

Capítulo 1

Introdução

Neste Capítulo apresenta-se o objectivo e a motivação da tese, abordamos sobre a solução proposta para o planeamento de uma rede móvel e sem fios WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) baseado na norma IEEE 802.16-2004. A norma IEEE 802.16 define a interface ar para redes metropolitanas sem fios WMAN (*Wireless Metropolitan Area Network*) totalmente IP (*Internet Protocol*). O WiMAX suporta níveis de qualidade de serviço ao nível e redes cabladas e suporta dados com elevado ritmo de transmissão e várias formas de comunicação IP, por exemplo, voz sobre IP e videoconferência. Com o WiMAX teremos acessos sem fios, em detrimento do cabo, tornando-se assim mais barato do que a rede cablada, como por exemplo ADSL, tornando-se mais barato e simples o acesso a áreas rurais ou suburbanas.

1.1 Objectivos e Motivação

O objectivo desta dissertação é efectuar o planeamento de uma rede sem fios IEEE 802.16-2004 no concelho da Covilhã através da simulação com a ferramenta de planeamento de redes WinProp. O desempenho de redes de comunicação móveis e sem fios depende de uma eficiente arquitectura de rede. As redes WiMAX ponto-multiponto e móveis requerem um planeamento de rede devido a reutilização de frequência e elevados requisitos para a relação portadora-ruído e a relação portadora-ruído mais interferência em cada local do receptor. O planeamento de rede é necessário para analisar o desempenho da rede sem fios.

Esta solução suportará comunicações de banda larga e possibilitará portanto suportar imagem e vídeo de alta definição, bastante úteis para os vários serviços como por exemplo os serviços de emergência médica, protecção civil e o ensino e prática da medicina. Para além disso, suportará dados com elevado ritmo de transmissão e várias formas de comunicação IP, por exemplo, voz sobre IP e videoconferência. A rede metropolitana ponto-multiponto da Covilhã permitirá aos alunos, docentes e investigadores deslocarem-se, no seu dia a dia, mantendo-se contactáveis e com acesso permanente aos recursos da rede, uma valia para o modelo pedagógico implementado na licenciatura de medicina.

Para além disso, este trabalho apresenta-se uma análise analítica para o padrão de reutilização e o factor de reutilização co-canal.

Para avaliar a solução proposta compararam-se, os resultados obtidos analiticamente com os resultados obtidos através da simulação.

1.2 Contribuições

A partir dos trabalhos desenvolvidos e apresentados nesta dissertação, foram dadas várias contribuições originais em conferências nacionais [RARG07], [SVCR08c], [RMAR08] e internacionais [VCRM08]. Foi ainda submetido um artigo para a revista: *Elektronikk* [SVCR08a].

Adicionalmente entre os principais resultados alcançados com a elaboração desta dissertação, existem as seguintes contribuições relevantes:

- Elaboração de bases de dados topográficas e de vector para o concelho e a cidade da Covilhã;

- Abordagem analítica para a escolha eficiente do padrão de reutilização para melhorar a cobertura e o ritmo de transmissão.

1.3 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação é constituída por nove capítulos e alguns anexos. A sua estrutura é descrita a seguir de uma forma sucinta.

O Capítulo 2 apresenta uma visão geral da norma IEEE 802.16-2004 e uma breve descrição da camada física e MAC (*Medium Access Control*), bem como da arquitectura de QoS (*Quality of Service*) especificada pela norma. O Capítulo 3, apresenta uma visão geral do WiMAX móvel (IEEE 802.16-2005), as diferenças e similaridades em relação a versão fixa/portátil.

No Capítulo 4 é apresentado o projecto de instalação de Feixes Pré-WiMAX para interligar a FCS-UBI (Faculdade de Ciências da Saúde da Universidade da Beira Interior) aos hospitais Sousa Martins na Guarda e Amato Lusitano em Castelo Branco realizado no âmbito do projecto MobileMAN.

No Capítulo 5 são descritos os conceitos fundamentais no planeamento celular, como o conceito de reutilização de frequências, as interferências, bem como as técnicas para melhorar a cobertura e a capacidade do sistema, a divisão de células e a sectorização.

O Capítulo 6 apresenta a ferramenta de planeamento de redes móveis e sem fios WinProp, bem como os diagramas de radiação das antenas e as bases de dados.

O Capítulo 7 apresenta os cálculos necessários para o planeamento celular de uma rede WiMAX ponto-multiponto que irá abranger todo o concelho da Covilhã, bem como uma abordagem analítica para a cobertura e o padrão de reutilização, tendo em conta a relação portadora-ruído-mais-interferência.

No Capítulo 8 são apresentados os resultados e análises obtidos na simulação da propagação e do planeamento da rede sem fios.

O Capítulo 9 finaliza esta dissertação consolidando os resultados através das conclusões e considerações relevantes. Finalmente são sugeridos alguns trabalhos futuro.

Capítulo 2

Norma IEEE 802.16-2004

Este Capítulo apresenta uma visão geral da norma IEEE 802.16-2004 e uma breve descrição da camada física e MAC (*Medium Access Control*), bem como da arquitectura de QoS (*Quality of Service*) especificada pela norma. O objectivo da norma é especificar a interface ar, incluindo a camada MAC e a camada física, para redes metropolitanas sem fios, WMAN (*Wireless Metropolitan Area Network*), com distinção de serviços. Será visto também que a norma IEEE 802.16-2004 fornece apenas o suporte para a implementação de uma arquitectura de QoS, deixando em aberto para que cada fabricante introduza a sua própria solução.

2.1 Introdução

Em Julho de 1999, o IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*) criou o grupo de trabalho IEEE 802.16, para desenvolver uma norma para sistemas BWA (*Broadband Wireless Access*). A versão final foi aprovada em Junho de 2004 [IEEE04], com o seguinte objectivo de especificar a interface ar para sistema fixo de acesso sem fios de banda larga. Este sistema é conhecido também com interface ar IEEE WirelessMAN.

A norma IEEE 802.16 define a forma como o tráfego sem fios é transmitido entre as estações subscritoras, SS (*Subscriber Station*) e uma estação base, BS (*Base Station*).

Esta tecnologia foi desenvolvida para estimular o acesso sem fios de banda larga em redes metropolitanas, MANs (*Metropolitan Area Networks*), oferecendo um desempenho comparável às tradicionais tecnologias de cabo e DSL (*Digital Subscriber Line*). As principais vantagens da norma IEEE 802.16 são: i) a possibilidade de fornecer serviços rapidamente, mesmo em áreas de difícil implantação da infra-estrutura, ii) evitar gastos desnecessários com custos de instalações, iii) com a possibilidade de ultrapassar limites físicos, como paredes ou prédios, iv) com elevada escalabilidade e v) baixo custo de actualização e manutenção, entre outros.

A sua arquitectura básica consiste numa estação base, BS, e uma ou mais estações subscritoras, SSs, Figura 2.1. A BS é o nó central que coordena toda a comunicação e as SSs posicionam-se a distâncias diferentes da BS. Para além disso, todo o tráfego de dados da rede passa pela BS, ou seja, não existe comunicação directa entre as SSs. A estação base pode estar ligada a uma outra infra-estrutura de rede como, por exemplo, a Internet, possibilitando uma extensão dos serviços oferecidos aos utilizadores. Da mesma forma, as SSs podem oferecer serviços diferenciados para utilizadores ligados através de uma rede local com ou sem fios.

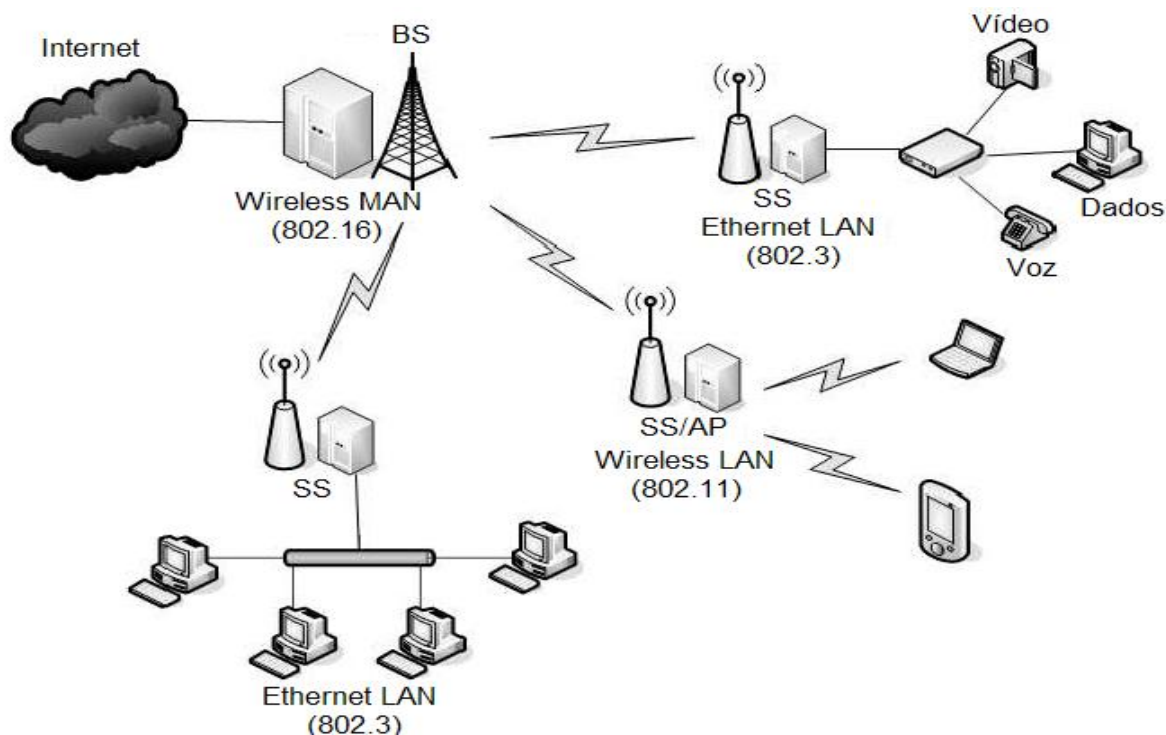


Figura 2.1 - Arquitetura básica do sistema BWA

2.2 Características Técnicas da Norma IEEE 802.16-2004

As principais características técnicas da norma IEEE 802.16-2004 são apresentadas a seguir [AnGM07].

Modulação - o WiMAX apresenta três modos de operação, todos na camada física (PHY), os quais são: *single carrier*, OFDM 256, ou OFDMA 2K. O modo mais comumente utilizado é o OFDM 256.

Débito Binário - com o esquema de modulação robusto, o WiMAX entrega elevadas taxas de débito binário com longo alcance e uma grande eficiência espectral e que é também tolerante às reflexões dos sinais. A velocidade de transmissão dos dados varia entre 1 Mbps e 75 Mbps, dependendo das condições de propagação.

O WiMAX utiliza esquemas de modulação e codificação adaptativa que permite que uma estação base, BS (*Base Station*) negocie o débito binário e o alcance do sinal. Por exemplo, se a BS não pode estabelecer uma ligação robusta com um utilizador localizado a uma grande distância, utilizando o esquema de modulação de ordem superior por exemplo, 64-QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*), a modulação é reduzida para 16-QAM ou QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*), o que reduz o débito binário, porém aumenta o alcance da célula.

Escalabilidade - para acomodar com facilidade o planeamento celular por WIMAX, tanto nas bandas de frequências licenciadas quanto nas não licenciadas, a norma IEEE 802.16-2004 suporta diversas larguras de banda. Por exemplo, se um operador tem disponível 20 MHz de espectro, ele pode dividi-lo em dois sectores de 10 MHz ou 4 sectores de 5 MHz cada. O operador pode aumentar a quantidade de utilizadores mantendo um bom alcance do sinal e um bom débito binário. O operador pode reutilizar o mesmo espectro de frequência em dois ou mais sectores, criando uma separação entre as antenas da BS. Uma das larguras de banda mais utilizada é, no entanto, 3.5 MHz

Cobertura - a norma IEEE 802.16-2004 também suporta tecnologias que permitem a expansão de cobertura, incluindo as tecnologias de "*smart antennas*" assim como as tecnologias *mesh*.

A utilização de técnicas avançadas de múltiplo acesso, OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*), codificação e modulação aumentam o desempenho na ausência de linha de vista. Os ganhos superiores resultantes permitem maior penetração nos obstáculos a longa distância.

Qualidade de Serviço - a norma IEEE 802.16-2004 apresenta qualidade de serviço que permite a transmissão de voz e vídeo, que requerem redes de baixa latência. O controlo do acesso ao meio, MAC (*Medium Access Control*) da norma IEEE 802.16-2004 fornece níveis de serviço "*Premium*" para clientes corporativos, assim como um elevado volume de serviços num padrão equivalente aos serviços hoje oferecidos pelos serviços de ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*) e de *Cable Modem*, tudo dentro da mesma BS.

Segurança – as características de privacidade e encriptação estão previstos na norma IEEE 802.16-2004, permitindo transmissões seguras incluindo os procedimentos de autenticação.

2.3 Camadas Física e MAC

A camada física da norma 802.16-2004 opera na faixa de frequência de 2 a 11 GHz. As taxas de transmissão de dados variam de 50 a 150 Mbps, dependendo da largura de banda do canal e do tipo de modulação [Tane02]. As transmissões ocorrem em dois canais diferentes: o canal descendente, DL (*Downlink*), onde o fluxo de dados é no sentido da BS para as SSs, e outro canal ascendente, UL (*Uplink*), com o fluxo de dados

no sentido das SSs para a BS. No DL, os dados são transmitidos por difusão, enquanto que no UL o meio é partilhado através de técnicas de acesso múltiplo.

A norma fornece a flexibilidade de dois esquemas de *duplexing*: FDD (*Frequency Division Duplexing*) e TDD (*Time Division Duplexing*). Basicamente, no FDD o DL e o UL utilizam frequências diferentes, enquanto no TDD, os dois canais partilham a mesma frequência e os dados são transmitidos em tempos diferentes. O canal é segmentado no tempo e composto por tramas de tamanho fixo. Cada trama é dividido numa sub-trama para o DL e outra para o UL. A duração destas sub-tramas é controlada dinamicamente pela BS. A Figura 2.2 apresenta a estrutura da trama TDD [IEEE04].

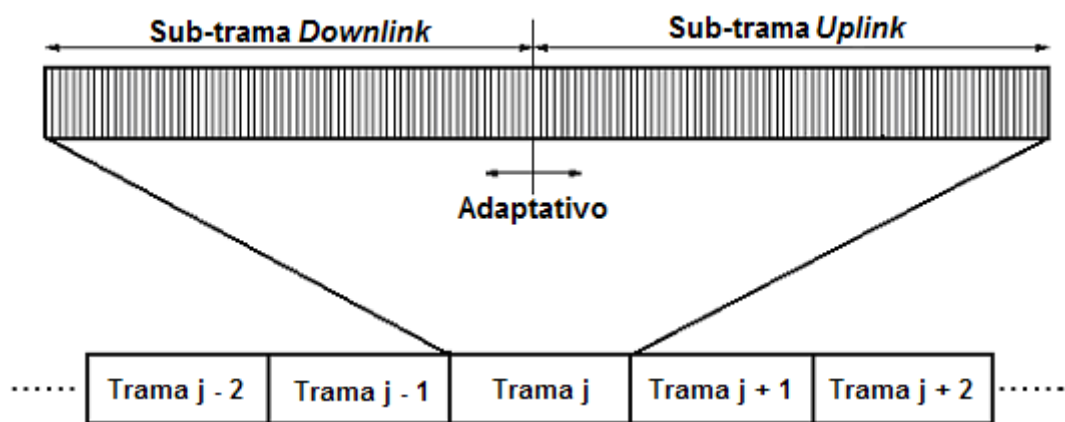


Figura 2.2 - Estrutura simplificada da trama TDD

No DL a transmissão é relativamente simples pois somente a BS transmite nesta sub-trama. Os pacotes de dados são transmitidos por difusão para todas as SSs, que por sua vez, capturam apenas os pacotes que são destinados a elas próprias. Para o UL, a BS determina o número de segmentos que será atribuído para cada SS dentro da sub-trama. Esta informação é transmitida por difusão pela BS através da mensagem UL-MAP (*UpLink Map Message*) no início de cada trama. A UL-MAP contém informações específicas, IE (*Information Element*) que incluem as oportunidades de transmissão, ou seja, os segmentos de tempo durante os quais a SS pode transmitir durante a sub-trama UL. Após receber a UL-MAP, as estações transmitem os dados em segmentos de tempo pré-definidos como indicados no IE. Na BS, é necessário um módulo de escalonamento do UL para determinar as oportunidades de transmissão (IEs) utilizando as requisições (*BW-Request*) enviadas pelas SSs. A Figura 2.3 apresenta a estrutura da trama MAC no esquema de atribuição TDD.

As SSs utilizam acesso aleatório e *piggybacking* (requisições enviadas pelas SSs no final da trama de dados, transmitidas durante o UL) na sub-trama UL para enviar requisições de oportunidades de transmissão para a BS [IEEE04]. Esta é responsável por estabelecer um intervalo de reserva no início do UL para que as SSs possam requisitar as oportunidades de transmissões na próxima sub-trama UL (ou em algum mais a frente, dependendo da ocorrência ou não de colisões).

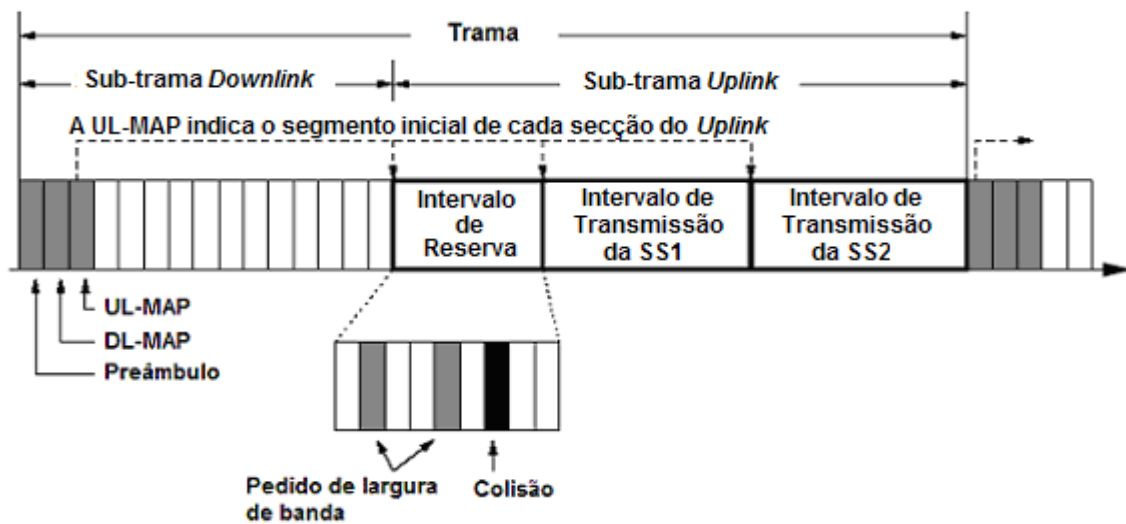


Figura 2.3 - Estrutura da trama MAC no esquema TDD

É importante notar que a norma IEEE 802.16-2004 utiliza um protocolo de acesso ao meio *Request/Grant* baseado em atribuição dinâmica, onde o período de reserva, que serve para identificar os pedidos dos utilizadores, utiliza acesso aleatório. Depois de enviar o pedido de largura de banda para a BS, a estação espera ser escalonada em alguma sub-trama UL posteriormente, Figura 2.4.

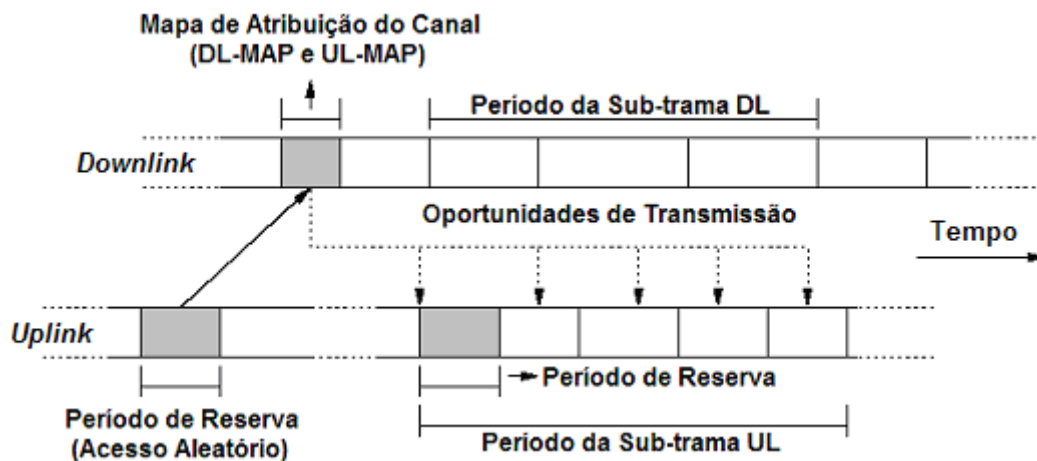


Figura 2.4 - Estrutura de atribuição da norma IEEE 802.16-2004

A norma define o algoritmo *binary truncated exponential backoff* para resolução de colisões neste intervalo. Uma SS detecta a ocorrência de colisão caso a UL-MAP da próxima trama não contenha nenhuma oportunidade de transmissão destinada a ela. Uma outra característica da norma base é o suporte a requisição de oportunidades de transmissão baseada em ligação (*Request/Grant*), GPC (*Grants Per Connection*) ou por estação, GPSS (*Grants Per Subscriber Station*). Na GPSS, a estação requisita oportunidades de transmissão como um pacote para todos os serviços que ela mantém, e esta SS é responsável por atribuir as oportunidades recebidas entre os diferentes tipos de fluxos. Na norma IEEE 802.16-2004 só se utiliza o GPSS.

É importante realçar que a norma IEEE 802.16-2004 define apenas os mecanismos para sinalização de QoS, tais como *BW-Request* e UL-MAP, mas não define o escalonador do UL, ou seja, o mecanismo que determina as IEs na UL-MAP.

2.3.1 WirelessMAN SCa

A camada física SCa foi desenvolvida com tecnologia de portadora única, e utiliza frequências abaixo de 11 GHz para suportar transmissões sem linha de vista. Deve existir suporte a pelo menos um tipo de *duplexing*, FDD ou TDD [Ohrt05]. O sentido ascendente utiliza TDMA, e o sentido descendente utiliza o TDM (*Time Division Multiplexing*) ou TDMA. São especificadas estruturas de quadro que permitem melhor equilíbrio e estimação do desempenho, em regiões onde sem linha de vista ou com grande atraso de espalhamento. As modulações utilizadas são: BPSK, *Spread BPSK*, QPSK, 16-QAM, 64-QAM.

2.3.2 OFDM

A especificação WirelessMAN-OFDM foi desenvolvida para a comunicação sem linha de vista, utilizando frequências abaixo de 11 GHz e FFT (*Fast Fourier Transform*) com 256 portadoras [Ekl02]. As ondas são criadas através da transformada inversa de Fourier. A Figura 2.5 apresenta o símbolo OFDM no domínio do tempo.

O seu tempo útil é chamado de T_b uma cópia do final do símbolo (T_g) é posicionada no início, para recolher o sinal caso tenha passado por múltiplos percursos, mantendo assim a ortogonalidade. No domínio da frequência, existem três tipos de sub-portadoras: para transmissão de dados, pilotos utilizadas em estimativas e nulas, que não estão a

transmitir no momento, e são utilizadas como bandas de guarda, sub-portadoras inactivas ou sub-portadoras DC.

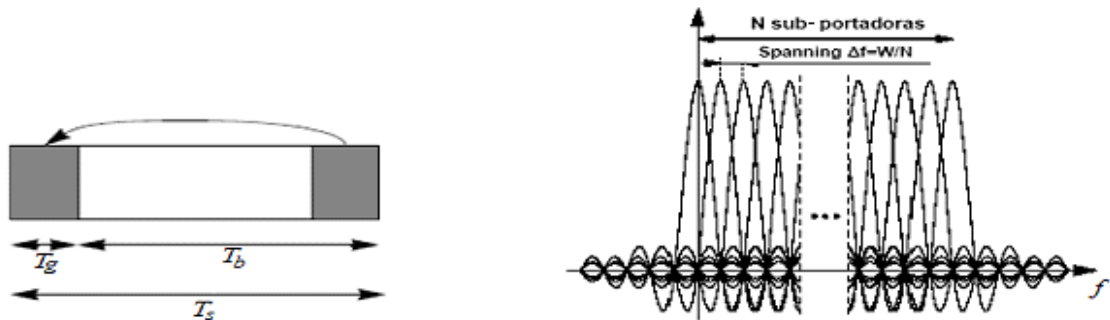


Figura 2.5 - Estrutura do símbolo OFDM no tempo (extraído de [Wima04])

As bandas de guarda tem o objectivo de permitir que o sinal decresce naturalmente e criar a forma de “barreira” da FTT. A sub-portadora DC equivale à frequência RF da estação Base, Figura 2.6. As modulações utilizadas por esta especificação são: BPSK, QPSK com mapeamento de *Gray*, 16-QAM e 64-QAM opcional em bandas não licenciadas).



Figura 2.6 – Descrição das frequências no OFDM [Wima04]

Para as bandas licenciadas, o tipo de *duplexing* pode ser tanto FDD quanto TDD. Em bandas não licenciadas, o tipo de *duplexing* deve ser o TDD. A transmissão é baseada em tramas. A sub-trama de *downlink* possui somente uma PDU (*Protocol Data Unit*), enquanto a sub-trama de *uplink* é dividido em intervalos de contenção programados para requisitos iniciais e de banda, além de um ou vários PDUs, transmitidos por diferentes SS.

2.3.3 OFDMA

A camada física OFDMA é baseada no OFDM, e foi desenvolvida para operação sem linha de vista, com frequências inferiores a 11 GHz. O modelo emprega FTT com 2048

e 4096 portadoras [Ekl02]. O símbolo no domínio do tempo é semelhante ao OFDM, Figura 2.5. no domínio da frequência, a diferença é que as sub-portadoras são divididas em sub canais. No *downlink*, cada sub-canal pode ser utilizado para a transmissão para uma grupo diferente de utilizadores. No *uplink*, cada utilizador pode utilizar um ou mais canais. Diversos utilizadores podem transmitir simultaneamente. A divisão em sub-canal lógicos tem por objectivo a escalabilidade, acesso múltiplo e ao processamento de grupos de antenas. Não é necessário que as sub-portadoras que compõem um mesmo canal sejam adjacentes, como apresentado na Figura 2.7. as modulações utilizadas são QPSK com mapeamento de Gray, 16-QAM e 64-QAM sendo este ultimo opcional.

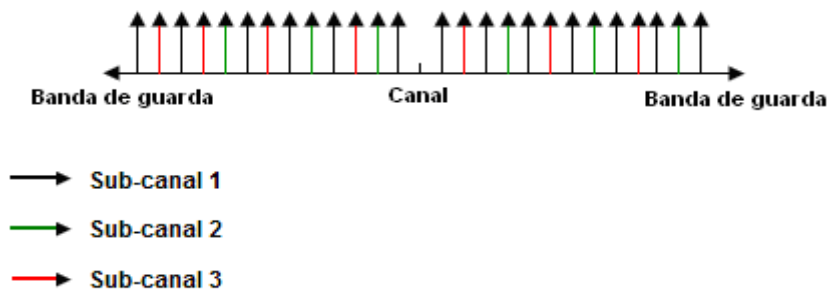


Figura 2.7 – Descrição das frequências na tecnologia OFDMA [Wima04]

Para bandas licenciadas, pode ser utilizado tanto o tipo de *duplexing* FDD quanto TDD. As estações subscritoras podem ser H-FDD, que tenta combinar os benefícios do TDD com o FDD. Em bandas não licenciadas, o tipo de *duplexing* deve ser TDD.

2.4 Qualidade de Serviço na Norma IEEE 802.16-2004

A camada MAC da norma IEEE 802.16-2004 define mecanismos de sinalização de QoS e funções para controlar a transmissão de dados entre a BS e as SSs. Dentro desse contexto, a norma define quatro tipos de classes de serviços associados a fluxos de tráfego [IEEE04], cada um com diferentes requisitos de QoS.

1. **UGS (*Unsolicited Grant Service*):** este serviço suporta tráfego com taxa constante, CBR (*Constant Bit Rate*) ou fluxos similares tais como, VoIP (voz sobre IP). Estas aplicações requerem uma constante atribuição de largura de banda.
2. **rtPS (*real-time Polling Service*):** este serviço é para aplicações de tempo real com taxa de transmissão variável, VBR (*Variable Bit Rate*) como por exemplo,

MPEG (*Moving Picture Experts Group*) vídeo ou videoconferência. Estas aplicações possuem requisitos específicos de largura de banda, bem como, um atraso máximo tolerável.

3. **nrtPS (*non-real-time Polling Service*)**: este serviço é para fluxos sem requisitos de tempo real, mas que necessitam melhores condições do que os serviços “de melhor esforço”, como por exemplo, transferência de dados. Estas aplicações são insensíveis ao atraso no tempo e requerem um mínimo de atribuição de largura de banda.
4. **BE (*Best Effort*)**: este serviço é para tráfego “de melhor esforço”, onde não existe garantia de QoS, tais como HTTP (*Hyper Text Transfer Protocol*). As aplicações recebem largura de banda disponível após à atribuição aos quatro fluxos anteriores.

Na classe de serviço UGS, a mensagem de pedido de largura de banda não é necessário. Para as outras classes, o tamanho actual da fila é incluído na mensagem de pedido de largura de banda para representar o pedido actual por largura de banda de transmissão. Em resumo, a norma IEEE 802.16-2004 especifica: o mecanismo de sinalização para troca de informações entre a BS e as SSs, como a configuração das ligações, pedido de largura de banda (*BW-Request*) e UL-MAP e o escalonamento do UL para a classe de serviço UGS. A norma não define algoritmos de escalonamento do UL para as classes de serviço rtPS, nrtPS e BE; controlo de admissão e a política de tráfego.

A Figura 2.8 apresenta a arquitectura de QoS existente na norma 802.16-2004. O módulo de escalonamento de pacotes do UL, UPS (*Uplink Packet Scheduling*) encontra-se na BS e controla todas as transmissões de pacotes no UL. Como o protocolo é orientado à ligação, a aplicação deve estabelecer uma ligação entre a BS e o fluxo de serviço associado (UGS, rtPS, nrtPS ou BE). A BS identifica as ligações com um CID (*Connection Identifier*) único para cada uma. A norma IEEE 802.16-2004 define o processo de sinalização para o estabelecimento de uma ligação (*Connection Request, Connection Response*) entre SS e BS, mas não especifica o processo de controlo de admissão. Todos os pacotes da camada de aplicação numa SS são classificados de acordo com o CID e encaminhados para uma fila apropriada. A SS recupera o pacote na fila e transmite-o na rede no segmento de tempo determinado na UL-MAP enviada pela BS. A UL-MAP é definida pelo módulo UPS baseada nas mensagens de pedido de

largura de banda (*BW-Request*) que reportam o tamanho actual da fila de cada ligação na SS.

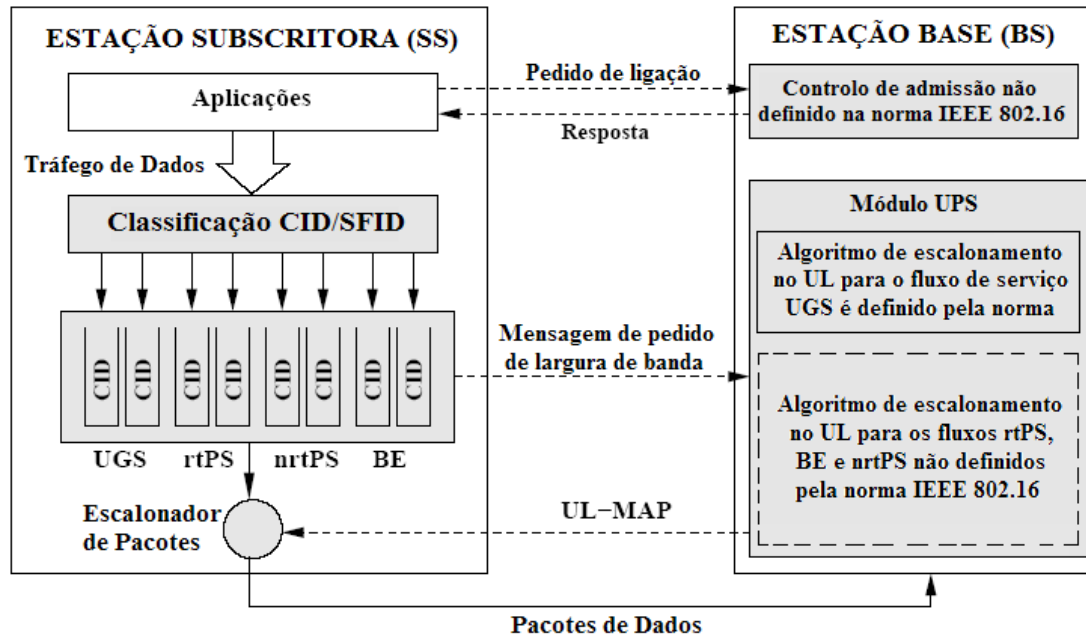


Figura 2.8 - Arquitectura de QoS da norma IEEE 802.16-2004

2.5 Comparação entre WiFi e WiMAX

O WiFi (IEEE 802.11g) e o WiMAX (IEEE 802.16-2004) não são oponentes, na realidade são tecnologias complementares, solucionam problemas diferentes embora se assemelhem em alguns aspectos. A principal característica de uma rede WiFi é a sua simplicidade. Uma estação pode associar-se a um ponto de acesso ou a um *hot spot* de maneira simples e quase transparente ao utilizador. Contudo, esta simplicidade traz algumas limitações.

Mesmo com as melhorias do IEEE 802.11e, o WiFi suporta apenas uma única ligação e parâmetros limitados de QoS [Inte04]. A norma IEEE 802.11 é baseada em uma arquitectura distribuída, onde as operações na camada MAC são coordenadas entre os pontos de acesso e as estações.

Por outro lado, o WiMAX é baseado em uma arquitectura totalmente centralizada, onde a estação base tem o controlo do acesso ao meio entre as estações subscritoras. A norma IEEE 802.16-2004 suporta múltiplas ligações que são completamente caracterizadas por vários parâmetros de QoS. Para além disso, a norma IEEE 802.16-2004 fornece uma classificação dos pacotes que permite mapear as ligações entre várias aplicações e interfaces distintas, como por exemplo, Ethernet, ATM (*Asynchronous Transfer Mode*),

IP. A norma IEEE 802.16-2004 já apareceu com a capacidade de suportar diferentes níveis de serviços para tipos distintos de tráfego, incorporado naturalmente na camada MAC. Contudo, A norma define apenas uma arquitetura capaz de suportar QoS e não especifica uma solução completa para fornecer garantias serviço oferecido.

A Tabela 2.4 apresenta de forma resumida, uma comparação entre as normas IEEE 802.11g e IEEE 802.16-2004. As diferenças são consideráveis, as normas resultantes apresentam características diferentes, pois procuram otimizar aspectos distintos.

Tabela 2.1 - Comparação entre as normas IEEE 802.11g e IEEE 802.16-2004

	IEEE 802.11g	IEEE 802.16-2004
Grupo	WLAN	WMAN
Espectro	2.4 GHz não licenciada	2 - 1GHz, licenciada, não licenciada
Aplicação Inicial	LAN sem fios	Acesso de banda larga sem fios, BWA
Canal	3 Canais com 20 MHz cada	Múltiplos Seleccionáveis 1,25 a 20 MHz
Condições do canal	NLoS	NLoS
Duplexing	TDD	FDD/TDD
Acesso ao meio	CSMA/CA com OFDM; PDMA (<i>Packet Division Multiple Access</i>) no modo opcional PCF	TDMA com OFDM 256; TDMA com OFDMA 2048
Modulação	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64QAM	Adaptativa BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM
Ritmo de Transmissão Máximo	54 Mbps a 20 metros; 6Mbps a 60 metros	(DL) 75Mbps com canal 20MHz (UL) 20Mbps com canal 20MHz
Cobertura	50 metros (<i>indoor</i>); 100 metros (<i>outdoor</i>)	Raio 3 a 10 km NLoS; Raio 50Km LoS
QoS	WMM, prioridade para conteúdos multimédia (<i>draft</i> do futuro 802.11e)	4 Tipos de serviço (<i>unsolicited grant, real-time, non real-time, best effort</i>)
Topologias	PP, PMP, <i>Mesh</i> (proprietária e 802.11s)	PP, PMP, <i>Mesh</i> (opcional)
Mobilidade	Não, futuro 802.11p	Fixo, pedestre e móvel até 40Km/h
Fast Handover	Não (Futuro 802.11r)	Não
Aplicações Típicas	Redes locais sem fios	<i>Backbone</i> , Acesso fixo à <i>internet</i> , Redes Privadas
Especificações Adicionais	WPA2 obrigatório	ARQ, AAS e MIMO (opcional);
Segurança	802.11i	<i>Triple-DES</i> , RSA
Utilizadores	Centenas	Milhares

2.6 Sumário e Conclusões

Neste Capítulo apresentou-se uma visão geral da norma IEEE 802.16-2004 (WiMAX) para acesso banda larga sem fios. Descreveram-se as camadas e física e MAC do WiMAX, com base nas normas IEEE 802.16 (norma base) e IEEE 802.16-2004. Por fim, apresentou-se a comparação entre as tecnologias WiFi e WiMAX, podendo-se extrair as seguintes conclusões:

- O WiMAX representa um avanço tecnológico importante na área de redes sem fios, em virtude das promessas em termos do desempenho e cobertura, fundamentadas no conjunto de funcionalidades suportadas;
- O WiMAX vem possibilitar o acesso sem fios de banda larga, fornecendo elevados ritmos de transferências de dados. É uma alternativa económica e viável, já que não pressupõe um elevado custo de implementação como em redes através de cabos;
- A camada PHY do WiMAX permite dois modos de atribuição de banda o TDD (*Time Division Duplex*) e o FDD (*Frequency Division Duplex*), *Half-duplex* e o *Full-duplex*;
- O OFDM é a estratégia de modulação utilizada em sistemas WiMAX;
- As técnicas de acesso múltiplo tradicionais como, FDMA, TDMA, CDMA, CSMA, podem todas ser aplicadas para OFDM. A aproximação recomendada é uma FDMA-TDMA híbrida chamada OFDMA;
- A garantia de QoS numa infra-estrutura sem fios impõe uma série de desafios tecnológicos que não existem nas redes cabladas;
- A camada MAC da norma IEEE 802.16-2004 fornece classes de serviço "*Premium*", como um elevado volume de serviços num padrão equivalente aos serviços de ADSL e de *Cable Modem*, tudo dentro da mesma estação base;
- A norma IEEE 802.16-2004 suporta quatro classes de serviço;
- A norma IEEE 802.16-2004 suporta algoritmos de escalonamento de pacotes que oferecem garantias de qualidade nas quatro classes de serviço;
- O WiMAX e o WiFi não são tecnologias oponentes mais sim complementares, pois procuram otimizar aspectos distintos.

Capítulo 3

WiMAX Móvel

Neste Capítulo apresenta-se uma visão geral do WiMAX móvel (IEEE 802.16-2005), as diferenças e similaridades em relação a versão fixa/portátil, o SOFDMA (*Scalable Orthogonal Frequency Division Multiple Access*), os esquemas de sub-canalização, mobilidade (*Handover*) bem como as classes de serviços suportadas. Veremos que a tecnologia WiMAX móvel e WiMAX fixo são diferentes para aplicações distintas mais não oponentes. Apresenta-se também uma abordagem que pode ser seguida para a determinação dos requisitos de cobertura e capacidade dos sistemas WiMAX móvel e finalmente apresenta-se as diferentes alternativas e configurações de antenas da estação base WiMAX móvel como por exemplo o SIMO, MIMO e o *Beamforming*.

3.1 Introdução

A norma IEEE 802.16e, ou WiMAX móvel (*Mobile WiMAX*) é uma solução de banda larga sem fios que permite a convergência de redes banda larga, móveis e fixas, por uma tecnologia MAN (*Metropolitan Area Network*) de rádio acesso de arquitectura de rede flexível. A interface ar (camada PHY) adopta OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*), para um desempenho superior para multi-percursos em ambientes sem linha de vista, NLoS. O OFDMA escalável, SOFDMA (*Scalable OFDMA*) é introduzido na norma para suportar larguras de banda escaláveis, de 1.25 a 20 MHz. O *Release-1* de perfis de certificação do WiMAX *Forum* cobre as larguras de banda de 5, 7, 8.75 e 10 MHz, nas bandas de 2.3, 2.5 e 3.5 GHz [Wima06a].

Apresentam-se em seguida algumas das características técnicas importantes da norma IEEE 802.16e.

Elevadas taxas de dados - a inclusão de técnicas MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) de diversidade espacial de antenas, em conjunto com esquemas de sub-canalização, codificação avançada e modulação permitem que o WiMAX móvel atinja taxas de pico de DL de 63 Mbps por sector, e picos de UL de 28 Mbps por sector, em canais de 10 MHz.

Qualidade de serviço (QoS) - a premissa fundamental da arquitectura da camada MAC da norma IEEE 802.16 é a QoS. Define fluxos de serviços, que permitem QoS baseado em IP, extremo-a-extremo. Adicionalmente, a sub-canalização e os esquemas de sinalização fornecem o mecanismo flexível para o escalonamento óptimo de recursos de espaço, frequência e tempo sobre a interface ar, trama a trama.

Escalabilidade - o projecto da norma prevê a adopção de diferentes possibilidades de canalização, de 1.25 a 20 MHz. Permite que a norma se adeque às diferentes realidades mundiais de atribuição de frequências.

Segurança - a norma inclui sistemas flexíveis e poderosos de segurança, autenticação EAP (*Extensible Authentication Protocol*) e encriptação AES-CCM (*Advanced Encryption Standard-Counter with Cipher-block chaining Message Authentication code*) nativos. Suporta diferentes grupos de credenciais de utilizadores, incluindo: cartões SIM/USIM (*Subscriber Identity Module/Universal Subscriber Identity Module*), GSM/UMTS (*GSM/Universal Mobile Telephone System*), cartões inteligentes, certificados digitais e esquemas utilizador/senha.

Mobilidade - suporta esquemas otimizados de *handover* com latências inferiores que 50 ms para garantir aplicações em tempo real, como VoIP (*Voice over IP*), sem degradação do desempenho.

3.2 Camada Física da Norma IEEE 802.16e

3.2.1 SOFDMA

Na norma IEEE 802.16e o modo Wireless MAN OFDMA é baseado no conceito de OFDMA escalável, (*Scalable OFDMA*). A SOFDMA permite atender os diversos requisitos de atribuição de espectro. A tecnologia SOFDMA permite ajustar o tamanho da transformada rápida de Fourier, FFT (*Fast Fourier Transform*), ao mesmo tempo em que se fixa a largura de canal da sub-portadora em 10.94 kHz. Este espaçamento constante resulta numa melhor eficiência espectral em canais mais largos e numa redução de custos em canais mais estreitos. A Tabela 3.1 apresenta os parâmetros da tecnologia SOFDMA.

Tabela 3.1 - Parâmetros da SOFDMA [Wima06a]

Parâmetros	Valores			
Largura de banda do canal [MHz]	1.25	5	10	20
Frequência de amostragem [MHz]	1.4	5.6	11.2	22.4
Tamanho da FFT (N_{FFT})	128	512	1024	2048
Número de sub-canais	2	8	16	32
Espaçamento da frequência da sub-portadora	10.94 kHz			
Tempo de símbolo útil ($T_b = 1/f$)	91.4 ms			
Tempo de guarda ($T_g = T_b/8$)	11.4 ms			
Duração do símbolo OFDMA ($T_s = T_b + T_g$)	102.9 ms			
Número de símbolos OFDMA (5 ms <i>frame</i>)	48			

3.2.2 Estrutura da Trama TDD

A camada PHY da norma IEEE 802.16e prevê TDD, FDD e FDD *half-duplex*. Entretanto, as versões iniciais de perfis de certificação do WiMAX *Forum* incluirão apenas TDD. Certificações FDD surgirão na medida em que possibilidades de mercado forem levantadas onde a regulamentação local proíbe a utilização da técnica TDD ou os

aspectos locais forem mais favoráveis à utilização da técnica FDD. O TDD é o esquema de *duplexing* preferido pelos seguintes motivos:

- Permite o ajuste de taxa na relação nos sentidos ascendentes/descendentes para suporte eficiente de tráfego assimétrico, enquanto que na técnica FDD DL e UL são sempre fixos e, em geral, com taxa igual;
- Assegura reciprocidade das características do canal, disponibilizando melhor suporte à adaptação da ligação, MIMO e outros avanços em tecnologia de antenas inteligentes empregues pela norma;
- Necessita apenas duma banda de canais, tende a ser muito mais flexível na sua adaptação aos diferentes espectros atribuídos pelas entidades reguladoras locais;
- Permite implementação de emissores/receptores TDD menos complexos e, portanto, mais baratos.

A Figura 3.1 apresenta a estrutura da trama OFDM para uma implementação TDD. Cada trama é dividida em sub-trama DL e UL separado por TTG (*Transmit/receive Transition Gap*) e RTG (*Receive/transmit Transition Gaps*) respectivamente para impedir colisões nas transmissões DL e UL. Uma trama, utiliza o seguinte controlo de informação para assegurar o melhor funcionamento do sistema:

- **Preâmbulo** - o preâmbulo, utilizado para sincronização, é o primeiro símbolo OFDM da trama;

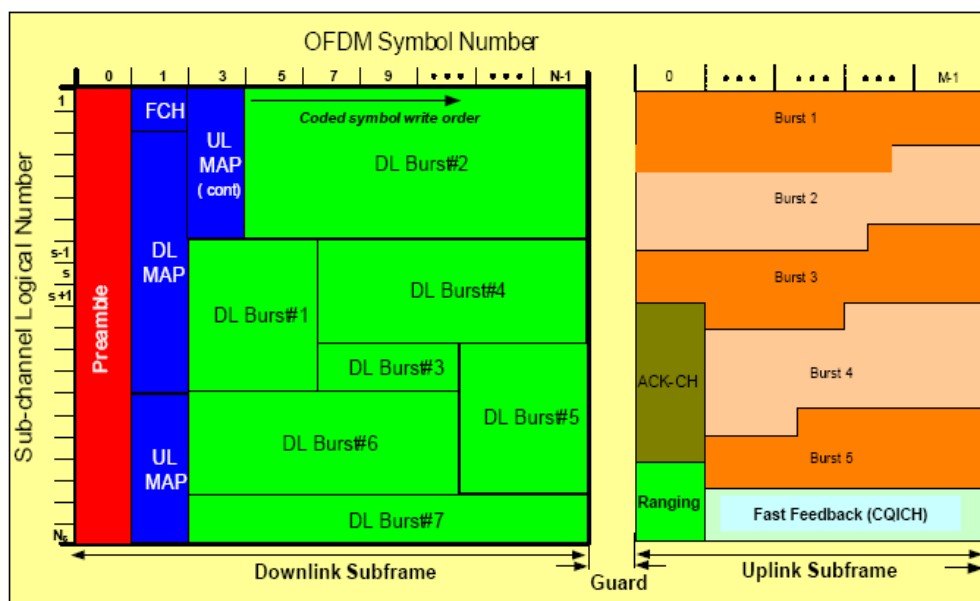


Figura 3.1 - Estrutura da trama TDD para a norma IEEE 802.16e (extraído de [Wima06a])

- **Frame Control Head (FCH)** – o FCH segue o preâmbulo, fornece a informação de configuração da trama tal como o comprimento da mensagem MAP (*Media Access Protocol*) e o esquema de codificação e sub-canais utilizáveis;
- **DL-MAP e UL-MAP** - o DL-MAP e UL-MAP fornecem a atribuição do sub-canal e outra informação de controlo para as sub-trama DL e UL, respectivamente;
- **UL Ranging** - o sub-canal UL ranging é atribuído às estações móveis, MS (*Mobile Station*) para executar tempo de *closed-loop*, frequência, e ajustar a potência assim como pedidos de largura de banda;
- **UL CQICH** - o canal UL CQICH (*Channel Quality Information CHannel*) é atribuído à MS para avaliar a informação do estado do canal;
- **UL ACK** - o UL ACK (*UL Acknowledge*) é atribuído à MS para avaliar o reconhecimento DL HARQ (*DL Hybrid Automatic Repeat Request*).

3.2.3 Características Avançadas da Camada PHY

Para aumentar a cobertura e a capacidade das aplicações da norma IEEE 802.16e foram introduzidas a modulação e codificação adaptativa, AMC (*Adaptive modulation and coding*), o pedido de repetição automático híbrido, HARQ (*Hybrid Automatic Repeat reQuest*) e a avaliação rápida do canal, CQICH. O Suporte de modulações QPSK, 16-QAM e 64-QAM é obrigatório no sentido descendente, DL, enquanto que no sentido ascendente, UL, a modulação 64-QAM é opcional. Ambos CC (*Convolutional Code*) e CTC (*Convolutional Turbo Code*) com variação da taxa de codificação e repetição de codificação são suportados na norma. Suportam-se o BTC (*Block Turbo Code*) e o LDPC (*Low Density Parity Check code*) como características opcionais.

A Tabela 3.2 apresenta um resumo de esquemas de código e modulação suportadas no WiMAX móvel. Os códigos e modulações opcionais no sentido ascendente, UL são apresentados em itálico.

Tabela 3.2 – Modulações e códigos suportados na norma IEEE 802.16e [Wima06a]

		DL (Descendente)	UL (Ascendente)
Modulação		QPSK, 16-QAM, 64-QAM; BPSK opcional para OFDMA-PHY	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64- QAM
Code Rate	CC	1/2, 2/3, 3/4, 5/6	1/2, 2/3, 5/6
	CTC	1/2, 2/3, 3/4, 5/6	1/2, 2/3, 5/6
	Repetição	x2, x4, x6	x2, x4, x6

3.2.4 Sub-Canalização

As sub-portadoras disponíveis podem ser divididos em vários grupos de sub-portadoras chamados sub-canais. O WiMAX fixo baseado na camada PHY OFDM só permite uma forma limitada de sub-canalização no sentido ascendente, UL, Figura 3.2 (a). A norma define 16 sub-canais, onde 1, 2, 4, 8, ou todos os conjuntos podem ser atribuídos para uma estação subscritora, SS no sentido ascendente. A sub-canalização no sentido ascendente, UL no WiMAX fixo permitem as estações subscritoras transmitir utilizando só uma fracção (tão baixo quanto 1/16) da largura da banda atribuída isto pela estação base, no qual fornece melhorias no *link budget* que podem ser utilizadas para aumentar desempenho do alcance e/ou melhoram o tempo de vida da bateria das estações subscritoras . Um factor de sub-canalização de 1/16 fornece uma melhoria de 12 dB no *link budget* [AnGM07].

Porém, o WiMAX móvel baseado na camada PHY OFDMA permite sub-canalização em ambos os sentidos ascendente e descendente, e aqui, sub-canais formam a unidade de recurso de frequência mínima atribuída pela estação base. Então, diferentes sub-canais podem ser atribuídos a utilizadores diferentes como um mecanismo de acesso múltiplo. Este tipo de esquema de acesso múltiplo é chamado OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*), Figura 3.2 (b).

Os Sub-canais podem ser constituídos utilizando ambas sub-portadoras contíguos ou sub-portadoras distribuídos pseudo-aleatoriamente através do espectro de frequência. Sub-canais formados utilizando sub-portadoras distribuídos fornecem mais diversidade de frequência que é particularmente útil para aplicações móveis.

O WiMAX define vários esquemas de sub-canalização baseado em portadores distribuídos para ambos os sentidos ascendente, UL e descendente, DL. Um, chamado de PUSC (*Partial Usage of SubCarriers*), é obrigatório para todas as implementações

do WiMAX móvel. Os perfis iniciais do WiMAX definem 15 e 17 sub-canais para o sentido descendente e o sentido ascendente respectivamente, para operação PUSC na largura da banda de 5 MHz. Para operação na largura de banda de 10 MHz, são 30 e 35 canais, respectivamente [AnGM07].

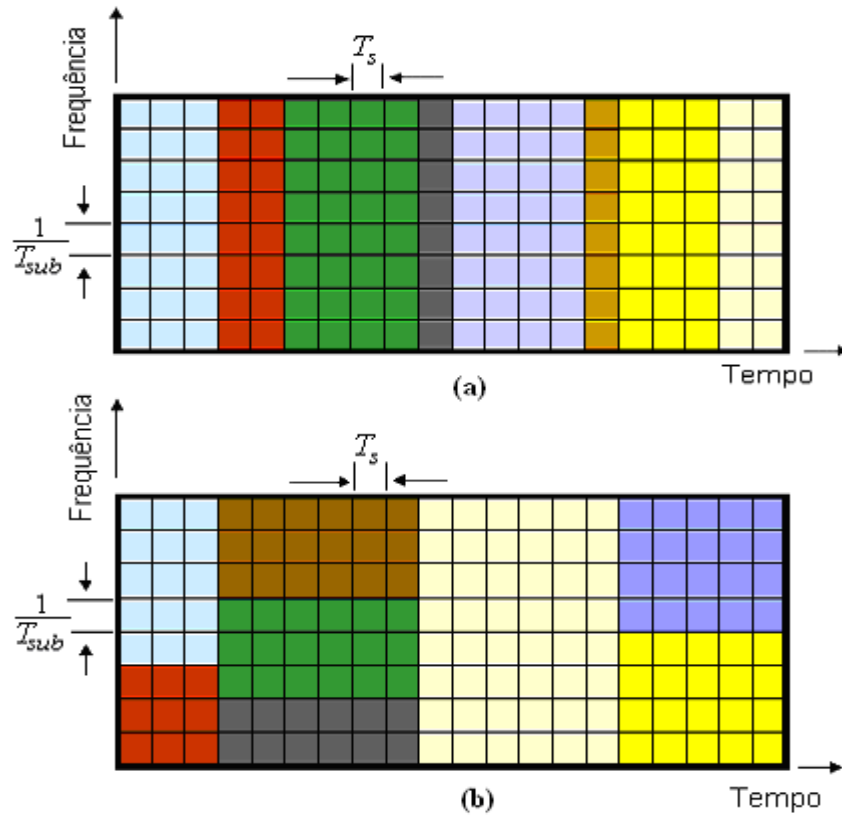


Figura 3.2 - Sub-canalização em sistemas baseados em (a) OFDM e (b) OFDMA

O esquema de sub-canalização baseado em sub-portadoras contíguas no WiMAX é chamada de banda AMC (*Adaptive Modulation and Coding*). Embora a diversidade de frequência é perdida, a banda AMC permite aos investigadores e projectistas de sistemas explorar a diversidade multi-utilizador, atribuindo sub-canais a utilizadores baseado na resposta da frequência deles. A diversidade multi-utilizador pode fornecer ganhos significativos na capacidade global do sistema, se o sistema esforça-se a proporcionar para cada utilizador um sub-canal que maximiza o SINR recebido. Em geral, sub-canais contíguas são mais apropriados para aplicações fixas e de baixa mobilidade.

