

Plataforma/Middleware para estudo de comunicações sem fios

Por:
Miguel Ângelo Andrade Moura

Orientador: Doutor Pedro Miguel Mestre Alves da Silva
Co-orientador: Doutor Carlos Manuel José Alves Serôdio

Dissertação submetida à
UNIVERSIDADE DE TRÁS-OS-MONTES E ALTO DOURO
para obtenção do grau de
MESTRE
em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, de acordo com o disposto no
DR – I série –A, Decreto-Lei nº 74/2006 de 24 de Março e no
Regulamento de Estudos Pós-Graduados da UTAD
DR, 2ª série – Deliberação nº 2391/2007

Plataforma/Middleware para estudo de comunicações sem fios

Por:
Miguel Ângelo Andrade Moura

Orientador: Doutor Pedro Miguel Mestre Alves da Silva
Co-orientador: Doutor Carlos Manuel José Alves Serôdio

Dissertação submetida à
UNIVERSIDADE DE TRÁS-OS-MONTES E ALTO DOURO
para obtenção do grau de
MESTRE
em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, de acordo com o disposto no
DR – I série –A, Decreto-Lei nº 74/2006 de 24 de Março e no
Regulamento de Estudos Pós-Graduados da UTAD
DR, 2ª série – Deliberação nº 2391/2007

Orientação científica:

Doutor Pedro Miguel Mestre Alves da Silva

Professor Auxiliar

da Escola de Ciências e Tecnologia

da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Doutor Carlos Manuel José Alves Serôdio

Professor Auxiliar

da Escola de Ciências e Tecnologia

da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

“Todo o trabalho tem em si mesmo a sua misteriosa recompensa”
(Charles Van Lerberghe)

Plataforma/Middleware para estudo de comunicações sem fios

Miguel Ângelo Andrade Moura

Submetido na Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro
para o preenchimento dos requisitos parciais para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Resumo – A constante e progressiva evolução tecnológica tem contribuído para o procurar intensivo do acesso à informação. Assistindo-se nos dias de hoje a um crescimento exponencial do número de dispositivos capazes de aceder à informação em qualquer momento e em qualquer lugar. Obviamente que isto se tornou possível devido à grande evolução sentida nas comunicações sem fios, utilizando Rádio Frequência.

Esta ubiquidade das comunicações apenas é possível devido ao facto de existirem múltiplos operadores que oferecem este tipo de serviço. Também não deveremos esquecer as diferentes redes sem fios locais, como por exemplo a eduroam, que permite o acesso em qualquer lado, dentro dos campus universitários.

Todas estas redes exigem um trabalho prévio de planeamento, que na maioria das vezes é feito recorrendo a ferramentas de análise e simulação da propagação das ondas electromagnéticas.

Apesar de já existirem actualmente várias aplicações para esta finalidade, estas nem sempre são capazes de suportar vários modelos de propagação das diversas zonas (rural, suburbana, urbana), bem como não são de fácil acesso (acesso aberto), nem são compatíveis com os diversos sistemas operativos.

Este projecto tem como objectivo a implementação de uma aplicação para o estudo de redes sem fios, que permita a análise e obtenção de resultados dos diversos modelos de propagação de radiofrequências (propagação em Espaço livre, Gume-de-faca, Obstáculo arredondado, Egli, Terra plana, Okomura-Hata).

A aplicação será desenvolvida utilizando a tecnologia Java, recorrendo a API Java 2D, de modo a facilitar a compreensão visual por parte dos utilizadores (parte gráfica). Esta aplicação servirá também para o estudo da propagação de radiofrequências, recorrendo aos modelos de propagação referidos anteriormente, bem como servirá de ferramenta de estudo para futuros alunos no leccionar das diversas unidades curriculares relacionadas.

Palavras-chave: Comunicações sem fios, propagação de radiofrequências, modelos de propagação, Java, API Java 2D.

Platform / Middleware to study wireless communications

Miguel Ângelo Andrade Moura

Submitted to the University of Trás-os-Montes and Alto Douro
in partial fulfillment of the requirements for the degree of
Master of Science in Electrical Engineering and Computers

Abstract: The constant and progressive technological evolution has contributed to an intensive search for information access. The number of devices capable of access to information anywhere and anytime is increasing exponentially. Obviously it became possible due to the great development in the wireless communications (based on radio frequency).

This communications ubiquity is only possible because there are several operators that offer this kind of service. We must not forget also all the local wireless networks, as for example eduroam, that allows the access anywhere inside university campus. All those networks require a previous planning, which in the majority of cases is done using tools analyse and simulate the propagation of electromagnetic waves.

Although nowadays there are some applications, some are not able to support some propagation models for many types of areas (rural, suburban, urban) as also they are not easy to gain access to (open source), and they are not compatible with all operating systems. This project has as goal the implementation of an application for the study of wireless networks that allows the analysis and the obtaining of results from the various models of propagation for radio frequency (Free space propagation, Knife-edge, Smooth Tick, Okumura-Hata, Egli, Plane Earth).

The application will be developed using Java technology, using API Java 2D, to do the GUI. The application will also be used for the study of the propagation of radio frequency, using the above propagation models, and also will be used as a study tool for undergraduate students in the study of several related subjects.

Key words: Wireless communications, radiofrequency propagation, propagation models, Java, API Java 2D.

Agradecimentos

Ao concluir este projecto desejo agradecer a diversas pessoas a quem estou grato por todo o apoio prestado.

Ao Prof. Pedro Mestre, orientador do projecto, pela extraordinária disponibilidade em oferecer estímulos e ouvir com interesse e ânimo todas as questões, dúvidas e problemas. Em especial pela confiança depositada.

Ao Prof. Carlos Serôdio, co-orientador do projecto, pela disponibilidade e conselhos prestados. Essencialmente também pela confiança depositada no trabalho.

A todos os meus amigos, não preciso referir nomes, os meus verdadeiros amigos saberão para quem e de quem falo. Obrigado por tudo, pelos bons e maus momentos, essencialmente pela partilha de amizade.

À minha família, pais, irmão, obrigado pelo apoio, pela confiança depositada, por tudo, porque se há alguém a quem devo tudo sois vós.

Índice Geral

Resumo.....	v
Abstract.....	vi
Agradecimentos.....	viii
Índice geral.....	viii
Índice de figuras.....	x
Índice de tabelas.....	xi
Acrónimos e Abreviaturas.....	xii

1. Introdução	1
1.1 Evolução dos sistemas de comunicação sem fios	1
1.2 Plataforma/middleware	2
1.3 Principais resultados obtidos da Plataforma/middleware	3
1.4 Motivação e objectivos.....	4
1.5 Organização da dissertação	5
2. Propagação de Radiofrequência	7
2.1 Conceitos fundamentais	7
2.1.1 Propagação	8
2.1.2 Densidade de Potência	9
2.1.3 Frequências utilizadas	10
2.1.4 Propagação em linha de vista (troposfera)	11
2.1.4.1 Refracção Troposférica	11
2.1.4.2 Zonas ou elipsóides de Fresnel.....	12
2.1.4.3 Reflexões.....	13
2.1.4.4 Desvanecimento	14
2.2 Modelos de Propagação troposférica	16
2.2.1 Classificação geral dos modelos de propagação	17
2.2.2 Modelo de propagação em espaço livre	19
2.2.3 Modelos de perdas por difracção.....	21
Obstáculo tipo gume-de-faca (knife edge)	21
Obstáculo arredondado (thick smooth)	23
2.2.4 Modelo de Terra-plana.....	25
2.2.5 Modelo de Egli.....	28
2.2.6 Modelo de Longley-Rice.....	29

2.2.7	Modelo de Okumura.....	30
2.2.8	Modelo de Hata	30
2.2.9	Modelo COST-231-Walfisch-Ikegami	32
2.3	Plataformas de análise e simulação de Radiofrequência	34
3.	Concepção e Implementação.....	40
3.1	Concepção	40
3.1.1	A tecnologia java.....	43
3.1.2	API Java 2D	44
3.1.3	Criar ambiente gráfico.....	45
3.1.4	Seleção do Modelo de propagação a utilizar	49
4.	Resultados e Conclusões	52
4.1	Aplicação.....	52
4.2	Discussão.....	58
4.3	Conclusão e Perspectivas Futuras	60
5.	Bibliografia	61

Índice de Figuras

Figura 1 - Elementos de uma comunicação	7
Figura 2 - Elementos de uma comunicação rádio	7
Figura 3 - Conceito de densidade de potência	10
Figura 4 - Refracção troposférica	12
Figura 5 - Zonas de Fresnel numa ligação troposférica.	13
Figura 6 - Reflexão do tipo regular e do tipo difusa	14
Figura 7 - Propagação de multipercurso	15
Figura 8 - Obstáculo gume-de-faca acima da linha de vista	22
Figura 9 - Obstáculo gume-de-faca abaixo da linha de vista	23
Figura 10 - Obstáculo do tipo thick smooth	23
Figura 11 - Valor de $T(m,n)$ em função dos valores de m e n	25
Figura 12 - Condição de propagação em terra-plana	26
Figura 13 - Factor de ajuste para diversas frequências e probabilidades no modelo de Egli	28
Figura 14 - Alguns parâmetros utilizados pelo ITM para computar perdas	29
Figura 15 - Exemplo do software TAP	35
Figura 16 - Exemplo do software WinProp	36
Figura 17 - Exemplo do software Decibel Planner	37
Figura 18 - Exemplo do software AXTRIX	38
Figura 19 - Exemplo do software Radio Mobile	38
Figura 20 - Diagrama de blocos da aplicação.	41
Figura 21 - Java Classe para obtenção dos objectos através de imagens.	45
Figura 22 - Exemplo do efeito do pressionar do rato sobre os objectos.....	46
Figura 23 - Exemplo do efeito do deslizar do rato sobre os objectos.....	47
Figura 24 - Exemplo do efeito do “scroll” do rato sobre os objectos.....	47
Figura 25 - Exemplo da aplicação.....	49
Figura 26 - Exemplo do efeito da selecção dos modelos através da ComboBox.	50
Figura 27 - Exemplo do método <i>paintObjects</i>	51
Figura 28 - Exemplo do modelo de propagação: Espaço-livre.	52
Figura 29 - Exemplo do modelo de propagação: Gume-de-faca.....	53
Figura 30 - Exemplo do modelo de propagação: Terra-plana.....	54
Figura 31 - Exemplo do modelo de propagação: Egli.....	56
Figura 32 - Exemplo do modelo de propagação: Obstáculo arredondado.	56
Figura 33 - Exemplo do modelo de propagação: Okumura-Hata.....	57

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Divisão do espectro de radiofrequências	9
--	---

Acrónimos

Lista de Acrónimos

Sigla:	Expansão:
AMPS	<i>Advanced Mobile Phone System</i> (Sistema Avançado para Telefonia Móvel)
API	<i>Application Programming Interface</i> (Interface de Programação de Aplicações)
AWT	<i>Abstract Window Toolkit</i> (Ferramenta gráfica de programação Java)
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i> (Acesso Múltiplo por Divisão de Código)
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i> (Múltiplo Acesso por Divisão de Frequência)
FM	<i>Frequency modulation</i> (Modulação em frequência)
FSK	<i>Frequency-shift keying</i> (Modulação por chaveamento de frequência)
GPRS	General packet radio service (Pacote geral de serviço rádio)
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i> (Sistema Global para Comunicações Móveis)
JVM	<i>Java Virtual Machine</i> (Maquina Virtual Java)
RF	Radiofrequência
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i> (Múltiplo Acesso por Divisão de Tempo)
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunication System</i> (Sistema Universal de Telecomunicações Móveis)

1. Introdução

1.1 Evolução dos sistemas de comunicação sem fios

Os sistemas de comunicações sem fios já existem no nosso quotidiano há alguns anos. Exemplo disso são os sistemas celulares. Os primeiros sistemas celulares a operar eram baseados na transmissão da voz por modulação analógica.

A modulação utilizada para voz nesta primeira geração era a FM (modulação em frequência), tendo sido a sua qualidade de transmissão, o motivo da sua utilização para a transmissão áudio [1]. Para sinalização utilizava-se o FSK (*Frequency Shift Key*, modulação por chaveamento de frequência), técnica de modulação na qual o sinal digital modulante varia a frequência de uma onda portadora analógica de acordo com valores pré-determinados. Como técnica de acesso ao meio era utilizada a multiplexagem por divisão de frequência (FDMA - *Frequency Division Multiple Access*), esta técnica baseava-se na divisão da banda de frequência em faixas relativamente estreitas, denominadas de canais [2].

Numa segunda geração de sistemas sem fios celulares surgiram novas técnicas digitais para codificação e compressão de voz. Estas permitiram a combinação da multiplexagem por divisão de tempo com a técnica anterior, resultando no sistema FDMA/TDMA (*Time Division Multiple Access*). Esta técnica consiste na divisão de um canal de frequência em intervalos de tempo distintos, criando assim vários canais lógicos dentro do canal físico [2]. Esta segunda geração veio melhorar a capacidade em três vezes mais que a anterior, oferecendo assim um melhor desempenho.

Numa terceira fase, a companhia Qualcomm desenvolveu uma nova técnica de acesso ao meio, baseada na codificação de cada canal de voz, a taxas elevadas, por códigos específicos que geram sinais com baixa correlação. Esta técnica denominada de espalhamento espectral foi herdada de aplicações militares, onde o sinal a ser transmitido era espalhado numa faixa do espectro bastante larga, tornando as

transmissões difíceis de interceptar. Baseado nestas técnicas, a Europa convergiu as suas pesquisas para o padrão GSM, actualmente o padrão mais difundido no mundo.

Os primeiros sistemas de comunicação sem fios possuíam uma única estação base, com uma antena situada no ponto mais elevado da cidade e tinham elevada potência de transmissão, para que fosse possível cobrir uma vasta área. Com isto surgiu o primeiro grande problema, para além da comunicação ser restrita à área e limitada ao número de canais disponíveis, os sistemas deveriam estar geograficamente separados para evitar interferências aquando da deslocação do utilizador entre duas áreas distintas.

Então para evitar este problema, criou-se o conceito célula, que contém uma estação rádio base, dividindo o espectro disponível em grupos de frequências. Estes grupos são utilizados em células separadas entre si o suficiente para não existirem interferências.

O sistema celular (conjunto de células), permite cobrir toda a área utilizando transmissores de baixa potência e permite também a continuidade das chamadas em curso através da técnica de *handoff* (procedimento utilizado para transição de célula de forma transparente ao utilizador) [3].

1.2 Plataforma/middleware

Middleware (mediador), no campo da computação, é um programa que faz a mediação entre o *software* e as demais aplicações. É utilizado para mover ou transportar informações e dados entre programas de diferentes protocolos de comunicação, plataformas e dependências do sistema operativo.

As tecnologias de *middleware* são geralmente constituídas por módulos dotados com APIs de alto nível que proporcionam a sua integração com aplicações desenvolvidas em diversas linguagens de programação e interfaces de baixo nível que permitem a sua independência relativamente ao dispositivo [4].

O seu principal objectivo é mascarar e fornecer um modelo de programação mais produtivo para os programadores de aplicações. É composto por um conjunto de processos ou objectos, que interagem entre si de forma a implementar comunicação e oferecer suporte para a partilha de recursos.

O *middleware* é portanto uma designação genérica utilizada para se referir aos sistemas de *software* que se encontram entre as aplicações e os sistemas operativos. O objectivo do *middleware* é facilitar o desenvolvimento de aplicações, assim como facilitar a integração de sistemas desenvolvidos de forma não integrada.

No contexto da informática, plataforma é o padrão de um processo operacional ou de um computador. É uma expressão utilizada para denominar a tecnologia empregue em determinada infra-estrutura de Tecnologia da Informação ou telecomunicações, garantindo facilidade de integração dos diversos elementos dessa infra-estrutura [4].

1.3 Principais resultados obtidos da Plataforma/middleware

A aplicação desenvolvida, é dotada da capacidade de cálculo de diversos parâmetros dos modelos de propagação:

- Espaço-livre;
- Gume-de-faca;
- Obstáculo arredondado;
- Terra plana;
- Egli;
- Okumura- Hata.

Para o desenvolvimento da aplicação foi escolhida a tecnologia Java, pois devido às suas características permite o desenvolvimento de aplicações verdadeiramente multi-plataforma.

Apesar da aplicação aqui apresentada não poder ser classificada como um middleware, pretende-se que esta seja o primeiro passo para a sua construção. Uma plataforma/middleware para simulação de propagação deverá ter vários componentes

entre os quais se destacam o suporte para modelos de propagação, suporte para interacção com o utilizador.

A aplicação aqui proposta é um simulador de propagação de sinais electromagnéticos, capaz de simular os modelos mais clássicos utilizados no dimensionamento de redes sem fios, nomeadamente as redes celulares. Sendo o seu objectivo implementar os componentes base acima referidos. Como produto final pretende-se obter um simulador que possa ser utilizado nas aulas teóricas de "Comunicações Móveis e Redes sem Fios" do Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.

Esta é transparente ao utilizador e de fácil compreensão, permite ao utilizador mover e redimensionar os componentes, bem como alterar diversos parâmetros dos modelos de propagação, o que faz dela, uma boa ferramenta de estudo para futuros alunos nas diversas unidades curriculares que abordem o tema em questão.

1.4 Motivação e objectivos

No contexto actual, as redes de comunicações sem fios assumem um papel cada vez mais presente e vital na maioria das tarefas do quotidiano. Sendo assim, torna-se fundamental ir para além das aplicações mais “visíveis” (Internet sem fios, Telemóveis) e investir em potenciais aplicações, como é o caso das redes de sensores sem fios.

Quando se opera com sistemas de comunicações sem fios existe a necessidade de recorrer a diferentes ferramentas informáticas de simulação, planeamento e análise de desempenho dos mesmos. Sendo assim, pretende-se neste projecto, desenvolver uma aplicação que integre quer a cobertura física da rede quer a análise de desempenho de todo o sistema.

Actualmente já existem algumas aplicações para análise de propagação de radiofrequências, como por exemplo o *ASTRIX* ou mesmo o *Wizard*, mas poucos são aqueles que conjugam o idealizado para esta aplicação, pois alguns são estáticos (não nos permitem mover os componentes, por exemplo), outros apenas contêm alguns

modelos de propagação, bem como outros não são executáveis nos diversos sistemas operativos, ou até mesmo não são de acesso livre.

Sendo assim, pretende-se criar uma aplicação que terá grande utilidade, visto que visa englobar vários modelos de propagação RF, será dinâmica (permitindo ao utilizador manusear os diversos componentes consoante o modelo de propagação seleccionado) e por fim terá como vantagem a possibilidade de ser utilizada nos diversos sistemas operativos já que será realizada em linguagem Java. É de referir que a aplicação em causa terá uma função essencial, pois será didáctica, ou seja, servirá como ferramenta de estudo para os futuros alunos, como referido anteriormente.

A aplicação desenvolvida deverá ser capaz de calcular parâmetros de propagação do sinal essenciais, utilizando para tal, diversos métodos e técnicas de propagação, bem como de simular os sistemas de comunicação sem fios, de forma a obter resultados teóricos que nos auxiliem e sejam vantajosos aquando da montagem real de um sistema de comunicação sem fios.

