SERGIO DUQUE CASTILHO

**TÍTULO: FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE CANAL DE
PROPAGAÇÃO EM AMBIENTE CELULAR BASEADO EM MODELOS
GEOMÉTRICOS ESTATÍSTICOS**

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Elétrica**

**São Paulo
2006**

SERGIO DUQUE CASTILHO

**TÍTULO: FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE CANAL DE
PROPAGAÇÃO EM AMBIENTE CELULAR BASEADO EM MODELOS
GEOMÉTRICOS ESTATÍSTICOS**

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Elétrica**

**Área de Concentração: Sistemas
Eletrônicos**

Orientador:

Prof. Dr. Luiz Cezar Trintinalia

**São Paulo
2006**

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, de outubro de 2006.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Castilho, Sergio Duque

Ferramenta de simulação computacional de canal de propagação em ambientes celulares baseado em modelos geométricos estatísticos / S.D. Castilho. --- ed.rev. -- São Paulo, 2006. 121 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle.

1.Propagação 2.Telefonia celular 3.Telefonia móvel 4.Simulação de sistemas I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle II.t.

A Elvira, minha esposa, por ter me apoiado e incentivado na realização deste trabalho. A paciência dispensada é própria de quem ama.
Aos meus pais Alexandre e Ismênia, e meus filhos Tayane e Felipe.

AGRADECIMENTOS

Expresso meus agradecimentos ao Prof. Dr. Luiz Cezar Trintinalia por ter me proporcionado a oportunidade e pelo constante incentivo e dedicação dispensada durante sua orientação no decorrer deste trabalho.

Minha gratidão Prof. Dr. Paul Jean Etienne Jeszensky pela infraestrutura disponibilizada e as condições de pesquisa oferecida.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram para a concretização deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma ferramenta de simulação computacional de canal de propagação para ambiente macro-celular baseada em modelos geométricos e no modelo estatístico apresentado no relatório COST 259 DCM.

Para a implementação desta ferramenta é realizada, inicialmente, uma abordagem dos principais modelos de predição de perda por propagação, utilizados atualmente, assim como, um estudo dos modelos geométricos que fornecem as informações de distribuição de potência temporal e angular para diferentes tipos de distribuições estatísticas de espalhadores.

A modelagem geométrica utiliza grupos independentes no qual os espalhadores são distribuídos com uma densidade Gaussiana. A utilização desta distribuição Gaussiana leva a distribuições de atraso e ângulo de chegada mais próximas dos resultados de medições do que o usando distribuição uniforme.

A base geométrica define o conceito direcional e temporal. A base estatística define o número de grupo de espalhadores adicionais e suas localizações, quando estes existiram. Efeitos como: direção e potência de chegada de cada grupo de espalhadores, a presença ou não de visada direta entre transmissor e receptor a medida que a estação móvel percorre uma célula e a variação da polarização cruzada foram implementados nesse simulador. Desta forma, essa ferramenta computacional simula tanto a dispersão temporal, presente nos modelos de banda larga, como a dispersão angular, utilizadas em sistemas de comunicação móveis que exploram a diversidade espacial..

ABSTRACT

This work present a simulation tool for macro cell environment based on geometrical and statistical representation of the scatterers and on the COST 259 Directional Channel Model (DCM).

A comprehensive review of the propagation prediction models for terrestrial wireless communication systems and geometric channel models, that provide, times of arrival (TOA) and the angle of arrival (AOA) for diferents statistics scatterers distribution is realized.

This tool uses gaussianly distributed scatterers for each cluster. This distribution is naturally more realistic than the uniform distribution leading closer to experimental results.

This geometrically based model simulates the TOA dispersion present in wide band channel models and the AOA dispersion necessary for systems that explore spatial diversity.

This tool also incorporates the concept of line-of-sight and non-line-of-sight and its birth and death as the mobile station moves in a cell, as well as the appearance and disappearance of additional clusters of scatterers.

The output provided by this simulation tool is comprised of all the complex amplitudes, delays and angles of arrival of all multipath components associated with each cluster of scatterers. Mean attenuation and slow fading effects are also incorporated to the model and fast fading appears as a consequence of the multipath interference.

SUMÁRIO.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LISTA DE SÍMBOLOS

1.INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivo do trabalho.....	3
1.2 Estrutura do texto.....	3
2. PREDIÇÃO DE PROPAGAÇÃO.....	5
2.1 Introdução.....	5
2.2 Propagação no espaço livre.....	5
2.3 Propagação em áreas urbanas.....	6
2.3.1 Classificação de áreas.....	7
2.3.2 Predição de perda de percurso.....	9
2.3.2.1 Medidas realizadas por Young.....	10
2.3.2.2 Método de Allsebrook.....	10
2.3.2.3 O Método de Okumura.....	13
2.3.2.4 A formulação de Hata.....	15
2.3.2.5 COST231 O modelo estendido de Hata.....	17
2.3.2.6 O método de Walfisch e Bertoni.....	18
2.3.2.7 COST231 – Walfisch-Ikegami.....	20
3. MODELO DE CANAL TEMPO ESPAÇO COM BASE GEOMÉTRICA.....	24

3.1 Introdução.....	24
3.2 Modelo de Lee.....	27
3.3 Modelo geométrico com base estatística para ambiente macro celular.....	31
3.3.1 As funções densidade de probabilidade.....	32
3.3.2 O espectro Doppler.....	39
3.3.3 Simulação das distribuições uniforme e Gaussiana.....	42
4. O MODELO COST-259.....	46
4.1 Descrição do modelo.....	46
4.2 Parâmetros de entrada.....	46
4.3 Análise do modelo.....	47
4.3.1 Geração dos grupos de espalhadores.....	47
4.3.2 Cálculo do tempo de atraso, azimuth e elevação dos espalhadores.....	48
4.3.3 Calculo do espalhamento temporal, espalhamento do azimuth e potência dos espalhadores.....	48
4.3.4 Polarização das componentes multi percurso.....	50
4.3.5 Desvanecimento Lento.....	51
4.3.6 Probabilidade de linha de visada.....	51
4.3.7 Desvanecimento rápido.....	51
4.3.8 Modelamento das componentes multi percurso.....	53
5. A FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.....	56
5.1 A perda média de potencia na propagação.....	57
5.2 O desvanecimento em larga escala ou lento.....	58
5.3 Geração do número de grupo de espalhadores adicionais e sua localização.....	60
5.4 Probabilidade de linha de visada.....	61
5.5 Desvanecimento rápido.....	61
5.6 Potência dos grupos de espalhadores distantes.....	64
5.7 Polarização das componentes multi percurso.....	64
5.8 Aparecimento e desaparecimento de Linha de visada.....	65

6. SIMULAÇÕES E RESULTADOS.....	67
6.1 Definição do ambiente.....	67
6.2 Tipos de simulações e resultados.....	68
6.2.1 Simulação de Perda media de potência.....	68
6.2.2 Simulação do desvanecimento lento.....	68
6.2.3 Simulação do desvanecimento rápido.....	71
6.2.4 Simulação espacial.....	73
6.2.5 Simulação da variação do fator de Rice.....	74
6.2.6 Simulação aparecimento e desaparecimento de LdV dos grupos distantes.....	75
6.2.7 Simulação da polarização cruzada.....	76
6.2.8 Simulação do aparecimento e desaparecimento de LdV entre a EM e a ERB.....	77
7. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	78
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79
APÊNDICE A: FUNÇÕES EM LINGUAGEM MATLAB®.....	83

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Mecanismos de propagação.....	5
Figura 2.2	Primeira elipsóide de Fresnel.....	6
Figura 2.3	Fator de correção γ_c para frequências acima de 200 MHz.....	12
Figura 2.4	Geometria utilizada por Allsebrook e Delisle.....	13
Figura 2.5	Perda média relativa ao espaço $A_{mu}(f, d)$	14
Figura 2.6	Fator de ganho/altura da antena da estação rádio base em áreas urbanas como função da distância.....	14
Figura 2.7	Fator de ganho/altura da antena da estação móvel H_{ru}	15
Figura 2.8	Método de calculo da altura efetiva da antena da estação rádio Base.....	15
Figura 2.9	Geometria para difração no topo dos edifícios.....	19
Figura 2.10	Definição da orientação do ângulo φ	21
Figura 2.11	Definição gráfica dos parâmetros das equações.....	22
Figura 3.1	Modelo de canal com multi percurso.....	25
Figura 3.2	Coordenadas relativas da ERB e da EM.....	27
Figura 3.3	Parâmetros do modelo de Lee.....	29
Figura 3.4	A potência versus o azimuth no modelo de Lee com N=30 e D/R=2, 10, 20.....	29
Figura 3.5	Modelo geométrico de Stapleton com rotação dos espalhadores.....	30
Figura 3.6	Representação dos parâmetros do modelo de Petrus.....	31
Figura 3.7	Função densidade de probabilidade do ângulo de chegada (D em metros e ângulo em graus).....	34
Figura 3.8	Gráfico da fdp conjunta do AdC e do TdC.....	36
Figura 3.9	Geometria para o calculo da FDP do TdC.....	37
Figura 3.10	Plano bidimensional para calculo do efeito Doppler.....	40
Figura 3.11	Densidade espectral de potencia.....	42
Figura 3.12	Posição relativa dos espalhadores para uma densidade uniforme de espalhadores no circulo de raio r_0 , relativos a estação rádio base.....	44
Figura 3.13	Histograma da potência angular para diferentes	

	distribuições de espalhadores.....	44
Figura 3.14	Histograma do espectro temporal de potência para diferentes distribuições de espalhadores.....	45
Figura 4.1	Posição da EM, dos espalhadores próximos e distantes.....	48
Figura 4.2	Reflexão do sinal vertical.....	50
Figura 4.3	Probabilidade de ocorrência de linha de visada.....	52
Figura 4.4	Distribuição da potência angular implementada no COST 259 comparada com a distribuição Laplaciana com σ igual a 0.758, de modo a tornar-se compatível com a Fig. 3.14 2 Figura 4.5.....	53
Figura 4.5	Distribuição da potência em função do tempo no COST 259.....	54
Figura 5.1	Um modelo de ambiente macro-celular.....	56
Figura 5.2	Perda média de potência em função da distância para uma frequência de 900 MHz para os três modelos de perda de potência adotados.....	58
Figura 5.3	Desvanecimento lognormal correlacionado.....	59
Figura 5.4	Célula com 3 grupos de espalhadores adicionais, além do grupo ao redor da estação móvel. A seção em destaque mostra os espalhadores distribuídos gaussianamente em um dos grupos.....	60
Figura 5.5	Representação fasorial das componentes multi percurso.....	62
Figura 5.6	Simulação do desvanecimento rápido para diferentes valores do fator de Rice.....	63
Figura 6.1	Resultados obtidos na simulação do desvanecimento lento para o ambiente AR ou TA.....	69
Figura 6.2	Histograma do sinal obtido para uma simulação do desvanecimento lento.....	69
Figura 6.3	Resultados obtidos na simulação do desvanecimento lento para o ambiente TU ou UD.....	70
Figura 6.4	Histograma do sinal obtido para uma simulação do desvanecimento lento.....	71
Figura 6.5	Simulação do desvanecimento rápido acrescido da perda média de potência.....	72
Figura 6.6	Histograma do sinal obtido para uma simulação do desvanecimento rápido.....	72
Figura 6.7	Densidade espectral de potencia das componentes multi	

	percurso, gerando desta forma o efeito Doppler a medida que a EM se desloca.....	73
Figura 6.8	Variação do fator de Rice como função do nascimento e morte de LdV.....	74
Figura 6.9	Regiões de visibilidade dos grupos distantes e suas respectivas potência.....	75
Figura 6.10	Simulação do XPD gerando as componentes verticais e horizontais acrescido do nascimento e morte de LdV e do desvanecimento lento.....	76
Figura 6.11	Transição de Linha de visada entre a ERB e a EM para um cenário TA.....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1	Parâmetros específicos para os diferentes cenários.....	55
Tabela 5.1	Parâmetros específicos para simulação dos diferentes cenários.....	66
Tabela 6.1	Parâmetros gerados na simulação espacial.....	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AdC	Ângulo de chegada
AR	Área rural
COST	European Co-operation in the Field of Scientific and Technical
DECT	Digital Enhanced Cordless Telecommunication
DCS	Digital Cellular System
EAP	Espectro angular de potência
ERM	Estação Rádio Base
EM	Estação Móvel
ETP	Espectro temporal de potência
FDP	Função distribuição de probabilidade
fdp	Função densidade de probabilidade
GBSBM	Geometrically Based Single Bounce Macrocell
GSM	Global System for Mobile
LdV	Linha de visada
RV	Região de visibilidade
SLdv	Sem linha de visada
UMTS	Universal Mobile Communication System
TA	Terreno acidentado
TdC	Tempo de chegada
TU	Típico urbano
UD	Urbano denso
XPD	Discriminação polar cruzada

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da região dos espalhadores
A_k	Amplitude ricean do sinal do grupo de espalhadores ao redor da EM
$A_\tau(\tau)$	Área de interesse da distribuição de espalhadores como função do tempo de chegada
C	Fator de correção
c	Velocidade da luz
d	Distância entre transmissor e receptor
D	Distância entre a ERB e a EM
D_{cor}	Distância de corte de visibilidade
d_{co}	Distância de corte de LdV
d_{max}	Máxima distância do grupo de espalhadores
d_k	Distância total percorrida pelo sinal que sai da Em, reflete no espalhador e chega a ERB
eg	Fator de correlação entre o espalhamento temporal e o desvanecimento lognormal
$E(t)$	Campo resultante na ERB
$E_n(t)$	Campo da n-ésima componente multi percurso
$EPL(.)$	Excesso de perda de potência
E_0	Amplitude do sinal enviado
f_c	Frequência da portadora
f_m	Máximo deslocamento Doppler
f_n	Deslocamento Doppler da n-ésima componente multi percurso
$f_r(r)$	Função densidade de probabilidade do raio dos espalhadores relativo a EM
$f_{x,y}(x,y)$	Função densidade de probabilidade conjunta de posição x,y do espalhador relativo a EM
$f_{r,\varphi}(r,\varphi)$	Função densidade de probabilidade conjunta raio-ângulo relativo a EM

$f_{R,\theta}(R, \theta)$	Função densidade de probabilidade conjunta raio-ângulo relativo a ERB
$f_v(f)$	Função densidade de probabilidade da distribuição da frequência Doppler
$f_\varphi(\varphi)$	Função densidade de probabilidade do ângulo de chegada relativa a EM
$f_\theta(\theta)$	Função densidade de probabilidade do ângulo de chegada relativa a ERB
$f_\tau(\tau)$	Função densidade de probabilidade do tempo de chegada
$f_{\tau,\varphi}(\tau, \varphi)$	Função densidade de probabilidade atraso-ângulo de chegada relativa a EM
$f_{\theta,\tau}(\theta, \tau)$	Função densidade de probabilidade atraso-ângulo de chegada relativo a ERB
$F(\tau)$	Função distribuição de probabilidade do tempo de chegada
$\mathfrak{F}\{\cdot\}$	Transformada de Fourier
g	Componente fasorial resultante do sinal
g_{esp}	Componente de cada multipercurso
g_{LdV}	Componente dominante do sinal
g_{SLdV}	Componente resultante dos diversos multi percurso
G_r	Ganho da antena receptora
G_t	Ganho da antena transmissora
$Gw(\cdot)$	Variável com distribuição Gaussiana de média zero e variância 1
h_B	Altura média dos edifícios
h_{EM}	Altura da antena da EM
h_{ERB}	Altura da antena da ERB
$h_r[n]$	Função de correlação
h_o	Altura média dos edifícios
$K(t)$	Componente fase
K_{Rice}	Fator de Rice
$J(\cdot, \cdot)$	Jacobiano
$J_0(\cdot)$	Função de Bessel de primeira espécie e ordem zero

$K_0(.)$	Função de determinação do fator de Rice
L_1	Perda média de potência
L_{add}	Perda de potência adicional
L_D	Perda por difração em terrenos com obstáculos
L_{gk}	Perda de potência do k-ésimo grupo de espalhadores
L_H	Perda média de potencia COST231 Hata estendido
L_{mds}	Perda por difração múltipla
L_o	Perda no espaço livre
L_p	Perda média de potência em terra plana modelo dos dois raios
L_{p1}	Perda de potencia do sinal em terra plana acrescido do fator de correção urbano devido aos edifícios
L_{roi}	Perda adicional função do ângulo de incidência
L_{rts}	Perda por difração nos topos dos edifícios
L_T	Perda média de potência total
L_{TD}	Transição de linha de visada
$L(t)$	Número de multi percurso Variante no tempo
L_V	Transição de visibilidade
L_{WI}	Perda média de potencia COST231 WI
$L_{(aberta)}$	Perda média de potência em área aberta no modelo de Hata
$L_{(suburbana)}$	Perda média de potência em área suburbana no modelo de Hata
$L_{(urbana)}$	Perda média de potência em área urbana no modelo de Hata
L_k	Perda média de potenciado grupo de espalhadores
$L_{\sigma d}$	Distância de correlação do desvanecimento lognormal
$L_{\sigma XPD}$	Distância de correlação da polarização cruzada
$L_{\sigma\varphi}$	Distância de correlação do espalhamento do azimuth
$N_{ad}(.)$	Variável aleatória com distribuição de Poisson
N_{AV}	Número de regiões de visibilidade
N_{cl}	Número total de grupo de espalhadores

$N_{cl\min}$	Número mínimo de grupo de espalhadores
N_0	Número médio de grupo de espalhadores adicionais
$N[\mu, \sigma]$	Variável com distribuição Gaussiana de média μ e desvio padrão σ
P_{gesp}	Potencia do grupo de espalhadores ao redor da EM
P_{gk}	Perda de potência por sombreamento do k-ésimo grupo de espalhadores
P_h	Potência média recebida na polarização horizontal
$P_l(.)$	Espectro de potência temporal angular
P_{LdV}	Potencia de linha de visada
$P_m(.)$	Espectro de potência temporal angular médio
P_{SLdV}	Potência sem linha de
P_v	Potência média recebida na polarização vertical
P_T	Potência total
$P_\tau(\tau)$	Espectro temporal de potência
$P_\varphi(\varphi)$	Espectro angular de potência relativo a EM
$P_\theta(\theta)$	Espectro angular de potencia relativo a ERB
$Q(t)$	Componente quadratura
re	Raio efetivo da terra
r_i	Distância entre a EM e o i-ésimo espalhador
R_D	Raio de visibilidade do grupo
R_i	Distância entre o i-ésimo espalhador e a ERB
r_0	Raio máximo do grupo de espalhadores
$S_0(f)$	Densidade espectral de potência
$U(a, b)$	Variável randômica com distribuição uniforme
$u[n]$	Degrau unitário
(X, Y)	posição ou vetor de posição da EM relativo a ERB
W'	Largura relativa da rua
W	Largura da rua
w_c	Frequência angular da portadora

w_d	Percurso em linha de visada
α_l	Amplitude complexa do sinal com o l-ésimo percurso
α_i	Amplitude complexa da i-ésima componente
α_r	Fator de correlação
β	Perda devido aos edifícios
β_r	Valor máximo da correlação por distância
φ_i	Ângulo de azimuth do i-ésimo multi percurso relativo a EM
γ_c	Fator de correção adicional para frequências acima de 200 MHz
γ_{gk}	Elevação do k-ésimo grupo de espalhadores
γ_l	Ângulo de elevação do sinal com o l-ésimo percurso
γ_n	Ângulo entre a direção do movimento da EM e a reta que a liga a ERB
$\dot{\varphi}$	Velocidade angular dos espalhadores ao redor das EM
ϕ_i	Fase da i-ésima componente multi-percurso
λ_c	Comprimento de onda da portadora
μ_{XPD}	Valor médio da XPD
θ_{gk}	Azimuth do k-ésimo grupo de espalhadores
θ_i	Ângulo de azimuth do i-ésimo multi percurso relativo a ERB
θ_n	Ângulo entre a n-ésima componente e a direção do percurso percurso direto
θ_l	Ângulo de azimuth do sinal com o l-ésimo percurso
θ_0	Ângulo de azimuth do caminho direto entre a Em e a ERB
$\rho_{\sigma\theta}$	Coefficiente de correlação entre desvanecimento lognormal e azimuth
$\rho_{\tau\theta}$	Coefficiente de correlação entre espalhamento temporal e azimuth
$\rho_{\tau\theta}$	Coefficiente de correlação entre desvanecimento lognormal e azimuth
σ_d	Desvio padrão do desvanecimento lognormal
σ_s	Desvio padrão da distribuição dos espalhadores
σ_{XPD}	Desvio padrão da XPD
$\sigma_{\theta k}$	Desvio padrão do azimuth do k-ésimo grupo de espalhadores

$\sigma_{\theta med}$	Desvio padrão do espalhamento de azimuth médio
$\sigma_{\tau k}$	Desvio padrão da distribuição temporal do k-ésimo grupo de espalhadores
$\sigma_{\tau med}$	Desvio padrão do tempo médio de atraso do grupo de espalhador a 1 Km
$\sigma_{\sigma\theta}$	Desvio padrão do espalhamento de azimuth
$\sigma_{\sigma\tau}$	Desvio padrão do espalhamento temporal
σ_1^2	Valor quadrático médio das componentes multi percurso do grupo de espalhadores ao redor da EM
τ_{gk}	Atraso do k-ésimo grupo de espalhadores
τ_i	Tempo de propagação da i-ésima componente multi percurso
τ_k	Atraso do k-ésimo grupo de espalhadores
τ_l	Atraso do sinal com o l-ésimo percurso
τ_0	Tempo de propagação do sinal direto entre a EM e a ERB
ΔX	Passo de discretização espacial

1 - INTRODUÇÃO

A modelagem e a simulação do canal de propagação é uma das ferramentas fundamentais através da qual sistemas de comunicação são projetados e otimizados.

Os mecanismos básicos que afetam a propagação são reflexão, difração e espalhamento, sendo que estes mecanismos estão sujeitos às variações no tempo devido a modificações contínuas e arbitrárias do meio físico entre o transmissor e o receptor. O resultado deste mecanismo complexo de propagação é o aparecimento de inúmeras componentes multi percurso, que chegam ao receptor de diferentes direções, com diferentes fases e diferentes atrasos, pois viajam por diferentes caminhos. Estas componentes são somadas vetorialmente no receptor dando origem à flutuação do sinal, chamada de desvanecimento por multi percurso e é responsável pela degradação do sistema de comunicação segundo Parsons (2000, p. 115) e Rappaport (1996, p.169).

Esses fenômenos podem ser modelados por expressões matemáticas usadas para representar as características de propagação de uma onda eletromagnética em um determinado meio. A busca por modelos matemáticos quer seja baseada em medidas, na teoria de propagação das ondas eletromagnéticas, com base estocástica ou até mesmo a combinação destes, têm sido alvo de pesquisa há muito tempo, como por exemplo, o trabalho realizado por Rice (1948, p.109); uma série de medidas realizadas em Nova York e publicadas por Young (1952, p. 1068), provando que a perda de potência do sinal é maior que a prevista nas equações de espaço livre; o trabalho de Clarke (1968, p. 957) que desenvolveu um modelo onde as características estatísticas das ondas eletromagnéticas vindas da estação móvel eram deduzidas a partir das reflexões do sinal transmitido, e a análise espectral do modelo de Clarke foi desenvolvida por Gans (1972, p. 27).

Com a evolução da telefonia celular, novos modelos do canal de propagação foram propostos para a predição da atenuação do sinal em um determinado ambiente. Entre esses podemos citar o de Hata (1980, p. 317), que estabeleceu uma formulação matemática empírica derivada dos resultados publicados por Okumura et al (1968, p. 825), de modo a tornar possível sua utilização em sistemas de processamento e o de Walfisch e Bertoni (1988, p. 1788), que elaborou um modelo teórico para a predição da perda média de potência em ambientes urbanos na banda de UHF para as frequências entre 300 MHz a 3 GHz. Todos estes modelos se aplicavam a segunda geração de telefonia celular.

Com o surgimento da terceira geração de telefonia celular, e o advento de redes inteligentes de antenas, tanto para cancelamento de interferência como para localização das unidades móveis, surgiu a necessidade de um melhor entendimento das propriedades espaciais do canal de comunicação.

Portanto, os novos modelos, construídos a partir do entendimento clássico do desvanecimento do sinal e do efeito Doppler, incorporam adicionalmente, a informação do espalhamento temporal, importante para a análise da comunicação em banda larga e a direção de chegada das componentes multi percurso na estação radio base, importante para a análise espacial e projetos de redes inteligentes de antenas.