3.2.5 Ritmos de Transmissão na Camada PHY

Como os esquemas de modulação e codificação adaptativa introduzem bastante flexibilidade na camada PHY do WiMAX, os ritmos de transmissão, Tx, variam significativamente em função dos parâmetros de transmissão.

Os parâmetros que têm um impacto significativo no ritmo de transmissão de dados são a largura de banda do canal, e o esquema de modulação e codificação utilizados. Outros parâmetros, como o número de sub-canais, o tempo de guarda OFDM, e a taxa de amostragem (*oversampling*), também têm um impacto significativo.

A Tabela 3.3 apresenta os ritmos de transmissão para canais com várias larguras de banda, assim como os esquemas de modulação e codificação aplicados [AnGM07]. Os valores apresentados aplicam-se a todos os utilizadores no sector para o caso TDD, assumindo-se uma razão de largura de banda DL/UL de 3:1.

Tabela 3.3 - Ritmos de Tx da camada PHY para várias larguras de banda do canal

Largura de banda do canal	3.5 MHz	1.25 MHz	5 MHz	10 MHz	8.75 MHz					
Meio PHY	256 OFDM	128 OFDMA	512 OFDMA	1024 OFDMA	1024 OFDMA					
<i>Oversampling</i>	8/7	28/25	28/25	28/25	28/25					
Modulação e taxas de codificação	Ritmos de Tx Dados na Camada PHY [kbps]									
	DL	UL	DL	UL	DL	UL	DL	UL	DL	UL
BPSK, 1/2	946	326	Não Aplicável							
QPSK, 1/2	1882	653	504	154	2520	653	5040	1344	4464	1120
QPSK, 3/4	2822	979	756	230	3780	979	7560	2016	6696	1680
16-QAM, 1/2	3763	1306	1008	307	5040	1306	10080	2688	8928	2240
16-QAM, 3/4	5664	1958	1512	461	7560	1958	15120	4032	13392	3360
64-QAM, 1/2	5645	1958	1512	461	7560	1958	15120	4032	13392	3360
64-QAM, 2/3	7526	2611	2016	614	10080	2611	20160	5376	17856	4480
64-QAM, 3/4	8467	2938	2268	691	11340	2938	22680	6048	20088	5040
64-QAM, 5/6	9408	3264	2520	768	12600	3264	25200	6720	22320	5600

Para os cálculos, assume-se uma trama de duração igual a 5 ms, um intervalo de guarda OFDM superior a 12.5 % e a utilização dum esquema de permutação da sub-portadora PUSC (*Partially Used Sub-Channel*) [AnGM07]. Assume-se também que todos os símbolos de dados OFDM utilizáveis estão disponíveis para tráfego do utilizador, excepto um símbolo utilizado para trama DL superior. Os números apresentados na Tabela 3.3 não assumem multiplexação espacial que utilizando antenas múltiplas no

emissor ou o receptor. Em utilização permite aumentar as taxas de pico em canais com multi-percursos elevados. A largura de banda de 8.75 MHz é utilizada na versão WiBro na Korea do Sul.

3.3 Classes de Serviço da Norma IEEE 802.16e

Com base nos tipos de fluxo de serviços especificados na norma DOCSIS (*Data Over Cable Service Interface Specification*), o WiMAX móvel define cinco classes de serviço, as quais devem ser tratadas de forma diferenciada pelo mecanismo de escalonamento da camada MAC. As classes de serviço do WiMAX móvel são: UGS (*Unsolicited Grant Service*), rtPS (*Real-Time Polling Service*), nrtPS (*Non Real-Time Polling Service*), BE (*Best Effort*) e ErtPS (*Extended real-time Polling Service*).

A Tabela 3.4 apresenta as classes de serviço de forma resumida, assim como os parâmetros de QoS e exemplos de aplicação.

Tabela 3.4 - Classes de serviço suportadas no WiMAX Móvel[AnGM07]

Classe de Serviços	Parâmetros de QoS	Exemplos de Aplicação
UGS (<i>Unsolicited Grant Service</i>)	<ul style="list-style-type: none"> • Taxa máxima sustentada • Tolerância máxima à latência • Tolerância a <i>jitter</i> 	VoIP (<i>Voice over IP</i>) sem supressão de silêncio
rtPS (<i>Real-Time Polling Service</i>)	<ul style="list-style-type: none"> • Taxa mínima reservada • Taxa máxima sustentada • Tolerância máxima à latência • Prioridade de tráfego 	<i>Streaming</i> áudio e vídeo, MPEG (<i>u</i>) <i>encoded</i>
nrtPS (<i>Non Real-Time Polling Service</i>)	<ul style="list-style-type: none"> • Taxa mínima reservada • Taxa máxima sustentada • Prioridade de tráfego 	FTP (<i>File Transfer Protocol</i>)
BE (<i>Best Effort</i>)	<ul style="list-style-type: none"> • Taxa máxima sustentada • Prioridade de tráfego 	<i>Web browsing</i> , Transferência de dados
ErtPS (<i>Extended real-time Polling Service</i>)	<ul style="list-style-type: none"> • Taxa mínima reservada • Taxa máxima sustentada • Tolerância máxima à latência • Tolerância a <i>jitter</i> • Prioridade de tráfego 	VoIP (<i>Voice over IP</i>) com supressão de silêncio

3.4 Gestão da Mobilidade na Norma IEEE 802.16e

A norma IEEE 802.16e disponibiliza dois estados de “espera” para a estação móvel, para o consumo eficiente de energia: *Sleep Mode* e *Idle Mode*. A norma também inclui o *seamless handover* ou seja, *handover* sem quebras, permitindo permanência de comunicação durante a mudança da área de cobertura, a velocidades veiculares (até 150 km/h).

Na norma IEEE 802.16e definem-se três tipos de *handover* [Wima06a]: HHO (*Hard Handover*), FBSS (*Fast Base Station Switching*) e MDHO (*Macro Diversity Handover*). O HHO é o único obrigatório. No FBSS, há uma lista de BSs (*Base Stations*), chamada *Active Set*, envolvidas no FBSS com a MS (*Mobile Station*). É definida uma *Anchor BS*, com quem a MS faz toda a comunicação. A transição de *anchor BS*, ou seja, o *handover*, é feito sem troca explícita de mensagens de *handover*, mediante a medição de nível de sinais das BSs pertencentes ao *active Set*. No MDHO a MS comunica-se com todas as estações base do *active Set*.

3.5 Vantagens Chaves do WiMAX Móvel

Ao contrário dos sistemas 3G baseados em WCDMA, que evoluíram de sistemas de voz central, o WiMAX foi projectado para satisfazer as exigências necessárias para a entrega de serviços IP de dados de banda larga bem como voz.

A camada PHY do WiMAX móvel é baseada em tecnologia OFDMA escalável, SOFDMA. As novas tecnologias empregues no WiMAX móvel resultam na mais baixa complexidade de equipamento e gestão da mobilidade mais simples devido à rede nuclear de suporte ser totalmente IP. Assim os sistemas WiMAX móveis apresentam vantagens sobre os sistemas 3G baseados em WCDMA, incluindo:

- ✓ Tolerância relativamente ao desvanecimento multi-percurso;
- ✓ Largura da banda de canal escalável;
- ✓ Acesso múltiplo ortogonal em ligação ascendente;
- ✓ Suporte da técnica TDD para aumentar a eficiência espectral;
- ✓ Escalonamento selectivo de frequência (relacionado com a sub-canalização);
- ✓ Reutilização de frequência fraccionária;
- ✓ Excelente qualidade de serviço, QoS;
- ✓ Tecnologia de antenas inteligentes avançada.

3.6 Aplicações da Norma IEEE 802.16e

As aplicações vislumbradas para a norma IEEE 802.16e podem ser classificadas em cinco grandes classes, Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Classes de aplicações da norma IEEE 802.16e

Classe	Aplicação	Requisito estimado de banda		Requisito estimado de latência		Requisito estimado de jitter	
1	Jogos interactivos <i>multiplayer</i>	Baixo	50 kbps	Baixo	< 25 ms	N/D	
2	VoIP & videoconferência	Baixo	32 a 64 kbps	Baixo	< 160 ms	Baixo	< 50 ms
3	<i>Streaming Media</i>	Baixo a elevado	5 kbps a 2 Mbps	N/D		Baixo	< 100 ms
4	Web & Browsing & <i>Instant Messaging</i>	Moderado	10 kbps a 2 Mbps	N/D		N/D	
5	<i>Media content downloads</i>	Elevado	> 2 Mbps	N/D		N/D	

3.7 WiMAX Fixo versus WiMAX Móvel

Aparentemente, as duas normas parecem muito similares, mas existem algumas diferenças entre elas. Como exemplo, podemos mencionar a banda de frequência, a norma IEEE 802.16e se propõe a oferecer suporte à mobilidade nas bandas licenciadas de 2 - 6 GHz, enquanto a norma IEEE 802.20 só suporta uma mobilidade pedestre nas bandas de 2 – 11 GHz.

O WiMAX móvel é compatível com a especificação da norma IEEE 802.16-2004. Em frequências inferiores a 3.5 GHz pode oferecer concorrência à tecnologia celular com alcance de 2 a 5 km (nas cidades).

A Tabela 3.6 complementa a apresentação efectuada nos parágrafos anteriores e traz um resumo comparativo que aponta as principais características mais importantes do WiMAX fixo e móvel.

Tabela 3.6 – WiMAX fixo versus WiMAX móvel

	WiMAX Fixo	WiMAX Móvel
Norma IEEE	IEEE 802.16-2004	IEEE 802.16e-2005
Frequências	2 - 11 GHz, licenciado, não licenciado	2 - 6 GHz, licenciado, não licenciado
PHY	256 FFT OFDM	512 e 1024 FFT SOFDMA
Condições do Canal	LoS e NLoS	LoS e NLoS
Ritmo de Transmissão Máximo	1 - 75 Mbps	1 - 75 Mbps
Largura de Banda do Canal	3.5, 7 e 10 MHz	5, 7 e 10 MHz
Duplexing	TDD & FDD	TDD (actualmente)
Camada de Convergência	Ethernet (<i>Layer 2</i>)	IP (<i>Layer 3</i>) Ethernet opcional
Mobilidade	Fixo e Mobilidade Pedestre	Portátil e Móvel
Terminais (CPE)	<i>Outdoor CPEs</i> <i>Indoor Modems</i>	Cartões PC, Dispositivos USB, Mini-PCI (para PC), PDAs, etc.
Modulação	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64QAM	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64QAM
Funcionalidade Rede	<i>Transparent Bridging,</i> <i>Nomadic Roaming,</i> <i>Self-Install</i>	<i>Handover Support,</i> <i>Paging, Sleep Mode</i>
Funcionalidades CPE	Diversidade Tx e Rx (opcional); Sub-canalização no UL (opcional); AAS (opcional)	AAS (obrigatório) MIMO (obrigatório)
Raio típico da Célula	3 a 10 km, NLoS e 50 km, LoS	2 - 5 km

3.8 Determinação dos Requisitos de Cobertura

O objectivo fundamental em qualquer planeamento de uma rede WirelessMAN é conseguir uma cobertura ubíqua ao longo de toda área metropolitana.

Isso requer diferentes considerações, dependendo do terreno, densidade de construções, edifícios altos, e outros factores que podem afectar a relação multi-percurso e o *link budget*. Para além disso, com aplicações móveis é necessário manter uma cobertura adequada, independentemente do local onde se encontrem os utilizadores a serem localizados, quer no exterior, com linha de vista de uma estação base, num veículo em movimento rápido, ou no interior de um edifício.

Tradicionalmente, planeamentos celulares eram somente baseados em alcançar uma cobertura ubíqua com pouca consideração pelos requisitos da capacidade.

Considerando que os únicos serviços oferecidos eram voz e o mercado era incerto, esta era uma abordagem muito razoável. Para além disso, o serviço de voz oferece uma aplicação de baixa taxa de dados permitindo a redes móveis tradicionais alcançar cobertura *indoor* e *outdoor* com uma rede de baixa taxa de dados. Com o aumento dos utilizadores e mais serviços oferecidos, eram colocadas estações base adicionais e/ou adicionados canais as estações base existentes para satisfazer os crescentes requisitos da capacidade.

Com o WiMAX móvel, no entanto, os operadores vão querer oferecer uma vasta gama de serviços de banda larga com suporte a qualidade de serviço, QoS (*Quality of Service*). Para atender as expectativas dos utilizadores para estes tipos de serviços, será necessário determinar previamente os requisitos da capacidade e planear a rede adequadamente desde o início. Um planeamento celular rigoroso em antecipação a crescente procura dos utilizadores, garante uma experiência de qualidade ao utilizador quando a rede estiver mais ocupada. Isto será particularmente importante nas zonas urbanas de elevada densidade, visto que o planeamento nestas zonas tem mais probabilidades de ser impulsionado pelos requisitos da capacidade.

3.9 Determinação dos Requisitos da Capacidade

Para chegar a uma estimativa precisa dos requisitos da capacidade para novos serviços de banda larga não é um exercício simples. É preciso antecipar como os utilizadores utilizarão os novos serviços oferecidos e com que frequência os utilizadores estarão activamente na rede. Nesta Secção apresenta-se uma abordagem que pode ser seguida [Wima06b].

A densidade de dados, expressa em Mbps por km², é uma métrica conveniente para descrever os requisitos da capacidade. Para determinar a densidade de dados necessários para uma região demográfica específica é um processo de multi-passo. Estes passos são resumidos na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 - Passos para estimar os requisitos da densidade de dados [Wima06b]

Passos	Descrição
1	Densidade populacional
2	Taxa de crescimento populacional
3	Mercado a que é dirigido
4	Penetração no mercado
5	Mistura de utilizadores
6	Efeito da mobilidade e <i>roaming</i>
7	Actividade do PBH (<i>Peak Busy Hour</i>)
8	Desempenho desejado durante PBH
9	Densidade de dados necessários

3.10 Estações Base WiMAX Móvel

O equipamento da estação base WiMAX móvel estará disponíveis de muitos e diferentes fornecedores, embora todos os equipamentos WiMAX serão compatíveis, com desempenho satisfatório e requisitos de interoperabilidade, estarão disponível um grande número de diferentes configurações a partir das quais podemos escolher [Wima06b]. A disponibilidade e adaptação das características opcionais também acrescentam variabilidade aos equipamentos. Para além disso, existem diferentes bandas de frequências que podem ser consideradas e uma variada quantidade de espectro disponível nessas bandas. A escolha do espectro vai em muitos casos, afectar o factor de reutilização de frequências e a largura de banda do canal que pode ser utilizado na rede de acesso.

3.10.1 Configurações das Antenas

Para além das antenas SIMO (*Single Input Multiple Output*) e MIMO (*Multiple Input Multiple Output*), a tecnologia WiMAX móvel suporta uma vasta gama de antenas inteligentes [Wima06b] para aumentar tanto a cobertura como o débito binário do canal. As características suportadas pelas antenas avançadas em perfis de *Release-1* incluem *Adaptive Beamforming*, *STC (Space Time Coding)* e *SM (Spatial Multiplexing)*.

A Tabela 3.8, apresenta de forma resumida as opções das antenas avançadas suportadas pelo WiMAX móvel, onde N_e é número de antenas de emissão e N_r é o número de antenas de recepção.

Embora muitas destas estações base as antenas avançadas sejam características opcionais, para a estação móvel é obrigatório suportar todas as opções da estação base que podem ser utilizados para garantir a interoperabilidade entre os fornecedores. Para as discussões que se seguem, a estação móvel será adotado, em todos os casos, como ser configurado com uma antena de emissão e duas antenas de recepção, SIMO (1x2).

Tabela 3.8 - Opções das antenas avançadas [Wima06b]

Ligação	<i>Space Time Coding</i> (STC)	<i>Spatial Multiplexing</i> (SM)	<i>Adaptive Beamforming</i>
Descendente (DL)	$N_e = 2, N_r \geq 1$ Matriz A	$N_e = 2, N_r \geq 2$ Matriz A, Codificação vertical	$N_e \geq 2, N_r \geq 1$
Ascendente (UL)	Indisponível	$N_e = 1, N_r \geq 2$	$N_e \geq 1, N_r \geq 2$

3.10.2 Estação Base com SIMO (1x2)

Uma configuração típica da antena da estação base do WiMAX móvel será o SIMO (1x2). Mesmo até com uma única antena de emissão no fim de cada ligação está configuração tira proveito de multi-percurso para melhorar a potência do sinal recebido em ambos os sentidos descendentes, DL e ascendente, UL quando comparado com a configuração SISO (*Single Input Single Output*). Com duas antenas receptoras em ambas estações base e móvel o sinal recebido é melhorado pela utilização da diversidade e a utilização da técnica MRC (*Maximal Ratio Combining*).

3.10.3 Base Estação com MIMO (2x2)

Adicionando uma segunda antena a estação base ficamos com uma configuração MIMO (2x2) [Tong06]. Isto oferece a possibilidade para dois modos adicionais para melhorar o desempenho *downstream*. Com o STC (*Space Time Coding*) também conhecida como a Matriz MIMO A, são enviados fluxos de dados DL idênticos de cada antena emissora fornecendo espaço e diversidade de espaço. Num ambiente com desvanecimento rápido e multi-percurso o STC melhora a relação sinal-ruído, SNR (*Signal to Noise Ratio*) na recepção do sinal na estação móvel para permitir suportar máxima eficiência de modulação em rajada e assim aumentar a capacidade no sentido descendente, DL bem como o alcance no sentido descendente. Com o SM (*Spatial Multiplexing*), também conhecido como a Matriz MIMO B, cada uma das antenas de emissão da estação base

envia um fluxo de dados DL diferente. Esta técnica utiliza multi-percurso para distinguir entre os fluxos de dados diferentes e teoricamente tem o potencial para duplicar a capacidade DL sob condições de canal favoráveis. Para tirar proveito do STC e SM, o WiMAX móvel também suporta troca adaptativa MIMO. Isto permite uma troca dinâmica entre a Matriz A e a Matriz B dependendo das condições existentes do canal a qualquer momento.

Com o MIMO (2x2) a capacidade do canal ascendente, UL também é melhorada permitindo dois utilizadores móveis transmitir colaborativamente no mesmo *time slot*, esta técnica é conhecida como *collaborative spatial multiplexing* do UL.

O MIMO é particularmente efectivo em planeamentos nas áreas urbanas e suburbanas onde há multi-percurso considerável. O MIMO (2x2) também pode suportar dupla diversidade de polarização para fornecer dois sinais ortogonais para melhorar o desempenho quando não há multi-percurso suficiente. O MIMO também é igualmente efectivo em ambientes de mobilidade estacionária e de grande mobilidade.

A adição de uma segunda antena e uma cadeia de amplificador de potência de elevada potência associada acrescenta complexidade a estação base WiMAX mas não obstante pode ser considerado uma actualização do custo efectivo sobre o SIMO (1x2) em cenários de capacidade limitada desde que a capacidade do canal descendente é tipicamente aumentada para até 55% ou mais [Wima06c]. A Figura 3.3 apresenta uma avaliação mais visual das opções das estações base e móvel com antenas de configuração SIMO e MIMO.

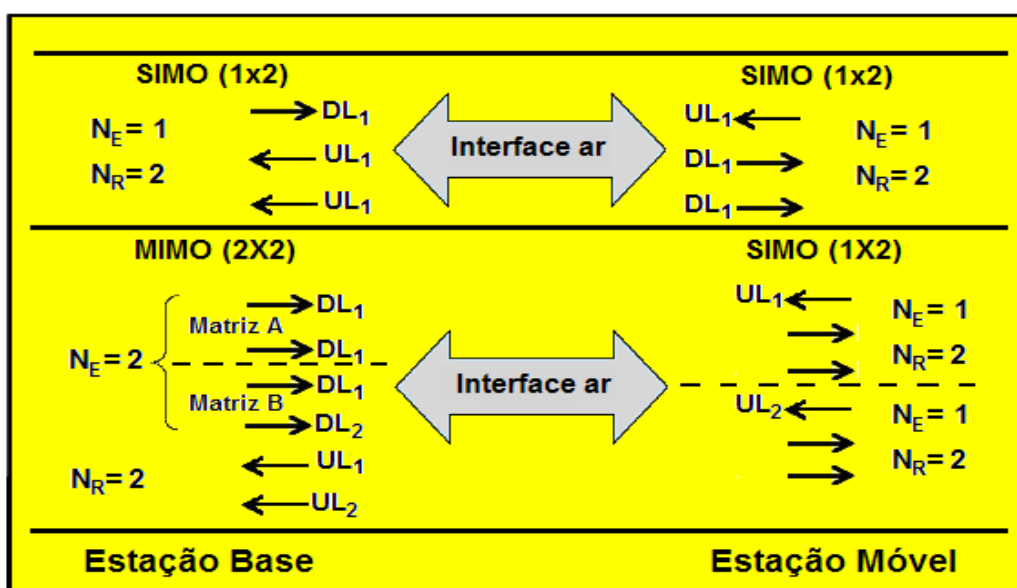


Figura 3.3 - Opções das estações base e móvel com configurações SIMO/MIMO

3.10.4 Estação Base com *Beamforming* Adaptativa

O BF (*Beamforming*) é outra opção de antena avançada suportada pela tecnologia WiMAX. Esta tecnologia de antena geralmente também chamada de sistemas de antena inteligentes ou antenas adaptativas podem ser implementadas de varias maneiras [LePe99].

A abordagem mais simples, conhecida como “*Switched Beam*”, fornece a capacidade para trocar entre várias antenas *beam* estreitas ou entre diferentes *beams* num *array* da antena. Uma segunda abordagem, conhecida como “*Dynamically Phased Array*”, utiliza um algoritmo DoA (*Direction of Arrival*) do utilizador directo para a *beam* dinamicamente.

Ambas as abordagens melhoram a potência do sinal recebido e por conseguinte podem fornecer melhoria no alcance e na capacidade do canal mas também está sujeito a um ângulo de espalhamento devido a espalhamento e multi-percurso, especialmente predominante em ambientes urbanos e muitos suburbanos [Tong06].

Uma terceira abordagem para *beamforming* é conhecida como “*array* Adaptativa” ou “*Beamforming* Adaptativa” Com esta aproximação os parâmetros de *beamforming* são determinados adaptativamente baseado em ambas condições do canal e da interferência. Isto também pode permitir o *array* a não só maximizar a potência do sinal para o utilizador desejado mas também fornece um mecanismo para anular a interferência de saída.

Com o *array* adaptativa ou *Beamforming* Adaptativa, podemos utilizar outros algoritmos para aumentar construtivamente ambas as relações SNR e SIR (*Signal to Interference*) em todos os ambientes de propagação.

Electronicamente os padrões de antena guiadas são implementados para fornecer a amplitude e fase apropriada para cada alimentação dos n elementos do *array* da antena da estação base. O *array beamforming* para o WiMAX móvel terá em principio 2 a 8 elementos. Embora seja possível, não é provável que os *arrays* com mais de oito elementos sejam considerados nestas bandas de frequência devido à adição da complexidade e o aumento do tamanho e peso [Wima06b].

São utilizadas técnicas de processamento de sinal digital para analisar o desempenho da ligação em tempo real e ajustar os factores de pesagem para amplitude e fase para cada alimentação da antena manter um óptimo desempenho. São utilizados sinais recebidos no sentido ascendente, UL para determinar as características da ligação e desde que o

WiMAX móvel utiliza o TDD (*Time Division Duplexing*), é garantido a reciprocidade do canal.

Desde que os elementos da antena no *array* são tipicamente espaçados a um meio do comprimento de onda ou menos, o tamanho de abertura está limitado, não obstante, o ganho dos elementos de 14 a 16 dBi são aceitáveis na banda dos 2.5 GHz. Em situações de alcance limitado, o *beamforming* fornece maior capacidade de alcance devido ao *link budget* melhorado em ambos o sentidos descendente, DL e ascendente, UL.

Para suportar múltiplos utilizadores simultaneamente dentro da área de cobertura, uma mensagem MAP (*Media Access Protocol*) deve ser transmitida a todos os utilizadores no sector. Desde que a mensagem MAP é *broadcast*, o benefício do alcance no sentido descendente fornecido pela adição do *link budget* com *beamforming* pode não ser percebido completamente sem utilizar múltiplas repetições para garantir a recepção adequada da mensagem.

É possível, calcular o benefício do *beamforming* baseado na melhoria esperada de SNIR (*Signal to Noise plus Interference Ratio*) [Wima06b].

A Tabela 3.9 apresenta uma comparação entre as configurações SIMO (1x2) e *beamforming* adaptativa. Ambos os parâmetros de SIMO (1x2) e *beamforming* podem variar de fornecedor para fornecedor, porque como já foi mencionado o número de elementos de um *array beamforming* pode variar de 2 a 8.

Tabela 3.9 - *Beamforming* adaptativa versus SIMO (1x2) a 2.5 GHz [Wima06b]

Parâmetros	Valores
SIMO (1x2)	
Ganho da Antena	15 dBi
Potência da emissão da antena	40 dBm (10Watts)
EIRP	55 dBm
<i>Beamforming</i> Adaptativa	
Elementos <i>Beamforming</i>	8
Ganho da antena por elementos	15 dBi
Potência da emissão por elemento	+31 dBm (1.35 Watts)
Implementação	-1 dB
Ganho efectivo do <i>array</i>	23 dBi
EIRP	63 dBm

3.10.5 Estação Base com *Beamforming* Adaptativa e MIMO

Com um *array beamforming* adaptativa de n elementos em vários lugares podem ser consideradas técnicas de divisão para posterior aumento do desempenho. A implementação da Matriz MIMO A com *beamforming* pode aumentar a robustez do canal em ambientes com desvanecimento rápido e a utilização da Matriz MIMO B permite múltiplos fluxos de dados para adicionar o desempenho do débito binário. Com a adição desta capacidade pode-se aumentar o débito binário do canal em 10 a 15% [Wima06b].

As Soluções de WiMAX com *beamforming* terão geralmente arquitecturas completamente diferentes das soluções SIMO e MIMO. Uma típica configuração SIMO ou MIMO terão amplificadores de potência montadas à base da torre para facilitar o arrefecimento e a manutenção. Os amplificadores neste caso teriam que ser classificados segundo o tamanho para compensar as perdas por cabo que podem variar de 2 a 4 dB dependendo da altura de torre e da frequência.

As soluções com *beamforming* requerem um bom controlo da fase e amplitude entre os elementos de transmissão e serão frequentemente implementadas com os amplificadores de potência integrados com os elementos do *array* da antena montada na torre. O tamanho maior e o peso destas estruturas também necessitarão de uma montagem mais robusta. Há exigências adicionais de processamento de sinais para soluções de *beamforming* com *Beamforming* adaptativa que é ser mais intensivo computacionalmente.

3.11 Sumário e Conclusões

Neste Capítulo apresentou-se uma visão geral da norma do WiMAX móvel como a camada PHY e algumas características da camada MAC, a reutilização de frequências fraccionária. E por fim apresentou-se as várias alternativas das configurações das antenas da estação base WiMAX móvel, podendo-se extrair as seguintes conclusões:

- O WiMAX móvel, é baseado na tecnologia de SOFDMA que é mais apropriado para comunicação de dados sem fios de banda larga;
- Os atributos e capacidade do desempenho do WiMAX móvel fazem com que seja uma solução viável para o elevado desempenho, serviço sem fios de banda larga de baixo custo;

- O WiMAX móvel também pode ajustar dinamicamente a razão de DL/UL com suporte TDD fornecendo maior flexibilidade e vantagens de eficiência espectral em suportar vários tipos de tráfego de banda larga;
- O WiMAX fixo baseado em OFDM-PHY só permite uma forma limitada de sub-canalização no sentido ascendente, UL, porém, o WiMAX móvel baseado em OFDMA-PHY permite sub-canalização em ambos os sentidos ascendente, UL e descendente, DL;
- Devido a reutilização de frequência fraccionária, as MSs perto da BS tendem a manter a sub-portadora, enquanto MSs na fronteira da célula mudam de sub-portadoras, baseado num planeamento dinâmico e automático sobre sectores, em função da carga da rede e condições de interferência.
- As técnicas de antenas avançadas como MIMO com STC (*Space Time Coding*), SM (*Spatial Multiplexing*) e Beamforming, são alternativas viáveis para planeamentos de elevada densidade e capacidade limitada, melhoram significativamente o desempenho do sistema;

Capítulo 4

Feixes WiMAX

Neste Capítulo apresenta-se o projecto de instalação de Feixes Pré-WiMAX para interligar a FCS-UBI (Faculdade de Ciências da Saúde da Universidade da Beira Interior) aos hospitais Sousa Martins na Guarda e Amato Lusitano em Castelo Branco realizado no âmbito do projecto MobileMAN. Apresenta-se o dimensionamento do feixe pré-WiMAX PTP com repetidores utilizado para interligar a FCS/UBI ao HAL (Hospital Amato Lusitano) e ao HSM (Hospital Sousa Martins) tendo em consideração os valores mínimos de C/N e de C/N com desvanecimento. Testaram-se várias ligações ponto-a-ponto com equipamento pré-WiMAX na cidade da Covilhã e na região da Beira Interior. Obtiveram-se resultados experimentais para a potência recebida que se adequam aos modelos teóricos. Estes resultados levaram à instalação definitiva da ligação entre a FCS e o HAL, que tem demonstrado ser robusta relativamente a perda de pacotes.

4.1 Introdução

Este trabalho apresenta resultados do projecto de redes sem fios WiMAX (*World Interoperability for Microwave Access*) ponto-a-ponto, que pretendem ligar a FCS-UBI (Faculdade de Ciências da Saúde da Universidade da Beira Interior) na Covilhã, ao HAL (Hospital Amato Lusitano) em Castelo Branco, e ao HSM (Hospital Sousa Martins) na Guarda.

Como mencionado anteriormente o WiMAX é o nome comercial da norma IEEE 802.16. Para a elaboração desta norma foram criados vários grupos de trabalho, dos quais se destacam o IEEE 802.16-2004, que se dedica às redes PTP (Ponto-a-Ponto) e às redes PTM (Ponto-a-Multiponto) sem suporte de mobilidade, e o IEEE 802.16e, que se dedica às redes PTM com suporte de mobilidade [Shak06]. No futuro, existirá o IEEE 802.16m, a chamada *Advanced Air Interface*, que permitirá a convergência do WiMAX com o LTE (*Long Term Evolution*) do 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*). Antes de surgir o WiMAX já existiam outros sistemas de comunicação sem fios, como o WiFi. No entanto, estes eram limitados pela distância, o que obrigava à instalação de muitos repetidores, o que tornava o processo bastante dispendioso.

Dados os desafios deste projecto, como por exemplo, a longa distância entre as instituições que se pretendem ligar, o WiMAX surge como uma solução aliciante pois, para além de oferecer elevados ritmos de transmissão, tem um alcance elevado. No caso de ligações PTP o WiMAX apresenta um alcance máximo de aproximadamente 50 km, enquanto que no caso de ligações PTM as células têm um raio de cobertura compreendido entre 2 e 5 km. Para além destas vantagens, o WiMAX permite várias formas de comunicação multimédia e IP (*Internet Protocol*) como por exemplo, videoconferência, voz sobre IP e comunicação de imagem e de vídeo de alta resolução, o que é bastante útil para a prática e para o ensino de medicina.

4.2 Dimensionamento de Feixes WiMAX

4.2.1 Modelos

Do trabalho realizado anteriormente no projecto MobileMAN, para a ligação da FCS a tutoria do HAL, por se encontrarem a uma distância longa e o perfil do terreno não o permitir, vai ser necessária a instalação de um repetidor na Serra da Gardunha e no castelo em Castelo Branco. Assim pode dizer-se que esta ligação é constituída por três saltos, dando origem a três ligações, uma entre a FCS (Covilhã) e a Serra da Gardunha, de aproximadamente 21 km, Figura 4.1 uma segunda entre a Serra da Gardunha e castelo em Castelo Branco, de 26 km e, Figura 4.2, por último, entre o castelo e o HAL, inferior a 1 km, Figura 4.3.

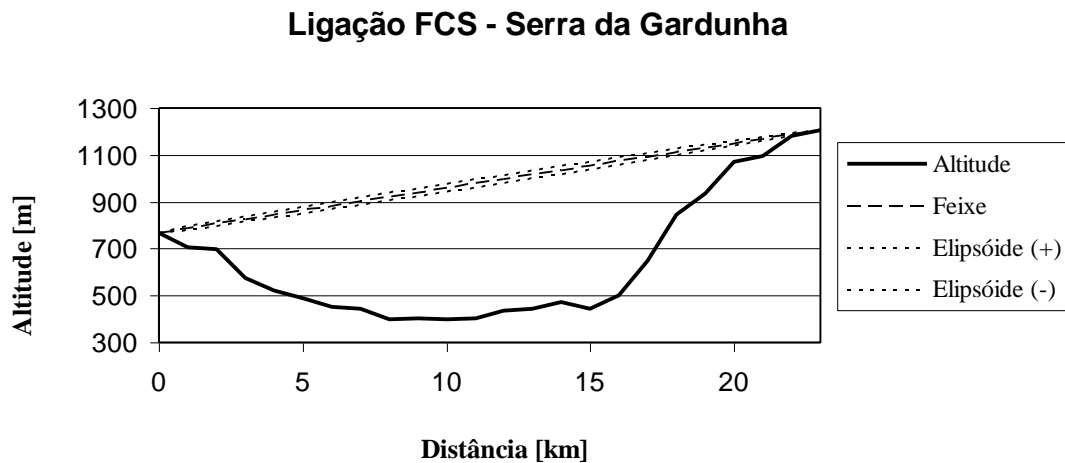


Figura 4.1 - Ligação entre a FCS e a Serra da Gardunha

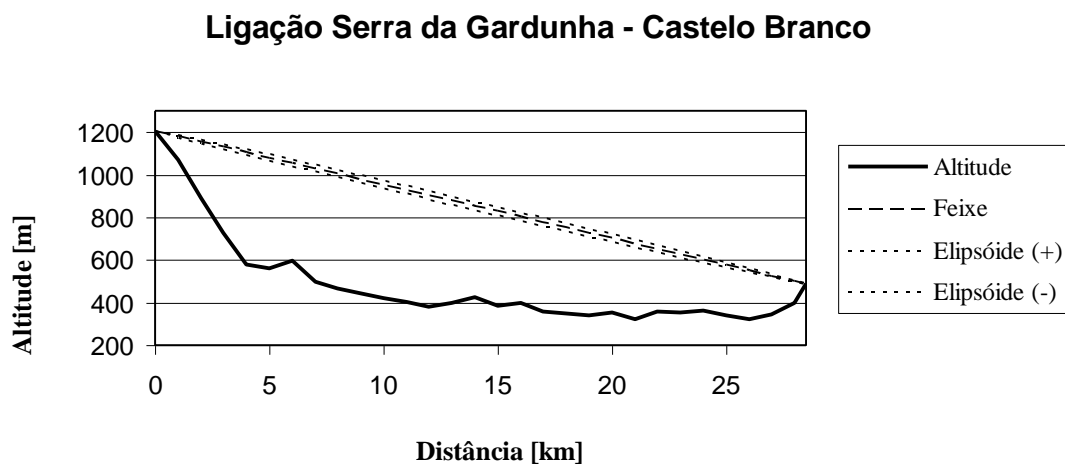


Figura 4.2 - Ligação entre a Serra da Gardunha e Castelo Branco

Ligação Castelo Branco - Tutoria do HAL

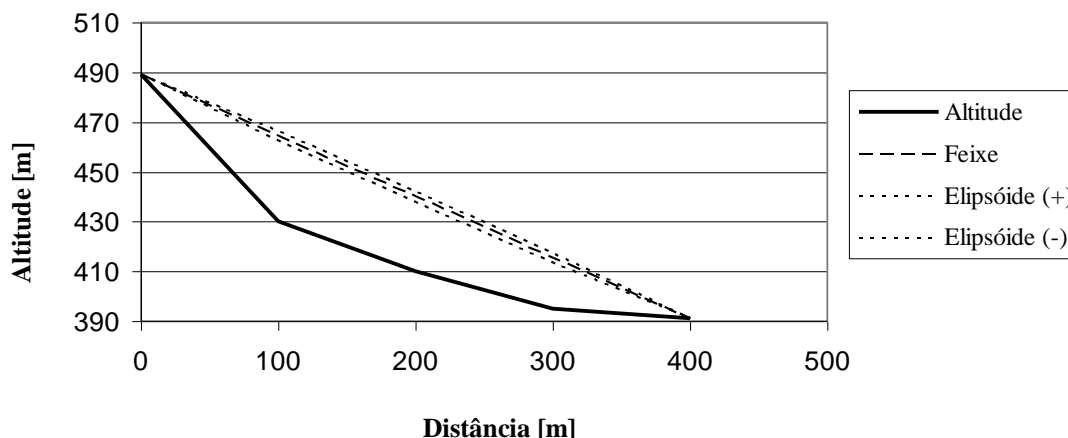


Figura 4.3 - Ligação entre a Castelo e Castelo Branco

O último salto é justificado pelo castelo obstruir o feixe e o Hospital encontrar-se a uma altitude mais reduzida, Figura 4.4.

Ligação Serra da Gardunha - Tutoria HAL

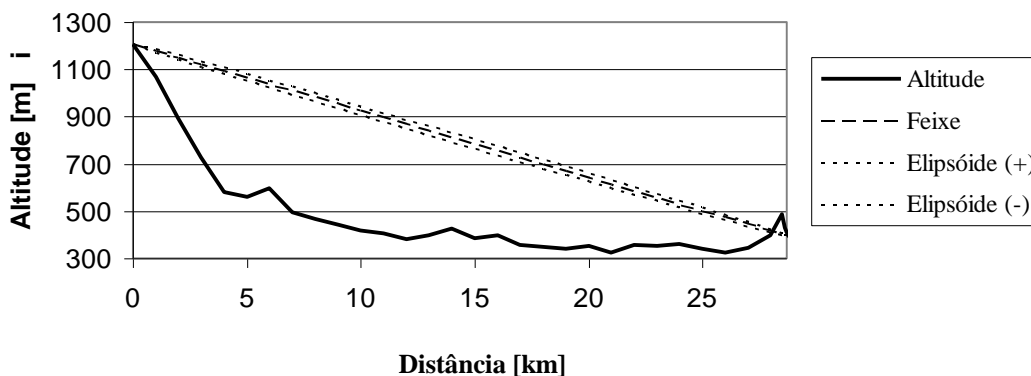


Figura 4.4 - Ligação entre a Serra da Gardunha e tutoria HAL

Ao analisar-se o perfil do terreno entre a Covilhã e a Guarda, tendo em consideração a localização da FCS e do HSM, verificou-se que a unidade base, BU (*Base Unit*) não poderia ficar na FCS devido à inexistência de linha de vista entre as estações terminais, tendo esta de ser instalada na Reitoria da Universidade da Beira Interior. Como o perfil do terreno é muito irregular, surgiu a necessidade de instalar dois repetidores, um localizado no Alto da Malhoeira e o outro no Barracão. Assim, o primeiro salto, entre a Reitoria e o Alto da Malhoeira, é de 11.05 km, o segundo salto, entre o Alto da

Malhoeira e o Barracão, é de 22.25 km e, finalmente, o terceiro salto, entre o Barracão e o HSM, tem 6.30 km.

No dimensionamento, foi calculada a atenuação, L , segundo a fórmula de Friis, a potência recebida, P_R , a relação portadora-ruído, C/N , e a relação portadora-ruído mínima com desvanecimento, $C/N_{min_c_desv}$. De acordo com a fórmula de Friis, a atenuação é dada pela seguinte expressão [Vele95]

$$L = 32.4 + 30\gamma + 10\log d + \gamma_{chuva} \times d + \gamma_{nevoeiro} \times d + \gamma_{neve} \times d + 20\log f, \quad (4.1)$$

onde γ é o expoente de propagação, γ_{chuva} é a atenuação específica devido à chuva, $\gamma_{nevoeiro}$ é a atenuação específica devido ao nevoeiro e γ_{neve} é a atenuação específica devido à neve. As atenuações específicas são expressas em dB/km, d é a distância em km e a frequência, f , é medida em GHz [VCSM05]. Os valores dos parâmetros são os seguintes:

- $\gamma = 2$, pois para feixes hertzianos considera-se sempre a fórmula de Friis original [Vele95];
- $\gamma_{chuva} = 0.0811$ dB/km [Sale03];
- $\gamma_{neve} = 0.01$ dB/km. Este valor pode ser desprezado por ser muito inferior a γ_{chuva} ; geralmente, γ_{neve} é desprezável para frequências inferiores a 30 GHz [VCSM05];
- d varia entre 1 e 22.25 km;
- $f = 5.8$ GHz.

Para calcular P_R é necessário conhecer os valores dos seguintes parâmetros

- $P_E = -9$ dBW, potência máxima;
- $G_E = 28$ dBi [Alva06];
- $G_R = 28$ dBi [Alva06];
- L , calculado através da fórmula de Friis.

A potência recebida é dada por

$$P_R = P_E + G_E + G_R - L, \quad (4.2)$$

enquanto que a relação portadora-ruído, C/N é dada por

$$C/N = P_R - N, \quad (4.3)$$

onde [Sale03]

$$N = N_0 + N_f \quad (4.4)$$

Considera-se $b_{rf} = 20$ MHz e o factor de ruído, $N_f = 3$ dB

Por outro lado, a relação portadora-ruído mínima com desvanecimento, $C/N_{min_c_desv}$, é dada por [VCSM05]

$$\left(\frac{C}{N}\right)_{min_com_desvanecimento} = \left(\frac{C}{N}\right)_{min} + M_u + M_{ext} \quad (4.5)$$

onde M_u é a margem uniforme e M_{ext} é uma margem extra. Como o efeito de desvanecimento selectivo é desprezável em OFDM (*Orthogonal frequency-division multiplexing*), a margem de ligação é igual à margem uniforme. Para o cálculo do $C/N_{min_c_desv}$, de acordo com as cláusulas do ITU-R consideraram-se duas taxas de erro binário, ber , 10^{-6} e 10^{-3} . Assim sendo, C/N_{min} varia com o ber e com a modulação, Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - C/N_{min} em função da modulação e do ber [Sale03]

Modulação	$ber = 10^{-6}$	$ber = 10^{-3}$
QPSK	14	10
16-QAM	23	19
64-QAM	30	26

Da aplicação das expressões anteriores obtiveram-se os resultados que se apresentam nas Figuras 4.5, 4.6 e 4.7, onde é possível analisar a viabilidade das ligações para os três tipos de modulações suportadas pelo WiMAX, em função da distância, de C/N e de $C/N_{min_c_desv}$. A ligação é considerada viável sempre que C/N for superior ao $C/N_{min_c_desv}$.

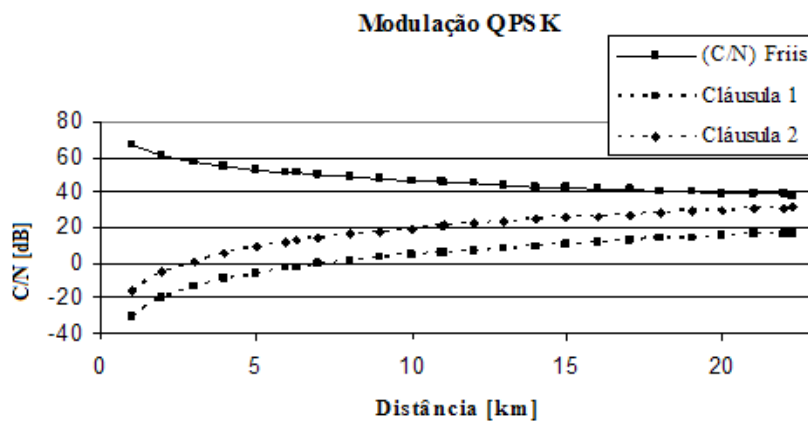


Figura 4.5 - Relação entre $C/N_{min_c_desv}$ e C/N para a modulação QPSK

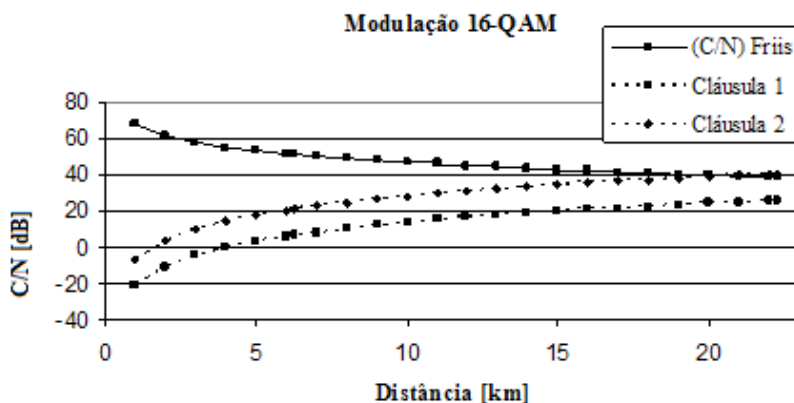


Figura 4.6 - Relação entre $C/N_{min_c_desv}$ e C/N para a modulação 16-QAM

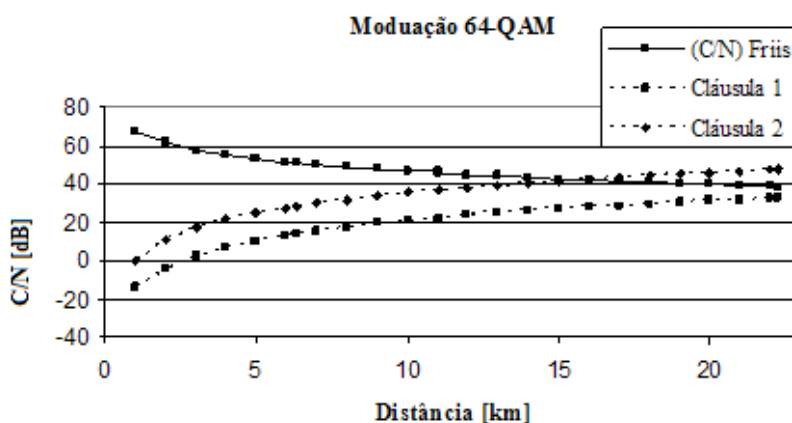


Figura 4.7 - Relação entre $C/N_{min_c_desv}$ e C/N para a modulação 64-QAM

4.2.2 Resultados

Dos resultados obtidos verificou-se que o elipsóide de Fresnel encontra-se totalmente desobstruído em todas as ligações apresentadas. No dimensionamento do feixe hertziano, utilizando um expoente de propagação, γ , igual a dois, observou-se que é possível suportar, sem dificuldade, a modulação QPSK para as duas cláusulas que limitam a taxa de erro, *ber*. Para as distâncias mais longas, as modulações 16-QAM e 64-QAM podem ser suportadas se for apenas considerada a primeira cláusula. Por outro lado, se for considerada a segunda cláusula, a modulação 16-QAM é suportada até aos 21 km, enquanto que a modulação 64-QAM é suportada até ao 15 km, aproximadamente. Conclui-se que as ligações podem ser estabelecidas sem problemas se for tida em consideração apenas a primeira cláusula. Os resultados com a segunda cláusula são um pouco mais restritivos.

4.3 Trabalho de Campo

4.3.1 Cenários

Para a realização deste trabalho utilizamos o equipamento WiMAX BreezeNET B da Alvarion que apresenta as seguintes características [Alva06].

- $f = 5.4$ GHz, pois o equipamento obedece à norma IEEE 802.1p, designada por Pré-WiMAX;
- Largura de banda do canal = 20 MHz;
- $G_E = G_R = 21$ dBi;
- $P_E = -9$ dBW, este valor corresponde ao valor máximo que a BU pode atingir.

A Tabela 4.2 apresenta de forma mais detalhada as principais características da especificação rádio do equipamento BreezeNET B da Alvarion [Alva06].

Para além do equipamento da Alvarion acima referido, utilizou-se para a realização deste trabalho o seguinte material.

- Dois computadores, um para funcionar como servidor e o outro como cliente;
- Dois cabos UTP (*Unshielded Twisted Pair*);
- Dois inversores 12V – 220V.

Com este material foi possível criar uma rede com uma topologia PTP, Figura 4.8.

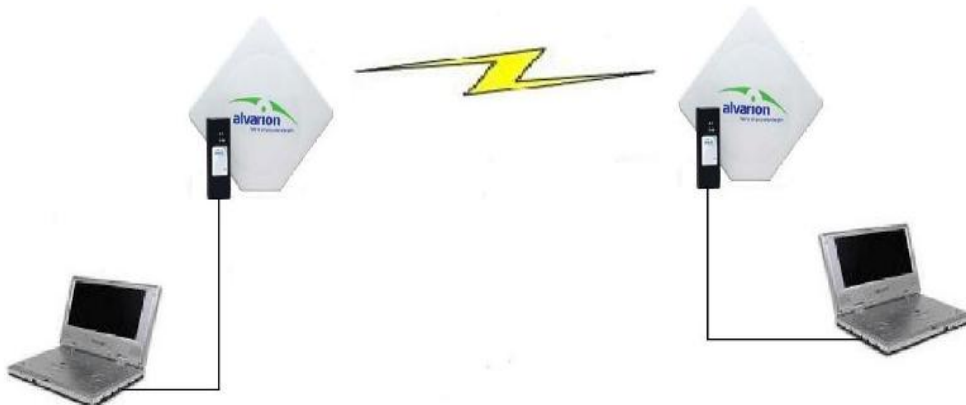


Figura 4.8 - Topologia da rede PTP utilizada no trabalho de campo

Tabela 4.2 - Especificações de rádio do equipamento BreezeNET B [Alva06]

Item	Descrição		
Frequência	5.2 GHz Família: 5.150 – 5.350 GHz 5.3 GHz Família: 5.250 – 5.350 GHz 5.4 GHz Família: 5.470 – 5.725 GHz 5.8 GHz Família: 5.725 – 5.850 GHz		
Modo de operação	TDD (<i>Time Division Duplex</i>)		
Largura de banda do canal	20, 40 (Modo Turbo) MHz		
Resolução da frequência central	10 MHz		
Antena ODU	21 dBi na banda dos 5.150-5.875 GHz. 10.5° horizontal x 10.5° vertical, polarização vertical, compatível com EN 302 085 V1.1.1 gama 1, Classe TS 1, 2, 3, 4, 5		
<i>Detached</i> 5 GHz Antenas	<ul style="list-style-type: none"> UNI-23-9: 23 dBi, 5.150-5.875 GHz, 9° horizontal x 9° vertical, polarização vertical, compatível com EN 302 085 V1.1.2 (2001-2002) UNI-28-4: 28 dBi, 5.150-5.875 GHz, 4.5o horizontal x 4.5o vertical, polarização vertical, compatível com EN 302 085 V1.1.2 (2001-2002). 		
Porta da antena (modelo D ODU)	Tipo N, 50 ohm		
Potência máxima de entrada (na porta da antena)	O valor típico é de -30 dBm		
Potência máxima de saída	21 dBm		
Sensibilidade típica (PER <10%, largura de banda de 20 MHz)	Nível de Modulação	Sensibilidade [dBm]	SNR Mínimo [dB]
	1	-89	6
	2	-88	7
	3	-86	9
	4	-84	11
	5	-81	14
	6	-77	18
	7	-73	22
	8	-71	23
Modulação	OFDM, 64 pontos FFT, BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM		

O teste foi realizado para cinco locais com distâncias diferentes, sendo que a BU está sempre localizada na FCS (Faculdade de Ciências da Saúde, que esta a uma altitude de 490 metros. A RB (*Remote Bridge*) esteve nos seguintes locais:

- Souto Alto – 488 m de altitude e fica a 5890 m da FCS;
- Parque de Campismo do Fundão – 550 m de altitude e fica a 14860 m da FCS;
- Casa do Guarda (Serra da Gardunha) – 912 m de altitude e fica a 17563 m da FCS;
- Posto de Vigia (Serra da Gardunha) – 1130 m de altitude e fica a 17922 m da FCS;
- Estação de feixes Hertzianos da Portugal Telecom (Serra da Gardunha) – 1212 m de altitude e fica a 20939 m da FCS.

À semelhança do que foi feito para o dimensionamento da ligação entre a FCS e o HSM, também aqui foi analisado o perfil do terreno para as cinco ligações, verificando-se que em todas elas existe linha de vista sem qualquer obstrução do elipsóide de Fresnel.

4.3.2 Resultados

Para avaliar as condições de tráfego foram instaladas duas directorias no computador utilizado como servidor, uma continha um ficheiro com 40MB e a outra continha 100 ficheiros de pequenas imagens, com um tamanho médio de 350 kB. O computador utilizado como cliente serviu para copiar o conteúdo das duas directorias que estão no servidor. Durante estas duas operações, foram obtidos valores para o ritmo de transmissão, relação portadora-ruído, ordem de modulação e o tempo total de transmissão, Tabela 4.3. Devido à falta de tempo para a realização do teste, uma vez que é recomendada, no mínimo, uma hora para cada ligação para o sistema poder estabilizar, foram tomados como referência os valores de pico (máximos) da transmissão. Quando se compara a relação portadora-ruído, C/N , calculada através da fórmula de Friis, com a curva de tendência obtida a partir dos resultados dos testes, verifica-se que os valores obtidos apresentam algumas diferenças, Figura 4.9. As curvas diferem aproximadamente em 10 dB para as distâncias mais baixas mas, esse valor tem tendência a diminuir à medida que a distância da ligação aumenta.

Tabela 4.3 - Resultados obtidos nos testes

Distância à FCS	Transferência (R_b) [kbps]		Site Survey		Tempo 40 MB
	40 MB	100 Ficheiros	C/N [dB]	Modulação	
5890 m (Souto Alto)	9 784	7 128	24 dB	8	46 s
14860 m (Parque de Camp. Fundão)	9 448	7 144	15 dB	6	47 s
17563 m (Casa do Guarda)	7 584	6 472	15 dB	6	49 s
17922 m (Posto de Vigia)	9 407	7 120	17 dB	6	47 s
20939 m (Antenas PT)	7 016	6 808	15 dB	6	49 s

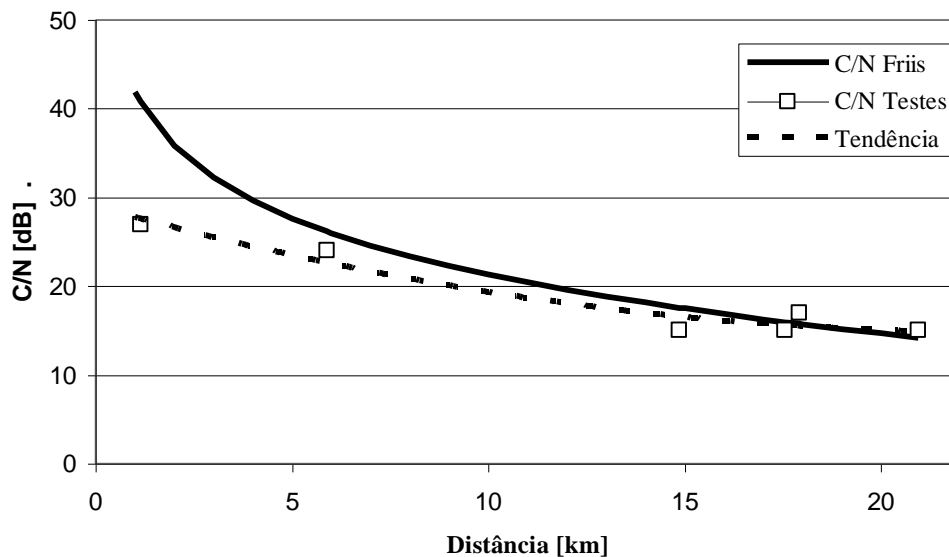


Figura 4.9 - Comparação entre o C/N teórico e C/N prático

Existem alguns factores para explicar as diferenças apresentadas, tais como o facto de a potência de emissão não manter um valor constante; embora o valor da potência não possa ser correctamente avaliado, pois o *interface* visual do equipamento não apresenta o seu valor, sabe-se apenas que atinge o valor máximo de -9 dBW (21dBm). Outra razão para esta diferença poderá ser a má orientação das antenas, uma vez que, estas têm uma largura de feixe reduzida, aproximadamente 9°.