1.5 Organização da dissertação

Além deste capítulo introdutório, que visou enquadrar o trabalho, bem como apresentar os objectivos traçados e a sua motivação, este documento é composto por mais 3 capítulos.

No capítulo 2, referente à propagação de radiofrequência, numa primeira parte são apresentados os conceitos fundamentais relativos às transmissões de comunicações sem fios, na segunda parte são estudados os modelos de propagação tipicamente utilizados para a análise de propagação de sinais nos sistemas de comunicação sem fios e são apresentadas algumas aplicações existentes actualmente para simulação de ambientes RF.

Quanto ao capítulo 3, dedicado á concepção e implementação, é nele que é apresentada a metodologia utilizada para a concepção da aplicação, bem como nos são transmitidos

alguns conceitos essenciais à compreensão da mesma; também neste capítulo são mostrados os passos relativos à programação na linguagem Java.

Finalmente, no capítulo 4, resultados e conclusões, apresentam-se os resultados experimentais obtidos, bem como a discussão dos mesmos; são comparados os simuladores existentes ao realizado e são apresentadas as conclusões retiradas do trabalho, referindo também algumas directrizes orientadoras de trabalho futuro.

2. Propagação de Radiofrequência

2.1 Conceitos fundamentais

Para que seja possível estabelecer uma comunicação básica entre dois pontos devem-se ter obrigatoriamente três componentes: transmissor, receptor e meio de transmissão, conforme ilustra a Figura 1.

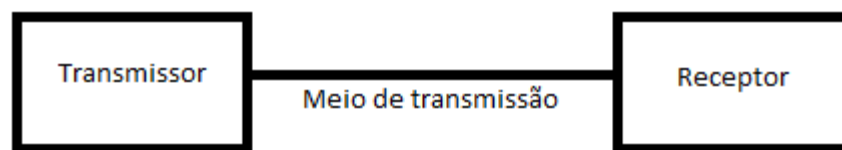


Figura 1 - Elementos de uma comunicação [6].

Quando essa comunicação é realizada a distâncias superiores ao alcance da voz humana, temos o conceito das telecomunicações. O tipo de meio físico utilizado na transmissão, pode ser classificado como orientado ou não-orientado.

No caso das redes de comunicações sem fios, estas utilizam as telecomunicações sob o prisma da utilização do meio aéreo (não-orientado), através de ondas electromagnéticas que se deslocam do transmissor ao receptor e vice-versa, conforme ilustra a Figura 2. A propagação da onda dá-se quando existe transferência de energia electromagnética entre esses dois pontos.

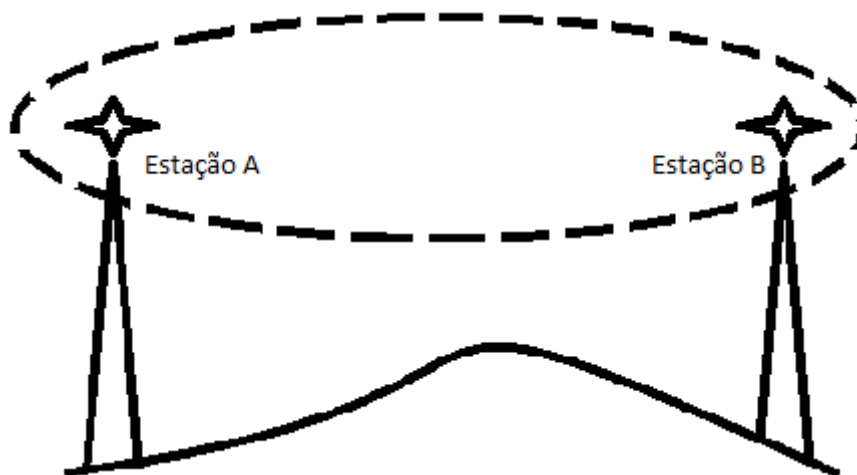


Figura 2 - Elementos de uma comunicação rádio (adaptado de) [6].

A energia será distribuída por todo o espaço, mas no entanto apenas parte da potência transmitida chegará à antena receptora. As redes definem de que forma os pontos de transmissão e recepção podem estar interligados, de forma a garantir que o sinal gerado na origem chegue a seu destino perceptível, dentro de uma taxa de erros aceitável. Portanto, para que estas funcionem correctamente torna-se necessário apreender alguns requisitos básicos [6]:

- A intensidade da potência do sinal recebido deve sobrepor-se ao ruído recebido e ao nível de sensibilidade;
- A intensidade do sinal deve ser propagada sem deformação excessiva;
- Para que as redes tenham confiabilidade, as condições acima devem permanecer constantes na maior parte do tempo.

Nestas redes, o sinal transmitido ao se propagar da antena transmissora até a receptora é atenuado e está sujeito a vários tipos de perdas: em espaço livre, por desvanecimento ou até mesmo devido a obstáculos que interceptam o percurso [7].

2.1.1 Propagação

Depois de feita esta abordagem inicial acerca dos principais aspectos das comunicações de redes sem fios, serão abordados os conceitos básicos referentes à propagação das ondas de rádio. Se examinarmos detalhadamente o espectro electromagnético, deparamo-nos em particular com uma faixa dedicada à radiocomunicação, denominada de espectro de radiofrequências.

É importante destacar que com a evolução tecnológica/científica, o limite superior dessa faixa a cada dia é transposto, e frequências cada vez mais elevadas são utilizadas na radiocomunicação. A Tabela 1 ilustra a divisão clássica do espectro de rádio.

As ondas electromagnéticas irradiadas pela antena propagam-se através do espaço. As condições de propagação dessas ondas dependem apenas do meio de transmissão. Para se analisar o mecanismo de propagação, deve-se considerar todas as influências possíveis que esse meio possa exercer, como o relevo, vegetação, prédios, etc.

Faixa de Frequência	Sigla	Designação	Exemplos de Utilização
300Hz a 3kHz	ELF	<i>Extremely Low Frequency</i>	Voz Humana, Comunicação para Submarinos.
3kHz a 30kHz	VLF	<i>Very High Frequency</i>	
30kHz a 300kHz	LF	<i>Low Frequency</i>	Navegação aérea, Radiodifusão AM.
300kHz a 3MHz	MF	<i>Medium Frequency</i>	
3MHz a 30MHz	HF	<i>High Frequency</i>	TV, Radiodifusão FM, Comunicação de segurança.
30MHz a 300MHz	VHF	<i>Very High Frequency</i>	
300MHz a 3GHz	UHF	<i>Ultra High Frequency</i>	
3GHz a 30GHz	SHF	<i>Super High Frequency</i>	Comunicação celular, Transmissão de dados, wi-fi.
30GHz a 300GHz	EHF	<i>Extremely High Frequency</i>	

Tabela 1 - Divisão do espectro de radiofrequências [8].

O mecanismo mais adequado consiste em analisar inicialmente um meio de transmissão ideal (como o vácuo), no qual teríamos condições perfeitas, como a ausência de obstáculos e outras limitações para o sinal. Depois de conhecido o procedimento de propagação nessas condições, aí sim, devem ser analisadas as modificações e consequentes repercussões produzidas pelas características do meio real.

A propagação realizada no vácuo é denominada de “*propagação em espaço-livre*”. Os principais desvios a esta condição ideal devem-se às alterações atmosféricas e a presença de possíveis obstáculos no percurso de propagação tais como montanhas, árvores, prédios e o próprio solo, que podem provocar interferências nas ondas como difracções, refracções, reflexões e espalhamentos [5].

2.1.2 Densidade de Potência

A quantidade de energia recebida pela antena receptora corresponde apenas a uma parcela da emitida pela antena transmissora, sendo a restante, dispersa pelo espaço. Analisando essa parcela recebida, propõe-se que se imagine uma fonte isotrópica irradiando igualmente energia, em todas as direcções. Desde que essa energia concebida pela fonte ao longo do tempo seja constante, então existirão várias zonas com a mesma potência, embora cada uma delas corresponda a diferentes instantes da emissão, Figura 3 [9].

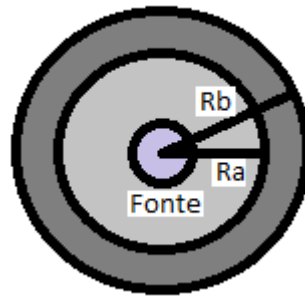


Figura 3 - Conceito de densidade de potência (adaptado de) [10].

Como as áreas das superfícies de A e B são diferentes, mas as potências são iguais, a densidade de potência, que corresponde à potência por unidade de área, em A é maior que em B , pelo facto de Ra ser menor que Rb . Assim sendo, pode-se expressar matematicamente a densidade de potência contida na área esférica, que dista R do transmissor isotrópico mostrada na Figura 3, através da equação [10]:

$$S = \frac{P}{4.\pi.R^2} \quad [\text{w/m}^2] \quad (1)$$

Onde:

S designa a densidade de potência;

P a potência transmitida pela fonte;

R o raio da esfera imaginária em torno da fonte isotrópica.

A equação mostra que a densidade de potência recebida aumenta bruscamente quando se aproxima da fonte, e diminui caso contrário.

2.1.3 Frequências utilizadas

À medida que se aumenta a frequência, tem-se que os feixes de onda se comportam cada vez mais como feixes luminosos. Será dada atenção especial para esse tipo de propagação (troposférica). Nesse contexto, analisaremos assim os principais aspectos que caracterizam uma comunicação que opera acima dos 30MHz (VHF, UHF, SHF,

EHF), acima deste valor, deixa de ser possível o uso da refração ionosférica, porque nessa faixa as ondas refractadas não chegam a atingir o ângulo zero (ângulo ideal), por conseguinte, não retornam à superfície terrestre.

2.1.4 Propagação em linha de vista (troposfera)

Acima de valores de frequência na ordem dos 30MHz, são usadas antenas que concentram a energia em feixes mais estreitos, estabelecendo a ligação directa entre antena transmissora e receptora. São formados assim sistemas em “*vista directa*”, usando propagação troposférica, ou seja, usando a camada adjacente à superfície terrestre.

Neste tipo de propagação não existem obstáculos entre antena transmissora e receptora. No caso de algum obstáculo surgir no percurso, dependendo do tamanho, este pode não impedir o funcionamento correcto da ligação. Posto isto, define-se o conceito de “*ligação por difracção*”: quando ocorre a difracção de uma onda de rádio por um obstáculo.

O fenómeno da difracção é definido como a capacidade que um feixe electromagnético tem de contornar obstáculos quando estes são da mesma ordem de grandeza do comprimento de onda do feixe. Note-se, que à medida que se aumenta a frequência para um mesmo obstáculo, temos um menor efeito da difracção.

A presença de obstáculos próximos à linha de vista entre as antenas, como montes, árvores ou prédios, conduz a uma diminuição da energia recebida, sendo que parte da onda é bloqueada e parte contorna o obstáculo. Com isto, quanto menor a frequência, mais peso terá o obstáculo na transmissão. A própria terra pode constituir um obstáculo a ser contornado, devido à sua curvatura [11].

2.1.4.1 Refracção Troposférica

Na propagação através da troposfera, observa-se uma curvatura do feixe da onda RF no plano vertical, este fenómeno acontece devido a sucessivas refrações que sofre o sinal.

Essas refrações traduzem-se num desvio do feixe quando ele atravessa camadas de densidades diferentes na troposfera. Também na troposfera, existe o problema da variação de temperatura e pressão à medida que se aumenta a altitude, originando sub-camadas com diferentes índices de refração, Figura 4.

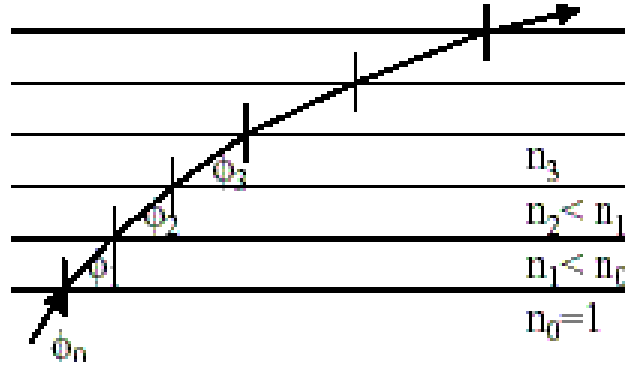


Figura 4 - Refracção troposférica [12].

2.1.4.2 Zonas ou elipsóides de Fresnel

Numa ligação rádio entre dois pontos A e B , o espaço entre os dois locais pode ser subdividido numa família de elipsóides, denominados de “*elipsóides de Fresnel*”, de forma que qualquer ponto M de um elipsóide satisfaça a relação:

$$AM + MB = n \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (2)$$

Onde:

n é um número inteiro, caracterizando a ordem da elipsóide, se $n = 1$ corresponde à primeira elipsóide de Fresnel;

λ é o comprimento de onda.

A Figura 5 ilustra três zonas de Fresnel, onde apenas a primeira (Z1) é considerada no estudo de radiopropagação.

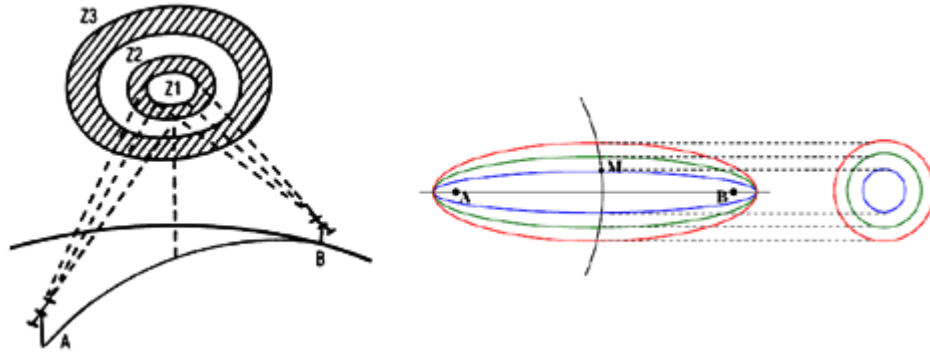


Figura 5 - Zonas de Fresnel numa ligação troposférica [13].

Como regra, uma ligação é considerado “linha de vista”, isto é, com difracção desprezível se não existir nenhum obstáculo dentro da primeira zona de Fresnel. O raio de uma elipsóide de Fresnel num ponto entre o transmissor e o receptor é dado pela expressão [13] [14]:

$$Rn = \sqrt{\frac{n \cdot \lambda \cdot d1 \cdot d2}{d1 + d2}} \text{ [m]} \quad (3)$$

Ou, calculando o raio da primeira zona a partir da frequência ao invés do comprimento de onda:

$$R1 = 550 \cdot \sqrt{\frac{d1 \cdot d2}{(d1 + d2) \cdot f}} \text{ [m]} \quad (4)$$

Onde:

f é a frequência em MHz;

$d1$ e $d2$ as distâncias em km entre o transmissor e o receptor no ponto onde se encontra o obstáculo.

2.1.4.3 Reflexões

A reflexão de uma onda electromagnética pode ser devida à superfície do solo, a obstáculos que podem estar próximos ou distantes do percurso, ou ainda devida às camadas atmosféricas, que provocam oscilação do campo eléctrico em torno do valor da

propagação em espaço-livre. O nível de interferência observado na antena receptora vem em função da atenuação da energia reflectida e do desfasamento.

Esta pode ser do tipo difusa, quando há um espalhamento da onda reflectida em várias direcções, ou do tipo regular, quando o feixe se reflecte de acordo com um ângulo bem definido igual ao de incidência sobre a água ($\theta_i = \theta_r$), conforme mostra a Figura 6 [15].

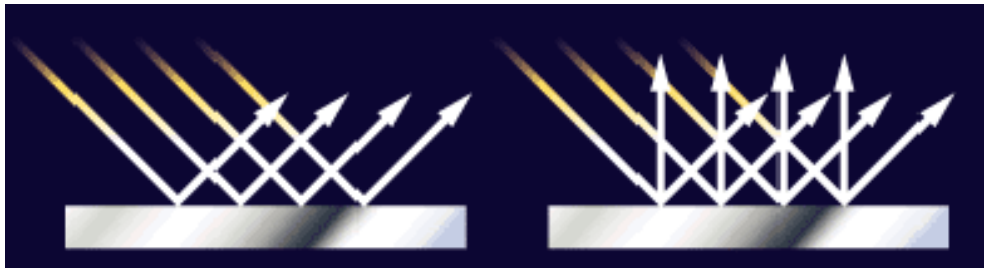


Figura 6 - Reflexão do tipo regular (esq.) e do tipo difusa (dir.) [16].

2.1.4.4 Desvanecimento

Desvanecimento ou *fading* é a designação atribuída ao fenómeno da existência de variações aleatórias, ao longo do tempo, da intensidade de sinal recebido. Essa variação é considerada na análise dos sistemas e é conhecida como atenuação suplementar. Os desvanecimentos são normalmente classificados em rápidos e lentos. Embora não exista uma regra definida para essa classificação, pode-se indicar, genericamente, que os desvanecimentos lentos correspondem a variações de poucos *dB* (decibéis) por minuto na intensidade do sinal, enquanto os desvanecimentos rápidos podem corresponder a variações de dezenas de *dB* em segundos [10].

Os desvanecimentos lentos são causados por efeitos de propagação como a difracção e a atenuação devido a efeitos meteorológicos como por exemplo a chuva, cuja variação com a frequência é suficientemente pequena na faixa de frequências do canal, podendo ser desprezada, e que por esse motivo, são denominados desvanecimentos planos. Já os desvanecimentos rápidos estão geralmente associados ao efeito de multipercurso atmosférico que é fortemente dependente da frequência e está relacionado ao fenómeno de reflexão, sendo por isto denominado desvanecimento selectivo [10].

O multipercurso atmosférico é um fenómeno aleatório que ocorre quando as irregularidades no índice de refração do ar produzem caminhos alternativos para a energia. Dessa maneira, o sinal total será formado pelas componentes das fases geradas pelos multipercursos. Se houver uma atenuação do raio directo de maneira que este se equipare às componentes geradas pelos multipercursos, poderão acontecer desvanecimentos profundos e consequentemente situações de recepção críticas. A Figura 7 ilustra a propagação por multipercurso [8].

Um modelo bastante utilizado para análise de ambientes com múltiplos percursos é o modelo dos dois raios. Nesse modelo, o sinal recebido será o somatório (interferência) dos dois raios, principal e reflectido, sendo o principal representado pela componente de fase A (referência) e o reflectido representado pela componente complexa cujo módulo é b :

$$y(t) = A. (x(t) + b. x(t - \tau)) \quad (5)$$

Onde:

A – Atenuação total que o raio directo sofre;

b – Amplitude do raio reflectido;

τ – Atraso do raio indirecto em relação ao directo.

