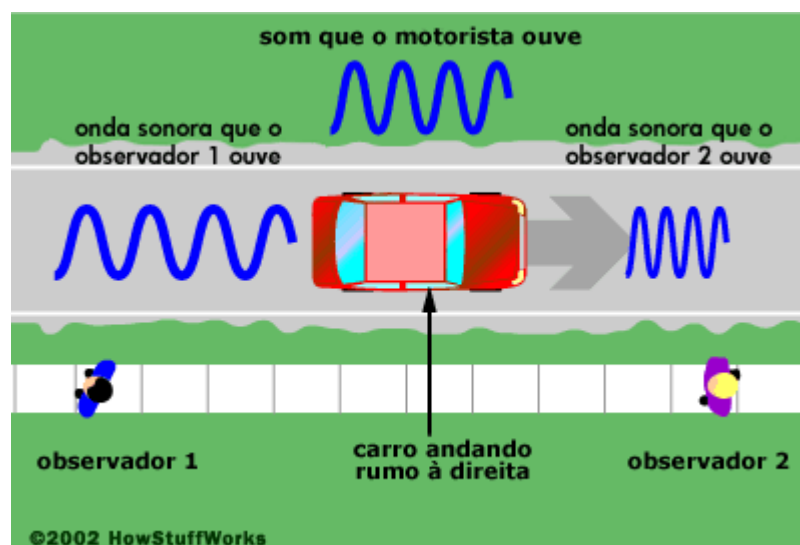


Figura 10: Casos com aplicação do efeito Doppler.

2.3.4 Ruído

Conforme (TANENBAUM, A. S) [6], Ruídos são alterações sofridas pelo sinal transmitido entre a transmissão e a recepção, são sinais elétricos indesejados que interferem com os sinais transmitidos. Esses sinais indesejados são gerados por vários tipos de fontes diferentes, tanto naturais quanto artificiais.

Fontes artificiais normalmente são aquelas criadas pelo homem, como descargas elétricas, circuitos de ignição de automóveis, o faiscamento no comutador de um motor elétrico um zumbido de 60 Hz e sinais gerados em outros sistemas de comunicação. Fontes de ruídos artificiais resultam em harmônicos da frequência natural de algum sistema.

Fontes de interferência naturais são geradas espontaneamente na natureza, exemplo: radiação extraterrestre, distúrbios atmosféricos, circuitos elétricos e eletrônicos.

Existem outros tipos de ruídos: Térmico, Intermodulação, Diafonia e impulsivo.

2.3.5 Antenas

Segundo (Balanis C. A) [8] - Antenas são dispositivos, usualmente metálicos, para radiação e recepção de ondas de rádio (Webster's). Antenas são dispositivos tradutores que transformam ondas se propagando em linhas de transmissão em ondas no espaço e vice-versa, para os casos de radiação e recepção (Mcgraw-Hill).

2.3.6 Tipos de antenas

- Antenas de fio – Dipolo, espiral e helicoidal
- Antenas de abertura – Corneta piramidal, cônica e guia retangular
- Arranjos de antenas – Yagi-Uda, aberturas e guias de ondas
- Antenas de refletor - Parabólico frontal, parabólico cassegrain e de canto
- Antenas de lente – Índice de refração > 1 , índice de refração < 1
- Antenas de microfita – Patches e quase-Yagi



Fig. 11: Antena Log-periódica



Fig. 12: Antena dipolo



Fig. 13: Monopólos de Patch elíptico



Fig. 14: “quase-Yagi” de microfita



Fig. 15: Antena helicoidal

2.3.7 Diagrama de Radiação

O diagrama de radiação é a representação gráfica desta característica em um determinado plano, com esse diagrama podemos visualizar vários parâmetros da antena, como: relação frente/costa, ângulo de meia potencia, abertura do feixe horizontal e vertical. (Sanches C. A) [5]

É usual nas antenas de alto ganho, onde a pequena abertura do lóbulo principal compromete a interpretação do diagrama de radiação polar.

Quanto mais concentrada a irradiação da antena maior será a intensidade de campo produzida nesta direção para a mesma potência irradiada.