4.3.3 Análise dos Resultados

Da análise dos resultados apresentados na Tabela 4.3, verifica-se que o ritmo de transmissão diminui com o aumento da distância entre as antenas. A exceção acontece na ligação entre a FCS e o Posto de Vigia onde o ritmo de transmissão e C/N são superiores às verificadas no ponto anterior, acontecimentos que atribuímos à possível existência de condições excepcionais de propagação como, por exemplo, o perfil do terreno nesta zona.

Os valores de C/N obtidos nos testes, quando comparados com os calculados teoricamente, apresentam uma pequena diferença, que pode ser explicada pelo facto de apenas se conhecer o valor máximo da potência e esta não ser constante, e de as antenas não terem sido fixadas de modo a assegurar o ritmo de transmissão.

Os resultados deste trabalho de campo levaram à instalação definitiva da ligação entre a FCS e o HAL, que tem demonstrado ser de uma elevada qualidade e robusta no que diz respeito à perda de pacotes, que é mínima, Figura 4.10. Finalmente, espera-se que seja brevemente instalada a ligação entre a FCS e o HSM na cidade de Guarda.



Figura 4.10 - Equipamento BreezeNet B na estação repetidora (Serra da Gardunha)

4.4 Sumário e Conclusões

Neste Capítulo apresentou-se o projecto de instalação de Feixes Pré-WiMAX para interligar a FCS-UBI aos hospitais Sousa Martins na Guarda e Amato Lusitano em Castelo Branco.

Apresentou-se o dimensionamento do feixe pré-WiMAX PTP com repetidores, tendo em consideração os valores mínimos de C/N e de C/N com desvanecimento. Apresentaram-se os testes para várias ligações PTP com equipamento pré-WiMAX na cidade da Covilhã e na região da Beira Interior, podendo-se extrair as seguintes conclusões:

- Para o projecto da ligação WiMAX FCS/UBI-HAL, foram realizados cálculos de forma a confirmar a ausência de obstrução da 1ª elipsóide de Fresnel;
- É necessário utilizar dois repetidores, de forma a garantir as condições de linha de vista;
- Assumiu-se a utilização do equipamento Alvarion BreezeNET B;
- Após o processo de dimensionamento, verificou-se que, para $\gamma = 2$, para a segunda cláusula, podem ser utilizados os três tipos de modulação;
- Os resultados do trabalho de campo foram comparados com o modelo teórico e conclui-se que existe uma elevada semelhança. As pequenas diferenças registadas podem ser explicadas pelo feixe de emissão reduzido das antenas e, portanto, a imperfeita orientação durante os testes.

Capítulo 5

Conceitos Fundamentais no Planejamento Celular e Propagação

Neste Capítulo apresenta-se os conceitos fundamentais no planejamento celular, como o conceito de reutilização de frequências e as interferências. Veremos que a interferência co-canal determina o desempenho da ligação, que, por sua vez, dita o padrão de reutilização de frequência e a capacidade global dos sistemas. Serão apresentados duas técnicas para melhorar a cobertura e a capacidade do sistema, a divisão de células e a sectorização, esta última será muito importante como veremos nos Capítulos mais adiante. Por fim, são apresentados os modelos de propagação de Friis modificada e o modelo de propagação SUI adoptado pelo grupo de trabalho do IEEE para sistemas de acesso fixo sem fios para as bandas de frequência abaixo de 11 GHz.

5.1 Introdução

O dimensionamento de uma rede WiMAX é de tal forma complexo que poderá envolver a maioria das áreas relacionadas com as telecomunicações, tal como o dimensionamento de sistemas de radiotelefonia e propagação, a regulamentação e o planeamento de frequências, a modulação, o dimensionamento das antenas, os planos de transmissão, o dimensionamento das centrais de comutação, *software*, etc.

Ao processo de escolha das normas, determinação das dimensões das células, escolha das posições das estações base e a atribuição de frequências às células chama-se planeamento celular. Os critérios utilizados no planeamento celular envolvem a garantia de um determinado desempenho do sistema.

5.2 Conceito de Reutilização de Frequências

A cada estação base é atribuído um grupo de canais de rádio para serem utilizados dentro de uma pequena região geográfica chamada célula. As estações base de células adjacentes são atribuídos grupos de canais que contém canais completamente diferentes daqueles das células vizinhas. As antenas das estações base são projectadas para permitir a cobertura desejada dentro de uma célula em particular [Yaco02].

Limitando a cobertura à área abrangida pela célula, pode-se utilizar o mesmo número de canais para cobrir diferentes células, que são separadas umas das outras por grandes distâncias, o suficiente para manter níveis toleráveis de interferência.

A Figura 5.1 apresenta o conceito de reutilização de frequências, onde as células marcadas com o mesmo número utilizam o mesmo grupo de canais.

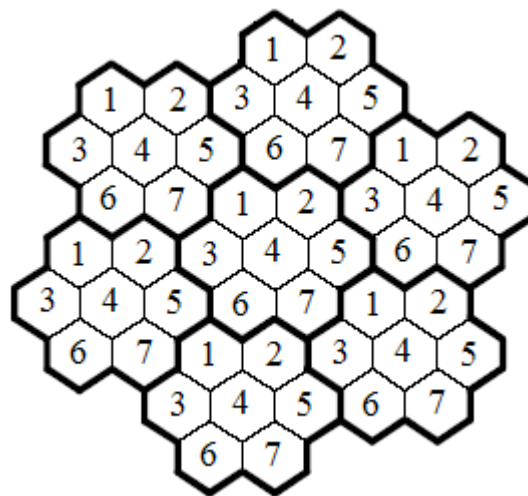


Figura 5.1 - Conceito de reutilização de frequências

O plano de reutilização de frequências é sobreposto a um mapa para indicar onde os diferentes canais de frequências serão utilizados.

A forma hexagonal utilizada para as células, Figura 5.1, é conceptual, sendo um modelo simplificado da cobertura para cada estação base [Rapp02]. A forma hexagonal tem sido universalmente adoptada porque facilita a análise do sistema celular. A cobertura real de uma célula é conhecida através de cartas geográficas e é determinada a partir de medidas de campo ou modelos de propagação.

Embora pareça natural a escolha de um círculo para representar a área de cobertura de uma estação base, este formato geométrico não é utilizado para a área de cobertura de uma célula porque círculos adjacentes não podem ser justapostos sem deixar espaços ou criar regiões sobrepostas. Quando se consideram os formatos geométricos que podem cobrir uma região sem deixar falhas ou sobreposições, as três melhores escolhas para o padrão de uma célula recaem no quadrado, no triângulo equilátero e no hexágono. Para este trabalho vamos adoptar a forma hexagonal devido ao facto de que uma célula precisa de ser projectada para servir aos utilizadores móveis mais fracos numa área geográfica, e estes estão localizados tipicamente na extremidade de uma célula.

A utilização da geometria hexagonal permite também a utilização do menor número possível de células para cobrir uma determinada região geográfica onde se deseja fazer o planeamento de uma rede.

Para além disso, o hexágono aproxima da forma mais adequada do padrão de irradiação circular que ocorreria para uma antena omnidireccional de uma estação base em condição de propagação em espaço livre. É importante salientar que a forma hexagonal aproxima a área de cobertura de uma estação base.

A área do hexágono é dada pela seguinte expressão.

$$A_H = \frac{3\sqrt{3}R^2}{2} = 2.5981R^2, \quad (5.1)$$

onde R é o raio da célula.

À distância mínima entre células que permite a reutilização da mesma frequência chama-se distância de reutilização. Um dado canal, utilizando por exemplo a frequência f_1 numa dada zona, para fazer uma chamada na célula C_0 (com um raio de cobertura R), poderá ser reutilizado noutra célula C_1 , por exemplo, Figura 5.2 [Vele95].

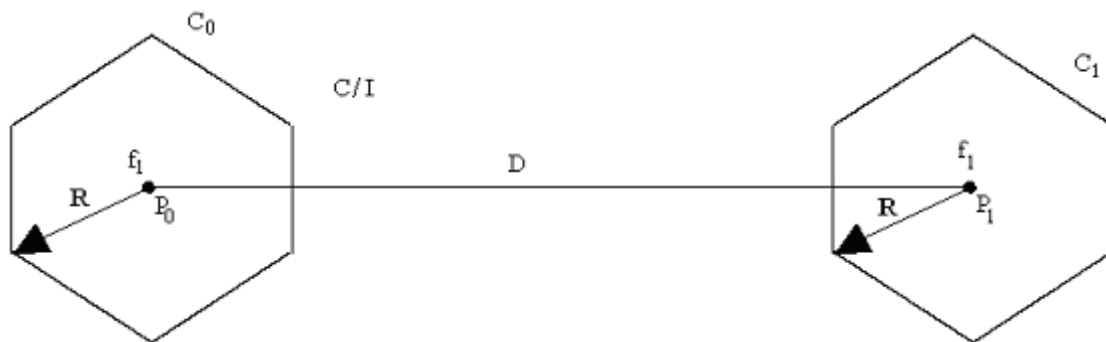


Figura 5.2 - Grandezas envolvidas na reutilização de frequências

5.3 Interferência e Capacidade do Sistema

A interferência é o principal factor limitativo do desempenho de sistemas de comunicações rádio celulares, uma vez que o ruído pode ser compensado mediante o aumento da potência do sinal para melhorar a relação portadora-ruído à entrada do receptor. No entanto na presença de interferências, a qualidade não pode ser melhorada aumentando a potência, já que pode conduzir a um agravamento da interferência. As fontes de interferência incluem: outras estações base a operarem na mesma banda de frequência, ou mesmo qualquer outro sistema no qual frequências próximas à frequência celular se espalhem para a banda de frequência celular.

A interferência é mais severa em áreas urbanas, devido à maior presença de ruído e ao grande número de estações base e estações subscritoras existentes. Os dois maiores tipos de interferência gerados pelo próprio sistema celular são: a interferência co-canal e a interferência por canal adjacente. Embora sinais interferentes sejam frequentemente gerados dentro do próprio sistema, são difíceis de serem controlados (devido aos efeitos aleatórios de propagação).

5.3.1 Interferência Co-canal

A reutilização de frequências implica que, numa dada área de cobertura, haja várias células a utilizar o mesmo conjunto de frequências. Estas células são chamadas células co-canal e a interferência entre os sinais associados a estas células é chamada interferência co-canal.

De forma diferente da que acontece quando se trata do ruído térmico (cujos efeitos podem ser atenuados aumentando a relação portadora-ruído), a interferência co-canal não pode ser atenuada simplesmente aumentando a potência da portadora de um emissor,

já que em sistemas celulares um aumento na potência de emissão da portadora implicará em interferência com células co-canais vizinhas.

Para reduzir a interferência co-canal, as células co-canal devem estar, fisicamente separadas por uma distância mínima, de forma que seja garantido uma separação adequada entre elas.

O cálculo da interferência é feito através da determinação da relação entre a portadora desejado e os sinais interferentes, C/I .

Para um dado sistema celular, quando o tamanho de cada célula é aproximadamente o mesmo e as estações base transmitem com a mesma potência, o factor de reutilização co-canal), r_{cc} , é independente da potência de emissão e torna-se uma função do raio da célula, R e da distância entre centros das células co-canais mais próximas, D .

Aumentando a razão D/R , a separação espacial entre células co-canais relativa à distância de cobertura de uma célula é aumentada, permitindo a redução da interferência co-canal. Para sistemas que utilizam o padrão hexagonal, o factor de reutilização co-canal, r_{cc} , é dado por

$$r_{cc} = \frac{D}{R} = \sqrt{3k}, \quad (5.2)$$

onde k é o padrão de reutilização, o número inteiro de conjuntos distintos de canais atribuídos a células contíguas, Figura 5.3.

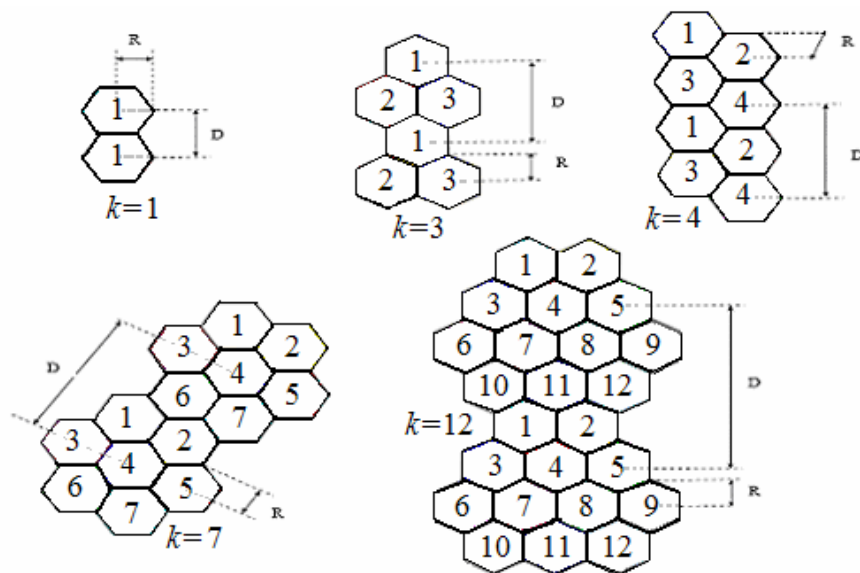


Figura 5.3 - Factor de redução de interferência co-canal para padrões de reutilização com k células ($k = 1, 3, 4, 7$ e 12)

A Tabela 5.1 apresenta os valores do factor de reutilização co-canal, rcc , para as várias configurações celulares.

Tabela 5.1 - Valores de q , para as várias configurações celulares

k	$rcc=D/R$
1	1.73
3	3.00
4	3.46
7	4.58
12	6.00

Os padrões de reutilização $k = 7$ e 12 são dos mais utilizados em sistemas celulares. Um pequeno valor para rcc implica uma maior capacidade para o sistema. Por outro lado, quanto maior for o factor de reutilização co-canal rcc , melhor será a qualidade da transmissão, devido a um menor nível de interferência co-canal. Como $rcc=D/R$, um valor elevado para rcc decorre de uma maior razão entre a distância entre células co-canais, D , e o raio das células, R , o que possibilita um menor nível de interferência co-canal para o sistema.

5.3.2 Interferência de Canal Adjacente

A interferência de canal adjacente resulta de sinais de frequências adjacentes à frequência da portadora que está a ser utilizada para efeitos de comunicação. Como principal fonte deste tipo de interferência têm-se as transmissões que utilizam portadoras de frequências adjacentes. Normalmente evita-se este tipo de interferência através de um planeamento de frequências que evite a utilização de canais adjacentes na mesma célula. Também uma filtragem mais selectiva permite reduzir este tipo de interferência. Assim há que garantir simultaneamente:

- Separar adequadamente os diferentes canais;
- Filtrar de forma mais selectiva;
- Evitar atribuição de canais contíguos na mesma célula;
- Maximizar a separação dos canais numa célula, utilizando para esse efeito os N sub-canais em que se divide o espectro disponível;
- Evitar se possível a atribuição de canais adjacentes em células adjacentes.

5.4 Relação Portadora-Interferência

A relação portadora-interferência é um parâmetro essencial no dimensionamento de uma rede móvel sem fios, porque permite estabelecer a ligação entre nível de interferência co-canal, tamanho do conjunto de células e quociente de reutilização co-canal.

Dado o número total de canais no sistema, é possível relacionar a eficiência espectral geográfica com a relação portadora-interferência através do valor de k .

Quanto maior for a relação C/I (menor interferência) maior será o factor de reutilização co-canal r_{cc} , originando-se padrões celulares com uma malha mais larga. Quanto maior for o padrão de reutilização, menor o número de canais por célula, o que se reflecte numa menor capacidade de suporte de tráfego [MaSa05].

Dado k_i células co-canal interferentes, a relação portadora-interferência C/I na estação base devido aos móveis será dada por

$$\frac{C}{I} = \frac{C}{\sum_{k=1}^{k_i} I_k} \quad (5.3)$$

Na Expressão (5.3), o parâmetro k_i expressa o número de células que ocasionam interferência co-canal em por exemplo um receptor móvel que esta a monitorizar um canal no sentido ascendente, DL. (interferência que as estações base vizinhas ocasionam numa estação móvel que se comunica na mesma frequência com a estação base da sua célula), o parâmetro C é a potência da portadora desejada e I_k é a potência de interferência causada pelo co-canal interferente [Yaco02].

As medidas de propagação num canal rádio móvel mostram que a intensidade média do sinal recebido em qualquer ponto decresce de acordo com a distância de separação entre o emissor e o receptor. A potência média recebida P_r a uma distância d a partir da antena emissora é aproximada por

$$P_r = P_0 \left(\frac{d_0}{d} \right)^{-\gamma} = P_0 \left(\frac{d}{d_0} \right)^{\gamma}, \quad (5.4)$$

ou

$$P_{r[\text{dBm}]} = P_{0[\text{dBm}]} - 10\gamma \cdot \log \left(\frac{d}{d_0} \right), \quad (5.5)$$

onde, P_0 é a potência recebida num ponto de referência a uma pequena distância d_0 da antena emissora situado na sua região de campo distante ($d_0 > 10\lambda$) e γ é o expoente de propagação. Para o espaço livre $\gamma = 2$.

Se considerarmos uma estação móvel que monitoriza uma ligação directa da estação base que lhe está a possibilitar a comunicação. O sinal desejado é, então, o sinal da estação base em serviço e a interferência sofrida é devida a estações base co-canal. Se D_k é a distância da k -ésima interferência, medida a partir da estação móvel, a potência recebida pela estação móvel, devida à k -ésima célula interferente será proporcional a $(D_k)^{-\gamma}$ [Yaco02]. O expoente de propagação tipicamente varia entre dois e quatro, em sistemas celulares urbanos. Ainda, a partir da Expressão (5.4) pode-se escrever que

$$P_r d^\gamma = P_o d_o^\gamma. \quad (5.6)$$

Assim, para cada célula interferente, com relação à célula interferida pode-se escrever que

$$C d^\gamma = I_k D_k^\gamma, \quad (5.7)$$

onde C é a potência recebida pelo móvel a uma distância d a partir da antena emissora desejada, I_k é a potência recebida a uma distância D_k do móvel ao k -ésimo emissor interferente e γ é o expoente de propagação do sinal com a distância.

Na Expressão (5.7) a distância d , pode ser aproximada pelo raio R , porque o pior caso teórico para recepção do sinal desejado é aquela em que o móvel se encontra no extremo da célula. A distância D_k pode ser aproximada pela distância co-canal, D , se considerarmos todas as estações base interferentes equidistantes da estação base desejada, o que é uma aproximação que também considera um caso pior do que o real para um utilizador posicionado no extremo da célula, como pode ser observado na Figura 5.4 (muitas distâncias D_k serão maiores do que D). Assim, a Expressão (5.7) pode ser reescrita como

$$C R^\gamma = I_k D^\gamma, \quad (5.8)$$

e, se a potência dos emissores de todas as estações base interferentes são iguais e o expoente de propagação é o mesmo em toda a área de cobertura, a relação C/I para o utilizador móvel pode ser aproximada por

$$\frac{C}{I} = \frac{q^\gamma}{k_i} \quad (5.9)$$

Observe-se que na Expressão (5.9), quanto mais urbanizada for a região (conduz a maiores valores para o coeficiente de atenuação com a distância, valores maiores para γ), maior será a relação C/I . Ou seja, as regiões densamente urbanizadas contribuem para o isolamento do sinal entre as células co-canal [Rapp02].

A Expressão (5.9) considera apenas a interferência sofrida pelo primeiro anel de células interferentes. Embora as células do primeiro anel sejam as que mais contribuem para a interferência, se é desejado um cálculo de C/I mais fiável a uma situação real, as contribuições dos outros anéis devem ser calculados [Yaco02]. Para determinar a C/I para qualquer número desejado de anéis interferentes, utiliza-se a seguinte expressão

$$\frac{C}{I} = \frac{rcc^\gamma}{6} \frac{1}{\sum_{z=1}^Z z^{1-\gamma}}, \quad (5.10)$$

onde Z é o número de anéis interferentes considerados.

A Expressão (5.9) pode ser escrita em função do k

$$\frac{C}{I} = \frac{(D/R)^\gamma}{k_i} = \frac{(\sqrt{3k})^\gamma}{k_i} \quad (5.11)$$

A Expressão (5.11) é baseada na geometria celular hexagonal e para $k = 7$, onde todas as células interferentes estão equidistantes a partir da estação subscritora, o que de facto não ocorre, em muitos casos. Para alguns planos de reutilização de frequência as células interferentes mais próximas possuem distâncias variadas com relação à célula desejada. Quando o utilizador móvel está no limite da célula ele é submetido ao pior caso de interferência co-canal no canal descendente. Utilizando o diagrama de geometria de célula apresentado na Figura 5.4 pode ser simulado o pior caso de interferência co-canal, para $k = 7$ células.

Com a unidade móvel no limite externo da célula, o utilizador móvel está a uma distância $D - R$ das duas células interferentes co-canais mais próximas e a exactamente, $D + \frac{R}{2}$, D , $D - \frac{R}{2}$ e $D + R$ das outras células interferentes, localizadas no primeiro anel.

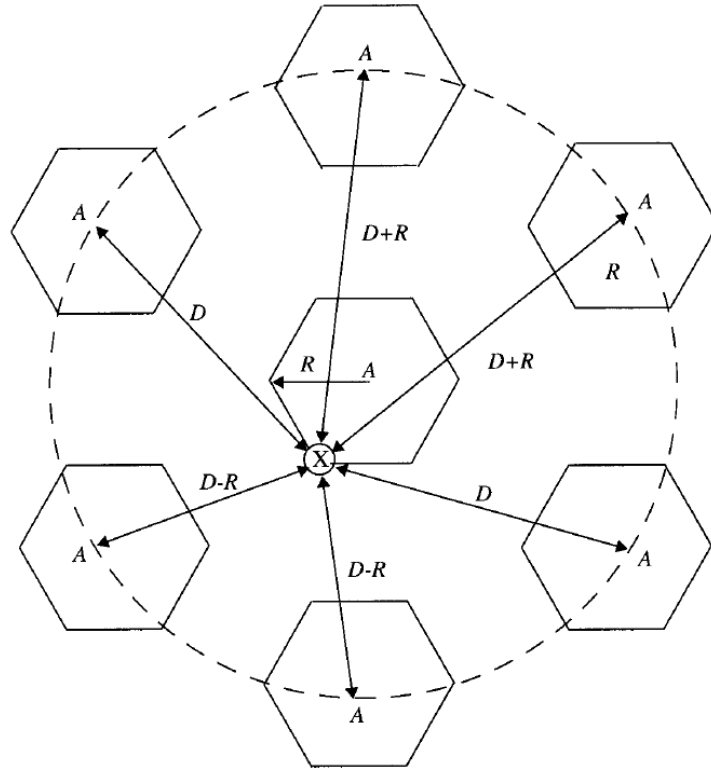


Figura 5.4 - Interferência co-canal (pior caso), extraído de [Yaco02]

A partir da geometria apresentada na Figura 5.4, e das Expressões (5.3) e (5.9), a relação portadora-interferência para o pior caso pode ser aproximada por

$$\frac{C}{I} = \frac{R^{-\gamma}}{2(D-R)^{-\gamma} + 2(D+R)^{-\gamma} + 2D^{-\gamma}}, \quad (5.12)$$

A Expressão (5.12) pode ser reescrita em termos do factor de redução da interferência co-canal, q , conforme

$$\frac{C}{I} = \frac{1}{2(rcc-1)^{-\gamma} + 2(rcc+1)^{-\gamma} + 2rcc^{-\gamma}}. \quad (5.13)$$

Para, $k=7$ o rcc é igual a 4.6, e a C/I pode ser obtida a partir da (5.13) para o pior caso, resultando em aproximadamente 49.56, ou 17dB.

Como por exemplo, para um sistema celular AMPS americano, a qualidade de voz adequada é fornecida quando a relação C/I é maior ou igual a 18 dB, para projectar um sistema celular com desempenho adequado na condição equivalente ao pior caso, o modelo de conjunto de células considerado não poderá ser adoptado. Seria necessário aumentar o k para o próximo tamanho imediatamente superior, no caso $k = 12$ [Rapp02].

Este procedimento conduz a uma significativa diminuição na capacidade do sistema, porque a reutilização de 12 células oferece uma utilização espectral de 1/12 em cada célula, enquanto que a reutilização de 7 células oferece uma utilização de espectro de 1/7. Na prática, a redução da capacidade do sistema (aumento de 7 para 12 células no *cluster*) visa a acomodar a situação de pior caso (a qual raramente ocorre) muitas vezes não é utilizada [Yaco02].

A partir da discussão feita, conclui-se que a interferência co-canal determina o desempenho da ligação, que, por sua vez, dita o padrão de reutilização de frequência e a capacidade global dos sistemas celulares.

5.5 Técnicas para Melhorar a Cobertura e a Capacidade do Sistema

À medida que a procura por serviços sem fios aumenta, o número de canais atribuídos a uma célula eventualmente se torna insuficiente para suportar o número de utilizadores exigidos. A solução para este problema consiste em fornecer mais canais por área de cobertura. As técnicas denominadas divisão de células (*cell splitting*) e setorização (*sectoring*) são utilizadas na prática para expandir a capacidade dos sistemas celulares.

5.5.1 Divisão de Células

A técnica de divisão de células consiste em subdividir uma célula congestionada em células menores, cada uma com a sua própria estação base e uma conseqüente redução na potência de emissão.

Esta técnica aumenta a capacidade de um sistema celular, através do aumento do número de vezes que os canais são reutilizados.

Definindo novas células de raio menor do que o raio das células originais e instalando estas células menores (chamadas micro células) entre as células existentes, a capacidade do sistema é aumentada devido ao número adicional de canais por área de cobertura. A Figura 5.5, apresenta o conceito de divisão de células.

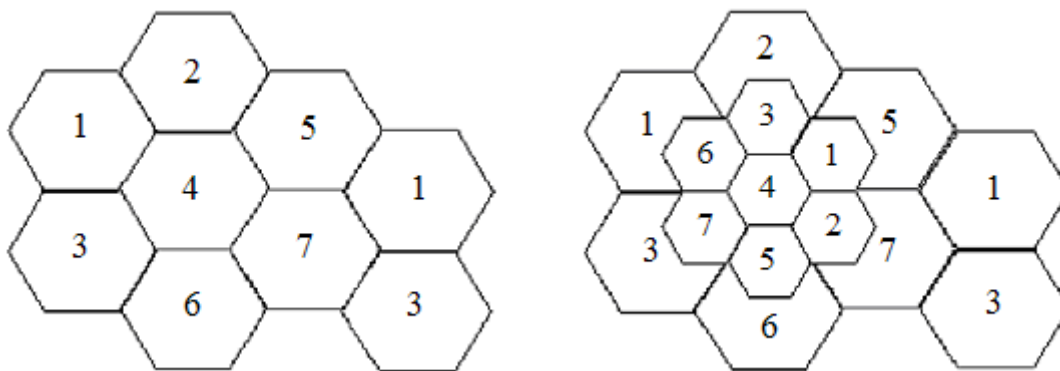


Figura 5.5 - Conceito de divisão de células

O conceito de divisão de células, se bem aplicado, permite a um sistema crescer através da substituição de grandes células por células menores, sem atrapalhar o esquema de atribuição de canais necessários para manter o *rcc* mínimo entre as células co-canais.

Uma desvantagem decorrente do processo de divisão de células é o aumento do número de estações base, factor que implica em aumento de custo para o sistema [Yaco02].

Uma redução do raio da célula por um factor x aumenta o número de BSs por um factor x^2 . Ou seja, se uma célula hexagonal for reduzida, de tal forma que o seu raio seja a metade do raio da célula original ($r = R/2$, factor $x = 2$) será necessário utilizar 4 vezes ($x^2 = 4$) mais células para cobrir a mesma área de serviço, gerando a necessidade de 4 vezes mais BSs.

Para ilustrar esta afirmação considere um hexágono de raio R . A área coberta por tal hexágono é 4 vezes maior do que a área coberta por um hexágono hipotético de raio $r = R/2$, já que a área da célula original é dada por (5.1) a nova célula será dada por

$$A_{\text{nova célula}} = \frac{3\sqrt{3}(R/2)^2}{2} = \frac{3\sqrt{3}R^2}{8}. \quad (5.14)$$

5.5.2 Sectorização

A técnica de divisão de células possibilita uma melhoria na capacidade do sistema através de uma mudança de escala no tamanho das células. A introdução de novas células de menor tamanho resulta no aumento do número de canais para uma mesma área de cobertura, através da diminuição do raio da célula, R e da manutenção do *rcc*.

Uma outra forma de aumentar a capacidade do sistema, no entanto, é manter o raio da célula inalterado e procurar métodos que possibilitem a diminuição do *rcc*.

O processo de sectorização possibilita aumentar o C/I , de tal forma que o tamanho do conjunto de células possa ser reduzido. Por meio da técnica de sectorização, o C/I é aumentado através da utilização de antenas direccionais e a melhoria da capacidade do sistema é obtida através da redução do número de células no conjunto de células, processo que permite o aumento da reutilização de frequências.

Entretanto, para que esta operação obtenha sucesso, é necessário reduzir a interferência relativa sem diminuir a potência de emissão.

A interferência co-canal num sistema celular pode ser diminuída substituindo uma única antena omnidireccional na estação base por várias antenas direccionais, cada uma delas irradiando dentro de um sector específico.

A técnica utilizada para diminuir a interferência co-canal e, conseqüentemente, aumentar o desempenho do sistema através da utilização de antenas direccionais é chamada de sectorização.

Diferentes factores de sectorização podem ser utilizados, resultando em diferentes reduções de interferência co-canal. Uma célula é normalmente repartida em 3 sectores de 120° ou em 6 sectores de 60° , conforme apresentado nas Figuras 5.6 (a) e 5.6 (b).

Quando é utilizada a técnica de sectorização, os canais utilizados numa célula particular são "partidos" em grupos sectorizados e são utilizados somente dentro de um sector particular, Figuras 5.6 (a) e 5.6 (b).

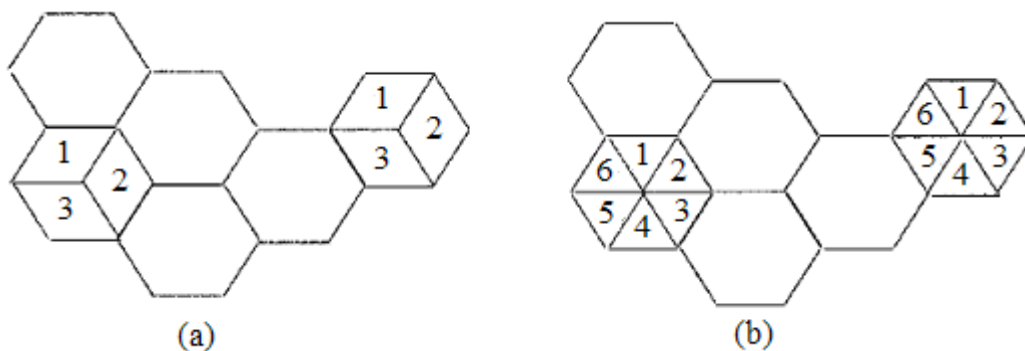


Figura 5.6 - Técnica de sectorização para (a) sectores de 120° e (b) sectores de 60°

Assumindo um padrão de reutilização de 7 células, para o caso de sectores de 120° , o número de canais interferentes no primeiro anel é reduzido de 6 para 2 [Yaco02]. Isto é devido ao facto de que apenas 2 das 6 células co-canal poderão receber interferência de um grupo particular de canais sectorizados, considerando-se que a distribuição de canais seja idêntica entre os sectores de todas as células, pela geometria criada pela sectorização, Figura 5.7.

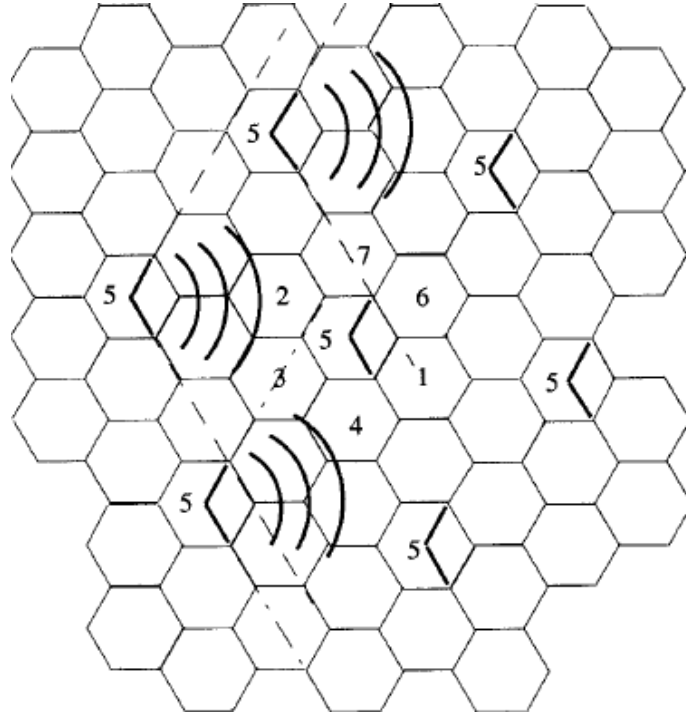


Figura 5.7 - Determinação da relação C/I com sectorização, no pior caso ($k=7$) com sectores de 120° , extraído de [Yaco02]

Observe que na Figura 5.7 a interferência sofrida por um utilizador móvel localizado no sector mais à direita na célula central de número 5. Existem 3 sectores de células co-canal de número 5 à direita da célula central e 3 à esquerda da célula central.

Destas 6 células co-canal, apenas duas têm antenas com padrões de irradiação que irradiam para dentro da célula central e, então, um utilizador móvel na célula central irá sofrer interferência de apenas estes dois sectores.

A relação portadora-interferência, C/I resultante para este caso pode ser determinada por

$$\frac{C}{I} = \frac{1}{\sum_{k=1}^{k_i=2} \left(\frac{R}{D}\right)^\gamma} = \frac{1}{\sum_{k=1}^{k_i=2} \left(\frac{D}{R}\right)^{-\gamma}} = \frac{1}{2rcc^{-\gamma}} = \frac{rcc^\gamma}{2}. \quad (5.15)$$

Para o caso em que uma célula é dividida em 6 sectores de 60° , a relação portadora-interferência é dada por

$$\frac{C}{I} = \frac{1}{\sum_{k=1}^{k_i=1} \left(\frac{R}{D}\right)^\gamma} = \frac{1}{\sum_{k=1}^{k_i=1} \left(\frac{D}{R}\right)^{-\gamma}} = \frac{1}{rcc^{-\gamma}} = rcc^\gamma. \quad (5.16)$$

As expressões (5.15) e (5.16) mostram que através da utilização de sectores com antenas direccionais melhora-se a relação C/I relativamente a (5.13), isto é, a sectorização permite reduzir o impacto da interferência co-canal.

5.6 Conceito de Reutilização de Frequências no WiMAX Móvel

O padrão de reutilização tradicional envolvido no planeamento celular convencional considera padrões de reutilização de frequência, k elevados, por exemplo, $k = 7$, para atenuar a interferência co-canal. Estes esquemas garantem uma separação espacial mínima de 5:1 entre o sinal interferente e o sinal desejado mas requer sete vezes mais espectro. Nas tecnologias como o WCDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*), introduzida com a 3G, e o OFDMA, introduzido com o WiMAX, podem utilizar padrões de reutilização mais agressivos para melhorar a eficiência espectral global.

E portanto, é importante apresentar duas configurações de reutilização de frequências comuns para um planeamento multi-celular com estação base de 3 sectores. São elas um sector com padrão de reutilização igual a 3, isto é $(c, 3, 3)$, e um sector de padrão de reutilização igual a 1, $(c, 1, 3)$ também referenciado como o padrão de reutilização de frequência universal [Wima06b], onde $((c, n, s)$ é a nomenclatura utilizada para descrever o padrão de reutilização de frequências em muitos livros e artigos de referência, sendo c o número de estações base locais no *cluster*, n é o número de canais de frequência única necessária e s é o número de sectores por estação base). Com um padrão de reutilização de frequência igual a 1, utiliza-se o mesmo canal em cada um dos três sectores da estação base, Figura 5.8.

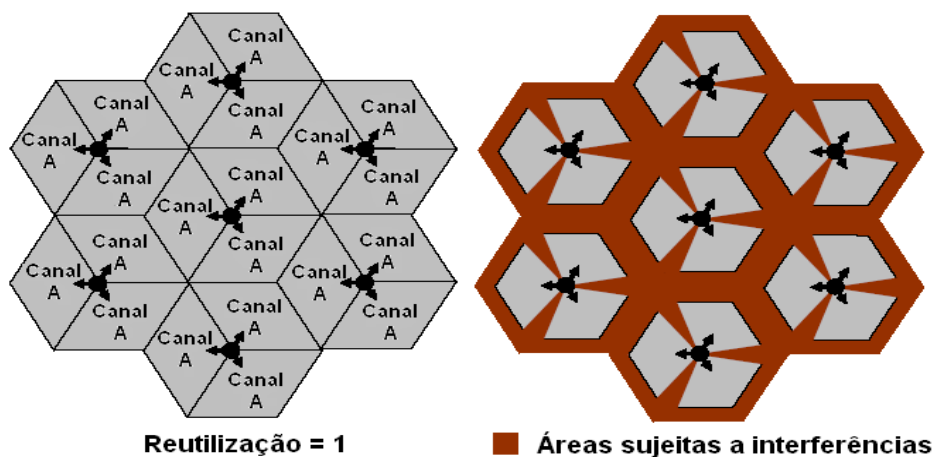


Figura 5.8 - Padrão de reutilização de frequência igual a 1 com 3 sectores por estação base [Wima06b]

Esta abordagem tem a vantagem de utilizar o mínimo de espectro possível e em muitos casos, pode representar a única alternativa de planeamento de reutilização devido à disponibilidade limitada do espectro. Com o padrão de reutilização igual a 1, é utilizado um plano de permutação de sub-portadora pseudo-aleatório juntamente com uma segmentação do canal para atenuar interferência co-canal nos limites do sector e das células.

Como resultado, sacrifica-se alguma capacidade do canal descendente desde que algumas sub-portadoras não sejam completamente utilizadas por toda célula. Contudo, a eficiência espectral no sentido descendente, DL para o WiMAX com o padrão de reutilização universal ainda é bastante elevado e geralmente prefere-se o padrão de reutilização igual a 3.

Com o padrão de reutilização igual a 3, para cada sector, é atribuído um único canal, Figura 5.9. Assim, assumindo a mesma largura de banda do canal, uma configuração da estação base de três sectores requerem três vezes mais espectro quando comparado com o padrão de reutilização igual a 1. O padrão de reutilização igual a 3 elimina a interferência co-canal nos limites do sector e diminui significativamente a interferência co-canal entre as células vizinhas devido ao aumento da separação espacial para canais operando na mesma frequência desde que os limites dos sectores da célula estejam devidamente alinhados.

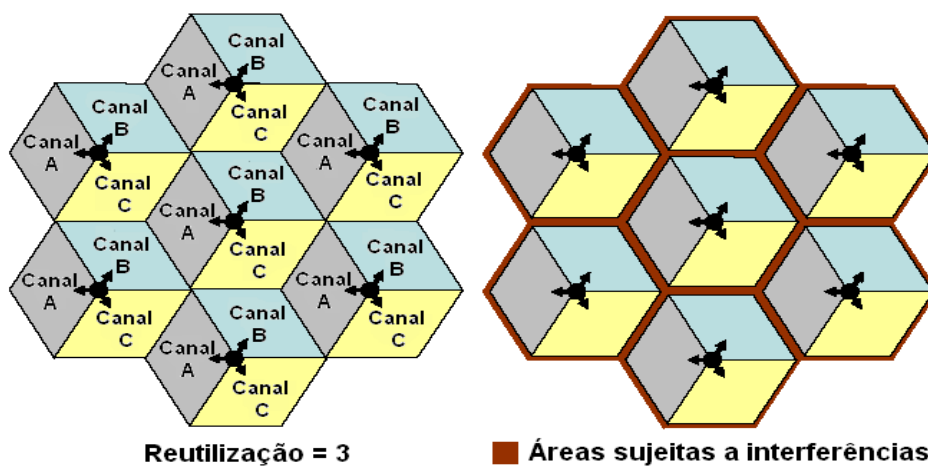


Figura 5.9 - Padrão de reutilização de frequências igual a 3 com 3 sectores por estação base [Wima06b]

A interferência de canal adjacente nos limites do sector é controlada pela natureza ortogonal das sub-portadoras inerentes com OFDMA. Um padrão de reutilização igual a

3 permite uma óptima utilização de todas as sub-portadoras, melhorando assim a eficiência espectral de cada canal, porém requerem três vezes mais espectro.

Embora as melhorias na eficiência espectral do canal com o padrão de reutilização igual a 3 possam ser significativas, a eficiência espectral global será sempre mais baixa tendo em conta as necessidades adicionadas ao espectro.

Para além disso, em alguns mercados pode também haver um investimento de capital adicionado associado à aquisição do espectro adicional, visto que o custo eficaz e a eficiência espectral global farão quase sempre o padrão de reutilização igual a 1, à abordagem de planeamento preferida no WiMAX [Wima06c].

5.7 Reutilização de Frequência Fraccionária

Como vimos anteriormente, o WiMAX móvel suporta o padrão de reutilização de frequência igual a 1, isto é, todas as células/sectores operam no mesmo canal de frequência para maximizar a eficiência espectral. Porém, devido à forte interferência co-canal no padrão de reutilização de frequência igual a 1, os utilizadores na fronteira da célula podem sofrer degradação na qualidade da ligação, Figura 5.10 [Nuay07].

Com o WiMAX móvel, os utilizadores operam em sub-canais que só ocupam uma pequena fracção da largura da banda do canal total, o problema da interferência no limite da célula pode ser facilmente resolvida pela configuração apropriada do sub-canal em utilização sem recurso ao planeamento de frequência tradicional. A reutilização flexível do sub-canal é facilitada através da segmentação do sub-canal e zona de permuta. Um segmento é uma subdivisão do OFDMA disponível nos sub-canais (um segmento pode incluir todos os sub-canais). Um segmento é utilizado para disponibilizar um único exemplo do MAC.

A zona de permuta é um número de símbolos de OFDMA próximos no DL ou no UL que utilizam a mesma permuta. A sub-trama DL ou UL podem conter mais de uma zona de permuta.

O padrão de reutilização do sub-canal pode ser configurado para que os utilizadores próximos da estação base operem na zona com todos os sub-canais disponíveis, enquanto que, para os utilizadores na fronteira, cada célula ou sector operam na zona com uma pequena fracção de todos os sub-canais disponíveis. Na Figura 5.10, F_1 , F_2 , e F_3 representam conjuntos diferentes de sub-canais no mesmo canal de frequência.

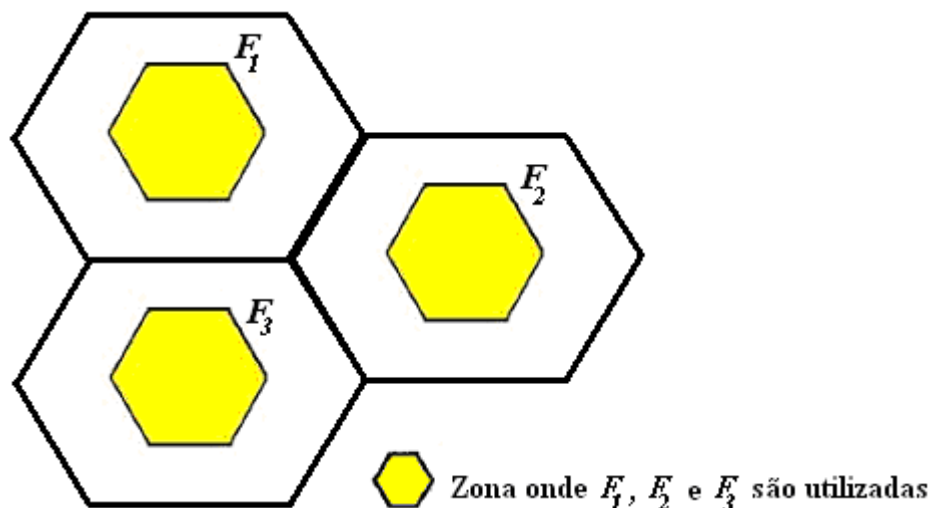


Figura 5.10 - Exemplo de frequências de operação para cada zona geográfica num esquema de reutilização de frequência fraccionária [Nuay07]

Com esta configuração, mantém-se uma reutilização de frequência completamente carregada para utilizadores no centro, para maximizar a eficiência espectral. A reutilização da frequência fraccionária é implementada para que os utilizadores na fronteira tenham qualidade na ligação de utilizador-extremidade e débito binário.

O planeamento da reutilização de sub-canais pode ser optimizado dinamicamente e automaticamente através de sectores ou células, em função da carga da rede e condições de interferência. Todas as células e sectores podem então operar no mesmo canal de frequência sem a necessidade de um planeamento de frequência tradicional.

5.8 Aspectos de Propagação

5.8.1 Modelos de Propagação

Qualquer dimensionamento de sistemas de comunicações sem fios depende, primeiramente, da adequada escolha do modelo de propagação. Basicamente, as três grandes categorias dos modelos são: empíricos, semi-empíricos e teóricos.

Modelos empíricos: são gerados com base no resultado de campanhas de medidas realizadas em determinados tipos de ambientes e para bandas específicas de valores de parâmetros (alturas de antenas, frequências, etc.). Costumam apresentar relativa facilidade e rapidez de cálculos, porém geram melhores resultados quanto mais se aproxima a região de projecto da região de medições para obtenção do modelo.

Modelos semi-empíricos: são gerados também com base em medidas de campo, porém as suas equações guardam relação com modelos canônicos de propagação, obtidos a partir da teoria. Como exemplo, há modelos semi-empíricos baseados na atenuação de espaço livre, em que a dependência com a frequência e distância é da mesma forma, porém a constante aditiva é diferente, obtida por campanha de medições em determinadas gamas de parâmetros.

Modelos teóricos: são criados com base em fundamentos puramente teóricos. Muito são utilizados no cálculo de ligações ponto-a-ponto, incluindo atenuação no espaço livre e formas de se considerar os efeitos de difracção e reflexão no terreno.

Uma classe relevante destes modelos, são os modelos de traçado de raios. Em linhas gerais, utilizam técnicas de traçado de raios (*ray tracing*) para mapear a propagação das ondas electromagnéticas no ambiente. O raio directo, as reflexões, as transmissões e as difracções são calculados pela utilização de algum tratamento dado às equações exactas de campo, sendo muito comum a utilização das aproximações assimptóticas da UTD (*Uniform Theory of Diffraction*). Costumam ser muito melhores quanto melhor for a descrição geométrica e eléctrica do ambiente, bem como a utilização de robustas técnicas de aceleração de traçado de raios. Os modelos teóricos também são conhecidos por modelos físicos. Os modelos empíricos, quando comparados a um bom modelo teórico, e considerando um ambiente muito bem descrito, os modelos empíricos tendem a fornecer resultados de menor precisão que os de traçado de raios, os modelos empíricos são muito populares por permitirem estimativas relativamente rápidas da propagação no ambiente, o que, na maioria das vezes, é suficiente para o projecto nominal do sistema.

Para os sistemas tradicionais PTP, e até mesmo PMP, com antenas externas com linha de vista ou com difracção bem determinada (que possa ser calculada com rigor), não há motivo para se partir para modelos empíricos, uma vez que os modelos físicos (teóricos) são os mais apropriados e de cálculo relativamente rápido. Fornecem resultados precisos e utilizam-se das informações do terreno presentes na base de dados digital. Em alguns casos, quando for viável e a riqueza da informação digital permitir, os modelos físicos de traçado de raios também podem ser utilizados, dando ainda mais sofisticação ao resultado do dimensionamento.

Entretanto, com o crescente aumento de interesse por sistemas fixos de banda larga em regiões densamente urbanizadas, com clientes residenciais e em escritórios, cresce o interesse por modelos empíricos que não dependam de descrições detalhadas dos

ambientes de propagação e que forneçam resultados rápidos, para uma estimativa do dimensionamento da rede.

5.8.2 Fórmula de Friis Modificada

O modelo de propagação mais simples, válido em condições de propagação em espaço livre, é dado pela fórmula de Friis [Vele95]

$$1/L = \frac{P_r}{P_e G_e G_r} = \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2, \quad (5.17)$$

onde L é a atenuação, P_r é a potência recebida, P_e é a potência de emissão, G_e é o ganho da antena de emissão, G_r é o ganho da antena de recepção, λ é o comprimento de onda e d é a distância.

Numa situação real, para além da atenuação em espaço livre, é necessário considerar outros fenómenos que vão influenciar a atenuação, tais como o efeito da curvatura da Terra, as perdas por difracção e as perdas devido à existência de obstáculos, reflexões e refracções, entre outros.

Para modelar estes fenómenos de uma forma realista, utilizam-se modelos que se baseiam nos modelos rigorosos de cada um dos fenómenos, modificados por parâmetros obtidos a partir de medidas de campo. Os modelos de predição fornecem o valor médio da potência do sinal a uma dada distância de uma estação base, mas nos ambientes de comunicações móveis, devido ao desvanecimento, os sinais associados não podem ser tratados através de métodos determinísticos, sendo necessário estabelecer modelos que descrevam melhor esses fenómenos.

Um modelo correntemente aplicado utiliza a fórmula de Friis para espaço livre substituindo o expoente de propagação 2 por γ [Vele95]. O valor de γ varia entre 2 e 4 em sistemas com cobertura celular. Em espaço livre considera-se $\gamma=2$, em zonas urbanas, considera-se $\gamma = 3$, $\gamma = 3.5$ e $\gamma = 4$, de forma a distinguir os diferentes níveis de densidade da área edificada. Deste modo, a atenuação, L é dada pela expressão

$$L = 32.4 + 30\gamma + 10\log d + \gamma_{chuva} \times d + \gamma_{nevoeiro} \times d + \gamma_{neve} \times d + 20\log f, \quad (5.18)$$

onde γ é o expoente de propagação, γ_{chuva} é a atenuação específica devido à chuva, $\gamma_{nevoeiro}$ é a atenuação específica devido ao nevoeiro, γ_{neve} é a atenuação específica devido à neve. As atenuações específicas são expressas em dB/km, a distância em km e

a frequência, f em GHz [MaSa05]. No entanto, para feixes hertzianos e ligações PTP, considera-se sempre a fórmula de Friis original, ou seja, com $\gamma = 2$.

5.8.3 Modelo de Propagação SUI

O grupo de trabalho do IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*) que actua no protocolo 802.16 desenvolve normas técnicas para os sistemas de acesso sem fios, FWA (*Fixed Wireless Access*) [Rapp96]. As normas propostas para as frequências abaixo de 11 GHz contêm o modelo desenvolvido pela Universidade de *Stanford* nos EUA, chamado de modelo SUI (*Stanford University Interim*). O modelo de propagação SUI foi inicialmente definido para a análise na banda de frequência do sistema MMDS (*Multichannel Multipoint Distribution Services*), que abrange a banda dos 2.5 a 2.7 GHz, mas actualmente também se costuma aplicar a banda dos 3.5 GHz.

O modelo de propagação SUI é dividido em três tipos de ambiente chamados de A, B e C. O tipo A é associado à máxima atenuação e é apropriada para regiões acidentadas com densidade de moderada a intensa de vegetação. O tipo C é enquadrado como uma região de atenuação de percurso mínima, onde o terreno é plano com uma densidade de vegetação leve. O tipo B é caracterizado pela composição do tipo A e C, ou seja, predominância de terreno plano com moderada a intensa densidade de vegetação ou região acidentada com densidade de vegetação leve. A expressão básica da atenuação com os factores de correcção é então

$$L = A + 10\gamma \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_f + X_h + s, \text{ [dB]}, \text{ para } d > d_0, \quad (5.19)$$

onde d é a distância entre a antena emissora e a antena receptora em metros, d_0 é a distância mínima entre as antenas e vale 100 m e s é o factor de distribuição estatística do tipo log-normal que é utilizado para calcular o desvanecimento devido a árvores e outros obstáculos e vale entre 8.2 a 10.6 dB. Os valores dos outros parâmetros são definidos como

$$A = 20 \log\left(\frac{4\pi d_0}{\lambda}\right), \quad (5.20)$$

e

$$\gamma = a - bh_b + \frac{c}{h_b}, \quad (5.21)$$

onde o parâmetro h_b é a altura da estação base acima do solo em metros e deve estar entre 10 e 80 m.

As constantes utilizadas como a , b e c são apresentadas na Tabela 5.2. O parâmetro γ que aparece na expressão (5.21) é igual para o expoente de atenuação. Para um dado tipo de terreno o expoente de atenuação é determinado por h_b .

Tabela 5.2 - Constantes do modelo IEEE 802.16 (SUI)

Constante do Modelo	Terreno Tipo		
	A	B	C
a	4.6	4.0	3.6
b	0.0075	0.0065	0.005
c	12.6	17.1	20.0

Os termos X_f e X_h são factores de correcção para frequência e altura da antena do receptor acima do solo, respectivamente. Estes factores são definidos por

$$X_f = 6.0 \log \frac{f}{2000}, \quad (5.22)$$

e

$$X_h = -10.8 \log \left(\frac{h_m}{2.0} \right), \text{ para terrenos tipo A e B,} \quad (5.23)$$

$$X_h = -20.0 \log \left(\frac{h_m}{2.0} \right), \text{ para terreno tipo C,} \quad (5.24)$$

onde f é a frequência em MHz e h_m é a altura da antena do receptor entre 2 m e 10 m. O modelo SUI é utilizado para efectuar a predição da atenuação em três tipos de ambientes, denominados de áreas rurais, suburbana e urbana.

5.9 Relação Portadora-Ruído Térmico

Um indicador importante da qualidade de uma transmissão é a relação portadora-ruído, que corresponde à razão entre a potência da portadora e a potência do ruído. No estudo de sistemas de comunicação é comum calcular para diversos pontos da ligação a relação

portadora-ruído para avaliar o efeito do ruído. O ruído térmico é o mais predominante na maioria de sistemas de telecomunicações, e a sua potência n_0 é dada por

$$n_0 = K_B T b_{rf}, \quad (5.25)$$

onde K_B é a constante de Boltzman ($K_B = 1,38 \times 10^{-23} J/K$), T é a temperatura observada pela antena, expressa em Kelvin, e b_{rf} é a largura de banda efectiva de ruído, em Hz [Sale02].