O desafio, portanto, é desenvolver modelos de canal de comunicação mais realistas que incorporem todo o trabalho realizado para a segunda geração de telefonia celular bem como as informações temporal e espacial. Nesta linha, surgiram os modelos espaço-temporais de canal com base geométrica, como o modelo de Willian C. Y. Lee (1982, p. 199). Nesse modelo os efeitos da correlação entre duas antenas de uma estação rádio base são estudados. Em outro modelo idealizado por Stapleton et al (1994, p. 1789), os espalhadores estão distribuídos uniformemente ao redor da estação móvel, como no modelo de Lee, porém possuem uma velocidade angular, de modo a simular o efeito Doppler.

O modelo de Paul Petrus (2002, p. 1197) distribui espalhadores com densidade de probabilidade uniforme, em uma região delimitada por um círculo de raio R ao redor da estação móvel e determina a expressão da densidade de probabilidade do ângulo de chegada das componentes multi percurso. Seguindo esta linha, outros modelos foram propostos como, por exemplo, o modelo de Mahmoud (2002, p.211), com distribuição hiperbólica de espalhadores, o estudo realizado por Laurila (1989, p. 267) sobre a influência da distribuição dos espalhadores no espectro temporal de potência e o trabalho realizado por Janaswamy (2002, p. 488) em cujo modelo é utilizada a distribuição Gaussiana de espalhadores.

Hofstetter e Steinböck (2004, p. 195) desenvolveram uma ferramenta de simulação de canal de propagação para ambiente macro e micro celular, baseada no COST 259 DCM, nesta ferramenta, os espalhadores seguem uma distribuição uniforme e utilizada a velocidade da estação móvel para forçar o surgimento do efeito Doppler.

O relatório COST 259 DCM, editado por Correia (2001, cap. 3), descreve um modelo estatístico de canal com base geométrica, de alta complexidade, abordando inúmeros aspectos do canal de comunicação, Esse modelo é analisado em detalhe neste trabalho para ambiente

macro-celular, visando a implementação de uma ferramenta de simulação computacional de canal de propagação.

1.1 Objetivo do trabalho

Esta dissertação de mestrado tem os seguintes objetivos gerais: (i) o estudo dos modelos do canal de rádio propagação, incluindo os modelos atuais de canal com base geométrica e estatística; (ii) uma análise das distribuições estatísticas de espalhadores, de modo a escolher o modelo que mais se aproxima dos resultados de medidas encontradas na literatura.

Como objetivo específico essa dissertação implementa um modelo computacional de canal de comunicação com base geométrica e estatística para ambiente macro celular, e realiza a sua validação através da comparação dos resultados obtidos, com os medidos, disponíveis na literatura.

1.2 Estrutura do texto

Esta dissertação é estruturada como segue: Inicialmente no Capítulo 2 são estudados os mecanismos básicos de propagação do sinal de rádio e os principais modelos de predição para perda média de percurso.

No capítulo 3 são estudados os modelos de canais com base geométrica e as suas respectivas funções densidade de probabilidade, o desvanecimento devido ao espalhamento multi percurso e o efeito Doppler,

No capítulo 4 é apresentada uma descrição do modelo COST 259 no que diz respeito a sua configuração e implementação.

No capítulo 5, o mais importante desta dissertação, é apresentado um simulador de canal de propagação com base geométrica e estatística para ambiente macro celular.

No capítulo 6 são apresentados os resultados e gráficos obtidos com a ferramenta de simulação implementada em linguagem Matlab® e compar os resultados com as medidas existentes na literatura.

Finalmente, no capítulo 7, as conclusões e trabalhos futuros são apresentados.

2 - PREDIÇÃO DE PROPAGAÇÃO

2.1 Introdução

Os fenômenos de propagação do sinal de rádio são complexos e diversos, devido ao ambiente que separa o transmissor do receptor.

No espaço livre a potência média do sinal variar com o inverso do quadrado da distância, segundo a formulação clássica de Friis, outros fenômenos aos quais as ondas eletromagnéticas estão sujeitas, como: difração, refração, reflexão e espalhamento, conforme pode ser visto na Fig. 2.1, também afetam a potência do sinal no receptor. Neste capítulo, serão vistos os mecanismos básicos de propagação do sinal de rádio e os principais modelos de predição para perda de percurso.

Figura 2.1: Mecanismos de Propagação

2.2 – Propagação no Espaço Livre

Em casos onde existe o caminho direto entre transmissor e receptor e o volume contido no primeiro elipsóide de Fresnel não possui obstáculo, como mostra a Fig. 2.2, a propagação do sinal de rádio pode ser considerada em condições bem próximas à do espaço livre e, portanto, obedece às leis e a formulação do espaço livre. Embora a refração sofrida pela onda eletromagnética na atmosfera altere sua trajetória, devido a não homogeneidade do meio, fazendo com que o horizonte visual não seja o mesmo para uma comunicação ponto a ponto a grandes distância, neste trabalho, será considerada linha de visada, como um caminho direto entre transmissor e receptor.

Figura 2.2 Primeiro elipsóide de Fresnel

2.3 – Propagação em áreas Urbanas

A propagação do sinal de rádio em áreas urbanas como a que ocorre na comunicação entre a estação rádio base e a estação móvel localizada ao nível das ruas e avenidas, é função dos obstáculos criados pelo homem como casas e edifícios, da vegetação e das variações no terreno.

Em áreas urbanas, o efeito de obstáculos como edifícios e a propagação das ondas de rádio através das ruas, tornam difícil a predição da potência do sinal recebido.

Freqüentemente o caminho do sinal de maior potência não é o mais óbvio ou um caminho direto. A potência do sinal nas ruas, cuja direção é radial, ou aproximadamente radial, em relação à estação rádio base, normalmente excede a dos caminhos ou das ruas cuja direção é azimutal.

A estimação do sinal recebido em uma estação móvel é um processo realizado em duas partes: a primeira envolve a predição do sinal médio em uma pequena região da área de serviço e a segunda descreve a variação deste valor médio, quantificando o quanto este sinal pode flutuar dentro da área em consideração.

A variação deste valor médio pode também ser decomposta em dois fatores de contribuição: o primeiro é a variação rápida ao redor do valor médio local, denominado desvanecimento rápido ou desvanecimento de Rice ou Rayleigh, e o segundo é a variação lenta na potência média, causada pela mudança no perfil do terreno entre a estação móvel e a estação rádio base, quando a primeira se desloca, sendo normalmente denominada desvanecimento em larga escala ou lento. Esta característica é normalmente modelada por uma distribuição estatística Lognormal.

2.3.1 – Classificação das áreas

A propagação das ondas de rádio em áreas urbanas recebe grande influência da natureza e do ambiente, em particular da dimensão e densidade dos edifícios. No estudo da propagação móvel, uma descrição qualitativa do ambiente é utilizada, usando termos como área rural, suburbana, urbana, urbana densa e terrenos acidentados. Áreas urbanas densas são normalmente definidas como sendo dominadas por altos edifícios, blocos de escritórios ou edifícios comerciais. As áreas suburbanas são compostas de casas residenciais, jardins e parques. Já as áreas rurais são definidas como fazendas com poucas construções, bosques e florestas. Os terrenos acidentados são vales e montanhas.

Estas descrições são qualitativas e dão margem a diferentes interpretações, por diferentes usuários. Por exemplo, uma área descrita como urbana em uma cidade pode ser descrita como suburbana em outra. Isto pode gerar dúvidas de como um modelo baseado em medidas realizadas em uma cidade pode ser aplicado a qualquer outra. Desta forma é necessário descrever o ambiente quantitativamente, de modo a evitar ambigüidade nas definições causadas por possíveis diferenças culturais.

Em situações de interesse prático, um ambiente pode ser considerado como sendo composto de classes ou tipos de espalhamento diferentes e mutuamente independentes.

Em uma cidade, elementos como edifícios e árvores devem parecer como uma coleção de obstáculos aleatórios, onde cada edifício pode gerar vários espalhamentos. Da mesma forma uma floresta deve ser modelada como uma coleção de árvores distribuídas aleatoriamente. Se a propriedade estatística do espalhamento em grupo ou individual é conhecida, bem como a distribuição populacional, então é possível gerar uma descrição quantitativa do ambiente na forma estatística e um método de classificação do ambiente pode ser baseado nestas aproximações.

Um conglomerado de células em comunicação móvel pode ser visto como uma mistura de ambientes (urbano, suburbano e rural). Seguindo esta definição, esse conglomerado pode ser dividido em blocos, e cada bloco ser considerado como uma amostra de um ambiente, descrito por diferentes tipos de topografia. Apesar das amostras de bloco em um conglomerado de células não serem totalmente idênticas, elas são suficientemente similares para permitir uma descrição estatística média.

Quando consideramos o efeito do ambiente, seis fatores são úteis na classificação da topologia a ser usada:

- A densidade de edificações (porcentagem da área coberta por edificações).
- Dimensão das edificações (área coberta por edificações)
- Altura das edificações
- Localização das edificações
- Densidade de vegetação
- Ondulação do terreno

Usando alguns destes fatores, algumas investigações acabaram criando classificações para ambientes no qual algumas experiências foram realizadas.

Kozono e Watanabe (1977, p.1133) realizaram um trabalho tentando uma descrição quantitativa do ambiente urbano, parte desta investigação era a influência dos edifícios sobre a potência média do sinal recebido. Em medidas realizadas nas cidades japonesas, foi verificado que a altura e o volume dos edifícios (grau de urbanização), se correlaciona melhor com o valor médio recebido do sinal. As áreas utilizadas se estendiam por 500 m x 500 m a partir da estação rádio base.

Ibrahim e Parsons (1983, p.377) realizaram um trabalho semelhante na cidade de Londres, introduzindo dois parâmetros: o primeiro é um fator de uso do solo que representa a porcentagem da área de 500 m x 500 m coberta por edifícios, o segundo parâmetro representa a porcentagem ou grau de urbanização, em essência o mesmo parâmetro de Kozono e Watanabe e que tem uma grande correlação com o desvanecimento do sinal.

Com o surgimento do sistema único de telefonia celular na Europa, o GSM - Global System for Mobile Communications. Tornou-se necessário uma padronização dos parâmetros a serem utilizados, no trabalho de Kafaru (PARSONS 2000, p. 76) as seguintes informações podem ser retiradas dos mapas:

- Localização das construções.
- Tamanho das construções.
- Área total ocupada pelas construções.
- Número de construções na área considerada.
- Altura do terreno.

- Parques e jardins.

A partir destas informações desenvolve-se os seguintes parâmetros:

- Distribuição e tamanho dos edifícios.
- Índice de área dos edifícios.
- Distribuição da altura dos edifícios.
- Índice de vegetação.

Com esses quatro parâmetros, é possível classificar os ambientes como:

- Classe 1: Área rural e terreno acidentado.
- Classe 2: Área urbana
- Classe 3: Área urbana densa

Obtendo-se desta forma uma classificação mais homogênea para ambientes em diferentes regiões

Hoje em dia é possível retirar as informações geográficas de uso do solo da base de dados de tecnologia digital, Venes e Correia (2003, p. 551) desenvolveram uma ferramenta de simulação com seleção de modelos de propagação dinâmica de acordo com a classificação do ambiente.

2.3.2– Predição de Perda de Percurso

As técnicas de predição utilizam fatores que consideram as áreas urbanas de diferentes modos. Algumas destas técnicas podem ser utilizadas em um grande número de cenários urbanos, embora não exista um modelo universal aceito como o melhor. Novamente a precisão de um modelo em particular depende dos ajustes entre os parâmetros necessários do modelo e os disponíveis para determinada área. Normalmente estamos interessados em uma predição do valor médio da potência em uma pequena área, e com igual importância na variação deste sinal à medida que a estação móvel se desloca na célula.

2.3.2.1 – Medidas Realizadas por Young

Young (1952, p. 312) não desenvolveu um método específico de predição, mas reportou uma importante série de medidas realizadas em New York entre as frequências de 150 e 3.700MHz. O resultado experimental destas medidas no qual o sinal da estação rádio base é

recebido por uma estação móvel se deslocando em uma determinada rua, confirma que a perda de potência em um determinado percurso é maior que a prevista no espaço livre.

Young não comparou o resultado destas medidas com a equação de perda de potência através do método dos dois raios, dado pela equação 2.1, mas os resultados obtidos nas suas medidas mostravam que a perda de potência é inversamente proporcional a distância elevada a quarta potência.

$$L_p = G_t + G_r + 20 \log\left(\frac{h_{ERB} h_{EM}}{d^2}\right) \quad (2.1)$$

Para este caso os termos são definidos como:

d é a distância entre a ERB e a EM,

h_{ERB} é a altura da antena da ERB,

h_{EM} é a altura da EM,

G_t e G_r são os ganhos da antena transmissora e receptora respectivamente.

2.3.2.2 – Método de Allsebrook

Allsebrook e Parsons (1977, p.313) realizaram uma série de medias nas cidades britânicas de Birmingham, Bath e Bradford utilizando as frequências 85, 167 e 441 MHz, com o intuito de criar um modelo de predição de propagação. Das cidades escolhidas Birmingham era a maior delas, possuía a maior densidade de edifícios, mas as características do terreno eram desprezíveis, ou seja, a topografia do terreno era plana; Bath e Bradford eram cidades muito menores que a primeira, mas as topografias dos terrenos eram montanhosas. Os resultados obtidos para as frequências de 85 e 167 MHz mostravam que o inverso da quarta potência da distância forneciam um bom ajuste para os dados experimentais.

A equação:

$$L_{p1} = G_t + G_r + 20 \log\left(\frac{h_{ERB} h_{EM}}{d^2}\right) + 10 \log \beta, \quad (2.2)$$

é a perda de potencia do sinal em terra plana acrescido do fator de correção urbano β , devido aos edifícios e não a topologia do terreno, dado por:

$$\beta = \left(\frac{40}{f_c}\right)^2 \quad (2.3)$$

Na cidade de Birmingham, onde o efeito do terreno podia ser desprezado, a modelagem da perda de potência total segue a formula a seguir:

$$L_T(dB) = L_{P1} + L_{mds} + \gamma_c \quad (2.4)$$

Onde:

L_{mds} é referente a perda por difração devido a edificios,

γ_c é um fator de correção adicional para frequências acima de 200 MHz dado pela Fig. 2.3.

Através de uma análise extensiva dos resultados experimentais, o modelo proposto para cidades montanhosas é dado pela equação:

$$L_T(dB) = L_0 + [(L_P - L_0)^2 + L_D^2]^{1/2} + L_{mds} + \gamma_c, \quad (2.5)$$

onde foram adicionadas as perdas devido ao terreno. No modelo proposto a perda de potência para cidades planas pode ser obtido fazendo-se $L_D \rightarrow 0$.

L_0 é a perda de potência no espaço livre:

$$L_0(dB) = 32.44 + 20 \log f_{c(MHz)} + 20 \log d_{(Km)} \quad (2.6)$$

L_D é a perda por difração em terrenos com obstáculos usando o método de Epstein e Peterson (1953, p.595).

Figura 2.3 Fator de correção γ_c para frequências acima de 200 MHz

Em um trabalho comparando vários modelos de propagação, Delisle et al (1985, p.86) aproximaram L_{mds} para:

$$L_{mds}(dB) = 20 \log_{10} \left(\frac{h_0 - h_{EM}}{548 \sqrt{W' * f_C * 10^{-3}}} \right) + 16 \quad (2.7)$$

h_0 é a altura média dos edifícios, nas vizinhanças da estação móvel de altura h_m ,

f_C é a frequência da portadora,

W' é obtido conforme Fig. 2.4.

Nesse trabalho foi mostrada a grande sensibilidade em relação a h_0 . Apesar das comparações, o fator γ foi ignorado, mas admite-se a necessidade de um fator de correção para frequências em UHF, porem não necessariamente tão grande como sugerido por Allsebrook e Parsons (1977, p.313) de 15 dB quando f_C aumenta de 200 para 500 MHz.

Figura 2.4 Geometria utilizada por Allsebrook e Delisle

2.3.2.3 O Método de Okumura

Após uma extensiva série de medidas na cidade de Tóquio e seus arredores, para frequências até 1920 MHz, Okumura et al (1968, p. 825) publicaram um modelo empírico para predição da potência do sinal.

A base desse modelo é que à perda de potência no espaço livre entre os pontos de interesse, a esta perda é adicionando os parâmetros A_{mu} , H_{te} e H_{ru} conforme mostra a equação:

$$L(dB) = L_F + A_{mu} + H_{te} + H_{ru} \quad (2.8)$$

O fator $A_{mu}(f, d)$ é a média da atenuação no espaço livre em uma área urbana para terrenos quase planos, este fator é obtido da Fig 2.5, com a altura da antena da estação rádio

base igual a 200 m e a altura da antena da estação móvel igual a 3 m, $A_{mu}(f, d)$ é função da frequência (100 – 3000 MHz) e da distância entre estação rádio base e a estação móvel,

Figura 2.5 – Perda média relativa ao espaço $A_{mu}(f, d)$.

H_{te} é o fator de ganho relativo a altura da antena da estação rádio base, mostrado na Fig. 2.6, é função da altura da antena da estação rádio base e da sua distância à estação móvel.

Figura 2.6 – Fator de ganho/altura da antena da estação rádio base em áreas urbanas como função da distância

O fator H_{ru} é o ganho relativo a altura da antenna da estação móvel dado pela Fig. 2.7 e o método de calculo da altura efetiva da antenna da estação rádio base é dado pela Fig 2.8.

Figura 2.7 – Fator de ganho/altura da antenna da estação móvel H_{ru}

Figura 2.8 – Método de calculo da altura efetiva da antenna da estação rádio base

2.3.2.4 A Formulação de Hata

Com a intenção de tornar o método de Okumura et al fácil de ser aplicado, Hata (1980, p. 317) estabeleceu uma relação matemática empírica para descrever as informações dadas por Okumura. A formulação de Hata é limitada a uma gama de parâmetros de entrada e é aplicada

somente a terrenos quase planos. A expressão matemática e sua gama de aplicação são dadas por:

Área urbana:

$$L_{H(urbana)} = 69.55 + 26.16 \log f_c - 13.82 \log h_{ERB} - a(h_{EM}) + (44.9 - 6.55 \log h_{ERB}) \log d \quad (2.9)$$

Onde:

$L_{H(urbana)}$ é a perda média de potência em área urbana

$150 \leq f_c \leq 1500$ f_c em MHz é a frequência da portadora

$30 \leq h_{ERB} \leq 200$ h_{ERB} em metros é a altura da antena transmissora

$1 \leq d \leq 20$ d em Km é a distância entre transmissor e receptor

h_{EM} é a altura da antena receptora $1 \leq h_{EM} \leq 10m$.

O termo $a(h_{EM})$, está relacionado com a altura da antena da estação móvel e é calculado como segue:

Para cidades pequenas ou médias:

$$a(h_{EM}) = (1.1 \log f_c - 0.7) h_{EM} - (1.56 \log f_c - 0.8) \quad (2.10)$$

para $1 \leq h_{EM} \leq 10m$

Para cidades grandes:

$$a(h_{EM}) = \begin{cases} 8.29(\log 1.54 h_{EM})^2 - 1.1 & f_c \leq 200MHz \\ 3.2(\log 11.75 h_{EM})^2 - 4.97 & f_c \geq 400MHz \end{cases} \quad (2.11)$$

Áreas suburbanas:

$$L_{H(suburbana)}(dB) = L(urbana) - 2 \left[\log\left(\frac{f_c}{28}\right) \right]^2 - 5.4 \quad (2.12)$$

Áreas abertas:

$$L_{H(abertas)}(dB) = L_{H(urbana)} - 4.78(\log f_c)^2 + 18.33 \log f_c - 40.94 \quad (2.13)$$

Estas equações têm uma considerável melhora quanto praticidade da sua utilização, se comparada com as curvas de Okumura.

2.3.2.5 COST 231 O Modelo Estendido de Hata

COST é uma organização intergovernamental européia fundada em 1971 para cooperação no campo científico e de pesquisa técnica em várias áreas, a COST-Telecom que atua na área de telecomunicações, envolve centenas de cientistas trabalhando nos institutos de pesquisa, universidades e indústria. Modelos como COST-207, COST-231 entre outros contribuíram para o desenvolvimento do GSM - Global System for Mobile Communication, DECT - Digital Enhanced Cordless Telecommunications e UMTS - Universal Mobile Telecommunications System.

O modelo de Hata, discutido anteriormente, atinge uma gama de frequência ente 150 e 1500 MHz, desta forma não podem ser aplicados ao DCS 1800 (Digital Cellular System), e outros sistemas similares operando na faixa entre 1800 e 1900 MHz. Por esse motivo o modelo europeu COST 231 (1998, cap.3), reprograma as curvas de Okumura para altas frequências, criando um modelo estendido, que segue a seguinte equação:

$$L(dB) = 46.3 + 33.9 \log f_c - 13.83 \log h_{ERB} - a(h_{EM}) + (44.9 - 6.55 \log h_{ERB}) \log d + C_m \quad (2.14)$$

Nesta equação $a(h_{EM})$ é definido pela equação 2.11,

$$C = \begin{cases} 0dB & \text{-para cidades de tamanho médio e centros suburbanos} \\ & \text{com média densidade de árvores} \\ 3dB & \text{-para centros metropolitanos} \end{cases},$$

A equação (2.14) é válida para as seguintes faixas de valores:

$$1500 \leq f_c \leq 2000 \quad f_c \text{ em MHz é a frequência da portadora}$$

$$30 \leq h_{ERB} \leq 200 \quad h_{ERB} \text{ em metros é a altura da antena transmissora}$$

$$1 \leq d \leq 20 \quad d \text{ em km é a distância entre transmissor e receptor}$$

$$1 \leq h_{EM} \leq 10 \quad h_{EM} \text{ em metros é a altura da antena receptora.}$$

A aplicação deste modelo é restrita para macro células onde a antena da estação rádio base está acima do topo dos edifícios adjacentes. Nem o modelo original ou o modelo estendido são aplicados à micro-células, onde a altura da antena é baixa.

2.3.2.6 – O Método de Walfisch e Bertoni

Walfisch e Bertoni (1988, p. 1788) desenvolveram um modelo teórico baseado na geometria do percurso do sinal mostrado na Fig 2.9. No modelo proposto os edifícios próximos à estação móvel são os mais importantes, como mostra o percurso 1 e 2 da Fig. 2.9. Outras possíveis propagações existem como a componente 4, compostas de múltiplos percursos e difrações. Os sinais que alcançam o móvel através dos edifícios, percurso 3, são negligenciados.

O modelo proposto representa os edifícios como uma série de gumes de faca e um ângulo α de incidência no topo do edifício imediatamente anterior entre a estação móvel e a estação rádio base, conforme mostra a Fig. 2.9. Por este motivo, os edifícios próximos à estação móvel se encontram na 1^o Zona de Fresnel e a difração é calculada por método numérico. Para obter a difração causada por vários edifícios ao longo do percurso, principalmente quando α é pequeno, algumas aproximações devem ser feitas: a polarização utilizada é vertical, a propagação é perpendicular à sequência de edifícios e os edifícios são da mesma altura.

É necessário estabelecer o campo que incide no topo do prédio imediatamente anterior à estação móvel, para determinar a onda que sofre difração na direção da rua.

A perda total no percurso consiste em 3 fatores: a perda entre as antenas considerando o espaço livre L_0 , a difração múltipla no topo dos edifícios próximos a estação móvel e a perda por difração e espalhamento do topo dos edifícios até à estação móvel.

Admitindo uma antena isotrópica, a perda no espaço livre é dada por:

$$L_0(dB) = 32.44 + 20 \log f_{c(MHz)} + 20 \log d_{(Km)} \quad (2.15)$$

A perda adicional, devido à difração final na direção da rua onde se encontra a estação móvel, é estimada admitindo o topo dos edifícios como um gume de faca.

Figura 2.9 – Geometria para difração no topo dos edifícios

O sinal recebido pela estação móvel é profundamente desvanecido, devido a reflexão dos edifícios próximos à estação móvel. A perda excedente sofrida pelo sinal sobre o espaço livre é dada por:

$$L_{ex}(db) = 57.1 + A + \log f_c + 18 \log d - 18 \log(h_{ERB} - h_0) - 18 \log \left(1 - \frac{d^2}{17(h_{ERB} - h_0)} \right) \quad (2.16)$$

Onde:

$$A = 5 \log \left[\left(\frac{b}{2} \right)^2 + (h_0 - h_{EM})^2 \right] - 9 \log b + 20 \log \left\{ \tan^{-1} [2(h_0 - h_{EM})/b] \right\} \quad (2.17)$$

A perda total é dada adicionando L_{ex} , à perda obtida no espaço livre, b e h_0 podem ser obtidos segundo a Fig. 2.9

2.3.2.7 COST 231 – Walfisch-Ikegami

Durante o projeto COST231 (1998, cap. 3), o foi proposto como modelo de propagação uma combinação do modelo Walfisch-Bertoni com o modelo de Ikegami el al (1994, p. 822) para uma melhor estimação da perda média de percurso. No novo modelo quatro fatores foram incluídos:

- Altura dos edifícios, h .
- Largura das ruas, w .