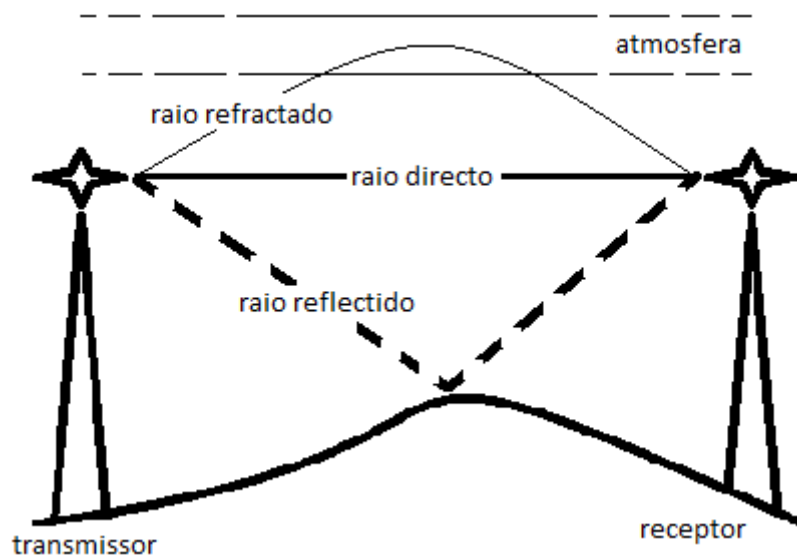


Figura 7 - Propagação de multipercurso (adaptado de) [8].

2.2 Modelos de Propagação troposférica

Actualmente diversas aplicações estimam a propagação de RF na presença de várias adversidades, constituindo o que chamamos de propagação troposférica. Perdas de propagação troposférica sobre o terreno, vegetação e/ou construções podem ser atribuídas a vários fenómenos, incluindo difracção, refracção, absorção ou espalhamento. Os modelos de propagação são uma tentativa de validar a cobertura de ligação via rádio antes da instalação física dos equipamentos. Dentro desse contexto, torna-se necessário examinar o relevo físico (*site survey*) e utilizar, de preferência, mais modelos de propagação antes de finalmente instalar a rede. Nesse âmbito, serão apresentados alguns modelos de propagação básicos, amplamente utilizados, para posteriormente serem usados na aplicação desenvolvida neste projecto.

A propagação de ondas electromagnéticas no ambiente terrestre é um fenómeno com propriedades que são difíceis de serem preditas. Esta afirmação é particularmente verdade nas faixas de VHF, UHF e SHF onde o surgimento de obstáculos e mudanças na atmosfera, causam espalhamento do sinal [17].

O responsável por projectar os sistemas não dispõe de nenhuma forma precisa de conhecer as características do meio de propagação, tem somente uma ideia de como esse meio afectará a operação [17]. Com isso, deve utilizar um ou mais modelos de propagação, que por outras palavras, são técnicas ou regras que tentam descrever como o mundo físico real afecta o fluxo da energia electromagnética ao longo do caminho entre antena transmissora e receptora.

Alguns desses modelos têm um grau elevado de especificidade, como por exemplo, para estações que operam em áreas urbanas densas. Outros tentam ser genericamente aplicáveis baseados na teoria electromagnética para representar os aspectos físicos da realidade na qual a onda está sujeita [18].

A maioria dos modelos de propagação fornece um valor mediano do sinal, torna-se assim necessário conhecer bem a estatística do sinal para determinar correctamente a

sua variação. A abordagem ao problema de estimação do sinal não pode ser feita de modo exclusivamente determinista, a estimação correcta e o desenvolvimento de modelos para o efeito requer o conhecimento de todos os factores que influenciam a propagação nas comunicações sem fios [18].

2.2.1 Classificação geral dos modelos de propagação

Os modelos de propagação dividem-se em duas grandes categorias: modelos empíricos, que empregam fórmulas estatísticas e não consideram o ambiente real de propagação, ou seja, baseado em medidas e conduzindo a relações simples entre a atenuação e a distância, e em modelos analíticos, que consideram as características reais do meio de propagação aquando da sua montagem como obstruções inerentes ao terreno, por exemplo [19] [18].

São apresentadas, de seguida, as principais características de ambos os tipos de modelos [18]:

Modelos empíricos – conduzem a curvas e equações que melhor se ajustam às medidas; têm como vantagem o facto de contabilizar todos os factores que afectam a propagação; estão sujeitos a validação para diferentes locais, frequências, condições (ambiente, de medida).

Modelos analíticos – não contabilizam todos os factores; não têm em consideração o ambiente em que o receptor se desloca; permitem uma fácil alteração para outros valores de parâmetros; dependem da definição de bases de dados geográficas.

Os modelos utilizados actualmente, são considerados modelos híbridos, englobam perspectivas quer do modelo empírico quer do modelo analítico.

Estes modelos têm alguma flexibilidade na medida em que podem ser aferidos com medidas reais realizadas nos ambientes de propagação específicos onde vão ser utilizados. Desta forma, minimiza-se o erro entre a estimação prevista pelo modelo de propagação e a posterior realidade, aquando da instalação (implementação física). Não

existe um modelo de aplicação genérico em todos os tipos de ambientes, frequências e parâmetros [18].

A aplicação de modelos com uma componente empírica requer a seguinte classificação de ambientes: rural, suburbano e urbano. Esta classificação considera, entre outros, os seguintes parâmetros: ondulação do terreno, densidade da vegetação, densidade e alturas de edifícios, existência de áreas abertas e existência de superfícies aquáticas [18].

Ambiente Urbano – cidade ou grande cidade com grandes edifícios com dois ou mais andares ou grandes aldeias com casas estreitas e altas, com árvores densamente cultivadas [20].

Características:

Os edifícios vão provocar a existência de numerosos raios reflectidos (causando desvanecimento), e de zonas de sombra (onde existe grande atenuação). A atenuação e reflexão variam de acordo com os materiais das construções; A existência de ruas conduz a fenómenos de propagação guiada, com características diferentes nas ruas radiais. A proximidade entre os edifícios e destes ao transmissor, pode conduzir a erros elevados na aplicação dos modelos. Devido a estas características, a tarefa de aferição do modelo de propagação com base em medidas reais torna-se extremamente dificultada, pelo que ocorrem sempre desvios entre a previsão do sinal e a realidade posteriormente implementada [20].

Ambiente Suburbano - vilas ou estradas com árvores dispersas e casas [20].

Características:

Caracterizado por ruas largas, a altura das construções é geralmente menor que a do ambiente urbano, o que faz com que ocorra difracção no topo dos edifícios. Apesar de existirem alguns obstáculos próximos do receptor e de não serem muito congestionados, este ao ser deslocado podem ocorrer reflexões ou mesmo zonas de sombra (sem cobertura do sinal) [20].

Ambiente rural - espaço aberto, sem árvores altas ou edifícios no percurso de propagação, lotes de terreno limpo (300-400m de comprimento), por exemplo explorações agrícola, campos de trigo e campos abertos [20].

Características:

Neste tipo de ambiente, a preocupação deixa de ser com os obstáculos mencionados anteriormente (edifícios, árvores, etc.) e passa a ser com a topografia do terreno. Devido à topografia do terreno podem ocorrer reflexões, fazendo com que para além do raio directo surja também um raio reflectido, ou então surjam montanhas no percurso fazendo com que a potência do sinal seja atenuada [20].

2.2.2 Modelo de propagação em espaço livre

Em telecomunicações, perda em espaço livre significa a perda na força do sinal que resulta do desprezo de toda a influência da absorção, difracção, obstrução, refracção, espalhamento e reflexão, não tendo assim, efeito na sua propagação [21].

Consideremos um transmissor que irradia uma determinada potência P através de uma antena isotrópica e um receptor que está situado a uma distância d de metros do transmissor, tem-se que a densidade de potência:

$$S = \frac{P}{4.\pi.R^2} \text{ [w/m}^2\text{]} \quad (1)$$

Existe ainda uma relação entre área efectiva da antena e ganho da mesma que é dada por [22]:

$$A_{eff} = \frac{G.\lambda^2}{4.\pi} \text{ [m}^2\text{]} \quad (6)$$

A área efectiva A_{eff} é aquela sob a qual a antena recebe a energia vinda da onda electromagnética. Considerando agora uma antena receptora localizada num ponto qualquer, a densidade de potência neste ponto é dada por:

$$S_r = \frac{P_t \cdot G_t}{4 \cdot \pi \cdot d^2} [\text{W/m}^2] \quad (7)$$

A potência na recepção é dada por:

$$P_r = S_r \cdot A_{eff} [\text{W}] \quad (8)$$

Substituindo as equações da densidade de potência e da área efectiva da antena receptora, na expressão da potência de recepção, obtém-se:

$$P_r = \frac{P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \lambda^2}{(4 \cdot \pi \cdot d)^2} [\text{W}] \quad (9)$$

Ou ainda:

$$\frac{P_r}{P_t} = \frac{G_t \cdot G_r \cdot \lambda^2}{(4 \cdot \pi \cdot d)^2} \quad (10)$$

Pode-se definir a perda de transmissão L como sendo:

$$L = \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot d}{\lambda} \right)^2 \cdot \frac{1}{G_t \cdot G_r} \quad (11)$$

E podemos definir também a perda L_{bf} , ou atenuação de espaço-livre por:

$$L_{bf} = \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot d}{\lambda} \right)^2 \quad (12)$$

Se aplicarmos a função logaritmo a ambos os termos da equação 10, obtém-se a equação de Friis, que estabelece que a potência de recepção é igual à potência de transmissão somada aos ganhos das antenas transmissora e receptora menos a atenuação de espaço-livre L_{bf} :

$$P_r = P_t + G_t + G_r - 92,5 - 20 \cdot \log(d) - 20 \cdot \log(f) \quad (13)$$

Onde:

P_r é a potência de recepção em dBm .

P_t é a potência de transmissão em dBm .

G_t e G_r : são os ganhos das antenas transmissora e receptora, em dBi .

d : é a distância em km .

f : é frequência em GHz .

2.2.3 Modelos de perdas por difracção

Alguns caminhos de propagação encontram um ou vários obstáculos separados e é necessário estimar as perdas causadas pelos mesmos. Para tal, é necessário idealizar a forma dos obstáculos, que podem ser tipo gume-de-faca (*knife-edge*) com largura desprezível ou de largura suave (*thick smooth*) com um raio de curvatura bem definido no topo. Obstáculos reais têm, obviamente, formas mais complexas, de forma que estes métodos devem ser utilizados apenas como uma aproximação [13].

Obstáculo tipo gume-de-faca (knife edge)

Na propagação de ondas electromagnéticas, o efeito de gume-de-faca consiste num redireccionamento por difracção de uma parte da radiação incidente que atinge um obstáculo bem definido.

O efeito de gume-de-faca é explicado pelo princípio Huygens-Fresnel, que afirma que uma obstrução bem definida para uma onda electromagnética cria uma fonte secundária, e cria consequentemente uma nova frente de onda. Esta propaga-se para a área de sombra do obstáculo [23].

Trata-se do método mais simples para o cálculo do efeito da perda por difracção causada por um obstáculo no percurso da onda. O obstáculo é modelado por um semi-plano posicionado transversalmente ao percurso [24]. Neste caso, todos os parâmetros são combinados num único parâmetro normalmente denotado por v que pode assumir uma variedade de formas de acordo com os parâmetros geométricos seleccionados.

$$v = h \cdot \sqrt{\frac{2}{\lambda} \cdot \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)} \quad (14)$$

Onde:

h: altura do gume-de-faca em m;

d1, d2: distâncias das extremidades do percurso ao topo do obstáculo em km;

λ : comprimento de onda;

Como mostra as Figuras 8 e 9 o parâmetro v também pode ser expresso por:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot d \cdot \alpha 1 \cdot \alpha 2}{\lambda}} \quad (15)$$

A difração por gume-de-faca, $J(v)$, pode ser também expressa em dB, segundo a equação:

$$J(v) = 6,9 + 20 \cdot \log \left(\sqrt{(v - 0,1)^2 + 1} + v - 0,1 \right) \text{ [dB]} \quad (16)$$

As Figuras 8 e 9 mostram respectivamente a condição de obstrução por gume-de-faca quando o obstáculo se encontra acima e abaixo da linha de vista.

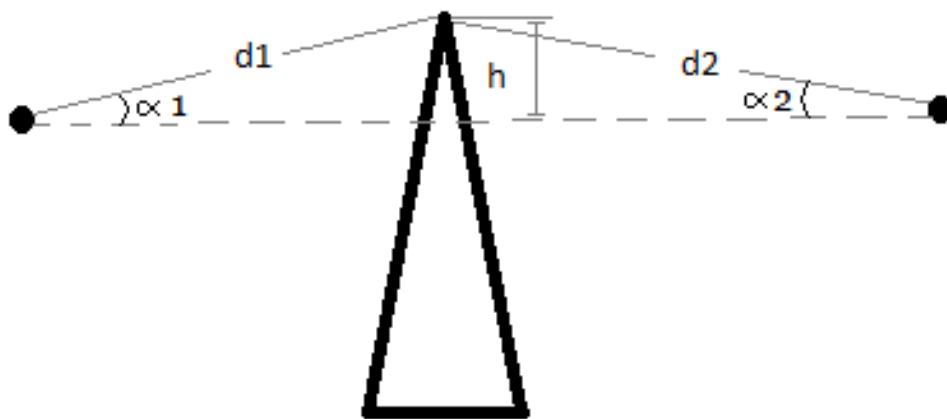


Figura 8 - Obstáculo gume-de-faca acima da linha de vista (adaptado de) [13].

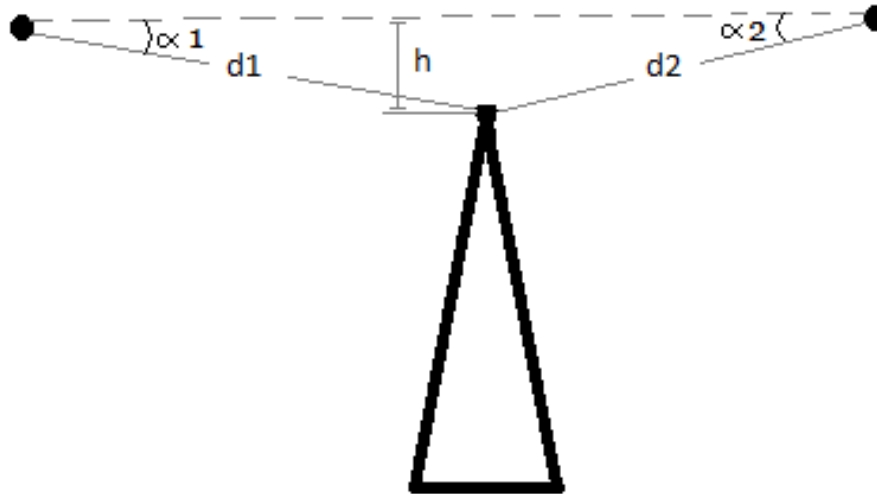


Figura 9 - Obstáculo gume-de-faca abaixo da linha de vista (adaptado de) [13].

Obstáculo arredondado (thick smooth)

Em frequências contidas nas faixas até UHF a forma do obstáculo torna-se um factor importante na determinação da atenuação. As formas apresentadas pelos obstáculos são bastante diversas. De uma forma geral, os obstáculos naturais têm uma forma arredondada ou convexa. Neste caso, podemos determinar o raio de curvatura do obstáculo e determinar a atenuação causada por ele.

A geometria de um obstáculo arredondado, de raio R , é ilustrada na figura 10 abaixo.

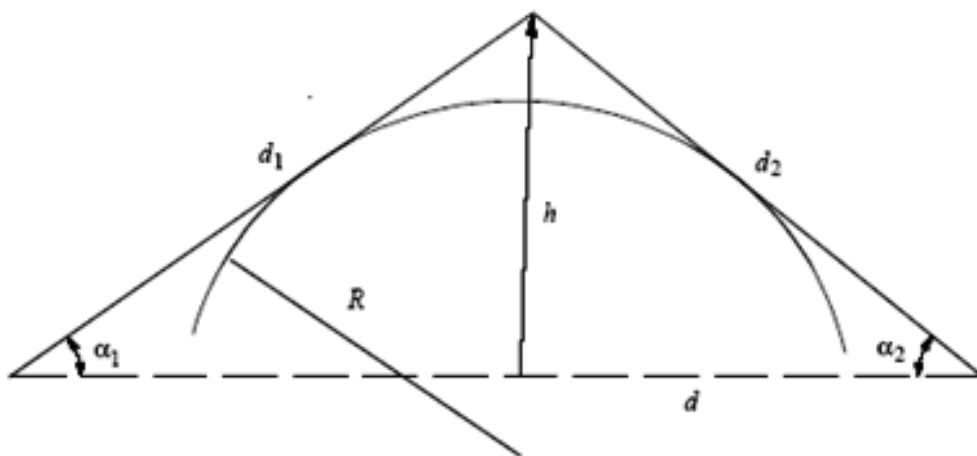


Figura 10 - Obstáculo do tipo thick smooth [13].

Note que as distâncias $d1$ e $d2$, e a altura h acima da linha de vista, são todas medidas para o vértice onde os raios projectados intersectam acima do obstáculo. A perda por difracção para essa geometria pode ser calculada como:

$$A = J(v) + T(m, n) \quad (17)$$

Onde $J(v)$ é a perda de Fresnel-Kirchoff devido ao equivalente gume-de-faca colocado com seu pico no ponto do vértice. O parâmetro sem dimensão v pode ser obtido a partir da equação apresentada no gume-de-faca. $T(m, n)$ é a atenuação adicional devido à curvatura do obstáculo:

$$T(m, n) = k \cdot m^b \quad (18)$$

$$k = 8,2 + 12 \cdot n \quad (19)$$

$$b = 0,73 + 0,27 \cdot [1 - e^{-1,43 \cdot n}] \quad (20)$$

$$m = R \cdot \frac{\left[\frac{d1+d2}{d1 \cdot d2}\right]}{\left[\frac{\pi \cdot R}{\lambda}\right]^{1/3}} \quad (21)$$

$$n = h \cdot \frac{\left[\frac{\pi \cdot R}{\lambda}\right]^{2/3}}{R} \quad (22)$$

Onde:

R é o raio de curvatura do obstáculo;

$d1$ e $d2$ são as distâncias das antenas transmissor e receptor ao obstáculo;

h é a altura relativa do obstáculo;

λ é o comprimento de onda.

Todas as variáveis devem estar na mesma unidade (m).

$T(m, n)$ pode ser também encontrado a partir da Figura 11.