Para a grande maioria dos sistemas de feixes Hertzianos, a antena receptora, no pior caso, "vê" a Terra à temperatura de cerca de 293 K (20 °C), pelo que a potência ruído, em unidades logarítmicas, é dada por

$$N_{0[\text{dBw}]} = -204 + 10 \log_{10}(b_{rf}), \quad (5.26)$$

ou

$$N_{0[\text{dBw}]} = -174 + 10 \log_{10}(b_{rf}), \quad (5.27)$$

O ruído N aos terminais da antena (expresso em dB) é determinado somando a N_0 o factor de ruído Nf [Sale02].

$$N = N_0 + Nf, \quad (5.28)$$

O cálculo da potência recebida, P_R , é dado através da seguinte expressão

$$P_R = P_E + G_e + G_R - L, \quad (5.29)$$

onde P_e é a potência de emissão, G_e é o ganho da antena de emissão, G_r é o ganho da antena de recepção e L é a atenuação e depende do modelo de propagação escolhido.

Calculada a potência recebida P_r à entrada do receptor, expressa em unidades logarítmicas, podemos então calcular a relação portadora-ruído, C/N

$$\frac{C}{N} = P_{r[\text{dBw}]} - N_{[\text{dBw}]}. \quad (5.30)$$

5.10 Sumário e Conclusões

Neste Capítulo apresentamos os principais conceitos relativos a propagação e o planeamento celular, como o conceito reutilização de frequências, interferências e os modelos de propagação de Friis modificada e o modelo de propagação SUI adoptado pelo grupo de trabalho do IEEE para sistemas de acesso fixo sem fios para as bandas de frequência abaixo de 11 GHz. E por fim, abordamos as técnicas para melhorar a capacidade do sistema como a divisão de células e sectorização.

- A forma hexagonal é universalmente utilizada para as células porque facilita a análise de um sistema celular;
- Os modelos de propagação sem fios dependem fortemente da arquitectura utilizada;
- Os canais sem fios podem ser distinguidos por diferentes ambientes de propagação, tais como: urbanos, suburbanos e rurais, internos e externos, etc; cada um destes ambientes possui certas particularidades que os diferenciam uns dos outros;
- A atenuação influencia as ondas electromagnéticas em termos de perda de potência em função da distância entre o emissor e receptor bem como da frequência utilizada;
- O modelo de propagação teórico mais conhecido é o modelo de propagação de espaço livre. Este modelo é utilizado para prever o nível de sinal recebido em condições de ligação em linha de vista entre o emissor e o receptor, que são condições mais típicas de ligações de satélite e sistemas de microondas;
- Os sistemas sem fios devem poder lidar contra severas interferências de células vizinhas; estas interferências podem ser atenuadas através da sectorização e do padrão de reutilização de frequência;
- O conceito de planeamento celular foi concebido para aproveitar melhor o espectro de rádio frequências limitado, permitindo, ao mesmo tempo, grandes áreas de cobertura;
- Na prática, o projecto de redes sem fios deparam-se com dificuldades reais de propagação radioelétrica e regiões de cobertura imperfeitas, específicas a cada célula.

Capítulo 6

Aplicação da Ferramenta de Planeamento WinProp

Neste Capítulo apresenta-se a ferramenta de planeamento de redes móveis e sem fios WinProp os aspectos relacionados com a sua instalação e os cenários de aplicação. Abordam-se os diagramas de radiação das antenas. Para além dos diagramas de radiação das antenas, as bases de dados são os dados de entradas mais importantes, necessários para a modelação da propagação e para o planeamento das redes móveis e sem fios. Existem diferentes tipos de bases de dados cuja a utilização depende do ambiente onde será feito o planeamento de rede. Finalmente, apresentam-se os diferentes tipos de projecto que se podem realizar e os modelos de propagação utilizados no WinProp.

6.1 Introdução

O WinProp é uma ferramenta de planeamento de redes móveis e sem fios que é constituída por três partes principais, o ProMan, que é concebida para o planeamento de redes móveis e sem fios, podendo também ser utilizado para analisar a propagação de ondas electromagnéticas em ambientes arbitrários, o WallMan, que é uma poderosa interface gráfica do utilizador e que permite editar convenientemente bases de dados *indoor* ou urbanas e o AMan (*Antenna Manager*), que serve para manipular os vários tipos de antenas através duma janela GUI (*Graphical User Interface*).

O WinProp é um *software* de fácil instalação; não é necessário iniciar qualquer programa de instalação basta apenas copiar os ficheiros executáveis para uma directoria do disco rígido. Para iniciar qualquer um dos três programas basta apenas abrir a pasta “Bin” e clicar no programa que se pretende iniciar. Por ser um *software* comercial, o WinProp só funciona com uma chave *hardlock* chamada “*Dongle*”, que precisa também de ser instalada.

O ProMan oferece dois tipos de projectos (propagação e rede), para diferentes cenários (rural, urbano, *indoor* e túnel), e suporta uma vasta gama de normas de redes sem fios. São suportadas as normas mais importantes e populares como por exemplo, o GSM, o GPRS, o UMTS, o CDMA 2000, e o WiMAX.

Uma característica especial do WinProp é o planeamento de rede móveis sem fios combinado, CNP (*Combined Network Planning*). Enquanto que em ferramentas de planeamento de redes radioelétricas clássicas, o utilizador tem que definir uma classe de modelos de propagação (macro/micro/pico) que pode ser utilizado para um determinado emissor, o WinProp oferece uma elevada flexibilidade baseada na abordagem CNP. Com o CNP, o WinProp combina diferentes cenários (por exemplo rural e urbano) e modelos de propagação para uma análise detalhada de ambientes híbridos [Winp07]. Para além dos diagramas de radiação das antenas, as bases de dados são os dados de entrada mais importantes, necessários para uma correcta modelação da propagação.

6.2 Diagramas de Radiação das Antenas

Nas predições com diferentes modelos de propagação, a antena do emissor do sentido descendente, DL, é modelada por um diagrama de radiação 3D. Isto torna possível

considerar características arbitrárias da antena, por exemplo, antenas sectoriais, omnidireccionais, etc. A antena da estação subscritora não é considerada (só se considera o ganho, como um número decimal) no *link budget*.

As antenas podem ter um ângulo de elevação, *tilt* (*uptilt* ou *downtilt*). Teoricamente, são possíveis *tilts* com um máximo de $\pm 90^\circ$. Os valores positivos descrevem *uptilts* e os valores negativos são utilizados para *downtilts*. Geralmente, os *tilts* são negativos (isto é *downtilts*) e estão na região entre 0 e -20° .

Os diagramas de radiação das antenas utilizadas no ProMan apresentam-se num formato binário (*.apb) ou num formato ASCII (*.apa). Se a versão padrão do WinProp não incluir a importação do diagrama de radiação da antena MSI, dados que é um módulo opcional, deverá ser comprado; também é possível utilizar padrões de antena MSI (*.msi) directamente, sem qualquer conversão com ferramentas externas. Quase todos fabricantes de antenas oferecem diagramas de radiação das antenas em ficheiros no formato *.msi. Assim os diagramas de radiação das antenas podem ser utilizados directamente sem qualquer problema de conversão.

Os tipos de ficheiros para os diagramas de radiação das antenas (ASCII, Binário, MSI) que podem ser utilizados no ProMan dependem dos módulos incluídos na licença. Não são suportados formatos que não forem adquiridas.

6.3 Antenas Propostas

Para a cobertura do concelho e da cidade da Covilhã, propomos utilizar antenas sectoriais ou antenas omnidireccionais. Para antenas sectoriais propomos a antena WiMAX 3500 MHz 120° para antenas omnidireccionais, propomos a antena GP3500-xx. As características detalhadas das antenas propostas apresentam-se nos Anexos A e B. Utilizando o *software* AMan do WinProp, obtivemos o diagrama de radiação 3D da Figura 6.1.

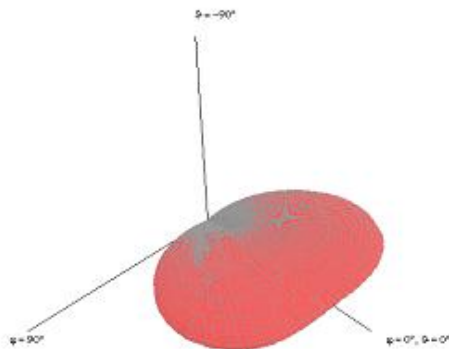


Figura 6.1 - Diagrama de radiação 3D da antena sectorial WiMAX 3500 MHz 120°

A Figura 6.2 apresenta os diagramas de radiação vertical e horizontal da antena WiMAX 3500 MHz 120°.

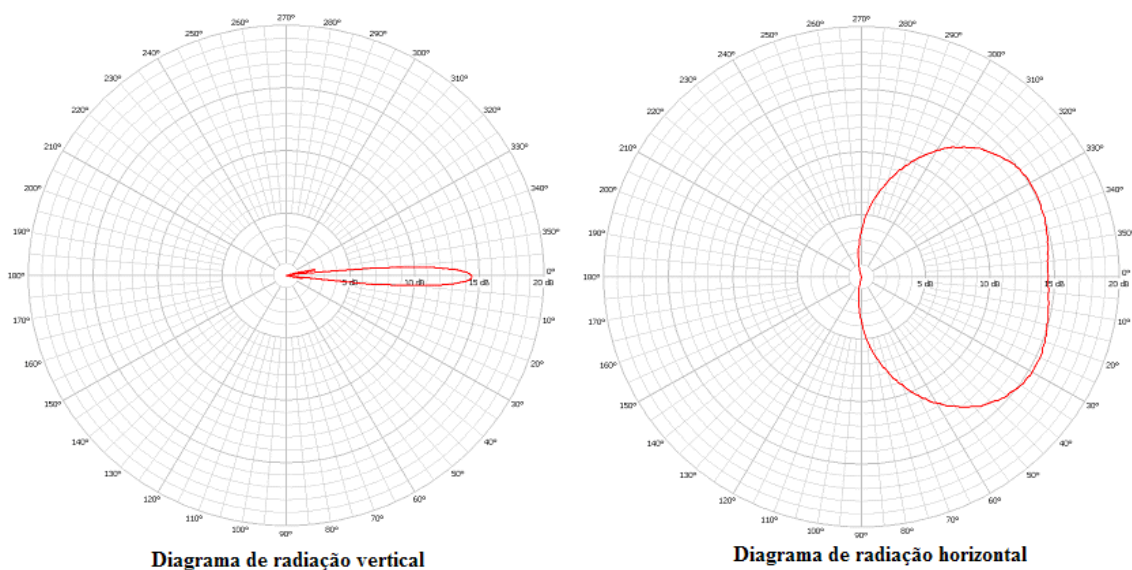


Figura 6.2 - Diagramas de radiação vertical e horizontal da antena sectorial WiMAX 3500 MHz 120°

No caso da antena omnidireccional por não estar pré-definida no WinProp tivemos de criar um novo diagrama de radiação da antena a partir do diagrama de radiação tirada do *datasheet* da antena omnidireccional GP3500-xx em formato *.bmp, Figura 6.3.

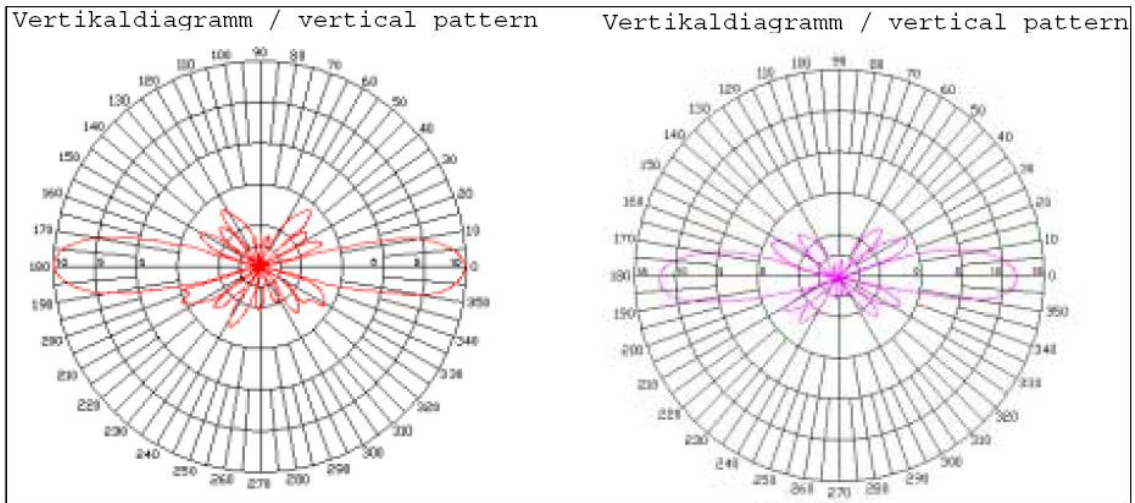


Figura 6.3 - Diagrama de radiação vertical tirada do *datasheet* da antena omnidireccional GP3500-xx em formato *.bmp

A Figura 6.4 apresenta a janela do *software* AMan depois de importarmos o ficheiro bitmap do diagrama de radiação da antena omnidireccional a partir do *datasheet*. É possível que os sistemas de coordenadas não coincidam.

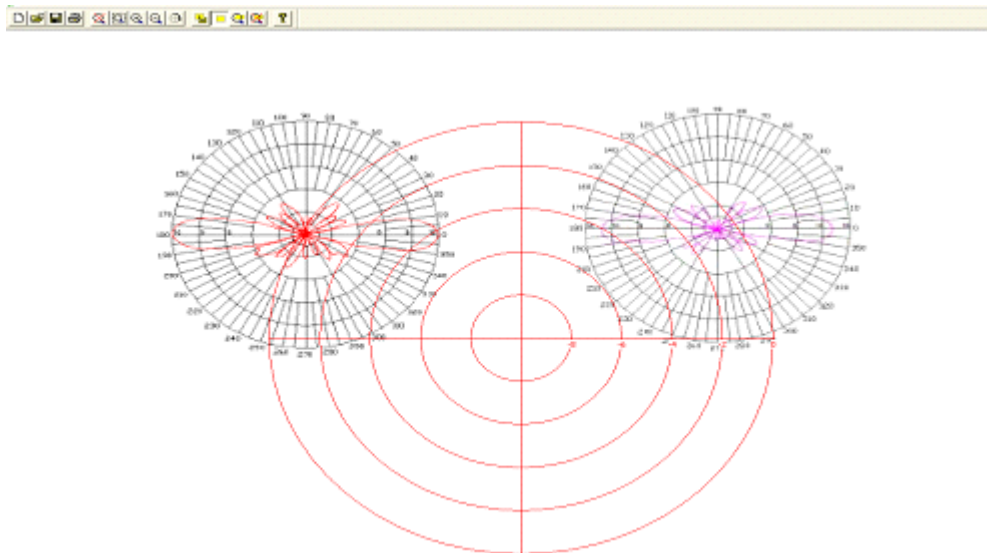


Figura 6.4 - Janela do AMan depois de importarmos o bitmap

A Figura 6.5 apresenta o ficheiro bitmap do diagrama de radiação depois de ampliado para um factor de 200 % e centrado com o sistema de coordenadas do *software* AMan.

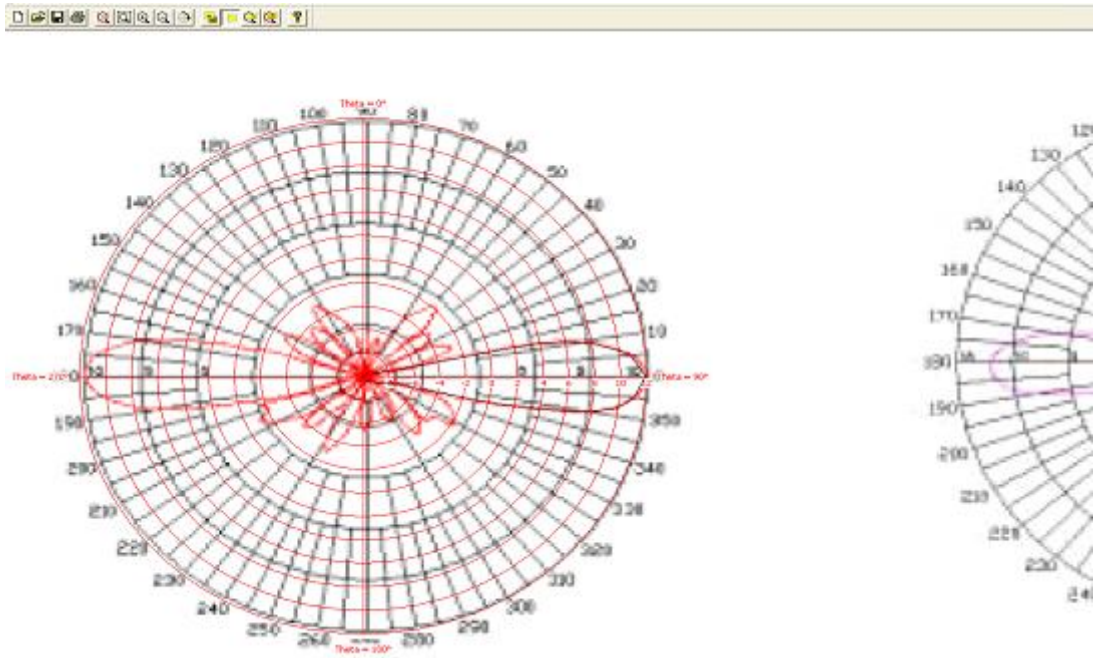


Figura 6.5 - Bitmap do diagrama de radiação da antena omnidireccional depois de ampliado e centrado

A Figura 6.6 apresenta o diagrama de radiação vertical da antena omnidireccional GP3500-xx criado a partir ficheiro *.bmp do *datasheet* da antena.

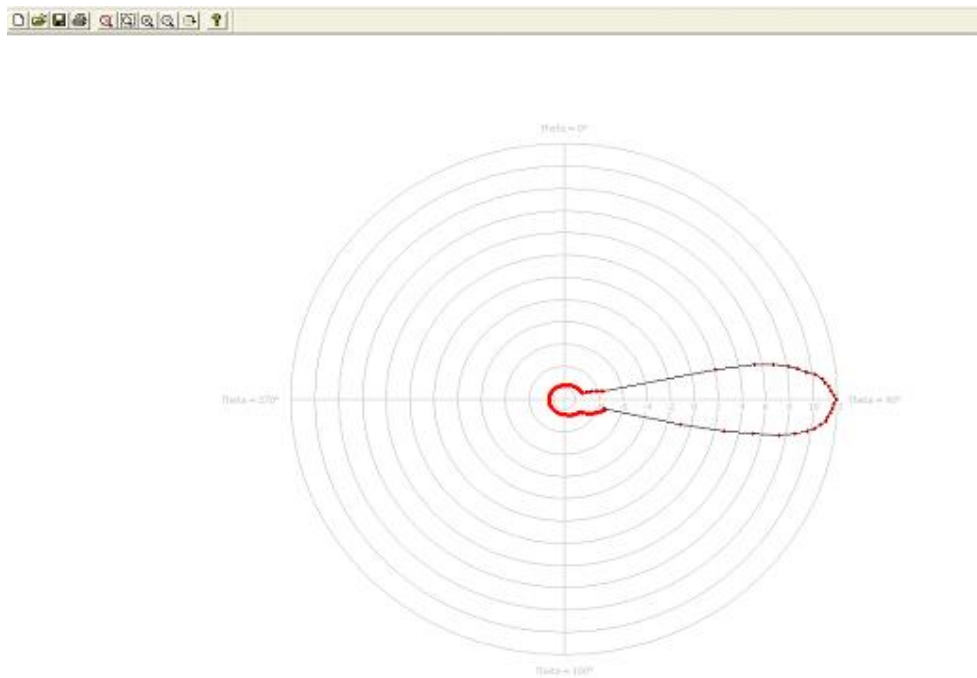


Figura 6.6 - Diagrama de radiação vertical da antena omnidireccional GP3500-xx

6.4 Bases de Dados

Como já foi mencionado anteriormente, para além dos diagramas de radiação das antenas, as bases de dados são os dados de entrada mais importantes necessários para uma correcta modelação da propagação. Geralmente, existem diferentes tipos de bases de dados que dependem do ambiente onde será feita o planeamento de rede.

Para além das bases de dados de vector, o WallMan também pode manipular bases de dados de *pixel*. Elas são principalmente utilizadas para mapas topográficos, mas às vezes também para bases de dados de edifícios. Alguns fornecedores de bases de dados oferecem bases de dados de edifício urbanos em *pixel* e em formato de vector, visto que o formato de vector é normalmente mais caro. O WinProp suporta os seguintes ambientes, Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Resumo dos tipos de ambiente, bases de dados e os respectivos modelos de propagação [Winp07]

Tipos de Ambiente	Características	Base de Dados	Modelos de Propagação
Rural	Com baixa densidade de edifícios	Topográficos e de <i>Clutter</i>	Hata-Okumura, <i>Knife-Edge</i> e <i>Parabolic Equations</i>
Suburbano	Com média densidade de edifícios	Topográficos e de <i>Clutter</i>	Hata-Okumura, <i>Knife-Edge</i> e <i>Parabolic Equations</i>
Urbano	Com elevada densidade de edifícios	Vector dos edifícios urbanos	COST 231 Walfisch-Ikegami, <i>Ray Tracing</i>
Urbano Denso	Com densidade muito elevada de edifícios	Vector dos edifícios urbanos	COST 231 Walfisch-Ikegami, <i>Ray Tracing</i>
Campus	Uma área pequena com alguns edifícios	De edifícios	Motley-Keenan, COST 231 <i>Multi Wall</i> , <i>Ray Tracing</i>
<i>Indoor</i>	Dentro de um edifício com todas as paredes e objectos diferentes	Vector de interior dos edifícios	Motley-Keenan, COST 231 <i>Multi Wall</i> , <i>Ray Tracing</i>
Túnel	Caminhos-de-ferro ou estradas com túneis	Base de dados <i>indoor</i>	Motley-Keenan, COST 231 <i>Multi Wall</i> , <i>Ray Tracing</i>

6.4.1 Conversão de Base de Dados

6.4.1.1 Bases de Dados Topográficos

As bases de dados topográficas (Modelo de Elevação Digital) são as bases de dados mais importantes utilizados para análise da propagação porque a topografia tem uma influência significativa na propagação de ondas electromagnéticas. As bases de dados topográficas são muito frequentemente também chamados de bases de dados de terreno e estão baseados em matrizes de *pixel*. Cada *pixel* define a altura topográfica para um determinado local, isto é o centro do *pixel*. Quanto melhor a grelha mais exacta é a base de dados. Actualmente são utilizadas grelhas com dimensão de 20 m. O WinProp só suporta valores de alturas (elevações) em metros, as outras unidades devem ser convertidas para metros.

A conversão de dados topográficos de outros ficheiros de diferentes formatos para o formato de dados do WinProp é possível com os conversores integrados dentro do ProMan. As bases de dados topográficas utilizadas neste projecto foram convertidas no *software* WallMan para o formato do WinProp a partir do ficheiro (*.asc) obtido a partir do *software* ArcView. O ficheiro (*.asc) foi extraído da carta militar nº 235 do IGeoE, escala 1/25000 a partir do *software* ArcView disponível no STIG-UBI, Serviço Transfronteiriço de Informação Geográfica – Universidade da Beira Interior, Figura 6.7. A Figura 6.8 apresenta a base de dados topográfica do concelho da Covilhã em 3D.

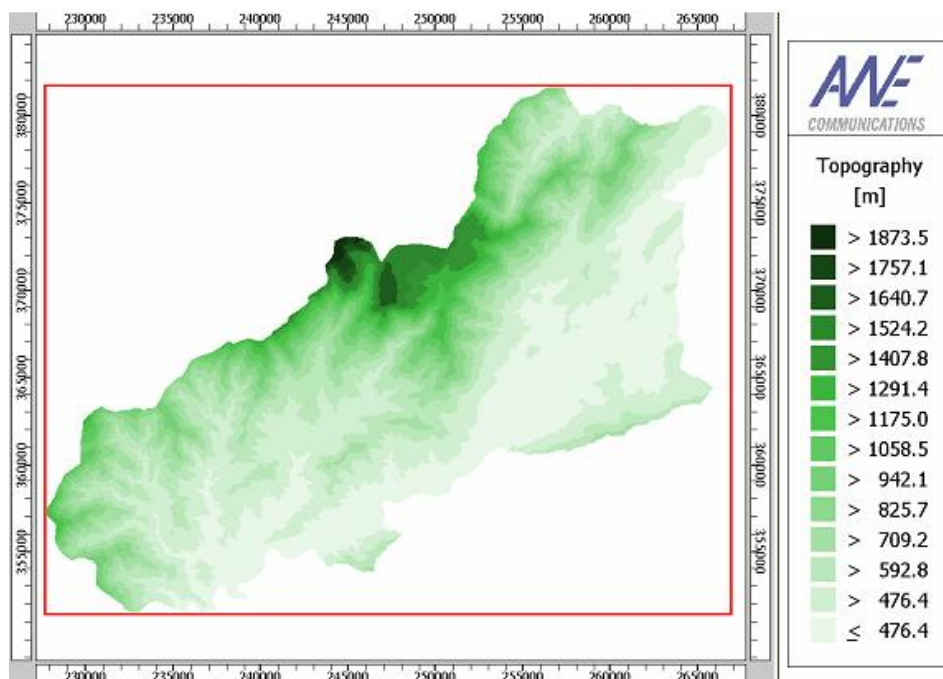


Figura 6.7 - Base de dados topográfica do concelho da Covilhã em 2D

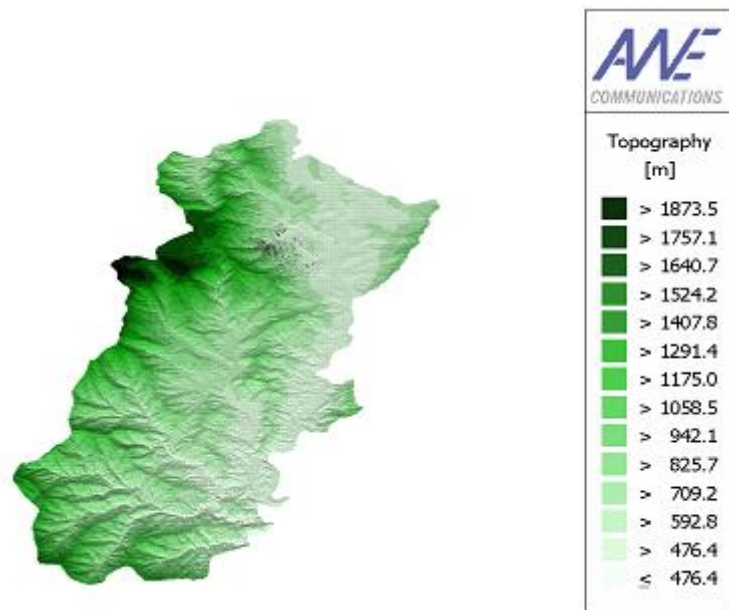


Figura 6.8 - Base de dados topográfica do concelho da Covilhã em 3D

A Figura 6.9 apresenta a base de dados topográfica da área metropolitana da Covilhã e arredores extraída a partir da carta militar nº 235.

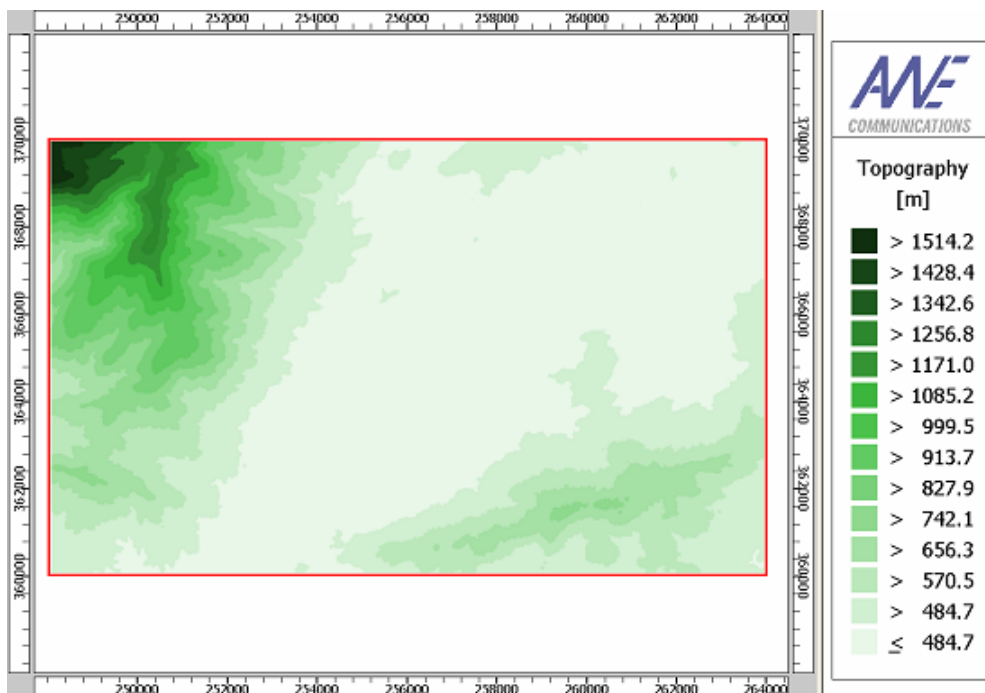


Figura 6.9 - Base de dados topográfica da cidade da Covilhã e arredores

6.4.1.2 Bases de Dados Urbano

As bases de dados de vector urbano contêm uma descrição de cada edifício urbano ou área de vegetação num ambiente urbano. Ao contrário das bases de dados de *pixel* topográficos ou de *clutter*, as bases de dados urbanos são bases de dados de vector, isto é cada edifício é descrito por um vector (polígono) e os atributos como por exemplo altura, material e tipo (edifício, vegetação) também são descritos.

A Figura 6.10 apresenta a base de dados de vector convertida no software WallMan para o formato do WinProp a partir do ficheiro (*.shp) extraída do *software* ArcView. A base de dados de vector apresentada na Figura 6.10 não contém a informação relativa as alturas de todos os edifícios.

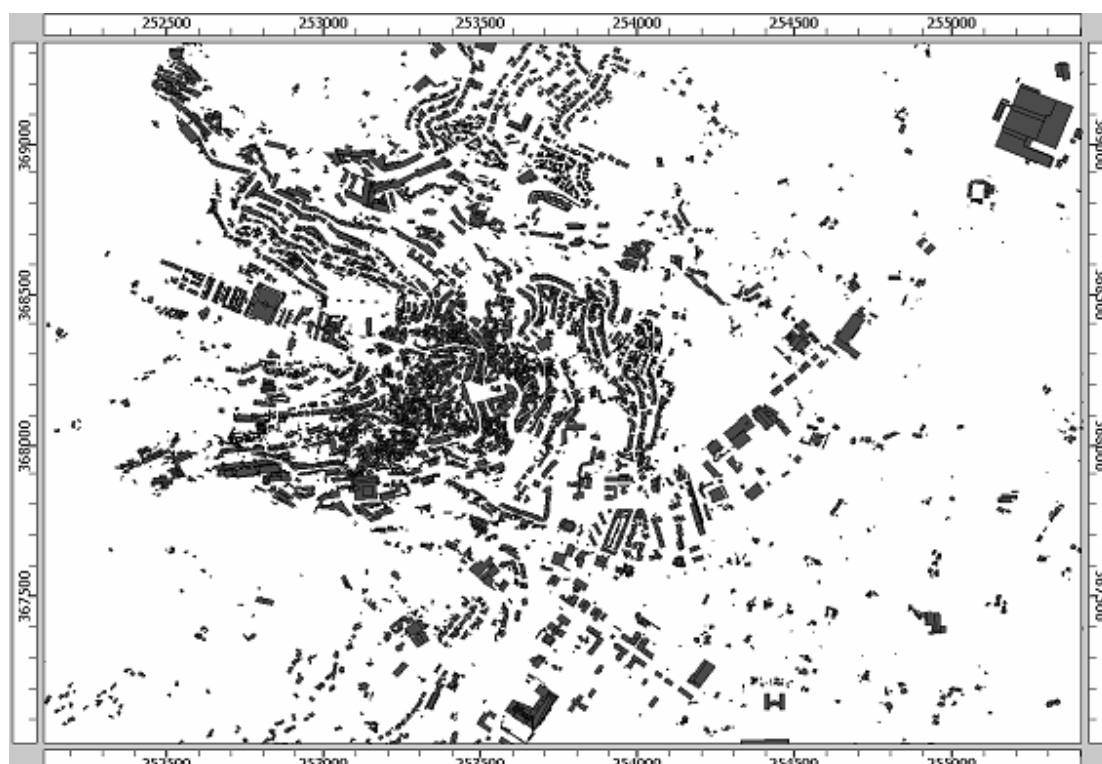


Figura 6.10 - Base de dados de edifícios urbanos (dados de vector) da cidade da Covilhã

6.4.1.3 Planeamento de Rede Combinado

Como mencionado anteriormente, uma das características especiais do WinProp é o planeamento de redes móveis e sem fios combinado, a partir do qual se podem combinar diferentes cenários como, por exemplo, urbano e rural, e modelos de propagação para uma análise detalhada de ambientes híbridos.

- CNP Rural – Urbano:** A estação base fica situada fora da cidade como por exemplo num monte. O modelo rural seria suficiente para a análise da célula excepto da cidade que é por exemplo em parte coberto por esta estação base. Para a cidade, os modelos rurais não são muito precisos e nesses casos deveríamos utilizar modelos de propagação urbanos. Com CNP isto passa a ser possível. Para além da base de dados urbana, utilizam-se os modelos de predição rural na cidade, onde os vectores de edifícios estão disponíveis; os raios calculados em ambientes rurais são traçados dentro da cidade. Isto aumenta significativamente a precisão da predição dentro da cidade, sem aumentar o tempo de cálculo fora da área urbana.
- CNP Urbano – Rural:** A estação base fica situada dentro da área urbana (por exemplo, num edifício) e a célula é de dimensão elevada, inclui áreas rurais onde não estão disponíveis dados dos edifícios (só topográfico). Com o CNP, na parte rural é possível utilizar os modelos rurais baseados nos resultados obtidos com os modelos urbanos (por exemplo, raios) da parte urbana. Assim, é possível uma transição suave do urbano para rural. No limite da cidade, a predição urbana pára e passam-se os resultados e dados para o modelo rural, que continua com a predição, Figura 6.11.

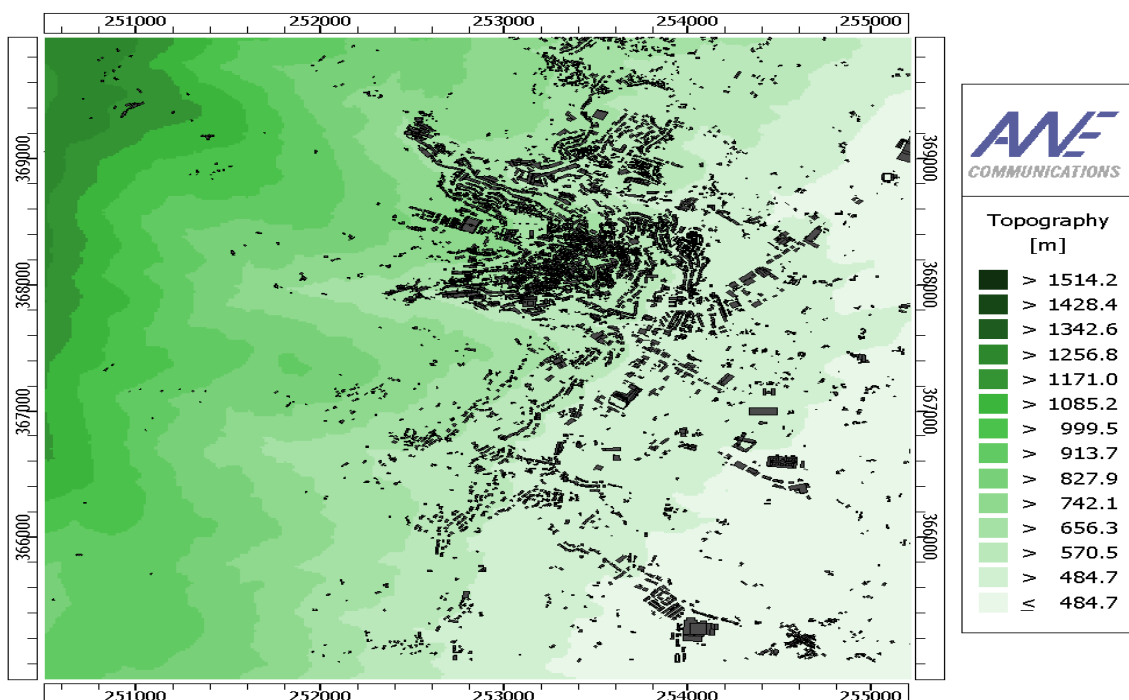


Figura 6.11 - CNP rural - urbano da cidade da Covilhã

6.5 Modelos de Propagação no WinProp

No planeamento de sistemas de rádio móvel e sem fios, são necessários modelos de propagação para determinar as características de propagação para qualquer configuração arbitrária [Pars92]. As predições são necessárias para um planeamento de cobertura adequado; a determinação dos efeitos de multi-percurso e da interferência, assim como os cálculos associados a célula, são a base para o elevado nível de qualidade do processo de planeamento de rede. Num sistema GSM, este processo de planeamento inclui, por exemplo, a predição da potência recebida, para determinar os conjuntos dos parâmetros das estações base. Com a introdução de serviços de banda larga sem fios em sistemas de terceira geração, UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*) ou em redes de área local e metropolitanas sem fios (WLAN e WMAN) as propriedades da largura de banda (por exemplo, espalhamento do atraso, expansão angular e resposta do impulso) do canal de rádio móvel tornam mais e mais importante para o processo de planeamento.

Os ambientes onde se pretende que estes sistemas sejam instalados variam de áreas *indoor* até grandes áreas rurais. Consequentemente, são necessários métodos de predição de propagação de ondas para cobertura dos diferentes tipos de células (macro, micro e pico) que incluem cenários *indoor* e situações em ambientes especiais, como túneis ou ao longo da auto-estrada.

Os fenómenos que influenciam a propagação das ondas radioelétricas podem geralmente ser descritos por quatro mecanismos básicos: reflexão, difracção, penetração e dispersão. Para a utilização prática dos modelos de propagação em cenários reais, estes mecanismos devem ser descritos por aproximações. Isto requer um processo de modelação multi-etapas [Damo98]:

- No primeiro passo, o ambiente de propagação tem que ser digitalizado criando-se uma base de dados que descreve o ambiente considerado de um modo adequado. Enquanto que para a predição de macro células a base de dados inclui a informação da altura do terreno e dados utilizados da região para a forma dos edifícios do ambiente urbano, a informação da altura e superfície dos edifícios são levadas em conta. Geralmente utilizam-se diferentes tipos de bases de dados com várias resoluções e diferente precisão, de acordo com o cenário especificado.

- O segundo passo, inclui a definição de aproximações matemáticas para os mecanismos de propagação física. Também são tratados os problemas básicos como, por exemplo, a difracção ao redor de uma zona em forma de cunha de condutividade não perfeita, representando o canto de um edifício e modelação de propagação sobre os topos de telhados.
- Com base nas soluções para ambos os problemas básicos determinístico e empírico, para os diversos ambientes foram desenvolvidas aproximações, o que constitui o terceiro passo de modelação.

Para os diferentes ambientes, é necessário fazer a distinção dos modelos de propagação em termos do fenómeno de propagação física dominante e de especificação da base de dados utilizada, descrevendo o cenário considerado.

A Tabela 6.2 apresenta [Winp07] uma avaliação e descrição dos diferentes tipos de célula.

Tabela 6.2 - Definição dos diferentes tipos de células

Tipo da Célula	Raio típico da célula	Localização típica da antena da BS
Macro célula (célula larga, terreno)	1 km a 30 km	No exterior, montado acima do nível médio do topo do telhado; a altura de todos os edifícios circundantes está abaixo da altura da antena da BS
Mini célula (pequena célula, suburbano)	0.5 km a 3 km	No exterior, montado acima do nível médio do topo do telhado; a altura de alguns edifícios circundantes está acima da altura da antena da BS
Micro célula (pequena célula, urbana)	Até 1 km	No exterior, montado acima do nível médio do topo do telhado; a altura de todos os edifícios circundantes está abaixo da altura da antena da BS
Pico célula (<i>indoor</i>)	Até 500 m	<i>Indoor</i> ou exterior (montado abaixo do nível do topo do telhado)

Para células grandes e pequenas, a antena da BS é geralmente instalada acima do nível médio do topo do telhado dos edifícios circundantes. Assim, a atenuação é determinada principalmente pela difracção nos telhados, isto é, os raios principais propagam-se sobre os edifícios. Pelo contrário, nas micro células, as antenas da BS são instaladas abaixo

nível do topo do telhado dos edifícios circundantes. Neste caso, a propagação é determinada pela difracção ao redor e reflexão em edifícios, o que conduz a efeitos de ondas guiadas nas ruas. São aplicadas pico células para fornecer cobertura *indoor* ou para cobrir áreas exteriores muito pequenas. Em qualquer caso, a antena da BS de uma pico célula é instalada dentro de um edifício ou bem abaixo do nível do topo do telhado no exterior.

6.5.1 Modelos Rurais

Para predições em macro células são normalmente aplicados modelos de propagação avançados, que incluem difracção múltipla sobre o terreno e edifícios. Em geral, a dispersão e a reflexão provocada por montes, montanhas e edifícios podem ser desprezadas porque a estação base fica situada sobre os obstáculos circunvizinhos, para cobrir uma vasta, área. As predições são baseadas no conhecimento da topografia, e em poucos modelos de edifícios com informação adicionais das alturas. Esta Secção descreve as diferentes abordagens para a modelagem de propagação em cenários rurais, Figura 6.12.

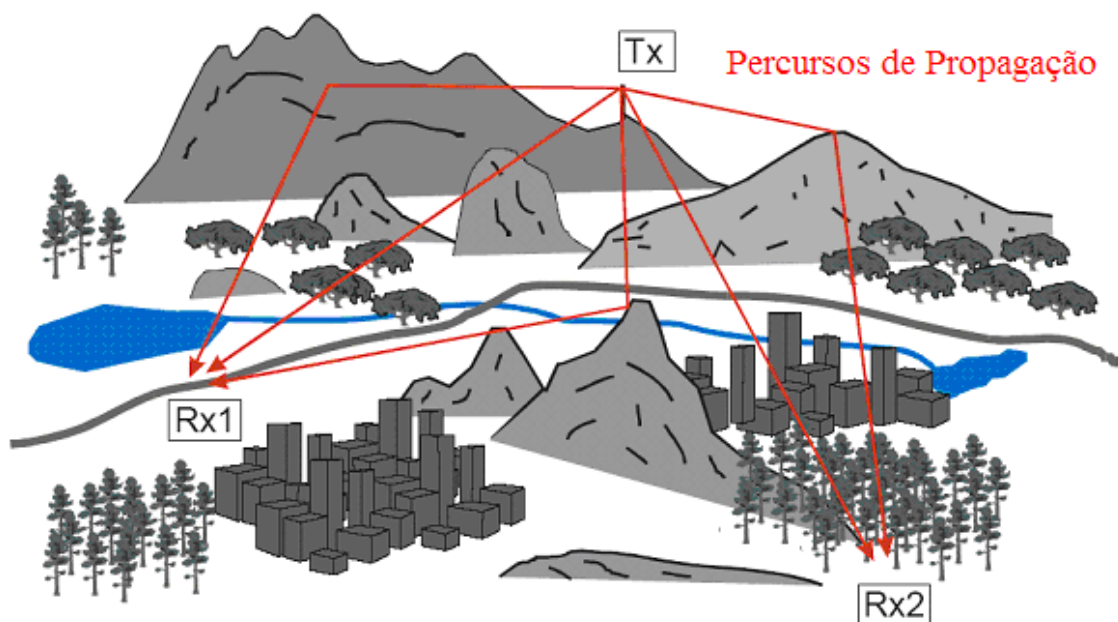


Figura 6.12 - Típico cenário para uma predição de terreno, extraído de [Winp07]

6.5.1.1 Modelo Hata-Okumura

O modelo de Hata-Okumura é uma aproximação empírica simples para a predição em áreas com macro células, é baseada na avaliação de medidas intensivas, até frequências entre 200 MHz e 2 GHz com polarização vertical. Este modelo tem um tempo de cálculo muito baixo. As equações resultantes dos dados das medidas necessitam somente dos seguintes parâmetros:

- Frequência, f , em MHz;
- Distância entre emissor e receptor d , em km;
- Altura da antena do emissor, h_e , em metros;
- Altura da antena de recepção em relação ao solo h_r , em metros.

Para melhorar a precisão deste modelo empírico, pode ser introduzida uma altura efectiva da antena para o emissor. Porém, o perfil do terreno entre o emissor e o receptor não é considerado. A Figura 6.13 apresenta a definição da altura efectiva da antena.

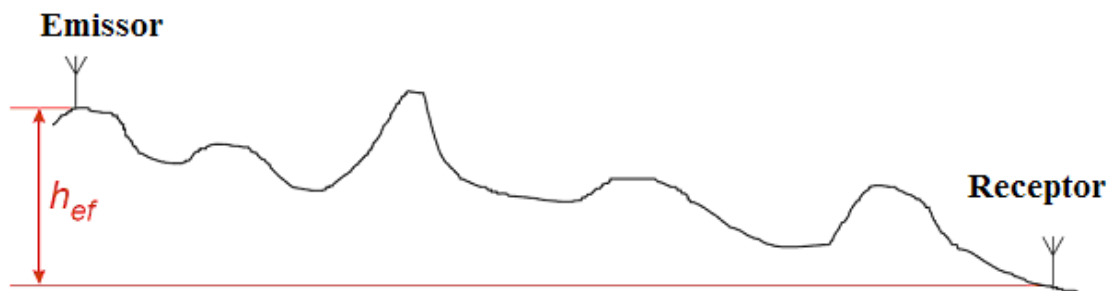


Figura 6.13 - Definição da altura efectiva da antena de emissão

Devido à calibração com dados das medidas o modelo Hata-Okumura é restringido para os seguintes parâmetros:

- $f = 150$ a 1500 MHz;
- $d = 1$ a 20 km;
- $h_e = 30$ a 200 m;
- $h_r = 1$ a 10 m.

A atenuação básica nas áreas urbanas é então calculada de acordo com a seguinte fórmula

$$L = 69.55 + 26.16 \log(f) - 13.82 \log(h_{ef}) + [44.9 - 6.55 \log(h_{ef})] \cdot \log(d) - c(h_r), \quad (6.1)$$

Esta é uma equação para a atenuação básica e diferentes termos de correcção de acordo com os diferentes ambientes de propagação (urbano denso, suburbano e espaços abertos) onde,

$$c(h_r)_{[dB]} = \begin{cases} [1.10 \log(f) - 0.70] \cdot h_r - [1.56 \log(f) - 0.80] & \text{para cidade pequena/media} \\ 8.29 \cdot [\log(1.54h_r)]^2 - 1.10, & f \leq 200 \text{ para cidade grande} \\ 3.20 \cdot [\log(11.75h_r)]^2 - 4.97, & f \geq 400 \text{ para cidade grande} \end{cases} \quad (6.2)$$

Para além das fórmulas para o caso urbano, há algumas modificações para o ambiente rural e para áreas abertas. Estas alterações conduzem as seguintes expressões

$$L_{rural} = L_{[dB]} - 2 \cdot [\log(f/28)_{[MHz]}]^2 - 5.40, \quad (6.3)$$

e

$$L_{aberto} = L_{[dB]} - 4.78 \cdot [\log(f)]^2 + 18.33 \log(f) - 40.94. \quad (6.4)$$

Estas fórmulas descrevem a propagação de onda de um modo “muito plano” porque o perfil do terreno entre o emissor e o receptor não é considerado, isto é, se houver, por exemplo, uma colina entre o emissor e receptor, os resultados não são alterados. Adicionalmente, os efeitos locais ao redor do receptor, por exemplo, a reflexão ou o *shadowing* são também desprezados.

O COST 231 estendeu o modelo de Hata-Okumura para a banda de frequência entre 1500 MHz e 2000 MHz, analisando as curvas de propagação de Okumura na banda de frequência superior. Esta combinação é chamada de modelo de COST Hata [Damo98] dada pela seguinte fórmula

$$L = 46.3 + 33.9 \cdot \log(f) - 13.82 \cdot \log(h_{ef}) - c(h_r) + (44.9 - 6.55 \cdot \log(h_{ef})) \cdot \log(d) + C_{m[dB]}, \quad (6.5)$$

onde

$$c(h_r) = (1.10 \cdot \log(f) - 0.7) \cdot h_r - (1.56 \cdot \log(f) - 0.8), \quad (6.6)$$

e

$C_m = 0$ dB para cidades de tamanho médio e centros suburbanos;

$C_m = 3$ dB para centros metropolitanos.

A aplicação do modelo COST-Hata é restringida para grande e pequenas áreas macro células, isto é altura de antena da BS sobre níveis de telhado adjacente da BS. A fórmula de Hata e as suas modificações não devem ser utilizadas para micro células.

O WiMAX *Forum* recomenda a utilização do modelo de propagação COST-231 Hata para simulações do sistema e planeamento de rede de sistemas com macro células em áreas urbanas e suburbanas para aplicações de mobilidade. O WiMAX *Forum* também recomenda adicionar 10 dB da margem de desvanecimento.

6.5.1.2 Método da Equação Parabólica

Devido à precisão limitada dos modelos empíricos há uma necessidade de encontrar métodos que descrevam a difracção e processos de dispersão nos terrenos não homogéneos, isto é o efeito do terreno para a variação em larga escala. Assim, têm sido investigados as diferentes aproximações de ondas completas e uma possibilidade eficiente é o método da equação parabólica.

Este método utiliza uma avaliação numérica da equação parabólica para calcular a intensidade de campo numa área macro celular baseada em dados do terreno. Este modelo é muito preciso porque são implicitamente considerados os diferentes mecanismos de propagação (propagação no espaço livre, reflexão e difracção). Devido ao algoritmo sofisticado, o tempo de cálculo é bastante longo, em comparação com os modelos empíricos.

6.5.2 Modelos Urbanos

O planeamento celular de um sistema de comunicações móveis necessita de predição de propagação de onda relativo ao cálculo da relação portadora-ruído e relação portadora-interferência no sistema móvel sem fios. A configuração de redes com células de reduzidas dimensões, especialmente do tipo micro e pico celulares, são de maior interesse para ambientes urbanos devido ao aumento da exigência da capacidade. Uma característica adicional é a potência de emissão reduzida. Contudo, a gama de predição acima de vários km tem de ser considerado para os cálculos da interferência inter-células. Instalam-se BSs pico celulares dentro de edifícios fornecendo também cobertura ao redor dos edifícios.

A transmissão radioelétrica em ambientes urbanos está sujeita a fortes propagação multi-percursos, Figura 6.14. As características dominantes nestes cenários são a reflexão, difracção, *shadowing* por obstáculos discretos e a ondas guiadas nas ruas. Para considerar estes efeitos na modelação da propagação, é necessário ter conhecimento de todos percursos de propagação dominantes. Estes percursos dependem essencialmente da altura da antena da BS em relação a altura dos edifícios em redor.

Para simplificar a modelação da propagação, foram desenvolvidos dois modelos empíricos de dimensionamento, assumindo a propagação acima dos topos dos telhados como o principal mecanismo de propagação. O modelo Walfisch-Ikegami com estendida da Acção de Cooperação Europeia COST 231 é uma aproximação analítica, contendo equações empíricas e factores de correcção.

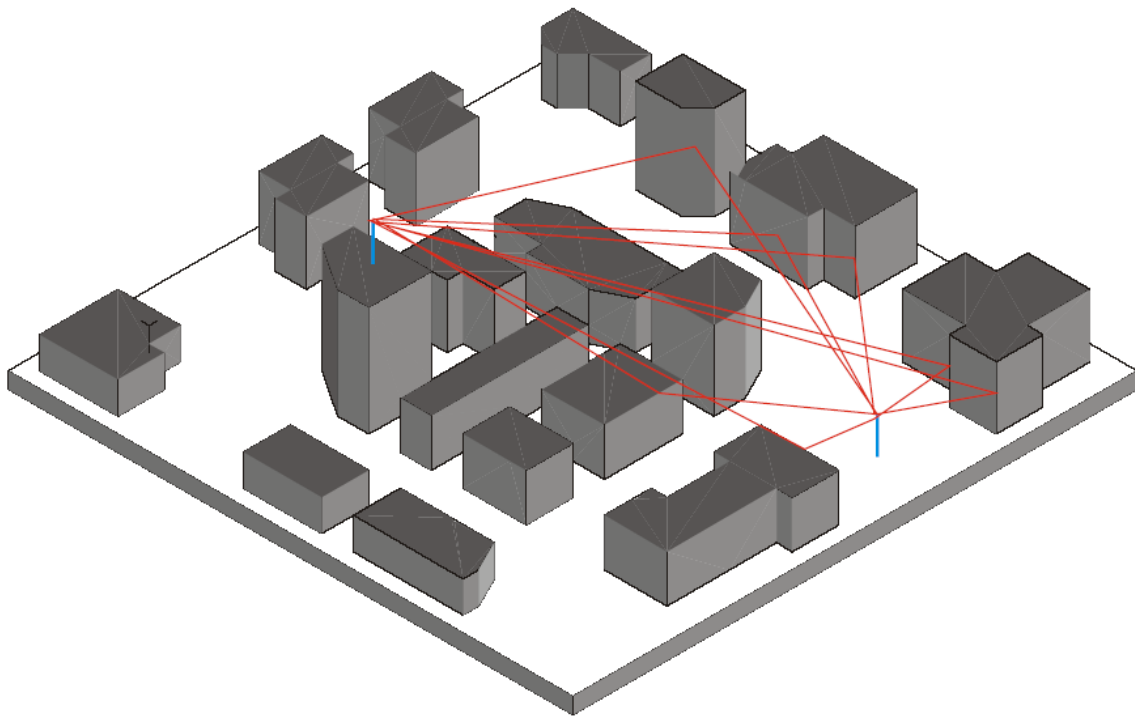


Figura 6.14 - Cenário de propagação num ambiente urbano típico, extraído de [Winp07]

6.5.2.1 Modelo do COST 231-Walfisch-Ikegami

Os chamados modelos empíricos (por exemplo o modelo segundo Walfisch/Ikegami) consideram apenas a propagação num plano vertical que contém o emissor e o receptor. Para a predição da intensidade, de campo, os parâmetros significativos têm que ser extraídos desta secção vertical (por exemplo altura média do edifício).

As equações que contêm estes parâmetros têm que ser optimizadas e ajustadas para numerosas medidas, de forma a se obter um modelo de predição que seja aplicável em diferentes ambientes de propagação. A vantagem principal dos modelos empíricos é o tempo de cálculos reduzido.