- Separação entre os edifícios, b .
- Orientação das ruas com respeito à direção do percurso, φ .

Este modelo prevê a distinção entre existência ou não de linha de visada, que é o caminho direto entre transmissor e receptor.

Para a condição de existência de linha de visada a equação da perda média de potência desenvolvida através das medidas é dada por:

$$L_{WI}(dB) = 42.6 + 26 \log d_{(Km)} + 20 \log f_{c(MHz)} \quad d \geq 20m \quad (2.18)$$

Quando não há linha de visada, a perda por difração múltipla do sinal é incluída (L_{msd}), bem como a difração nos topos dos edifícios (L_{rts}).

Desta forma obtém-se:

$$L_{WI} = \begin{cases} L_0 + L_{rts} + L_{msd} & L_{rts} + L_{msd} > 0 \\ L_0 & L_{rts} + L_{msd} \leq 0 \end{cases} \quad (2.19)$$

$$L_0 = 32.4 + 20 \log d_{Km} + 20 \log f_{cMHz} , \quad (2.20)$$

L_0 é a perda de propagação no espaço livre.

O termo L_{rts} é dada por:

$$L_{rts} = 16.9 - 10 \log w + 10 \log f_c + 20 \log(\Delta h_{movel}) + L_{ori} \quad (2.21)$$

$$L_{ori} = \begin{cases} -10 + 0.354\varphi & 0^\circ \leq \varphi < 35^\circ \\ 2.5 + 0.075(\varphi - 35) & 35^\circ \leq \varphi < 55^\circ \\ 4.0 - 0.114(\varphi - 55) & 55^\circ \leq \varphi < 90^\circ \end{cases} \quad (2.22)$$

$$\Delta h_{movel} = h_0 - h_{EM}$$

$$\Delta h_{base} = h_{ERB} - h_0 \quad (2.23)$$

A difração por multi percurso foi estimada por Walfisch e Bertoni para casos em que a antena da estação radio base se encontra acima do topo dos edifícios. No modelo COST231 – Walfisch-Ikegami foi previsto o fato da antena da estação rádio poder base estar abaixo do topo dos edifícios, usando uma função empírica baseada em medidas, obtendo-se a seguinte equação:

$$L_{msd} = L_{bsh} + k_a + k_d \log d_{Km} + k_f \log f_{cMHz} - 9 \log b \quad (2.24)$$

$$L_{bsh} = \begin{cases} -18 \log[1 + \Delta h_{base}] & h_{ERB} > h_0 \\ 0 & h_{ERB} \leq h_0 \end{cases} \quad (2.25)$$

k_a é a perda adicional quando a altura da antena transmissora está abaixo do topo dos edifícios, dada por:

$$k_a = \begin{cases} 54 & h_{ERB} > h_0 \\ 54 - 0.8(h_{ERB} - h) & h_{ERB} \leq h_0 \text{ e } d \geq 0.5km \\ 54 - 0.8(h_{ERB} - h) \frac{d}{.5} & h_{ERB} \leq h_0 \text{ e } d < 0.5km \end{cases} \quad (2.26)$$

Figura 2.10 Definição da orientação do ângulo φ

Figura 2.11 Definição gráfica dos parâmetros das equações

k_d e k_f seguem a dependência da difração com respeito à distância e frequência, dada por:

$$k_d = \begin{cases} 18 & h_{ERB} > h_0 \\ 18 - 15 \frac{(h_{ERB} - h_0)}{h_0} & h_{ERB} \leq h_0 \end{cases} \quad (2.27)$$

$$k_f = -4 + \begin{cases} 0.7 \left(\frac{f_c}{925} - 1 \right) & \text{-cidade de tamanho medio e suburbana} \\ 1.5 \left(\frac{f_c}{925} - 1 \right) & \text{-centros metropolitanos} \end{cases} \quad (2.28)$$

Para estes cálculos quando os dados não estão disponíveis, os seguintes valores são utilizados:

$$h_0 = 3 * \text{número_de_andares} + \text{altura_do_telhado}$$

$$\text{Altura_do_telhado} = \begin{cases} 3 \text{ m para telhado em pico} \\ 0 \text{ m para telhado plano} \end{cases}$$

$$20 \leq b \leq 50$$

$$w = \frac{b}{2}$$

$$\varphi = 90^\circ$$

Os parâmetros b , w e φ são definidos conforme figura 2.10 e Fig. 2.11.

O modelo é restrito aos seguintes parâmetros:

$$800 \leq f_c \leq 2000 \text{ MHz}$$

$$4 \leq h_{ERB} \leq 50 \text{ m}$$

$$1 \leq h_{EM} \leq 3 \text{ m}$$

$$0.02 \leq d \leq 5 \text{ km}$$

De acordo com o relatório COST 231, o erro médio apresentado pelo modelo é da ordem de 3 dB e o desvio padrão está entre 4 e 8 dB, nos casos onde a altura da antena da estação rádio base está acima do topo dos edifícios.

3 - MODELOS DE CANAL ESPAÇO TEMPORAL COM BASE GEOMÉTRICA

3.1 Introdução

Para a análise do desempenho de sistemas de comunicação sem fio e sistemas espaço temporal, como as antenas inteligentes, um modelo estatístico que forneça a dispersão angular ou ângulo de chegada (AdC), e a dispersão temporal ou tempo de chegada (TdC), das componentes multi percurso é de suma importância. Nos modelos clássicos iniciais, desenvolvidos para sistemas de transmissão em banda estreita Parsons (2000, cap.4), Gans (1972, p.27), Hata (1980, p.317) e Walfisch-Bertoni (1988, p.1788) somente a amplitude do sinal e o efeito Doppler eram levados em consideração.

Em outros modelos Petrus et al (2002, p. 1197), Mahmoud (2002, p. 211) e Libert e Rappaport (1996, p.844), cuja idéia foi originalmente proposta por Jakes, os espalhadores, seguem uma distribuição uniforme ao redor da estação móvel e representam obstáculos reais, gerando as componentes multi percurso. A distribuição física destes espalhadores gera uma distribuição de potência em função dos ângulos de chegada e dos tempos de chegada em relação à antena da estação rádio base.

É interessante observar que, devido ao fato de a unidade móvel se deslocar, bem como alguns elementos espalhadores ao seu redor, o canal é variante no tempo e, segundo Pedersen et al (2000, p.437) pode ser representado por:

$$h(t, \theta, \gamma, \tau) = \sum_{l=1}^{L(t)} \alpha_l(t) \delta(\theta - \theta_l(t)) \delta(\gamma - \gamma_l(t)) \delta(\tau - \tau_l) \quad (3.1)$$

α_l é a amplitude complexa do sinal com percurso l

γ_l é o ângulo de elevação do sinal com percurso l

θ_l é o ângulo de azimute de chegada do sinal de múltiplo percurso l

τ_l é o atraso de cada percurso

$L(t)$ é o número de multi percursos, variante no tempo.

O grande desafio é estabelecer modelos que apresentam características de espalhamento temporal e angular próximo daquelas obtidas nos casos reais. A figura 3.1 mostra uma analogia com os parâmetros citados, onde $(\alpha_l, \theta_l, \gamma_l, \tau_l)$ são vetores aleatórios e independentes.

Figura 3.1 Modelo de canal com multi percurso

Baseado na proposição acima, o espectro temporal angular instantâneo de potência recebido, que representa o comportamento instantâneo da potência recebida com relação ao ângulo de chegada e ao atraso é definido por Pedersen et al (2000, p. 437) como:

$$P_{\theta, \gamma, \tau}(\theta, \gamma, \tau) = \sum_{l=1}^L |\alpha_l|^2 \delta(\theta - \theta_l) \delta(\gamma - \gamma_l) \delta(\tau - \tau_l) \quad (3.2)$$

$|\alpha_l|$ é o valor absoluto da amplitude complexa.

Considerando a distância entre a estação rádio base e a estação móvel muito maior que a altura da antena transmissora e receptora, pode-se considerar um modelo bidimensional no plano (x, y) , sem perda de generalidade, definindo-se, desta forma o espectro temporal angular de potencia médio segundo Pedersen et al (2000, p. 437) como:

$$P_m(\theta, \tau) = E[P_{\theta, \tau}(\theta, \tau)] \quad (3.3)$$

Através da equação 3.3 são definidos dois parâmetros utilizados na comparação com medidas reais, o espectro temporal de potência (PDS – Power Delay Spectrum), e o espectro angular de potência (PAS – Power Angle Spectrum), dados respectivamente por:

$$P_\tau(\tau) = \int P(\theta, \tau) d\theta \quad (3.4)$$

$$P_\theta(\theta) = \int P(\theta, \tau) d\tau \quad (3.5)$$

As funções densidade de probabilidade do atraso $f_\tau(\tau)$ e do ângulo de chegada $f_\theta(\theta)$, ou a densidade conjunta atraso-ângulo $f_{\tau,\theta}(\tau,\theta)$, desempenham um papel importante e, segundo demonstrado por Pedersen et al (2000, p. 437) é possível estabelecer uma relação entre o espectro de potência e as funções de densidade de probabilidade dadas por:

$$P_\tau(\tau) \propto E\left[|\alpha|^2|\tau\right]f_\tau(\tau) \quad (3.6)$$

$$P_\theta(\theta) \propto E\left[|\alpha|^2|\theta\right]f_\theta(\theta) \quad (3.7)$$

$E\left[|\alpha|^2|\theta\right]$ é a potência do sinal condicionada ao azimute

$E\left[|\alpha|^2|\tau\right]$ é a potência do sinal condicionada ao atraso

A notação “ $\propto$ ” significa proporcional.

Uma forma simples de se obter a função densidade de probabilidade marginal do tempo ou do ângulo de chegada dos espalhadores é estima-la através de uma simulação estatística, usando-se um programa de simulação para gerar um grande número de espalhadores na região em consideração. Para cada percurso, calculando-se o ângulo e o tempo de chegada e, através de um histograma com uma resolução adequada, é possível obter o comportamento aproximado da função densidade de probabilidade.

De modo análogo ao proposto anteriormente; é possível obter a distribuição conjunta de $|\alpha|^2$ e (θ, τ) . Utilizando a distribuição obtida, e adotando um número de intervalos adequado, para o ângulo de chegada, é possível calcular a esperança de $|\alpha|^2$ condicionada a θ , ou seja $E\left[|\alpha|^2|\theta\right]$. Utilizando-se então a equação 3.7, com os parâmetros obtidos, é possível calcular o espectro angular de potência.

Outro modo de obter a função densidade de probabilidade é através de transformações de variáveis. Inicialmente, equacionando os espalhadores com respeito às suas localizações iniciais, próximas à estação móvel, e posteriormente relativos à estação rádio base, a transformação pode ser obtida através de um jacobiano como mostram as equações 3.8 e 3.9, e a figura 3.2.

$$\left. \begin{array}{l} \tau = f_1(r, \varphi) \\ \theta = f_2(r, \varphi) \end{array} \right\} \longleftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} r = f'_1(\tau, \theta) \\ \varphi = f'_2(\tau, \theta) \end{array} \right. \quad (3.8)$$

$$f(\tau, \theta) = \frac{f_{r,\varphi}(r = f'_1(\tau, \theta), \varphi = f'_2(\tau, \theta))}{|J(r, \varphi)|} \quad (3.9)$$

Figura 3.2 Coordenadas relativas da ERB e da EM.

Alguns dos principais modelos de canal com base estatística e geométrica bem como os mais recentes serão abordados neste capítulo, tendo como objetivo o estudo das suas distribuições de espalhadores e o efeito resultante nos espectros angular e de potência, para que seja possível escolher o modelo que mais se aproxime dos resultados experimentais encontrados na literatura, e, desta forma, implementar o mesmo na ferramenta de simulação computacional.

3.2 Modelo de Lee

No modelo de Lee (1982, p.199) assume-se que os espalhadores estão distribuídos uniformemente em uma circunferência de raio r_0 , ao redor da estação móvel. Este modelo foi originalmente concebido para prever a correlação entre dois elementos de uma rede de antenas de tamanho arbitrário.

Segundo o modelo de Lee, um grande espalhamento angular resulta em uma baixa correlação nos elementos da antena. O raio típico da circunferência onde se encontram os espalhadores está entre 100 e 200 comprimentos de onda.

Admitindo que N espalhadores estejam distribuídos em um círculo de raio r_0 , ao redor da estação móvel com um espaçamento angular $\varphi = 2\pi / N$, e orientados de forma que os espalhadores estejam na linha de visada, o ângulo de chegada na estação rádio base θ_i é dado por:

$$\theta_i = \theta_0 + \arctan\left(\frac{\sin \varphi_i}{D/r_0 + \cos(\varphi_i)}\right), \quad i = 0, 1 \dots N-1, \quad (3.10)$$

sendo:

θ_0 é o ângulo de azimute do caminho direto e

D a distância entre a estação móvel e a estação rádio base.

A distância total percorrida pelo sinal (d_t) emitido pela estação móvel, refletido nos espalhadores ao seu redor e que chega à estação rádio base, é dada por:

$$d_t = r_0 + \sqrt{r_0^2 + D^2 - 2r_0D \cos \varphi_i} \quad (3.11)$$

com

$$\varphi_i = \pi(1 - 2i/N). \quad (3.12)$$

Assim a correlação entre dois elementos de uma antena pode ser determinada por:

$$\rho(d_L, \theta_0, r_0, D) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \exp(-j2\pi d_L \cos(\theta_0 - \theta_i)) \quad (3.13)$$

sendo d_L o espaçamento entre dois elementos da rede de antenas conforme mostra a Fig. 3.3 e θ_i dado pela equação 3.10.

Levando em consideração uma atenuação inversamente proporcional ao quádruplo da distância percorrida pelo sinal em ambientes urbanos Rappaport (1996, p.102), podemos estabelecer uma razão entre as componentes dos sinais de multi percurso e a potência do sinal vindo da estação móvel dada por:

$$\alpha_i = \left[\frac{D/r_0}{1 + \sqrt{1 + (D/r_0)^2 - 2 \cos(\varphi_i)(D/r_0)}} \right], \quad (3.14)$$

cujo gráfico é mostrado na Fig. 3.4.

Figura 3.3 Parâmetros do modelo de Lee

Figura 3.4 A potência versus o azimuth no modelo de Lee com $N=30$ e $D/R=2, 10, 20$.

Com o objetivo de desenvolver um modelo teórico para simulação do efeito Doppler, Stapleton et al (1994, p. 1789) propuseram uma extensão no modelo de Lee, mantendo a distribuição uniforme dos espalhadores ao redor da estação móvel, porém admitindo uma velocidade angular dos mesmos, dependente da velocidade da estação móvel e da distância entre esta e a estação rádio base, conforme pode ser visto na Fig. 3.5.

Dado o raio dos espalhadores r_0 , a relação entre o espalhamento temporal $\Delta\tau$ e r_0 é dada por:

$$\Delta\tau = \frac{r_0}{c\sqrt{2}} \quad (3.15)$$

onde c é a velocidade da luz

A velocidade angular $\dot{\varphi}$ e a máxima frequência Doppler $W_{\max}$ são dadas por:

$$\dot{\theta} = \frac{v}{r_0}, \quad W_{\max} = \beta r_0 \dot{\theta} \quad \text{onde} \quad \beta = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3.16)$$

onde v é a velocidade da estação móvel e λ o comprimento de onda da portadora.

Figura 3.5 Modelo geométrico de Stapleton com rotação dos espalhadores

3.3 Modelo geométrico com base estatística para ambiente macro celular

Esse modelo de canal para ambiente macro celular proposto por Petrus, Reed e Rappaport (1996, p.1197), conhecido como GBSBM (Geometrically Based Single Bounce Macrocell), admite que as componentes multi percurso são causadas por espalhadores próximos da estação móvel. Nesse modelo são analisados 3 importantes parâmetros relacionados com as componentes multi percurso que caracterizam o canal: a função densidade de probabilidade do ângulo de chegada ao longo do azimuth, a função densidade de probabilidade da distribuição da frequência Doppler e o espectro Doppler.

Para esse modelo considera-se o seguinte:

- As ondas incidentes na estação rádio base chegam horizontalmente devido a distância entre transmissor e receptor ser muito maior que a altura das suas antenas.
- Cada espalhador considerado omnidirecional, re-radiando o sinal transmitido vindo da estação móvel.
- Os espalhadores possuem o mesmo coeficiente de radiação com fase uniformemente distribuída entre 0 e 2π .

- Os espalhadores estão distribuídos uniformemente ao redor da estação móvel.

A figura 3.6 exemplifica o modelo,

Figura 3.6 Representação dos parâmetros do modelo de Petrus.

Conforme mostra a figura acima, a distância entre a estação rádio base e a estação móvel é dada por D , o ângulo de chegada das componentes multi percurso θ_a é dependente de duas variáveis: o ângulo ϕ e do raio r que determina a localização do espalhador em relação a estação móvel.

3.3.1 As funções densidade de probabilidade.

Com a introdução de redes de antenas em sistemas de comunicação sem fio tornou-se necessário entender as características espaciais do canal de comunicação. As diversas componentes multi percurso vindas dos espalhadores fornecem as funções densidade de probabilidade (fdp), do Angulo de chegada (Adc), do Tempo de chegada (Tdc) e a fdp conjunta.

A correspondente direção de chegada dos sinais vindos desses espalhadores com relação a estação rádio base, pode ser obtidas através utilizando um jacobiano, ou seja, dada a localização de um determinado espalhador na posição (x, y) relativo à estação móvel, cuja representação polar é dada por (ϕ, r) , é possível transformar essa variáveis em (θ, R) , representação polar de (X, Y) relativo à estação rádio base.

De acordo com a figura 3.6, as relações trigonométricas entre (φ, r) e (θ_a, R) são dadas por:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{R^2 + D^2 + 2DR \cos(\theta)} \quad (3.17)$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{y}{x}\right) = \arctan\left(\frac{R \cos(\theta) - D}{R \sin(\theta)}\right) \quad (3.18)$$

Distribuição uniforme de espalhadores

Considerando uma densidade uniforme de espalhadores num círculo de raio r_0 , as funções densidade de probabilidade do ângulo φ , do raio r e a conjunta são dadas respectivamente por:

$$f_{\varphi}(\varphi) = \frac{1}{2\pi} \quad \text{para: } 0 \leq \varphi \leq 2\pi \quad (3.19)$$

$$f_r(r) = \frac{2r}{r_0^2} \quad \text{para: } 0 \leq r \leq r_0 \quad (3.20)$$

$$f_{\varphi r}(r, \varphi) = f_r(r)f_{\varphi}(\varphi) = \frac{r}{\pi r_0^2} \quad \text{para: } 0 \leq \varphi \leq 2\pi \text{ e } 0 \leq r \leq r_0 \quad (3.21)$$

Utilizando o jacobiano para mudança de variável a função densidade de probabilidade conjunta de (θ, R) pode ser obtida utilizando a equação:

$$f_{\theta R}(R, \theta) = \frac{f_{\varphi r}(r, \varphi)}{|J(r, \varphi)|} = f_{\varphi r}(r, \varphi) |J(R, \theta)| \quad (3.22)$$

onde $|J(r, \varphi)|$ é o jacobiano para a devida transformação das variáveis dado por:

$$|J(r, \varphi)| = \frac{\partial(r, \varphi)}{\partial(R, \theta)} = \begin{vmatrix} \frac{\partial r}{\partial R} & \frac{\partial r}{\partial \theta} \\ \frac{\partial \varphi}{\partial R} & \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} \end{vmatrix} = \frac{R}{r} \quad (3.23)$$

Como mostram as equações 3.16 e 3.17, as variáveis φ e r são função de x e y , portanto a relação entre a função densidade de probabilidade $f_{R, \theta}(R, \theta)$ e $f_{x, y}(x, y)$ é dada por:

$$f_{R, \theta}(R, \theta) = f_{x, y}(x, y) \times \frac{1}{|J(x, y)|} \frac{1}{|J(r, \varphi)|} \quad (3.24)$$

ou:

$$f_{R,\theta}(R, \theta) = r \times \frac{1}{A} \times \frac{R}{r} \quad (3.25)$$

onde:

$$\frac{1}{|J(x, y)|} = r, \quad (3.26)$$

$$\frac{1}{|J(\varphi, r)|} = \frac{R}{r}, \quad (3.27)$$

$$f_{x,y}(x, y) = \frac{1}{A} \quad (3.28)$$

e $A = \pi r_0^2$ é a área da circunferência de raio r_0 com centro na estação móvel, onde os espalhadores estão uniformemente distribuídos.

A direção de chegada ou função densidade de probabilidade marginal $f_\theta(\theta)$ é encontrada simplesmente integrando a função conjunta entre o limite máximo e mínimo do seu contorno como mostrado abaixo:

$$f_\theta(\theta) = \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} f_{\theta,R}(\theta, R) \partial R \quad (3.29)$$

onde os limites são dados por:

$$R = D \sin(\theta) \pm \sqrt{D^2 \sin^2(\theta) - D^2 + r_0^2} \quad (3.30)$$

obtendo-se:

$$f_\theta(\theta) = \frac{2}{\pi} \left(\frac{D}{r_0} \sin(\theta) \sqrt{1 - \frac{D^2}{r_0^2} \sin^2(\theta)} \right) \quad (3.31)$$

para: $D > r_0$ e $-\arcsen(r_0 / D) < \theta < \arcsen(r_0 / D)$

O gráfico da equação 3.31 obtida anteriormente é mostrado abaixo:

Figura 3.7 Função densidade de probabilidade do ângulo de chegada (D em metros e ângulo em graus)

A função densidade de probabilidade conjunta do AdC e do TdC segundo o desenvolvimento de Ertel e Reed (1999, p. 1829), parte do caminho total percorrido pelo sinal transmitido pela estação móvel, refletido no espalhador e que chega à estação rádio base, $(R + r)$, como pode ser visto na figura 3.6. O tempo decorrido para este percurso é dado por:

$$\tau = \frac{R + r}{c} = \frac{R + \sqrt{R^2 + D^2 - 2DR \cos(\theta)}}{c} \quad (3.32)$$

Isolando a raiz na equação acima, elevando ao quadrado os dois lados e isolando em relação a R obtém-se:

$$R = \frac{D^2 - \tau^2 c^2}{2(D \cos(\theta_a) - \tau c)} \quad (3.33)$$

Desta forma a fdp conjunta do AdC e do TdC $f_{\theta,\tau}(\theta, \tau)$ pode ser obtida através da seguinte transformação:

$$f_{\theta,\tau}(\theta, \tau) = \frac{f_{\theta,R}(\theta, R)}{|J(\theta, R)|} \bigg|_{R=D^2-\tau^2 c^2/2(D \cos(\theta)-\tau c)} \quad (3.34)$$

sendo o jacobiano dado por:

$$J(R, \theta) = \frac{2(D \cos(\theta) - \tau c)^2}{D^2 c + \tau^2 c^2 - 2\tau c^2 D \cos(\theta)} \quad (3.35)$$

obtendo desta forma a fdp conjunta:

$$f_{\theta, \tau}(\theta, \tau) = \frac{(D^2 - \tau^2 c^2)(D^2 c + \tau^2 c^2 - 2\tau c^2 D \cos(\theta))}{4A(D \cos(\theta) - \tau c)^3} \quad (3.36)$$

esta equação é válida para:

$$0 < \frac{D^2 + c^2 \tau^2 - 2cD\tau \cos \theta}{2c\tau - 2D \cos \theta} < r_0$$

onde:

$A = \pi r_0^2$ é a área onde se encontram os espalhadores uniformemente distribuídos ao redor da estação móvel.

Note que:

$$\frac{D}{c} \leq \tau \leq \frac{D + 2r_0}{c} \text{ é a variação máxima e mínima do tempo de chegada, e}$$

$$-\arcsen(r_0/D) \leq \theta \leq \arcsen(r_0/D) \text{ é a variação máxima e mínima do ângulo de chegada.}$$

O gráfico da fdp conjunta do AdC e do TdC ($f_{\theta, \tau}(\theta, \tau)$) dado pela equação 3.36 é mostrado a figura 3.8, nesse gráfico o valor aproximado de $\tau_{\min}$ é de $3.33 \cdot 10^{-6}$ e a estação móvel encontra-se localizada em $\theta = 0^\circ$ e $\tau = \tau_{\min}$.