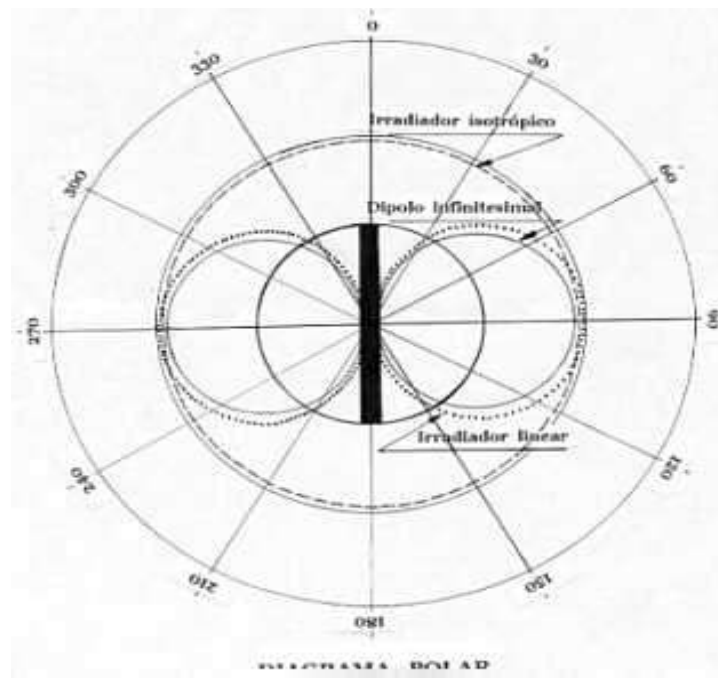


Figura 16: Exemplo de irradiação de antena.

Quanto à classificação do diagrama de radiação (formas) são: Isotrópico (ex. dipolos infinitesimais), Omnidirecional (ex. dipolos curtos) e Direcional (ex. corneta piramidal).

2.3.8 Radiação Isotrópica

Conforme (Haykin S) [2], uma antena isotrópica irradia igualmente em todas as direções. É uma referencia comparativa para as outras, sendo útil na explicação de fundamentos. A potência por unidade de área ou densidade de potência radiada na superfície de uma esfera de raio R centrada na fonte é dada por:

$$\Phi_R = \frac{P_T}{4\pi r^2} \quad (2.45)$$

A potência recebida por uma antena de área efetiva ou seção reta de absorção A_e é dada por

$$P_R = \Phi_R \cdot A_e = \frac{P_T}{4\pi r^2} A_e \quad (2.46)$$

A área física da antena e a sua área efetiva estão relacionadas através da eficiência da antena

$$\eta = \frac{A_e}{A}; \quad (2.47)$$

A área efetiva de uma antena isotrópica em qualquer direção é dada por

$$A_{iso} = \frac{\lambda^2}{4\pi} \quad (2.48)$$

Substituindo a equação (2.48) na (2.46), obtemos a seguinte relação entre a potência transmitida e recebida por antenas isotrópicas

$$P_R = \frac{P_T}{(4\pi r/\lambda)^2} = \frac{P_T}{L_P} \quad (2.49)$$

Nessa equação, a perda do percurso ou do caminho entre duas antenas isotrópicas é definida como

$$L_P = \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2 \quad (2.50)$$

2.3.9 Diretividade

O IEC (International Electrotechnical Commission) definiu que diretividade é a relação entre o campo irradiado pela antena na direção de máxima radiação e o campo que seria gerado por uma antena isotrópica que recebesse a mesma potência. A diretividade de uma antena define sua capacidade de concentrar a energia radiada numa determinada direção. (Balanis C. A) [8]

2.3.10 Ganho e Eficiência

(Balanis C. A) [8] define que o ganho de uma antena pode ser entendido como o resultado da diretividade menos as perdas. Matematicamente, é o resultado do produto da eficiência pela diretividade. Para uma antena parabólica, observando na direção do eixo principal, determinamos que a área seja simplesmente;

$$G = \frac{A_s}{A_{iso}} = \frac{\frac{\eta \pi D^2}{4}}{\frac{\lambda^2}{4\pi}} = \eta \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \quad (2.51)$$

Onde D é o diâmetro do prato.

A eficiência de uma antena, diz respeito ao seu projeto eletromagnético como um todo, ou seja, são todas perdas envolvidas (descasamento de impedância, perdas em dielétricos, lóbulos secundários...). Normalmente está na faixa de 90% a 95%. Para antenas parabólicas, a eficiência varia tipicamente de 45 a 75%; para antenas com captador direcional, a eficiência cobre a faixa de 50 a 80%.