Porém, a precisão da predição está limitada devido ao facto de só se considerar um pequeno número de parâmetros, sendo dada muita importância à influência da distância ao emissor. Adicionalmente, os efeitos de ondas guiadas em ruas não podem ser consideradas por uma abordagem empírica.

O modelo empírico implementado no ProMan foi desenvolvido durante a Acção Europeia COST 231 por uma combinação dos modelos de Walfisch e de Ikegami. O modelo permite melhorar a estimacão da atenuacão através da consideracão de dados adicionais para descrever o carácter do ambiente urbano, isto é:

- Altura do emissor h_{TX} ;
- Altura do receptor h_{RX} ;
- Valor médio de alturas dos edifícios h_{roof} ;
- Valor médio das larguras das estradas W ;
- Valor médio da separacão entre edifícios;
- Orientacão da estrada com consideracão para o percurso de rádio directo ϕ .

A Figura 6.15 apresenta os parâmetros geométricos utilizados para o cálculo com o modelo COST 231.

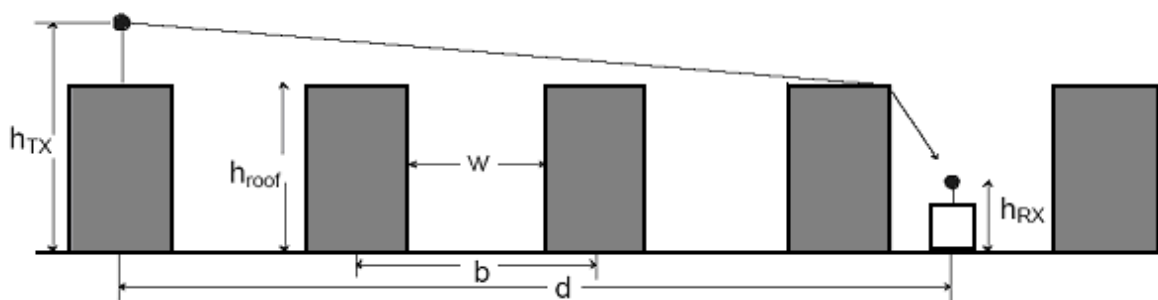


Figura 6.15 - Situação típica de propagação em áreas urbanas e definição dos parâmetros utilizados no modelo COST-Walfisch-Ikegami

Porém, este modelo ainda é estatístico e não determinístico porque só são considerados valores característicos para a predição. O modelo distingue entre situações de linha de vista, LoS e sem linha de vista, NLoS. No caso com LoS entre a estação base e antena

subscritora, é aplicada uma fórmula simples de atenuação de propagação diferente da atenuação no espaço livre. A calibração desta fórmula foi feita por medidas executadas em cidades Europeias.

- No caso Caso LoS a atenuação é dada por [Winp07]

$$L_p = 42.6 + 26 \cdot \log(d_{[km]}) + 20 \cdot \log(f_{[MHz]}), \quad (6.7)$$

onde a primeira constante é determinada de tal modo que L_p é igual a atenuação no espaço livre para $d = 20$ m. No caso NLoS a atenuação básica é composta por três termos restringido pela atenuação de espaço livre. O primeiro termo representa a atenuação de espaço livre, o segundo termo a atenuação por difracção e dispersão no topo dos edifícios (“*roof-top-to-street diffraction and scatter loss*”) e o terceiro a atenuação já ao nível das ruas devido às múltiplas difracções e reflexões que ocorrem (“*multi-screen diffraction loss*”).

- No caso NLoS a atenuação é dada por [Winp07]

$$L_p = \begin{cases} L_o + L_{rts} + L_{msd} & \text{para } L_{rts} + L_{msd} > 0 \\ L_o & \text{para } L_{rts} + L_{msd} \leq 0 \end{cases}, \quad (6.8)$$

onde a atenuação de espaço livre é dada por

$$L_o = 32.44 + 20 \log(f_{[MHz]}) + 20 \log(d_{[km]}), \quad (6.9)$$

a atenuação “*roof-top-to-street diffraction and scatter*” é dada por

$$L_{rts} = -16.9 - 10 \log(w_{[m]}) + 10 \log(f_{[MHz]}) + 20 \log\left(\left(h_{roof} - h_{RX}\right)_{[m]}\right) + L_{ori}, \quad (6.10)$$

sendo

$$L_{ori} = \begin{cases} -10 + 0.354 \varphi_{[deg]} & \text{para } 0^\circ \leq \varphi < 35^\circ \\ 2.5 + 0.075(\varphi_{[deg]} - 35) & \text{para } 35^\circ \leq \varphi < 55^\circ, \\ 4.0 - 0.114(\varphi_{[deg]} - 35) & \text{para } 55^\circ \leq \varphi < 90^\circ \end{cases}, \quad (6.11)$$

e a atenuação “*multi-screen diffraction*” dada por

$$L_{msd} = L_{bsh} + k_a + k_d \cdot \log(d_{[km]}) + k_f \cdot \log(f_{[MHz]}) - 9 \log(b_{[m]}). \quad (6.12)$$

O termo k_a representa o aumento da atenuação sofrida pelas estações base situadas abaixo do nível médio dos edifícios circundantes. Os termos k_d e k_f controlam a dependência de L_{msd} com a distância e a frequência, respectivamente, onde

$$L_{bsh} = \begin{cases} -18 \cdot \left[1 + (h_{TX} - h_{roof})_{[m]} \right] & \text{para } h_{TX} > h_{roof} \\ 0 & \text{para } h_{TX} < h_{roof} \end{cases}, \quad (6.13)$$

$$k_a = \begin{cases} 54 & \text{para } h_{TX} > h_{roof} \\ 54 - 0.8 \cdot (h_{TX} - h_{roof})_{[m]} & \text{para } d \geq 0.5 \text{ km e } h_{TX} \leq h_{roof} \\ 54 - 0.8 \cdot (h_{TX} - h_{roof})_{[m]} \cdot \frac{d_{[km]}}{0.5} & \text{para } d < 0.5 \text{ km e } h_{TX} \leq h_{roof} \end{cases}, \quad (6.14)$$

$$k_d = \begin{cases} 18 & \text{para } h_{TX} > h_{roof} \\ 18 - 15 \frac{h_{TX} - h_{roof}}{h_{roof} - h_{RX}} & \text{para } h_{TX} \leq h_{roof} \end{cases}, \quad (6.15)$$

$$k_f = -4 + \begin{cases} 0.7 \left(\frac{f_{[MHz]}}{925} - 1 \right) & \text{para cidades medias e zonas suburbanas} \\ 1.5 \left(\frac{f_{[MHz]}}{925} - 1 \right) & \text{para zonas urbanas} \end{cases}. \quad (6.16)$$

O modelo COST-Walfisch-Ikegami é valido para:

- $f = 800$ a 2000 MHz;
- $d = 0.02$ a 5 km;
- $h_{TX} = 4$ a 50 m;
- $h_{RX} = 1$ a 3 m.

Na ausência de dados concretos, são recomendados os seguintes valores:

- $b \in [20, 50] \text{m}$;
- $w = b/2$;
- $h_{roof} = 3 \text{ m} \times \{\text{n}^\circ \text{ de pisos}\} + h_{telhado}$;
- $h_{telhado} = \begin{cases} 3 \text{ m, se inclinado} \\ 0, \text{ se plano} \end{cases}$;
- $\varphi = 90^\circ$.

O modelo do COST 231 Walfisch-Ikegami tem sido verificado na prática nas bandas dos 900 e 1800 MHz e para distâncias compreendidas entre os 100 m e 3 km. Os erros de previsão aumentam consideravelmente para

$$h_{TX} \approx h_{roof}, \quad (6.17)$$

quando comparados com

$$h_{TX} \gg h_{roof}, \quad (6.18)$$

Este modelo não deve ser utilizado com

$$h_{TX} \leq h_{roof}, \quad (6.19)$$

Dado que não garante resultados adequados.

Para além disso, este modelo não deve ser utilizado para previsão de cobertura de micro células. Quando se consideram este tipo de BSs, pensamos em sistemas de antenas colocadas abaixo do topo dos edifícios, mas o termo k_a não considera fenómenos de propagação guiada em ruas cercadas por edifícios nem difracção nos cruzamentos. Os parâmetros b , w e φ não estão dimensionados de uma forma credível para micro células. Logo, os erros de previsão serão bastante elevados.

6.5.2.2 Fundamentos de Modelos de Raio Ópticos

O canal de rádio móvel em ambientes urbanos é caracterizado através de fortes multi-percursos de propagação. Os mecanismos de propagação dominantes nestes cenários são reflexão, difracção, sombreando por obstáculos discretos e as ondas guiadas em ruas.

Com uma abordagem de raios ópticos é possível considerar estes efeitos num modelo propagação.

Como comprimentos de onda menores, isto é frequências elevadas, é considerado, a propagação de onda torna-se semelhante à propagação da luz. É suposto um raio de rádio propagar ao longo de uma linha directa influenciada só por refacção, reflexão, difracção ou espalhamento. Estes são os conceitos de Geométrica Óptica. O critério levado em conta para esta abordagem de modelagem é que o comprimento de onda deveria ser muito menor em comparação com a extensão dos obstáculos considerados, isto é os edifícios para ambientes urbanos.

Nas frequências utilizadas para redes de comunicação móveis este critério é suficientemente cumprido.

6.6 Modelo *Dominant Path*

Os modelos empíricos têm que lidar com o problema de só se considerar o raio directo entre emissor e o receptor. Em cenários urbano este raio pode incluir as difracções sobre topo de telhado (por exemplo o modelo Walfisch-Ikegami) [HWLW03] enquanto que, em cenários *indoor*, o raio é sempre a linha directa entre o Tx e o Rx . Em ambos os cenários, este raio directo não é sempre dominante, sendo alvo de atenuação elevada. Um modelo baseado nestes percursos conduzirá a erros em cenários onde o raio directo apenas contribui de forma reduzida para a potência recebida total. Em contraste com modelos empíricos, as abordagens de raios ópticos calculam (até) centenas de raios para cada receptor.

As contribuições de todos os raios são sobrepostas (na maioria dos casos através de sobreposição incoerente) para obter a potência recebida. Mas na maioria dos casos apenas 2 ou 3 raios contribuem para mais do que 98% da energia, isto é, focando-se sobre estes raios dominantes a precisão seria suficiente [Woel00].

Uma segunda desvantagem de modelos de raio ópticos é a sua elevada dependência relativamente a pequenas inexactidões nas bases de dados. Como são avaliados critérios angulares durante a predição raio óptico, a orientação das paredes é extremamente importante.

Infelizmente, as bases de dados com precisão muito elevada não estão facilmente disponíveis para a maioria das aplicações. Para além das duas desvantagens mencionadas acima, surge ainda o outro problema dos modelos de raio ópticos: ou o

tempo de cálculos é muito longo ou, se termina o pré-processamento [HWLW03], o tempo de cálculos para o pré-processamento é elevado.

Depois de analisar as restrições dos modelos determinísticos de raio óptico, podem ser formulados os requisitos para um novo modelo, Um novo modelo deverá focar no percurso dominante entre o emissor, T_x , e o receptor, R_x , dado que este percurso leva a maior parte da energia. O algoritmo do modelo que é chamado DP (*Dominant Path*), pode ser subdividido em dois passos: determinação dos percursos dominantes (geometria) e predição da atenuação ao longo dos percursos. No primeiro passo, os percursos dominantes são determinados.

A Figura 6.16 apresenta um cenário onde o emissor, T_x , fica situado em qualquer ponto. O percurso dominante de T_x para R_x tem que conduzir, por cantos convexos, ao receptor. Para a determinação do percurso, é calculada uma árvore com todos cantos convexos. Todos os cantos visíveis dos cantos examinados são novos ramos na árvore.

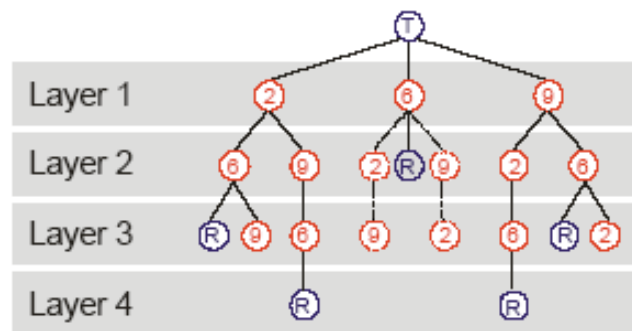


Figura 6.16 - Estrutura da árvore construída através de algoritmo, extraído de [WaSW07]

Como apresentado na Figura 6.16, o canto da árvore começa com os cantos visíveis do T_x . O receptor R_x é também incluído na árvore. O receptor é encontrado na árvore, em cada instante; os cantos ao longo do percurso podem ser determinados seguindo os ramos para atrás de T_x . Na Figura 6.16 mostra-se que existe mais de um percurso entre T_x e R_x .

Depois do cálculo da árvore, o algoritmo tem que decidir qual percurso é o melhor “dominante”. Este processo termina comparando as atenuações dos diferentes percursos um ao outro. A predição atenuação ao longo do percurso é determinada utilizando a expressão seguinte

$$L = 20 \log \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right) + 10p \log(l) + \sum_{i=1}^n f(\theta, i) + \sum_{j=1}^m t_j - \Omega, \quad (6.20)$$

onde L é a atenuação, em dB, de um caminho com um comprimento l em metros; λ é o comprimento de onda, $f(\theta, i)$ é uma função que determina a atenuação de interacção em dB, dada pelo gráfico da Figura 6.17, isto é, a atenuação ao mudar a direcção de propagação; θ é o ângulo entre a direcção anterior e a nova direcção de propagação, i é o número da interacção, por exemplo, $i=2$ significa a segunda interacção neste percurso de propagação. O factor p depende da situação de visibilidade entre o *pixel* actual e o emissor.

A adaptação do valor de p para cada situação permite diferentes expoentes de atenuação e pontos de ruptura individuais que dependem da situação actual. O modelo distingue entre as situações LoS, OLoS (*Obstructed LoS*), isto é pelo menos uma difracção, mas nenhuma transmissão e NLoS (*Non LoS*), isto é pelo menos uma transmissão. Ω é o factor de onda guiada é descrito em [WoLa98].

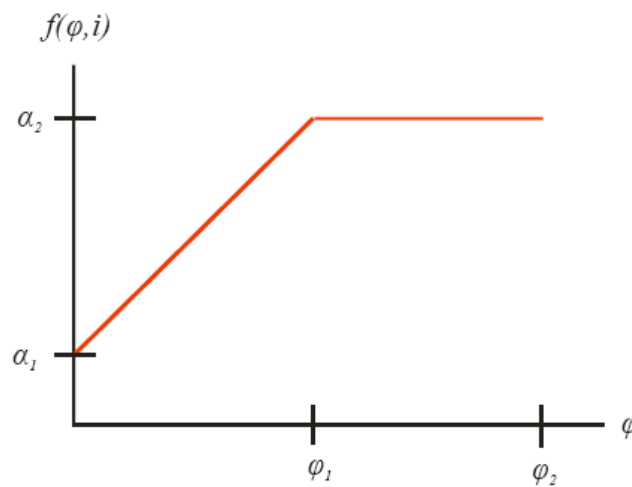


Figura 6.17 - Função para as atenuações de interacção extraído de [WoLa98]

A atenuação devido á reflexão nas paredes ao longo do percurso, bem como devido á distância deles para o percurso, influencia o Ω . Para a determinação da atenuação em cenários *indoor*, as transmissões através das paredes têm que ser consideradas adicionalmente. t_j significa a atenuação de transmissão do número de j paredes, isto é t_2 é, a atenuação de transmissão da segunda parede penetrada pelo percurso dominante [WaWo06].

6.7 Sumário e Conclusões

Neste Capítulo apresentam-se as aplicações da ferramenta de planeamento de redes móveis e sem fios WinProp. Abordam-se os diagramas de radiação das antenas, e as bases de dados criadas para o planeamento. Finalmente, abordam-se sobre os modelos de propagação utilizados na ferramenta WinProp, podendo-se extrair as seguintes conclusões:

- O WinProp é uma ferramenta poderosa de planeamento de redes móveis e sem fios;
- Os diagramas de radiação das antenas e as bases de dados são requisitos fundamentais no planeamento de rede e não podem ter nenhuma falha;
- As bases de dados de vector devem possuir as informações das alturas e material dos edifícios;
- As maiorias dos modelos de propagação utilizados na ferramenta WinProp, ainda não foram testadas para a banda de frequências dos 3.5 GHz;
- A maior parte dos modelos aqui apresentados consideram o emissor e o receptor no plano vertical;
- O modelo DP (*Dominant Path*) só faz o cálculo para o melhor percurso e não contempla os percursos com pequenas contribuições, e tem uma boa precisão na predição comparando com os modelos empíricos;
- O modelo DP tem um tempo de cálculo superior em relação aos modelos empíricos;
- A determinação dos percursos dominantes através do modelo DP do ponto de vista computacional não é uma tarefa muito simples.

Capítulo 7

Planeamento e Optimização de uma Rede Sem Fios IEEE 802.16-2004

Este Capítulo apresenta os cálculos necessários para o planeamento celular de uma rede WiMAX ponto-multiponto que irá abranger todo o concelho da Covilhã incluindo dimensões das células, cálculo de número de canais, etc. Apresenta-se uma abordagem analítica para o padrão de reutilização, factor de reutilização co-canal e a relação portadora-ruído-mais-interferência, $C/(I+N)$ ou SNIR (*Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio*), com o objectivo de minimizarmos a interferência e alcançar modulações de ordem elevada e, conseqüentemente, um elevado ritmo de transmissão. Este planeamento será feito tendo como base o planeamento realizado anteriormente no projecto MobileMAN (*Mobile IP for Broadband Wireless Metropolitan Area Networks*), mas, desta feita, tendo em consideração as especificações do equipamento WiMAX BreezeMAX 3000 da Alvarion, visto ter sido esta a solução encontrada para implementar a rede. Também será apresentada a optimização da localização das estações base já feita no projecto MobileMAN recorrendo a plataforma GIS (*Geographic Information System*). Por fim, será apresentada a optimização das localizações das estações base e área de cobertura para a cobertura da zona metropolitana da cidade da Covilhã.

7.1 O Concelho da Covilhã

O concelho da Covilhã, com pouco mais de 550 km², fica localizada no interior do país, pertence ao distrito de Castelo Branco, estando situada no eixo Norte-Sul entre esta e outra capital de distrito, a norte (cidade da Guarda). Na vertente sudeste da Serra da Estrela, a sua população é de 54506 habitantes. A cidade está localizada a 19.4 km do ponto mais alto de Portugal continental, a Torre (1993 m), e a sua área urbana estende-se entre os 450 e os 800 m de altitude. O clima do município é temperado, com relativa influência mediterrânea, sendo que as precipitações são mais escassas no verão. Os verões apresentam temperaturas amenas, enquanto os invernos têm temperaturas baixas. O frio aumenta conforme a altitude, variando de temperaturas amenas nas partes mais baixas a temperaturas negativas e ocorrência de neve nas zonas mais elevadas. Quanto à vegetação, há o predomínio de bosques, com árvores como o carvalho e a azinheira, entre outras. Entre a vegetação arbustiva, a carqueja é bastante encontrada. A vegetação torna-se escassa em direcção à Torre, Figura 7.1.

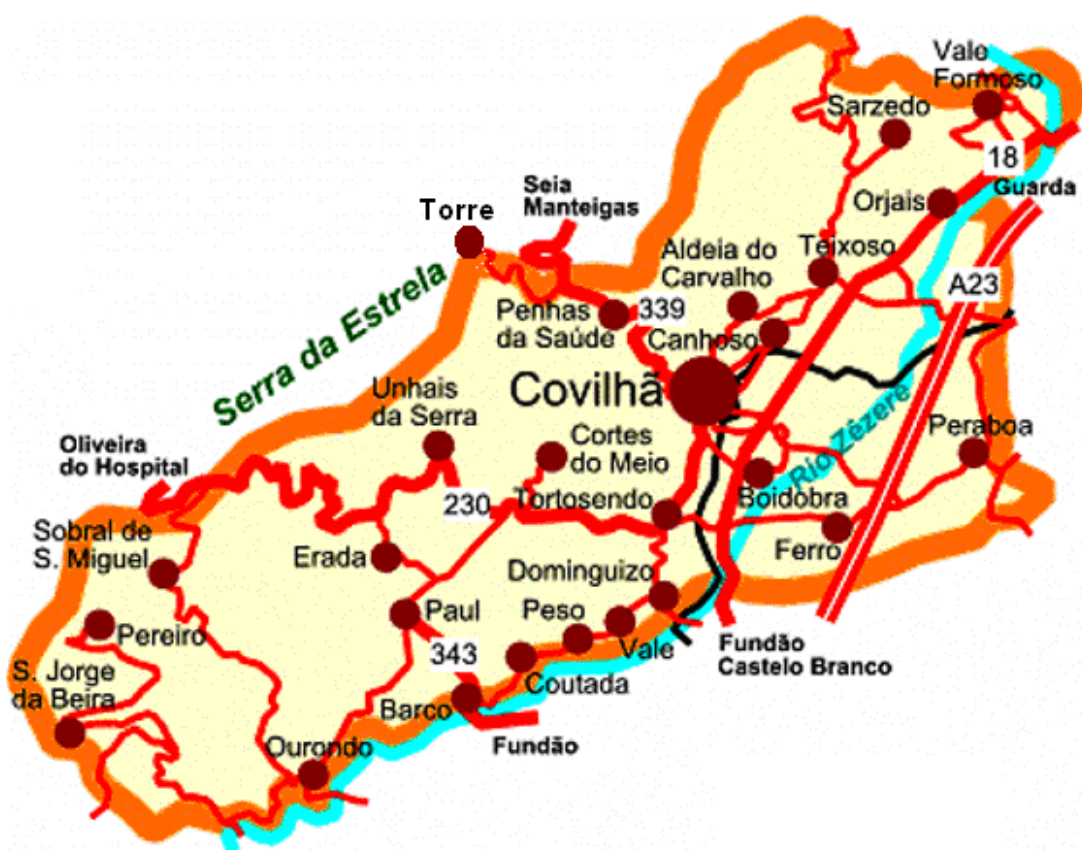


Figura 7.1 - Área em estudo: concelho da Covilhã

7.2 Cálculo do Número de Células

A forma hexagonal utilizada para as células é conceptual, sendo um modelo simplificado de cobertura para cada estação base. A forma hexagonal tem sido universalmente adoptada porque facilita a análise do planeamento celular. A cobertura real de uma célula é conhecida através de cartas geográficas e é determinada a partir de medidas de campo ou modelos de propagação. Embora pareça natural a escolha de um círculo para representar a área de cobertura de uma estação base, este formato geométrico não é utilizado para a área de cobertura de uma célula porque círculos adjacentes não podem ser justapostos sem deixar espaços ou criar regiões sobrepostas. Quando se considera o formato geométrico que pode cobrir uma região sem deixar falhas ou sobreposições, a melhor escolha para o padrão de uma célula recai no hexágono. O raio de cobertura de uma célula, R , corresponde a zona onde a qualidade do sinal ainda permite fornecer um bom serviço.

Como já foi visto anteriormente que o concelho da Covilhã tem uma área de aproximadamente 550 km^2 . Sendo a área do hexágono dada por

$$A_H = 2.5981 \times R^2, \quad (7.1)$$

podemos estimar o número de células, NC , necessárias para a cobertura de toda a área do concelho da Covilhã, dividindo a área total, A_T do concelho pela área do hexágono.

$$NC = \frac{A_T}{A_H} = \frac{550}{2.5981 \times R^2}. \quad (7.2)$$

O raio típico da célula para a norma IEEE 802.16-2004 em ambientes NLoS é de 3 a 10 km. A Figura 7.2 apresenta o número de células necessárias para a cobertura do concelho da Covilhã, em função do raio de cobertura de cada célula.

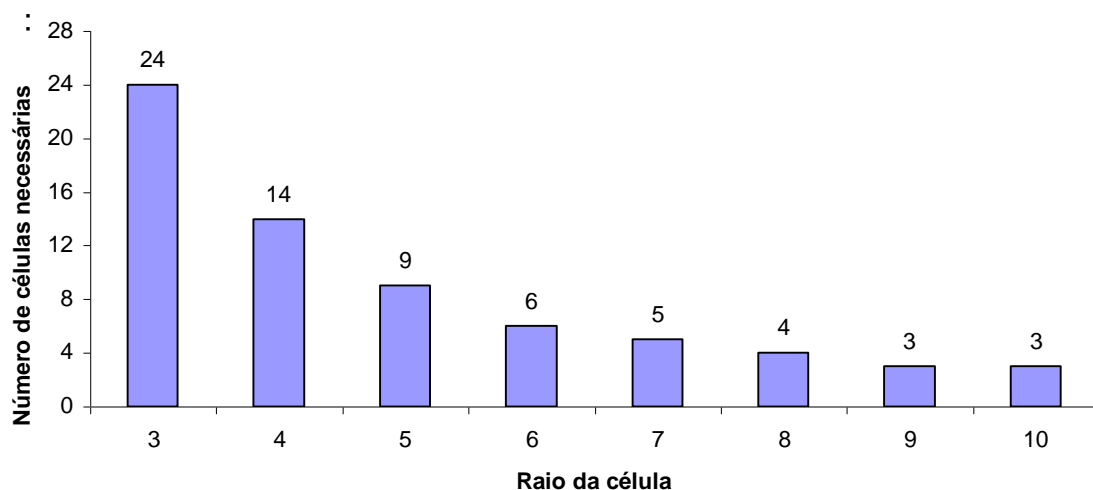


Figura 7.2 - Número de células necessárias para cobrir o concelho da Covilhã em função do raio de cobertura

Pela análise do gráfico da Figura 7.2, podemos verificar que, para os raios de cobertura de 6, 7, 8, 9 e 10 km obtemos um número muito reduzido de células para cobrir o concelho da Covilhã, visto que o terreno é bastante irregular com muitas montanhas o que tornaria o processo de implementação da rede muito complicado. Por outro lado, o raio de cobertura de 3, 4 e 5 km obtém-se um número aceitável de células, 24, 14 e 9 células respectivamente, porém podem existir problemas relacionados com a interferência.

7.3 Cálculo do Número de Canais

No planeamento de uma rede sem fios temos que decidir se vamos utilizar bandas de frequências licenciadas ou não licenciadas. Em qualquer uma das escolhas existem vantagens e desvantagens, cabe aos responsáveis avaliar a melhor opção.

Assim, têm sido feitos esforços para que sejam disponibilizadas as frequências de 2.5, 3.5, 5.8 GHz para o WiMAX. Quanto à largura de banda, espera-se que sejam disponibilizados entre 20 e 30 MHz para a ligação ascendente e outro tanto para a ligação descendente por operador [Shak06]. Neste planeamento vamos utilizar as bandas de frequências disponíveis no equipamento da Alvarion, Tabela 7.1. Teremos também em consideração a licença de frequências atribuída a Universidade da Beira Interior pela ANACOM (Autoridade Nacional de Comunicações) para o projecto MobileMAN, para posteriormente tiramos uma conclusão.

Tabela 7.1 - Frequências disponíveis na banda dos 3.5 GHz do equipamento da Alvarion [Alva06]

Séries (banda)	Separação Duplex	Frequência ascendente (UL)	Frequência descendente (DL)
3.5a	100 MHz	3399.5 a 3453.5 MHz	3499.5 a 3553.5 MHz
3.5b	100 MHz	3450 a 3500 MHz	3550 a 3600 MHz

Para a banda de frequências dos 3.5a temos uma largura de banda de 54 MHz tanto para a ligação ascendente como para a ligação descendente. Para a banda de frequências dos 3.5b temos uma largura de banda de 50 MHz tanto para a ligação ascendente como para a ligação descendente.

A licença atribuída pela ANACOM disponibiliza uma largura de banda de 24.5 MHz para ligação ascendente e outra largura de banda igual para ligação descendente.

Sendo assim podemos calcular o número total de canais, NTC , disponíveis, pela seguinte fórmula

$$NTC = \frac{LB}{\Delta f_{UP} + \Delta f_{DOWN}}, \quad (7.3)$$

onde LB é a largura de banda total disponível, Δf_{UP} é a largura de banda para a ligação ascendente, UL (*Uplink*) e Δf_{DOWN} é a largura de banda para a ligação descendente DL (*Downlink*), todos em MHz. A f_{UP} e a f_{DOWN} são ambos iguais a 3.5 MHz [Alva06].

Dado que a ANACOM nos atribuiu as faixas de 3443-3467.5 e 3543-3567.5 MHz e utilizando f_{UP} e f_{DOWN} igual a 3.5 MHz, aplicando a (7.3) concluiu-se que se consegue um total de 7 canais (portadoras). No equipamento BreezeMAX 3000, para o caso da banda dos 3.5a aplicando a (7.3) e utilizando f_{UP} e f_{DOWN} igual a 3.5 MHz, obtemos um total de 16 canais e para o caso da banda dos 3.5b obtemos um total de 15 canais. A Tabela 7.2 [Alva06] apresenta as especificações do equipamento.

Tabela 7.2 - Esquemas de modulação e codificação com o SNR mínimo e os respectivos ritmos de transmissão [Alva06]

C/N	Nível	Modulação	Net PHY Bit Rate [Mbps]
$C/N > 21$ dB	8	64 QAM – 3/4	12.27
19.8 dB $< C/N < 21.0$ dB	7	64 QAM – 2/3	11.29
15.0 dB $< C/N < 19.8$ dB	6	16 QAM – 3/4	8.47
12.2 dB $< C/N < 15.0$ dB	5	16 QAM – 1/2	5.64
8.9 dB $< C/N < 12.2$ dB	4	QPSK – 3/4	4.23
6.5 dB $< C/N < 8.9$ dB	3	QPSK – 1/2	2.82
5.5 dB $< C/N < 6.5$ dB	2	BPSK – 3/4	2.12
3.3 dB $< C/N < 5.5$ dB	1	BPSK – 1/2	1.41

7.4 Cálculo da Cobertura e do Padrão de Reutilização

A escolha criteriosa de canais de rádio apropriados para cada estação base é um processo importante, muito mais difícil na prática do que na teoria, principalmente devido à irregularidade e a topologia urbana envolvente. Para uma eficiente utilização do espectro de rádioeléctrico é necessário adoptar um esquema para a reutilização de frequências que seja consistente com os objectivos de garantir a cobertura, aumentar a capacidade do sistema e minimizar a interferência.

Nesta Secção apresenta-se uma análise que envolve o padrão de reutilização, factor de reutilização co-canal e o raio das células para os vários níveis de modulação e codificação. As conclusões extraídas contribuirão para uma escolha adequada do padrão de reutilização e um planeamento de frequências eficiente.

Sendo a relação interferência ruído, M , definida por

$$M = \frac{I}{N} \quad (7.4)$$

e a equação para a da relação portadora-ruído-mais-interferência utilizada no dimensionamento é dada por

$$\frac{C}{(N+I)} = \left(\frac{C}{N} \right)_{\min}, \quad (7.5)$$

a equação (7.5) pode ser escrita das seguintes formas

$$\frac{C}{N} = \left(\frac{C}{N} \right)_{\min} (1+M), \quad (7.6)$$

e

$$\frac{C}{I} = \left(\frac{C}{N} \right)_{\min} (1 + M^{-1}). \quad (7.7)$$

Da equação (7.6) resulta que

$$M = \frac{(C/N)}{(C/N)_{\min}} - 1, \quad (7.8)$$

onde $C = P_R(R)$ é calculada pela fórmula de Friis modificada com $\gamma = 3$ (ambientes urbanos, a hipótese assumida nesta Secção).

Estes valores de $M(R)$ são proporcionais à interferência que é ainda possível tolerar para a distância de cobertura R , cumprindo-se ainda os requisitos de qualidade para dado tipo de modulação/codificação.

Para a cobertura com células hexagonais, assume-se que no DL, dado que a distância de reutilização medida é D , Figura 5.4, a relação-portadora-interferência é dada por

$$\frac{C}{I} = \frac{rcc^\gamma}{6}, \quad (7.9)$$

onde rcc é o factor de reutilização;

enquanto que no caso do UL, Figura 7.3 é dada por

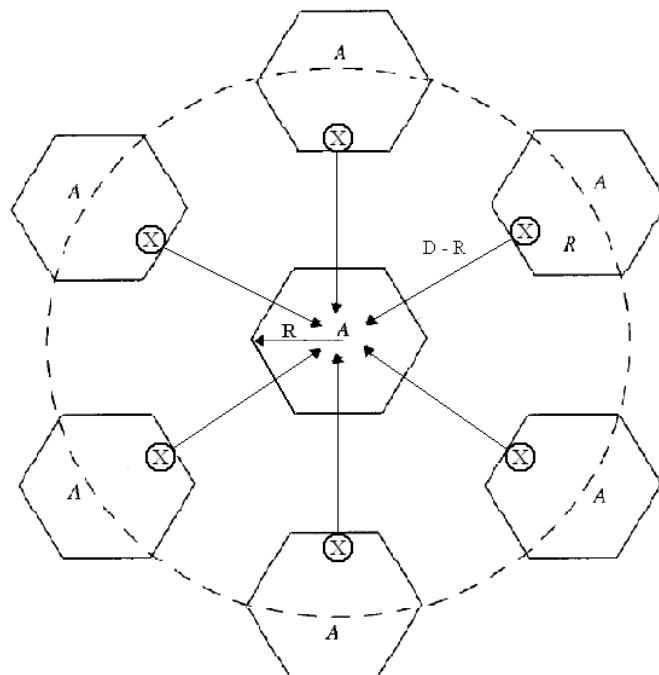


Figura 7.3 - Interferência co-canal no UL (pior caso)

$$\frac{C}{I} = \frac{(rcc-1)^\gamma}{6}. \quad (7.10)$$

Substituindo (7.9) em (7.7), obtém-se a seguinte equação para o factor de reutilização, $rcc=D/R$, no sentido descendente, DL

$$rcc = \sqrt[\gamma]{6(1+M^{-1})\left(\frac{C}{N}\right)_{\min}}. \quad (7.11)$$

Por outro lado, substituindo (7.10) em (7.7), obtém-se a seguinte equação no sentido ascendente, UL

$$rcc = \sqrt[\gamma]{6(1+M^{-1})\left(\frac{C}{N}\right)_{\min}} + 1. \quad (7.12)$$

O padrão de reutilização é obtido a partir da seguinte expressão

$$k = \frac{rcc^2}{3}. \quad (7.13)$$

- **Assíntota Horizontal**

Da (7.8), formalmente quando $R \rightarrow 0$ a relação $M \rightarrow +\infty$. Para calcular a assíntota horizontal do gráfico de $rcc(R)$ tem que se considerar a hipótese ($R \rightarrow 0$).

Assim, quando $M^{-1} \rightarrow 0$ e no caso do DL obtém-se

$$rcc \rightarrow \sqrt[\gamma]{6\left(\frac{C}{N}\right)_{\min}}. \quad (7.14)$$

Por sua vez, no caso do UL obtém-se (também quando $R \rightarrow 0$)

$$rcc \rightarrow \sqrt[\gamma]{6\left(\frac{C}{N}\right)_{\min}} + 1. \quad (7.15)$$

Conclui-se que o padrão de reutilização, k , para dado expoente de propagação, só depende do tipo de modulação/codificação e da geometria de interferência celular de ligação correspondente, DL ou UL.

- **Assíntota Vertical**

Existem limites para a cobertura que estão associadas a relação portadora-ruído no receptor na fronteira da célula.

Dado que M representa a interferência que ainda pode ser tolerada para um dado R , no limite, a distância de cobertura máxima a partir do qual já não pode ser tolerada qualquer interferência é obtida quando $I(R) \rightarrow 0$, ou seja, quando $M(R) \rightarrow 0$. Assim, a assíntota vertical dos gráficos de $M(R)$ e $rcc(R)$ é obtida quando $M(R) \rightarrow 0$, ou seja, é obtida resolvendo a equação

$$M = \frac{(C(R)/N)}{(C/N)_{\min}} - 1 = 0 \quad (7.16)$$

Ou, de forma simplificada

$$\frac{C(R)}{N} = \left(\frac{C}{N} \right)_{\min} . \quad (7.17)$$

Portanto

$$R_{\text{assíntota}} = R_{M \rightarrow 0} \quad (7.18)$$

Note-se que $M \rightarrow 0$ corresponde a $M_{[dB]} \rightarrow -\infty$. Comparando a equação (7.17), que é válida para $M \rightarrow 0$, com a equação (7.6), conclui-se que a abordagem de apenas considerar a relação portadora-ruído para determinar a distância de cobertura, R , é inadequada em sistemas onde a interferência é relevante, pois a equação (7.12) corresponde a uma relação interferência-ruído, M , nula. Se se dimensionar-se um sistema celular desta forma não ficaria nenhuma margem para intrferência contabilizada através de $M = I/N$.

Finalmente, pode-se concluir que a distância de cobertura máxima, correspondente à assíntota vertical, $R_{\text{assíntota}}$, para dado expoente de propagação, depende não só do tipo de modulação/codificação, mas também do ruído, N ; daí a redução do nível da potência de ruído, através da sub-canalização ser tão importante.

Aplicando (7.8) obtém-se o gráfico da relação interferência-ruído, M , Figura 7.14. A assíntota vertical, $R_{\text{assíntota}}$, é obtida a partir de (7.16) e é igual para ambos os sentidos de ligação.

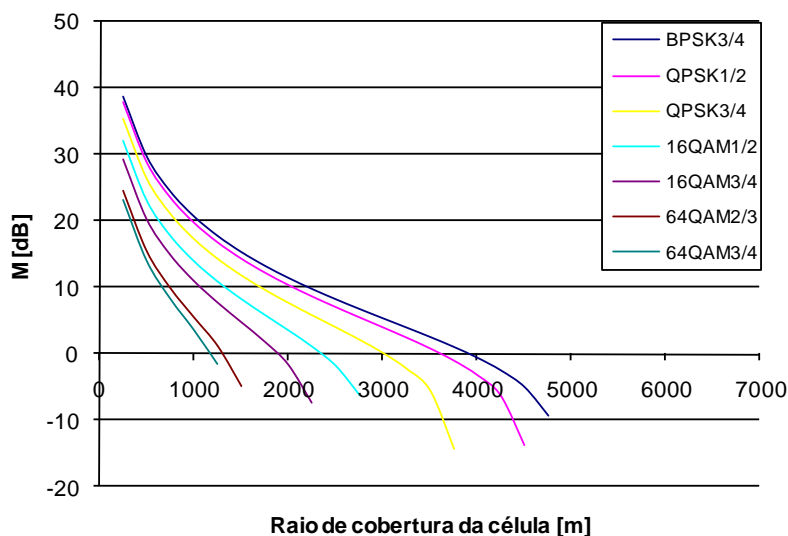


Figura 7.4 - Relação interferência-ruído em função do raio de cobertura sem sub-canalização

A Tabela 7.3 apresenta-se os valores de R correspondente às assíntotas verticais do gráfico de M , para ambos os sentidos, descendente, DL e ascendente, UL, (dado que não há diferenças) sem sub-canalização.

Tabela 7.3 - Valores da assíntota vertical sem sub-canalização

Nível	Modulação	R [m]
1	BPSK $\frac{1}{2}$	5814.86
2	BPSK $\frac{3}{4}$	4911.41
3	QPSK $\frac{1}{2}$	4548.55
4	QPSK $\frac{3}{4}$	3783.32
5	16-QAM $\frac{1}{2}$	2936.79
6	16-QAM $\frac{3}{4}$	2368.86
7	64-QAM $\frac{2}{3}$	1638.85
8	64-QAM $\frac{3}{4}$	1494.65

Analisando o gráfico da Figura 7.4 e a Tabela 7.3, concluí-se que as assíntotas verticais (distância de cobertura máxima) tomam menor valor para as modulações de ordem superior.

Aplicando (7.11) e (7.13) obtemos os gráficos das Figuras 7.5 e 7.6 respectivamente.

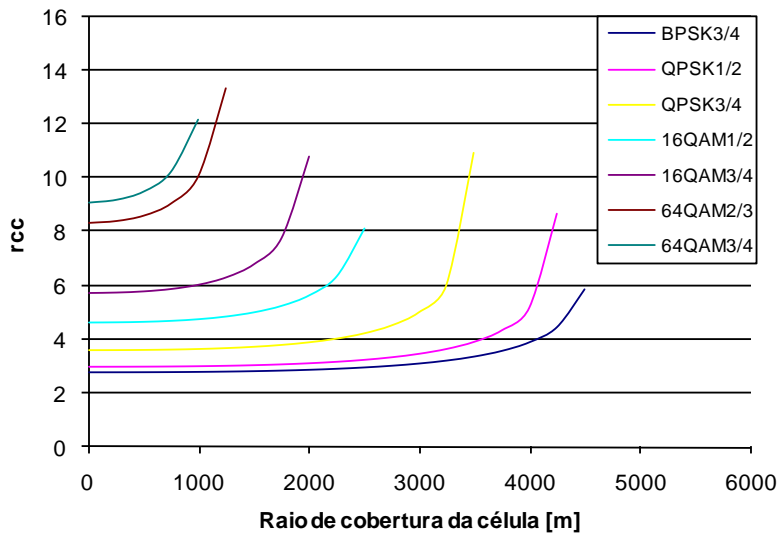


Figura 7.5 - Variação do factor de reutilização co-canal com o raio de cobertura da célula para vários níveis de modulação/codificação no DL

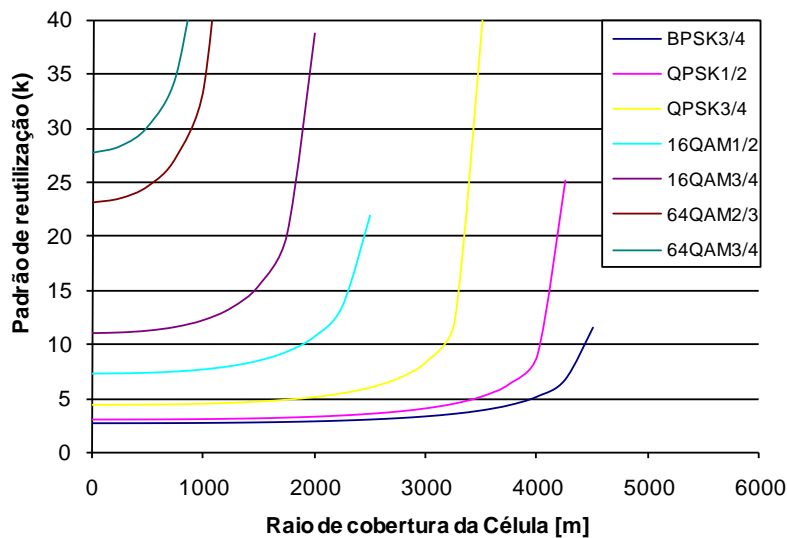


Figura 7.6 - Variação do padrão de reutilização com o raio de cobertura da célula para vários níveis de modulação/codificação no DL

Analisando os gráficos das Figuras 7.5 e 7.6, verificamos que, com um padrão de reutilização igual a 7, conseguimos atingir a modulação QPSK $\frac{3}{4}$ na fronteira da célula para $R \leq 2.7$ km e conseguimos atingir a modulação de ordem média (16-QAM $\frac{1}{2}$) até um raio de cobertura 1.2 km.

A Figura 7.7 apresenta os resultados para o UL, que são mais restritivos, dado que exigem padrões de reutilização superiores.

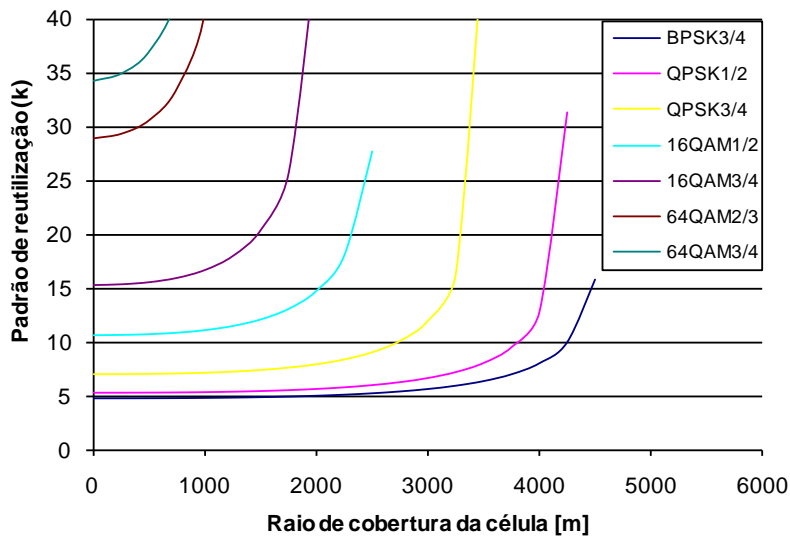


Figura 7.7 - Variação do padrão de reutilização com o raio de cobertura da célula para vários níveis de modulação/codificação no UL

Analisando o gráfico da Figura 7.7, verificamos que, no sentido ascendente, para um padrão de reutilização igual a 7, só conseguimos alcançar modulação de ordem inferior, QPSK $\frac{3}{4}$, até um raio inferior a 2 km. Podemos observar que no sentido ascendente, UL, para $k = 7$ não conseguimos alcançar a modulação 16-QAM $\frac{1}{2}$ como no sentido descendente.

Nas Secções seguintes abordaremos algumas técnicas para melhorar a capacidade e a cobertura, tanto no sentido ascendente como no sentido descendente.

7.4.1 Cálculo do Padrão de Reutilização com Sub-Canalização no UL

Como vimos na Secção anterior, com antenas omnidireccionais, no sentido ascendente com $k = 7$ só conseguimos alcançar as modulações de ordem inferior. Como forma de solucionar este problema podemos utilizar a sub-canalização no sentido ascendente, UL, que é uma característica opcional da norma IEEE 802.16-2004. Ao contrário da versão móvel, a norma IEEE 802.16-2004 não suporta sub-canalização no sentido descendente, DL, só permite a sub-canalização no sentido ascendente, UL. Na norma IEEE 802.16-

2004, a sub-canalização no UL permite, à estação subscritora, transmitir utilizando só uma pequena fracção (1/16) da largura da banda atribuída, através da estação base.

Utilizando um factor de 1/16 para a largura de banda resultante da sub-canalização e aplicando (7.12), obtemos o gráfico da Figura 7.8. A Figura 7.9 apresenta a o gráfico da relação interferência ruído, M , com a sub-canalização no UL.

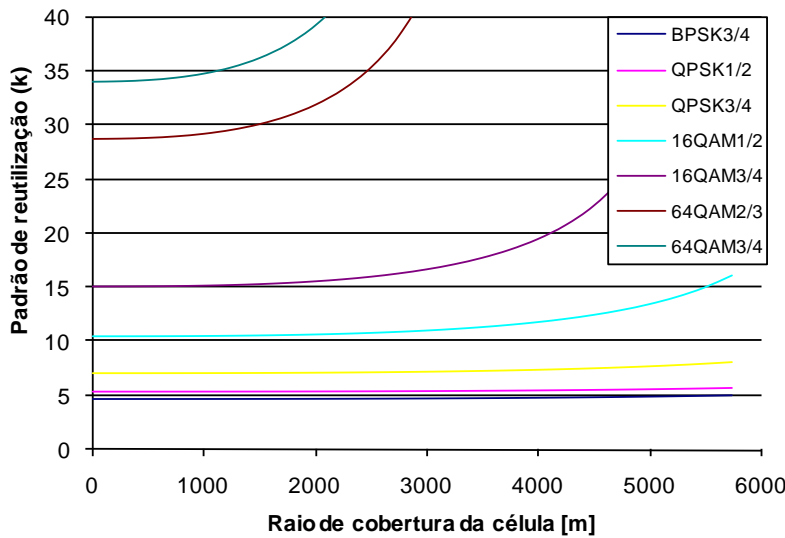


Figura 7.8 - Variação do padrão de reutilização com o raio de cobertura da célula para vários níveis de modulação/codificação com sub-canalização no UL

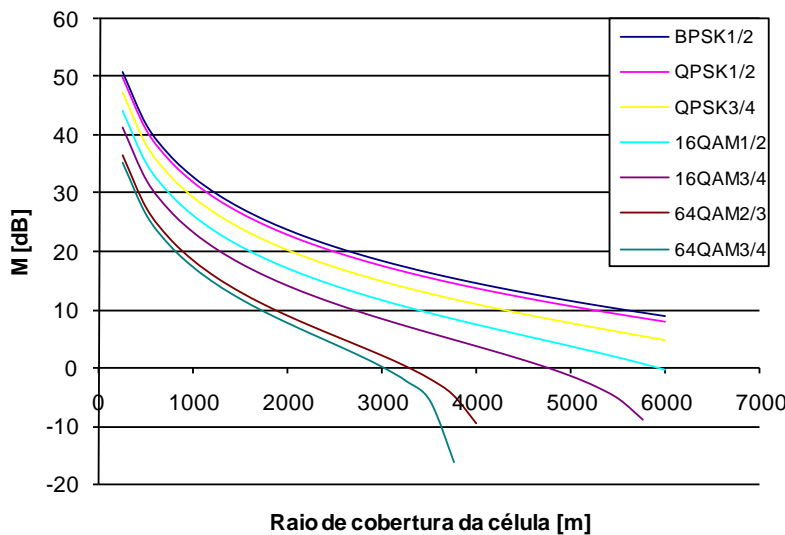


Figura 7.9 - Relação interferência-ruído em função do raio de cobertura com sub-canalização

Tabela 7.4 - Valores da assíntota vertical com sub-canalização

Nível	Modulação/Codificação	R [m]
1	BPSK $\frac{1}{2}$	14652.51
2	BPSK $\frac{3}{4}$	12375.98
3	QPSK $\frac{1}{2}$	11461.63
4	QPSK $\frac{3}{4}$	9533.36
5	16-QAM $\frac{1}{2}$	7400.25
6	16-QAM $\frac{3}{4}$	5969.16
7	64-QAM $\frac{2}{3}$	4129.65
8	64-QAM $\frac{3}{4}$	3766.28

Analisando o gráfico da Figura 7.8, verificamos que, em relação ao caso anterior (sem sub-canalização), não há aumento da capacidade, mas conseguiu-se aumentar consideravelmente a área de cobertura. Isto é, para $k = 7$ consegue-se na mesma atingir a modulação/codificação QPSK $\frac{3}{4}$, mas o raio de cobertura aumenta de 2 km para aproximadamente 5 km. Verificamos também que a modulação/codificação QPSK $\frac{1}{2}$ é suportada até um raio de cobertura de 6 km.

Analisando o gráfico da Figura 7.9 e a Tabela 7.4, verifica-se que os valores das assíntotas horizontais aumentam para mais do dobro em relação ao caso sem sub-canalização, Isto é, a área de cobertura é superior com a utilização de sub-canalização.

7.4.2 Cálculo do Padrão de Reutilização com Sectorização

Dado que a sub-canalização não permite aumentar o padrão de reutilização mas apenas a cobertura há que explorar outras técnicas que possibilitem o aumento da capacidade.

Um dos métodos utilizados para aumentar a capacidade do sistema (através da redução do padrão de reutilização) é a sectorização. Uma das soluções que será adoptada neste trabalho é a sectorização de 120° , ou seja, a utilização de três antenas sectoriais de 120° . A Figura 7.10 apresenta o gráfico da variação do padrão de reutilização de frequências com o raio de cobertura da célula para vários tipos de modulação/codificação.

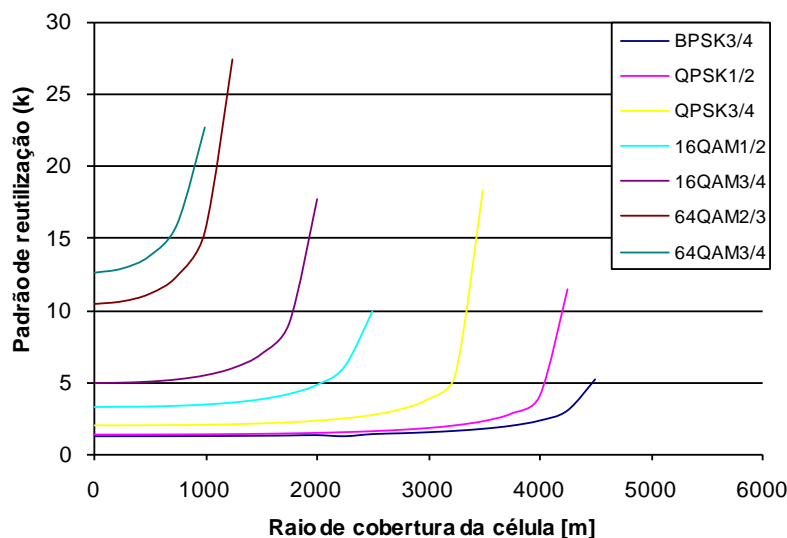


Figura 7.10- Variação do padrão de reutilização com o raio de cobertura da célula para vários tipos de modulação/codificação com sectorização no DL

Da análise da Figura 7.10 verificamos claramente que, com a sectorização, conseguimos melhorar significativamente os resultados anteriormente apresentados dado que os padrões de reutilização têm uma redução importante. Para o padrão de reutilização igual a 7, por exemplo conseguem-se alcançar, para a modulação/codificação (BPSK $\frac{1}{2}$ e QPSK $\frac{3}{4}$) um raio de cobertura de 6.0 km. Podemos verificar também que, para a modulação/codificação 16-QAM $\frac{1}{2}$, passamos de um raio de 1.2 km para 2.2 km. Adicionalmente, com um padrão de reutilização igual a 3 alcançamos, para as modulações de ordem inferior, um raio de aproximadamente 6.0 km.

Podemos concluir que, com a sectorização consegue-se melhorar a capacidade do sistema bem como minimizar a interferência.

7.4.3 Cálculo do k com Sectorização e Sub-Canalização

Nas Secções anterior verificamos que a utilizando a opção de sub-canalização aumentamos a cobertura e utilizando a sectorização aumentamos a capacidade do sistema nesta Secção iremos utilizar a sub-canalização e a sectorização simultaneamente para conseguirmos melhorar a capacidade e a cobertura do sistema.

A Figura 7.11 apresenta o gráfico da variação do padrão de reutilização de frequências com o raio da célula para várias modulações com sectorização e sub-canalização.