Segundo Ertel e Reed (1999, p. 1829) o calculo da fdp do TdC é um processo mais complicado. A integração da pdf conjunta sobre o AdC gera grandes dificuldades, mesmo quando os espalhadores seguem uma distribuição uniforme.

Um método mais simples é primeiro obter a função distribuição de probabilidade (FDP) e depois derivá-la em relação a τ .

Figura 3.8 Gráfico da fdp conjunta do AdC e do TdC

A FDP do TdC é calculada como a probabilidade dos espalhadores estarem localizados no lugar geométrico dos pontos P , cuja soma das distâncias a dois pontos fixos $F1$ e $F2$ é constante. Os pontos fixos são chamados de focos da elipse, local onde se encontra a estação móvel e a estação rádio base, como mostra a figura 3.9.

Para uma distribuição uniforme dos espalhadores, a FDP do TdC é dada por:

$$F(\tau) = \frac{A_r(\tau)}{A}, \quad (3.37)$$

onde $A_r(\tau)$ é a área de interesse e a derivada em relação a τ fornece a fdp do TdC,

$$f_r(\tau) = \frac{1}{A} \frac{\partial(A_r(\tau))}{\partial \tau} \quad (3.38)$$

Figura 3.9 Geometria para o calculo da FDP do TdC

A área de interesse $A_\tau(\tau)$ é a intersecção da elipse com a região circular onde se encontram os espalhadores, essas regiões, A_1 e A_2 são simétricas em relação ao eixo X. Segundo

Ertel e Reed (1999, p. 1829) utilizando coordenadas polares R e $A_\tau(\tau)$ podem ser obtidos por:

$$R(\varphi) = \frac{c^2\tau^2 - D^2}{2c\tau - 2D\cos(\varphi)} \quad (3.39)$$

$$\phi = \arccos\left(\left(\frac{D^2 - c^2\tau^2 + 2c\tau R}{2DR(\varphi)}\right)\right) \quad (3.40)$$

$$A_\tau(\tau) = A_1 + A_2 = 2 \int_0^\alpha \int_0^{r_0} r \partial r \partial \varphi + 2 \int_\alpha^\pi \int_0^{R(\varphi)} r \partial r \partial \varphi \quad (3.41)$$

$$A_\tau(\tau) = r_0^2 \phi + \int_\alpha^\pi \left(\frac{c^2\tau^2 - D^2}{2c\tau - 2D\cos(\varphi)} \right)^2 \partial \varphi \quad (3.42)$$

$$A_\tau(\tau) = \phi r_0^2 + \frac{D^2 - \tau^2 c^2}{4} \left[\frac{-\pi \tau c}{\sqrt{\tau^2 c^2 - D^2}} + \frac{D \sin(\phi)}{\tau c - D \cos(\phi)} \right. \\ \left. + \frac{2\tau c}{\sqrt{\tau^2 c^2 - D^2}} \arctan \left(\frac{\sqrt{\tau^2 c^2 - D^2} \tan(\alpha/2)}{\tau c - D} \right) \right] \quad (3.43)$$

Substituindo a equação 3.36 em 3.38 e derivando em relação a τ a fdp do TdC obtida é dada por:

$$f_{\tau}(\tau) = \frac{c}{\pi r_0^2} \left[\frac{\pi \tau^2 c^2 k_2 - \tau c k_2^2 + \tau c k_1 - 2 r_0 k_1^2}{4 k_1 k_2} + \frac{\tau^2 c^2 k_0 k_4 + \tau c k_0 k_1^2}{2 k_4^2 + 2 k_0^2 k_1^2} \right. \\ \left. + \frac{\tau^2 c^2 + k_1^2}{2 k_1} \arctan\left(\frac{k_0 k_1}{k_4}\right) - \frac{r_0 - \tau c}{\sqrt{4 r_0^2 D^2 - k_2^2}} \left(2 r_0^2 + \frac{\tau c k_1^2 k^4 (1 + k_0)}{2 k_4^2 + 2 k_0^2 k_1^2} \right) \right] \quad (3.44)$$

onde:

$$k_0 = \tan\left(\frac{1}{2} \arcsin\left(\frac{-\tau^2 c^2 + D^2 + 2 r_0 \tau c}{2 r_0 D}\right)\right), \quad k_1 = \sqrt{\tau^2 c^2 - D^2}, \quad k_2 = \sqrt{D^2 - 4 r_0^2 - \tau^2 c^2 + 4 r_0 \tau c},$$

$$k_3 = -\tau^2 c^2 + D^2 + 2 r_0 \tau c \quad \text{e} \quad k_4 = D - \tau c$$

Distribuição gaussiana dos espalhadores:

Usando o mesmo método de integração baseado na figura 3.9 Janaswamy (2002, p. 448) desenvolveu a fdp do ângulo de chegada para uma distribuição Gaussiana de espalhadores obtendo:

$$f_{\theta}(\theta) = \frac{e^{-(D/2\sigma_s)}}{2\pi} + \frac{D \cos(\theta)}{\sigma_s 2\sqrt{2\pi}} e^{-(D^2 \sin^2(\theta/2\sigma_s^2))} \times \operatorname{erfc}\left(\frac{-D \cos(\theta)}{\sqrt{2}\sigma_s}\right) \quad -\pi \leq \theta \leq \pi \quad (3.45)$$

onde σ_s é o desvio padrão da distribuição dos espalhadores e $\operatorname{erfc}(\cdot)$ é a usual função de erro complementar. Para valores pequenos de σ_s os espalhadores se concentram próximos a EM

3.3.2 O espectro Doppler.

O sinal recebido na estação rádio base experimenta o efeito Doppler devido ao movimento do transmissor. Isso ocorre para o sinal com linha de visada, como para os sinais de multi percurso. O deslocamento na frequência Doppler depende da direção e da velocidade do deslocamento do transmissor.

A n-ésima componente multi percurso sofre o seguinte deslocamento Doppler:

$$f_n = f_m \cos(\theta_n - \gamma_v) \quad (3.46)$$

onde:

$$f_m = v/\lambda \quad \text{é o máximo deslocamento Doppler}$$

θ_n é o ângulo entre a n-ésima componente e a direção do percurso direto

γ_v é o ângulo entre a direção do movimento da EM à reta que a liga a ERB

v é a velocidade da EM

λ_c é o comprimento de onda da frequência da portadora

Considerando o plano horizontal que representa a parte bidimensional do modelo de Aulin (1979, p.182), a n -ésima componente multi percurso que incide sobre o receptor proveniente do ponto (x_n, y_n) , com ângulo de incidência θ_n , amplitude α_n , fase ϕ_n e velocidade v_n , pode ser vista na Fig. 3.10.

O campo resultante é dado por:

$$E(t) = \sum_{n=1}^N E_n(t), \quad (3.47)$$

onde:

$$E_n(t) = \alpha_n \cos \left[w_c t - \frac{2\pi}{\lambda} [x_0 \cos(\theta_n) + y_0 \sin(\theta_n)] + \phi_n \right], \quad (3.48)$$

w_c a frequência angular da portadora,

ϕ_n é uniformemente distribuído entre 0 e 2π e $E\{|\alpha_n|^2\} = \frac{E_0}{N}$, onde E_0 é a amplitude do sinal enviado.

Figura 3.10 Plano bidimensional para cálculo do efeito Doppler

Dada a velocidade v na direção γ_n leva $(x_n, y_n) \xrightarrow{\text{para}} (v \cos(\gamma_v), v \sin(\gamma_v))$ e o campo resultante torna-se:

$$E(t) = K(t) \cos(w_c t) - Q(t) \sin(w_c t) \quad (3.49)$$

$$K(t) = \sum_{n=1}^N \alpha_n \cos(w_n t + \phi_n) \quad (3.50)$$

$$Q(t) = \sum_{n=1}^N \alpha_n \sin(w_n t + \phi_n) \quad (3.51)$$

sendo:

$$w_n = \frac{2\pi v}{\lambda_c} \cos(\theta_n - \gamma_v) \quad (3.52)$$

De acordo com o teorema do limite central $K(t)$ e $Q(t)$ são aproximadamente Gaussianas para N suficientemente grande, portanto esse processo será visto como puramente Gaussiano.

Considerando então, $E(t)$ um processo Gaussiano, este pode ser completamente caracterizada pela sua média $E\{E(t)\}$ e a sua função de auto-correlação $E\{E(t)E(t+\tau)\}$.

Como $E\{K(t)\}$ e $E\{Q(t)\}$ são nulos, a auto-correlação de $E(t)$ é dada por:

$$E\{E(t)E(t+\tau)\} = E\{K(t)K(t+\tau)\} \cos(w_c \tau) - E\{K(t)Q(t+\tau)\} \sin(w_c \tau) \quad (3.53)$$

$$E\{E(t)E(t+\tau)\} = k(\tau) \cos(w_c \tau) - q(\tau) \sin(w_c \tau) \quad (3.54)$$

onde:

$$k(\tau) = E\{K(t)K(t+\tau)\} = E\{Q(t)Q(t+\tau)\} = \frac{E_0}{2N} \sum_{n=1}^N E\{\cos(w_i \tau)\} \quad (3.55)$$

e

$$q(\tau) = E\{K(t)Q(t+\tau)\} = E\{Q(t)K(t+\tau)\} = \frac{E_0}{2N} \sum_{n=1}^N E\{\sin(w_i \tau)\} \quad (3.56)$$

assumindo θ_i uniformemente distribuído entre 0 e 2π , $k(\tau)$ é dado por:

$$k(\tau) = \frac{E_0}{2} J_0\left(\frac{2\pi v \tau}{\lambda_c}\right) \quad (3.57)$$

$$q(\tau) = 0 \quad (3.58)$$

onde $J_0(.)$ é a função de Bessel de primeira espécie e ordem zero.

O espectro Doppler ou a densidade espectral de potência de $Q(t)$ e $K(t)$ é obtida através da transformada de Fourier da função de auto-correlação $k(\tau)$ ou seja:

$$S_0(f) = \mathfrak{F}\{k(\tau)\}$$

$$S_0(f) = \begin{cases} \frac{E_0}{2} \frac{1}{2\pi} \frac{\lambda_c}{v} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(f_c \lambda_c / v\right)^2}}, & |f| \leq \frac{v}{\lambda_c} \\ 0, & \text{outros} \end{cases} \quad (3.59)$$

A Fig 3.11 mostra o gráfico da função densidade espectral de potencia (equação 3.59), da frequência Doppler, com os espalhadores distribuídos uniformemente em um raio de 100m, a distância entre a estação móvel e a estação rádio base igual a 1000m, a velocidade da estação móvel de 110Km/h e a frequência da portadora igual a 1GHz.

Figura 3.11 Densidade espectral de potencia

3.3.3 Simulação das distribuições uniforme e Gaussiana

Como objetivo de comparar o espectro de potência angular das distribuições vistas anteriormente, distribuiu-se um grande número de espalhadores com densidade uniforme e

Gaussiana, em um círculo de raio $r_0 = 100m$, cujo centro se encontra a uma distância $D = 1000m$ da estação rádio base.

O tempo necessário para um sinal sair da estação móvel, localizada no centro do círculo de espalhadores, refletir em um espalhador e chegar a estação rádio base é calculado geometricamente para cada espalhador. Da mesma forma, é utilizada a posição dos espalhadores para o cálculo do ângulo de chegada no receptor.

Optou-se por considerar a potência de cada multi percurso inversamente proporcional ao quadrado da distância percorrida

A Fig 3.13 mostra a distribuição dos espalhadores para o caso de densidade uniforme de espalhadores no círculo de raio r_0 , em função do ângulo e do tempo de chegada na estação rádio base. O resultado obtido está coerente com a função densidade de probabilidade conjunta dada pela equação 3.36, cujo gráfico é mostrado na Fig. 3.8.

A Fig. 3.14 apresenta os histogramas das potências angulares obtidas nas seguintes simulações:

- Gráfico da potência angular de uma função Laplaciana truncada é dada por:

$$P(\theta) = k_L \exp(-\sqrt{2} \frac{|\theta|}{\sigma_L}) \quad (3.60)$$

com σ_L igual a 0.758° e k_L igual a 1, de modo a se aproximar das medidas realizadas por Pedersen et al (2000, p.437) que apresentam um espalhamento angular de aproximadamente 5° .

- Gráfico da potência angular para uma distribuição uniforme em raio de espalhadores com r_0 igual a 23 m. O valor de r_0 faz com que a distribuição de potência angular aproxime-se dos valores medidos por Pedersen et al (2000, p.437).

- Gráfico da potência angular para uma distribuição uniforme em área de espalhadores para r_0 é igual a 23 m.

- Gráfico da potência angular para uma distribuição Gaussiana de espalhadores em raio com r_0 igual a 100 m e σ_s igual a 16. O valor de σ_s é determinado através de simulações, de modo a obter a melhor aproximação quando comparado com as medidas existentes.

- Gráfico da potência angular para uma distribuição Gaussiana de espalhadores em área para r_0 igual a 100 m e σ_s igual a 16.

Com base na Fig. 3.14 e Fig. 3.15, a distribuição Gaussiana de espalhadores em raio trata-se da melhor escolha para a distribuição dos espalhadores ao redor da estação móvel e para os grupos distantes. Segundo Laurila (1998, p. 267) e Fuhl et al (1998, p. 32) a distribuição Gaussiana de espalhadores é a melhor aproximação da realidade física, além do que é difícil justificar fisicamente uma distribuição uniforme.

Figura 3.12 Posição relativa dos espalhadores para uma densidade uniforme de espalhadores no círculo de raio r_0 , relativos a estação rádio base

Figura 3.13 Histograma da potência angular para diferentes distribuições de espalhadores

Figura 3.14 Histograma do espectro temporal de potência para diferentes distribuições de espalhadores

4 - O MODELO COST - 259 DCM

O relatório do Modelo COST-259 DCM (Directional Channel Model) apresentado por Correia (2001, cap. 3) é descrito neste capítulo. Este modelo de canal de propagação, com base estatística, é de grande importância para sistemas de rádio móvel que exploram processamento espaço temporal.

4.1 Descrição do Modelo

O relatório do Modelo COST-259 especifica três ambientes celulares, macro, micro e pico, cada um destes com quatro cenários diferentes. Neste estudo, somente os cenários macros celulares serão vistos, distribuídos em TU (Típico Urbano), UD (Urbano Denso), AR (Área Rural) e TA (Terreno Acidentado). O modelo COST-259 difere principalmente do modelo COST-207 nos seguintes itens:

- Inclui informações sobre as componentes de multi percurso que compõe o sinal, distribuídas de acordo com o tempo de chegada, azimuth, elevação e potência, utilizadas na simulação de redes inteligentes de antenas.
- Inclui mudança em larga escala do ambiente como: o número variável de espalhadores, a variação do fator de Rice em função da distância entre transmissor e receptor e a possibilidade de existência ou não de linha de visada entre transmissor e receptor.

4.2 Parâmetros de entrada

Para cada ambiente um conjunto de parâmetros deve ser fornecido, e os parâmetros de saída são fornecidos como função destes.

- O valor da frequência de operação em Hz
- As posições das estações móveis ou um vetor de posições (x, y), tendo como referência a posição (0,0), onde está localizada a estação rádio base.
- Altura das antenas da estação móvel e da estação rádio base, quando estes valores não são fornecidos, assume-se 1,5 m e 30 m respectivamente.
- Tipo de ambientes: Macro celular, micro celular e pico celular (somente o primeiro caso será visto neste trabalho).

- Cenário: TU (Típico Urbano), UD (Urbano Denso), AR (Área Rural) e TA (Terreno Acidentado).

4.3 Análise do modelo.

Neste capítulo os passos fundamentais envolvendo a geração dos parâmetros do simulador COST-259 serão abordados, procurando obedecer à seqüência necessária, tendo em vista que a posição da estação móvel é determinada pelo usuário.

4.3.1 Geração dos grupos de espalhadores.

Pelo menos um grupo de espalhadores é gerado, segundo o relatório, grupo este que se encontra ao redor da estação móvel localizada na posição (x, y) e possui N espalhadores. Outros grupos de espalhadores chamados de grupos adicionais também possuem N espalhadores que estão distribuídos ao redor da estação móvel ou na célula coberta pela estação rádio base

O número total de grupos de espalhadores N_{cl} utilizados é determinado através de uma distribuição de Poisson dada por:

$$N_{cl} = N_{cl\min} + N_{ad}(N_0), \quad (4.1)$$

$N_{cl\min} = 1$ é o número mínimo de grupo de espalhadores,

$N_{ad}(N_0)$ é uma variável aleatória com distribuição de Poisson e média N_0 ,

onde N_0 é o número médio de grupos adicionais, conforme mostra a tabela 4.1 na página 50, grupos estes que representam montanhas ou construções distantes e irão refletir o sinal transmitido pela estação móvel antes de chegar a estação rádio base.

Os grupos de espalhadores adicionais, quando existirem, são distribuídos em um círculo de raio igual a $d_{\max}$, círculo este que representa a área de cobertura de uma célula e é determinado como função do cenário conforme tabela 4.1 na página 50.

Sua referência é a estação rádio base posicionada no centro da célula e representada no modelo como a origem do plano (x, y) cuja coordenada é dada pela posição (0,0).

4.3.2 Cálculo do tempo de atraso, azimute e elevação dos grupos de espalhadores.

Admitindo um percurso único para cada grupo de espalhador, o atraso (τ_{gk}), o azimute θ_{gk} e a elevação (γ_{gk}), do k-ésimo grupo de espalhadores, tanto os próximos da estação móvel quanto os distantes, podem ser calculados, utilizando pura geometria, como mostra a Fig. 4.1, onde a posição (x,y) da estação móvel é fornecida. A distância $d_k = d_{k1} + d_{k2}$ que representa a distância total percorrida pelo sinal transmitido e refletido no espalhador, até chegar a antena do receptor pode facilmente ser calculada.

Figura 4.1: Posição da EM, dos espalhadores próximos e distantes.

4.3.3 Cálculo do espalhamento temporal, espalhamento do azimute e potência dos espalhadores.

A partir dos dados obtidos do tempo de atraso da chegada (τ_{gk}), do azimute (θ_{gk}) e da elevação (γ_{gk}), as distribuições dos espalhadores em termos de espalhamento temporal ($\sigma_{\tau k}$), espalhamento do azimute ($\sigma_{\theta k}$) e a perda de potência por sombreamento (P_{gk}), pode ser obtida por:

$$P_{gk}[dB] = \sigma_d * X - L_k \quad \text{em dB} . \quad (4.2)$$

$$\sigma_{\theta k} = \sigma_{\theta med} * 10^{[\sigma_{\theta} * Y / 10]} \quad \text{em graus} \quad (4.2.1)$$

$$\sigma_{\tau k} = \sigma_{\tau med} * di^{eg} * 10^{[\sigma_{\tau} * Z / 10]} \quad \text{em segundos} . \quad (4.2.2)$$

P_{gk} é a potencia do k-ésimo grupo de espalhadores

$\sigma_{\tau k}$ é o espalhamento temporal do k-ésimo grupo de espalhadores

$\sigma_{\theta k}$ é o espalhamento angular do k-ésimo grupo de espalhadores.

Estes valores estão correlacionados conforme coeficientes abaixo:

$\rho_{\tau\theta}$ = coeficiente de correlação entre espalhamento temporal e de azimuth, 0.5.

$\rho_{\sigma\tau}$ = coeficiente de correlação entre desvanecimento lognormal e de azimuth, -0.75.

$\rho_{\sigma\theta}$ = coeficiente de correlação entre desvanecimento lognormal e espalhamento temporal, -0.75.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \rho_{\sigma\tau} & \rho_{\sigma\theta} \\ \rho_{\sigma\tau} & 1 & \rho_{\tau\theta} \\ \rho_{\sigma\theta} & \rho_{\tau\theta} & 1 \end{bmatrix}^{1/2} \begin{bmatrix} Gw_1(.) \\ Gw_2(.) \\ Gw_3(.) \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Onde $Gw_1(.)$, $Gw_2(.)$ e $Gw_3(.)$ são variáveis randômicas Gaussianas independentes de média 0 e variância 1 e os valores obtidos de X , Y e Z são variáveis randômicas correlacionadas.

Este modelo é baseado em no trabalho de Greenstein et al (1997, p. 477), com modificações introduzidas pelo COST 259, onde “ eg ” na equação 4.2.2 é o fator de correlação entre o espalhamento temporal e o desvanecimento, assume-se $eg = 0.5$ para os cenários TU, UD e AR e 1 para TA.

Os valores de L_k utilizados na equação 4.2 são determinados da seguinte forma:

$$L_k = L_1 + L_{ad} \text{ [dB]} \quad (4.4)$$

$$L_{ad} = U(0,20) + (\tau_k - \tau_0) / \mu s \text{ [dB]} \quad (4.5)$$

Sendo L_1 a perda de potência média determinada por COST 231 WI ou COST 231 Hata, como visto no capítulo 2, adicionando a perda por sombreamento, L_{ad} representam as perdas adicionais de potencia por grupo de espalhadores, determinada pela equação 4.5, onde $U(0,20)$ é uma variável randômica uniformemente distribuída entre 0 e 20, τ_k é o tempo de

atraso do k-ésimo grupo de espalhadores e τ_0 é o tempo de atraso referente a distância entre a estação móvel e a estação rádio base, dividido pela velocidade de propagação.

4.3.4 Polarização das componentes múltiplo percurso

A característica da diversidade na polarização é normalmente descrita através da discriminação polar cruzada (XPD), que é o desbalanceamento entre as polarizações, e definida como a relação entre a potência média recebida na polarização vertical e a potência média recebida na polarização horizontal, dado que a polarização vertical foi transmitida, dada por:

$$XPD = \frac{P_v}{P_h} \quad (4.6)$$

Estes parâmetros são extremamente dependentes do ambiente do canal e variam conforme a localização.

Figura 4.2 Reflexão do sinal vertical

A variação da XPD é definida como uma variável aleatória Gaussiana dada por:

$$XPD \cong N[\mu_{XPD}, \sigma_{XPD}] [dB], \quad (4.7)$$

onde μ_{XPD} é a média, e σ_{XPD} é o desvio padrão da distribuição normal, ambos em dB .

4.3.5 Desvanecimento Lento

O desvanecimento lento é causado na maioria dos casos por grandes objetos refletores e difratores ao longo do caminho da propagação do sinal.

Caracterizado na literatura por uma função de distribuição unidimensional, que pode ser aproximada por uma distribuição lognormal segundo Gudmundson (1991, p. 2145), o

desvanecimento lento é obtido gerando uma variável aleatória gaussiana e multiplicando-a pelo valor de sigma em dB, obtendo desta forma uma variável lognormal, que para ambientes macro-celulares é correlacionada por uma função exponencial. Os valores de sigma (σ_{df} em dB), e da distância de decorrelação (L_{sdf} em metros), são função do ambiente e o resultado em dB é adicionado à perda de percurso.

4.3.6 Probabilidade de linha de visada

A probabilidade de linha de visada no COST259 tem função dada por:

$$\Pr_{lv} = \begin{cases} \frac{h_{ERB} - h_0}{h_{ERB}} \frac{d_{CO} - d}{d_{CO}} & d < d_{CO} \quad e \quad h_{ERB} > h_0 \\ 0 & d \geq d_{CO} \quad ou \quad h_{ERB} \leq h_0 \end{cases} \quad (4.8)$$

onde d é a distância entre o transmissor e o receptor, h_{ERB} é a altura da antena da estação rádio base, h_0 é a altura média dos edifícios e d_{CO} é a distância de corte, ou seja, é a distância a partir da qual a probabilidade de linha de visada é nula.

Para que haja probabilidade de linha de visada d deve ser menor que d_{CO} como mostra a equação 4.8, cujo gráfico pode ser visto na figura 4.3.

4.3.7 Desvanecimento rápido

O desvanecimento rápido é o resultado da superposição dos diversos multi percurso vindos de diferentes caminhos e, portanto, com diferentes atrasos e deferentes ângulos de chegada. Em sistemas macro-celulares a relação entre a potência do sinal direto entre a estação móvel e a estação rádio base e a somatória das potência das componentes multi percurso é derivada do fator de Rice “ K_{Rice} ”.

Obviamente um valor alto de K_{Rice} implica em potência de linha de visada (P_{LDV}) alta, e para $K_{Rice} \rightarrow 0$ implica em uma distribuição de Rayleigh.