Em geral a eficiência global é definida por

$$e_0 = e_r e_c e_d \quad (2.52)$$

Onde

e_0 = eficiência global

e_r = eficiência da reflexão = $1 - |\Gamma|^2$

e_c = eficiência condutora

e_d = eficiência dielétrica

2.3.11 Equação de Friis

Conforme (Haykin S) [2], a equação de Friis é o modelo utilizado para prever o sinal recebido quando não há nenhum obstáculo entre o emissor e o receptor. É o caso quando a Linha de Visada é Direta entre emissor e receptor, onde

$$P_R = \frac{P_T G_T G_R}{L_P} \quad (2.53)$$

A equação (2.53) é conhecida normalmente como a equação de Friis. Podemos simplificá-la, escrevendo em termos de ganho em decibel

$$P_R(dB) = P_T(dB) + G_T(dB) + G_R(dB) - L_P(dB) \quad (2.54)$$

2.3.12 Linha de Visada Direta

(TANENBAUM, A. S) [6] define sobre linha de visada direta como sendo a visualização entre antenas (receptora e transmissora) alinhadas, apontadas uma diretamente para a outra.

Observam-se os seguintes detalhes:

- Comunicação via satélite – sinais de 30 MHz não são refletidos na ionosfera.
- Comunicação no solo – antenas com linha de visada efetiva devido à refração.

2.3.13 Antenas Inteligentes

As aplicações de antenas direcionais e setorizadas multiplicam o uso de canais de rádio, no entanto não elimina os problemas de interferência de co-canal. O objetivo de um sistema baseado em antenas inteligentes é aumentar o número de usuários que podem ser servidos por uma única célula, a um dado instante.

São projetadas para lidar com níveis de tráfego e mudar o ganho de visando expandir ou contrair em áreas localizadas, sem a necessidade de subir em uma torre ou montar outra antena. Os provedores de sistemas wireless podem modelar a cobertura de uma célula para ajustar a distribuição particular de tráfego daquela região ou de acordo com a hora do dia ou o dia da semana, ou mesmo acomodar um aumento temporário de tráfego devido, por exemplo, a um evento esportivo a ser realizado em uma determinada região.

De uma forma geral, um sistema baseado em antenas inteligentes objetiva aumentar o ganho de acordo com a localização do usuário (formando um lobo em direção ao usuário individual) e rejeitar interferência ou ruído de fora daquele lobo principal.

A mais avançada tecnologia atualmente existente na área de antenas inteligentes é chamada “conjunto de antenas adaptativas”. Tais sistemas utilizam uma variedade de algoritmos de processamento adaptativo para localizar e acompanhar os sinais como, por exemplo, o algoritmo LMS, redes neurais artificiais, algoritmos genéticos, entre outros, visando minimizar dinamicamente a interferência e maximizar a recepção dos sinais efetivamente desejados.

A tecnologia de antenas adaptativas permite atingir níveis superiores de supressão de interferência, tornando possível o reuso mais eficiente de frequências, comparativamente aos padrões de reuso hexagonais utilizados em sistemas celulares convencionais. Em essência, a

alocação de frequências em um sistema que conta com antenas adaptativas é continuamente adaptada de acordo com a localização da maior parte dos usuários. Ainda, os sistemas baseados em conjuntos de antenas adaptativas permitem que diferentes setores sejam criados para diferentes usuários, conduzindo a uma alocação de frequências e canais em tempo real. (TANENBAUM, A. S) [6].

2.4 TECNOLOGIA 802-11

O Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), define as normas ou especificações comuns para programar tecnologia de rede. Por exemplo, a especificação IEEE 802 define os padrões para tecnologias de rede que funcionam na camada física e camada de ligação de dados. O padrão 802.11 estabelece normas para a criação e para uso de redes sem fio. A transmissão dessa rede é feita por sinais de radiofrequência, que se propagam pelo ar e podem cobrir ambientes em centenas de metros. Como existem inúmeros serviços que podem utilizar sinais de rádio, é necessário que cada um opere de acordo com as exigências estabelecidas pelo governo de cada país. Essa é uma maneira de se evitar problemas, especialmente interferências existentes.

2.5 PADRÕES DE EQUIPAMENTOS 802-11

O IEEE desenvolveu uma série de padrões para redes de transmissão de dados sem fio. O padrão IEEE 802.11 foi o primeiro a ser desenvolvido e permite taxas de transmissão brutas de 1 até 2Mbps nas bandas ISM. O padrão evoluiu da seguinte forma

802.11a

Chega a alcançar velocidades de 54 Mbps dentro dos padrões da IEEE e de 72 a 108 Mbps por fabricantes não padronizados. Esta rede opera na frequência de 5 GHz e inicialmente suporta 64 utilizadores por Ponto de Acesso (PA). As suas principais vantagens são a velocidade, a gratuidade da frequência que é usada e a ausência de interferências. A maior desvantagem é a incompatibilidade com os padrões no que diz respeito a Access Points 802.11 b e g, quanto a clientes, o padrão 802.11a é compatível tanto com 802.11b e 802.11g na maioria dos casos, já se tornando padrão na fabricação dos equipamentos.