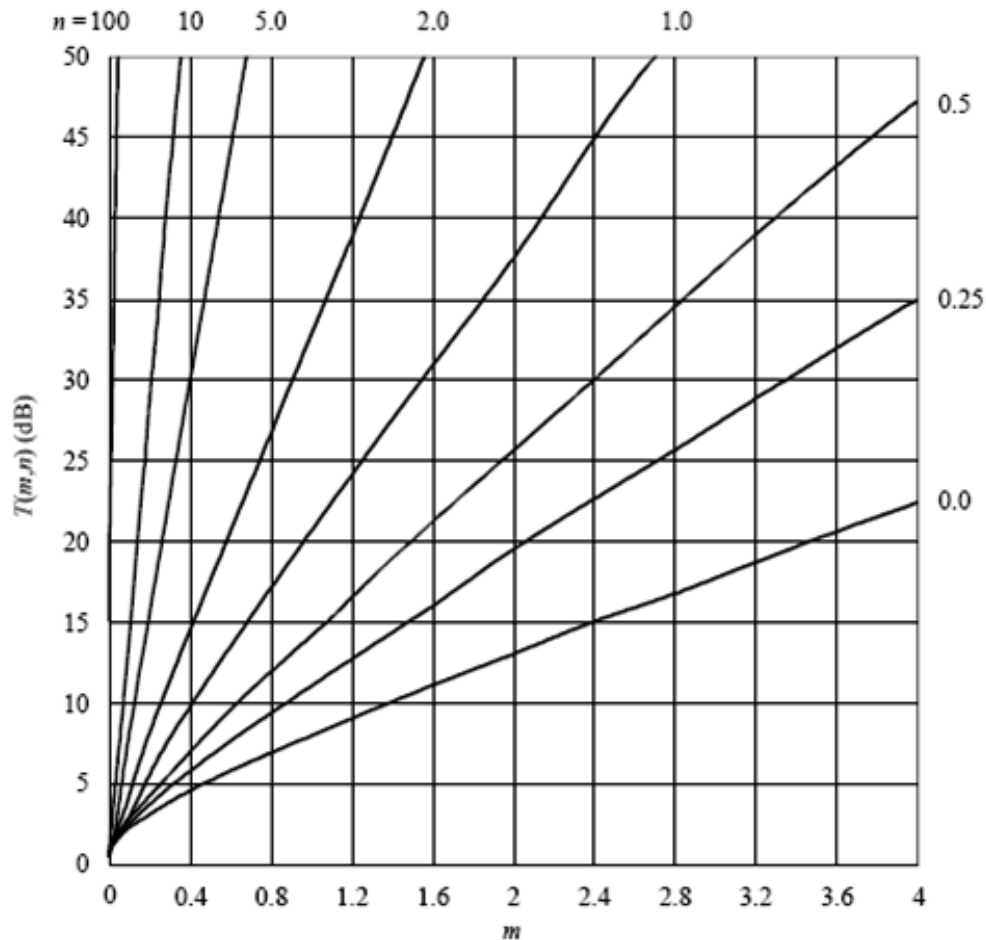


Figura 11 - Valor de $T(m,n)$ em função dos valores de m e n [13].

Note que à medida que R tende a zero, m e $T(m,n)$, também tendem a zero. Com isto, pode-se associar o modelo de espaço-livre com os modelos de difracção quando houver obstáculo na primeira zona de Fresnel para quantificar as perdas de propagação [13].

2.2.4 Modelo de Terra-plana

Este modelo considera a presença da terra com uma superfície reflectora lisa e plana como mostra a Figura 12. Esta configuração tem em consideração não somente o raio directo entre o transmissor e receptor, como também o raio reflectido na superfície da terra [24]. Quando um feixe electromagnético incide num terreno plano, originam-se mais dois feixes, que são a onda reflectida e uma onda de superfície [25].

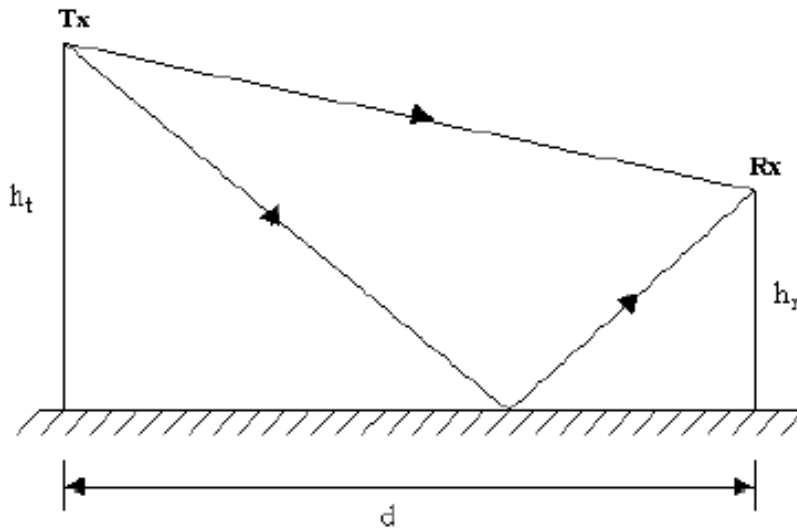


Figura 12 - Condição de propagação em terra-plana [24].

Para antenas isotrópicas acima da terra-plana, o campo eléctrico recebido é:

$$E = E_0 \cdot (1 + R_c \cdot e^{j\Delta} + (1 - R_c) \cdot F \cdot e^{j\Delta} + \dots) \quad (23)$$

Onde:

R_c é o coeficiente de reflexão do solo;

E_0 é o campo eléctrico para propagação em espaço-livre.

Esta expressão pode ser interpretada como a soma complexa da onda directa com a onda reflectida no solo e a onda de superfície, que pode ser desprezada para frequências acima de 800 MHz [26].

Para uma onda incidente polarizada horizontalmente (24), e para uma polarizada verticalmente (25) na superfície de terra-plana, temos respectivamente:

$$R_c = \frac{\sin \Psi - \sqrt{(\epsilon_r - jx) - \cos^2 \Psi}}{\sin \Psi + \sqrt{(\epsilon_r - jx) - \cos^2 \Psi}} \quad (24)$$

$$R_c = \frac{(\epsilon_r - jx) \cdot \sin \Psi - \sqrt{(\epsilon_r - jx) - \cos^2 \Psi}}{(\epsilon_r - jx) \cdot \sin \Psi + \sqrt{(\epsilon_r - jx) - \cos^2 \Psi}} \quad (25)$$

Onde:

ϵ_r : é a constante dielétrica relativa do solo.

Ψ : ângulo de incidência entre o raio reflectido e a superfície.

χ : $\sigma/(2 \pi f c \epsilon_0)$ onde σ é a condutividade do solo e ϵ_0 é a constante dielétrica no vazio.

Então, $\chi = \sigma/(\omega \epsilon_0)$.

A diferença de fase entre a onda directa e a onda reflectida pode ser encontrada a partir de uma aproximação com dois raios não tendo em conta a onda de superfície. Chamando de h_t e h_r as alturas das antenas de transmissão e recepção, respectivamente, a diferença de fase pode ser expressa por:

$$\Delta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \left(\sqrt{d^2 + (h_t + h_r)^2} \right) - \sqrt{d^2 + (h_t - h_r)^2} \quad (26)$$

Fazendo:

Temos que:

$$\sqrt{1' + \epsilon_r} \cong 1 + \frac{\epsilon_r}{2} \quad (27)$$

$$\Delta \cong \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{h_t \cdot h_r}{d} \quad (28)$$

A diferença de fase e a aproximação para o coeficiente de reflexão dão um modelo de dois raios frequentemente utilizado para propagação em terra plana.

Para d elevado, ($d \gg 5h_t \cdot h_r$), o coeficiente de reflexão tende para -1, de forma que a atenuação pode ser dada por:

$$L_{TP} = 20 \cdot \log(4\pi d) - 20 \cdot \log(\lambda) - 20 \cdot \log \left\{ \left[2 \cdot \sin \left(\frac{2\pi \cdot h_t \cdot h_r}{\lambda \cdot d} \right) \right]^2 \right\} \text{ [dB]} \quad (29)$$

Onde:

d : é a distância entre as estações em metros.

λ : comprimento de onda em metros

h_t : é a altura da antena de transmissão em metros.

h_r : é a altura da antena de recepção em metros.

2.2.5 Modelo de Egli

Egli baseou-se no modelo de terra-plana, e através de medições, adicionou um factor de correcção β que varia com a frequência [27]. Em contraste com o modelo teórico de terra-plana, Egli compreendeu um aumento da perda de percurso com a frequência para faixas de $1 < d < 50 \text{ km}$, e propôs o seguinte modelo semi-empírico para perda de propagação:

$$L_{P50} = -32 + 40.\log(d) + 20.\log(f) - 20.\log(h_t) - 20.\log(h_r) \text{ [dB]} \quad (30)$$

Onde:

d : é a distância entre as estações em metros.

h_t : é a altura da antena de transmissão em metros.

h_r : é a altura da antena de recepção em metros.

f : é a frequência em MHz.

Nota-se pela equação que Egli introduziu uma correcção empírica dependente de $(40 \text{ MHz}/f)^2$ para frequências entre 30 MHz e 1 GHz. A equação provê a perda de propagação média (50%), onde, se outra estimativa diferente da média for desejada, o factor de ajuste em dB pode ser obtido da Figura 13.

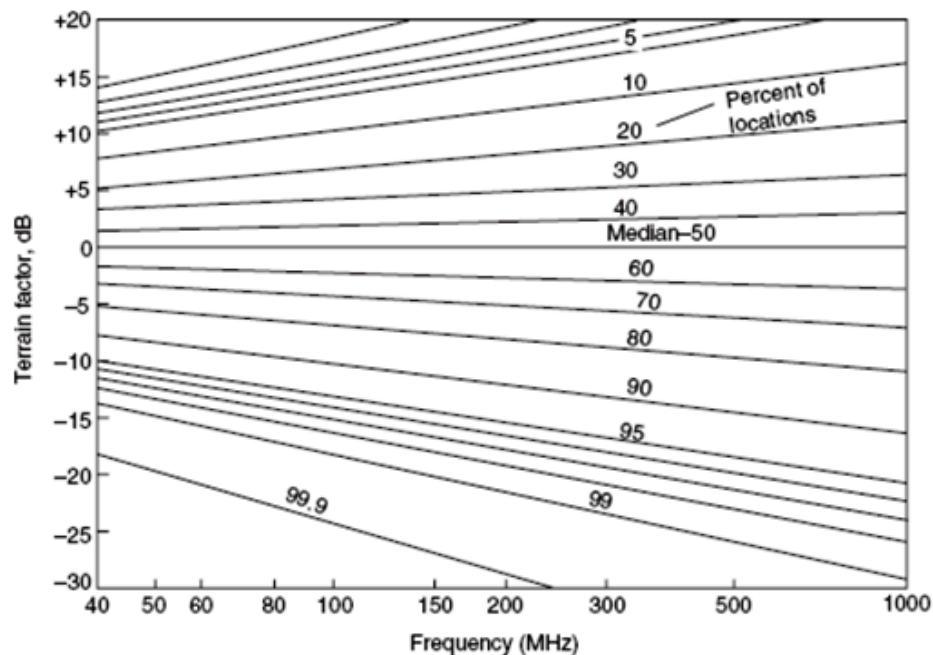


Figura 13 - Factor de ajuste para diversas frequências e probabilidades no modelo de Egli [27].

2.2.6 Modelo de Longley-Rice

Trata-se de um modelo bastante detalhado, para predição em terreno irregular, também conhecido como ITM (Irregular Terrain Model) [27]. O modelo é baseado em dados adquiridos entre 40 MHz e 20 GHz em faixas de distâncias que vão de 1 a 2000 km, com altura das antenas variando entre 0.5 e 3000 m, para polarização vertical e horizontal. O modelo toma em conta as condições do relevo, clima, condições e curvatura do solo.

Devido ao nível de detalhe do modelo, este é geralmente aplicado a partir de auxílio computacional através de um algoritmo. Podem ser encontradas várias versões comerciais e algumas livres de algoritmos do modelo Longley-Rice, como por exemplo, o *software Radio Mobile* [28], disponível para Windows. A Figura 14 ilustra alguns dos parâmetros necessários para que o algoritmo do ITM calcule as perdas, ressaltando a complexidade desse modelo.

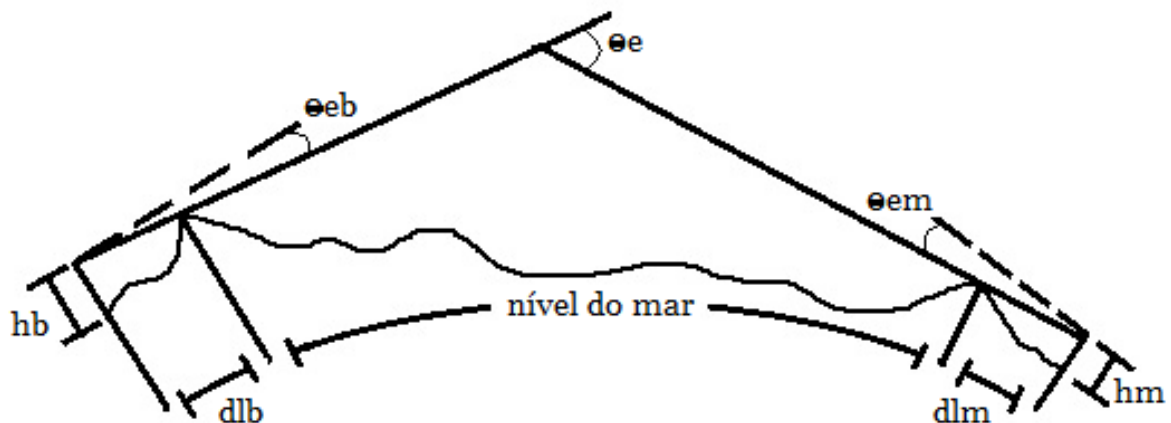


Figura 14 - Alguns parâmetros utilizados pelo ITM para computar perdas (adaptado de) [28].

Onde:

hb e hm : são as alturas efectivas das antenas de transmissão e recepção.

dlb e dln : são as distâncias ao horizonte das antenas.

θ_{eb} e θ_{em} : são os ângulos de elevação ao horizonte.

θ_e : distância angular para o caminho além do horizonte.

Δh : parâmetro de irregularidade do terreno.

2.2.7 Modelo de Okumura

Este é um dos modelos mais utilizados para a propagação em áreas urbanas [29]. O modelo não deve ser utilizado quando as áreas urbanas contêm várias estruturas com muita altura e que bloqueiam o sinal [30]. O valor médio da perda de propagação pode ser expresso por [29]:

$$L_{50} = L_F + A_{mu}(f, d) - G(h_{te}) - G(h_{re}) - G_{AREA} \text{ [dB]} \quad (31)$$

Onde:

L_{50} é o valor médio da perda de propagação;

L_F a perda em espaço-livre;

A_{mu} é a atenuação média relativa á frequência f , pode ser calculado através de curvas empíricas;

d corresponde à distância entre a base e a unidade móvel;

$G(h_{te})$ e $G(h_{re})$ são os ganhos da antena da estação base e da antena móvel, respectivamente;

h_{te} e h_{re} são as alturas das antenas da estação base e receptora;

G_{area} é o ganho gerado pela operação de transmissão, pode ser calculado através de curvas empíricas.

O modelo é considerado o mais simples e melhor em termos de precisão na previsão da perda de propagação para os primeiros sistemas celulares. É muito prático, e tornou-se um padrão para sistemas de planeamento no Japão. Este modelo serve como base ao modelo de Hata.

2.2.8 Modelo de Hata

O modelo de Hata é uma fórmula empírica [31] da perda de propagação fornecida pelo modelo de Okumura. A fórmula para a perda de propagação média em áreas urbanas é dada por:

$$L_{50} = 69,55 + 26,6 \cdot \log(f_c) - 13,82 \cdot \log(h_{te}) - a(h_{re}) \\ + (44,9 - 6,55 \cdot \log(h_{te})) \cdot \log(d) \text{ [dB]} \quad (32)$$

Onde:

f_c é a frequência (em MHz), que varia de 150 MHz para 1500MHz;

h_{te} e h_{re} são as alturas efectivas da estação base e das antenas móveis (em metros), respectivamente;

d é a distância da estação de base para a antena móvel;

$a(h_{re})$ é o factor de correcção para a altura da antena da unidade celular, que é uma função do tamanho da área de cobertura.

Para pequenas e médias cidades, o factor de correcção da antena móvel é dada por:

$$a(h_{re}) = (1,1 \cdot \log(f_c) - 0,7)h_{re} - (1,56 \cdot \log(f_c) - 0,8) \text{ [dB]} \quad (33)$$

Para uma grande cidade, é dada por:

$$a(h_{re}) = 8,29 \cdot (\log(1,54 \cdot h_{re}))^2 - 1,1 \text{ [dB]}, \text{ para } f_c \leq 300\text{MHz} \quad (34a)$$

$$a(h_{re}) = 3,2 \cdot (\log(11,75 \cdot h_{re}))^2 - 4,97 \text{ [dB]}, \text{ para } f_c \geq 300\text{MHz} \quad (34b)$$

Para obter a perda numa área suburbana, a fórmula é alterada do seguinte modo:

$$L_{50} = L_{50}(\text{urban}) - 2 \cdot [\log\left(\frac{f_c}{28}\right)]^2 - 5,4 \text{ [dB]} \quad (35a)$$

E para áreas rurais, vem que:

$$L_{50} = L_{50}(\text{urban}) - 4,78 \cdot (\log(f_c))^2 - 18,33 \cdot \log(f_c) - 40,98 \text{ [dB]} \quad (35b)$$

Este modelo é bastante adequado para grandes sistemas móveis de células, mas não é adequado para sistemas de comunicações pessoais, que cobrem uma área circular de cerca de 1 km de raio [31].

2.2.9 Modelo COST-231-Walfisch-Ikegami

Este modelo utiliza o modelo teórico Walfisch-Bertoni, e é composto de três termos [32]:

$$L_b = L_0 + L_{rts} + L_{msd} \text{ , para } L_{rts} + L_{msd} > 0 \text{ (36a)}$$

$$L_b = L_0 \text{ , para } L_{rts} + L_{msd} \leq 0 \text{ (36b)}$$

Onde:

L_0 representa a perda em espaço-livre;

L_{rts} representa a difracção desde o topo do edifício até a rua, bem como a perda por espalhamento;

L_{msd} representa a difracção por multi-tela;

A perda por espaço-livre é dada por:

$$L_0 = 32,4 + 20.\log(d) + 20.\log(f) \text{ (37)}$$

Onde:

d é a distância em Km;

f é a frequência em MHz.

A perda por difracção L_{rts} é calculada através de:

$$L_{rts} = -16,9 - 10.\log(w) + 10.\log(f) + 20.\log(\Delta h_{Mobile}) + L_{ori} \text{ (38)}$$

Onde:

w é a largura da rua em metros, e:

$$\Delta h_{Mobile} = h_{roof} - h_{Mobile} \quad (39)$$

É a diferença de altura a que se encontra o topo da antena em relação ao topo do edifício.

L_{ori} é dada por:

$$L_{ori} = -10 + 0,354.\phi, \text{ para } 0 \leq \phi < 35^\circ \quad (40a)$$

$$L_{ori} = 2,5 + 0,075.(\phi - 35), \text{ para } 35^\circ \leq \phi < 55^\circ \quad (40b)$$

$$L_{ori} = 4,0 + 0,114.(\phi - 55), \text{ para } 55^\circ \leq \phi < 90^\circ \quad (40c)$$

Onde:

ϕ é o ângulo de incidência em relação à direcção da rua.

A perda por difracção L_{msd} é calculada através de:

$$L_{msd} = L_{bsh} + k_a + k_b \cdot \log(d) + k_f \cdot \log(f) - 9 \cdot \log(b) \quad (41)$$

Onde:

b é a distância entre os prédios ao longo do percurso;

L_{bsh} e k_a representam o aumento da perda de percurso, devido a uma reduzida altura da antena estação-base.