Portanto o fator de Rice é caracterizado por dois parâmetros: a potência do sinal direto (P_{LDV}), e a potência dos sinais multi percurso (P_{SLDV}).

$$K_{Rice} = P_{LDV} / P_{SLDV} \quad (4.9)$$

No relatório COST 259 o fator de Rice está relacionado com a probabilidade de linha de visada.

Figura 4.3 Probabilidade de ocorrência de linha de visada

O fator de Rice é modelado como uma distribuição lognormal cuja média depende do excesso de perda de potência (EPL em dB):

$$EPL(d) = L_1 - 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) \quad [dB] \quad (4.10)$$

sendo dado pro:

$$K_0(EPL) = N \left(\frac{26 - EPL[dB]}{6}, 6 \right) \quad [dB] \quad (4.11)$$

4.3.8 Modelamento das componentes multi percurso

As componentes multi percurso de cada grupo de espalhadores apresentam uma densidade de probabilidade para o atraso e para o ângulo de chegada dada por:

$$p(\tau, \theta) = \frac{1}{\sigma_{\tau k}} \exp\left(-\frac{\tau}{\sigma_{\tau k}}\right) * \frac{1}{\sigma_{\theta k}} \exp\left(-\sqrt{2} \left| \frac{\theta}{\sigma_{\theta k}} \right| \right) \quad (4.12)$$

onde $\sigma_{\tau i}$ e $\sigma_{\theta i}$ foram obtidos pela equação 4.2.

Esta função é exponencial no atraso e Laplaciana no azimute como pode ser visto na Fig. 4.5 e Fig. 4.6.

Figura 4.4 Distribuição da potência angular implementada no COST 259 comparada com a distribuição Laplaciana com σ igual a 0.758, de modo a tornar-se compatível com a Fig. 3.14

Figura 4.5 Distribuição da potência em função do tempo no COST 259

Tabela 4.1. Parâmetros específicos para os diferentes cenários.

Parâmetros				
	TU	UD	AR	TA
Média de células adicionais, N_0	0.17	1.18	0.06	1.18
Máxima distância do cluster, $d_{\max}$ [m]	3000	3000	5000	5000
Raio de visibilidade da célula, RD [m].	100	100	300	300
Transição de visibilidade LD [m]	20	20	20	20
Corte de linha de visada D_{cor} [m]	500	500	5000	5000
Altura média dos edifícios h_0 [m]	15	30	5	5
Desvanecimento lognormal σ_d [dB]	9	9	6	6
Distância de decorrelação do desvanecimento lognormal $L_{\sigma d}$ [m]	5.5-11	5.5-11	500	500
Tempo médio de atraso do cluster a 1km $\sigma_{\tau med}$ [s]	$0.4 \cdot 10^{-6}$	$0.4 \cdot 10^{-6}$	$0.4 \cdot 10^{-6}$	$0.4 \cdot 10^{-6}$
Taxa de espalhamento temporal eg	0.5	0.5	0.5	0.5
Desvio padrão do espalhamento temporal $\sigma_{\sigma\tau}$ [μs]	2	2	2	2
Espalhamento médio de azimuth $\sigma_{\theta med}$ [deg.]	10	10	15	5
Desvio padrão do espalhamento de azimuth $\sigma_{\sigma\theta}$ [deg]	2	2	2	2
Distância de correlação do espalhamento de azimuth $L_{\sigma\varphi}$ [m]	60	60	60	60
Correlação entre desvanecimento lento e atraso temporal $\delta_{\sigma\tau}$	-0.75	-0.75	-0.75	-0.75
Correlação entre desvanecimento lento e espalhamento de azimuth $\delta_{\sigma\varphi}$	-0.75	-0.75	-0.75	-0.75
Correlação entre atraso temporal e espalhamento de azimuth $\delta_{\tau\varphi}$	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5
XPD valor médio μ_{XPD}	6	6	12	12
XPD desvio padrão σ_{XPD}	6	6	3	3

5 - A FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Diversos são os modelos e ferramentas de simulação de canal de propagação para ambiente macro celular. Os modelos geométricos como o de Lee (1982, p. 192), Stapleton et al (1994, p.1789), Petrus et al (2002, p. 1197), Libert e Rappaport (1996, p. 844), entre outros apresentam grupos de espalhadores que estão distribuídos com diferente densidade de probabilidade, em uma região cuja forma geométrica é pré-definida, na maioria dos casos circular e ao redor da estação móvel. Outro modelo também geométrico, porém com distribuição hiperbólica de espalhadores é apresentado por Mahmoud (2002, p. 211). Este modelo não delimita a região onde os espalhadores se encontram, podendo ocorrer reflexões em qualquer local da célula coberta pela estação rádio base, neste caso os espalhadores distantes são em menor números e não estão em grupos. O Modelo COST-259DCM (Directional Channel Model) [13], explora o processamento tempo espaço baseado em modelo estatístico de canal, com espalhadores ao redor da estação móvel, e grupo de espalhadores distantes adicionais.

No ambiente macro-celular como visto na Fig. 5.1, os grupos de espalhadores ocorrem ao redor da estação móvel, esses espalhadores são denominados espalhadores locais, ou em locais distantes que podem ser formados por edifícios ou montanhas, com linha de visada simultânea entre a estação rádio base e a estação móvel, denominados espalhadores distantes. Desta forma uma ferramenta de simulação deve prever estes acontecimentos para o ambiente macro celular.

Figura 5.1 Um modelo de ambiente macro-celular

Esta ferramenta de simulação computacional de canal de propagação aqui apresentada, tem por objetivo fornecer informações como:

- A potencia média no local onde se encontra a estação móvel.
- A direção, fase e tempo de chegada dos sinais na antena da estação rádio base, vindos da estação móvel, dos espalhadores próximos e dos grupos de espalhadores distantes.
- A variação do canal de comunicação (desvanecimento rápido e lento), à medida que a estação móvel se desloca.

5.1 A perda média de potência na propagação

Para o ambiente macro-celular, o modelo de perda de potência utilizado será o COST231-Hata para Área Rural e Terreno Acidentado, e COST231 Walfisch-Ikegami para áreas Tipicamente Urbano e Urbano Denso com linha de visada (LdV) e sem linha de visada (SLdV). O modelo de Hata, originalmente restrito a uma gama de frequência entre 150 e 1500 MHz, conforme visto anteriormente, foi modificado para ser aplicado em sistemas que operam entre 1800 e 1900 MHz, este novo modelo é chamado COST 231-Hata estendido, que juntamente com o anterior pode ser utilizado com os seguintes parâmetros:

Frequência: 150-1500 MHz e 1800-2000 MHz

Altura da antena da Estação Base: 30-200 m

Altura da antena da estação móvel: 1-10 m

Distância: 1-20 km

O modelo COST-Walfisch-Ikegami, adotado pelo COST 231 é uma combinação do método Walfidch-Bertoni com o método de Ikegami, podendo ser utilizado dentro das seguintes faixas de parâmetros:

Frequência: 800 – 2000 MHz

Altura da antena da Estação Base: 4 – 50 m

Altura da antena da estação móvel: 1 - 3 m

Distância: 0.02 - 5 Km

A implementação pode ser vista no apêndice A com as seguintes funções: COST231wi.m, Hata.m, RTSCOSTt231.m e MDSCOSTt231.m. A Fig. 5.2 mostra um

exemplo de utilização destas funções para altura da antena da estação móvel e da estação rádio base iguais a 1,5 m e 30 m respectivamente.

Figura 5.2 Perda média de potência em função da distância para uma frequência de 900 MHz para os três modelos de perda de potência adotados.

5.2 O desvanecimento em larga escala ou lento

O termo desvanecimento em larga escala denota a variação da amplitude média ou da potência média do sinal recebido quando a posição da estação móvel varia da ordem de algumas dezenas de comprimento de onda. Esse valor médio se mantém aproximadamente constante para pequenas variações no espaço.

A amplitude média do desvanecimento rápido segue uma distribuição lognormal, segundo medidas realizadas Gudmundson (1991, p. 2145) na Europa utilizando a frequência de 900 MHz em áreas suburbanas e urbanas, levaram a estabelecer uma distância de correlação de 27 m.

Para gerar esse processo aleatório em função da distância, é sorteada uma variável aleatória Gaussiana independente, para cada posição especificada da estação móvel, que é filtrada por um filtro digital com resposta dada por:

$$h(n) = e^{-an} \sqrt{1 - e^{-2an}} U(n) \quad (5.1)$$

sendo:

$\alpha = \Delta x / L_{\sigma d}$, onde Δx é o passo de discretização espacial

Um exemplo de utilização do programa Lognormal_desvan_lento.m para ambiente típico urbano é apresentado na figura 5.3. Ao valor obtido deve ser adicionada a potência no local onde se encontra a estação móvel.

Figura 5.3 Desvanecimento lognormal correlacionado

5.3 Geração do número de grupos adicionais de espalhadores e suas localizações

O número de grupos de espalhadores adicionais (além do grupo ao redor da estação móvel), é modelado por uma variável aleatória com distribuição de Poisson de média N_0 . O valor de N_0 é dado pela tabela 5.1 na página 61, para os diferentes cenários

Para a simulação macro-celular, objetivo deste trabalho, o número de grupos de espalhadores adicionais é gerado pela função “poissrnd.m”. A distribuição desses grupos é

uniforme na célula coberta pela estação rádio base, suas posições, quando existirem, serão geradas pela função “posi_grupos_espalhadores.m”. Após a geração do número de grupos de espalhadores e das suas respectivas posições, a função “criacao_do_grupo.m” gera os espalhadores de cada grupo, com uma distribuição Gaussiana, como visto no cap. 4, fornecendo todos os azimutes (θ), todas as distâncias entre a estação rádio base e os espalhadores (ρ), e a distância entre a estação móvel e cada um dos espalhadores (d).

Um exemplo de utilização desta função está mostrado na Fig. 5.4, para o cenário urbano denso, onde 4 grupos de espalhadores são distribuídos em uma célula coberta pela estação rádio base no centro.

Figura 5.4 Célula com 3 grupos de espalhadores adicionais, além do grupo ao redor da estação móvel. A seção em destaque mostra os espalhadores distribuídos gaussianamente em um dos grupos

5.4 Probabilidade de linha de visada

A probabilidade de linha de visada a ser utilizada será a mesma implementada no relatório COST 259 publicado por Correia (2001, cap. 3), cuja função de probabilidade é dada por:

$$P_{LV} = \begin{cases} \frac{h_{ERB} - h_B}{h_{ERB}} \frac{d_{CO} - d}{d_{CO}}, & d < d_{CO} \quad e \quad h_{ERB} > h_0 \\ 0 & d \geq d_{CO} \quad ou \quad h_{ERB} \leq h_0 \end{cases}, \quad (5.2)$$

e implementada no programa “prob_de_visada.m”.

Nessa equação d é a distância entre a estação rádio base e a estação móvel, h_{ERB} é a altura da antena da estação rádio base, h_B é a altura média dos edifícios e d_{CO} é a distância de corte ou a máxima que a estação móvel deve estar para que haja probabilidade de linha de visada.

Os parâmetros h_{ERB} e h_B quando não especificados são assumidos como 30 m e 1.5 m respectivamente.

O valor de P_{LV} também será utilizado na simulação do aparecimento e desaparecimento da linha de visada (seção 5.8).

5.5 Desvanecimento rápido

O canal de comunicação com desvanecimento rápido possui uma resposta impulsiva que muda rapidamente quando comparada com o comprimento de onda, ou seja, a amplitude, a fase e tempo de atraso de qualquer componente multi percurso possui uma variação mais rápida que a taxa de mudança do sinal transmitido.

O desvanecimento rápido lida com a mudança nas características do canal devido ao movimento da estação móvel.

A amplitude do desvanecimento é modelada por uma distribuição de Rice quando existe uma componente dominante no sinal e segue uma distribuição Rayleigh quando não existe linha de visada ou uma componente dominante.

No canal de rádio móvel o fator de Rice (K_{Rice}), é caracterizado por dois parâmetros: a potência de linha de visada (P_{LdV}) ou potência recebida na ERB vinda diretamente da EM e a potencia sem linha de visada (P_{SLdV}) que é a somatória das potencias dos espalhadores pertencentes ao primeiro grupo de espalhador localizado ao redor da estação móvel. A figura 5.5 exemplifica a componente dominante e os multi percursos na forma fasorial, onde g é a componente resultante, g_{SLdV} é a componente resultante da somatória dos diversos multi

percursos g_{esp} pertencentes ao primeiro grupo de espalhadores e g_{LdV} é a componente dominante.

Figura 5.5 Representação fasorial das componentes multi percurso

A potencia total do sinal é dada por:

$$P_T = P_{g_{LdV}} + P_{g_{esp}} \quad (5.3)$$

ou seja:

$$P_T = \frac{1}{2} E[|g|^2] = \frac{1}{2} |g_{LdV}|^2 + \frac{1}{2} E[|g_{esp}|^2] = \frac{E_0^2}{2} + \sigma_k^2 \quad (5.4)$$

portanto,

$$K_{Rice} = \frac{P_{g_{LdV}}}{P_{g_{esp}}} = \frac{E_0^2}{2\sigma_k^2} \quad (5.5)$$

$$P_T = \sigma_k^2 (K_{Rice} + 1) \quad (5.6)$$

No relatório COST259 o fator de Rice é modelado pela seguinte expressão:

$$K_{Rice}(EPP) = N\left(\frac{26 - EPL(d)}{6}, 6\right) [dB] \quad (5.7)$$

$$EPP(d) = L_1 - 20 \log_{10}\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) [dB] \quad (5.7.1)$$

Nessa $EPP(d)$ é o excesso de perda de potencia, L_1 é a perda média de potência no local onde se encontra a estação móvel, d é a distância entre transmissor e receptor, λ o comprimento de onda e $N(\mu, \sigma)$ representa uma variável aleatória Gaussiana com média μ e desvio σ .

Na simulação do desvanecimento rápido a probabilidade de linha de visada (equação 5.5) e a distância de corte podem ser levados em consideração na determinação do fator de

Rice e sua variação ao longo da trajetória da EM. A presença ou não de linha de visada determina o valor da perda adicional L_1 que determina o valor médio de K_{Rice} .

A simulação do desvanecimento rápido mostrado na Fig. 5.6 foi realizado nas seguintes condições: distância percorrida entre 50 e 55 m, cenário UD, raio do grupo de espalhadores próximos igual a 100 m, número de espalhadores por grupo igual a 50, frequência da portadora igual a 900MHz. O gráfico contínuo foi simulado com $K_{Rice} = 0dB$ e o gráfico pontilhado com $K_{Rice} = -10dB$.

Figura 5.6 Simulação do desvanecimento rápido para diferentes valores do fator de Rice

5.6 Potência dos grupos de espalhadores distantes

A potência de cada um dos grupos de espalhadores adicionais, cujo número já foi definido, será dada por:

$$L_i = L_1 + L_{ad} \quad [dB], \quad (5.8)$$

$$L_{ad} = U(0,20) + (\tau_i - \tau_0) / \mu s \quad [dB], \quad (5.8.1)$$

sendo $U(0,20)$ é uma variável aleatória uniformemente distribuída entre 0 e 20 em dB.

τ_0 o tempo que o sinal leva para percorrer a distância entre a estação móvel e a estação rádio base, τ_i é o tempo médio que as componentes multi percurso de cada grupo distante levam

para percorrer a distância entre o i -ésimo grupo de espalhadores e a estação rádio base mais a distância entre elas e a estação móvel e L_1 é a perda média de potência na propagação.

Para o i -ésimo grupo de espalhador distante, quando existir, a potência total é soma das j -ésimas componentes multi percurso.

$$\sigma_i^2 = \frac{1}{2} E \left\{ \sum_j^N |g_j(d)|^2 \right\}. \quad (5.9)$$

5.7 Polarização das componentes multi percurso

Segundo Ludwig [27] a definição de polarização cruzada aceita como padrão pelo IEEE é a polarização ortogonal a polarização de referência.

A utilização da polarização ortogonal em sistemas de comunicação fornece dois canais de comunicação para uma mesma banda de frequência, por isso o interesse da polarização em diagramas de radiação das antenas.

Nos canais de comunicação móvel os espalhadores que geram a propagação dos multi percursos também causam uma polarização randômica do sinal segundo Toftgard e Eggers [28], tradicionalmente descrita como polarização cruzada (XPD).

Ela é definida como a relação entre a potência média recebida na polarização vertical e a potência média recebida na polarização horizontal dado que a vertical foi transmitida.

$$XPD = \frac{P_{vv}}{P_{vh}}. \quad (5.10)$$

Segundo o relatório COST 259, as componentes horizontal e vertical do sinal recebido são não correlacionadas e a distribuição proposta para o XPD e também a ser utilizada na ferramenta de simulação é dada por:

$$XPD = N(\mu_{XPD}, \sigma_{XPD}) \text{ [dB]} \quad (5.11)$$

onde μ_{XPD} é a média e σ_{XPD} é o desvio padrão da distribuição normal, ambos em dB cujos valores podem ser encontrados na tabela 5.1 para diferentes cenários.

O vetor variável aleatória Gaussiana XPD é passa por um filtro digital conforme equação 5.1 para $L_{\sigma_{XPD}}$ dado pela tabela 5.1

5.8 Aparecimento e desaparecimento de Linha de visada

A simulação do nascimento e morte da linha d visada entre a ERB e a EM à medida que esta percorre uma distância w_d dentro da região de visibilidade (distância menor que a distância de corte de visibilidade, D_{cor}), é determinada através do conceito de Regiões de Visibilidade (RV).

Cada região de visibilidade terá o seu centro coincidindo com uma posição do vetor deslocamento da EM e um raio igual à região de visibilidade R_D .

O número de áreas de visibilidade N_{AV} ao longo do percurso é dado por:

$$N_{AV} = P_{LV} w_d / R_D \quad (5.12)$$

onde P_{LV} é o valor obtido da função de probabilidade de linha de visada dado pela equação 5.5 e w_d é o comprimento do percurso para distância abaixo da distância de corte, D_{cor} .

Para a distribuição das N_{AV} áreas de visibilidade será utilizada a função distribuição de probabilidade da linha de visada.

O conceito de região de visibilidade também será utilizada para os grupos distantes, existindo neste caso uma região de visibilidade para cada grupo distante tornando-se ativo quando a EM entra na região correspondente.

No caso em que $w_d \ll R_D$ a existência ou não de LdV será gerada estatisticamente por uma distribuição uniforme entre 0 e 1, existirá linha de visada quando esta variável for maior ou igual a média de P_{LV} no percurso w_d .

As regiões de visibilidade são áreas circulares de raio R_D e a entrada e saída destas regiões é suavizada pela função:

$$f(x, y) = 1 - \exp(-C) \quad (5.13)$$

para:

$$C = \begin{cases} R_D + 2L_p - \sqrt{(x - x_p)^2 + (y - y_p)^2} \geq 0 \\ 0 & \text{outros} \end{cases} \quad (5.13.1)$$

onde (x, y) é o vetor de posição da EM e (x_p, y_p) é o centro da região de visibilidade.

Tabela 5.1. Parâmetros específicos para simulação dos diferentes cenários.

Parâmetros				
	TU	UD	AR	TA
Média de células adicionais, N_0	0.17	1.18	0.06	1.18
Máxima distância do grupo, $d_{\max}$ [m]	3000	3000	5000	5000
Raio de visibilidade, RD [m]	100	100	300	300
Transição de visibilidade LD [m]	20	20	20	20
Corte de linha de visada D_{cor} [m]	500	500	5000	5000
Altura média dos edifícios H_b [m]	15	30	5	5
Desvanecimento lognormal σ_d [dB]	9	9	6	6
Distância de decorrelação do desvanecimento lognormal $L_{\sigma d}$ [m]	11	11	500	500
Distância de correlação dos espalhadores $L_{\sigma d}$ [m]	60	60	60	60
XPD valor médio μ_{XPD}	6	6	12	12
XPD desvio padrão σ_{XPD}	6	6	3	3
Distância de correlação da XPD $L_{\sigma XPD}$ [m]	8	8	8	8

6 - SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Esta ferramenta de simulação computacional de canal de comunicação para ambiente macro celular foi implementada em linguagem de programação Matlab® cuja lista completa de funções pode ser vista no Apêndice A.

Para a utilização desta ferramenta dois passos básicos são necessários: o primeiro deve definir o ambiente de simulação e o segundo as simulações a serem realizadas.

A posição da estação móvel, determinada através do vetor de posições, será a localização na qual o canal será simulado. Para uma segunda simulação com os mesmos parâmetros de entrada, os resultados serão diferentes mas estatisticamente similares.

6.1 Definição do ambiente

Neste passo devem ser definidas as propriedades do ambiente no qual o canal será simulado, especificando os parâmetros abaixo relacionados na função Def_amb_simulacao.m.

- Tipo de cenário: TU - Típico Urbano, UD - Urbano Denso, AR - Área Rural e TA - Terreno Acidentado. A variável “Parametro.cenario” deve ser definida igual ao cenário a ser simulado
- Frequência da portadora: a variável “Parametro.Fc” deve indicar a frequência a ser utilizada.
- Vetor de posições: a variável “Parametro.vetor” fornece o vetor de posições da estação móvel dado pelos pares (x,y) no plano horizontal.
- Altura da antena da estação móvel: a variável “Parametro.EMh” especifica a altura da antena da estação móvel, este valor quando não definido é considerada igual a 1.5 m.
- Altura da antena da estação rádio base: a variável “Parametro.ERBh” especifica a altura da antena da estação rádio base, este valor quando não definido é considerada igual a 30 m.

Para diferentes tipos de cenário, diferentes parâmetros serão utilizados na simulação, os valores destes parâmetros podem ver vistos na tabela 5.1.

A cada simulação realizada é gerada uma célula com um ou mais grupos de espalhadores, linha de visada, desvanecimento rápido e lento. Estas informações são

utilizadas para calcular as características do canal em cada posição (x, y) do vetor de posições da estação móvel.

6.2 Tipos de simulações e resultados

Como a simulação do canal de propagação através desta ferramenta é complexa e geral, portanto, podem ser geradas informações não necessárias para uma simulação particular, além do tempo despendido para a obtenção destes valores, foram introduzidos vetores de habilitação para que apenas os testes de interesse sejam realizados.

Os parâmetros básicos para uma simulação são habilitados na função `Def_amb_simulacao.m`. Uma lista básica dos parâmetros a serem habilitados ou não com a descrição dos resultados a serem obtidos é especificada a seguir:

6.2.1 Simulação de Perda media de potência

O parâmetro `Simulacao.Perdar_media_de_potencia` quando habilitada calcula a perda média de potência em cada ponto do percurso determinado pelo vetor de posições conforme especificado no item 5.1 e mostrado na Fig. 5.2.

6.2.2 Simulação do desvanecimento lento

A simulação do desvanecimento lento conforme descrito no item 5.2 ocorre quando o parâmetro `Simulacao.Desvanecimento_lento` está habilitado.

Os resultados obtidos para uma simulação no cenário AR ou TA pode ser visto na Fig 6.1, para esta simulação foram utilizados os seguintes parâmetros:

- O vetor de posições da estação móvel simula um percurso cuja direção é radial em relação a estação rádio base e a distância percorrida pode ser vista na Fig 6.1
- A variância do sinal obtido, conforme Fig. 6.1 confirma os valores da tabela 5.1.
- A Fig. 6.2 mostra um histograma do sinal obtido, confirmando que o sinal é lognormal.
- A frequência utilizada foi de 900 MHz
- A distância de correlação é especificada conforme cenário e pode ser obtida na tabela 5.1

Figura 6.1 Resultados obtidos na simulação do desvanecimento lento para o ambiente AR ou TA

Figura 6.2 Histograma do sinal obtido para uma simulação do desvanecimento lento

Os resultados obtidos para uma simulação no cenário AR ou TA pode ser visto na Fig. 6.3, para esta simulação foram utilizados os seguintes parâmetros:

- O vetor de posições da estação móvel simula um percurso cuja direção é radial em relação a estação rádio base e a distância percorrida pode ser vista na Fig 6.3
- A variância do sinal obtido, conforme Fig. 6.3 confirma os valores da tabela 5.1.
- A Fig. 6.4 mostra um histograma do sinal obtido, confirmando que o sinal é lognormal.
- A frequência utilizada foi de 900 MHz
- A distância de correlação é especificada conforme cenário e pode ser obtida na tabela 5.1

Figura 6.3 Resultados obtidos na simulação do desvanecimento lento para o ambiente TU ou UD

Figura 6.4 Histograma do sinal obtido para uma simulação do desvanecimento lento

6.2.3 Simulação do desvanecimento rápido

Quando o parâmetro `Simulação.Devanecimento_rápido` está habilitado são geradas as componentes fase e quadratura provenientes do sinal espalhados nos espalhadores próximos a EM. Estes valores são gerados para cada ponto do vetor de posições fornecido.