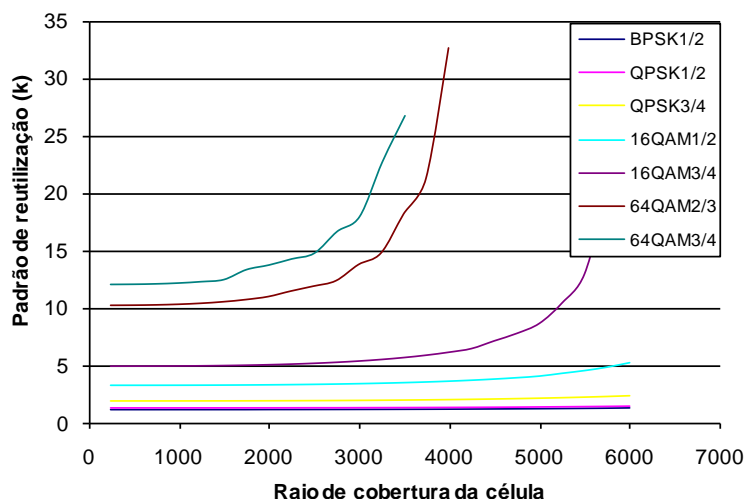


Figura 7.11 - Variação do padrão de reutilização com o raio de cobertura da célula para vários níveis de modulação/codificação com sectorização e sub-canalização no UL

Analisando o gráfico da Figura 7.11 verificamos que o sistema melhora significativamente com a utilização do método de sectorização e a sub-canalização. Isto é, neste caso com um padrão de reutilização de 7, conseguimos alcançar a modulação/codificação de ordem média (16-QAM $\frac{3}{4}$) até um raio de cobertura de 4.3 km. Verificamos também que é possível alcançar a modulação 16-QAM $\frac{1}{2}$ até um raio de cobertura de 6.0 km.

Utilizando estes dois métodos verificamos que com um padrão de reutilização igual a 3, conseguimos alcançar as modulações de ordem inferiores como por exemplo, BPSK $\frac{1}{2}$, QPSK $\frac{1}{2}$ e QPSK $\frac{3}{4}$ para raios raios de cobertura superiores a 6.0 km.

Concluimos assim que a utilização de sectorização permite reduzir o padrão de reutilização enquanto que a sub-canalização permite melhorar a cobertura nos sistemas WiMAX. A redução do padrão de reutilização corresponde de forma directa a um aumento de capacidade, e não à melhoria de cobertura, embora de forma indirecta também permita melhorar a capacidade de sistema, dado que se utiliza a modulação e codificação adaptativa.

7.5 Minimização de Interferências

Os sistemas de comunicações móveis e sem fios possuem dimensionamento e desempenho fortemente afectados pelo ruído e interferência. O planeamento do sistema deve-se focar na atenuação da interferências intra- e inter-sistémicas. O primeiro tipo é

gerada dentro do próprio sistema, especialmente em malhas muito densas de ligações ponto-multiponto, e também quando se realiza reutilização de frequências em sistemas ponto-multiponto. As interferências inter-sistémicas são geradas fora do sistema, por sistemas em bandas de frequência concorrentes.

Nesta Secção apresenta-se uma análise sobre a relação portadora ruído mais interferência, $C/(I+N)$, ou SNIR, e o factor de reutilização co-canal para minimizarmos a interferência e alcançarmos modulações de elevada ordem.

7.5.1 Cálculo da SNIR

As Figuras 7.12 e 7.13 apresentam os gráficos da relação portadora-ruído-mais-interferência, SNIR em relação ao factor de reutilização co-canal, r_{cc} para vários raios de cobertura da célula nos sentidos descendente, DL e ascendente, UL respectivamente.

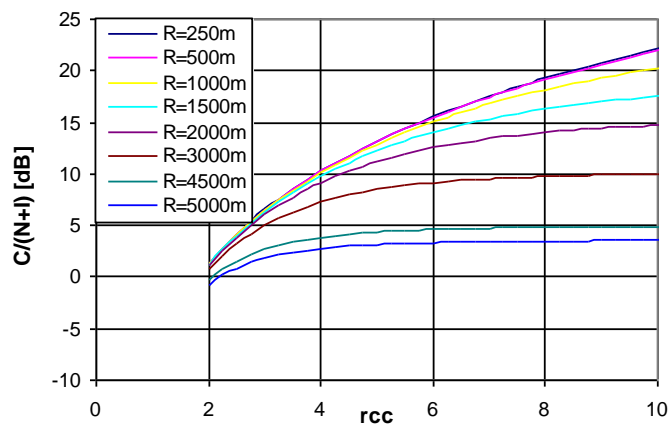


Figura 7.12 - Variação de SNIR com o factor de reutilização co-canal para vários raios de cobertura da célula no DL

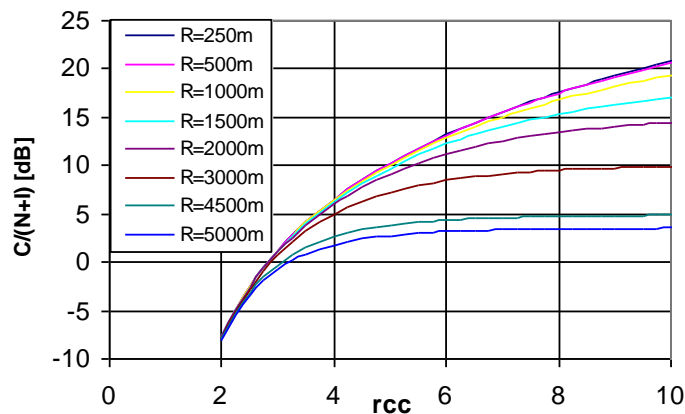


Figura 7.13 - Variação de SNIR com o factor de reutilização co-canal para vários raios de cobertura da célula no UL

Analisando o gráfico da Figura 7.12 verificamos, que no DL com raios da célula maiores é possível utilizar qualquer factor de reutilização co-canal, mas teremos valores muito baixo de $C/(N+I)$ e, conseqüentemente uma modulação de ordem baixa. No caso do gráfico da Figura 7.13, verificamos que, no UL para raios da célula superiores só é possível utilizar padrões de reutilização de 7 para obter a modulação ordem inferior. Dos gráficos das Figuras 7.12 e 7.13 concluimos que com antenas omnidireccionais temos de ter no mínimo um $rcc = 4.58$, padrão de reutilização de 7 e raio da célula de 3 km.

As Figuras 7.14 e 7.15 apresentam o ritmo de transmissão em relação ao factor de reutilização co-canal, rcc , para vários raios de cobertura da célula nos sentidos descendente, DL e ascendente, UL respectivamente.

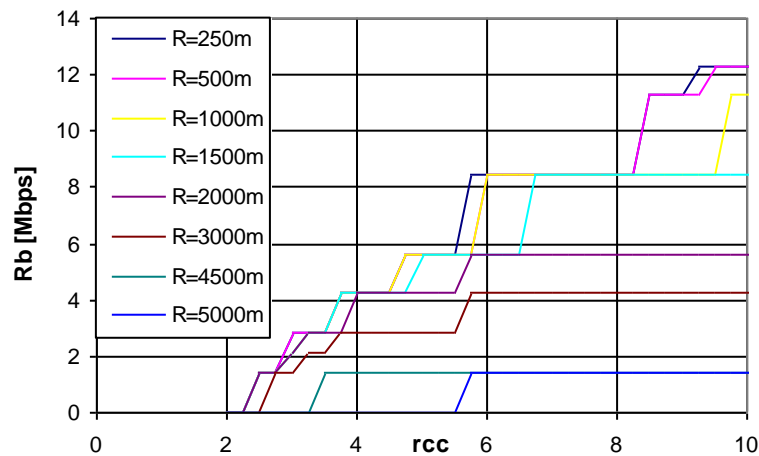


Figura 7.14 - Variação do ritmo de transmissão com o factor de reutilização co-canal para vários raios de cobertura da célula no DL

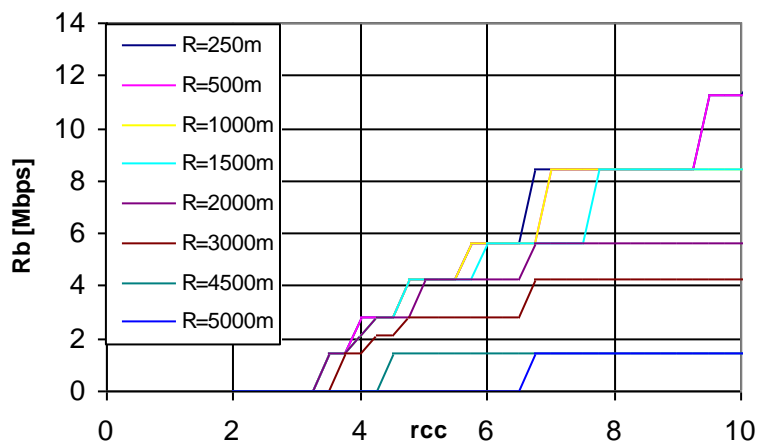


Figura 7.15 - Variação do ritmo de transmissão com o factor de reutilização co-canal para vários raios de cobertura da célula no UL

Analisando os gráficos das Figuras 7.14 e 7.15, verificamos que para um raio de cobertura da célula de 5 km só conseguimos ter ritmos de transmissão baixos na ordem dos 1.41 Mbps (modulação BPSK) e com padrão de reutilização maior do que 7, para o caso de sentido descendente e maior do que 12 para o caso do sentido ascendente. Com o padrão de reutilização de 7 ($rcc = 4.58$) consegue-se atingir modulações de ordem inferior QPSK $\frac{3}{4}$ (4.23 Mbps) com raio da célula de 2 km e atingir modulações de ordem média 16-QAM $\frac{1}{2}$ (5.64 Mbps) com raio da célula de 1.5 km no DL. No sentido ascendente, UL, com o padrão de reutilização de 7 ($rcc = 4.58$) consegue-se atingir modulações de ordem inferior QPSK $\frac{1}{2}$ (2.82 Mbps) com raio da célula de 3 km. Dos gráficos das Figuras 7.14 e 7.15 concluímos que para atingirmos a modulação de ordem média e elevada com antenas omnidireccionais temos de ter um elevado número de frequências. Para solucionarmos este problema temos de utilizar a sub-canalização ou a sectorização o que veremos a seguir.

7.5.2 Cálculo da SNIR com Sub-Canalização no UL

Como foi dito anteriormente a utilização da opção de esquemas de sub-canalização é uma das formas de melhorar os resultados obtidos na Secção anterior. A Figura 7.16 apresenta o cálculo da relação portadora-ruído mais interferência, $C/N+I$ em relação ao factor de reutilização co-canal, rcc para vários raios de cobertura da célula com sub-canalização no sentido ascendente, UL. A Figura 7.17 apresenta o ritmo de transmissão em relação ao factor de reutilização co-canal, rcc , para vários raios de cobertura da célula com sub-canalização no sentido ascendente, UL.

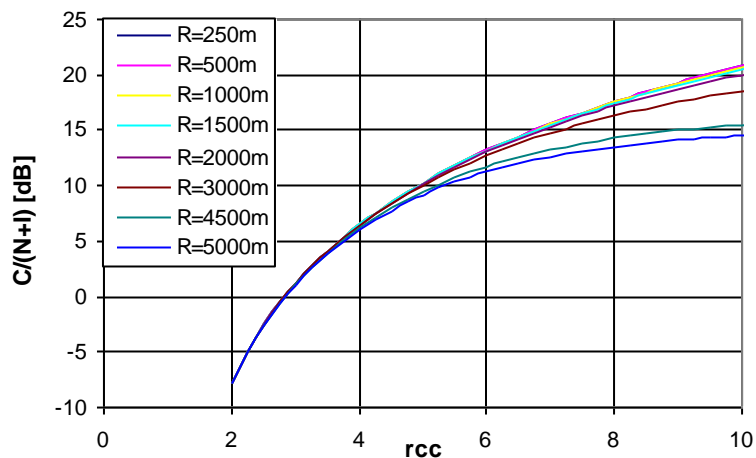


Figura 7.16 - Variação de SNIR com o factor de reutilização co-canal para vários raios de cobertura da célula com sub-canalização no UL

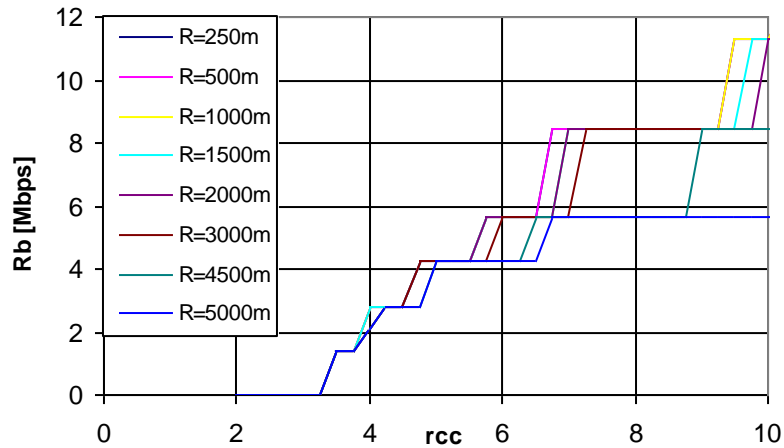


Figura 7.17 - Variação do ritmo de transmissão com o factor de reutilização co-canal para vários raios de cobertura da célula com sub-canalização no UL

Analisando os gráficos das Figuras 7.16 e 7.17, verificamos que os resultados melhoram bastante em relação ao caso sem a sub-canalização no sentido ascendente, UL.

A partir da Figura 7.17 verifica-se que com o padrão de reutilização igual a 7 ($rcc = 4.58$) com um raio de cobertura da célula de 3 km passamos de 2.82 Mbps para 4.23 Mbps com sub-canalização. Verificamos também que com um raio de 5 km é possível suportar a modulação QPSK $3/4$, o que não acontecia sem a sub-canalização.

7.5.3 Cálculo da SNIR com Sectorização

Com vimos anteriormente uma das técnicas para melhorar o ritmo de transmissão é a sectorização. Esta será a técnica adoptada neste planeamento celular.

As Figuras 7.18 e 7.19 apresentam os gráficos da relação portadora-ruído-mais-interferência, $C/(N+I)$ e o ritmo de transmissão em relação ao factor de reutilização co-canal, rcc , para vários raios de cobertura da célula com sectorização de 120° .

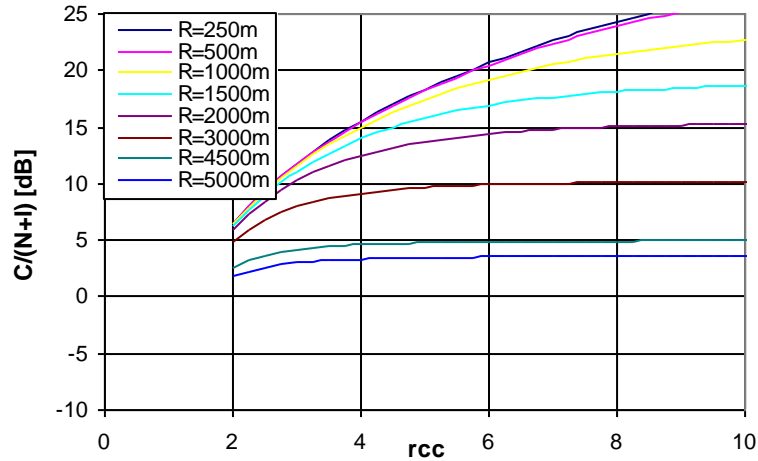


Figura 7.18 - Variação de SNIR com o factor de reutilização para vários raios de cobertura da célula com sectorização de 120°

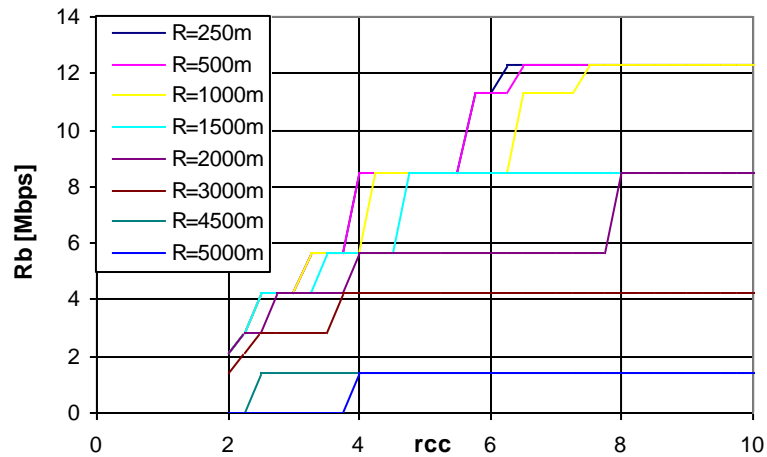


Figura 7.19 - Variação do ritmo de transmissão com o factor de reutilização co-canal para vários raios de cobertura da célula com sectorização de 120°

Da análise dos gráficos das Figuras 7.18 e 7.19 verificamos que os resultados melhoram significativamente em relação ao caso sem sectorização. Com padrão de reutilização igual a 7 ($rcc = 4.58$) passamos de 2.82 Mbps para raio de cobertura de 2 km para 4.23 Mbps para raio de cobertura de 3 km e com raio de cobertura de 2 km conseguimos alcançar um ritmo de transmissão de 5.64 Mbps.

Com o raio de cobertura da célula de 1.5 km suporta-se a modulação de ordem média, 16-QAM $3/4$ (8.47 Mbps).

7.5.4 Cálculo da SNIR com Sectorização e Sub-Canalização

Nas Secções anteriores utilizamos os métodos de sectorização e a opção de sub-canalização individualmente para melhorar os resultados do ritmo de transmissão, nesta secção vamos utilizar os dois métodos simultaneamente. As Figuras 7.20 e 7.21 apresentam os gráficos da relação portadora-ruído-mais-interferência, $C/(N+I)$ e o ritmo de transmissão em relação ao factor de reutilização co-canal, r_{cc} , para vários raios de cobertura da célula com sectorização de 120° e sub-canalização.

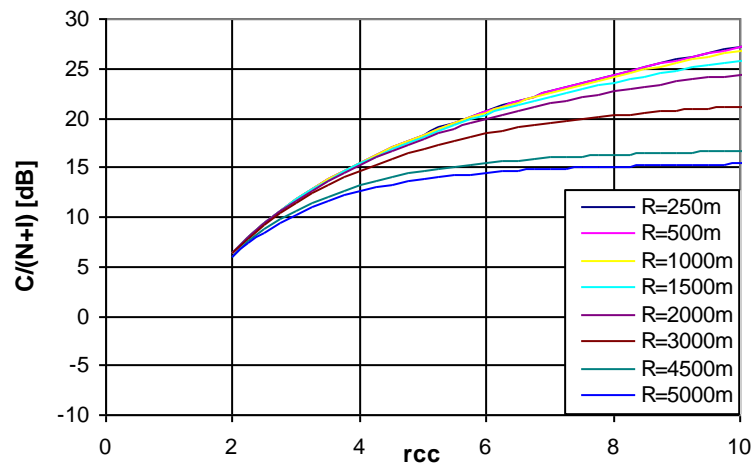


Figura 7.20 - Variação da SNIR com o factor de reutilização para vários raios de cobertura da célula com sectorização de 120° e sub-canalização

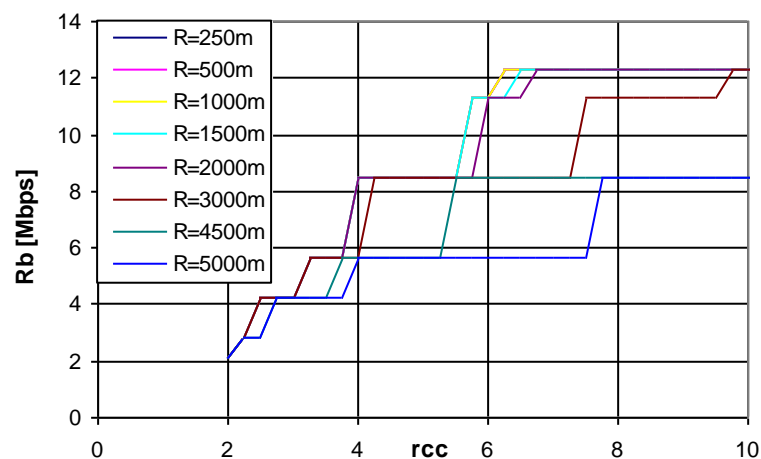


Figura 7.21 - Variação do ritmo de transmissão com o factor de reutilização co-canal para vários raios de cobertura da célula s com sectorização de 120° e sub-canalização

Dos gráficos das Figuras 7.20 e 7.21 verificamos que os resultados melhoram significativamente em relação aos casos anteriores. Em relação ao caso da Figura 7.13 conseguimos alcançar uma modulação de ordem média, 16-QAM $\frac{1}{2}$ que corresponde a um ritmo de transmissão de 5.64 Mbps com um raio de cobertura de 5 km e com um raio de 3 km é possível suportar a modulação a modulação 16-QAM $\frac{3}{4}$ (8.47 Mbps) para $rcc = 4.58$.

7.5.5 Ritmo de Transmissão e Cobertura

Um dos grandes objectivos do planeamento e optimização de qualquer sistema móvel sem fios é saber o ritmo de transmissão, R_b , máximo alcançável em cada zona e a que distância de cobertura. Em seguida, faz-se uma comparação do ritmo de transmissão máxima com o respectivo esquema de modulação/codificação, para raios de cobertura da célula de 2 km e 3 km.

As Figuras 7.22, 7.23, 7.24 e 7.25 apresentam os gráficos do ritmo de transmissão máxima alcançável em função da distância do móvel ao centro da célula para distâncias de cobertura das células de 2 km e 3 km, para ambos os sentidos de ligação descendente, DL e ascendente, UL, mas sem a opção de sub-canalização no UL.

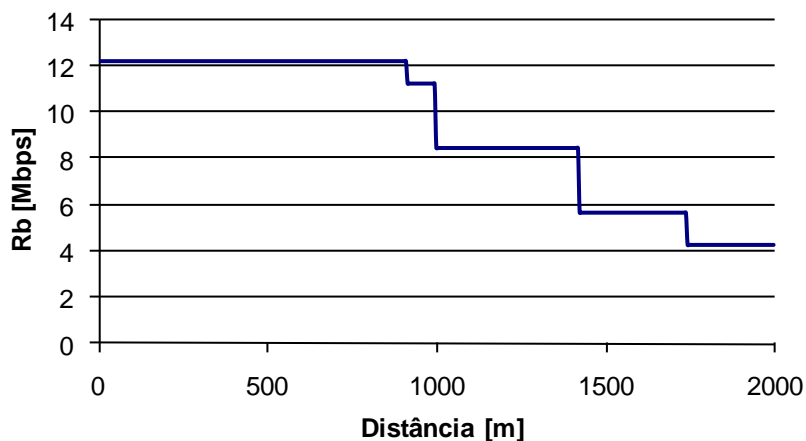


Figura 7.22 - Ritmo de transmissão máxima alcançável para o raio de cobertura da célula de 2 km no DL

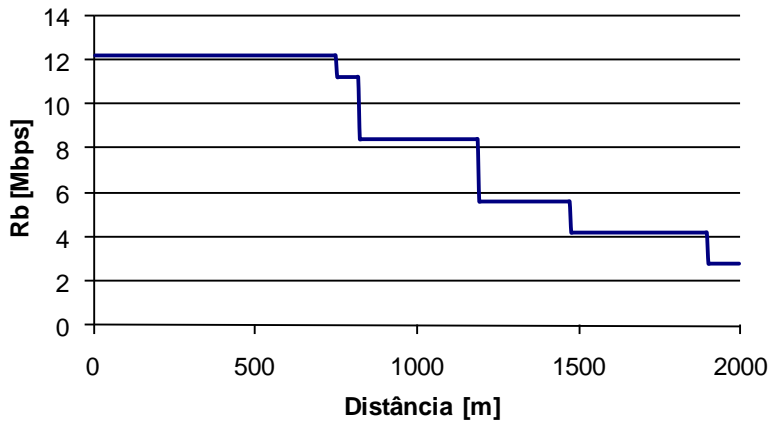


Figura 7.23 - Ritmo de transmissão máxima alcançável para o raio de cobertura da célula de 2 km no UL sem sub-canalização

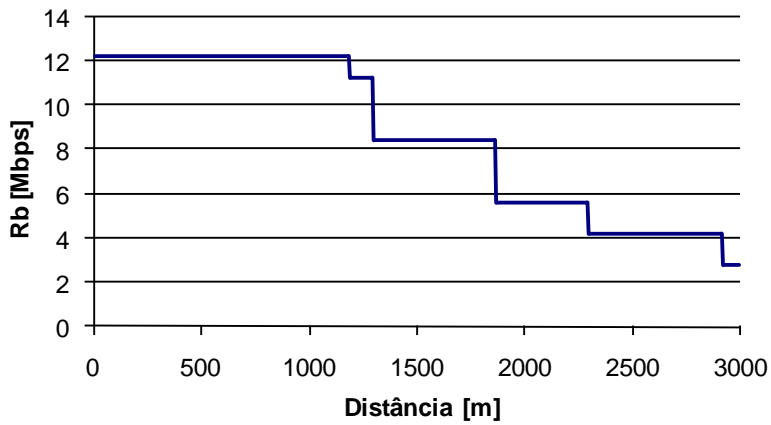


Figura 7.24 - Ritmo de transmissão máxima alcançável para o raio de cobertura da célula de 3 km no DL

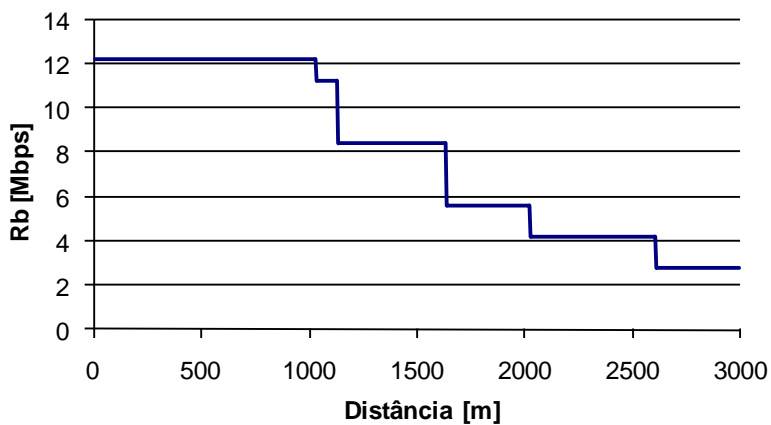


Figura 7.25 - Ritmo de transmissão máxima alcançável para o raio de cobertura da célula de 3 km no UL sem sub-canalização

As Figuras 7.26 e 7.27 apresentam os gráficos do ritmo de transmissão máximo alcançável em função da distância ao centro da célula a distância de cobertura da célula de 2 km e 3 km, para o sentido de ligação ascendente UL com a opção de sub-canalização.

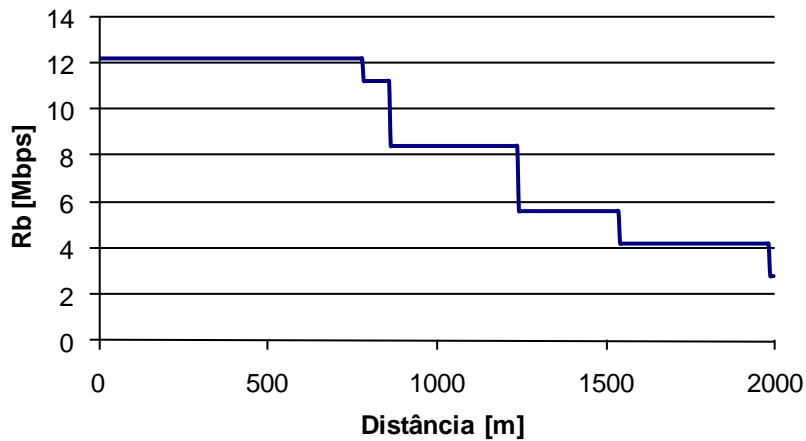


Figura 7.26 - Ritmo de transmissão máxima alcançável para o raio de cobertura da célula de 2 km no UL com a sub-canalização

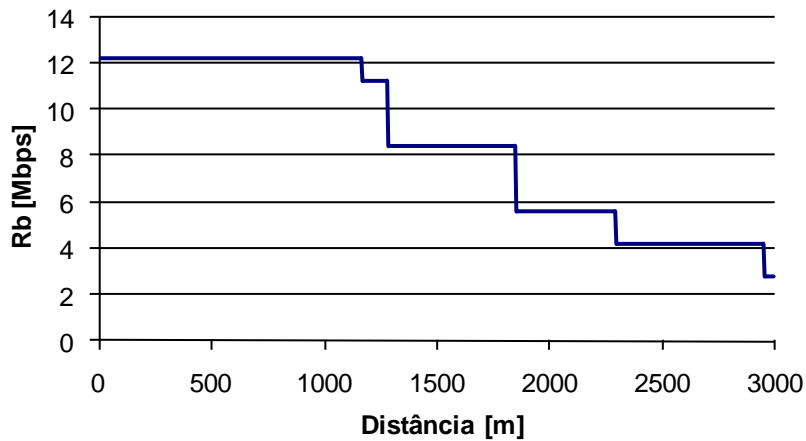


Figura 7.27 - Ritmo de transmissão máxima alcançável para o raio de cobertura da célula de 3 km no UL com a sub-canalização

Pela análise dos gráficos obtidos, extraímos as seguintes Tabelas com o ritmo de transmissão e esquemas de modulação/codificação em relação ao raio de cobertura da célula. A Tabela 7.5 apresenta o caso sem a opção de sub-canalização e a Tabela 7.6 apresenta o caso com a opção de sub-canalização no UL.

Tabela 7.5 - Ritmo de transmissão e esquemas de modulação/codificação vs raio de cobertura da célula de 2 e 3 km sem sub-canalização

<i>Rb</i> [Mbps]	Modulação/Codificação	<i>R</i> = 2000 m		<i>R</i> = 3000 m	
		DL	UL	DL	UL
12.27	64-QAM $\frac{3}{4}$	910 m	750 m	1185 m	1030 m
11.29	64-QAM $\frac{2}{3}$	995 m	820 m	1295 m	1130 m
8.47	16-QAM $\frac{3}{4}$	1420 m	1190 m	1865 m	1635 m
5.64	16-QAM $\frac{1}{2}$	1740 m	1475 m	2295 m	2025 m
4.23	QPSK $\frac{3}{4}$	2000 m	1900 m	2920 m	2610 m
2.82	QPSK $\frac{1}{2}$	-	2000 m	3000 m	3000 m

Tabela 7.6 - Ritmo de transmissão e esquemas de modulação/codificação vs raio de cobertura da célula de 2 e 3 km com sub-canalização

<i>Rb</i> [Mbps]	Modulação/Codificação	<i>R</i> = 2000 m		<i>R</i> = 3000 m	
		DL	UL	DL	UL
12.27	64-QAM $\frac{3}{4}$	-	780 m	-	1165 m
11.29	64-QAM $\frac{2}{3}$	-	860 m	-	1280 m
8.47	16-QAM $\frac{3}{4}$	-	1240 m	-	1850 m
5.64	16-QAM $\frac{1}{2}$	-	1540 m	-	2295 m
4.23	QPSK $\frac{3}{4}$	-	1985 m	-	2955 m
2.82	QPSK $\frac{1}{2}$	-	2000 m	-	3000 m

Com as Tabelas 7.5 e 7.6, aplicando uma equação simples para áreas obtemos as respectivas áreas das coroas com o ritmo de transmissão em percentagem, esquemas de modulação e raio de cobertura, Tabelas 7.7 e 7.8. Combinando os ritmos de transmissão suportados com a percentagem de área coberta, obtemos o ritmo de transmissão médio para ambos os sentidos com e sem sub-canalização, Tabela 7.9.

Tabela 7.7 - Percentagem de utilização de MCS para o raio de cobertura das células de 2 km

<i>R_b</i> [Mbps]	MCS	DL		UL		UL com sub-canalização	
		<i>R</i> [m]	Área [%]	<i>R</i> [m]	Área [%]	<i>R</i> [m]	Área [%]
11,29 a 12,27	64-QAM	995	24.75	820	16.51	860	18.48
5.64 a 8.47	16-QAM	1740	50.94	1475	37.58	1540	40,80
2.82 a 4.23	QPSK	2000	24.31	2000	45.61	2000	40.71

Tabela 7.8 - Percentagem de utilização de MCS para o raio raio de cobertura da célula de 3 km

<i>R_b</i> [Mbps]	MCS	DL		UL		UL com sub-canalização	
		<i>R</i> [m]	Área [%]	<i>R</i> [m]	Área [%]	<i>R</i> [m]	Área [%]
11,29 a 12,27	64-QAM	1295	18.63	1130	14.19	1280	18.20
5.64 a 8.47	16-QAM	2295	39.89	2025	31.37	2295	40,32
2.82 a 4.23	QPSK	3000	41.48	3000	54.44	3000	41.48

Tabela 7.9 - Ritmos de transmissão médio para raios de cobertura da célula de 2 e 3 km

	<i>R</i> =2000 m			<i>R</i> =3000 m		
	Sem sub-canalização		Com sub-canalização	Sem sub-canalização		Com sub-canalização
	DL	UL	UL	DL	UL	UL
<i>R_b</i> _{médio} [Mbps]	7.624	6.473	6.803	6.753	5.886	6.751

Analisando as Tabelas 7.7 e 7.8, verificamos que, para o raio de cobertura de 2 km, o DL apresenta a melhor coroa para a modulação/codificação de ordem média e superior em relação aos casos de UL e UL com sub-canalização. Obtém-se uma capacidade de sistema 17% superior em relação ao UL. Na extremidade da célula, isto é, modulação/codificação de ordem inferior, o UL apresenta a melhor coroa.

A sub-canalização aumenta claramente a área da coroa central com MCS de ordem superior em relação ao caso sem a sub-canalização no UL excepto na extremidade da célula. No caso em que o raio é de cobertura de 3 km verificamos que os resultados no DL e no UL com sub-canalização estão equilibrados, com um ritmo de transmissão médio de aproximadamente 6.753 Mbps.

Analisando a Tabela 7.9 verificamos que, para o raio de cobertura da célula de 2 km, o ritmo de transmissão médio é claramente superior em relação aos outros dois casos, mas verificamos que a sub-canalização melhora o ritmo de transmissão no UL. Existe um aumento de 4.8 % na capacidade do sistema. Neste caso, o ritmo de transmissão médio no UL (6.803 Mbps) não atinge o valor do ritmo de T_x no DL (7.624 Mbps).

7.6 Fórmula de Friis Modificada

7.6.1 Cálculo da Atenuação

Para o cálculo da atenuação segundo o modelo de Friis modificado vão ter-se em consideração os seguintes parâmetros:

- Três expoentes de propagação, $\gamma = 2, 3$ e 4 ;
- Atenuação específica da chuva, $\gamma_{chuva} = 0.0811$ dB/km;
- Atenuação específica do nevoeiro, $\gamma_{nevoeiro} = 0.01$ dB/km, esta atenuação pode ser desprezada por ser inferior à da chuva;
- Atenuação específica da neve, γ_{neve} , é desprezável para frequências inferiores a 30 GHz;

Da aplicação da (5.18) obtemos o gráfico da Figura 7.28 onde é possível ver o comportamento da atenuação em função da distância.

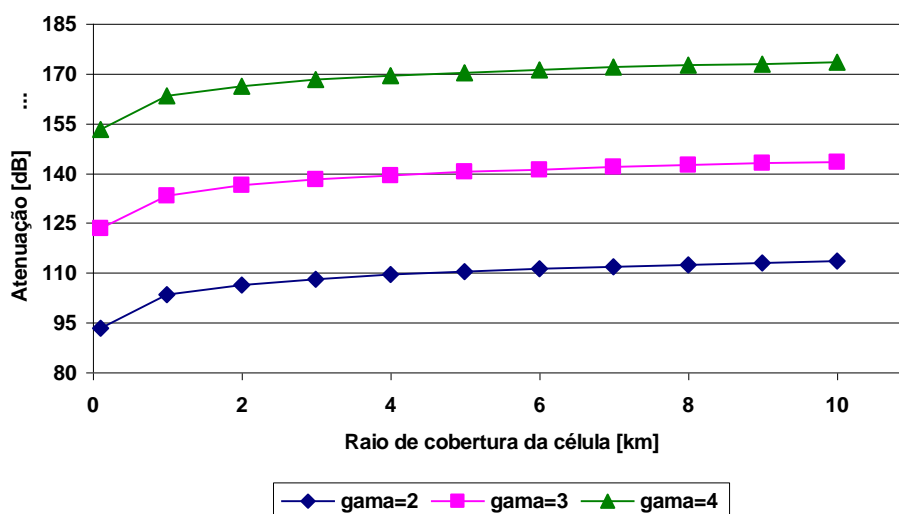


Figura 7.28 - Atenuação, segundo o modelo Friis em função do raio de cobertura da célula, segundo a fórmula de Friis

Aplicando a expressão (6.5) obtemos a atenuação segundo o modelo de propagação COST 231 Hata. Os resultados obtidos são apresentados no gráfico da Figura 7.29, a atenuação segundo a fórmula de Friis com $\gamma = 3$ consta no gráfico apenas para carácter comparativo, como uma recta de referência. Para o cálculo da atenuação teve-se em consideração os seguintes parâmetros:

- Frequência, $f = 3500$ MHz;
- Altura da antena emissora, $h_b = 30$ m;
- Altura da antena receptora, $h_m = 1$ m;
- Factor de correcção para áreas urbanas $C_m = 3$ dB;
- Factor de correcção para áreas suburbanas $C_m = 0$ dB.

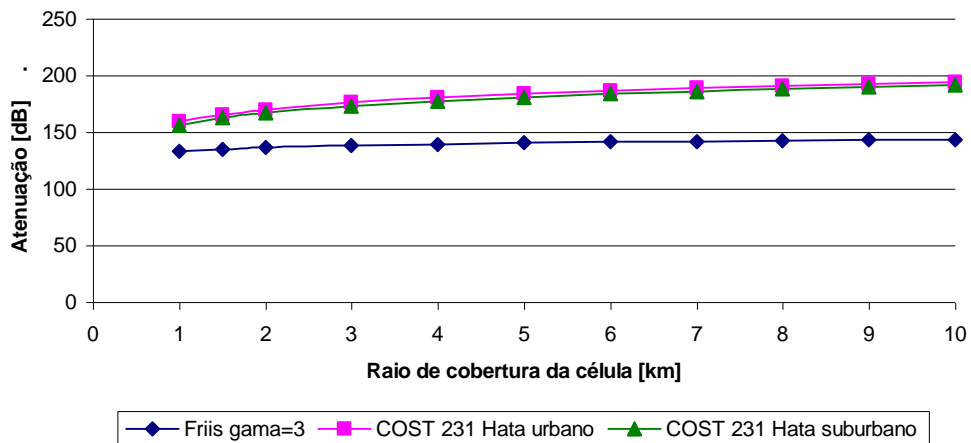


Figura 7.29 - Atenuação em função do raio de cobertura da célula, segundo o modelo COST 231 Hata

7.6.2 Cálculo da Potência Recebida

A potência recebida, P_r , é obtida através da expressão (5.29) e tendo em consideração as especificações das antenas utilizadas. Os resultados obtidos são apresentados no gráfico da Figura 7.30.

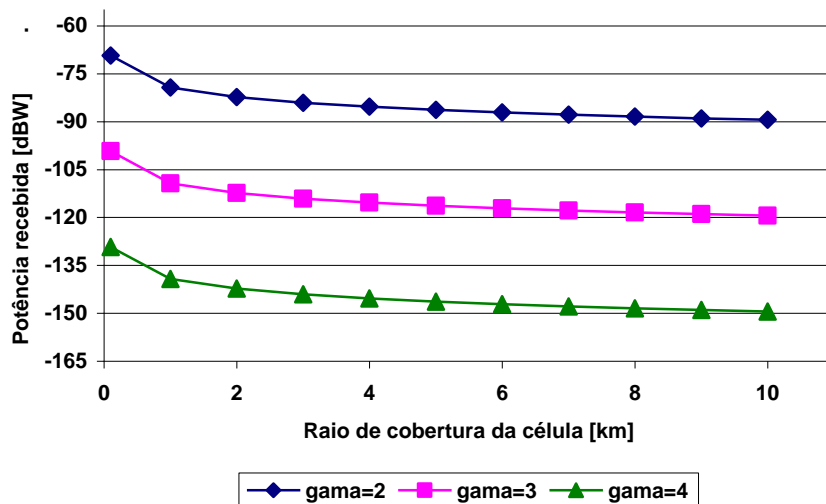


Figura 7.30 - Potência de recebida em função do raio de cobertura da célula, segundo a fórmula de Friis

A Figura 7.31 apresenta o gráfico da potência recebida calculada segundo o modelo de propagação COST 231 Hata.

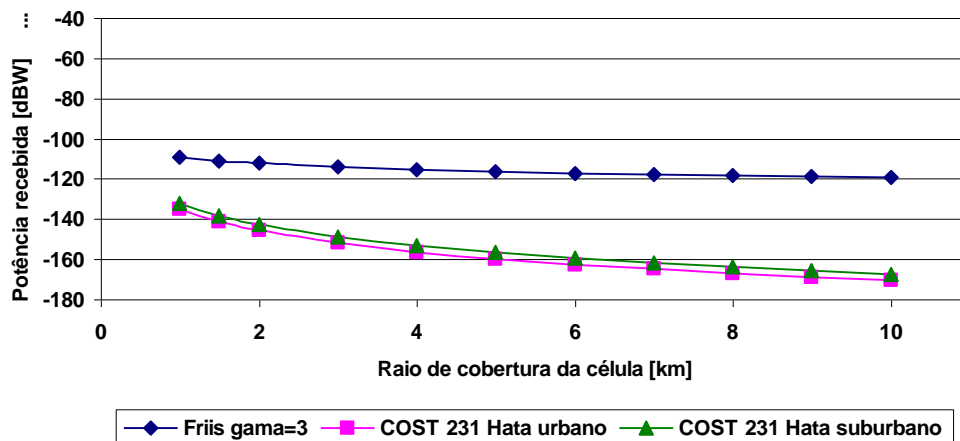


Figura 7.31 - Potência recebida em função do raio de cobertura da célula, segundo o modelo COST 231 Hata

7.6.3 Cálculo da Relação Portadora-Ruído

A relação portadora-ruído, C/N , que corresponde à razão entre a potência da portadora e a potência do ruído, é um indicador importante da qualidade de uma transmissão. Assim da aplicação de (5.30), com uma largura de banda de 3.5 MHz e um factor de ruído

térmico, $N_f = 3$ dB, obtém-se os resultados da relação portadora-ruído segundo o modelo de propagação de Friis, Figura 7.32.

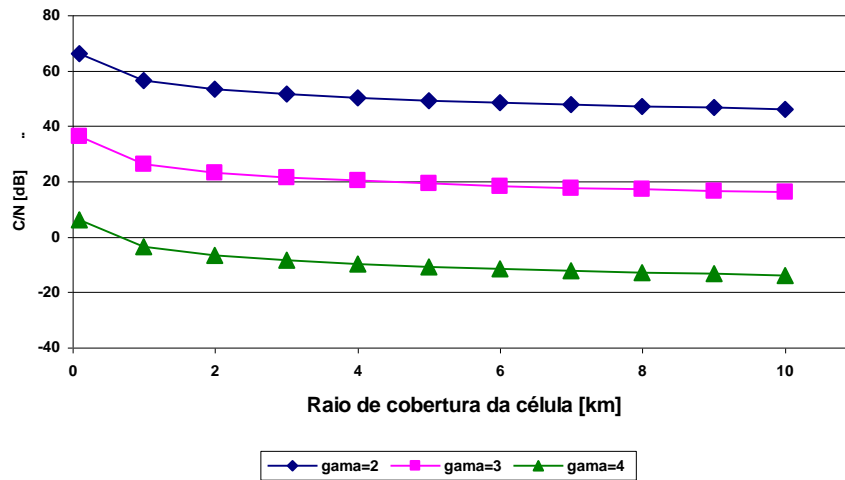


Figura 7.32 - Relação portadora-ruído, C/N , em função do raio de cobertura da célula, segundo a fórmula de Friis

A Figura 7.33 apresenta o gráfico da relação portadora-ruído calculada segundo o modelo de propagação COST 231 Hata e tendo em consideração os mesmos parâmetros do modelo de propagação de Friis.

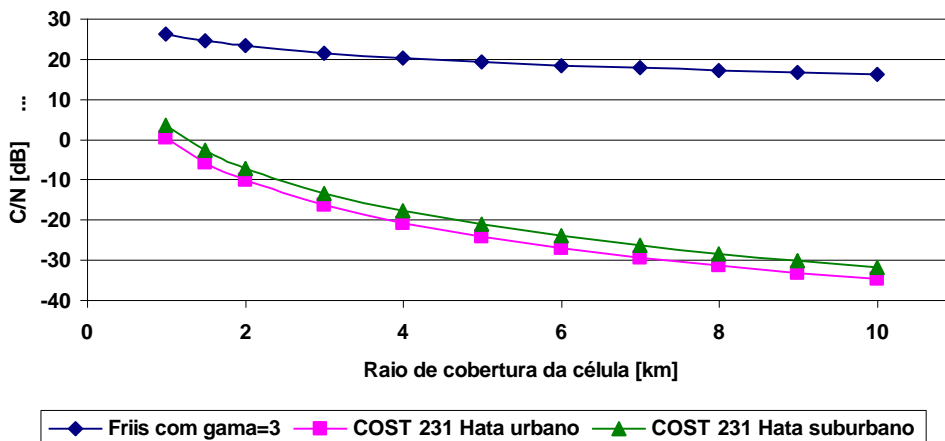


Figura 7.33 - Relação portadora-ruído, C/N , em função do raio de cobertura da célula, segundo o modelo COST 231 Hata

7.7 Análise dos Resultados

Analisando os gráficos da variação da atenuação com a distância, Figuras 7.28 e 7.29, verifica-se que a atenuação aumenta com o raio de cobertura da célula. No modelo

COST 231 Hata urbano e suburbano existe bastante mais atenuação do que no modelo de Friis modificada para os três expoentes de propagação.

Da análise dos gráficos da variação da potência recebida com o raio de cobertura da célula, para os dois modelos de propagação, Figura 7.30 e 7.31, verifica-se que a potência recebida diminui com o aumento do raio de cobertura da célula, pois depende linearmente da atenuação. Verifica-se também que o modelo COST 231 Hata apresenta valores de potência inferiores em relação ao modelo de Friis

Na análise dos gráficos das Figuras 7.32 e 7.33, e sabendo que os valores mínimo de C/N para as modulação de ordem inferior, como por exemplo QPSK são da ordem dos 6.5 a 8.9 dB [Alva06], verifica-se que só é possível ultrapassar esses valores para $\gamma=2$ e $\gamma=3$. Para as modulações de ordem média, 16-QAM, os valores mínimos de C/N de são da ordem dos 12.2 a 15 dB [Alva06] é possível ultrapassar esses valores para $\gamma=2$ e $\gamma=3$. Verifica-se também que para a modulação de ordem superior cujo os valores mínimos de C/N são de 19.8 a 21 dB é possível ultrapassar esses valores para $\gamma=2$ e para $\gamma=3$ apenas até o raio de cobertura da célula de 4 km. Por outro lado com o modelo de propagação COST 231 Hata não é possível suportar nenhuma das modulações.

O modelo COST 231 Hata não foi testado para a faixa de frequências utilizada nesse trabalho porém o *WiMAX Forum* recomenda a sua utilização para a simulação do sistema e planeamento de rede macro célula e a ferramenta de simulação utilizada para neste trabalho faz a aplicação deste modelo de propagação. Por ser um modelo bastante pessimista para essa banda de frequências não vai ser explorado nesta trabalho.

7.8 Cálculo da Relação Portadora-Interferência

A relação portadora-interferência é um parâmetro essencial no planeamento de uma rede celular, porque permite estabelecer a ligação entre nível de interferência co-canal, o tamanho do conjunto de células e factor de redução de reutilização co-canal.

Como já foi visto a relação portadora-interferência, C/I , é uma grandeza que varia com o factor de reutilização, k , e com o expoente de propagação, γ . Aplicando a expressão (5.15) obtém-se os valores de C/I , para os diferentes tipos de expoente de propagação, γ , Figura 7.34.

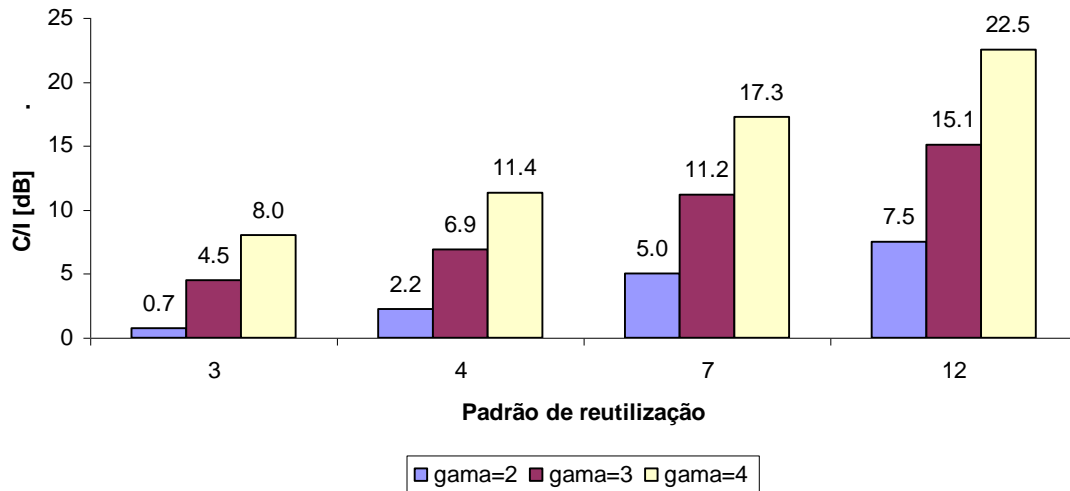


Figura 7.34 - Valores de C/I em função de γ e do padrão de reutilização

Analisando os resultados apresentados no gráfico da Figura 7.34, verificamos que para $\gamma = 2$ apenas é possível estabelecer ligações com modulação de baixa ordem (BPSK e QPSK) quando o padrão de reutilização é igual ou maior do que 7. Quando o $\gamma = 3$ só é possível estabelecer ligações com modulações de baixa e média ordem (BPSK, QPSK e 16-QAM). Quando $\gamma = 4$ é possível estabelecer ligações com todas as ordens de modulação (BPSK, QPSK, 16-QAM e 64-QAM).

7.9 Cálculo da Relação Portadora-Interferência com Sectorização

Como foi dito anteriormente o processo de sectorização possibilita aumentar a relação portadora-interferência, C/I , de tal forma que o tamanho do conjunto de células possa ser reduzido. Assim podemos resolver a restrição obtida no cálculo da relação portadora-interferência. Assim aplicando (5.15) obtemos os valores de C/I com sectores de 120° para vários padrões de reutilização e para os diferentes valores de γ , Figura 7.35.

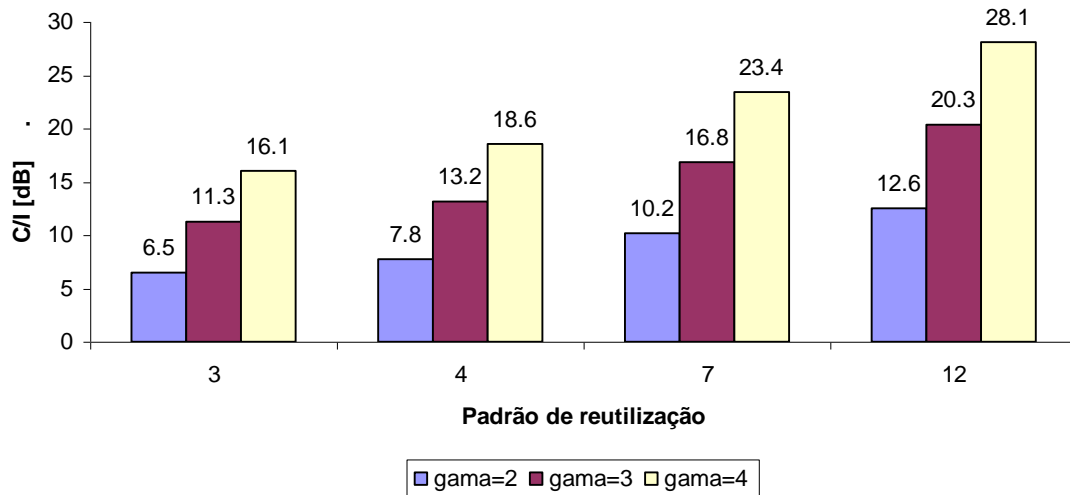


Figura 7.35 - Valores de C/I em função de γ e do padrão de reutilização com sectores de 120°

Aplicando a (5.16), obtemos os valores de C/I com sectores de 60° para vários padrões de reutilização e para os diferentes valores de γ , Figura 7.36.

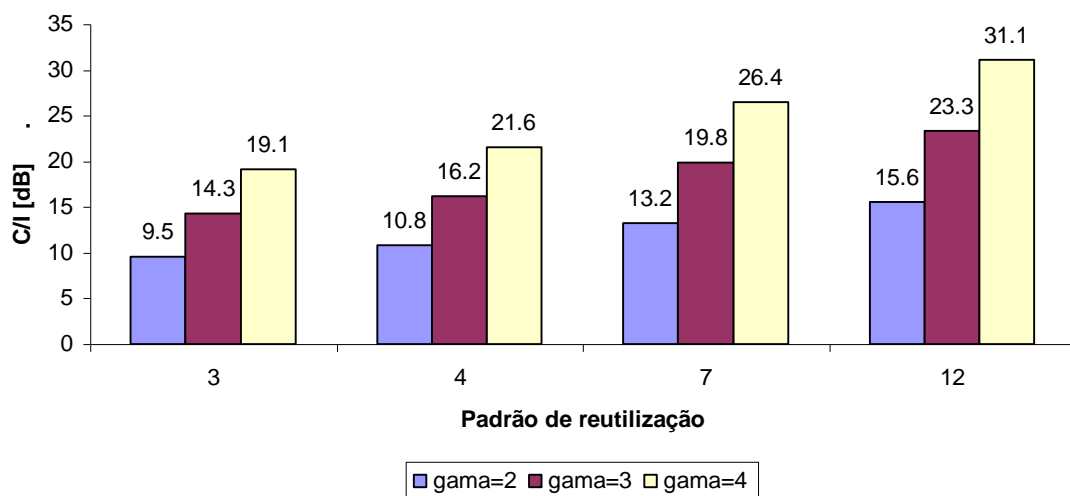


Figura 7.36 - Valores de C/I em função de γ e do padrão de reutilização com sectores de 60°

Da análise dos gráficos das Figuras 7.35 e 7.36, verificamos que no caso com sectores de 120° melhora significativamente relação portadora-interferência representando um ganho de 3 em relação ao caso em que é utilizada uma única antena omnidireccional, ou seja, aproximadamente 4.8 dB de ganho na relação portadora-interferência. E no

caso de sectores de 60° representa um ganho de 6 em relação ao caso em que é utilizada uma única antena omnidireccional, ou seja, aproximadamente 7.8 dB de ganho na relação portadora-interferência. Para sectores de 60° e 120° é possível ultrapassar um $C/I_{min} = 3.8-8.9$ dB, valores mínimos para modulações de baixa ordem com qualquer expoente de propagação. Para sectores de 120°, Figura 7.35, com o $\gamma = 3$ é possível ultrapassar $C/I_{min} = 12.2-15$ dB valores mínimos da modulação de ordem média para um padrão de reutilização maior ou igual a 7. Com $\gamma = 4$ é possível ultrapassar $C/I_{min} = 19.8-21$ dB valores mínimos da modulação de ordem elevada para um padrão de reutilização maior ou igual a 7.