Usando a expressão:

$$\Delta h_{Base} = h_{base} - h_{roof} \quad (42)$$

Onde h_{base} é a altura da estação-base, observa-se que L_{bsh} e k_a , podem ser obtidas por:

$$L_{bsh} = -18 \cdot \log(1 + \Delta h_{Base}), \text{ para } h_{base} > h_{roof} \quad (43a)$$

$$L_{bsh} = 0, \text{ para } h_{base} \leq h_{roof} \quad (43b)$$

$$k_a = 54, \text{ para } h_{base} > h_{roof} \quad (44a)$$

$$k_a = 54 - 0,8 \cdot \Delta h_{Base}, \text{ para } d \geq 0,5Km \text{ e } h_{base} \leq h_{roof} \quad (44b)$$

$$k_a = 54 - 1,6 \cdot \Delta h_{Base} \cdot d, \text{ para } d < 0,5Km \text{ e } h_{base} \leq h_{roof} \quad (44c)$$

A perda por difracção em função da distância e da frequência, k_d e k_f respectivamente, pode ser expressa da seguinte forma:

$$k_d = 18, \text{ para } h_{base} > h_{roof} \quad (45a)$$

$$k_d = (18 - 15) \cdot \frac{\Delta h_{Base}}{h_{roof}}, \text{ para } h_{base} \leq h_{roof} \quad (45b)$$

$$k_f = -4 + 0,7 \left(\frac{f}{925} - 1 \right) \quad (46a)$$

Para áreas suburbanas e cidades pequenas com pouca densidade vegetativa, vem que:

$$k_f = -4 + 1,5 \left(\frac{f}{925} - 1 \right) \quad (46b)$$

Este modelo foi considerado pela UIT-R (*International Telecommunication Union Radiocommunication Sector*) na área das Telecomunicações Móveis Internacionais – 2000, como um modelo a ser normalizado [30].

2.3 Plataformas de análise e simulação de Radiofrequência

Antes de desenvolver a aplicação foi necessário avaliar algumas plataformas existentes para o cálculo de radiofrequências de forma a facilitar o enquadramento da mesma no panorama actual. Assim sendo de seguida são apresentadas algumas plataformas actuais já desenvolvidas, referindo em cada uma delas os aspectos mais importantes.

TAP (Terrain Analysis Package) – *software* para realizar avaliação dos locais de transmissão existentes ou propostos; previsões de cobertura rádio, estudos de intermodulação e administração de radiotransmissores, televisão e radiodifusão em FM, MMDS, ITFS, PCS, SCADA, WLL, Wi-Fi, WiMAX, microondas.

A versão 6.0 do pacote de análise de terreno (TAP) para o Windows é composta por 25 módulos que, quando combinados, são ferramentas com uma ampla capacidade de projecção de sistemas RF. A maioria dos estudos é controlada através de uma das duas telas principais - HDPath e HDCoverage. Os cálculos de cobertura, são feitos em HDCoverage e podem ser exibidos e impressos como mapas com a configuração individualizada. Esta plataforma não é *open source* [33]. A ilustração do *software* encontra-se na Figura 15.

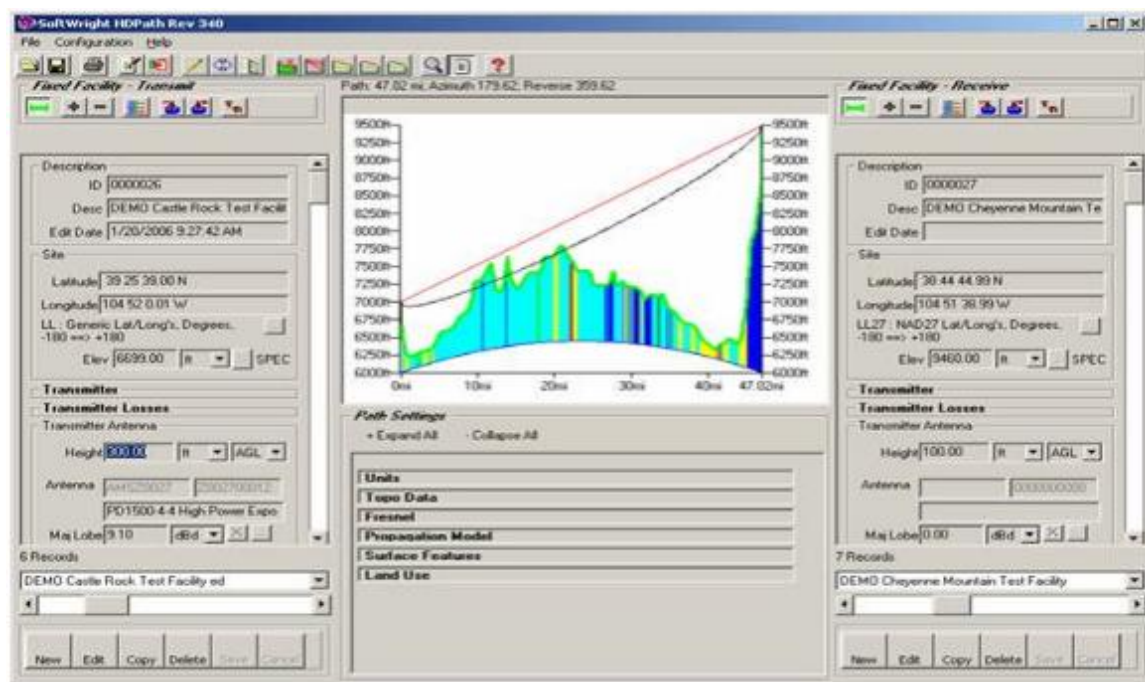


Figura 15 - Exemplo do software TAP [33].

WIZARD - fornece todas as funcionalidades de modelagem e análise do modelo RF Terra plana com base de propagação para as principais tecnologias sem fio (AMPS, CDMA, GSM, TDMA e SMR). Esta aplicação baseada em janelas produz parcelas de previsão *full-color* para auxiliar o planeamento de crescimento da rede, análise de

interferência, e implementações de multi-tecnologia. Esta plataforma é *open source*. Não existe especificações quanto ao sistema operativo em que este pode ser executado, e apesar de já ter sido uma plataforma bastante utilizada, encontra-se descontinuado [34].

WinProp – software adequado para uso em macro, mini, micro planeamento de rede. Possui métodos de cálculo através de equações parabólicas para as células urbanas, redes sem fio indoor e planeamento de redes LAN sem fio (WLAN). As características incluem a previsão da intensidade de campo, potência recebida, atraso de propagação e de desvanecimento. O software é *open source* mas apenas para utilizadores frequentes, este é baseado em Windows [34] e pode ser ilustrado através da Figura 16.

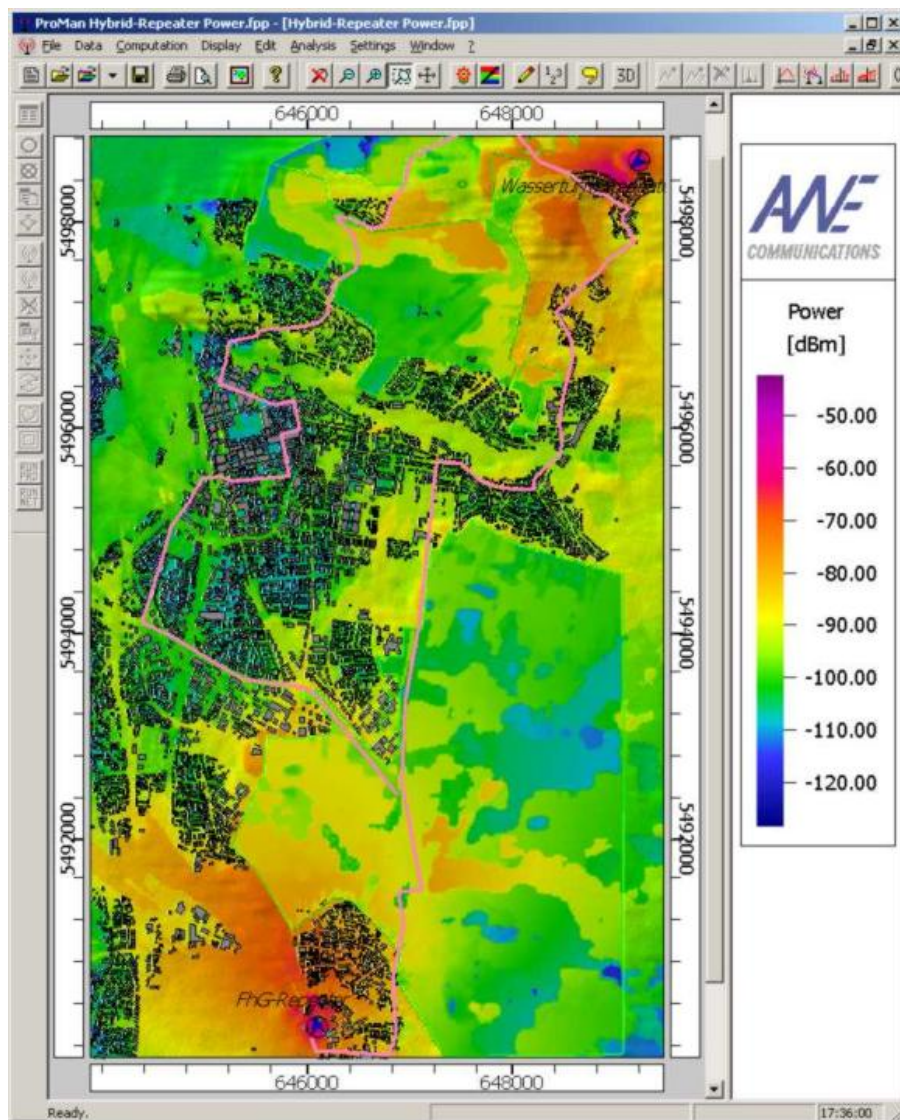


Figura 16 - Exemplo do software WinProp [34].

Planet e decibel Planner - é uma solução empresarial projectada para a implementação de toda a rede e organização da mesma. Permite aos utilizadores criarem redes utilizando 2G, 2.5G, 3G ou tecnologias sem fio. O decibel Planner é usado para projectar redes sem fio baseadas em CDMA2000, bem como outras tecnologias de banda larga móvel e sem fio. Também combina perfeitamente previsão RF com capacidade de análise espacial, permitindo aos operadores de rede, de forma eficiente, planejar, construir e operar com redes sem fio de alta velocidade.

O software oferece serviços com suporte para 2G, 2.5G e 3G, incluindo: AMPS, iDEN, GSM / TDMA, GPRS, cdmaOne, cdma2000 (1xRTT, 1xEV-DO, 1xEV-DV), UMTS, ponto a ponto, microondas e planeamento fixo via rádio (2 GHz e 40 GHz) [34]. Esta plataforma não é *open source*, o sistema operativo requerido é o Windows ou Unix, e pode ser ilustrado através da Figura 17.

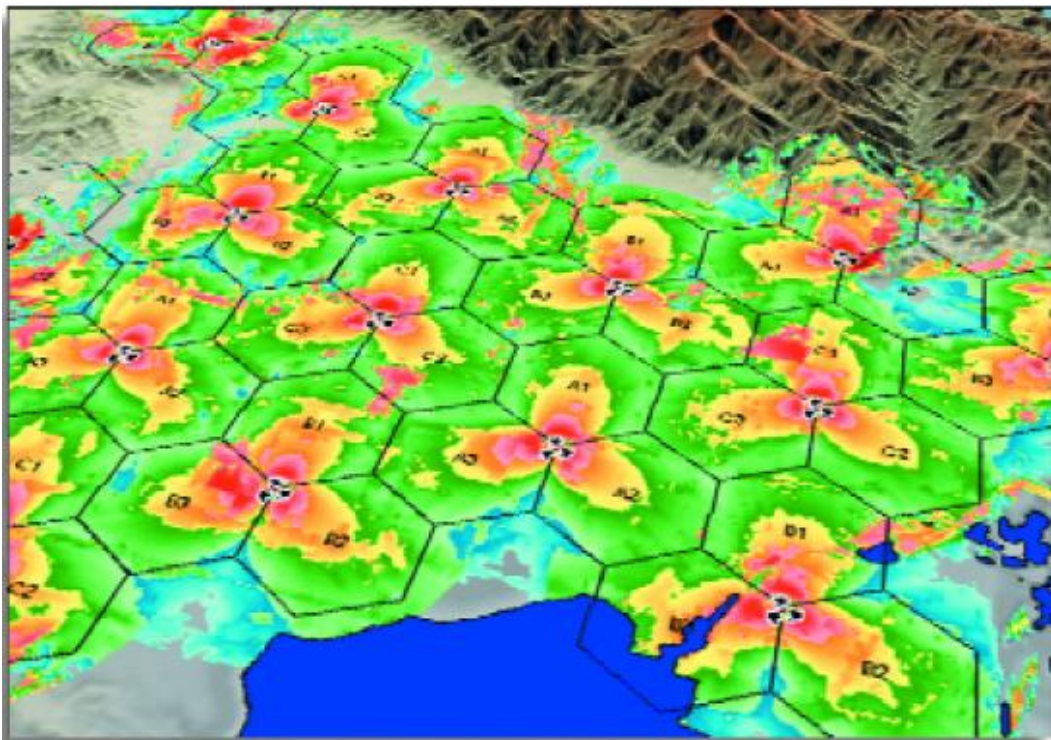


Figura 17 - Exemplo do software Decibel Planner [34].

ASTRIX - é uma plataforma de planeamento de sistemas móveis, é construído em torno de três componentes principais: RPS - Radio Planning System, para planeamento e gestão de sistemas móveis; RL.T - Radio Link Tool; Rede Integrada de Base de Dados -

A base de dados é criada em Oracle e com um formato aberto [34]. Esta plataforma não é *open source*, mas é compatível com os sistemas operativos Windows e Unix. Esta plataforma é ilustrada na Figura 18.

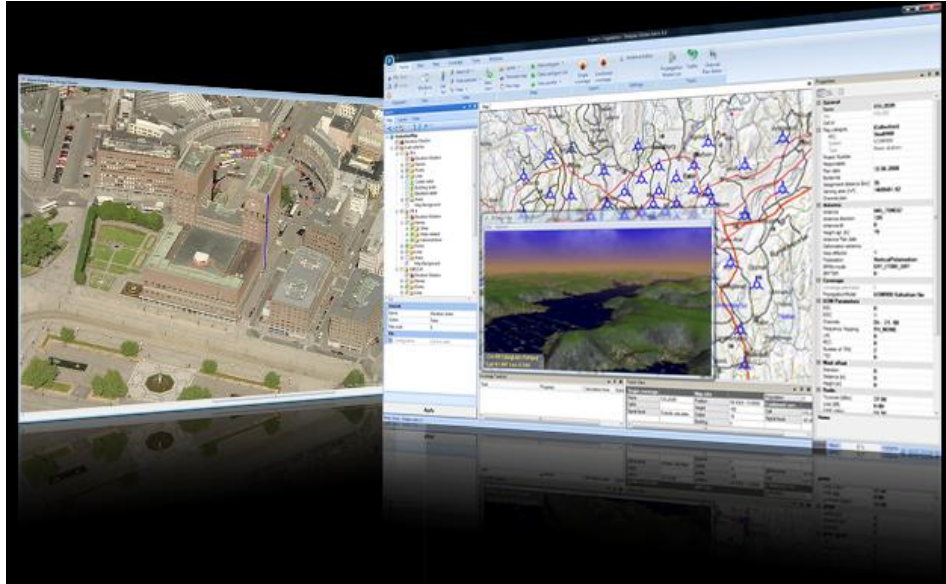


Figura 18 - Exemplo do software AXTRIX [34].

Radio Mobile – é um programa de simulação de propagação RF, que opera para frequências de 20MHz a 20GHz. Este é baseado no modelo ITS Longley-Rice.

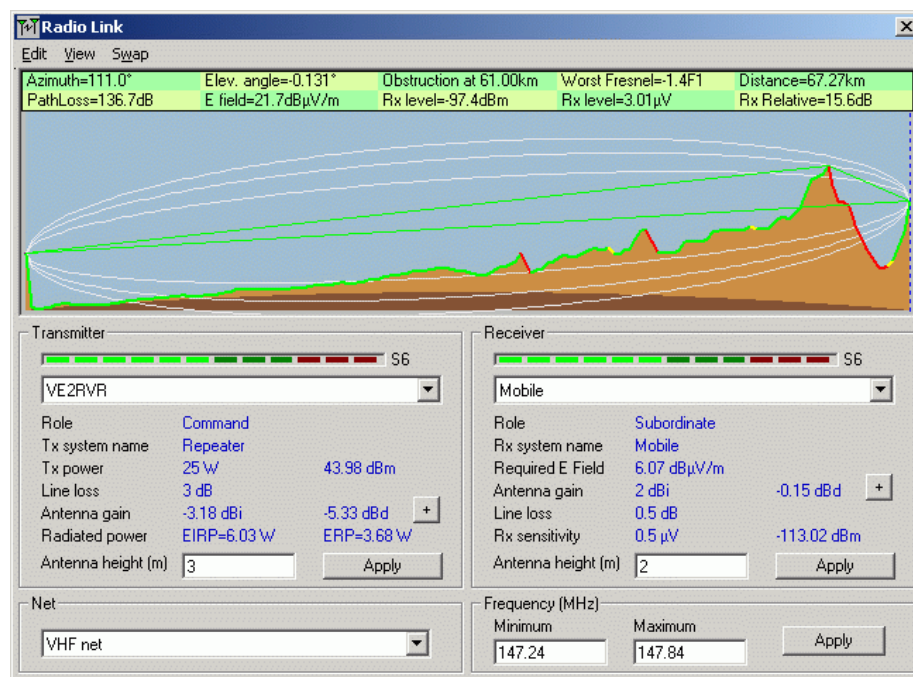


Figura 19 - Exemplo do software Radio Mobile [34].

A aplicação permite utilizar mapas e dados do Radar *Space Shuttle*, permitindo ao utilizador movimentar as unidades de transmissão de ondas RF. Este software é *open source*, e pode ser utilizado quer em Windows, quer em sistemas Unix [44]. A Figura 19 ilustra a aplicação.

3. Concepção e Implementação

Este projecto deverá ser a base de um sistema de estudo para redes sem fios, que deverá permitir acrescentar novos módulos com novas funcionalidades. Além da parte de implementação da aplicação envolve o desenvolvimento da parte de análise da propagação.

Esta aplicação terá grande utilidade, visto que visa englobar vários modelos de propagação RF e será realizada de forma a permitir a inclusão de quaisquer modelos existentes e que futuramente possam surgir, será dinâmica pois permitirá ao utilizador mover os componentes consoante o modelo de propagação seleccionado e por fim terá a vantagem de permitir a interoperatividade nos diversos sistemas operativos já que será realizada em linguagem Java, recorrendo a API Java 2D.

Para o desenvolvimento da aplicação será utilizada a Netbeans IDE 6.9. Esta ferramenta foi escolhida devido ao facto de ser disponibilizada de uma forma gratuita e livre, além disso permite o desenvolvimento da aplicação com interface gráfica em Java, de uma forma bastante simples.