Um exemplo de simulação para o cenário UD pode ser visto na Fig. 6.5, para esta simulação foram utilizados os seguintes parâmetros:

- O vetor de posições da estação móvel simula um percurso cuja direção é radial em relação a estação rádio base e a distância percorrida pode ser vista na Fig 6.5
- O sinal obtido é a somatória das componentes multi percurso para um fator de Rice que determine um canal Rayleigh
- A frequência utilizada foi de 900 MHz

Figura 6.5 Simulação do desvanecimento rápido acrescido da perda média de potência

Figura 6.6 Histograma do sinal obtido para uma simulação do desvanecimento rápido

Figura 6.7 Densidade espectral de potencia das componentes multi percurso, gerando desta forma o efeito Doppler a medida que a EM se desloca.

6.2.4 Simulação espacial

O parâmetro Simulação.Espacial quando habilitado gera os parâmetros mostrados na tabela 6.1.

Tabela 6.1 Parâmetros gerados na simulação espacial

```
G.Numero_de_grupos: 2
G.Distante_Azimuth: [50x2 double]
G.Distante_Azimuth_med: [-6.862112e-002 2.634842e+000]
G.Distante_Elevacao: [50x2 double]
G.Distante_Elevacao_med: [4.254814e-002 3.890991e-002]
G.Distante_Rho: [50x2 double]
G.Distante_Tau: [100x101 double]
G.Distante_Tau_med: [2x101 double]
G.Tau_0: [1x101 double]
G.Proximo_Azimuth: [50x101 double]
G.Proximo_Azimuth_med: [1x101 double]
G.Proximo_Elevacao: [50x101 double]
G.Proximo_Elevacao_med: [1x101 double]
G.Proximo_Tau: [50x101 double]
G.Proximo_Tau_med: [1x101 double]
```

Nesta simulação são gerados dois grupos adicionais, além do grupo ao redor da EM. Os resultados são relativos à ERB.

Os resultados G.Distante se referem aos grupos de espalhadores distantes quando estes existirem, G.Próximo se refere ao grupo de espalhadores próximo a EM, G.Tau ao tempo que o sinal leva para percorrer a distância entre a EM e a ERB a G.Numero_de_grupos mostra o número de grupos adicionais gerados na simulação.

6.2.5 Simulação da variação do fator de Rice

O parâmetro Simulação.Variação_fator_de_rice quando habilitado varia o fator de rice de acordo com a equação 5.14. O fator de Rice influi diretamente na potência das componentes multi percurso do grupo próximo e na potência do sinal direto entre a estação móvel e a estação rádio base, conforme descrito no item 5.5.

Um exemplo de variação do fator de rice para um cenário UD com nascimento e morte de linha de visada é mostrado na Fig. 6.8

Figura 6.8 Variação do fator de Rice como função do nascimento e morte de LdV

6.2.6 Simulação aparecimento e desaparecimento de LdV dos grupos distantes

A medida que a EM se movimenta em uma célula os grupos de espalhadores distantes podem se tornar visíveis ou não se o parâmetro `Simulação.Nascimento_e_morte_grupos` estiver habilitado. A potência dos grupos de espalhadores distantes é determinada conforme o item 5.6, equação 5.15 e 5.16. No exemplo de simulação mostrado na figura 6.9, para 3 grupos distantes, ao desvanecimento lento é adicionada a perda média de potência na propagação. Nesta simulação foram utilizados os seguintes parâmetros:

- O vetor de posições da estação móvel simula um percurso cuja direção é radial em relação a estação rádio base e a distância percorrida pode ser vista na Fig 6.9
- O sinal obtido é a somatória das componentes multi percurso de cada grupo distante
- A frequência utilizada foi de 900 MHz e o cenário é o UD

Figura 6.9 Regiões de visibilidade dos grupos distantes e suas respectivas potência

6.2.7 Simulação da polarização cruzada

A simulação da polarização cruzada (XPD) segue a descrição do item 5.7 e a equação 5.19. A simulação da XPD será realizada quando o parâmetro `Simulação.Polarizacao_`

crusada_XPD estiver habilitado. Nesta simulação são geradas as componentes verticais e horizontais dos sinais que chegam a estação rádio base, emitido pela estação móvel e por todos os multi percursos. Nesta simulação foram utilizados os seguintes parâmetros:

- O vetor de posições da estação móvel simula um percurso cuja direção é radial em relação a estação rádio base e a distância percorrida pode ser vista na Fig 6.10
- Os sinais obtidos são as componentes vertical e horizontal do sinal recebido pela estação rádio base
- A frequência utilizada foi de 900 MHz e o cenário é o UD
- A esta simulação foram acrescentados o nascimento e morte de LdV e o desvanecimento lento.

Figura 6.10 Simulação do XPD gerando as componentes verticais e horizontais acrescentado do nascimento e morte de LdV e do desvanecimento lento

6.2.8 Simulação do aparecimento e desaparecimento de LdV entre a EM e a ERB

Quando o parâmetro Simulação.Nascimento_e_morte_LdV estiver habilitado a simulação do aparecimento e desaparecimento da LdV entre a EM e a ERB é realizado.

Nesta simulação são geradas regiões de visibilidade levando-se em consideração a função probabilidade de linha de visada definida pela equação 5.5. A Fig 6.11 mostra o fator

de multiplicação do desvanecimento do sinal transmitido pela estação móvel até chegar a estação rádio base para um cenário TA e uma distância percorrida entre 200 e 6000 m, este fator gera a transição de potência entre LdV e SLdV.

Figura 6.11 Transição de Linha de visada entre a ERB e a EM para um cenário TA

7 - CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Nesta dissertação de mestrado é apresentada uma ferramenta de simulação computacional de canal de comunicação para ambiente macro celular baseado em modelos geométricos e estatísticos que explora os conceitos espaciais.

Os grupos de espalhadores com distribuição Gaussiana em raio, tanto no grupo próximo a EM quanto nos grupos distantes, fornece uma boa aproximação angular e temporal na distribuição de potência quando comparada com as medidas realizadas.

O desvanecimento rápido aparece naturalmente como função da variação das componentes multi percurso à medida que a estação móvel se desloca na célula, o mesmo acontecendo com o efeito Doppler.

A implementação do aparecimento e desaparecimento da linha de visada influi diretamente no fator de Rice e, portanto, na relação de potência entre o sinal da EM e das componentes multi percurso que chegam à ERB.

Os parâmetros gerados caracterizam um canal de rádio realista para simulação da terceira e quarta geração de telefonia celular que explora a diversidade espacial.

Para trabalhos futuros sugere-se a implementação dos cenários micro e pico celular a esta ferramenta, de modo a caracterizar os ambientes internos e a simulação do desvanecimento rápido quando não existe variação na posição da EM.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

ALLSEBROOK, K., PARSONS, J. D., “Mobile Radio Propagation in British Cities at Frequencies in the VHF and UHF Bands” IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 26, no. 4, pp. 313-322, Nov. 1977.

AULIM, T., “A Modified Model for Fading Signal at a Mobile Radio Channel”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. vt-28, no. 3, pp. 182-203, Aug. 1979.

CLARKE, R. H., “A Statistical Theory of Mobile-radio Reception”. Bell System Tech, p. 957-1000, Jul.-Aug. 1968.

CORREIA, L. M., “Wireless Flexible Personalised Communications COST 259: European Co-operation in Mobile Radio Research” John Wiley & Sons Mar. 2001.

COST 231 “Digital Mobile Radio Towards Future Generation Systems Final Report” dez. 1998

DELISLE, G. Y. "Propagation Loss Prediction: A Comparative Study with Application to the Mobile Radio Channel". IEEE Transaction on Vehicular Technology, vol. 32, pp. 86-96, May 1985.

EPSTEIN, J. and PETERSON, D. W., “An Experimental study of wave propagation at 850 MC”. Proc. of the I.R.E., vol. 41, pp. 595-611, May 1953

ERTEL, B. E., REED, J. H., “Angle and Time of Arrival Statistics for Circular and Elliptical Scattering Models”, IEEE Jornal on Selected Areas in Communication, vol. 17, no. 11, pp. 1829-1840, Nov. 1999.

FUHL, J., MOLISCH, A. F., and BINEK, E., IEE Proc. Radar, Sonar, Navigat., vol. 145, no. 1, pp. 32-41, Feb.1998.

GANS, M. J., “A power-Spectral Theory of Propagation in the Mobile-Radio Environment” .IEEE Transaction on Vehicular Technology, vol. 21, pp. 27-38, Feb. 1972.

GRENTIN L. J., RECEG, V., YEH, Y. S., CLRK, M. V., "A New Path-Gain/Delay-Spread Propagation Model for Digital Cellular Channels" IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol.46, no. 2, pp. 477-485, May 1997.

GUDEMUNDSON, M "Correlation Model for Shadow Fading in Mobile Radio Systems" Electronics Letters, vol. 27, pp. 2145-2146, Nov. 1991.

HATA, M. "Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services". IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 29, pp. 317-325, Aug.1980.

HOFSTETTER, H., STEINBOCK, G., "A Geometry based Stochastic Channel Model for MIMO Systems" ITG Workshop on Smart Antennas, Munich, Germany, pp. 194-199, Mar. 2004

IBRAHIM, M. F. and PARSONS, J. D., "Signal strength prediction in built-up areas Part 1: Median signal strength". IEE Proceedings, vol. 130, part F, no. 5, pp. 377-384, Aug 1983

IKEGAMI, F., YOSHIDA, S., TAKEUCHI, T. and UMEHIRA, M., "Propagation factors controlling mean field strength on urban streets" IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. AP-32, pp. 822-829, Aug. 1984.

JANASWAMY, T., "Angle and Time of Arrival Statistics for the Gaussian Scatter Density Model", IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 1, no 3, pp. 488-497, Jul. 2002

KOSONO, S., WATANABE, K., "Influence of Environmental Buildings on UHF Land Mobile Radio Propagation", IEEE Transaction on Communication, vol. 25, no. 10, pp. 1133-1143, Oct. 1977

LAURILA, J., MOLISCHS, S. F. e BONEK, E. "Influence of the scattered distribution on power delay profiles and azimuthal power spectra of mobile radio channels" Proc. ISSSTA-98, vol. 1, pp. 267-271, 1998

LEE, W. C. Y, "Mobile Communication Engineering" McGraw-Hill, 1982.

LIBERT, J. C., RAPPAPORT, T. S. "A Geometrically Based Model for Line-of-Sight Multipath Radio Channels," IEEE Vehicular Technology Conference, Atlanta, GA, pp. 844-848, May 1996.

LUDWING, A. C., "The Definition of Cross Polarization", IEEE Transaction on Antenas and Propagation, ap. 21, pp. 116-119, Jan. 1973.

MAHMOUD, S. S., HUSSAIN Z.M., SHEA, P. "Space-Time Model for Mobile Radio Channel with Hyperbolically Distributed Scatterers" IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 1, pp. 211-214, Nov. 2002.

OKUMURA, T., Omori E. and Fakuda K. "Field strength and its variability in VHF and UHF land mobile service". Review of electrical communication laboratory, pp. 825-873, Sep. 1968.

PEDERSEN, K. I., MOGENSEN, P. E. and FLEURY, B. H., "Stochastic Model of Temporal and Azimuthal Dispersion Seen at the Base Station in Outdoor Propagation Environments". IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol 49, pp. 437-447, Mar. 2000.

PEDERSEN, K.I., MOGENSEN, P.E. and FLEURY, B.H., "Power azimuth spectrum in outdoor environments". IEEE Electronics Letters, 28th vol 33, no. 18, pp.1583-1584, Aug. 1997.

PARSONS, J. D., "The Mobile Radio Propagation Channel ". 2nd. ed. John Wiley & Sons LTD, 2000.

PETRUS, P., REED, J.H., RAPPAPORT, T. S. "Geometrically-Based Statistical Channel Model for Macrocellular Mobile Environments" IEEE Transactions on Communications vol. 50, no. 3, pp. 1197-1201, Mar, 1996.

PUNNOSE, R. J., NIKITIN, P. V., STANCIL, D. D., "Efficient Simulation of Ricean Fading within a Packet Simulator", IEEE Vehicular Technology Conference, pp. 764-767, 2000.

RAPPAPORT, T. S. "Wireless Communications Principles and Practice" Prentice Hall, 1996.

RICE, S. O., "Statistical properties of a sine wave plus Random Noise". Bell System Tech, pp. 109-157, Jan. 1948.

RICHARD, B. E., CARDIERI, P., SOWERBY, K. W., RAPPAPORT, T. S., REED, J. H., "Overview of Spatial Channel Model for Antenna Array Communication Systems". IEEE Personal Communications, vol. 41, pp. 10-22, Feb. 1998.

STAPLETON, S.P. , CARBO, X. and MCHEEN T., “Spatial Cannel Simulator for Phased Arrays”. Communications Science Laboratory, School of Engineering Science, Simon Fraser University, Canada, IEEE, pp. 1789-1792, 1994.

TOFTGARD, J., EGGRS, P. C. F., “Experimental Characterization of Polarization State Dynamics of Personal Communication Radio Channels”, IEEE Vehicular Technology Conference, 43rd., pp. 18-20, May 1993

VENES, J. M. and CORREIA, L. M., " Evaluation of Parameters for Model Selection Based on Grids ". Proc Conf. on Telecommunications ConfTele , Aveiro , Portugal , vol. 1, pp. 551-554 , Jun. 2003.

YOUNG, W. R., “Comparation of Mobile Radio Transmission at 150, 450, 900 and 3700 MC”. Bell System Tech, pp. 313-322, Jan. 1952.

WALFISCH, J. and BERTONI, H. L. “A Theoretical Model of UHF Propagation in Urban Environments”. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 36 pp. 1788-1796, Dec. 1988.

APÊNDICE A

FUNÇÕES EM LINGUAGEM MATLAB®

```
%Esta função define o ambiente e habilita os parâmetros para simulação
%Parâmetros de entrada:
% · Cenário: "TU" (Típico Urbano)
%      "UD" (Urbano Denso)
%      "AR" (Área Rural)
%      "TA" (Terreno Acidentado)
% · Frequência da portadora: Fc (em MHz)
% · Vetor de posições: (x,y) em metros
% · Altura da antena da estação móvel metros: EMh
% · Altura da antena da estação rádio base em metros: ERBh
function [Parametro,Simulacao]= Def_amb_simulacao
%Exemplo de vetor de posição:
%-----
%Movimento circular
%theta=0:.1:8*pi;
%R=500;
%[x,y] = pol2cart(theta,R);
%-----
%Vetor de posições com movimento linear uniforme
x=50:3:2000;
y=50:3:2000;
[a b]=size(y);
y(1,1:1:b)=0;
%-----
Parametro.cenario='TA';
Parametro.Fc=900;
Parametro.vetor=([x ; y]);
Parametro.EMh=1.5;
Parametro.ERBh=50;
Parametro.LdV=1;    %habilitado implica em linha de visada, verificar Simulacao.LdV
```

```

Parametro.Rice=-10;           %informa o fator de rice em dB, verificar
Simulacao.Variacao_fator_de_rice

Parametro.Pot_trans=1;%em W

Parametro.Plotar=0;

%Simulações a serem realizadas (habilitado=1)
%realiza as simulações:
Simulacao.LdV=0;%.....Quando habilitado o Parametro.LdV e gerado estatisticamente
Simulacao.Perdar_media_de_potencia=0;%.....Simula a perda media de potencia
Simulacao.Devanecimento_lento=0;%.....Simulala o desvanecimento lento
Simulacao.Devanecimento_rapido=0;%.....Simula o desvanecimento rapido
Simulacao.Espacial=1;%.....Simula o canal e gera: azimuth, elevacao, tempo de chegada
Simulacao.Nascimento_e_morte_grupos=0%.....Simula o nascimento e morte da linha de visada dos
    grupos distantes
Simulacao.Variacao_fator_de_rice=0%....Simula a variação do fator de Rice à medida que a EM se
    afasta da ERB
Simulacao.Polarizacao_crusada_XPD=0%....Simula a perda de polarização do sinal
Simulacao.Nascimento_e_morte_LdV=1%.....Simula o nascimento e morte da LdV à medida que a
    EM se movimenta

```

```

%% Ferramenta de simulacao de canal de propagação
% para ambiente macrocelular
%
% Esta função simula o canal de comunicação segundo
% com os parametros definidos na "def_amb_simulacao"
function [Parametro,Simulacao,Valores,Resultado,G]=Simulacao_computacional(SCastilho)
%
SCastilho;
set_simulacao_espacial=0;
%-----
[Parametro,Simulacao]= Def_amb_simulacao; %leitura de ambiente e simulação
Simulacao.LdV=0;
[Valores] = cenario(Parametro); %busca os valores para simulacao como funcao do cenario
[Parametro]= Verifica_param_simulacao(Parametro,Valores); %verifica Parametros
%-----
x=Parametro.vetor(1,:);
y=Parametro.vetor(2,:);

```

```

[theta,R] = cart2pol(x,y);
if length(R)==1
    passo=0;
    distancia=R;
end
d=0;
passo=1:1:length(x);
passo(:,:)=0;
for i=2:1:length(x)
    passo(i)=sqrt((x(i-1)-x(i))^2 + (y(i-1)-y(i))^2);
end
percurso=1:1:length(x);
percurso(1)=0;
for i=1:1:length(passo)
    d=d+passo(i);
    distancia_percorrida(i)=d;
end

Parametro.vetor_distancia_percorrida=distancia_percorrida;
Parametro.vetor_theta_rho=([theta,R]);
%-----
%Gera a perda media de potencia em dB
set_a=Simulacao.Perdar_media_de_potencia+Simulacao.Devanecimento_rapido+Simulacao.Polarizacao_cruzada_XPD+...
Simulacao.Nascimento_e_morte_LdV+Simulacao.Devanecimento_lento;
if set_a>=1
    bak=Parametro.LdV;
    Parametro.LdV=0;
    [perda] = Perda_de_potencia (Parametro,Valores,Simulacao);
    Resultado.Perda_SLdV=perda;

    Parametro.LdV=1;
    [perda] = Perda_de_potencia (Parametro,Valores,Simulacao);
    Resultado.Perda_LdV=perda;
    Parametro.LdV=bak;
end

PwLog=0;

```

```

%Gera o desvanecimento lento em dB
if Simulacao.Devanecimento_lento == 1
    [PwLog]=Desvan_lento_lognormal(Parametro,Valores,Simulacao);
    Resultado.PwLog=PwLog;
else
    Resultado.PwLog(1:1:length(Parametro.vetor_distancia_percorrida))=0;
end
fprintf('Simulação desvanecimento lento = OK\n\n');
%Gera azimuth, elevacao, tempo de chegada real e medio de cada componente
%Gera o desvanecimento rapido
set_b=Simulacao.Devanecimento_rapido+Simulacao.Espacial+Simulacao.Polarizacao_crusada_
XPD+...
    Simulacao.Variacao_fator_de_rice+Simulacao.Devanecimento_lento;
if set_b >= 1
    set_simulacao_espacial=1;
    [G]=Canal_Espacial(Parametro,Valores,Simulacao,Resultado);
    %Simulacao quando existem Grupos distantes
    if G.Numero_de_grupos >= 1
        if Simulacao.Nascimento_e_morte_grupos==1%nascimento e morte de linha de visada dos
grupos distantes
            % Resultado.Linha_de_visada..informa onde cada grupo e visivel
            [Resultado]= Transicao(Parametro,Valores,Resultado,G);
        end

        for k=1:1:G.Numero_de_grupos
            a(1:1:length(distancia_percorrida))=rand(1);
            b=G.Distante_Tau_med(k,:)-G.Tau_0;
            %Fornecer a potencia de cada grupo distante
            %como funcao do vetor de posicao com desvanecimento rapido e lentodo
            P_media_grupos_distantes(k,:)=Resultado.Perda_LdV+a*20+b/1e-6;
            Resultado.Perda_potencia_grupos_distantes(k,:)=Resultado.Perda_LdV+a*20+b/1e-
6+Resultado.PwLog;
        end

        if Simulacao.Nascimento_e_morte_grupos==1%nascimento e morte de linha de visada dos
grupos distantes
            a=P_media_grupos_distantes.*Resultado.Linha_de_visada_gr_dist;
            Resultado.Perda_potencia_grupos_distantes=...
                10*log10(a)+Resultado.Perda_potencia_grupos_distantes+P_media_grupos_distantes;
        end
    end

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Ei dos grupos distantes

[Resultado.Pw_DesRap_multiperc_gr_Dist]=Desvanecimento_rapido_1(Parametro,Valores,Simulacao,Resultado,G);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

end

else

    G=0;

end

fprintf('Simulação nascimento e morte grupos distantes = OK\n\n');
% Simulacao.Polarizacao_crusada_XPD = 1
% Gera a variacao da potencia devido a polarizacao crusada para grupos
% distantes
if Simulacao.Polarizacao_crusada_XPD == 1
    %como utilizar o resultado: Pw=10*log10(Parametro.Pot_trans)-Resultado.Perda-
Resultado.PwLog...
        % +Resultado.PwRapido + Resultado.XPD_horizontal_EM ;
media=0;          % Media vert/hor XPD dB
desvio=1;         % Desvio vert/hor pol. do XPD dB
dis_corr=Valores.LX;      % Distancia de correlacao do XPD m
[y]= Log_correlacionada(desvio,media,dis_corr,distancia_percorrida,Parametro);
y=y*6+6;
yy=10.^(y/10);
XPD_vertical_EM=10*log10(yy./(yy+1));
XPD_horizontal_EM=10*log10(1./(yy+1));

if G.Numero_de_grupos >= 1
    y(1:1:G.Numero_de_grupos,1:1:length(distancia_percorrida))=0;
    for i=1:1:length(G.Numero_de_grupos)
        [y(i,:)]= Log_correlacionada(desvio,media,dis_corr,distancia_percorrida,Parametro);
    end
    if Simulacao.Polarizacao_crusada_XPD == 1 %XPD para grupos distantes
        y=y.*6+6;
        yy=10.^(y/10);
        Grupo_dist_XPD_vertical=10*log10(yy./(yy+1));
        Grupo_dist_XPD_horizontal=10*log10(1./(yy+1));
    end
end

```



```

    end
else
Resultado.Grupo_dist_XPD_horizontal(1:1:length(Parametro.vetor_distancia_percorrida))=0;
Resultado.Grupo_dist_XPD_vertical(1:1:length(Parametro.vetor_distancia_percorrida))=0;
end
fprintf('Simulacao XPD = OK\n\n');
% Simulacao.Nascimento_e Morte_LdV = 1
% Gera a variacao da potencia devido ao nascimento e morte da LdV a medida
% que a EM se Movimenta
if Simulacao.Nascimento_e_morte_LdV == 1

    %Dado um percurso verifica o quando esta abaixo de dco
    percurso_em_LdV=0;
    percurso_em_LdV1=0;
    j=1;
    for i =0:1:(length(Parametro.vetor_distancia_percorrida)-1)
        if Parametro.vetor_theta_rho(2,j)<=Valores.dco
            if i==0
                percurso_em_LdV1(j)= Parametro.vetor_distancia_percorrida(j);
                j=j+1;
            else
                percurso_em_LdV1(j)=abs(Parametro.vetor_distancia_percorrida(i+1)...
                    -Parametro.vetor_distancia_percorrida(i));%cada passo com
LdV
                i_percurso_em_LdV(j)=i;%posicao i do LdV
                j=j+1;
            end
        end
    end
    percurso_em_LdV=sum(percurso_em_LdV1);%percurso total em LdV
end
if percurso_em_LdV~=0

    %.....
    %Calcula a probabilidademedia em LdV
    for i=1:1:length(Parametro.vetor_distancia_percorrida)
        if Parametro.vetor_theta_rho(2,i)<=Valores.dco
            P_LdV(i)=((Parametro.ERBh-Valores.Bh)/Parametro.ERBh)*((Valores.dco-
Parametro.vetor_theta_rho(2,i))/Valores.dco);