Para sectores de 60°, Figura 7.36, com $\gamma = 2$ é possível ultrapassar modulação de ordem media para um padrão de reutilização maior ou igual a 7. Com $\gamma = 3$ ultrapassamos a modulação de ordem média para um padrão maior ou igual a 4 e a modulação de ordem elevada para um padrão de reutilização maior e igual a 7. Com $\gamma = 4$ ultrapassamos a modulação de ordem elevada para um padrão de reutilização maior e igual a 4.

Desta análise concluímos que a medida que aumentamos o número de sectores e consequentemente menores ângulos de abertura entre elas, maior é a relação portadora-interferência.

7.10 Optimização das Estações Base Recorrendo a Ferramenta GIS

No planeamento celular de uma rede sem fios WiMAX, a colocação das BSs, é um passo muito importante na concepção. A análise da visibilidade do terreno é uma disciplina da informação geográfica, que pode ser utilizada em muitas aplicações práticas nos mais variados campos. A visibilidade a partir de um foco de iluminação é um parâmetro importante do terreno pois é um indicador de acesso visual, que nos permite determinar a “acessibilidade” de um local, ou seja, a existência de linha de vista, LoS (*Line-of-sight*).

Uma plataforma GIS é um programa de computador, geralmente com uma interface gráfica, que permite ao utilizador importar, processar e exportar dados espaciais.

O programa utilizado para a optimização da colocação das estações de base foi o ArcGis. Como a maioria das plataformas GIS, baseia-se na análise de informação por camadas. O ArcGis 9, versão utilizada no desenvolvimento desta optimização, tem muitas

potencialidades, desde a simples representação de dados, até ao desenvolvimento de novas aplicações, integradas no ArcMap.

As ferramentas disponíveis no ArcMap podem ser melhoradas utilizando extensões ao ArcView. O 3D *Analyst*, por exemplo, disponibiliza ferramentas que facilitam o estudo de dados espaciais permitindo, nomeadamente, determinar quais são as áreas em torno de uma dada coordenada cuja altitude é inferior a um certo limite e também a análise da superfície do terreno, entre outras [MaSa05].

7.11 Optimização da LoS

Os GIS são uma tecnologia fundamental para se determinar a melhor colocação para uma BS. O papel dos GIS passa pelo cálculo de distâncias e visualização de mapas. Permitem além disso correlacionar as várias camadas de informação disponível. O ArcGis 9 foi a ferramenta utilizada para a representação dos mapas, tendo sido utilizadas as seguintes camadas de informação: modelo digital de terreno, cartas militares do IGeoE, escala 1/25000 e bases de dados das vias de comunicação existentes no concelho. O modelo digital de terreno do concelho da Covilhã foi obtido através do ArcView com a informação digital das curvas de nível de 5 em 5 metros, disponíveis no STIG-UBI, Serviço Transfronteiriço de Informação Geográfica – Universidade da Beira Interior.

Com base no modelo digital de terreno do concelho da Covilhã, Figura 7.37, e especificando alguns parâmetros, conseguiu-se saber quais os pontos, as zonas da célula, que têm linha de vista com cada uma das estações base.

No processo de optimização teve-se o cuidado de cobrir com linha de vista as principais vias de comunicação e aglomerados populacionais do concelho da Covilhã

Como referido anteriormente, a função de análise de visibilidade no ArcView requer a especificação de um conjunto de parâmetros para o cálculo da visibilidade. Durante o processo de optimização, concluímos que, a solução mais apropriada para resolver o problema da cobertura com linha de vista do concelho da Covilhã, é a colocação de dezoito estações de base, Figura 7.38.

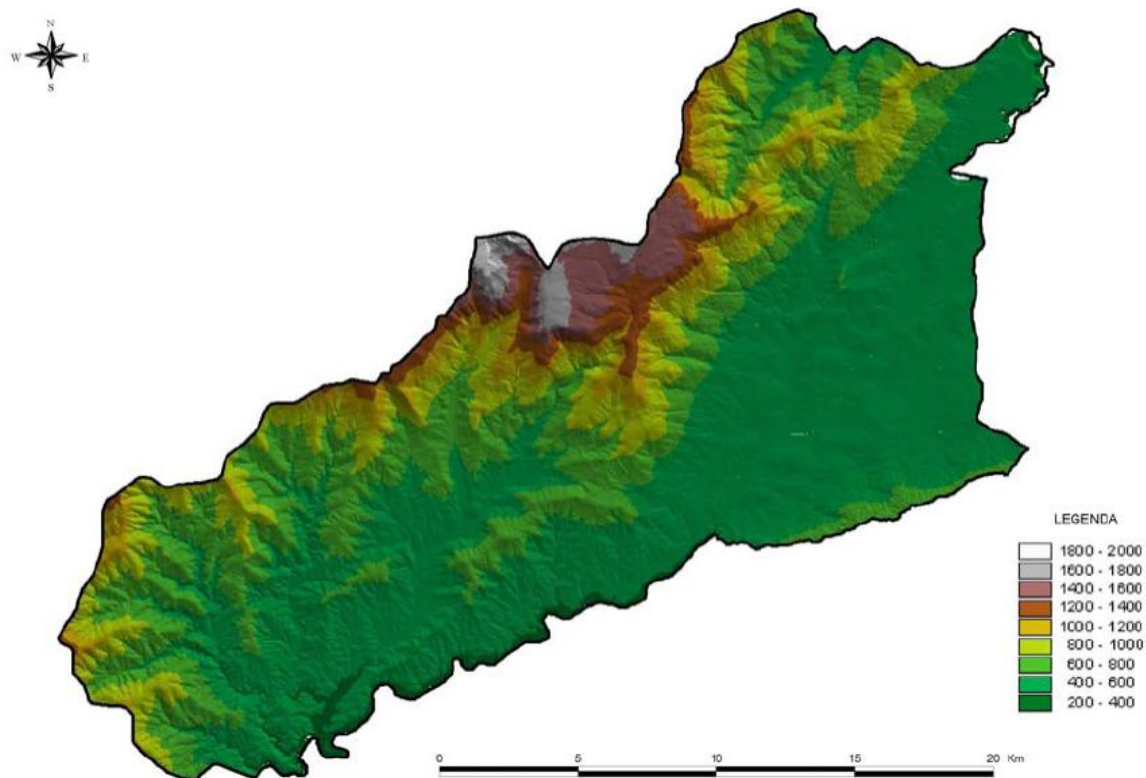


Figura 7.37 - Modelo digital de terreno do concelho da Covilhã

A Tabela 7.4 apresenta as localizações e as características das dezoito estações base necessárias para cobrir o concelho da Covilhã. A Figura 7.38 apresenta o modelo digital de terreno do concelho da Covilhã com a colocação das estações base.

Tabela 7.10 - Localização e Características das BSs para o concelho da Covilhã

BS	Local e Características	BS	Local e Características
1	X = 231531 m Y = 352784 m Cota - 885 m Altura da antena – 20 m Antena - 3 x WiMAX3500MHz 120°	10	X = 263660 m Y = 364037 m Cota - 571 m Altura da antena – 25 m Antena - 3 x WiMAX3500MHz 120°
2	X = 229011 m Y = 356553 m Cota - 1122 m Altura da antena – 25 m Antena - 3 x WiMAX3500MHz 120°	11	X = 258599 m Y = 370763 m Cota - 615 m Altura da antena – 25 m Antena - 3 x WiMAX3500MHz 120°
3	X = 235259 m Y = 357425 m Cota - 662 m Altura da antena – 30 m Antena - 3 x WiMAX3500MHz 120°	12	X = 264663 m Y = 377325 m Cota - 467 m Altura da antena – 20 m Antena - 3 x WiMAX3500MHz 120°
4	X = 241933 m Y = 356538 m Cota - 581 m Altura da antena – 10 m Antena - 3 x WiMAX3500MHz 120°	13	X = 255759 m Y = 380381 m Cota - 864 m Altura da antena – 10 m Antena - 3 x WiMAX3500MHz 120°
5	X = 239045 m Y = 362379 m Cota - 736 m Altura da antena – 15 m Antena - 3 x WiMAX3500MHz 120°	14	X = 255188 m Y = 373837 m Cota - 1240 m Altura da antena – 25 m Antena - 3 x WiMAX3500MHz 120°
6	X = 243725 m Y = 367000 m Cota - 789 m Altura da antena – 30 m Antena - 3 x WiMAX3500MHz 120°	15	X = 247000 m Y = 369700 m Cota - 1758 m Altura da antena – 20 m Antena - 3 x WiMAX3500MHz 120°
7	X = 247923 m Y = 362411 m Cota - 760 m Altura da antena – 20 m Antena - 3 x WiMAX3500MHz 120°	16	X = 250854 m Y = 370366 m Cota - 1354 m Altura da antena – 25 m Antena - 3 x WiMAX3500MHz 120°
8	X = 255532 m Y = 367116 m Cota - 463 m Altura da antena – 15 m Antena - 3 x WiMAX3500MHz 120°	17	X = 245191 m Y = 364280 m Cota - 679 m Altura da antena – 20 m Antena - 3 x WiMAX3500MHz 120°
9	X = 255595 m Y = 360687 m Cota - 603 m Altura da antena – 20 m Antena - 3 x WiMAX3500MHz 120°	18	X = 232222 m Y = 360186 m Cota - 808 m Altura da antena – 25 m Antena - 3 x WiMAX3500MHz 120°

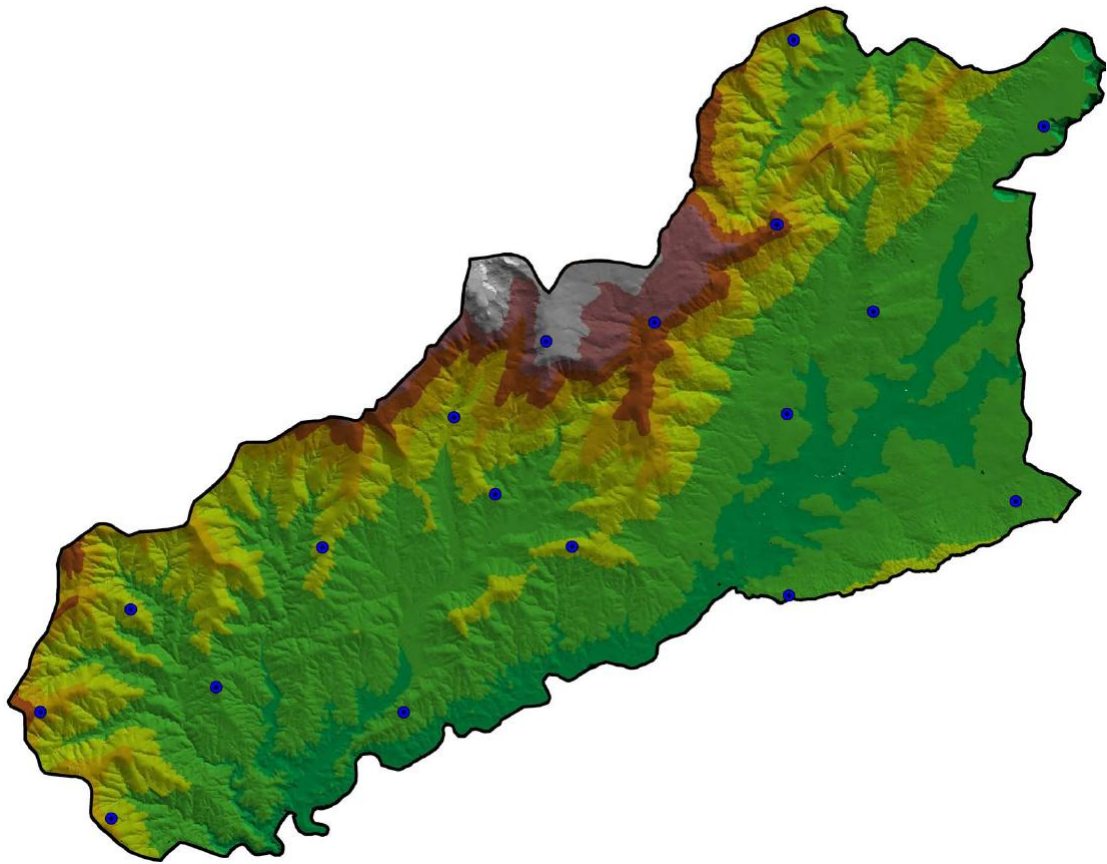


Figura 7.38 - Modelo digital de terreno do concelho da Covilhã com a representação das dezoito estações base

Após a optimização da LoS, no cálculo das percentagens de cobertura conclui-se que, aproximadamente 83% das localidades e 57,3% das vias de comunicação têm linha de vista com as estações base, Figura 7.39 [MaSa05].

A Figura 7.40 apresenta a disposição das estações base no concelho da Covilhã identificadas por número. Aqui não teremos em conta o esquema de ligação entre as estações base.

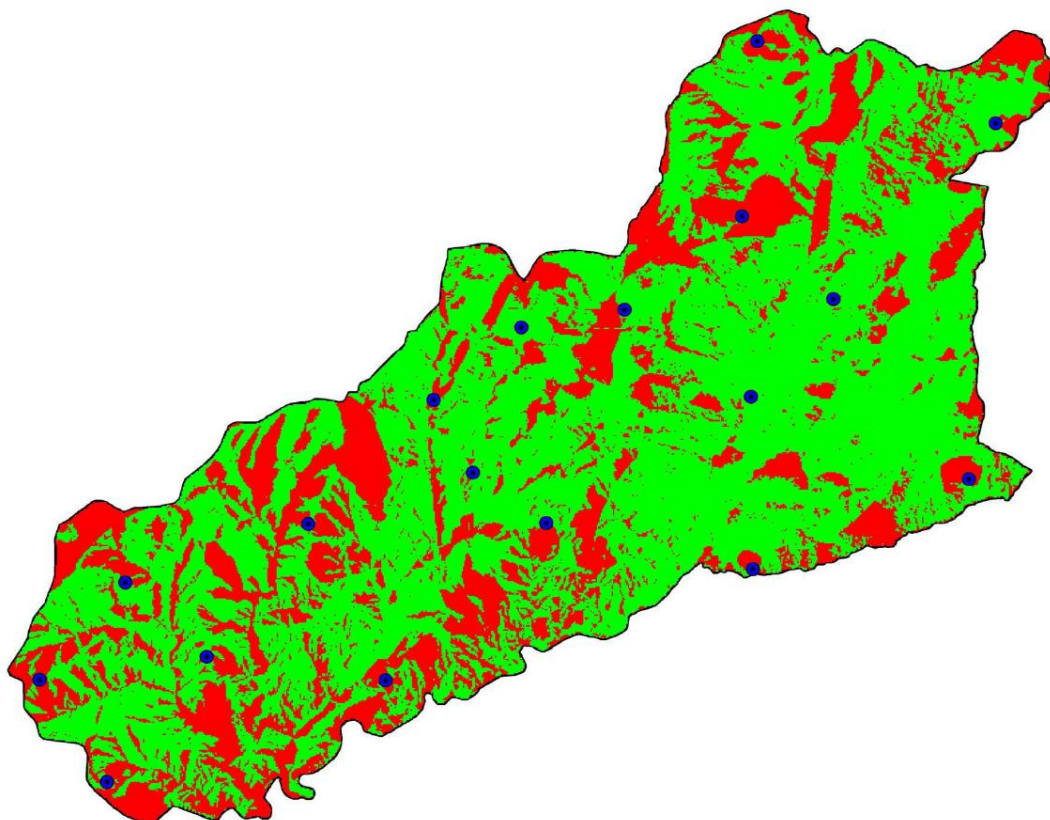


Figura 7.39 - O concelho da Covilhã com as zonas de LoS representadas a verde e as zonas de NLoS representadas a vermelho [MaSa05]

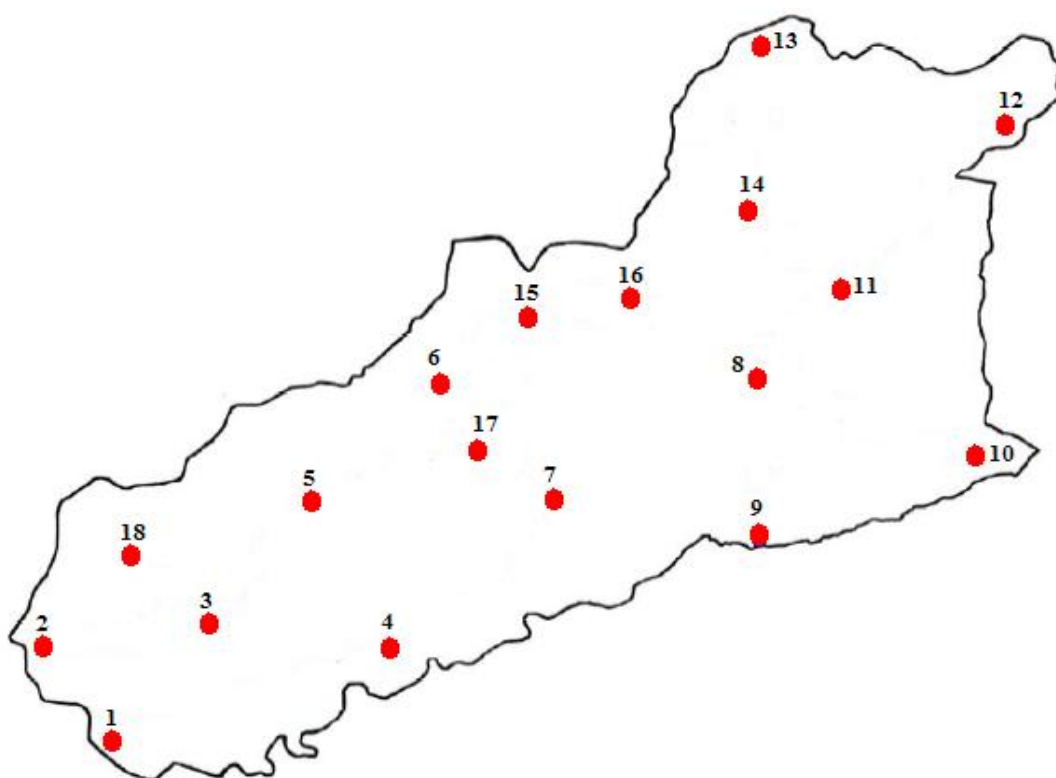


Figura 7.40 - Disposição das estações base para proposta de um esquema de ligação sem fios para com o *backhaul*

7.12 Cidade da Covilhã

Nesta Secção, efectuamos o planeamento de uma rede sem fios WiMAX para a área urbana da Covilhã, Figura 7.41.



Figura 7.41 - Área urbana da Covilhã, extraído da carta militar nº 235 do IGeoE, escala 1/25000

7.13 Optimização da Localização das Estações Base

Em zonas urbanas com sombra, por obstáculos urbanos e do relevo irregular do terreno, o expoente de propagação pode ser elevado. Logo, a localização das estações base tem de ser cuidadosamente escolhida para conseguirmos uma percentagem maior de área coberta com linha de vista.

Para alcançar esta optimização e consequentemente atingir a maior percentagem de área coberta com linha de vista, utilizámos as potencialidades das ferramentas GIS. A partir delas, foi-nos possível escolher a melhor posição das estações base, baseada no modelo digital do terreno, Figura 7.42.

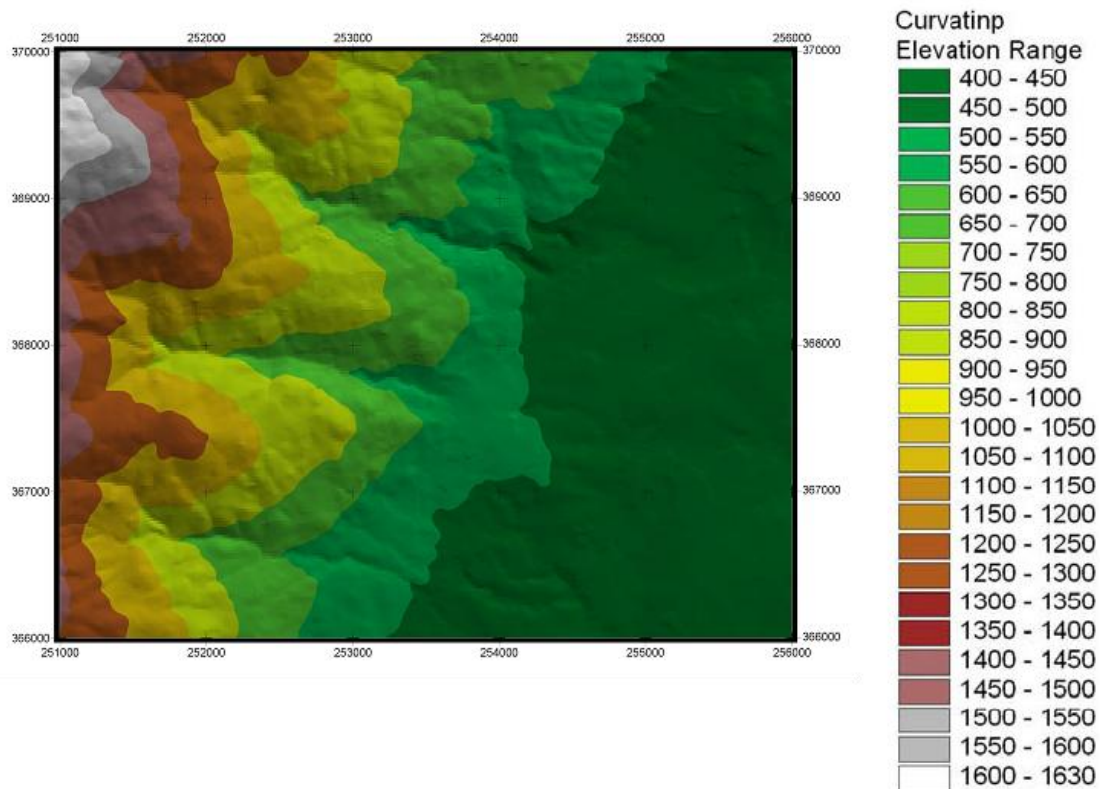


Figura 7.42 - Modelo digital do terreno (TIN) [Cava01]

Durante o processo de otimização da localização das BSs, teve-se o cuidado de prestar especial atenção as principais instituições da cidade da Covilhã como por exemplo os centros comerciais, a central de camionagem a estação de comboios, a Universidade, os Bombeiros, a Polícia, a Câmara Municipal, o Hospital e o Centros de Saúde. Com base no ArcView, chegou-se à conclusão que a solução mais apropriada para resolver o problema da iluminação da zona da Covilhã é a colocação de três BSs com antenas sectoriais. A primeira BS, será colocada na Residência Universitária Mista da UBI, a segunda BS estará localizada no Aeródromo da Covilhã e a terceira BS na rotunda do Covelo, Figura 7.43.

Após o processo de otimização da localização das BSs, obteve-se uma percentagem de cobertura com linha de vista da área de interesse de aproximadamente 63.2%.

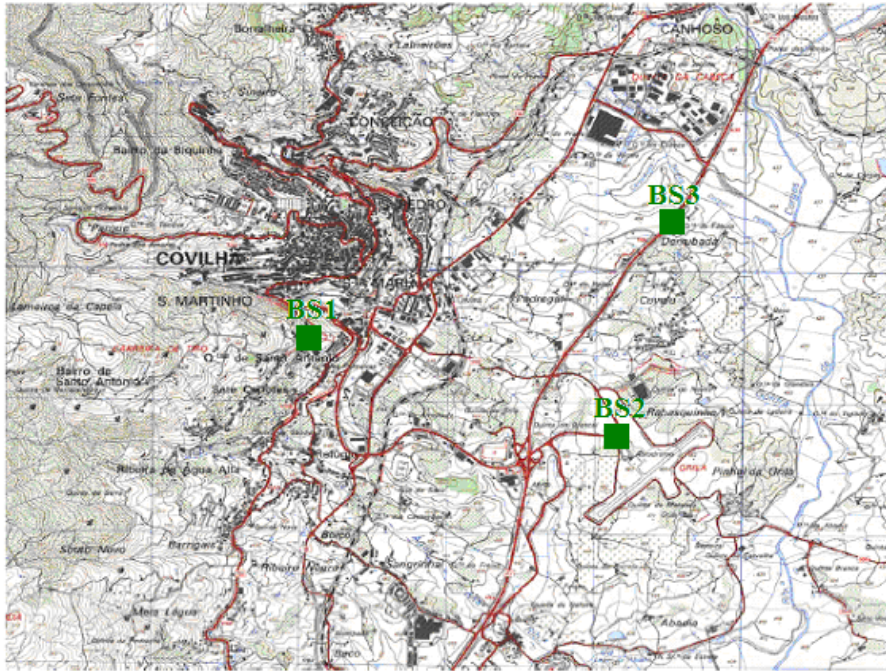


Figura 7.43 - Área urbana da Covilhã com estações base colocadas em locais estratégicos extraído da carta militar nº235 do IGeoE, escala 1/25000

A Figura 7.44 apresenta o resultado dos locais com e sem linha de vista com as três BSs, calculado através do ArcGIS 9.0 (extensão 3D Analyst) [MaSa05].

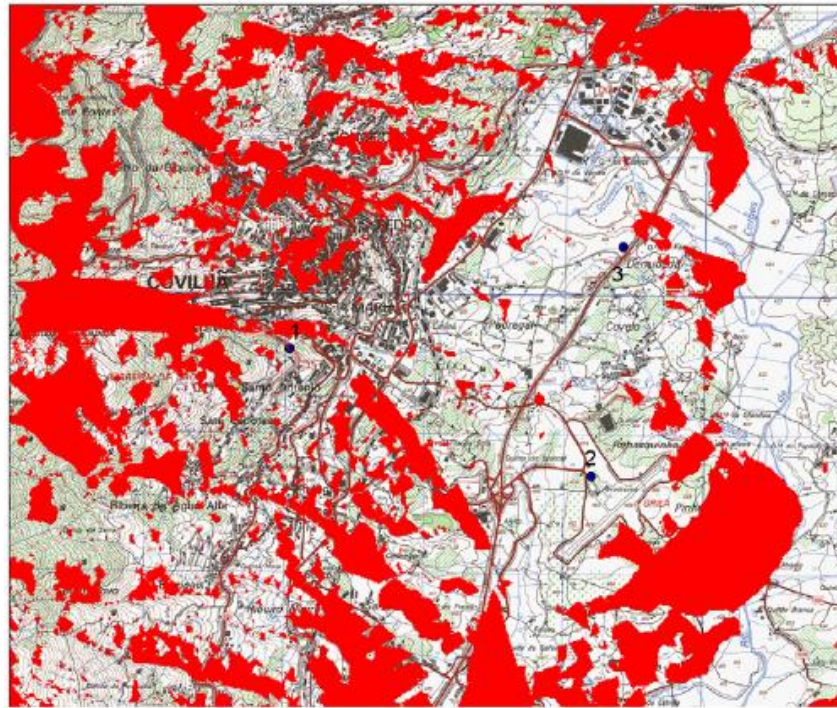


Figura 7.44 - Zona urbana da Covilhã com as zonas de NLoS com as 3 BSs, representadas a vermelho [MaSa05]

A Tabela 7.11 apresenta as localizações e as características das três estações base necessárias para cobrir a área urbana da Covilhã.

Tabela 7.11 - Local e características das BSs para a área urbana da Covilhã

BS	Local e Características
1	X = 253224 m Y = 367585 m Cota - 650 m Altura da antena -22 m Antena - 3 x WiMAX3500MHz 120°
2	X = 255205 m Y = 366830 m Cota - 500 m Altura da antena -20 m Antena - 3 x WiMAX3500MHz 120°
3	X = 255616 m Y = 368314 m Cota - 460 m Altura da antena -10 m Antena - 3 x WiMAX3500MHz 120°

7.14 Sumário e Conclusões

Neste Capítulo apresentou-se os aspectos relevantes no planeamento de uma rede sem fios. Efectuou-se o cálculo do número de células necessárias para cobrir o concelho da Covilhã, determinamos o número de canais disponíveis tanto para a faixa de frequência atribuída como para a faixa utilizada no equipamento. Apresentou-se uma análise analítica para o padrão de reutilização, factor de reutilização co-canal e a relação portadora-interferência mais ruído, sem e com sectorização e sub-canalização para melhorar o raio de cobertura capacidade e minimizar a interferência. Abordou-se os aspectos relacionados com a atenuação, potencia recebida e relação portadora-ruído, aplicando os modelos de propagação de Friis modificado e COST 231 Hata.

Por fim, apresentou-se a optimização das estações base e linha de vista realizada recorrendo a ferramenta GIS, podendo-se extrair as seguintes conclusões:

- Do cálculo do número de células utilizando células de raio igual a 3 km seriam necessárias 24 BSs, mais com a ferramenta GIS verificamos que com 18 BSs é possível cobrir na totalidade o concelho da Covilhã;

- Devido ao número muito grande de BSs é necessário um número razoável de canais disponíveis para minimizar a interferência co-canal;
- É possível utilizar o padrão de reutilização igual a 7 no planeamento celular no concelho da Covilhã;
- Com a sub-canalização conseguimos aumentar a área de cobertura no sentido ascendente;
- A utilização de sectorização permite reduzir o padrão de reutilização enquanto que a sub-canalização permite melhorar a cobertura nos sistemas WiMAX;
- A redução do padrão de reutilização corresponde de forma discreta a um aumento de capacidade, e não a melhoria de cobertura, embora de forma indirecta também permite melhorar a capacidade do sistema, dado que se utiliza modulação e codificação adaptativa;
- A sub-canalização melhora significativamente o ritmo de transmissão médio na medida em que aumentamos o raio de cobertura da célula;
- A SNIR pode ser minimizada utilizando a sectorização e a opção de sub-canalização no sentido ascendente, UL;
- A sectorização e a sub-canalização no UL melhoram significativamente o ritmo de transmissão;
- A análise da SNIR com o factor de reutilização co-canal para vários raios de cobertura da célula, permiti-nos saber que padrão de reutilização utilizar para minimizarmos a interferência co-canal e melhorar o ritmo de transmissão;
- Aplicando a sectorização e a opção de sub-canalização no UL simultaneamente melhora-se significativamente os resultados em termos de SNIR e ritmo de transmissão;
- O modelo de propagação COST 231-Hata é bastante pessimista em relação ao modelo de propagação de Friis modificada, talvez porque nunca foi testada para a banda dos 3.5 GHz;
- Através da ferramenta GIS, conseguimos escolher as melhores localizações para as estações base e otimizar a área de cobertura.

Capítulo 8

Simulação e Resultados Obtidos

Para analisar o comportamento da rede sem fios IEEE 802.16-2004 no concelho de na zona urbana da Covilhã, com as estações base localizadas em locais estratégicos, neste Capítulo apresentamos os resultados e análises da simulação da propagação e do planeamento da rede sem fios com base nas optimizações das estações base descritas no capítulo anterior. O estudo detalhado da propagação é feito apenas na cidade da Covilhã, visto que para o concelho da Covilhã temos dezoito estações de base com três sectores cada, o que perfaz um total de 54 antenas e o simulador WinProp faz a simulação uma a uma. Finalmente, será apresentada o tempo de cálculos para os dois cenários simulados.

8.1 Cenário

Nesta Secção apresentamos os resultados da simulação do planeamento de uma rede sem fios IEEE 802.16-2004 no concelho da Covilhã, Figura 8.1. A simulação do planeamento desta rede foi feita tendo em conta as especificações do equipamento WiMAX BreezeMAX da Alvarion, Anexo C, as faixas de frequências atribuídas pela ANACOM, as optimizações das BSs descritas no Capítulo anterior e os parâmetros apresentados na Tabela 8.1. O equipamento BreezeMAX 3000 é a plataforma WiMAX da Alvarion para as bandas de frequências licenciadas dos 3 - 4 GHz.

Os mecanismos de acesso e de atribuição de largura de banda acomodam centenas de estações subscritoras por canal, com SSs que podem suportar diferentes serviços para múltiplos utilizadores. O sistema utiliza a tecnologia OFDM, que é robusta em condições adversas do canal e permite operar em ligações sem linha de vista, permitindo fácil instalação e cobertura melhorada, enquanto se mantém um nível elevado de eficiência espectral. Os esquemas de modulação e codificação podem ser adaptados por *burst*, com o objectivo de se alcançar um equilíbrio entre robustez e eficiência, conforme as condições de ligação predominantes.

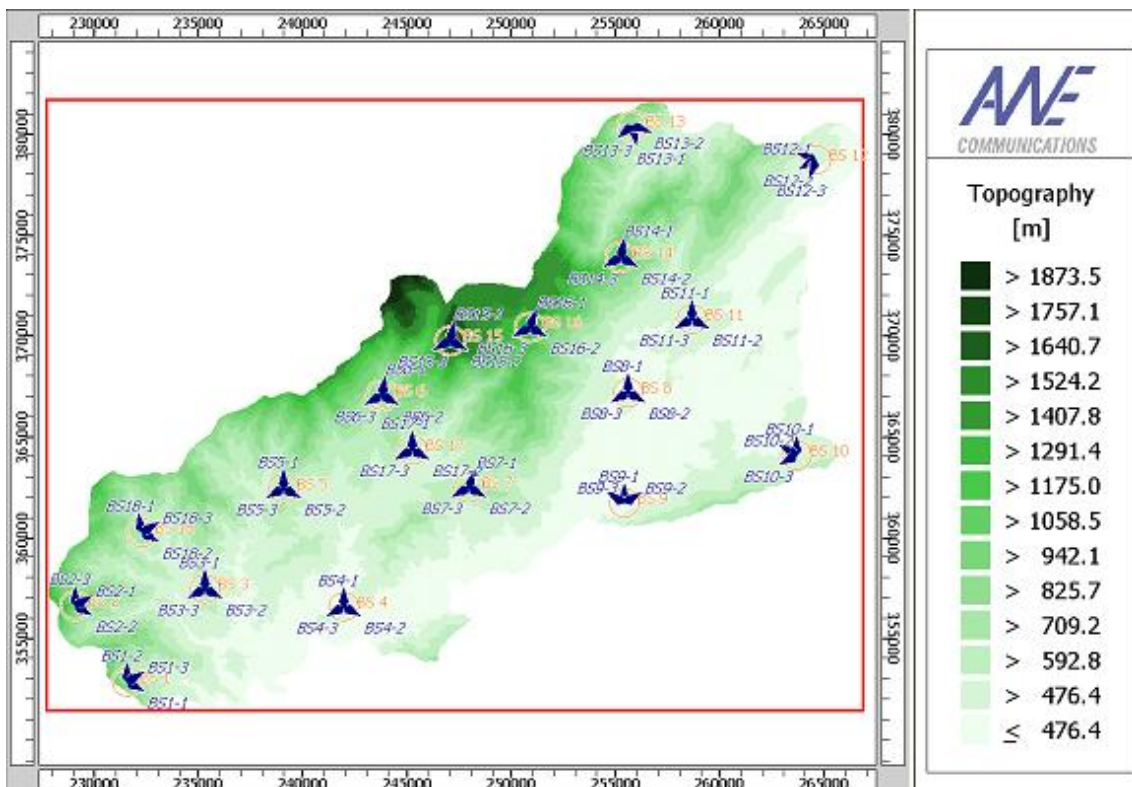


Figura 8.1 - Concelho da Covilhã com as dezoito estações base

Tabela 8.1 - Parâmetros utilizados na simulação

Parâmetros	Valores
Interface ar	IEEE 802.16-2004
Número de células	18
Número de sectores por células	3
Frequência de operação	3.5 GHz
Modo de <i>duplexing</i>	FDD
Técnica de acesso múltiplo	TDMA
Largura de banda	3.5 MHz
Separação DL/UL	100 MHz
Padrão de antena	WiMAX 3500 MHz 120°°
Altura da BSs	Várias, Tabela 7.2
Altura da SS	1.5 metros
Potência máxima da BS	43 dBm (19.95 Watts)
Ganho de antena da BS	15.3 dBi
Ganho de antena da BS	-1 dBi
BS <i>Noise Figure</i>	4 dB
SS <i>Noise Figure</i>	7 dB
Modelo de Propagação	<i>Dominant Path</i>

Na Tabela 8.1, os parâmetros número de célula e número de sectores por células só são validos para o concelho da Covilhã, os restantes parâmetros são ambos para o concelho e a cidade da Covilhã.

No planeamento do concelho da Covilhã considera-se um número elevado de estações base com 3 sectores cada, o que perfaz um total de 54 antenas e como o simulador WinProp apresenta os resultados de cada antena individualmente, não vamos apresentar todos os resultados de propagação obtidos.

8.2 Resultados de Propagação no Concelho da Covilhã

Nesta Secção apresentamos alguns resultados das predições do projecto de propagação no concelho da Covilhã. O estudo mais detalhado de propagação será elaborado na área urbana da cidade da Covilhã.

Em seguida apresentamos alguns resultados das predições obtidas no concelho da Covilhã:

Estação Base 15

A estação base 15 fica localizada nas coordenadas X = 247000 m, Y = 369700 e a uma altitude de 1758 m, perto do ponto mais alto de Portugal continental, a Torre (1993 m). As antenas da estação base encontram-se a uma altura de 20 metros do solo. A Figura 8.2 apresenta os locais com linha de vista, LoS e sem linha de vista, NLoS, a partir da BS15. No Anexo D apresentam-se ss restantes cartas com os locais com e sem linha de vista.

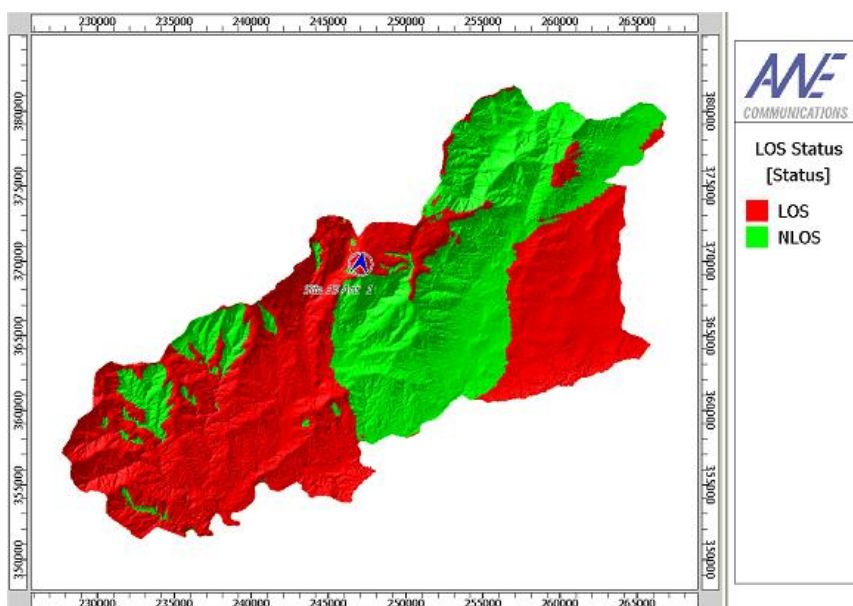
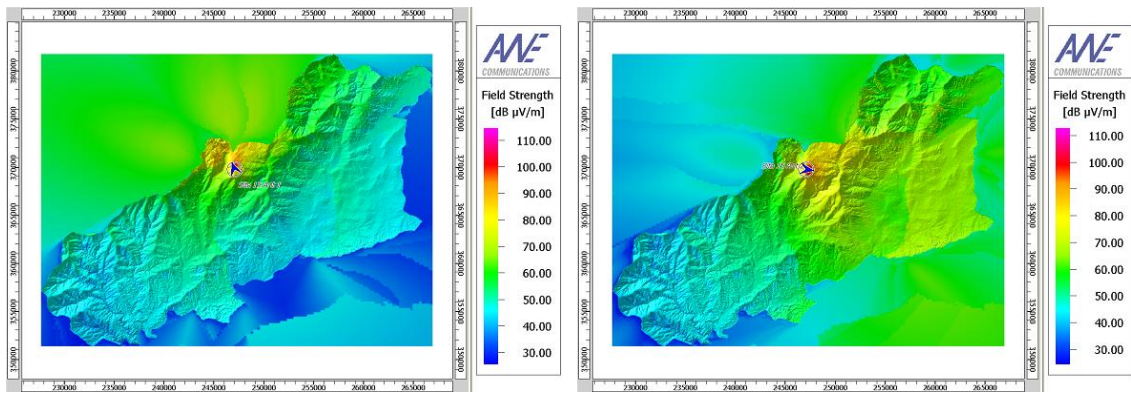


Figura 8.2 - Locais com e sem Linha de vista da a partir da BS15

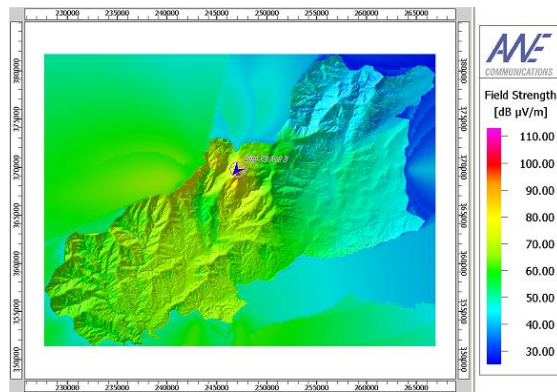
Da análise do mapa da Figura 8.2, verificamos que se consegue ter linha de vista com o ponto mais alto do concelh; praticamente só não existe linha de vista nas zonas mais baixas como a Covilhã.

As Figuras 8.3, 8.4 e 8.5 apresentam os resultados das predições da intensidade de campo, atenuação e potência recebida do sinal, respectivamente, nos 3 sectores da BS 15.



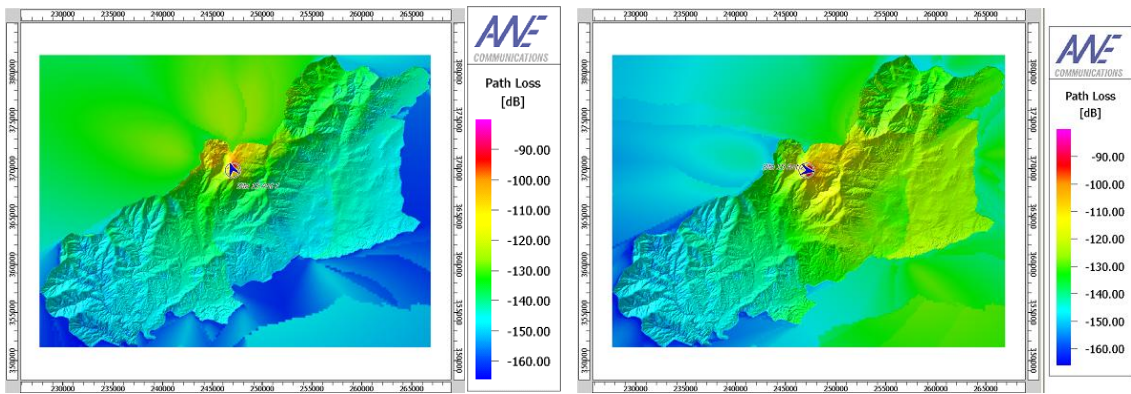
(a) Sector 1

(b) Sector 2



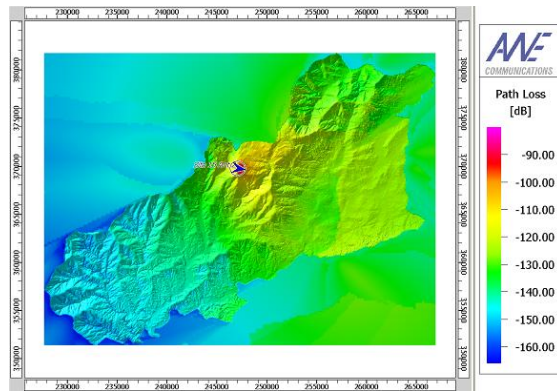
(c) Sector 3

Figura 8.3- Predição da intensidade de campo na BS 15



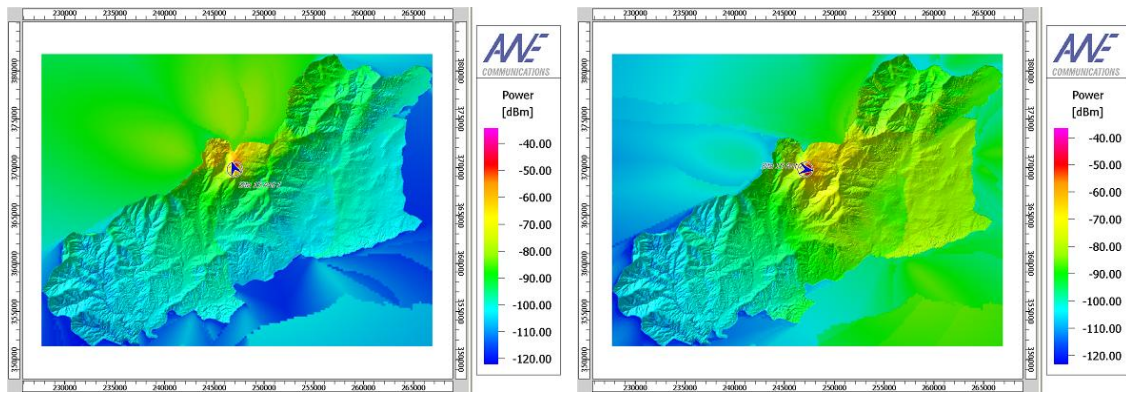
(a) Sector 1

(b) Sector 2



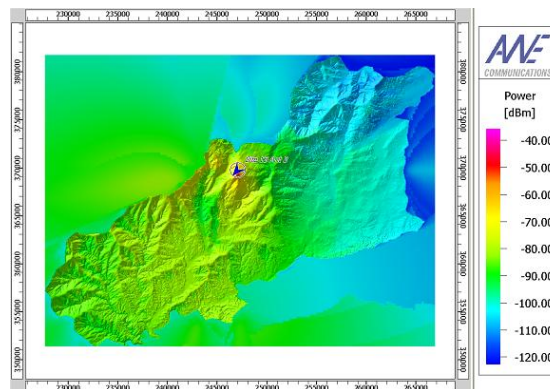
(c) Sector 3

Figura 8.4 - Predição da atenuação na BS 15



(a) Sector 1

(b) Sector 2



(c) Sector 3

Figura 8.5 - Predição da potência na BS 15

Analisando as Figuras 8.3, 8.4 e 8.5, verifica-se que a intensidade de campo é mais elevada perto da BS, atingindo um valor de 120 dB μ V/m. O gráfico da Figura 8.6 ajuda-nos a analisar a variação da potência com a distância.

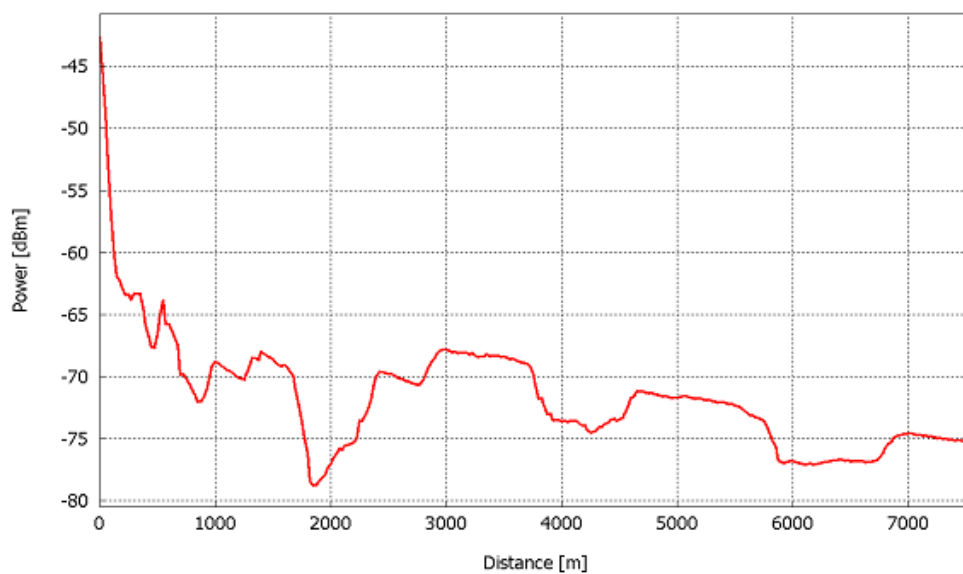


Figura 8.6 - Variação da potência com a distância na BS15

Pode-se concluir que, em geral, a potência diminui com o aumento da distância, apesar de existir um comportamento estranho devido a irregularidades do terreno.

8.3 Análise da Rede no Concelho da Covilhã

No processo de planeamento é interessante analisar a influência dos esquemas de modulação e codificação que estão disponíveis nos diferentes locais da área coberta.

O equipamento WiMAX utiliza 8 esquemas de modulação e codificação, MCS (*Modulation and Coding Schemes*) distintos com alvos individuais de SNIR, Tabela 8.2. Com base nas predições da potência recebida, ou da atenuação para cada sector da estação base obtemos diferentes resultados de planeamento de rede, a que nos permite analisar o desempenho da rede.

O projecto de rede segundo a terminologia do AWE () baseou-se essencialmente em simular e analisar as predições para cada modo de transmissão, MCS, como, por exemplo (SNR, potência T_x necessária na SS e BS, número de canais, etc.) e determinar o ritmo de transmissão máximo alcançável em todos os locais possíveis na área de cobertura.

Tabela 8.2 - Esquemas de modulação e codificação com o SNR mínimo e os respectivos ritmos de transmissão [Alva06]

ID	Modulação e Codificação	SNR mínimo [dB]	Ritmos de Transmissão [Mbps]
1	BPSK 1/2	3.3	1.41
2	BPSK 3/4	5.5	2.12
3	QPSK 1/2	6.5	2.82
4	QPSK 3/4	8.9	4.23
5	16-QAM 1/2	12.2	5.64
6	16-QAM 3/4	15	8.47
7	64-QAM 2/3	19.8	11.29
8	64-QAM 3/4	21	12.27

Predição da Potência Recebida Máxima no DL

A Figura 8.7 apresenta a predição da potência recebida máxima no sentido descendente, DL. A potência recebida máxima no DL é determinada para cada *pixel* (estação subscritora) em todas as células.

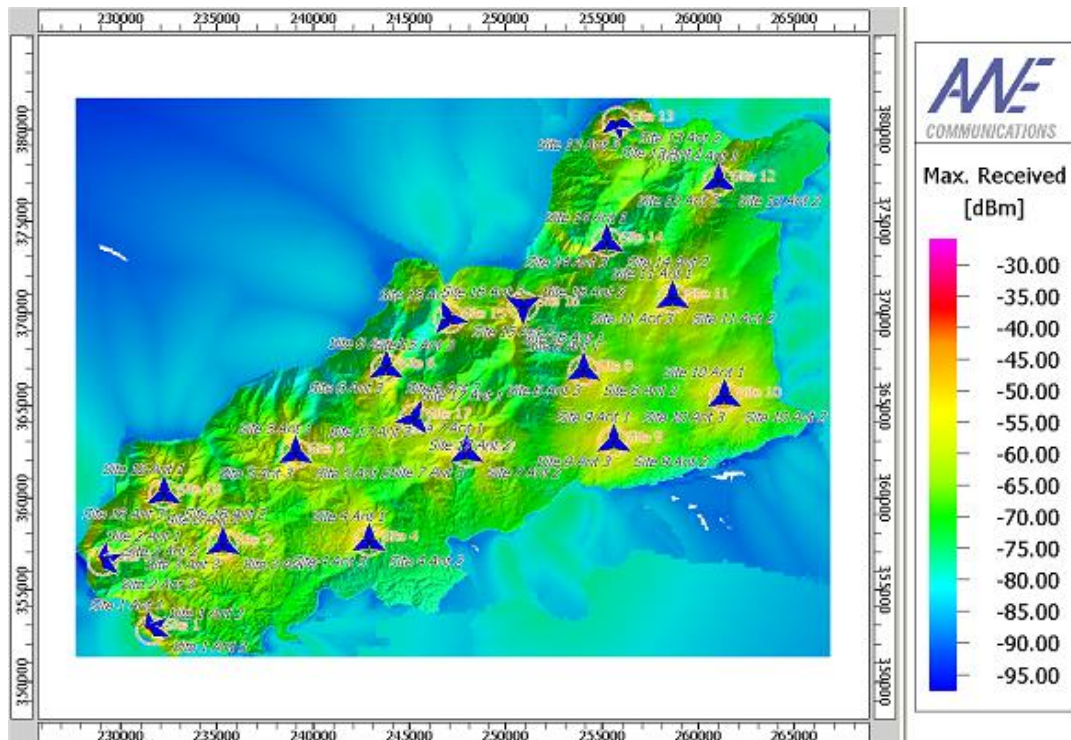


Figura 8.7 - Predição da potência recebida máxima no DL

A partir dos resultados associados à carta do concelho da Covilhã, Figura 8.7, obtemos o gráfico da Figura 8.8 em que observamos o comportamento da potência recebida máxima em função da distância.

Com os resultados da predição da potência recebida máxima da Figura 8.7 podemos também fazer a análise de cobertura através de um limiar definido para a potência recebida.

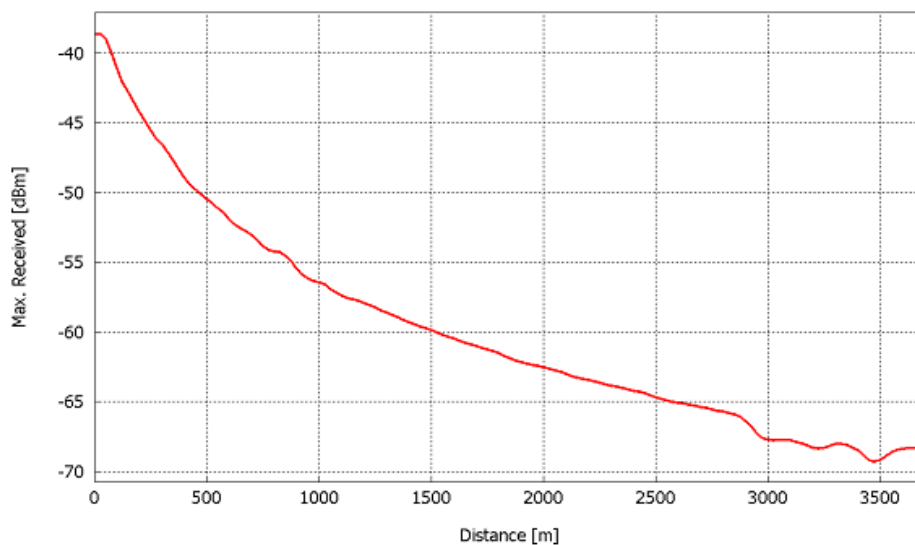


Figura 8.8 - Potência recebida máxima em função da distância

A Figura 8.9 apresenta a análise de cobertura através do limiar da potência recebida, sendo o limiar definido de -80 dBm. A cor dos *pixels* representa se eles estão acima vermelho ou abaixo verde do limiar.