802.11b

Alcança uma velocidade de 11 Mbps padronizada pelo IEEE e uma velocidade de 22 Mbps, oferecida por alguns fabricantes não padronizados. Opera na frequência de 2.4 GHz. Inicialmente suporta 32 utilizadores por ponto de acesso. Um ponto negativo neste padrão é a alta interferência tanto na transmissão como na recepção de sinais, porque funcionam a 2,4 GHz equivalentes aos telefones móveis, fornos microondas e dispositivo Bluetooth. O aspecto positivo é o baixo preço dos seus dispositivos, a largura de banda gratuita bem como a disponibilidade gratuita em todo mundo. O 802.11b é amplamente utilizado por provedores de internet sem fio.

802.11d

Habilita o hardware de 802.11 operar em vários países aonde ele não pode operar hoje por problemas de compatibilidade, por exemplo, o IEEE 802.11a não opera na Europa...

802.11e

O 802.11e agrega qualidade de serviço (QoS) às redes IEEE 802.11. Neste mesmo ano foram lançados comercialmente os primeiros pontos de acesso trazendo pré-implementações da especificação IEEE 802.11e. Em suma, 802.11 permite a transmissão de diferentes classes de tráfego, além de trazer o recurso de Transmission Opportunity (TXOP), que permite a transmissão em rajadas, otimizando a utilização da rede.

802.11f

Recomenda prática de equipamentos de WLAN para os fabricantes de tal forma que os Access Points (APs) possam interoperar. Define o protocolo IAPP (Inter-Access-Point Protocol).

802.11g

Baseia-se na compatibilidade com os dispositivos 802.11b e oferece uma velocidade de 54 Mbps. Funciona dentro da frequência de 2,4 GHz. Têm os mesmos inconvenientes do padrão 802.11b incompatibilidades com dispositivos de diferentes fabricantes. As vantagens também são as velocidades. Usa autenticação WEP estática já aceitando outros tipos de autenticação como WPA (Wireless Protect Access) com criptografia dinâmica (método de criptografia TKIP e AES). Torna-se por vezes difícil de configurar, como Home Gateway devido à sua

freqüência de rádio e outros sinais que podem interferir na transmissão da rede sem fio.

802.11h

Versão do protocolo 802.11a (Wi-Fi) que vai ao encontro com algumas regulamentações para a utilização de banda de 5 GHz na Europa. O padrão 11h conta com dois mecanismos que otimizam a transmissão via rádio: a tecnologia TPC permite que o rádio ajuste a potência do sinal de acordo com a distância do receptor; e a tecnologia DFS, que permite a escolha automática de canal, minimizando a interferência em outros sistemas operando na mesma banda.

802.11i

Criado para aperfeiçoar as funções de segurança do protocolo 802.11 seus estudos visam avaliar, principalmente, os seguintes protocolos de segurança.

802.11n

Taxas de transmissões na faixa de 300 Mbps e, teoricamente, pode atingir taxas de até 600 Mbps, faixas de 2,4 GHz e 5 GHz, o que o torna compatível com os padrões anteriores, uso do *Multiple-Input Multiple-Output* (MIMO), capaz de aumentar consideravelmente as taxas de transferência de dados através da combinação de várias vias de transmissão.

2.6 MODELOS DE NORMAS DE PROPAGAÇÃO PARA CÁLCULOS INDOOR

2.6.1 Modelo ITU-R P.1238-1

Conforme (Sanches C. A) [5] o modelo mais utilizado para predição de perdas em ambientes fechados. Levam em consideração os seguintes aspectos:

- Reflexão e difração a partir de objetos vizinhos;
- Atenuação através de paredes, pisos, e outros obstáculos;
- Canalização de energia em corredores;
- Movimento de pessoas no ambiente.

Esses aspectos implicam em: Perda no caminho (Path Loss); Variação temporal e espacial da perda do caminho; Efeitos de multipercursos e Descasamento de polarização. Sua modelagem matemática engloba todos esses fatores.

Os coeficientes de perda de potencia devido a distancia que são indicados a seguir têm em conta implicitamente a transmissão através de paredes, assim como através de obstáculos, além de outros fatores de perdas que podem se manifestar em um só andar de um edifício.