```

```

        P_LdV1=mean(P_LdV);%Porcentagem do percurso com linha de vizada
    end
end
%.....
%Numero de areas de limha de visada
N=percurso_em_LdV*P_LdV1/(Valores.raio_de_visibilidade);
NT=fix(N);
N1=N-NT;
if NT > 0; %regiao completa de LdV
%.....

    %Localizacao das areas quando existir
    % 1 CASO - percurso em LdV e continuo
    a=0:1:length(i_percurso_em_LdV)-1;a=num2str(a);b=num2str(i_percurso_em_LdV);TF =
strcmp(a,b);
    if TF==1 %garante percurso em LdV e continuo
        y=(max(P_LdV))*Parametro.vetor_theta_rho(2,:);
        ((max(P_LdV))*Parametro.vetor_theta_rho(2,:).^2)/...
            (2*max(Parametro.vetor_theta_rho(2,:)));%grafico da integral de P+LdV

        a=max(P_LdV)/(2*max(Parametro.vetor_theta_rho(2,:)));
        b=max(P_LdV);
        c=rand(1,NT)*max(y);
        d=(b-sqrt(b^2-4*a*c))/(2*a);
        e=percurso_em_LdV1(1,2)*length(percurso_em_LdV1)-percurso_em_LdV1(1,2);
        for i=1:1:length(d)
            if d(i)>=e
                d(i)=abs(e);
            end
        end
        for j=1:1:length(d)
            if d(j) >= 1
                i=1;
                while sum(percurso_em_LdV1(1:1:i)) <= (d(j)-percurso_em_LdV1(1,2) )
                    i=i+1;
                end
                d1(j)=i;
            end
        end
    end
end

```

```

end

for i=1:1:length(d1)
    %Valores.ShadowLength = tranzicao de LdV para NLdV
    %pontos = ponto central da LdV
    %Valores.L_shf = distancia de correlacao Lognormal
    %K1 = e uma funcao exponencial crescente ate o centro e decrecenta do centro
    %para frente ....pontos(i)
    if d1(i)~=0
        c=((Valores.L_shf+2*Valores.ShadowLength) - sqrt( (Parametro.vetor(1,;)-
Parametro.vetor(1,d1(i))).^2 + ...
            (Parametro.vetor(2,;)-Parametro.vetor(2,d1(i))).^2 ))/Valores.ShadowLength;
        K1(i,:)=1-exp(-(max (0,c)));
    end
end
[a,b]=size(K1);
if a == 1
    Resultado.Nascimento_morte_LdV=K1;
else
    Resultado.Nascimento_morte_LdV=max(K1);
end

    %centro da LdV
else
    %2 CASO - percurso em LdV nao continuo
    fprintf('Caso nao definido - LdV deve ter percurso continuo\n\n');
end %Final TF==1
else %Regiao parcial de LdV NT = 0
    N1;
    a=rand(1);
    if a <= P_LdV1 %tenho LdV pequena
        d=round(rand(1,1)*max(i_percurso_em_LdV));
        c=((Valores.L_shf+2*Valores.ShadowLength) - sqrt( (Parametro.vetor(1,;)-
Parametro.vetor(1,d)).^2 + ...
            (Parametro.vetor(2,;)-Parametro.vetor(2,d)).^2 ))/Valores.ShadowLength;
        K2=1-exp(-(max (0,c)));
        Resultado.Nascimento_morte_LdV(1,1:1:length(Parametro.vetor_theta_rho(2,:)))=K2;
    else %nao tenho visibilidade

```

```

        Resultado.Nascimento_morte_LdV(1,1:length(Parametro.vetor_theta_rho(2,:)))=0;
    end
    end %Final numero de areas de limha de visada
else %Nao existe percurso em LdV
    fprintf('Nao existe percurso em LdV\n\n');
    Resultado.Nascimento_morte_LdV(1:1:length(Parametro.vetor_distancia_percorrida))=0;
end
end %Final Simulacao.Nascimento_e_morte_LdV
fprintf('Parametro nascimento e morte de LDV = OK\n\n');

%Sinal de chegada na ERB transmitido pela EM
%calculo do sinal resultante Eo complexo:
%Com ou sem LdV e XPD
%Verifica o fator de Rice
%Variacao ponto a ponto do fator de rice
[a,b]=size(Parametro.vetor_distancia_percorrida);
if Simulacao.Variacao_fator_de_rice==1
    valor_grupo=0;
    if Simulacao.Nascimento_e_morte_LdV == 1
        valor_grupo=1;
    end
    [Parametro,Simulacao]=
Varia_Fator_Rice(Parametro,Valores,Simulacao,Resultado,valor_grupo);
    K=10.^(Parametro.Variacao_Rice_dB/10);
else
    K1 = 10^(Parametro.Rice/10);
    K(1:1:b)=K1;
end%Rice Ok

%Gera o desvanecimento rapido em dB
if Simulacao.Devanecimento_rapido == 1

[Resultado.Pw_DesRap_multiperc_gr_Prox]=Desvanecimento_rapido_2(Parametro,Valores,Simulacao,Resultado,G);

    if Simulacao.Polarizacao_crusada_XPD == 1%XPD para grupos proximo
        media=0;           % Media vert/hor XPD dB
        desvio=1;          % Desvio vert/hor pol. do XPD dB
        dis_corr=Valores.LX; % Distancia de correlacao do XPD m
    end
end

```

```

for k=1:1:Valores.No_espalhadores_por_grupo
    [y]= Log_correlacionada(desvio,media,dis_corr,distancia_percorrida,Parametro);
    y=y*6+6;
    yy=10.^(y/10);
    y=y.*6+6;
    yy=10.^(y./10);

Resultado.Grupo_prox_XPD_vertical(k,:)=Resultado.Pw_DesRap_multiperc_gr_Prox(k,:).*(yy./(yy+
1));

Resultado.Grupo_prox_XPD_horizontal(k,:)=Resultado.Pw_DesRap_multiperc_gr_Prox(k,:).*(1./(yy
+1));

    end
end
end
fprintf('Simulação desvanecimento rapido = OK\n\n');
%Fim do desvanecimento rapido

%Calculo de Eo
EPf=0;
EP=0;
ep=0;
lamb=3e8/(Parametro.Fc*1e6);
thetai1=pi;%aleatoria uniforme entre 0 e 2*pi
EP(1:1:b)=0;
ep(1:1:b)=0;
if Simulacao.Variacao_fator_de_rice==1
    K=10.^(Parametro.Variacao_Rice_dB/10);
else
    K1 = 10^(Parametro.Rice/10);
    [a,b]=size(EP);
    K(1:1:b)=K1;
end
EP(1,1)=1.*exp(sqrt(-1)*thetai1);%Portadora
for i=1:1:length(Parametro.vetor_distancia_percorrida)
    EP(1,i)=(1/sqrt(2))*exp(sqrt(-1)*((3e8*2*pi/lamb)*G.Tau_0(1,i)));
end
Perda_pot=Resultado.Perda_LdV;

```

```

if Simulacao.Nascimento_e_morte_LdV==0
    if Parametro.LdV==1
        Perda_pot=Resultado.Perda_LdV;
    else
        Perda_pot=Resultado.Perda_SLdV;
    end
    if Simulacao.Perdar_media_de_potencia==0
        Perda_pot(:,:)=0;
    end
    EP=EP.*(K./(K+1));
    ep=10.^((Perda_pot+Resultado.PwLog)/20);
    Resultado.Pw_E0=2.*EP./ep;
else
    EP=EP.*(K./(K+1));

ep1=10.^((Resultado.Perda_LdV+Resultado.PwLog)/20).*Resultado.Nascimento_morte_LdV;
    ep2=10.^((Resultado.Perda_SLdV+Resultado.PwLog)/20).*(1-
Resultado.Nascimento_morte_LdV);
    Pw_E01=2.*EP./(ep1+1e-300);
    Pw_E02=2.*EP./(ep2++1e-300);
    Resultado.Pw_E0=2.*EP./(ep1+ep2)%max(ep2,ep1);
end
if Simulacao.Polarizacao_crusada_XPD == 1
    Resultado.Pw_E0_vetical=Resultado.Pw_E0.*(10.^(XPD_vertical_EM/10));
    Resultado.Pw_E0_horizon=Resultado.Pw_E0.*(10.^(XPD_horizontal_EM/10))
end
%plot(Parametro.vetor_distancia_percorrida,10*log10(abs(Resultado.Pw_E0).^2/2),'b');
%Eo Ok

SCastilho=1;

```

```

%Valore para teste como função do cenário
%esta informações são utilizadas na simulação e enviadas como estrutura
%do tipo "valor.numero".
%Para cada tipo de cenário uma serie de parâmetros são necessários
function [Valores] = cenario(Parametro)
    if Parametro.cenario=='TU' %Típico Urbano

```

```

Valores.No_espalhadores_por_grupo=50; %numero de espalhadores ao redor da EM
Valores.N0 = 0.17;      % número médio de cluster adicional
Valores.rm = 1000;      % Menor distância do grupo de espalhadores
Valores.sr = 500;       % desvio padrão da distancia dos grupos
Valores.raio_do_cluster = 50;    % Raio de visibilidade do grupo
Valores.ShadowLength = 20;      % comprimento da transição de visibilidade
Valores.raio_de_visibilidade = 100; %raio de visibilidade do grupo
Valores.LdVR = 30;      % Disco de linha de vivada e distancia entre edificios
Valores.LRua = 20;      % Transicao entre LdV e NLdV largura da rua
Valores.dco = 500;      % Corte de LdV
Valores.Bh = 15;        % altura media dos edificios
Valores.S_rice = 6       %Desvio padrao do fator de Rice
Valores.S_shf = 6;       % Desvio Padao Lognormal. in dB
Valores.L_shf = 100;     % Distancia de correlação lognormal
Valores.stmed = 0.4e-6;  % Median of trms at 1 km
Valores.S_st = 2;        % Std dev of log(trms)
Valores.L_st = 100;      % Distancia de autocorrelação lognormal
Valores.mX = 6;          % Media vert/hor XPD dB
Valores.sX = 6;          % Desvio vert/hor pol. do XPD dB
Valores.LX = 8;          % Distancia de correlacao do XPD m
Valores.L_K = 8;         % Distancia de correlacao do parametro Rice
Valores.ERBh = 30;       % Altura da antena da ERB
Valores.EMh=1.5;        %altura da antena da estacao movel
end

if Parametro.cenario=='UD' % Urbano Denso
    Valores.No_espalhadores_por_grupo=50;
    Valores.N0 = 1.18;
    Valores.rm = 1000;
    Valores.sr = 500;
    Valores.raio_do_cluster = 50;
    Valores.ShadowLength = 20;
    Valores.raio_de_visibilidade = 100;
    Valores.LdVR = 30;
    Valores.LRua = 20;
    Valores.dco = 500;
    Valores.Bh = 30;
    Valores.S_rice = 6

```

```

Valores.S_shf = 9;
Valores.L_shf = 100;
Valores.stmed = 0.4e-6;
Valores.S_st = 2;
Valores.L_st = 100;
Valores.mX = 6;
Valores.sX = 6;
Valores.LX = 8;
Valores.L_K = 8;
Valores.ERBh = 50;
Valores.EMh=1.5;    %altura da antena da estacao movel
end

if Parametro.cenario=='AR' % Area Rural
    Valores.No_espalhadores_por_grupo=50; %numero de espalhadores ao redor da EM
    Valores.N0 = 0.06;
    Valores.rm = 3000;
    Valores.sr = 5000;
    Valores.raio_do_cluster = 300;
    Valores.ShadowLength = 20;
    Valores.LRua = 20;
    Valores.LdVR = 100;
    Valores.LShadowLength = 20;
    Valores.raio_de_visibilidade = 300;
    Valores.dco = 5000;
    Valores.Bh = 5;
    Valores.S_rice = 6
    Valores.S_shf = 6;
    Valores.L_shf = 60;
    Valores.stmed = 0.1e-6;
    Valores.S_st = 2;
    Valores.L_st = 100;
    Valores.mX = 12;
    Valores.sX = 3;
    Valores.LX = 8;
    Valores.L_K = 8;
    Valores.ERBh = 50;
    Valores.EMh=1.5;    %altura da antena da estacao movel

```



```

end
if Parametro.cenario== 'TA' % Terreno Acidentado
    Valores.No_espalhadores_por_grupo=50; %numero de espalhadores ao redor da EM
    Valores.N0 = 1;
    Valores.rm = 3000;
    Valores.sr = 5000;
    Valores.raio_do_cluster = 300;
    Valores.ShadowLength = 20;
    Valores.raio_de_visibilidade = 300;
    Valores.LdVR = 100;
    Valores.LRua = 20;
    Valores.dco = 5000;
    Valores.Bh = 5;
    Valores.S_rice = 6
    Valores.S_shf = 9;
    Valores.L_shf = 100;
    Valores.stmed = 0.1e-6;
    Valores.S_st = 2;
    Valores.L_st = 100;
    Valores.mX = 12;
    Valores.sX = 3;
    Valores.LX = 8;
    Valores.L_K = 8;
    Valores.ERBh = 50;
    Valores.EMh=1.5; %altura da antena da estacao movel
end;

```

```

% Esta função verifica os parâmetros habilitados na
%na função Def_amb_simulacao
function [Parametro]= Verifica_param_simulacao(Parametro,Valores);
a=isfield(Parametro,'EMh');
if a==0
    Parametro.EMh=Valores.EMh;
end
a=isfield(Parametro,'ERBh');
if a==0
    Parametro.ERBh=Valores.ERBh;
end

```

End

```

function [Perda] = Perda_de_potencia (Parametro,Valores,Simulacao)
% escolha das funções
x=Parametro.vetor(1,:);
y=Parametro.vetor(2,:);
[theta,distancia] = cart2pol(x,y);
theta=abs(theta*360/(2*pi));
for j=1:length(theta)
if theta(j) > 270
    theta(j) = abs(theta(j)-360);
end
if theta(j) > 180
    theta(j)=abs(theta(j)-180);
end
if theta(j) > 90
    theta(j)=abs(theta(j)-180);
end
end
P_LdV=Parametro.LdV;
if Simulacao.LdV ~= 0
    %Neste caso e gerada uma variável randômica U(0,1)
    %caso seja maior que 0.5 P_LdV=0 (SLdV)
    a=rand(1);
    if a >= 0.5
        P_LdV=0;
    else
        P_LdV=1;
    end
end
if Parametro.cenario=='TU'
    Perda = cost231wi(distancia, Parametro.Fc, Parametro.ERBh, Parametro.EMh, Valores.LRua,
Valores.LdVR, Valores.Bh, theta, P_LdV,Parametro.cenario);
end
if Parametro.cenario=='UD'
    Perda = cost231wi(distancia, Parametro.Fc, Parametro.ERBh, Parametro.EMh, Valores.LRua,
Valores.LdVR, Valores.Bh, theta, P_LdV,Parametro.cenario);

```

```

end
if Parametro.cenario=='AR'
    Perda = hata(distancia, Parametro.Fc, Parametro.ERBh, Parametro.EMh, Parametro.cenario);
end
if Parametro.cenario=='TA'
    Perda = hata(distancia, Parametro.Fc, Parametro.ERBh, Parametro.EMh, Parametro.cenario);
End

```

```

function perda = cost231wi(distancia, frecuencia, ht, hr, ws, wb, hb, fi, los,cenario)
% Função para previsão de perda média usando o modelo "COST231-WI".
% saída = cost231wi(distancia, frecuencia, ht, hr, ws, wb, hb, fi, los, zona)
% saída    : Vetor com estimativas de perdas, em função da distancia
%           para um valor fixo da frecuencia
% distancia : Vetor com valores da distancia expressa em m,
% frecuencia : Valor da frequência de trabalho, expressa em MHz,
% ERBh      : Altura da antena Emissora (em metros)
%           Recomenda-se que esteja na gama [4,50] metros,
% EMh       : Altura efetiva da antena no terminal movel (em metros)
%           Recomenda-se que esteja na gama [1,3] metros,
% ws        : Largura da rua (expressa em metros), onde o terminal móvel
%           se encontra; admite-se que este se localiza no centro da via,
% wb        : Distancia média entre edificios, marcada entre os pontos
%           centrais dos mesmos, para efeitos do calculo da média,
% hb       : Altura média dos edificios; neste parametros, inclui-se a
%           contribuição dos telhados,
% fi        : Orientação da via relativamente à união entre terminais (Graus);
% los       : condição de linha de vista
%           1 - LOS
%           0 - NLOS;
% cenario   : Tipo de ambiente urbano em causa:
%           1 - UD (Urbano Denso),
%           0 - TU (Tipicamente Urbano).
distancia=distancia/1000;
if los == 1
    perda = 42.6+26*log10(distancia)+20*log10(frecuencia);
else

```

```

perda = msdcost231(distancia, frequencia, ht, hr, ws, wb, hb, cenario);
parcial = rtscost231(frequencia, hr, ws, hb, fi);
perda = perda + parcial - Perdaespacolivres(frequencia,distancia);
end

```

```

function saida = hata(distancia, frequencia, hte, hre, cenario)
% FUNÇÃO PARA PREVISÃO DE PERDAS USANDO O "MODELO DE HATA"
% saida = hata(distancia, frequencia, ht, hr, cenario)
% saida : Vector com estimativas de perdas, em função da distancia
%         para um valor fixo da frequencia
% distancia : Vector com valores da distancia expressa em km
%             Recomenda-se que seja superior a 1 km
% frequencia : Frequencia de trabalho, expressa em MHz,
%             Recomenda-se que se situe na gama [150,1500] MHz
% ht : Altura efectiva da antena Emissora (em metros)
%     Recomenda-se que esteja na gama [30, 200] (metros)
% hr : Altura efectiva da antena no terminal móvel (em metros)
%     Recomenda-se que esteja na gama [1, 10] (metros)
% cenario : Classificação da area em analise para o parâmetro de correcção alfa(Hre)
%          TA - Terreno acidentado
%          AR - Area rural
    alfa = 1; %distancia <= 20 Km
    %alfa = (1.1*log10(frequencia) - 0.7)*hre - (1.56*log10(frequencia) - 0.8); %distancia > 20
Km
    if frequencia > 1500
        perda = 46.30 + 33.90*log10(frequencia) - 13.82*log10(ht) + (44.9 -
6.55*log10(ht)).*log10(distancia./1000);
        perda = perda -(1.1*log10(frequencia)-0.7)*hre + (1.56*log10(frequencia)-0.8);
        saida = perda;
    else
        perda = 69.55 + 26.16*log10(frequencia) - 13.82*log10(hte) + (44.9 -
6.55*log10(hte)).*log10(distancia./1000);
        perda = perda -(1.1*log10(frequencia)-0.7)*hre + (1.56*log10(frequencia)-0.8);
        saida = perda;
    end
    saida = saida -4.78*(log10(frequencia)^2)+18.33*log10(frequencia)-40.94;

```

```

function saida = msdcost231(distancia, frequencia, ht, hr, ws, wb, hb, cenario)
% Função para previsão de perda média usando o modelo "COST231-WI".
% saída = mscost231(distancia, frequencia, ht, hr, ws, wb, hb, cenario)
% saída    : Vetor com estimativas de perdas, em função da distancia
%           para um valor fixo da frequencia
% distancia : Vetor com valores da distancia expressa em km,
% frequencia : Valor da frequência de trabalho, expressa em MHz,
% ht        : Altura da antena Emissora (em metros)
%           Recomenda-se que esteja na gama [4,50] metros,
% hr        : Altura efetiva da antena no terminal móvel (em metros)
%           Recomenda-se que esteja na gama [1,3] metros,
% ws        : Largura da rua (expressa em metros), onde o terminal móvel
%           se encontra; admite-se que este se localiza no centro da via,
% wb        : Distancia média entre edificios, marcada entre os pontos
%           centrais dos mesmos, para efeitos do calculo da média,
% hb        : Altura média dos edificios; neste parametros, inclui-se a
%           contribuição dos telhados,
% cenario   : Tipo de ambiente urbano em causa:
%           BU (Urbano Denso),
%           TU (Tipicamente Urbano).
ka = 0;
kd = 0;
kf = 0;
lbsk = 0;
perda = 0;
saida = 0 * distancia;
if ht > hb
    lbsh = -18*log10(1 + ht - hb);
else
    lbsh=0;
end
if cenario == 'TU'
    kf = -4 + 0.7 * (frequencia / 925 - 1);
else
    kf = -4 + 1.5 * (frequencia / 925 - 1);
end

```

```

if ht > hb
    kd = 18;
else
    kd = 18 - 15 * (ht - hb) / hb;
end

for n = 1 : length(distancia),
    if ht > hb
        ka = 54;
    elseif ht <= hb
        if distancia(n) >= 0.5
            ka = 54 - 0.8 * (ht - hb);
        else
            ka = 54 - 1.6 * (ht - hb) * distancia(n);
        end
    end
    perda = lbsh + ka + kd*log10(distancia(n)) + kf*log10(frequencia) - 9*log10(wb);
    if perda < 0
        perda = 0;
    end
    saida(n)= perda;
end

```

```

function saida = rtscost231(frequencia, hr, ws, hb, fi)
% Função para previsão de perda média usando o modelo "COST231-WI".
% saida = rtscost231(frequencia, hr, ws, hb, fi)
% saida      : Vetor com estimativas de perdas, em função da frequencia
% frequencia : Vetor com valores da frequência expressa em MHz
%             Recomenda-se que esteja na gama [4,50] metros,
% hr         : Altura da antena do terminal móvel (em metros)
%             Recomenda-se que esteja na gama [1,3] metros,
% ws         : Largura da rua (expressa em metros), onde o terminal móvel
%             se encontra; admite-se que este se localiza no centro da via,
% hb         : Altura média dos edificios; neste parametros, inclui-se a
%             contribuição dos telhados.