3.1 Concepção

Quanto à concepção esta encontra-se dividida em duas partes, uma primeira em que é abordada a forma como o ambiente gráfico (aquilo que é visível ao utilizador) é elaborado, e uma segunda parte em que são apresentados os objectos necessários e os respectivos métodos. O diagrama de blocos da Figura 20 apresenta o modelo da aplicação proposta.

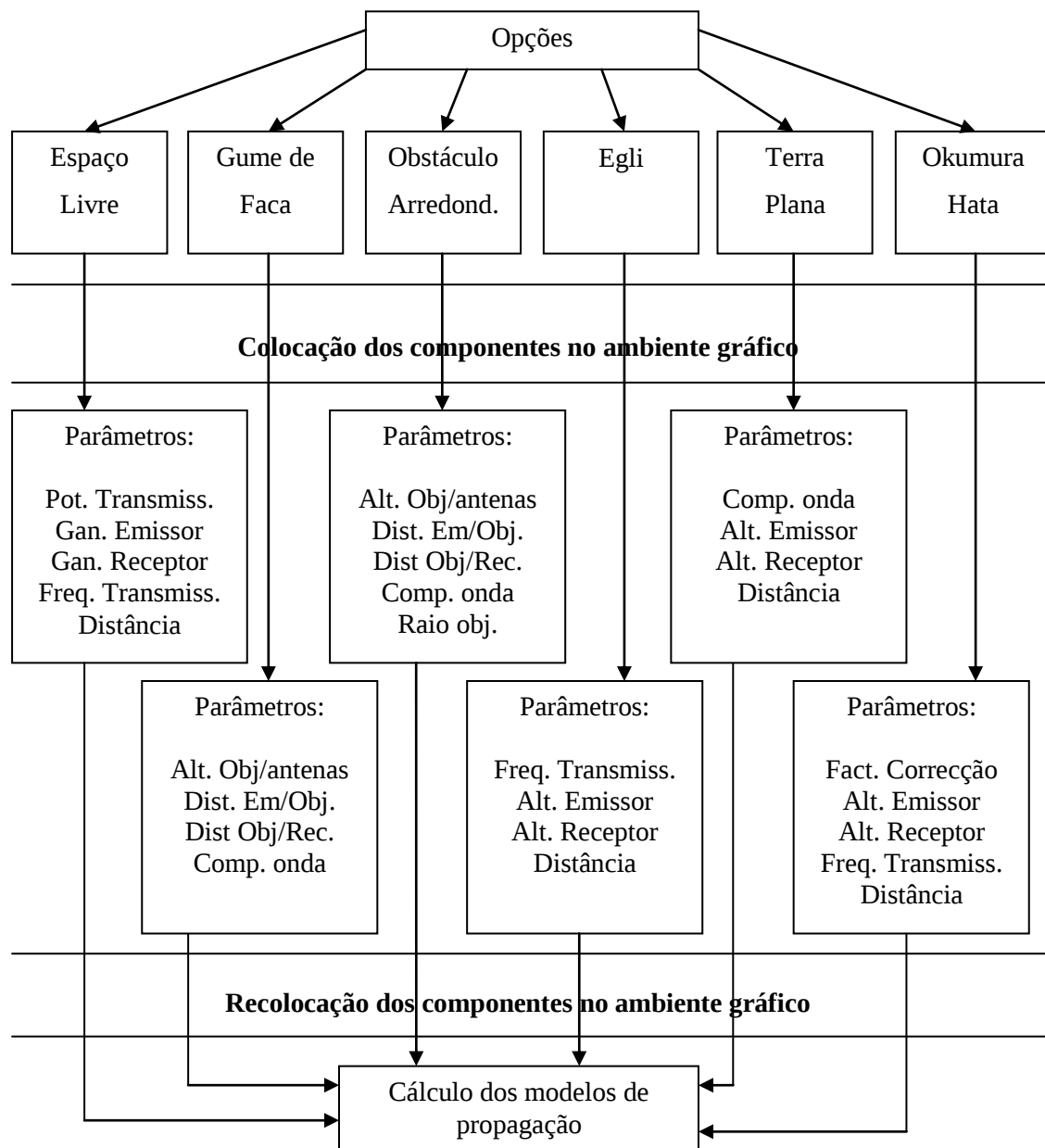


Figura 20 - Diagrama de blocos da aplicação.

A aplicação proposta apresentará ao utilizador a possibilidade de escolha de um dos 6 modelos de propagação implementados. Estes modelos serão escolhidos pelo utilizador a partir de um menu de escolha.

Para além deste menú, a aplicação também deverá apresentar ao utilizador uma área de desenho, onde os diferentes componentes do sistema de telecomunicações a simular serão apresentados. Ao utilizador deverá ser dada a possibilidade de alterar a posição e dimensão dos diferentes componentes. Também deverá ser dada a possibilidade de alterar os parâmetros intrínsecos a cada um dos modelos.

Depois de escolher um dos modelos de propagação (Espaço Livre, Gume-de-Faca, Obstáculo Arredondado, Egli, Terra Plana e Okmura-Hata), a aplicação escolherá os intervenientes no modelo (transmissor, receptor, obstáculos), e coloca-os na área de desenho.

Após esta fase, cada modelo escolhido permite a alteração de diversos parâmetros. No caso do modelo de propagação em Espaço livre os parâmetros variáveis são: potência de transmissão, ganho da antena emissora, ganho da antena receptora, frequência de transmissão e distância entre as antenas. Já para o modelo Gume-de-faca os parâmetros passíveis de serem alterados são: diferença de altura entre o objecto e as antenas, distância entre o emissor e o objecto, distância entre o objecto e o receptor e o comprimento de onda. Para o modelo Obstáculo arredondado podemos alterar os mesmos parâmetros do modelo referido anteriormente, com o acréscimo do raio do obstáculo.

Para o modelo de Egli, os parâmetros ajustáveis são: frequência de transmissão, altura da antena emissora, altura da antena receptora e a distância entre as duas antenas. No que diz respeito ao modelo de propagação Terra Plana, este contém os mesmos parâmetros alteráveis que o Egli com excepção da frequência de transmissão que neste modelo é substituída pelo comprimento de onda. Para o último modelo mas não menos importante, Okomura-Hata, os parâmetros ajustáveis são os mesmos que o modelo Terra Plana, com o acréscimo da variável, factor de correcção.

Após todos estes passos o utilizador pode movimentar/redimensionar os componentes adicionados a área de desenho consoante o modelo de propagação que foi seleccionado previamente, de forma a alterar alguns parâmetros que só são alteráveis por interacção com os objectos.

Por fim, quando o utilizador decidir que os parâmetros para um determinado modelo de propagação já se encontram adequados, o utilizador poderá indicar à aplicação que pretende determinar o valor do sinal recebido.

No final de cada cálculo o utilizador pode seleccionar um novo modelo a utilizar, bastando para tal repetir toda a sequência descrita acima.

3.1.1 A tecnologia java

O Java não é apenas uma linguagem de programação [36], mas sim uma tecnologia que inclui múltiplos componentes. A tecnologia Java é formada por um conjunto de elementos que envolvem, além da sintaxe da linguagem de programação, os formatos de arquivos (.java e .class), um conjunto de APIs (classes, componentes, *frameworks*), e uma Máquina Virtual Java (JVM).

O Java é uma linguagem de programação de alto nível orientada a objectos, bastante funcional que se distingue pelas seguintes características [37] [38]: é simples, orientada a objectos, possui uma arquitectura neutra, é portátil, distribuída, interpretada, segura, tem alta performance, é multi-processo e dinâmica.

A plataforma Java é baseada em componentes de *software* que trabalham sobre *hardware* de outras plataformas. Esta é constituída por dois elementos essenciais: Java Virtual Machine (JVM), que interpreta os *byte-codes* gerados e permite que a linguagem Java seja utilizada por qualquer máquina, e a Java Application Programming Interface (API) [39][42].

Uma das características chave desta tecnologia é a possibilidade de uma aplicação ser executada em múltiplas plataformas, sem que haja a necessidade de recompilar o código. Daí esta tecnologia estar relacionada com a sigla WORA (Write Once Run Anywhere), ou seja, a aplicação é escrita e compilada uma vez e executada em qualquer plataforma, desde que haja uma implementação da JVM.

Java Application Programming Interface (API)

O Java API é um conjunto de bibliotecas que permitem disponibilizar diversas funcionalidades aos programadores. Essas bibliotecas são constituídas por um conjunto de classes, que se encontram agrupadas em pacotes (*packages*). Cada *package* possui classes com funcionalidades úteis em ramos específicos da programação Java.

3.1.2 API Java 2D

A API Java 2D pertence ao *package* `java.awt` que contém as classes relacionadas com a interface gráfica nomeadamente menus, botões, caixas de texto, etc. Ainda possui classes que tratam do processamento de imagens e que são utilizadas no tratamento de eventos criados pela interface gráfica [40].

Em computação, o Java 2D é uma interface de programação de aplicações (API) para desenhar gráficos em duas dimensões usando a linguagem Java. O Java 2D é implementado como uma extensão do *Abstract Window Toolkit* (AWT).

Inicialmente, os projectistas da AWT atribuíram a tarefa de desenhar janelas, botões e caixas de texto ao sistema operativo. Mas logo perceberam que não era muito portátil, e limitava severamente a performance do Java em aplicações mais sérias. Então, decidiram associar à AWT uma nova extensão, chamada *Swing*, que desenharia integralmente todos os componentes do painel. Ao fazer isso, a biblioteca Java 2D ganhou grande importância [41]

Entretanto, uma das suas grandes reclamações sempre foi o desempenho, o que motivou os projectistas da Sun a investir em optimizações no Java 2D. Entre elas, está a aceleração de *hardware* (integrada com OpenGL), que possibilitou trabalhar em modo janela. Esta API contém várias operações que se tornam necessárias aquando a realização de uma aplicação. Esta permite-nos desde desenhar objectos, moldar os próprios objectos e mesmo mover os objectos criados na aplicação] [40].

3.1.3 Criar ambiente gráfico

Recorrendo à API Java2D, é fundamental à partida criar o ambiente gráfico, ou seja aquilo que se torna visível ao utilizador, este tem que ser simples, prático e apelativo. Para tal, esta API, tem ferramentas básicas de desenho.

Na aplicação implementada, o passo inicial passou por criar os objectos que representarão as estruturas reais (antena emissora e receptor, bem como os impedimentos naturais à propagação do sinal), para tal recorremos a uma classe *MyImage*, apresentada na Figura 21 que controlará todos os parâmetros dos objectos desejados.

```
class MyImage {  
  
    public boolean enabled = true;  
  
    Image img;  
    float xpos, ypos, width, height;  
  
    public float getXPos() {  
        return xpos;  
    }  
  
    public float getYPos() {  
        return ypos;  
    }  
  
    public float getWidth() {  
        return width;  
    }  
  
    public float getHeight() {  
        return height;  
    }  
  
    public MyImage(String filename, float x, float y, float h, float w) {  
        img = new ImageIcon(this.getClass().getResource(filename)).getImage();  
        xpos=x;  
        ypos=y;  
        width=w;  
        height=h;  
    }  
  
    Image getImage() {  
        return img;  
    }  
}
```

Figura 21 - Java Classe para obtenção dos objectos através de imagens.

Esta classe guarda a posição em que o objecto visual tem que estar no ecrã (posição x, posição y), bem como tem as suas características (altura, largura), possui também vários métodos necessários aquando da necessidade de utilização desses objectos (*getposx()*, *getposy()*, *getheight()*, *getwidth()*, que retornam os valores da posição x, posição y, altura, largura, respectivamente, *setposx()*, *setposy()*, *setheight()*, *setwidth()*, que permitem alterar os valores desse mesmo objecto).

Assim, através desta classe é possível recorrer a imagens já existentes e associá-las a objectos, fazendo com que seja mais fácil a sua manipulação: alterar altura, alterar posição, mover, etc.

Para guardar os diferentes componentes (instancias da classe *MyImage*), é utilizado um *java.util.Array*. Este objecto permite de uma forma bastante simples, guardar qualquer objecto que descenda de *java.lang.Object*, ou seja, qualquer objecto do Java.

Após termos os objectos necessários, passemos a um outro passo, que é o facto de conseguirmos movimenta-los na aplicação, com o clique do rato. Para tal é necessário recorrer á técnica de “*double buffering*”, ou seja, consiste na utilização de duas memórias temporárias ao invés de uma, assim com esta técnica evitamos a ocorrência de *flickering*, que poderá ocorrer quando como por exemplo se arrasta uma imagem.

Utilizando esta técnica, apenas veremos o objecto a deslocar-se para o local escolhido pelo utilizador de uma forma suave.

```
private void areadosobjectosMousePressed(java.awt.event.MouseEvent evt) {  
  
    x = evt.getX();  
    y = evt.getY();  
  
}
```

Figura 22 - Exemplo do efeito do pressionar do rato sobre os objectos.

Na Figura 22, encontra-se o método que faz com que sempre que o botão esquerdo do rato é pressionado em cima de um objecto, é devolvido pela aplicação o valor das

posições x, y dos objectos. Assim sendo, torna-se mais fácil reconhecer o posicionamento dos diversos objectos, relativamente a área em que estes podem ser movimentados, facilitando assim sucessivas funções que possam ser implementadas a partir das coordenadas dos mesmos.

```
private void areadosobjectosMouseDragged(java.awt.event.MouseEvent evt) {

    int dx = evt.getX() - x;
    int dy = evt.getY() - y;

    for (int i = 0; i < componentesDisponiveis.size(); i++) {
        MyImage aux = componentesDisponiveis.get(i);
        if (aux.isHit(evt.getX(), evt.getY())) {
            System.out.println("Hit");
            aux.setX(evt.getX() - aux.getWidth() / 2);
            aux.setY(evt.getY() - aux.getHeight() / 2);
            this.paintObjects(areadosobjectos);
            int valor = cb.getSelectedIndex();
        }
    }
}
```

Figura 23 - Exemplo do efeito do deslizar do rato sobre os objectos.

Basicamente, o código ilustrado na Figura 23 pode ser explicado da seguinte forma: o objecto antes de pressionado pelo rato encontra-se situado numa posição x e outra y, com uma determinada altura e largura; quando este é pressionado, começa a efectuar o cálculo da sua posição referente à posição inicial, logo ao ser movido está a recalculer a posição relativa, quando o rato deixa de ser premido este é largado na posição desejada pelo utilizador e devolve ao sistema as suas novas coordenadas.

```
private void areadosobjectosMouseWheelMoved(java.awt.event.MouseWheelEvent evt) {

    if (evt.getScrollType() == MouseWheelEvent.WHEEL_UNIT_SCROLL) {

        for (int i = 0; i < componentesDisponiveis.size(); i++) {
            MyImage aux = componentesDisponiveis.get(i);
            if (aux.isHit(x, y)) {
                float amount = evt.getWheelRotation() * 5f;
                aux.addHeight(amount);
                int valor = cb.getSelectedIndex();
                this.paintObjects(areadosobjectos);
            }
        }
    }
}
```

Figura 24 - Exemplo do efeito do “scroll” do rato sobre os objectos.

O código ilustrado na figura 24, ilustra o efeito do “scroll” do rato quando este se encontra sobre um objecto, fazendo com que o mesmo aumente ou diminua as suas dimensões relativamente as dimensões originais. Este método, faz com que seja mais fácil ao utilizador alterar as dimensões dos objectos, facilitando assim a manipulação dos mesmos durante a projecção e cálculo dos modelos de propagação.

Neste código é mostrado como todos os elementos do vector de objectos a colocar no ecrã é percorrido, e no caso de ser encontrado um objecto sob o foco do rato, os parâmetros desse objecto são alterados.

Após esta alteração, é necessário actualizar os parâmetros da simulação. Recorre-se então à função *getSelectedIndex()*, que devolve o valor da selecção do modelo, ou seja cada modelo tem um número associado na *combobox*, e através deste numero torna-se mais fácil para programar os parâmetros associados a cada modelo de propagação.

Todos os modelos que permitem a manipulação dos objectos (altura, largura, distâncias entre eles), estão constantemente a ser actualizados nos campos referentes a cada variável do modelo de propagação em uso. Para tal cada uma dessas variáveis é actualizada a cada *click*, mover, “scroll” do rato, desde que este se encontre sobre os objectos passíveis de serem movidos, consoante o modelo utilizado para o cálculo de propagação RF.

O aspecto final da aplicação desenvolvida é apresentado na Figura 25. Esta apresenta três áreas principais:

- Área de desenho, onde são apresentados ao utilizador os diferentes componentes que fazem parte do sistema de comunicações a ser simulado;
- Menu de escolha do modelo de simulação a utilizar. O utilizador pode escolher um dos seguintes modelos:
 - Espaço Livre;
 - Terra Plana;
 - Egli;
 - Okumura-Hata;
 - Gume-de-faca;
 - Obstáculo arredondado.

- Área de alteração dos parâmetros de simulação, onde o utilizador pode escolher a ajustar os parâmetros de cada um dos modelos de propagação. O conteúdo desta área é dependente do modelo de propagação escolhido.

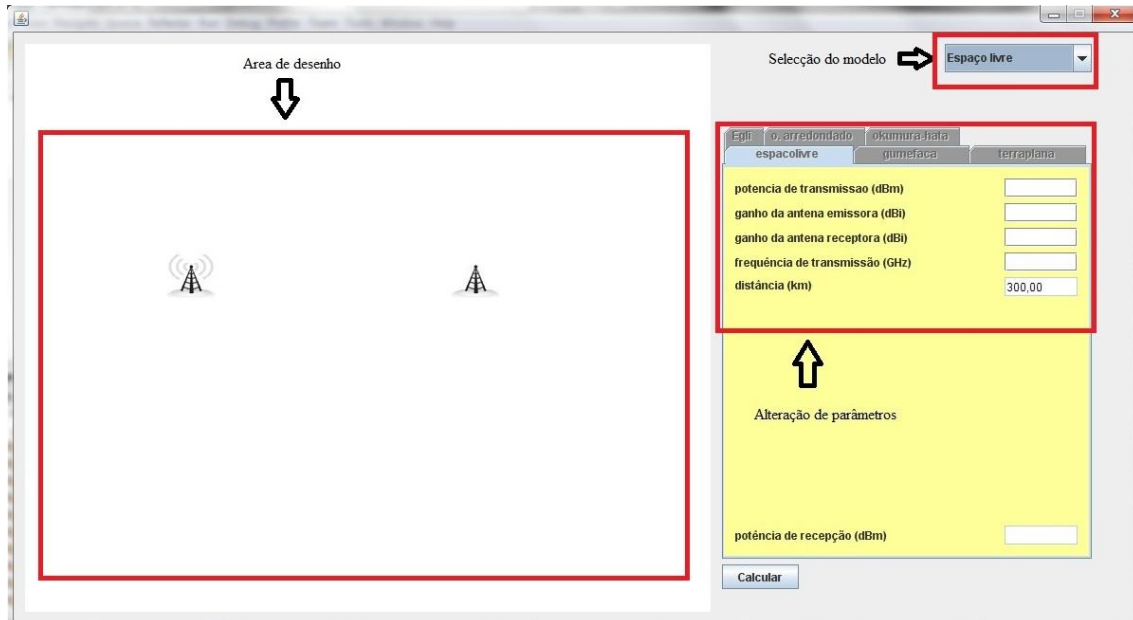


Figura 25 - Exemplo da aplicação.