A formulação do modelo é dada por

$$L_{total} = 20 \log_{10}(f) + N \log_{10}(d) + L_f(n) - 28 \quad (2.55)$$

Onde:

- f é a frequência em MHz;
- N é o coeficiente de perda por distância;
- d é a distância em metros entre os nós (Tx – Rx);
- L_f é o fator de penetração no solo;
- n é o número de pisos penetrados ($n > 0$);

A ITU apresenta que este modelo não fornece a perda exata, e sim apenas uma média da perda. Os valores exatos flutuam em torno desta média. Um dos causadores dessa flutuação em torno do valor esperado são os desvanecimentos (Shadow Fading), outro problema previsto por este modelo é o atraso por multipercurso.

2.6.2 Modelo One Slope

Conforme (Sanches C. A) [5] o modelo One Slope assume uma dependência linear entre a perda de trajeto (dB) e a distância logarítmica, sendo expresso como

$$L = L(d_0) + 10n \log(d) \quad (2.56)$$

Onde:

- L = perda por propagação em função da distância dB;
- d = distância entre a base e terminal em metros;
- $L(d_0)$ = perda de propagação de referência a um metro de distância em dB (com a frequência de 2,4 GHz das redes wi-fi, o valor da perda será de 40,2 dB);
- n = gradiente potência-distância

Esse modelo é muito mais fácil de usar, porque o parâmetro básico de entrada só é a distancia entre o transmissor e receptor. Porém, há a grande dependência do ambiente (gradiente n) que deve ser levada em conta. Analisando esse modelo, para cada um dos 81 pontos medidos, deverão ser feitos os cálculos referentes a esse modelo de predição.

Tabelas disponíveis para cálculos estatísticos conforme modelos empíricos

AMBIENTES	N
Espaço livre	2
Área urbana	2,7 a 3,5
Indoor corredores	1,6 a 1,8
Indoor pouco obstruído	2,2 a 2,7
Indoor obstrução média	2,8 a 3,5
Ambiente aberto semilivre	3 a 4
Indoor com muita obstrução	4 a 6

Tab. 2.1 – Gradiente n distancia
Valores de (n) ambientes

Frequência - MHz	dB
900	31,50
1900	38
2400	40,20
4000	44,50
5300	46,90
7000	49,34

Tab. 2.2 – Modelo One Slop
Valores de $L(d_0)$

Alguns valores de FAF	(Floor Attenuation Factor)
Frequência - MHz	dB
900	10
1900	18
2400	21
5300	26

Tab. 2.3- Modelo Multi-Wall
Alguns valores de FAF

Frequência	Ed. Residencial - --- (N)	Ed. comercial
900 MHz	-	9 (1pisos) 19(2pisos) 24(3pisos)
1,8 – 2 GHz	$4n$ ----- (28)	$15+4(n-1)$
5,2 GHz	-	16(1pisos)

Tab. 2.4 – Modelo ITU –R
Valores de L_f e coeficientes de N

3 APLICAÇÃO INDOOR WLAN

Devido à complexidade de expor os cálculos baseados em modelos determinísticos, serão apresentados neste tópico os cálculos utilizando modelos empíricos e semi-empíricos, que normalmente são suficientes para um projeto de cobertura INDOOR. Tomando como referência um ambiente como complexo de tecnologia da UFRN, “Projeto CAV” pavimento superior (salas e laboratórios) de telecomunicações, aqui representados conforme figura 17, temos:

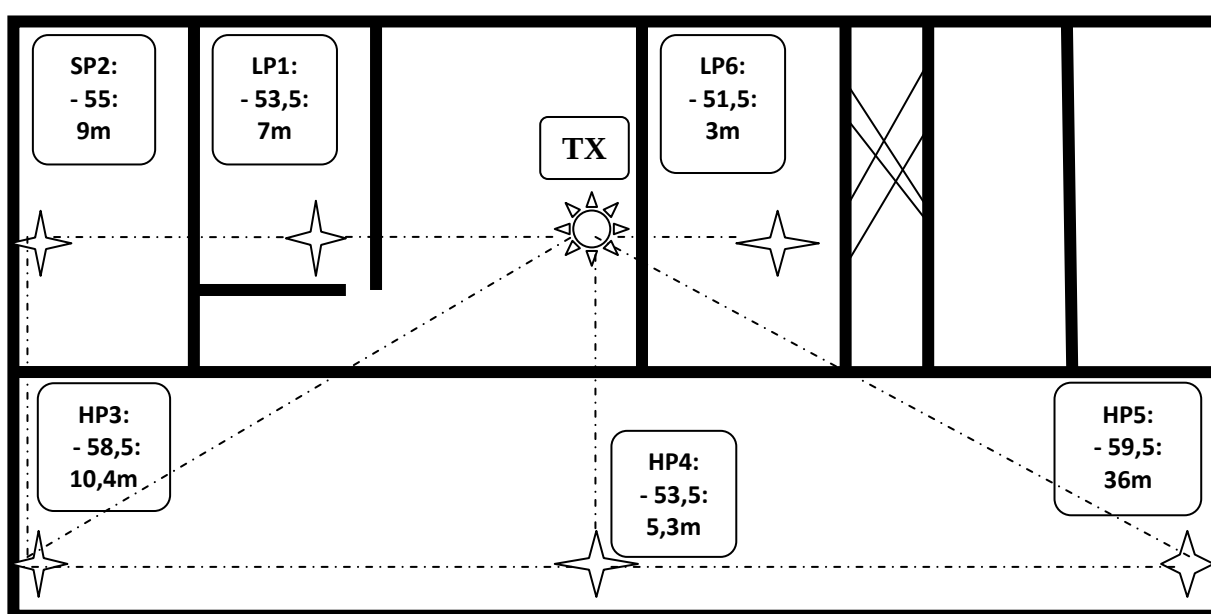


Figura 17: Topologia do Projeto CAV.

O “Projeto CAV” representa um ambiente com modelo de propagação determinístico, medição realizada no interior do pavimento superior (salas e laboratórios) de telecomunicações, parâmetros obtidos na recepção dos níveis de sinais.

Onde:  Transmissor,  Receptor, e os retângulos representam:

(L, S, H) – Laboratório, Sala e Hall interno; Ponto; Nível de Recepção; Distância em metros entre TX – RX.

3.1 PARÂMETROS OBTIDOS NA PRÁTICA DO PROJETO

Os equipamentos utilizados foram:

- Transmissor: VECTOR SIGNAL GENERATOR
- Receptor: ANALIZADOR DE ESPECTRON (100 KHz a 6 GHz)

Regulagem de equipamentos de medição

1. Equipamento Transmissor ao lado do Equipamento Receptor ligados por cabo de transmissão:

- Frequência de operação: 2450 MHz
- Potencia do transmissor: 20 dBm
- Potencia no receptor: 18,6 dBm
- Distancia entre transmissor e Receptor: não existe

2. Equipamento Transmissor ao lado do Equipamento Receptor ligados por antenas (LVD):

- Frequência de operação: 2450 MHz
- Potência do transmissor: 20 dBm
- Potencia no receptor: - 40 dBm

Medições realizadas com equipamentos

P1 - 1ª medição: Receptor a 7 metros do Equipamento Transmissor (LVD):

- Potencia no receptor: - 54,0 dBm
- Número de paredes tipo 1 (15 cm) : 1
- Atenuação na parede tipo 1 em 2450 MHz: 4 dB
- Atenuação no piso em 2450 MHz: 21 dB

P2 - 2ª medição: Receptor a 9 metros do Equipamento Transmissor (LVD):

- Potencia no receptor: - 55,0 dBm
- Número de paredes tipo 1 (15 cm) : 2
- Atenuação na parede tipo 1 em 2450 MHz: 4 dB
- Atenuação no piso em 2450 MHz: 21 dB

P3 - 3ª medição: Receptor a 10,4 metros do Equipamento Transmissor (LVD):

- Potencia no receptor: - 58,5 dBm
- Número de paredes tipo 1 (15 cm) : 1
- Atenuação na parede tipo 1 em 2450 MHz: 4 dB
- Atenuação no piso em 2450 MHz: 21 dB

P4 - 4ª medição: Receptor a 5,3 metros do Equipamento Transmissor (LVD):

- Potencia no receptor: - 53,5 dBm
- Número de paredes tipo 1 (15 cm) : 1
- Atenuação na parede tipo 1 em 2450 MHz: 4 dB
- Atenuação no piso em 2450 MHz: 21 dB

P5 - 5ª medição: Receptor a 36,87 metros do Equipamento Transmissor (LVD):

- Potencia no receptor: - 59,5 dBm
- Número de paredes tipo 1 (15 cm): 3
- Atenuação na parede tipo 1 em 2450 MHz: 4 dB
- Atenuação no piso em 2450 MHz: 21 dB

P6 – 6ª medição: Receptor a 3 metros do Equipamento Transmissor (LVD):

- Potencia no receptor: - 51,5 dBm
- Número de paredes tipo 1 (15 cm) : 1
- Atenuação na parede tipo 1 em 2450 MHz: 4 Db
- Atenuação no piso em 2450 MHz: 21 Db

3.2 MODELO DETERMINISTICOS DE PREDIÇÃO DE SINAIS DE PROPAGAÇÃO

Os modelos determinísticos combinam elementos empíricos com o método eletromagnético teórico da teoria uniforme da difração. O método considera os raios diretos com uma só reflexão e uma só difração, e pode ampliar-se a múltiplas difrações ou reflexões, assim como a combinação de raios difratados e refletidos, ao incluir os raios refletidos e difratados, a precisão da predição aumenta significativamente.