```

```

% fi      : Orientação da via relativamente à união entre terminais (Graus);
dhm = hb - hr;
perda = 0;
lzero = 0;
if fi < 35
    lzero = -10+0.354*fi;
elseif fi >= 35 & fi < 55
    lzero = 2.5+0.075*(fi-35);
else
    lzero = 4.0-0.114*(fi-55);
end
saida = frequencia * 0;
for n = 1 : length(frequencia),
    perda = -16.9 - 10*log10(ws) + 10*log10(frequencia(n)) + 20*log10(dhm) + lzero;
    if perda < 0
        perda = 0;
    end
    saida = perda;
end
end

```

```

function saida =Perdaespacolivre(frequencia, distancia)
% Função para previsao de perdas no espaço livre
% saída = freespaceloss(frequencia, distancia)
% saída      : Vector com estimativas de predas, em função da frequência
% frequencia : Vector com valores de frequência expressa em MHz
% distancia  : Distância entre o terminal fixo e o terminal móvel
%            Expressa em km
saida = -32.44 - 20*log10(distancia) - 20*log10(frequencia);

```

```

function [PwLog]=Desvan_lento_lognormal(Parametro,Valores,Simulacao)
%Desvanecimento Lento "LogPw"
%Esta função calcula a potencia do desvanecimento lognormal correlacinado
%A funcao de autocorrelacao:
%h[n] = beta * exp ( alfa*n ) * u[n]
%beta = sqrt(1-exp(-2*alfa))

```

```

%alfa = DelatX/dcorr
%dcor = distancia de descorrelacao
%A variavel LogPw e gerada convoluindo Xln(ruido Gaussiana) com h_n
%Parametros de entrada
%plotar=1 mostrar a lognormal gerada;
%sigma em dB;
%dcor= distancia de descorrelacao
%inicio= ponto inicial do percurso
%final= ponto final do percurso
%passo= distancia minima entre dois passos do percurso
%Parametros de saida
%LogPw= potencia do sinal lornormal
lamb=3e8/(Parametro.Fc*1e6);
%Pontos para simulacao
x=Parametro.vetor(1,:);
y=Parametro.vetor(2,:);
[theta,R] = cart2pol(x,y);
distancia=Parametro.vetor_distancia_percorrida;
inicio=min(distancia); %ponto inicial 1 equivale a zero
final=max(distancia);
sigma=1;
percurso=(final-inicio);
dx=percurso/(Valores.L_shf);
m=length(distancia);
x = randn(m,1); %Xln (ruído Gaussiana)
%Calculo de h[n]
Alfa= dx/Valores.L_shf;
Beta = sqrt(1-exp(-2*Alfa*lamb));
N=100+200/length(distancia); %tamanho da correlacao
n=0:(N-1); %para um passo qualquer min de h_n=4*10^-6
h_n=Beta*exp(-Alfa*n); %para N definido desta forma
h_n=h_n/max(h_n);
%Calculo da variavel correlacionada
y = conv(x,h_n);
y=y*Valores.S_shf;
%Despresando as N iniciais
y=y(1:length(distancia));

```



```

%Saida
media=mean(y);
desvio=std(y);
%levando para media zero e desvio 1
y=y-media;
y=y/desvio;
[a,b]=size(y);
if a ~= 1
    y=y';
end
%K = 10^(Parametro.Rice/10);
PwLog=y*Valores.S_shf;

```

```

%Esta funcao gera os parametros espaciais do cana de comunicacao:
%Tau = atrazo de cada multipercurso por grupo de espalhadores, para cada posicao x,y da
estacao movel
%Azimute = azimute de cada multipercurso por grupo de espalhadores, para cada posicao x,y da
estacao movel
%Elevacao = elevacao de cada multipercurso por grupo de espalhadores, para cada posicao x,y da
estacao movel
%Tau_med = atrazo medio por grupo de espalhadores
%Azimute_med = azimute media medio por grupo de espalhadores
%Elevacao_med = elevacao media por grupo de espalhadores
%Numero de grupos = fornece o numero de grupo de espalhadores
function [G] =Canal_Espacial (Parametro,Valores,Simulacao,Resultado)

[Theta_Espalhadores_ao_redor_EM,          Rho_Espalhadores_ao_redor_Em          ,
Theta_Espalhadores_distantes,...
Rho_Espalhadores_distantes , Numero_de_grupos ] = Gerando_a_célula (Parametro, Valores,
Simulacao, Resultado);

%format long e
G.Numero_de_grupos=Numero_de_grupos;
%Espalhadores Distantes - calculo dos seus parametros
X=Parametro.vetor(1 , :); %posicao X da Em
Y=Parametro.vetor(2 , :); %posicao Y da EM
[THETA_EM,RHO_EM] = cart2pol(X,Y);
theta_ms=atan2(Y,X);      %posicao Theta da EM

```

```

rho_ms=sqrt(X.^2+Y.^2); %posicao Rho da EM
[x,y] = pol2cart(Theta_Espalhadores_distantes,Rho_Espalhadores_distantes); %posicao x,y
dos espalhadores distantes
[x,m,n] = matris_L_C_em_LxC_1(x);
[y,m,n] = matris_L_C_em_LxC_1(y);
[Rho,m,n] = matris_L_C_em_LxC_1(Rho_Espalhadores_distantes);
if Numero_de_grupos >= 1
    G.Distante_Azimute = Theta_Espalhadores_distantes;
    G.Distante_Azimute_med=mean(Theta_Espalhadores_distantes);
    G.Distante_Elevacao = atan(Parametro.ERBh./Rho_Espalhadores_distantes);
    G.Distante_Elevacao_med=mean(G.Distante_Elevacao);
    G.Distante_Rho=Rho_Espalhadores_distantes;
    for i=1:1:length(X)
        D1(: , i)=sqrt((X(i)-x).^2+(Y(i)-y).^2); %distancia entre percurso da EM e espalhadores
dos grupos distantes
        D2(: , i)=sqrt((Parametro.ERBh-Parametro.EMh)^2+(Rho).^2);
        G.Distante_Tau(:,i)=(D1(: , i)+D2(: , i)+RHO_EM(i))/3e8;
    end
    G.Distante_Tau; %Tau=tempo decorrido para o sinal sair da EM, refletir no espalhador
        %distante e chegar a ERB para cada pondo do vetor de posicao
    for i=1:1:G.Numero_de_grupos
        a=1+(i-1)*Valores.No_espalhadores_por_grupo;
        b=(1+(i-1))*Valores.No_espalhadores_por_grupo;
        c=G.Distante_Tau(a:1:b,:);
        G.Distante_Tau_med(i,:)=mean(c);% Media de Tau para cada ponto do vetor de posicao
    end
end
G.Tau_0=RHO_EM/3e9;
G.Proximo_Azimute=Theta_Espalhadores_ao_redor_EM;
G.Proximo_Azimute_med=mean(G.Proximo_Azimute);
G.Proximo_Elevacao=atan(Parametro.ERBh./Rho_Espalhadores_ao_redor_Em);
G.Proximo_Elevacao_med=mean(G.Proximo_Elevacao);
[x,y] = pol2cart(Theta_Espalhadores_ao_redor_Em,
Rho_Espalhadores_ao_redor_Em);%(x,y) de cada
        %espalhador ao redor da EM para
        %cada ponto do vetor de posicao (X,Y)
X=Parametro.vetor(1 , :); %posicao X da Em
Y=Parametro.vetor(2 , :); %posicao Y da EM

```

```

    for i=1:1:length(X)
        D3(:, i)=sqrt((X(i)-x(:,i)).^2+(Y(i)-y(:,i)).^2);
    end
    D4=sqrt((Parametro.ERBh-Parametro.EMh)^2+(Rho_Espalhadores_ao_redor_Em).^2);
    G.Proximo_Tau=(D3+D4)/3e8; %Tempo para o sinal sair da EM, refletir
        %no Espalhador proximo e chegar a ERB
    G.Proximo_Tau_med=mean(G.Proximo_Tau);
    %Potencia dos espalhadores distantes

    r = (randn(1,Valores.No_espalhadores_por_grupo))/(Valores.No_espalhadores_por_grupo);
    a1=length(r);
    lamb=3e8/(Parametro.Fc*10^6);
    e1=(rand(1,a1)+.1);
    x=Parametro.vetor_distancia_percorrida;
    b1=(1/Valores.raio_do_cluster).*(rand(1,a1)+.01);
    for i=1:1:a1
        d=rand(1,1)*pi;
        a=e1(i)*(Valores.raio_do_cluster/3e8)*(2/pi)*((sin(b1(i)*pi*x+d)));
        b=e1(i)*(Valores.raio_do_cluster/3e8)*(2/pi)*((sin(b1(i)*pi*x+d))- (sin(b1(i)*2 * pi * x +d*2)
/ 2));
        c=e1(i)*(Valores.raio_do_cluster/3e8)*(2/pi)*((sin(b1(i)*pi*x+d))- (sin(b1(i)*2 * pi * x +d*2)
/ 2)+ (sin(b1(i)*3 * pi * x +d*3) / 3)-...
        (sin(b1(i)*4 * pi * x +d*4) / 4)+ (sin(b1(i)*5 * pi * x +d*5) / 5));
        f1=a+b+c;g=max(a+b+c);f1=f1-g;h=min(f1);;
        f(i,:)=f1-h;
        %figure;plot(Parametro.vetor_distancia_percorrida,f);
        %R(i,:)=(rand(1,1)+1).*exp(-
j.*(b1(i).*2.*pi.*Parametro.vetor_distancia_percorrida./(Valores.raio_do_cluster/lamb)+rand(1,1)*2*p
i));
        %R1(i,:)=real(R(i,:)).^4;
        %RR(i,:)=G.Proximo_Tau(i,:).*R1(i,:);
    end
    %RR;
    G.Proximo_Tau(:,:)=G.Proximo_Tau(:,:)+f(:,:)/10;

```

```

function [Resultado]= Transicao(Parametro,Valores,Resultado,G)
%Funcao Transicao
%Esta função localiza as areas de visada dos grupos

```

```

%de espalhadores distantes ou da estacao movel
%Saida: Resultado.Linha_de_visada = vetor que indica a transicao de
%potenciaentre LdV e NLdV
function [Resultado]= Transicao(Parametro,Valores,Resultado,G)
distancia=Parametro.vetor_distancia_percorrida;
NN=0;
for NN=1:1:G.Numero_de_grupos
areas = 1; %uma area de vizibilidade para cada grupo
%teste para numero de areas especifico
%areas=3;
%%%%%%%%%%
for i=1:1:areas %indica "numero de areas de visibilidade" ponto aleatorio para ser o centro da
area de visibilidade
    w=round(length(Parametro.vetor_distancia_percorrida)*rand(1));
end
if w==0
    w=1;
end
pontos=sqrt(Parametro.vetor(1,w).^2 + Parametro.vetor(2,w).^2);%ponto central de
visibilidade
K(1:length(Parametro.vetor_distancia_percorrida))=1;%prepara vetor K
for i=1:1:length(pontos)
%Valores.ShadowLength = tranzicao de LdV para NLdV
%pontos = ponto central da LdV
%Valores.L_shf = distancia de correlacao Lognormal
%K1 = e uma funcao exponencial crescente ate o centro e decrecenta do centro
%para frente ....pontos(i)
    c = ( Valores.L_shf - sqrt ( ( Parametro.vetor (1,:) - Parametro.vetor (1,w)) .^2 + (
Parametro.vetor(2,:) - Parametro.vetor(2,w)).^2 ))/Valores.ShadowLength;
    K1(i,:)=1-exp(-(max (0,c)));
end
[a,b]=size(K1);
if a == 1
    Resultado.Linha_de_visada(NN,:)=K1;
else
    Resultado.Linha_de_visada(NN,:)=max(K1);
end
end
end

```

```

%Plota os resultados
if Parametro.Plotar==1
    figure;
    plot(Parametro.vetor_distancia_percorrida,Resultado.Linha_de_visada);
    %axis([min(Parametro.vetor_distancia_percorrida)
max(Parametro.vetor_distancia_percorrida) 0 1.1]);
    grid on
end

```

```

function [PwRapido,E1] = Desvanecimento_rapido_2 (Parametro, Valores, Simulacao,
Resultado, G )
%Desvanecimento Rapido
%Esta função simula o desvanecimento rapido utilizando o
% fator de Ricean Krice
%Parametros de entrada:
%frequencia da portadora "Parametro.Fo"
%velocidade do movel em Km/h "Parametro.vm"
%numero de espalhadores "Valores.No_espalhadores_por_grupo"
% fator de Ricean em dB "Parametro.Rice"
%Parametro de saida
%desvanecimento rapido em dB "E1"
Mi=1;%para teste
%r = (randn(1,Valores.No_espalhadores_por_grupo))/(Valores.No_espalhadores_por_grupo);
%r = (Rice_devanecimento(Parametro, Valores, Mi))/(Valores.No_espalhadores_por_grupo);
%r= rand([Valores.No_espalhadores_por_grupo 1]);
a=1./(G.Proximo_Tau(:,1)*3e8).^2;
r=a/max(a);
lamb=3e8/(Parametro.Fc*1e6);
%Pontos para simulação
distancia=Parametro.vetor_distancia_percorrida;
thetail=rand([Valores.No_espalhadores_por_grupo 1])*2*pi;%aleatoria uniforme entre 0 e
2*pi
%Nao foi utilizada a frequencia Doppler

```

```

E(1:1:Valores.No_espalhadores_por_grupo,1:1:length(distancia))=0;
E1(:,1)=r.*exp(-j*thetai1);
%Calculo de Delta_Tau proximo
for i=2:1:length(distancia)
    E1(:,i)=r.*exp(-j*((3e8*2*pi/lamb)*G.Proximo_Tau(:,i)))+E1(:,1);
end
K1 = 10^(Parametro.Rice/10);
%Variacao ponto a ponto do fator de rice
if Simulacao.Variacao_fator_de_rice==1
    [Parametro,Simulacao]= Varia_Fator_Rice(Parametro,Valores,Simulacao,Resultado);
    K=10.^(Parametro.Variacao_Rice_dB/10);
    E=10*log10(real(sum(E1.^2)));
    [a,b]=size(E1);
    K(1:1:b)=K1;
    PwRapido=real((E-mean(E)).*(Parametro.Pot_trans.*(1./(K+1))));
else
    E=10*log10(real(sum(E1.^2)));
    [a,b]=size(E1);
    K(1:1:b)=K1;
    PwRapido=real((E-mean(E)).*(Parametro.Pot_trans.*(1./(K+1))));
end

```

```

%Desvanecimento Rapido dos grupos distantes
%Esta função simula o desvanecimento rapido utilizando o
% fator de Ricean "Krice
%
%Parametros de entrada:
%frequencia da portadora "Parametro.Fo"
%numero de espalhadores "Valores.No_espalhadores_por_grupo"
% fator de Ricean em dB "Parametro.Rice"
%
%Parametro de saida
%Eg componentes multipercurso dos grupos distantes
function [E1]=Desvanecimento_rapido_1(Parametro,Valores,Simulacao,Resultado,G)
Mi=1;%para teste
%r = (randn(1,Valores.No_espalhadores_por_grupo))/(Valores.No_espalhadores_por_grupo);

```

```

%r = (Rice_devanecimento(Parametro, Valores, Mi))/(Valores.No_espalhadores_por_grupo);
%r= rand([Valores.No_espalhadores_por_grupo 1]);
a=1./(G.Distante_Tau(:,1)*3e8).^2;
r=a/max(a);
lamb=3e8/(Parametro.Fc*1e6);
[b,c]=size(a);
%Pontos para simulação
distancia=Parametro.vetor_distancia_percorrida;
%-----
thetai1=rand([b 1])*2*pi;%aleatoria uniforme entre 0 e 2*pi

E1(:,1)=r.*exp(-j*thetai1);
%Calculo de Delta_Tau proximo
for i=2:1:length(distancia)
    E1(:,i)=r.*exp(-j*((3e8*2*pi/lamb)*G.Distante_Tau(:,i)))+E1(:,1);
end
e1=E1;
e1(:,:)=0;
e2=e1;

[a,b]=size(e1);
K(1:1:b)=0;

a=sqrt(real(sum(E1.^2)));
for i=1:1:G.Numero_de_grupos*50
    e1(i,:)=(.5/sqrt(50)).*E1(i,:).*a;
end
for k=1:1:G.Numero_de_grupos
    a1=1+(k-1)*50;
    b1=50+50*(k-1);
    for i=a1:1:b1

e2(i,:)=(e1(i,:).*(1./(K+1)))/(10.^((Resultado.Perda_potencia_grupos_distantes(k,:))/20)+1e-300);
        end
    end

E1=e2;
if Parametro.Plotar==1

```

```

figure
hold on;
for k=1:1:G.Numero_de_grupos
a1=1+(k-1)*50;
b1=50+50*(k-1);
plot(distancia,10*log10(real(sum(abs(E1(a1:1:b1,:)).^2))));
end
grid on;
hold off;
figure;
end
%.....

function [Parametro,Simulacao]= Varia_Fator_Rice(Parametro,Valores,Simulacao,Resultado)
%Variacao do Fator de Rice
%esta funcao gra uma variavel lognormal correlacionada
dis_corr=8;
distancia=Parametro.vetor_distancia_percorrida ;
desvio=Valores.S_rice;
media=0;
[y]= Log_correlacionada(desvio,media,dis_corr,distancia,Parametro);
B=20*log10((4*pi*Parametro.vetor_distancia_percorrida)/(3e8/Parametro.Fc));
EPL_d=Resultado.Perda+B;
A=(26-EPL_d)/6;
K0=A+y;
Parametro.Variacao_Rice_dB = K0;

%Inicializa os parametros
%a função gerando o mundo inicializa todos os parametros
function [ Theta_Espalhadores_ao_redor_EM , Rho_Espalhadores_ao_redor_Em ,
Theta_Espalhadores_distantes , Rho_Espalhadores_distantes,Numero_de_grupos ] =
Gerando_a_celula (Parametro,Valores,Simulacao,Resultado)
format long e
Numero_de_grupos = poissrnd(Valores.N0);
%posiciona os clusters adicionais
[xcl,ycl]=posi_grupos_espalhadores(Valores.rm,Valores.sr,Valores.raio_do_cluster,Numero_de_
grupos);

```



```

[Theta_Espalhadores_ao_redor_EM,
Theta_Espalhadores_distantes, ...
Rho_Espalhadores_distantes]=criacao_do_grupo(Parametro,Valores,Numero_de_grupos,xcl,ycl)
;

```

```

% Distribuicao de Poisson
% R = poissrnd(LAMBDA)
% usa o metodo do tempo de espera
function r = poissrnd(lambda)
if nargin < 1,
    erro('Requer um argumento');
end

if nargin == 1
    [errorcode rows columns] = rndcheck(1,1,lambda);
end
if nargin == 2
    [errorcode rows columns] = rndcheck(3,1,lambda,m,n);
end
if errorcode > 0
    error('Informacao incorreta');
end
if (prod(size(lambda)) == 1)
    lambda = lambda(ones(rows*columns,1));
else
    lambda = lambda(:);
end
r = zeros(rows, columns);    %r=0
j = (1:(rows*columns))';
k = find(lambda >= 15);
% Pra Lambida pequeno gera um contador.
p = zeros(length(j),1);
while ~isempty(j)
    p = p - log(rand(length(j),1));
    kc = [1:length(k)]';
    t = (p < lambda(j));
    j = j(t);

```

```

    p = p(t);
    r(j) = r(j) + 1;
end
% LAMBDA deve ser positivo.
r(lambda < 0) = NaN;

```

```

function [xcl,ycl]=posi_grupos_espalhadores(rm,sr,raio_do_cluster,NO_CLUSTER);
%Gera a posicao dos grupos de espalhadores
% grupos de espalhadores posicionado em qualquer lugar da celula
% posicionado por uma distribuiçao uniforme entre 0 e 2*pi,
% parametros de entrada:
% rm = minima distancia dos espalhadores
% sr = desvio
% raio_do_cluster = raio do grupo de espalhadores
ii=1;
RHO(ii)=0;
THETA(ii)=0;
if NO_CLUSTER >= 1
raio_min=rm+raio_do_cluster;
raio_max=rm-raio_do_cluster+sr;
    for ii=1:NO_CLUSTER
        RHO(ii) = unifrnd(raio_min,raio_max);
        THETA(ii)= unifrnd(0,2*pi);
    end
end
[xcl,ycl] = pol2cart(THETA,RHO);

```

```

%toda EM possui um grupo de espalhadores a sua volta
% [x,y] posição da EM
% [0,0] posição da ERB
% senario : BU, TU, RA e HT
% N = numero de cluster
% xcl = posicao dos grupos de espalhadores
% ycl = posicao dso grupos de espalhadores
%saida

```

```

%theta_cl e rho_cl = possui todas as posicoes de todos os espalhadores dos clusters incluindo ao
redor da MS

%
function [Theta_Espalhadores_ao_redor_EM, Rho_Espalhadores_ao_redor_Em,
Theta_Espalhadores_distantes, ... Rho_Theta_Espalhadores_distantes] = criacao_do_grupo
(Parametro,Valores,Numero_de_grupos,xcl,ycl);

%Parametros tirador da tabela 6.1
X1=0;
Y1=0;

Y = randn(Valores.No_espalhadores_por_grupo,Numero_de_grupos+1); %gera os
multipercursos no plano xy
X = randn(Valores.No_espalhadores_por_grupo,Numero_de_grupos+1);
maxY=max(Y);
maxX=max(X);
Y(:,1)=Y(:,1)/(maxY(:,1));
X(:,1)=X(:,1)/(maxX(:,1));
x=Parametro.vetor(1,:); %posicao x da Em
y=Parametro.vetor(2,:); %posicao y da EM
theta_ms=atan2(y,x); %posicao Theta da EM
rho_ms=sqrt(x.^2+y.^2); %posicao Rho da EM
Y1=Y(:,1).*Valores.raio_do_cluster; %multipercurso com o tamanho do cluster
X1=X(:,1).*Valores.raio_do_cluster;
%Movimenta os espalhadores proximos
for i=1:1:length(x)
    yy=1:1:Valores.No_espalhadores_por_grupo;
    xx=1:1:Valores.No_espalhadores_por_grupo;
    yy(1,:)=y(i);
    xx(1,:)=x(i);
    YEspalhadores_ao_redor_EM(:,i)=Y1(:,1)+yy'; %Espalhadores ao redor da EM mais
posicao da EM
    XEspalhadores_ao_redor_EM(:,i)=X1(:,1)+xx'; %Espalhadores ao redor da EM mais
posicao da EM
end
[Theta_Espalhadores_ao_redor_EM,Rho_Espalhadores_ao_redor_Em] = ...
cart2pol(XEspalhadores_ao_redor_EM,YEspalhadores_ao_redor_EM); %posicao polar dos
espalhadores ao redor da EM

% %mais a posicao da EM em
% coordenadas polares
%Para Numero de clusters adicionais diferente de 0
if Numero_de_grupos >= 1

```

```

theta_cl=atan2(ycl,xcl);      %posicao dos espalhadores
rho_cl=sqrt(xcl.^2+ycl.^2);  %posicao dos espalhadores
a=Numero_de_grupos+1;
for ii=2:1:a
    Y(:,ii)=Y(:,ii)/(maxY(:,ii));
    X(:,ii)=X(:,ii)/(maxX(:,ii));
    Y1(:,ii)=Y(:,ii).*(Valores.raio_do_cluster);%+rho_cl(:,ii-1)/10); %multipercurso com o
tamanho do cluster
    X1(:,ii)=X(:,ii).*(Valores.raio_do_cluster);%+rho_cl(:,ii-1)/10);
    Y11(:,ii)=Y1(:,ii)+ycl(ii-1);    %cluster mais posicao do grupo
    X11(:,ii)=X1(:,ii)+xcl(ii-1);    %cluster mais posicao do grupo
end
[Theta_Espalhadores_distantes,Rho_Theta_Espalhadores_distantes] = cart2pol(X11(:,
2:a),Y11(:,2:a));
else
    Theta_Espalhadores_distantes=0;
    Rho_Theta_Espalhadores_distantes=0;
end
%plotando os resultados
if Parametro.Plotar==1
    fat=1.7;    %fator para plotagem
    figure
    if Numero_de_grupos >= 1
        title(['Posição Real dos espalhadores']);
        polar(Theta_Espalhadores_distantes,Rho_Theta_Espalhadores_distantes,'r');    %plotando
cluster
        hold on
    end
    polar(Theta_Espalhadores_ao_redor_EM,Rho_Espalhadores_ao_redor_Em,'b') ;
    hold on
    polar(theta_ms,rho_ms,'r');    %localisacao da MS
    rho_ERB=0;
    theta_ERB=0;
    hold on
    polar(theta_ERB,rho_ERB,'*m');    %plotando BS
    hold off
end

```

```

function [y]= Log_correlacionada(desvio,media,dis_corr,distancia,Parametro)
%Gera uma funcao lognormal correlacionada
%Entrada: Desvio, Media, Distancia e Parametro
%Saida: y = a variavel correlacionada
inicio=min(distancia); %ponto inicial 1 equivale a zero
final=max(distancia);
sigma=1;
percurso=(final-inicio);
dx=percurso/(dis_corr);
m=length(distancia);
x = randn(m,1); %Xln (ruído Gaussiana)
%Calculo de h[n]
Alfa= dx/dis_corr;
Beta = sqrt(1-exp(-2*Alfa*(3e8/Parametro.Fc)));
N=100+200/length(distancia); %tamanho da correlação
n=0:(N-1); %para um passo qualquer min de h_n=4*10^-6
h_n=Beta*exp(-Alfa*n); %para N definido desta forma
h_n=h_n/max(h_n);
%Calculo da variavel correlacionada
y = conv(x,h_n);
y=y*desvio;
%Despresando as N iniciais
y=y(1:length(distancia));
%Saida
med=mean(y);
desv=std(y);
%levando para media zero e desvio 1
y=y-med;
y=y/desv;
[a,b]=size(y);
if a ~= 1
    y=y';
end
y=y*desvio+media;

```

```

function [saida,m,n] = matris_L_C_em_LxC_1(matriz_entrada)
% Multiplas colunas em Linhas
% entrada:
%   matriz qualquer m_x_n
% saida:
%   matriz m*n_x_1
[m,n]= size(matriz_entrada);
% sempre entra uma matriz, a primeira colunba ja esta pronta
for ii=1:1:n %varia o numero de colunas
    iii=1;
    for iii=1:1:m % varia o numero de linhas
        f=iii+((ii)-1)*m;
        a(f , 1) = matriz_entrada(iii,ii);
    end
end
saida=a;

```

```

function [Pro_visada] = Probabilidade_de_LdV(Parametro,Valores,d);
% Esta função gera como saida a probabilidade de linha
% de visada, de acordo com os parametros a seguir:
% d   distania entre ERB e EM
% Parametro.ERBh  altura da antena da estação radio base
% Valores.Bh      altura media dos edificios ao redor da ERB
% Valores.dco     distancia de corte
% a equação utilizada e dada por capitulo 6 equação 6.5
a= length(d);
for j=1:1:a
    Pro_visada(j)=(Parametro.ERBh-Valores.Bh)/Parametro.ERBh * (Valores.dco-
d(j))./Valores.dco;
    if d(j) >= Valores.dco
        Pro_visada(j)=0;
    end
end
Pro_visada;

```

```

function r = Rice_devanecimento(Parametro, Valores, Mi)
%Gera as componentes Ricean segundo a equação 5.XY
%K(dB) e o faror de Rice

```

```

%N e o numero de amostras
%Mi
K = 10^(Parametro.Rice/10); const = 1/(2*(K+1));
x = randn(1,Valores.No_espalhadores_por_grupo); y = randn (1 ,
Valores.No_espalhadores_por_grupo );
r = sqrt(const*((x + sqrt(2*K)).^2 + y.^2));
rt = zeros(1,Mi*length(r)); ki = 1;
for i=1:length(r)
rt(ki:i*Mi) = r(i); ki = ki+Mi;
end
r =rt;

```