3.1.4 Selecção do Modelo de propagação a utilizar

Após a conclusão da parte interface com o utilizador, torna-se necessário a utilização dos modelos de propagação estudados. Sendo assim é necessário criar um método que nos permita seleccionar o modelo a utilizar. Para tal, na própria aplicação foi incluído um menu lateral (*combobox*) que nos permite escolher o modelo a utilizar, tal como referido anteriormente.

Consoante o modelo a utilizar, são-nos dados os objectos relativos a esse modelo em questão, bem como uma janela com os parâmetros desse mesmo modelo passíveis de serem modificados pelo utilizador, como ilustrado na Figura 26.

É também nesta parte que são recolhidos os dados inseridos nos campos necessários para o cálculo da atenuação de potência de recepção do sinal dos diversos modelos de propagação. Os dados ao serem processados mediante o método a utilizar, serão processados e devolvidos para o utilizador sobre a forma de um resultado final que

expressará apenas e só o necessário para a compreensão do modelo de propagação. Esta parte é fundamental à aplicação visto que visa a obtenção de resultados teóricos que nos permitirão tirar conclusões relativas à implementação de um sistema de sensores de redes sem fios.

No exemplo apresentado na Figura 26, quando seleccionada a opção 1 da *combobox*, referente ao modelo de propagação em espaço livre, neste caso, a janela referente ao modelo, onde se encontram todos os parâmetros variáveis desse mesmo modelo, fica em modo activo, ou seja, permite a manipulação dos campos passíveis de serem alterados, bem como adiciona os objectos necessários à projecção do modelo, neste caso o transmissor e o receptor.

Estes são adicionados a um *array* da classe *MyImage*, que é a classe responsável pela identificação de cada objecto, bem como de todas as componentes associadas ao mesmo (posição x, posição y, altura, largura). Depois é invocado o método *paintobjects* que faz com que os objectos sejam identificados e colocados na área de utilização dos mesmos, consoante o modelo a utilizar.

```
private void cbActionPerformed(java.awt.event.ActionEvent evt) {
    // TODO add your handling code here:
    int valor = cb.getSelectedIndex();
    System.out.println(valor);

    if (valor == 1) {

        areadosobjectos.setIgnoreRepaint(true);

        espacolivres.setVisible(true);
        jTabbedPane1.setSelectedIndex(0);
        b.setVisible(true);

        System.out.println("123");
        //this.repaint();
        receptor = new MyImage("imgs/receptor.jpg", 450, 220, 50, 50);
        transmissor = new MyImage("imgs/transmissor.jpg", 150, 220, 50, 50);
        componentesDisponiveis = new ArrayList<MyImage>();
        componentesDisponiveis.add(receptor);
        componentesDisponiveis.add(transmissor);
        this.paintObjects(areadosobjectos);
    }
}
```

Figura 26 - Exemplo do efeito da selecção dos modelos através da ComboBox.

```

public void paintObjects(JPanel a) {

    BufferedImage img = new BufferedImage(723, 599, BufferedImage.TRANSLUCENT);

    Graphics g = img.getGraphics();

    g.clearRect(0, 0, 723, 599);
    g.setColor(Color.WHITE);
    g.fillRect(0, 0, 723, 599);

    System.out.println("in paint");
    Graphics2D g2d = (Graphics2D) g;

    g2d.setRenderingHint(RenderingHints.KEY_ANTIALIASING,
        RenderingHints.VALUE_ANTIALIAS_ON);
    g2d.setRenderingHint(RenderingHints.KEY_TEXT_ANTIALIASING,
        RenderingHints.VALUE_TEXT_ANTIALIAS_ON);

    for (int i = 0; i < componentesDisponiveis.size(); i++) {
        g2d.drawImage(componentesDisponiveis.get(i).getImage(),
            (int) componentesDisponiveis.get(i).getXPos(),
            (int) componentesDisponiveis.get(i).getYPos(),
            (int) componentesDisponiveis.get(i).getWidth(),
            (int) componentesDisponiveis.get(i).getHeight(), null);
    }

    a.getGraphics().drawImage(img, 0, 0, null);
}

```

Figura 27 - Exemplo do método *paintObjects*.

Para desenhar os objectos que fazem parte do modelo a simular, Figura 27, é utilizado o método *paintObjects*, que é responsável por:

- Limpar a área de desenho;
- Percorrer a lista de objectos e desenhá-los, um a um no ecrã que o utilizador vai visualizar.

Uma vez que, como foi explicado anteriormente, é utilizada a técnica de *double buffering*, o utilizador não se vai aperceber desta operação de limpeza e redesenho de todos os componentes.

Conforme o modelo escolhido, os objectos previamente adicionados ao *array* da classe *MyImage*, contendo as suas características (posição x, posição y, largura, altura), são adicionados um por um a área de desenho.

4. Resultados e Conclusões

A aplicação foi desenvolvida de forma a ser o mais acessível ao utilizador, e de forma a garantir veracidade nos dados recolhidos a partir da mesma. Foram analisados e implementados os diferentes modelos de propagação na aplicação de modo a torná-la uma ferramenta de trabalho futura com bastante interesse no panorama actual.

4.1 Aplicação

A aplicação desenvolvida para o estudo de comunicações sem fios contém os seguintes modelos de propagação (Espaço-livre, Gume-de-faca, Objecto arredondado, Terra-plana, Egli, Okumura-Hata). Seguidamente são ilustrados e especificados cada um dos modelos.

4.1.1 Espaço Livre

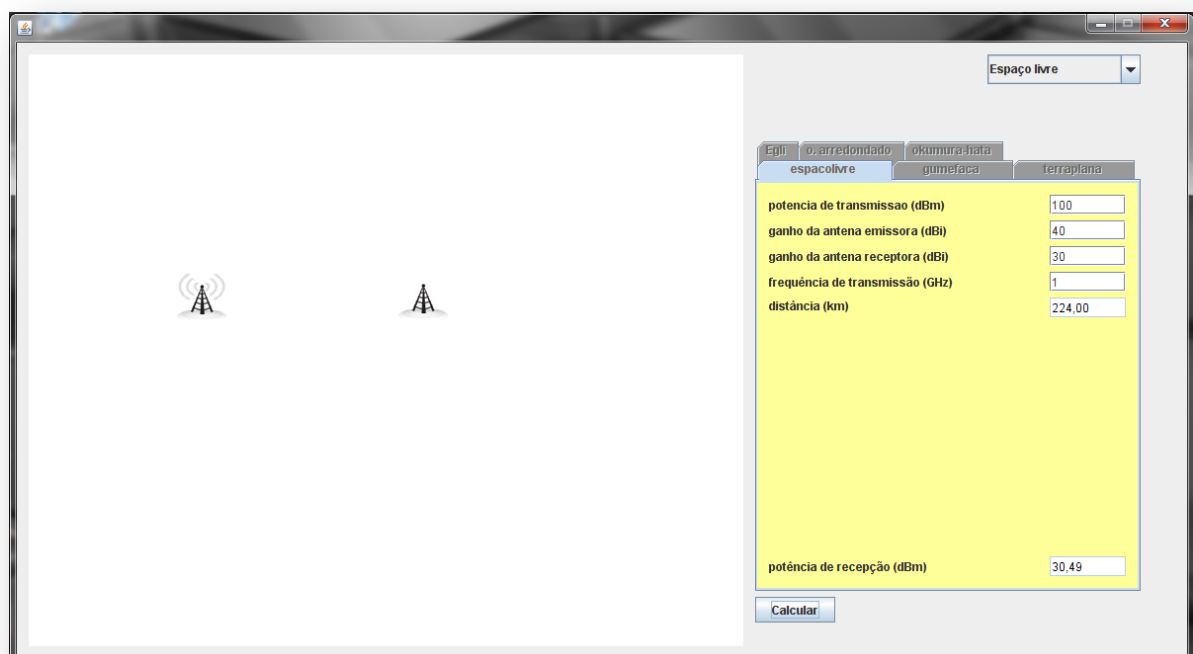


Figura 28 - Exemplo do modelo de propagação: Espaço-livre.

Neste modelo, ilustrado na Figura 28, os objectos adicionados a área específica são as antenas: transmissor e receptor, estas podem ser movimentadas com o *click* do rato sobre as mesmas, e a cada instante desse movimento o campo da distância entre elas é actualizado, de forma que o utilizador tenha a percepção da distância exacta a que quer dispor os objectos (1px=1km), no caso exemplo apresentado 224km.

Os campos passíveis a serem alterados/actualizados pelo utilizador na janela da direita, referente a este modelo, são: potência de transmissão (em dBm, no exemplo apresentado 100dBm), ganho das antenas: transmissor e receptor (em dBi, no exemplo apresentado 40dBi e 30dBi, respectivamente) e frequência de transmissão (em GHz, no exemplo apresentado 1GHz). Após concluídos todos estes passos pelo utilizador é necessário este clicar com o rato o botão calcular, para obter o resultado do modelo, ou seja, a potência de recepção do sinal (em dBm, no exemplo apresentado 30,49dBm).

4.1.2 Gume de Faca

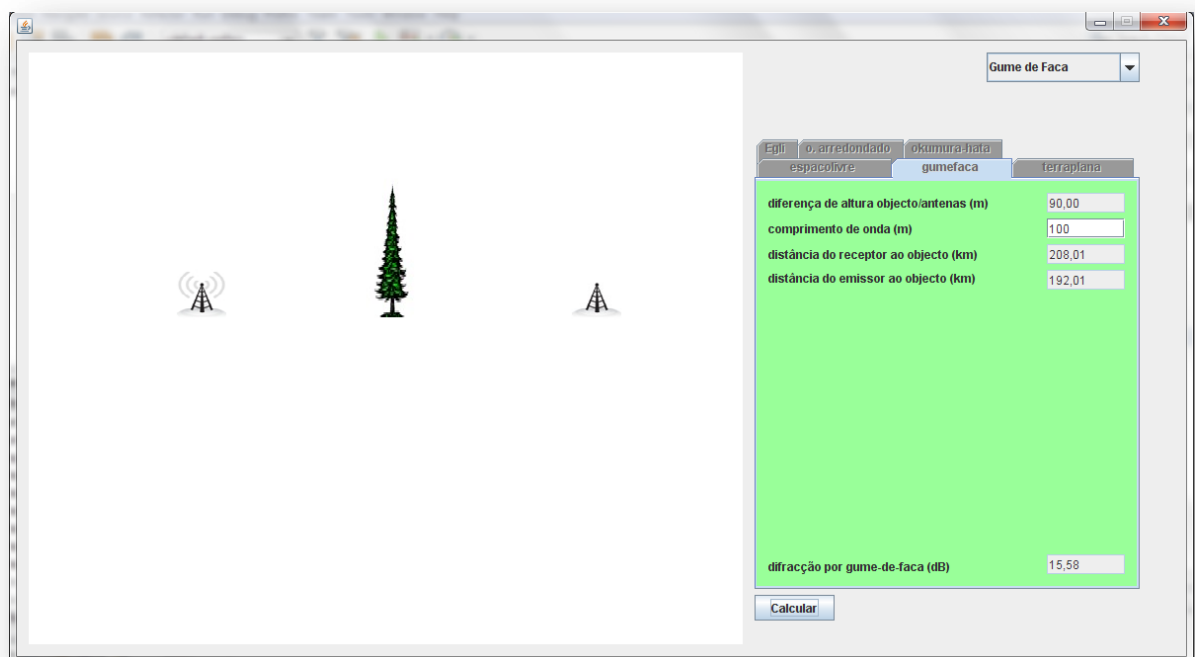


Figura 29 - Exemplo do modelo de propagação: Gume-de-faca.

Neste modelo, ilustrado na Figura 29, os objectos adicionados a área de visualização são as antenas: transmissor e receptor, e obstáculo gume-de-faca, estes podem ser

movimentadas com o *click* do rato sobre os mesmos, e a cada instante desse movimento o campo da distância entre eles (transmissor-obstáculo, obstáculo-receptor) é actualizado, de forma a o utilizador ter a percepção da distância exacta a que quer dispor os objectos (1px=1km), no exemplo apresentado 208,01km e 198,01km, respectivamente.

Com o movimento do “scroll” do rato sobre o obstáculo, o campo da diferença de altura entre este e as antenas é actualizado a cada instante desse movimento (1px=1m, exemplo apresentado 90m).

O campo passível a ser alterado/actualizado pelo utilizador na janela da direita, referente a este modelo, é o comprimento de onda (em m, no exemplo apresentado 100m). Após concluídos todos estes passos pelo utilizador é necessário este clicar com o rato o botão calcular, para obter o resultado do modelo, ou seja, a difracção por gume-de-faca (em dB, no exemplo apresentado 15,58 dBm).

4.1.3 Terra-Plana

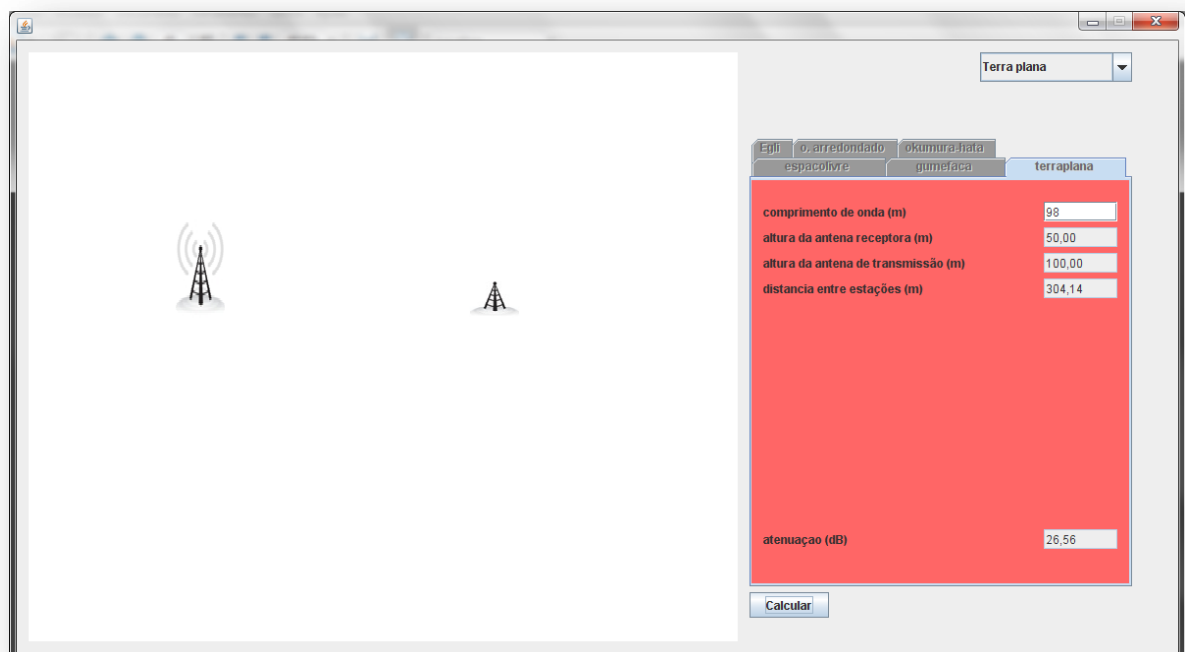


Figura 30 - Exemplo do modelo de propagação: Terra-plana.

Neste modelo, ilustrado na Figura 30, os objectos adicionados a área específica são as antenas: transmissor e receptor, estes podem ser movimentadas com o *click* do rato sobre os mesmos, e a cada instante desse movimento o campo da distância entre eles é actualizado, de forma a o utilizador ter a percepção da distância exacta a que quer dispor os objectos (1px=1m), no exemplo apresentado 304,14m.

Com o movimento do “scroll” do rato sobre as antenas, os campos das alturas das antenas: transmissor e receptor, são actualizados a cada instante desse movimento (1px=1m, no exemplo apresentado 100m e 50m, respectivamente).

O campo passível a ser alterado/actualizado pelo utilizador na janela da direita, referente a este modelo, é o comprimento de onda (em m, no exemplo apresentado 98m). Após concluídos todos estes passos pelo utilizador é necessário este clicar com o rato o botão calcular, para obter o resultado do modelo, ou seja, a atenuação (em dB, no exemplo apresentado 26,56 dB).

4.1.4 Egli

Neste modelo, ilustrado na Figura 31, os objectos adicionados a área específica são as antenas: transmissor e receptor, estes podem ser movimentadas com o *click* do rato sobre os mesmos, e a cada instante desse movimento o campo da distância entre eles é actualizado, de forma a o utilizador ter a percepção da distância exacta a que quer dispor os objectos (1px=1m), no exemplo apresentado 304,14m.

Com o movimento do “scroll” do rato sobre as antenas, os campos das alturas das antenas: transmissor e receptor, são actualizados a cada instante desse movimento (1px=1m, no exemplo apresentado 100m e 50m, respectivamente).

O campo passível a ser alterado/actualizado pelo utilizador na janela da direita, referente a este modelo, é a frequência de transmissão (em MHz, no exemplo apresentado 40MHz). Após concluídos todos estes passos pelo utilizador é necessário este clicar com o rato o botão calcular, para obter o resultado do modelo, ou seja, a perda de propagação (em dB, no exemplo apresentado 25,38 dB).

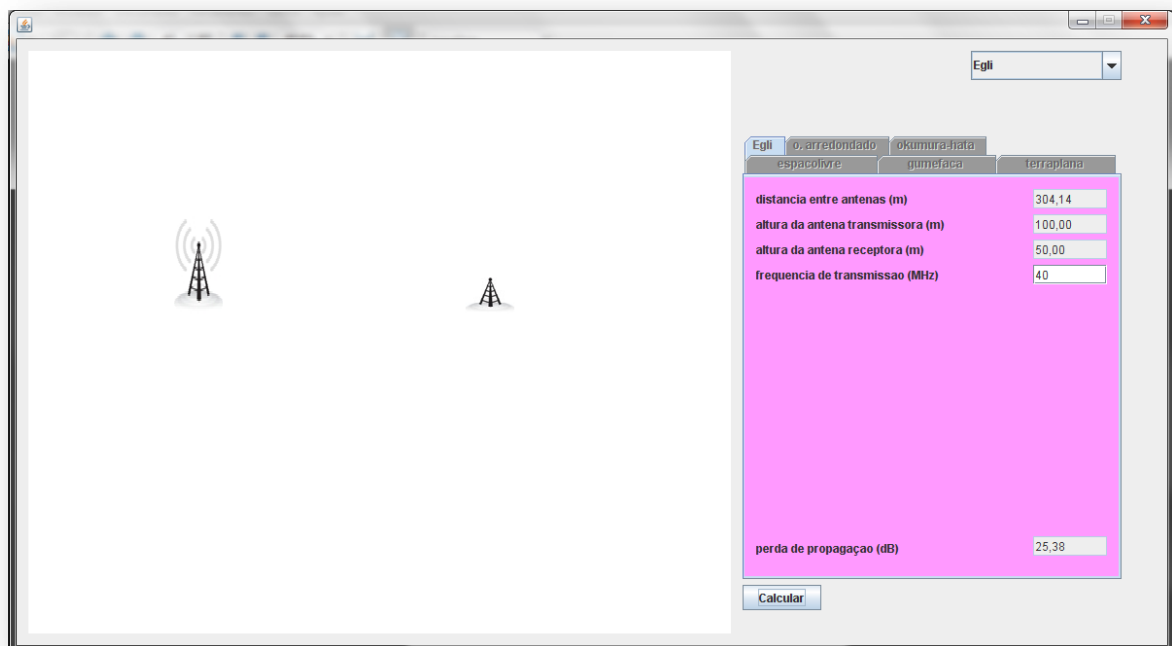


Figura 31 - Exemplo do modelo de propagação: Egli.