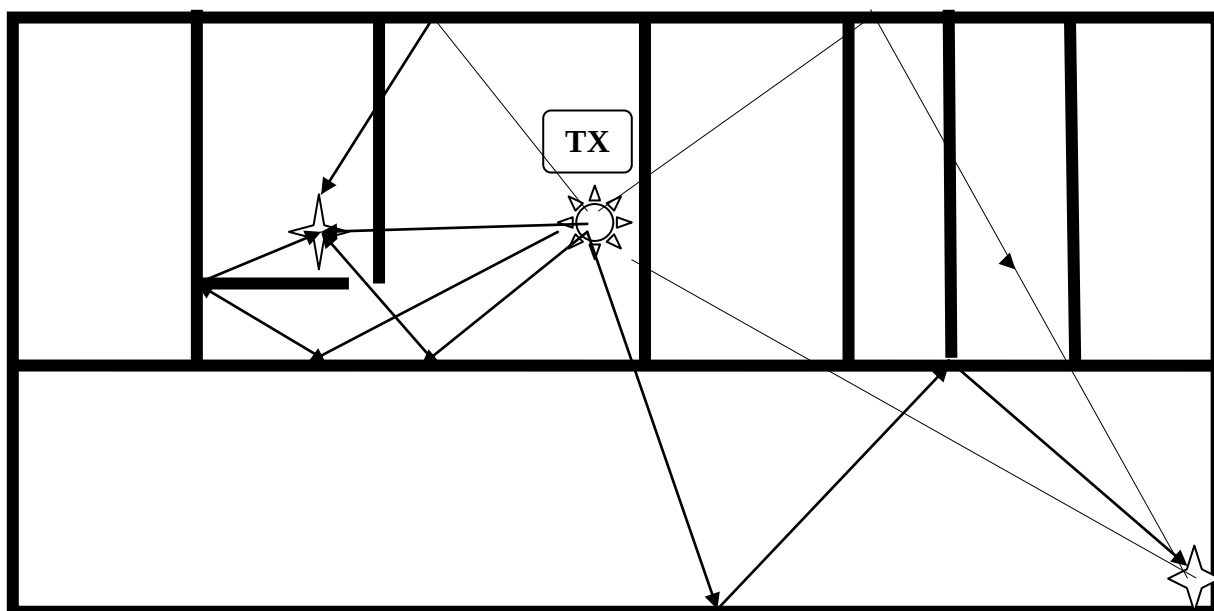


Figura 18: Exemplo de dois pontos na recepção de sinais por reflexão, difração ou técnicas de ópticas geométricas.

O lançamento de raios consiste em lançar certo número de raios de maneira uniforme no espaço em torno da antena do transmissor. Os raios são seguidos até alcançar o receptor ou até que sua amplitude se reduza abaixo de um limite especificado. Comparando com o enfoque da imagem, o lançamento de raios difratados pode ser examinado junto com as reflexões especulares. O enfoque de lançamento de raios é uma técnica apropriada para predizer em uma área a resposta de um canal aos impulsos, enquanto o enfoque de imagem se adéqua á predição ponto a ponto.

Esses modelos são excelentes simuladores para predição da área de cobertura, mas de nada adiantam se não há detalhes suficientes nas plantas para a correta análise do ambiente. Neste caso os modelos empíricos e semi-empíricos podem suprir essa necessidade.

O efeito de multipercursos é causado por três fenômenos, a reflexão, a difração e o espalhamento. Estes fenômenos permitem que um sinal atinja um destino por diferentes percursos, além do percurso direto (*LoS – Line of Sight*), quando este existe. A interseção destes raios faz com que o sinal no dado ponto no espaço seja composto pelos diversos sinais, de modo construtivo, isto é, aumentando o nível de potência do sinal, ou de modo destrutivo, diminuindo o nível de potência do sinal.