4.1.5 Obstáculo arredondado

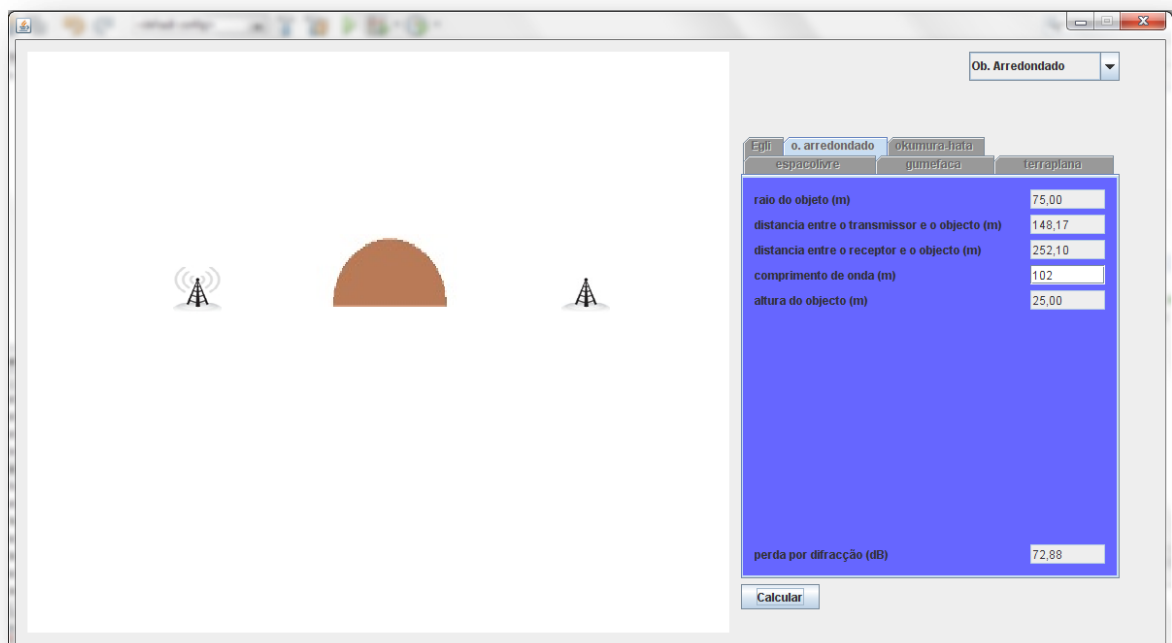


Figura 32 - Exemplo do modelo de propagação: Obstáculo arredondado.

Neste modelo, ilustrado na Figura 32, os objectos adicionados a área específica são as antenas: transmissor e receptor, e o obstáculo arredondado, estes podem ser movimentadas com o *click* do rato sobre os mesmos, e a cada instante desse movimento o campo da distância entre eles (transmissor-obstáculo, obstáculo-receptor) é actualizado, de forma a o utilizador ter a percepção da distância exacta a que quer dispor os objectos (1px=1m), no exemplo apresentado 148,17m e 252,1m, respectivamente.

Com o movimento do “scroll” do rato sobre o obstáculo, os campos da diferença de altura entre este e as antenas e do raio do mesmo são actualizados a cada instante desse movimento (1px=1m, no exemplo apresentado 25m e 75m, respectivamente).

O campo passível a ser alterado/actualizado pelo utilizador na janela da direita, referente a este modelo, é o comprimento de onda (em m, no exemplo apresentado 102m). Após concluídos todos estes passos pelo utilizador é necessário este clicar com o rato o botão calcular, para obter o resultado do modelo, ou seja, a perda por difracção (em dB, no caso exemplo apresentado 72,88 dB).

4.1.6 Okumura-Hata

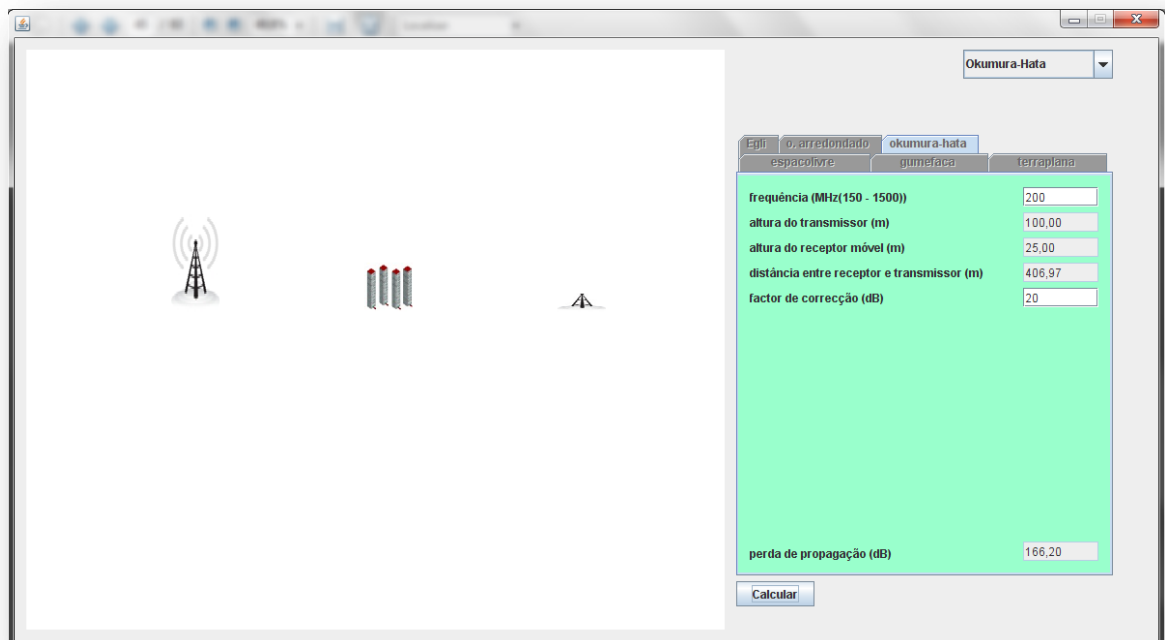


Figura 33 - Exemplo do modelo de propagação: Okumura-Hata.

Neste modelo, ilustrado na Figura 33, os objectos adicionados a área específica são as antenas: transmissor e receptor, e o ambiente citadino (só serve de referência, o modelo a calcular é para ambientes urbanos, neste caso), estes podem ser movimentadas com o *click* do rato sobre os mesmos, e a cada instante desse movimento o campo da distância entre eles é actualizado, de forma ao utilizador ter a percepção da distância exacta a que quer dispor os objectos (1px=1m), no exemplo apresentado 406,97m.

Com o movimento do “scroll” do rato sobre as antenas, os campos das alturas das antenas: transmissor e receptor, são actualizados a cada instante desse movimento (1px=1m, no exemplo apresentado 100m e 25m, respectivamente).

Os campos passíveis a serem alterados/actualizados pelo utilizador na janela da direita, referente a este modelo são: frequência (em MHz, no caso em específico 200MHz, convém salientar que este modelo de propagação é restrito ao intervalo [150-1500] MHz) e o factor de correcção (em dB, exemplo apresentado 20dB). Após concluídos todos estes passos pelo utilizador é necessário este clicar com o rato o botão calcular, para obter o resultado do modelo, ou seja, a perda de propagação (em dB, no exemplo apresentado 166,20 dB).

4.2 Discussão

Após a aplicação estar desenvolvida, temos necessariamente que fazer uma comparação com as aplicações já existentes para o cálculo de modelos de propagação RF. Esta aplicação comparada com as demais tem logo uma característica que se destaca: tem modelos de propagação quer para zonas urbanas, quer para zonas suburbanas, quer para zonas rurais. Outras aplicações existentes são específicas, ou contém módulos específicos para o cálculo de modelos de propagação para cada uma das 3 zonas mencionadas, como é o caso do *Winprop*, da AWE communications, que tem aplicações específicas para cada tipo de zona [43].

Existem também aplicações que contém vários modelos de propagação, de diferentes zonas, como por exemplo o Terrain Analysis Package (TAP), que possui os modelos

Longley-rice, Gume-de-faca, Objecto arredondado, Hata, Okumura e Egli, mas que são exclusivamente para Windows, não sendo executável num outro sistema operativo [33].

No que diz respeito à compatibilidade com outros sistemas operativos, ou mesmo com outras APIs, o ASTRIX é um dos programas mais capazes, permitindo até mesmo a interligação online com uma base de dados, mas esta aplicação no entanto não é *open source* [34].

Quanto ao Winprop, este apesar de possuir mecanismos para o planeamento de vários tipos de redes, para vários tipos de zonas, e para locais exteriores e interiores, bem como o facto de ser capaz de prever vários tipos de características (intensidade do sinal, potência recebida, atraso de propagação, etc.), este também tem as suas limitações, que são: o facto de só ser executado no sistema operativo Windows e apesar de ser considerado *open source*, este só o é para utilizadores frequentes [34].

No âmbito geral, e fazendo uma análise global, apesar de existirem várias aplicações para o cálculo de modelos de propagação, quer para as várias zonas (rural, suburbana, urbana), quer para interior ou exterior de edifícios, não é possível encontrar uma só aplicação capaz de ser denominada de “a mais eficiente”, isto porque cada uma delas é específica para determinado modelo de propagação ou determinada zona.

A maior parte das aplicações existentes são concebidas única e exclusivamente para um sistema operativo (Windows), bem como não são *open source*, ou seja não estão disponíveis para todo o tipo de utilizadores.

A aplicação desenvolvida, não vem assim colmatar uma lacuna existente, nem seria esse o principal objectivo da mesma, visto que visa ser uma aplicação que terá grande utilidade para o estudo dos modelos de propagação dos futuros alunos, mas sim complementar as aplicações já desenvolvidas, pois enquadra-se no panorama actual das redes sem fios, contém alguns modelos de diversas zonas (rural, suburbana, urbana). Devido ao facto de ser projectada em linguagem Java, a sua portabilidade encontra-se assegurada, pois permite ser executado nos diversos sistemas operativos.

4.3 Conclusão e Perspectivas Futuras

O objectivo principal desta dissertação consistiu no desenvolvimento da base para uma plataforma/middleware para o estudo de propagação de redes sem fio, que permitisse a realização de um conjunto de determinados modelos de propagação por fim a possibilitar a aprendizagem de conceitos em diversas unidades curriculares, de modo a auxiliar a aprendizagem das mesmas.

As grandes vantagens desta aplicação é a isenção de quaisquer custos de utilização e poder funcionar em qualquer sistema operativo, permitindo a aprendizagem de conteúdos por parte dos futuros alunos nas diversas unidades curriculares relacionadas com o tema em questão.

No desenvolvimento do projecto foi utilizada a tecnologia Java, recorrendo à API Java 2D. Esta tecnologia é independente de qualquer plataforma, significando assim que esta aplicação desenvolvida nesta dissertação, pode funcionar em qualquer sistema operativo e em qualquer máquina desde que possuam uma máquina virtual Java (JVM) instalada.

Relativamente a perspectivas futuras, no que trata a ideias concretas a serem implementadas, fica em aberto a inserção de novos modelos de propagação na aplicação realizada até então, novos modelos estes que possam ser úteis a diferentes tipos de utilizadores, bem como uma adaptação para visualização 3D, e a criação de uma ferramenta que permita ao utilizador a inserção de novos modelos, de uma forma transparente.

5. Bibliografia

- [1] Geoffrey N. Mendenhall, *FM and Digital Radio Broadcast Transmitters*, National Association of Broadcasters Engineering Handbook (Tenth Edition), 2007.
- [2] Vijay K. Garg, *Multiple Access Techniques*, Wireless Communications & Networking, 2007.
- [3] Wander, *Comunicações Móveis*, Curso de Electronica, Unidade 11, 2003.
- [4] Shengpu Liu, Liang Cheng, *A context-aware reflective middleware framework for distributed real-time and embedded systems*, Journal of Systems and Software, Volume 84, Issue 2, February 2011.
- [5] Shahin Farahani, *RF Propagation, Antennas, and Regulatory Requirements*, ZigBee Wireless Networks and Transceivers, 2008.
- [6] Juarez Nascimento, *Telecomunicações*, Makron Books, São Paulo, 1992.
- [7] Henry L. Bertoni, *Radio Propagation*, Encyclopedia of Physical Science and Technology, 2004.
- [8] Laurie Tetley, David Calcutt, *Radio wave propagation and the frequency spectrum*, Electronic Navigation Systems (Third Edition), 2001.
- [9] T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles & Practice*, Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall PTR, 1996.
- [10] Ovídio Barradas, *Sistemas em Radiovisibilidade*, Livros Técnicos e Científicos. Rio de Janeiro, Brasil.

- [11] Andreas Ludi, Andreas Magun, ***Refractivity structure constant and length scales from mm-wave propagation in the stably stratified troposphere***, Institute of Applied Physics, University of Bern, Sidlerstrasse 5, Switzerland, 2005.
- [12] G. S. Bochkarev, ***Influence of the ionosphere, modified by powerful oblique radiowaves, on HF radio wave propagation***, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Volume 59, Issue 18, December 1997.
- [13] ITU – T. RECOMMENDATION ITU-R, ***Propagation by diffraction***, ITU – T.Genebra, Suíça. 2004.
- [14] Naichia Yeh, ***Analysis of spectrum distribution and optical losses under Fresnel lenses***, School of Applied Sciences, MingDao University, Taiwan, 2010.
- [15] Fernando Felice, ***Análise do desempenho de enlaces ponto-a-ponto utilizando a faixa de frequência não licenciada de 2,4 GHz em tecnologia spread Spectrum***, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- [16] David R. Jackson, ***Plane Wave Propagation and Reflection***, The Electrical Engineering Handbook, 2005
- [17] G. A. Hufford, A. G. Longley, and W. A. Kissick, ***A Guide to the Use of the ITS Irregular Terrain Model in the Area Prediction Mode***, National Telecomm. and Info Admin. report 82-100, USA, abril de 1982.
- [18] Vijay K. Garg, ***Radio Propagation and Propagation Path-Loss Models***, Wireless Communications & Networking, 2007.
- [19] Annett Ihlefeld, ***Planning and Modelling of WLAN/WiMAX Networks***, Technische Universität Dresden, Alemanha, setembro de 2006.

- [20] J. Milanović, S. Rimac-drlje, I. Majerski, ***Radio Wave Propagation Mechanisms and Empirical Models for Fixed Wireless Access Systems***, 2010.
- [21] H. L. Bertoni, ***Radio Propagation for Modern Wireless Systems***, Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall PTR, 2000.
- [22] C. A. Balanis, ***Antenna Theory: Analysis and Design***, Harper & Row Publishers, New York, NY, 1982.
- [23] Vogler, L. E., ***The Attenuation Function for Multiple Knife-Edge Diffraction***, Radio Science, Vol. 17, No. 6, 1982.
- [24] Raj Kumar, S.K. Kaura, A.K. Sharma, D.P. Chhachhia, A.K. Aggarwal, ***Knife-edge diffraction pattern as an interference phenomenon: An experimental reality***, Optics & Laser Technology, Volume 39, Issue 2, March 2007.
- [25] <http://wireless.per.nl/reference/chaptr03/pel/pel.htm>, Chapter: Wireless Channels, Section: Path loss, Center for Wireless Technologies, Eindhoven (CWT/e), acedido em: Janeiro de 2011.
- [26] Guilherme Rosse Ramalho, ***Uma ferramenta de predição e avaliação de cobertura para sistemas de comunicação ponto-área***, Inatel, 2006.
- [27] John S. Seybold, ***Introduction to RF Propagation***, John Wiley & Sons, Inc, 2005.
- [28] George Hufford, Paul Mckenna, ***Irregular Terrain Model (ITM) (Longley-Rice Algorithms)***, Department of Commerce NTIA/ITS Institute for Telecommunication Sciences.
- [29] T. Okumura, E. Ohmori, and K. Fukuda, ***Field Strength and its Variability in VHF and UHF Land Mobile Service***, Review Electric. Communication Laboratory, 16, 9-10, 1968.

- [30] S. R. Saunders, F. R. Bonar, ***Explicit Multiple Building Diffraction Attenuation Function for Mobile Radio Wave Propagation***, Electronics Letters, 21, 14, July 1991.
- [31] M. Hata, ***Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Service***, IEEE Transactions on Vehicular Technology, VT-29,3, 1980, pp. 317-325.
- [32] K. Low, ***Comparison of Urban Propagation Models with CWMeasurements***, IEEE Vehicular Technology Sociep 42nd VTS Conference, Frontiers of Technology. From Pioneers to the 21st Century, 2, 1992.
- [33] <http://www.softwright.com/tap6.html>, **Terrain Analysis Package (TAP) TM**, Radio Engineering Software Products, acedido em: Outubro de 2010.
- [34] http://www.mindservices.com.au/index.php?option=com_content&view=article&id=85:rf-planning-tools&catid=65:library-references&Itemid=61, **RF Planning Tools**, Mindservices, acedido em: Novembro 2010.
- [35] P. Remelhe, ***Aplicações Moveis com J2ME***, FCA.Lisboa, 2005.
- [36] M. Magan, P. Vargas, D. Azzolin, ***Técnicas para Desenvolvimento de Aplicações Orientadas a Objetos Utilizando a Linguagem Java***, III Simpósio Brasileiro de Linguagens de Programação, 1999.
- [37] B. Souza, ***O mais importante do Java – Esforço de uma comunidade***, Revista Java Magazine, Edição 4, 2003.
- [38] K. Saleh, ***Object model in Java: elements and application***, Information and Software Technology, Volume 41, Issue 4, 15 March 1999.
- [39] Jonathan M. Lambert, James F. Power, ***Platform Independent Timing of Java Virtual Machine Bytecode Instructions***, Electronic Notes in Theoretical Computer Science, Volume 220, Issue 3, 12 December 2008.

[40] F. Bellotti, A. De Gloria, M. Risso, A. Villamaina, ***AutoGraL: a Java 2D graphics library for configurable automotive dashboards***, *Computers & Graphics*, Volume 25, Issue 2, April 2001.

[41] William J. Buchanan, ***Java (Extended functions)***, Software Development for Engineers, 1997.

[42] Jonathan M. Lambert, James F. Power, ***Platform Independent Timing of Java Virtual Machine Bytecode Instructions***, *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, Volume 220, Issue 3, 12 December 2008.

[43] <http://www.awe-communications.com/>, Winprop, AWE Communications, acessado em: Janeiro de 2011.