3.3 CÁLCULOS COM MODELOS EMPÍRICOS E DETERMINÍSTICOS:

1. Realizando o cálculo de perda de propagação (L) usando o modelo (One Slope), para (P1) conforme a figura 17, temos:

$$L = L_{d0} + 10n \log d$$

Onde, L_{d0} e n pertencem às tabelas indoor 2.2 e 2.1, respectivamente:

$$L = 40,2 + 10 \times 4 \times \log 7$$

$$L = 74,20 \text{ dBm}$$

Logo a atenuação desse trajeto será $L = 63,86 \text{ dB}$ e o nível de recepção de sinal é igual a:

Nível de recepção = Potência (TX) + Ganho da antena – Perda por propagação (L).

$$\text{Nível de Recepção} = 20 \text{ dBm} + 0 \text{ dBi} - 74,20 = -54,20$$

- Nível de Recepção pelo modelo empírico = $-54,20$
- Nível de Recepção pelo modelo determinístico = $-54,00$

2. Realizando o cálculo de perda de propagação (L) usando o modelo (ITU-R Recomendação P.1238), para (P5) conforme a figura 17, tem:

$$L_{total} = 20 \log_{10}(f) + N \log_{10}(d) + L_f(n) - 28$$

$$L_{total} = 20 \log_{10}(2450 \text{ MHz}) + 20 \log_{10}(36,87) + 4(3) - 28$$

$$L_{total} = 82,80 \text{ dBm}$$

Nível de recepção = Potência (TX) + Ganho da antena – Perda por propagação (L).

$$\text{Nível de Recepção} = 20 \text{ dBm} + 0 \text{ dBi} - 82,80 = -62,80$$

- Nível de Recepção pelo modelo empírico = $-62,80$
- Nível de Recepção pelo modelo determinístico = $-59,50$

4 CONCLUSÃO

Este projeto tem o intuito de estabelecer metas de aprendizagem para compreensão do tema, modelos de propagação interna para redes 802-11, desde a introdução às ondas eletromagnéticas, as características de modelos de propagação indoor.

Como nos sistemas wireless o seu meio de propagação é o canal rádio, características e efeitos sobre a informação trafegada são de natureza complexa e conseqüentemente impossibilita uma análise completamente determinística, sugerindo assim a utilização de dados experimentais.

No exercício anexo ao projeto, propagação indoor, as medições realizadas indicaram existências de flutuações de pequena escala e de larga escala do sinal em torno do seu valor médio e variaram de acordo com os modelos Rayleigh ou Rice, respectivamente e a partir destas tornou-se possível determinar a variação da potência do sinal devido ao movimento de pessoas no ambiente ou ao atravessar obstáculos fixos, como paredes, pisos, vidros, corredores, móveis etc.

Atualmente existem diversos modelos de propagação que permitem predizer a potencia do sinal de recepção. Alguns deles levam em conta os obstáculos encontrados no meio outros só consideram a distância como fator que ocasiona a atenuação do sinal.

Entretanto, conhecer o meio de transmissão é indispensável quando se objetiva realizar um bom planejamento de cobertura e desempenho radioelétrico.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ANATEL – Glossário de Telecomunicações.
- [2] HAYKIN, S. MOHER, M. Sistemas Modernos de Comunicações Wireless - 2008
- [3] J. R. Reitz, F. J. Milford e R. W. Christy, *Fundamentos da Teoria Eletromagnética*, Editora Campus Ltda., Rio de Janeiro (1982).
- [4] REGO, C. G. – Grupo de Antenas, Propagação e Teoria Eletromagnética: SP 2009.
- [5] SANCHES, C. ALBERTO – Projetando Redes WLAN: Edição exclusiva – Editora Érica.
- [6] TANENBAUM, A. S. Redes de Computadores. 4ª ed. Rio de Janeiro: Campus, 2003.
- [7] KRAUS J.D – CARVER K.R – Eletromagnetismo. 2º edição Guanabara dois 1978.
- [8] BALANIS C.A – Antenna Theory Analysis and Design. 2005

IEEEXPLORE: Disponível em <http://ieeexplore.ieee.org>. Acesso em 1/07/2010

INFOWESTER: Disponível em <http://www.infowester.com>. Acesso em 1/07/2010

TELECO. Disponível em <http://www.teleco.com.br>. Acesso em 20/03/2010.

WIKIPEDIA. Disponível em <http://www.wikipedia.org>. Acesso em 12/03/2010.

WIRELESSBRASIL. Disponível em <http://www.wirelessbrasil.org>. Aceso em 22/04/2010.

UNESP. Disponível em <http://www.shammas.eng.br>. Acesso em 24/04/2010.