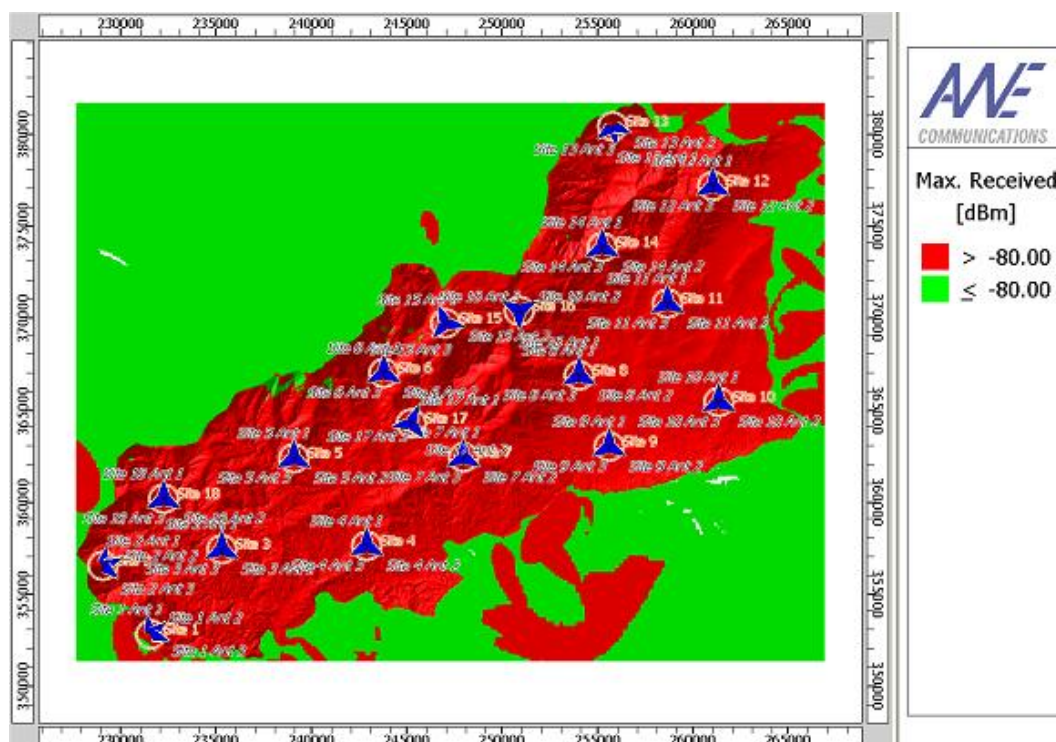


Figura 8.9 - Análise de cobertura

Analisando a Figura 8.8, verificamos que a potência recebida máxima diminui com o aumento da distância. Da análise do gráfico da Figura 8.9, verificamos que, com as dezoito estações base com antenas sectoriais, conseguimos cobrir uma percentagem elevada da área do concelho da Covilhã.

Predição do Ritmo de Transmissão Máximo no DL

A Figura 8.10 apresenta a predição do ritmo de transmissão de dados máximo alcançáveis em todos os locais possíveis na área de cobertura. Estes resultados são muito importantes porque assim sabemos onde esperar o máximo e o mínimo ritmo de transmissão.

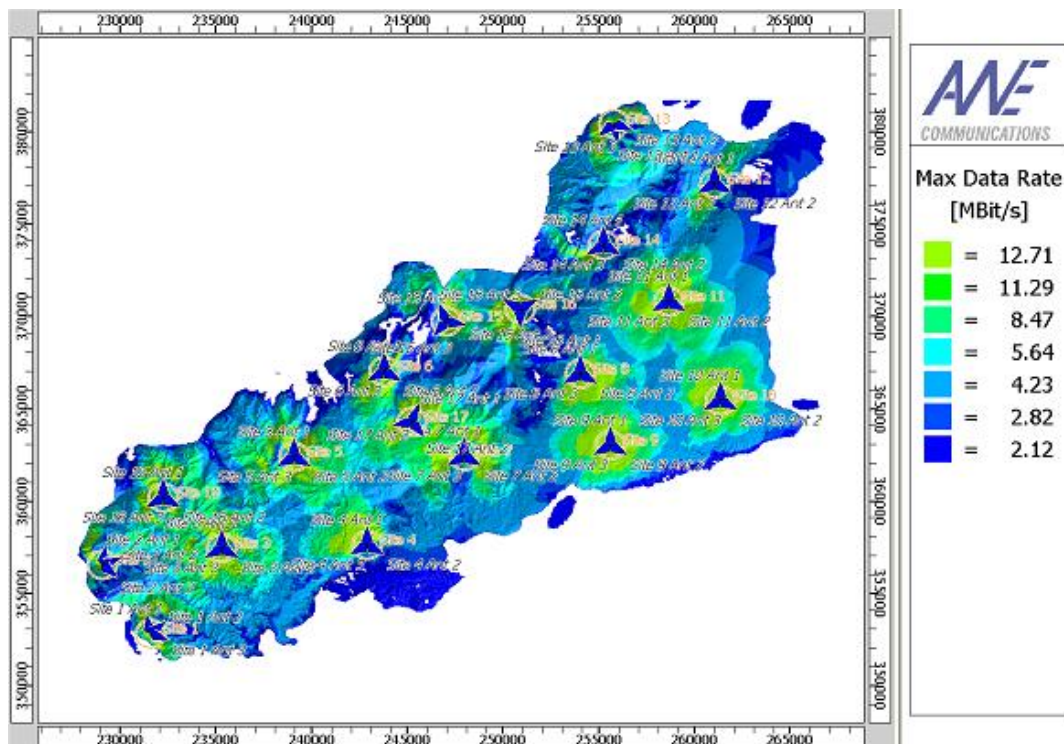


Figura 8.10 - Predição de ritmos de transmissão máximos alcançáveis

Analisando a carta da Figura 8.10, podemos observar que, para as SSs ou utilizadores na região próxima da BS, utiliza-se a modulação de ordem superior 64-QAM com um ritmo de transmissão de 12.71 Mbps. No caso dos utilizadores situados a uma distância média, utiliza-se a modulação 16-QAM (8.47 Mbps). Para os utilizadores distantes, perto da fronteira da célula, utiliza-se a modulação QPSK e BPSK (4.23 e 2.12 Mbps). Ou seja, quanto mais distante o SS ou o utilizador estiver em relação à BS, mais baixo será a ritmo de transmissão de dados. Para visualizar esta análise é importante analisar os gráficos das Figuras 8.11, 8.12 e 8.13, que representam a variação do ritmo de transmissão máximo com a distância, a probabilidade e probabilidade cumulativa do ritmo de transmissão máximo alcançável, respectivamente.

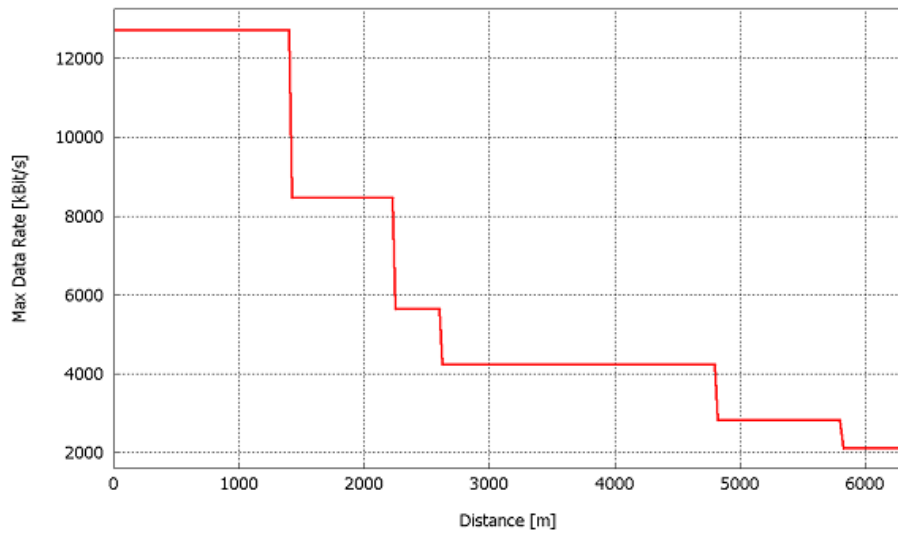


Figura 8.11 - Variação do ritmo de transmissão máxima com a distância

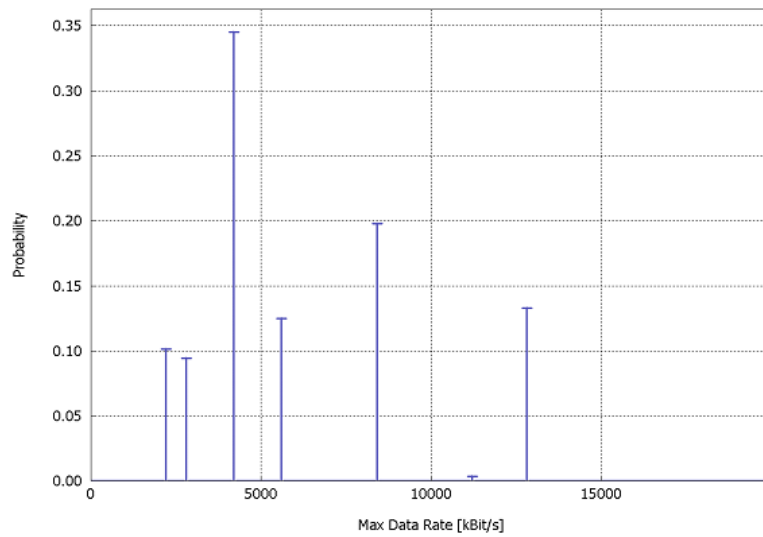


Figura 8.12 - Probabilidade de ritmo de transmissão máxima alcançável

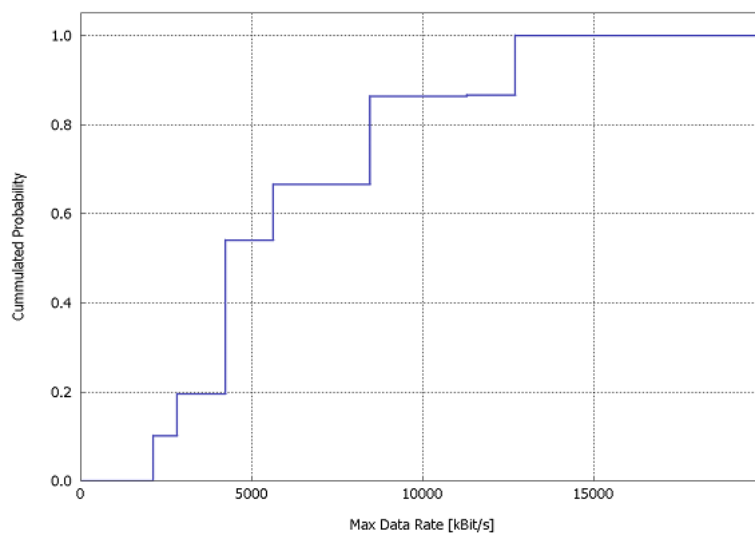


Figura 8.13 - Probabilidade cumulativa do ritmo de transmissão máxima alcançável

Verificamos que até uma distância de 1.5 km a ligação suporta a modulação de ordem elevada que corresponde a um ritmo de transmissão que vai entre 11.29 a 12.27 Mbps, até uma distância de 2.7 km conseguimos ter uma ligação com modulação de ordem média (5.64 a 8.47 Mbps) enquanto que com uma distancia de 6 km só conseguimos ter uma ligação com modulação de ordem inferior (1.41 a 4.23 Mbps), assumindo boas condições de propagação.

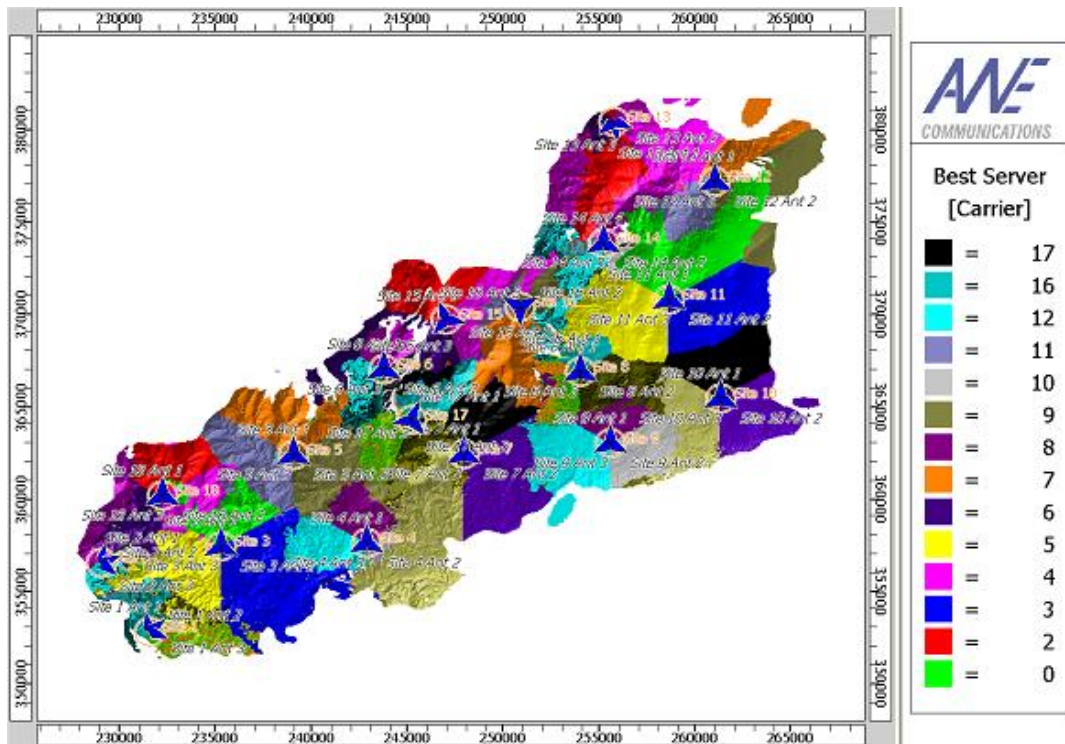
A partir da Figura 8.12, verificamos que a modulação/codificação mais utilizada e o respectivo ritmo de transmissão mais frequente é a QPSK $\frac{3}{4}$ (4.23 Mbps), aproximadamente em 35 % dos casos, seguida da modulação de nível médio, 16-QAM $\frac{3}{4}$ (8.47 Mbps), em mais de 20 % dos casos. A modulação de ordem superior é utilizada com uma frequência de aproximadamente 15 %.

Predição de Células “Melhor Servidor” (*Best Server*)

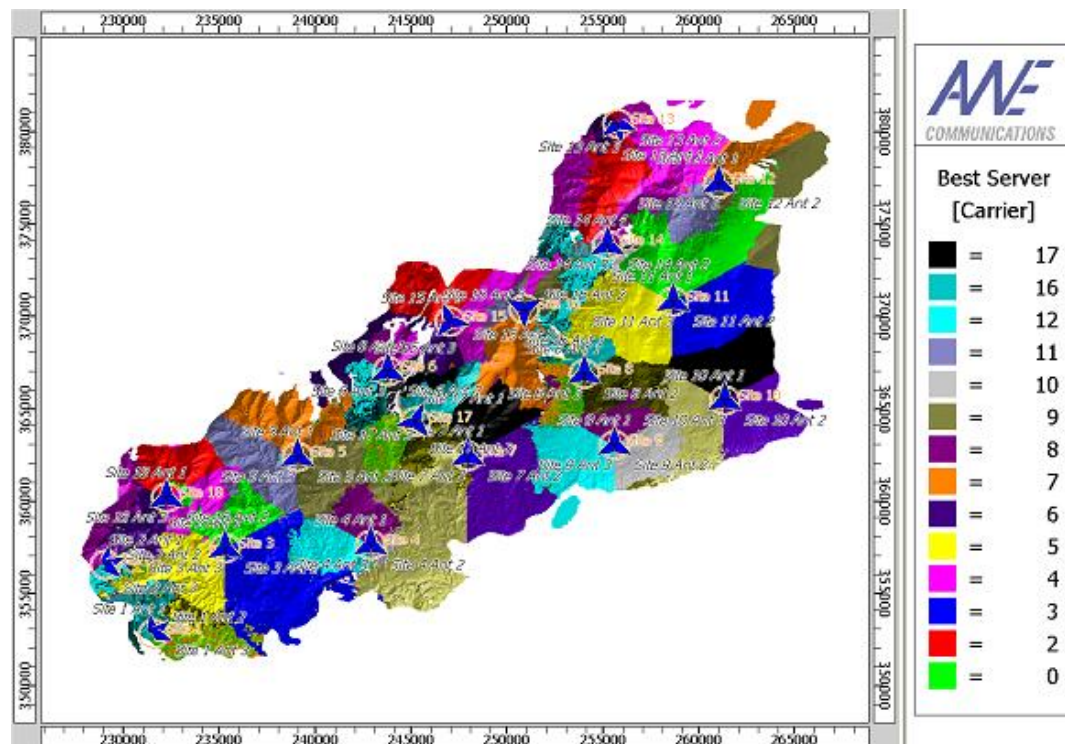
A Cada *pixel* (SS) é atribuído uma célula (BS). Esta célula é a célula de serviço para o *pixel* e todas as SSs neste local. A atribuição da célula, isto é a atribuição do *best server*, “melhor servidor”, pode ser feita através de dois algoritmos diferentes:

i) Atribuição baseada na potência (potência recebida máxima no *downlink*): A potência recebida na SS (*pixel*) é calculada para cada BS (célula). O *pixel* é atribuído para a célula com a potência recebida mais elevada.

ii) Atribuição geométrica (Abertura de antena): Pode ser definida uma abertura para cada antena. São atribuídos todos os *pixels* dentro desta abertura para a célula. Se o *pixel* for localizado em duas aberturas a atribuição é feita à antena (sector) com a menor distância. A Figuras 8.14 apresenta as cartas com as predições do melhor servidor e (*best server*) para cada um dos esquemas de modulação e codificação.

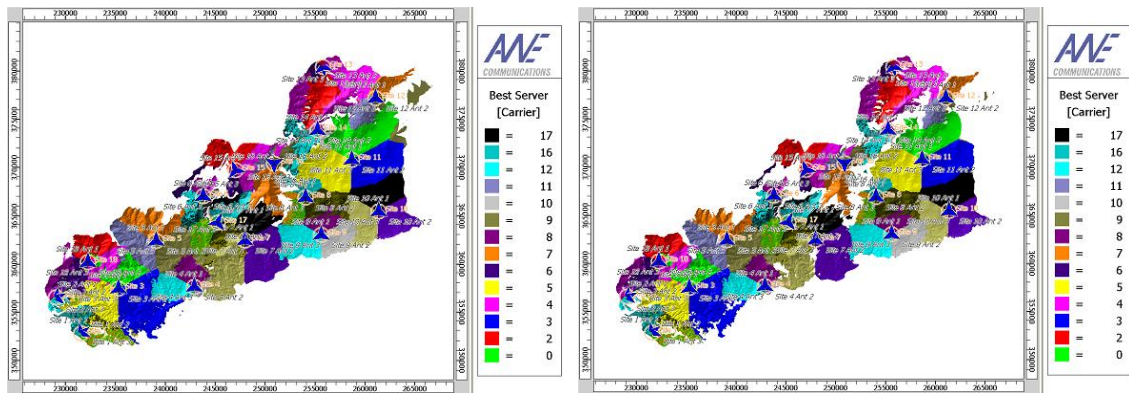


(a)



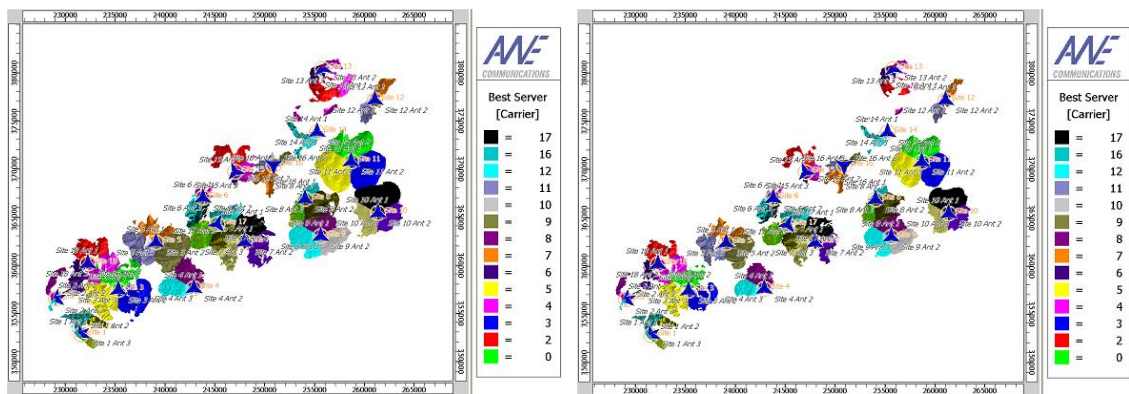
(b)

Figura 8.14 - Cartas com as células “melhor servidor” (*best server*)
 (a) BPSK $\frac{1}{2}$ e (b) BPSK $\frac{3}{4}$



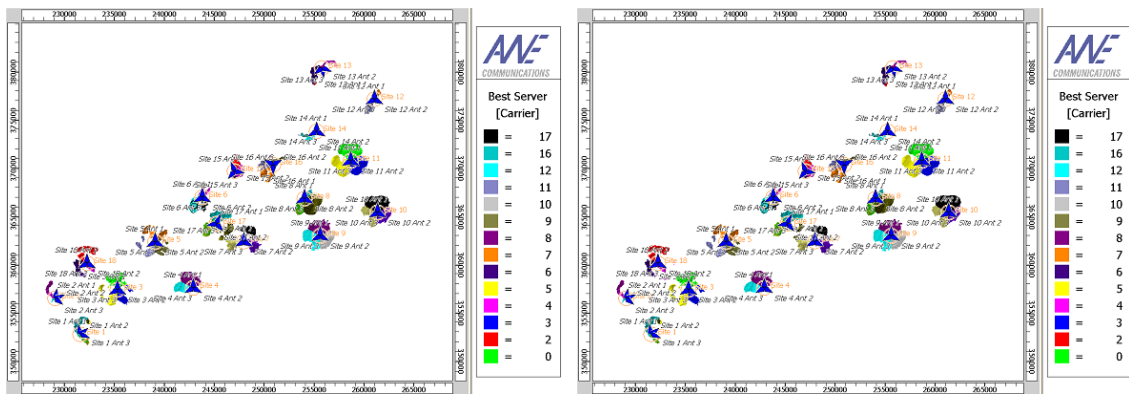
(c) QPSK $\frac{1}{2}$

(d) QPSK $\frac{3}{4}$



(e) 16-QAM $\frac{1}{2}$

(f) 16-QAM $\frac{3}{4}$



(g) 64-QAM $\frac{2}{3}$

(h) 64-QAM $\frac{3}{4}$

Figura 8.14 - Cartas com as células “melhor servidor” (*best server*) (cont.)

Analisando as cartas da Figura 8.14, verificamos que à medida em que a ordem de modulação aumenta a área da célula melhor servidor da célula diminui. Pois só se conseguem utilizar a modulação de ordem superior nas zonas próximas das antenas da estação base.

Predição do Número de Portadoras Recebidas no DL

As cartas, com a predição do número de portadoras no DL, Figura 8.15 são determinadas individualmente para cada MCS. Adicionalmente, consideram-se as capacidades das SSs, definidas para cada MCS, isto é, a potência de emissão máxima disponível na SS, o ganho da antena da SS, etc.

Determina-se o número de portadoras recebidas para cada SS (*pixel*). Uma portadora é recebida se a potência recebida no sentido descendente, DL, estiver acima de um limiar definido individualmente para cada MCS. O número de portadoras acima dum determinado limiar é muito importante para análise do *handover* porque podemos ver facilmente o número de alternativas disponíveis. Neste caso, este resultado não é muito relevante porque o sistema utilizado não suporta o *handover*.

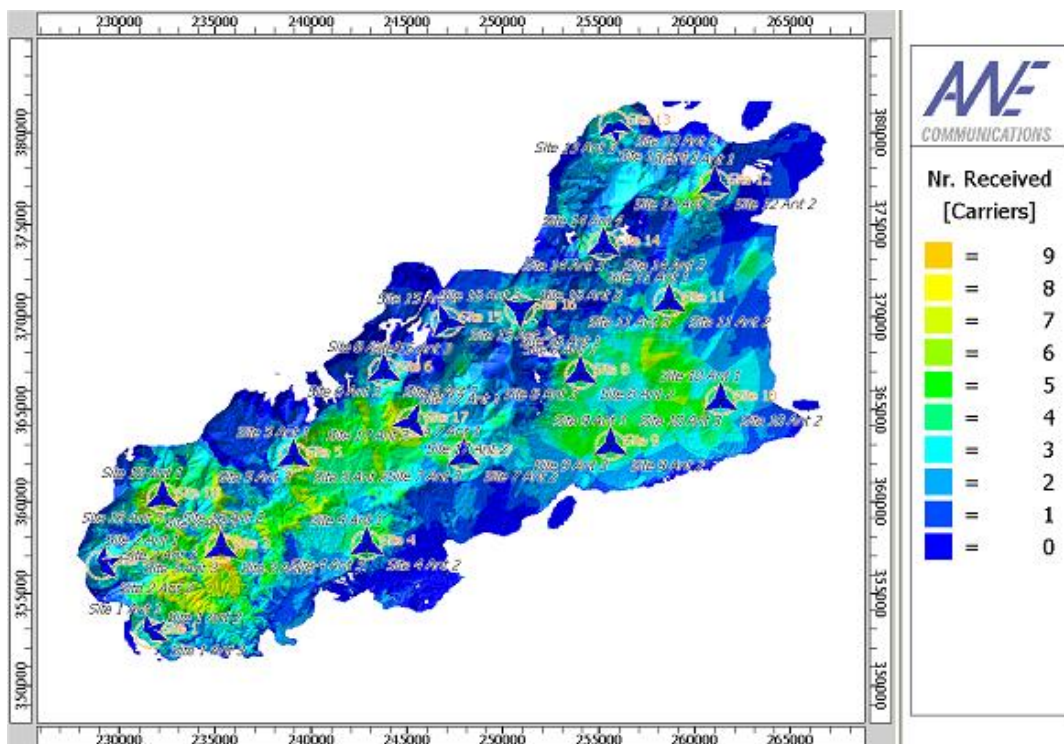
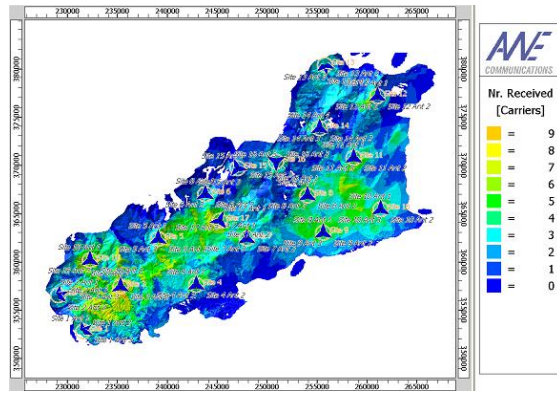
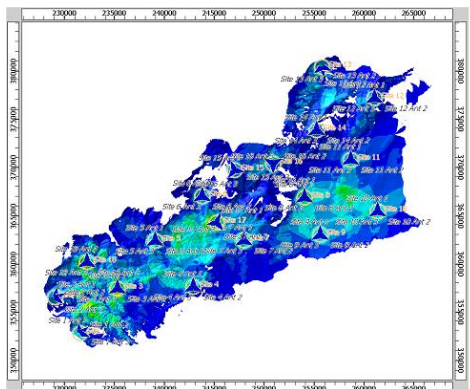


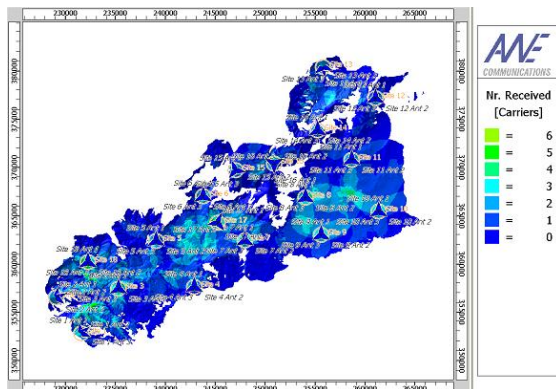
Figura 8.15 – Cartas com o número de portadoras recebidos na SS no DL
(a) BPSK 1/2



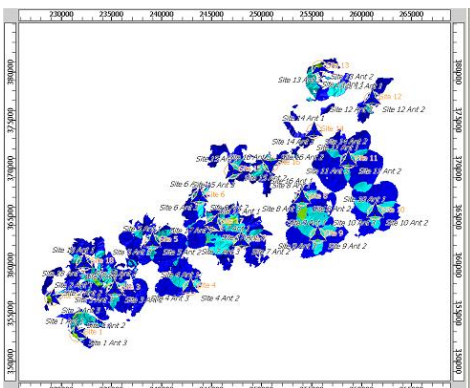
(b) BPSK $\frac{3}{4}$



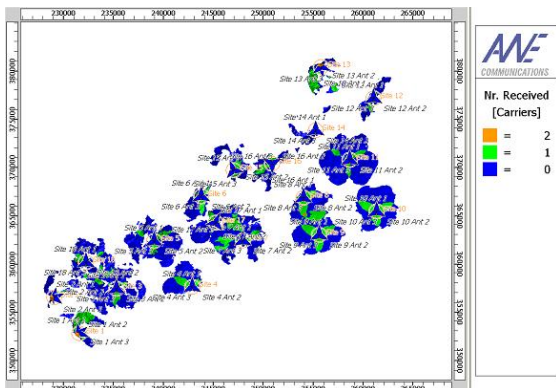
(c) QPSK $\frac{1}{2}$



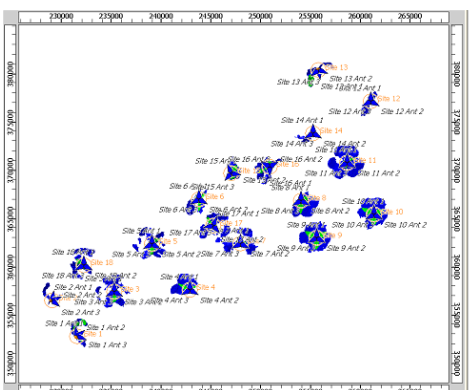
(d) QPSK $\frac{3}{4}$



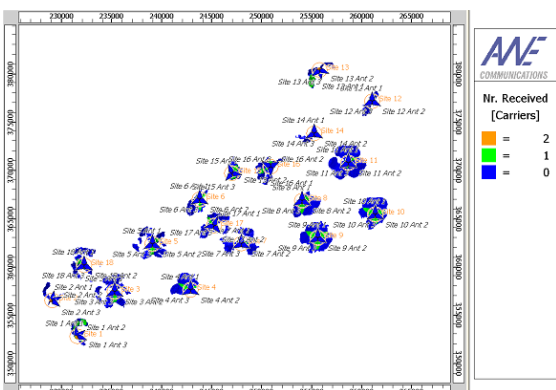
(e) 16-QAM $\frac{1}{2}$



(f) 16-QAM $\frac{3}{4}$



(g) 64-QAM $\frac{2}{3}$



(h) 64-QAM $\frac{3}{4}$

Figura 8.15 – Cartas com o número de portadoras recebidas na SS no DL (cont.)

Através da análise das cartas da Figura 8.15, verificamos que à medida que a ordem de modulação e codificação aumenta o número de portadoras recebidas diminui, Figura 8.16, isto é, quando a rede sem fios suporta modulações de ordem elevada recebem-se poucas portadoras. Observa-se também que a partir de modulações de ordem média e elevada só conseguimos receber 3 a 4 portadoras das 14 disponíveis.

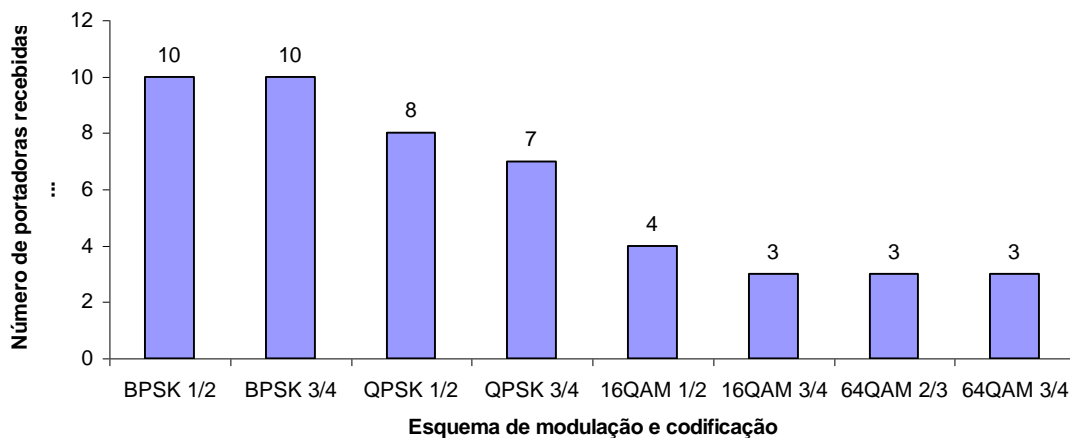
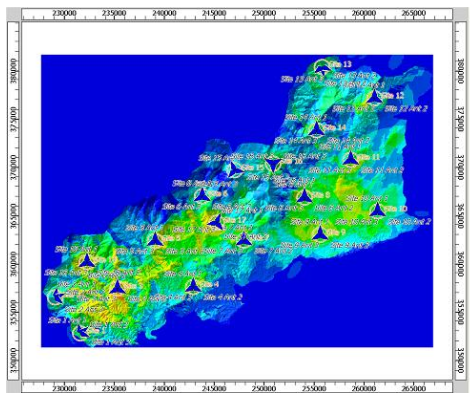


Figura 8.16 - Variação de número de portadoras em função dos MCS

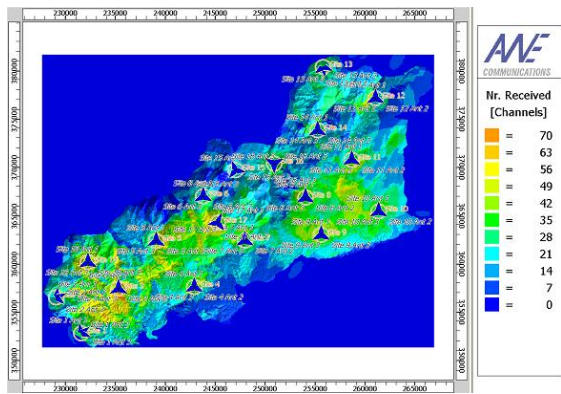
Predição de Número de Canais Recebidos no DL

As cartas com a predição do número de canais recebidos no DL, Figura 8.17 são também determinadas individualmente para cada MCS. São consideradas adicionalmente as capacidades das SSs, definidas individualmente para cada MCS, isto é, parâmetros como o factor de ruído da SS, o ganho da antena da SS, etc.

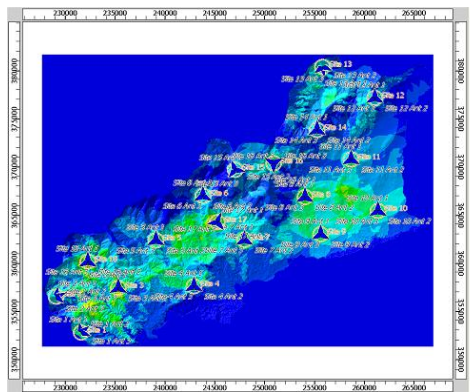
Determina-se o número canais para cada SS. Nos sistemas com o múltiplo acesso TDMA, o número de canais é o número de portadoras recebidas multiplicado pelo número de *time slots* em cada portadora. O número de canais pode não ser constante em cada portadora, isto é, a primeira portadora na célula pode ter 7 canais (*time slots*) e a segunda portadora na célula pode ter 8 canais (*time slots*).



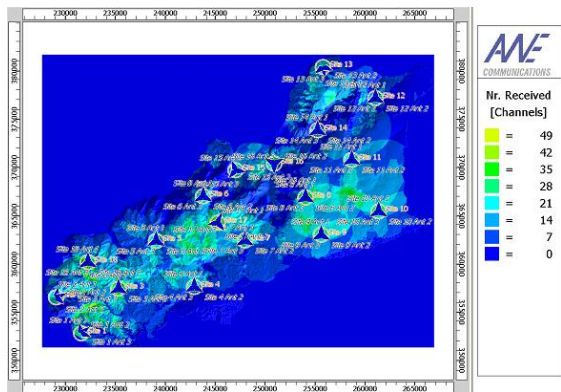
(a) BPSK $\frac{1}{2}$



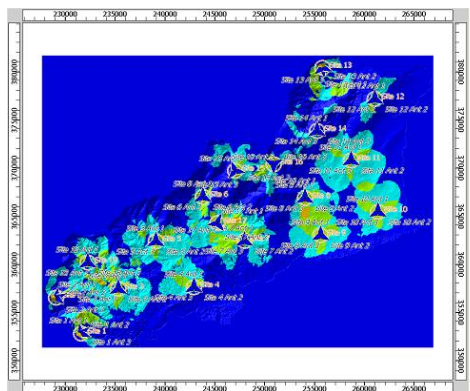
(b) BPSK $\frac{3}{4}$



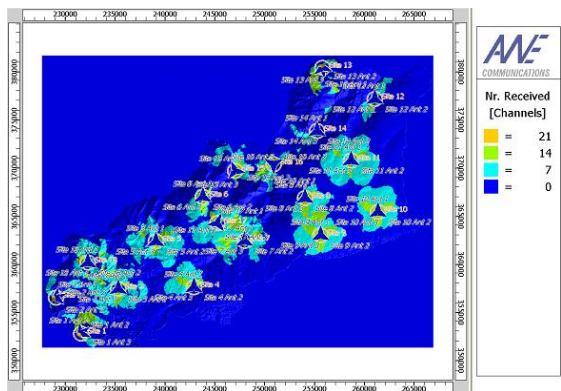
(c) QPSK $\frac{1}{2}$



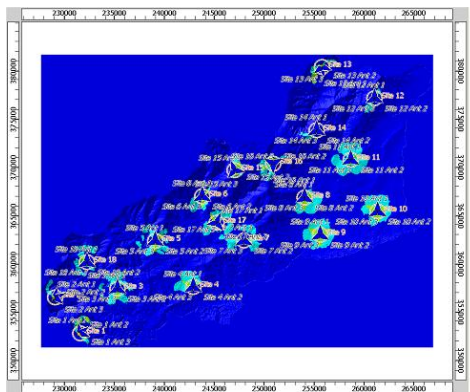
(d) QPSK $\frac{3}{4}$



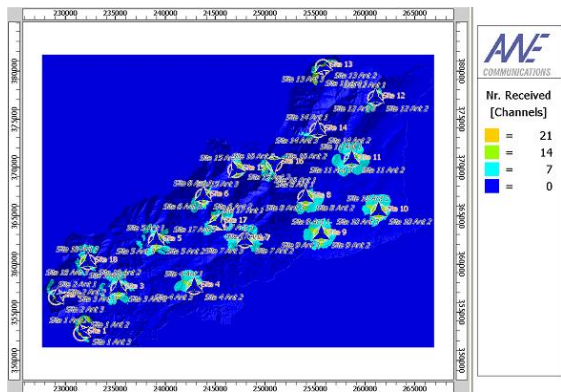
(e) 16-QAM $\frac{1}{2}$



(f) 16-QAM $\frac{3}{4}$



(g) 64-QAM $\frac{2}{3}$



(h) 64-QAM $\frac{3}{4}$

Figura 8.17 – Cartas com o número de canais recebidos na SS no DL

Analisando as cartas da Figura 8.17 verificamos que à medida que a ordem de modulação e codificação aumenta o número de canais recebidos diminui. Isto porque o número de canais é directamente proporcional ao número de portadoras, tal como vimos anteriormente, ou seja, quando a rede suporta a modulação de ordem superior com poucos canais disponíveis. Enquanto que para as modulações de ordem inferior, BPSK e QPSK, temos 70 e 56 canais disponíveis, respectivamente, para a modulação de ordem média e superior temos só 21 canais, Figura 8.18.

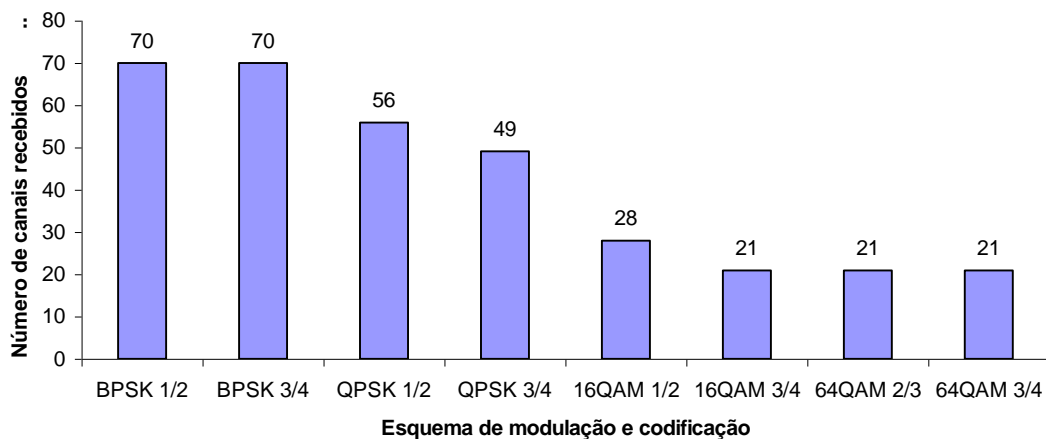
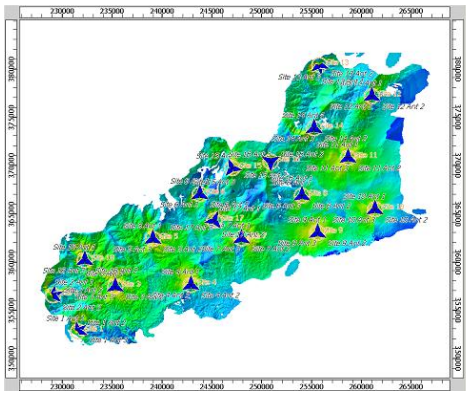


Figura 8.18 - Variação de número de canais recebidos em função do MCS

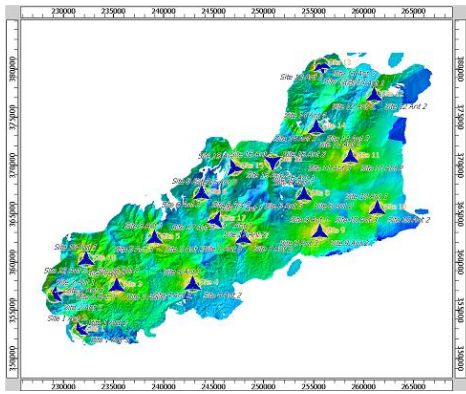
Predição do SNIR no DL

As cartas com a predição do SNIR no DL são também determinadas individualmente para cada MCS, Figura 8.19. Adicionalmente, consideram-se as capacidades das SS, definidas para cada MCS, isto é, a potência de T_x máxima disponível na SS, o ganho da antena da SS, etc. Se o valor da SNIR (*Signal to Noise plus Interference Ratio*) máximo estiver abaixo do mínimo necessário, definido individualmente para cada MCS, não é determinado o *pixel* (preenchido a cor) para uma célula.

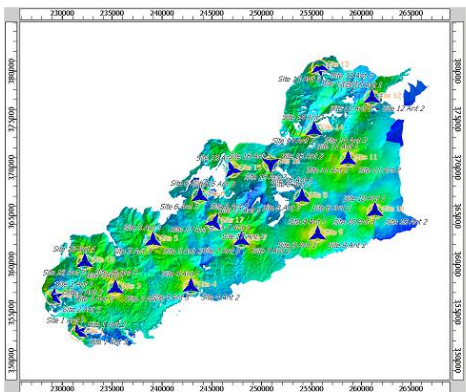
Para cada SS é determinado o SNIR no DL para a célula de serviço. O SNIR é a soma da interferência co-canal e com o ruído térmico determinado pela relação entre potência recebida na célula de serviço. A ferramenta não considera o UL. Embora os resultados no UL sejam em geral menos favoráveis, a utilização da sub-canalização poderá permitir ultrapassarmos essas limitações em termos de cobertura. No entanto, julgamos, que é necessário uma análise mais detalhada no UL, pois a sub-canalização em geral, não introduz melhorias em termos de capacidade do sistema.



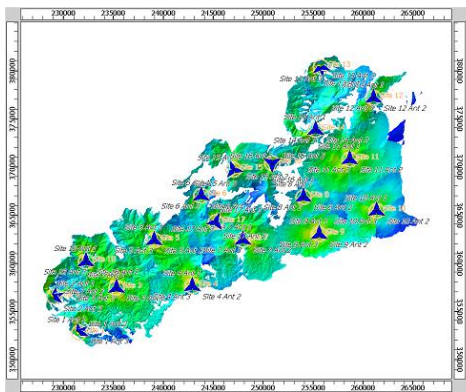
(a) BPSK $\frac{1}{2}$



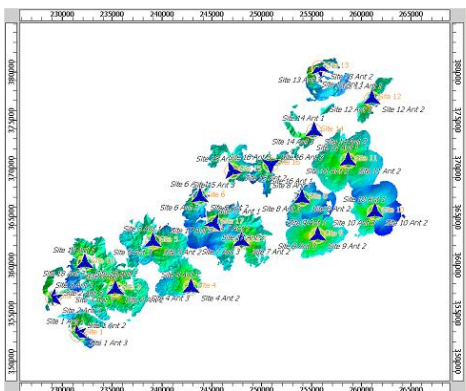
(b) BPSK $\frac{3}{4}$



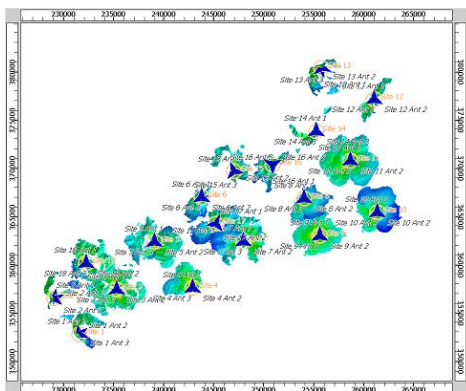
(c) QPSK $\frac{1}{2}$



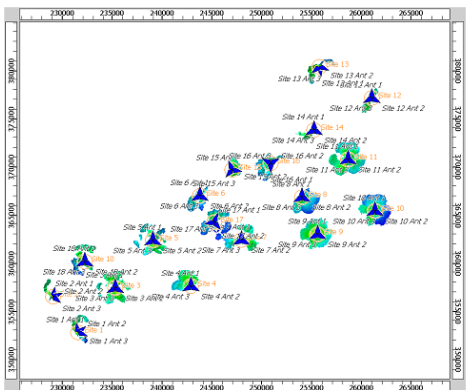
(d) QPSK $\frac{3}{4}$



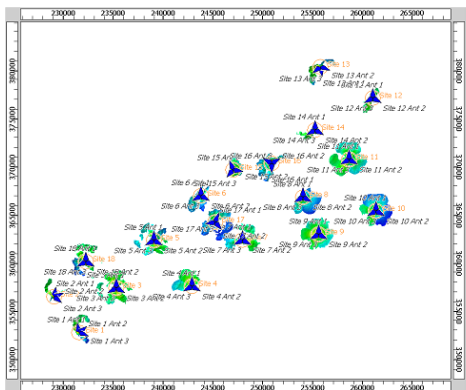
(e) 16-QAM $\frac{1}{2}$



(f) 16-QAM $\frac{3}{4}$



(g) 64-QAM $\frac{2}{3}$



(h) 64-QAM $\frac{3}{4}$

Figura 8.19 - Cartas com a previsão do SNIR no DL

Analisando as cartas da Figura 8.19 verifica-se que a potência e o SNIR decrescem em função da distância, Figura 8.20. Dado o impacto que a falta de qualidade no sinal recebido pode estar nas comunicações a norma IEEE 804.16-2004 emprega oito esquemas de modulação e codificação distintos, ou seja, próximo da estação base pode-se utilizar a modulação de ordem superior para os valores de SNIR elevados, mas para distâncias menos longas é necessário recorrer a modulação de ordem inferior.

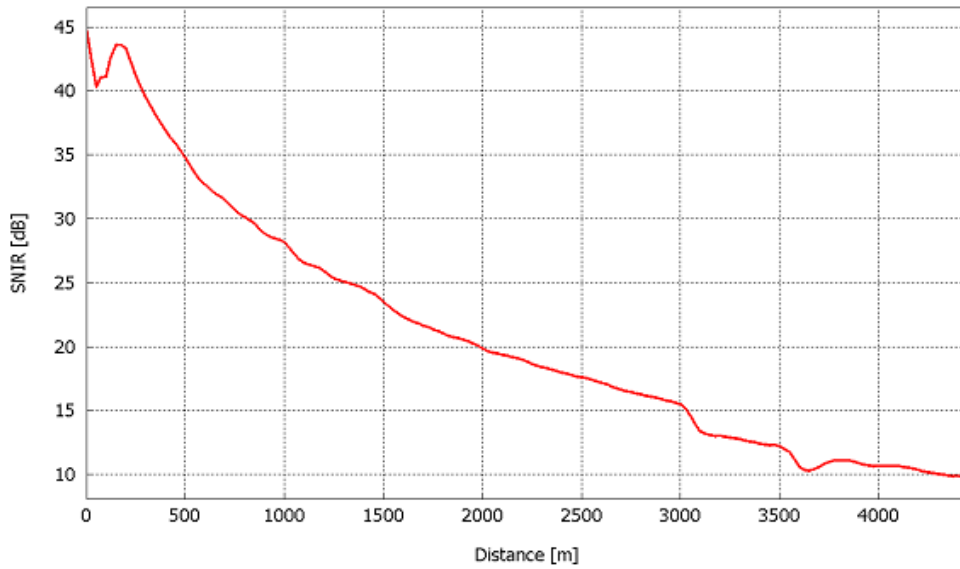
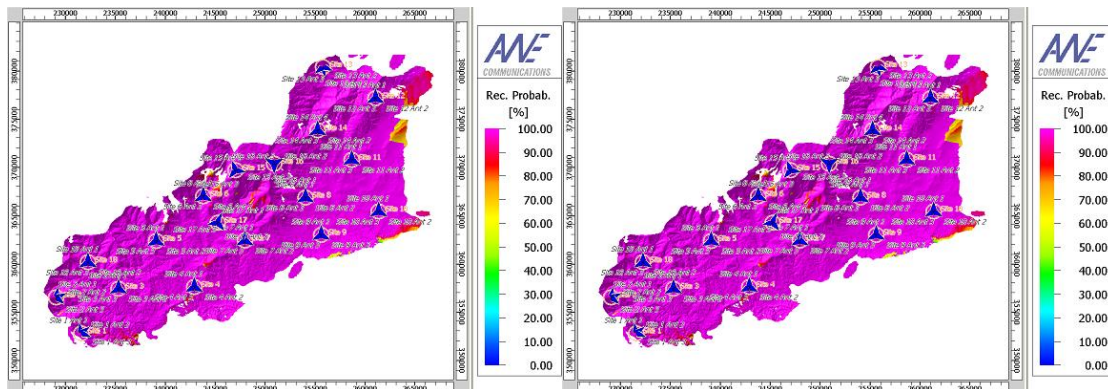


Figura 8.20 - Variação da SNIR em função da distância

Através da análise do gráfico da Figura 8.20, verificamos que, para estas distâncias é possível suportar sempre o esquema de modulação/codificação de ordem mais baixa visto que o SNR mínimo é de 3.3 dB, Tabela 8.2. No entanto, para modulação de ordem superior só é possível ultrapassar o valor mínimo até raios de cobertura de aproximadamente 2 km.

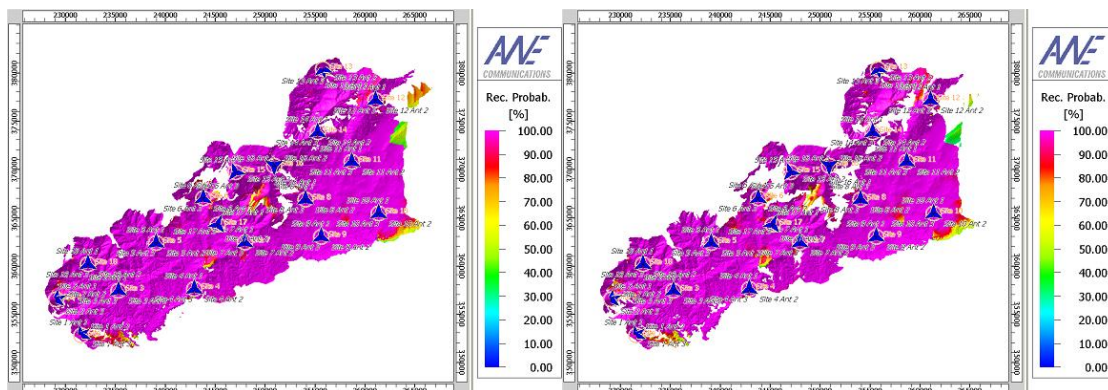
Probabilidade de Recepção no DL

As cartas com a probabilidade de recepção no DL são determinadas individualmente para cada MCS, Figura 8.21. Consideram-se adicionalmente as capacidades das SSs, definidas para estes MCS, isto é, a potência de T_x máxima disponível na SS, ganho da antena da SS, a margem de desvanecimento rápido, etc. A probabilidade de recepção é determinada baseada na predição de SNIR. É utilizada a distribuição de Rayleigh, e dependendo do valor de SNIR mínimo exigido definido para a MCS, é determinada a probabilidade de se ultrapassar o valor de SNIR mínimo necessário.



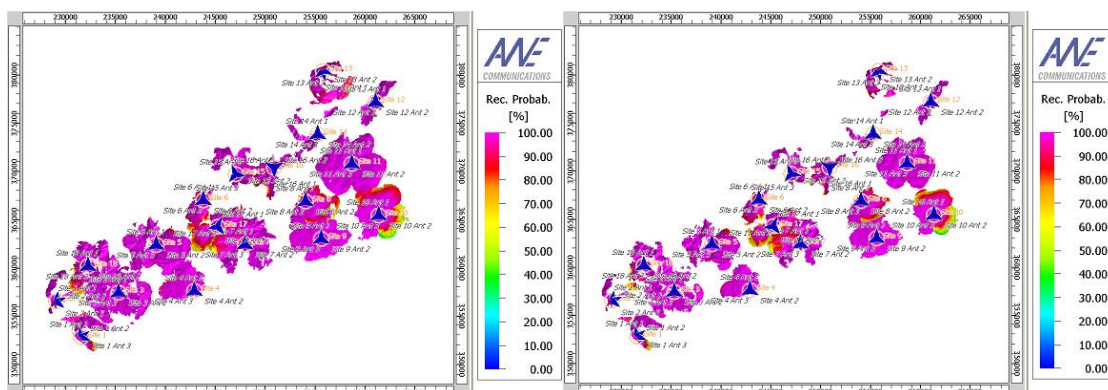
(a) BPSK $\frac{1}{2}$

(b) BPSK $\frac{3}{4}$



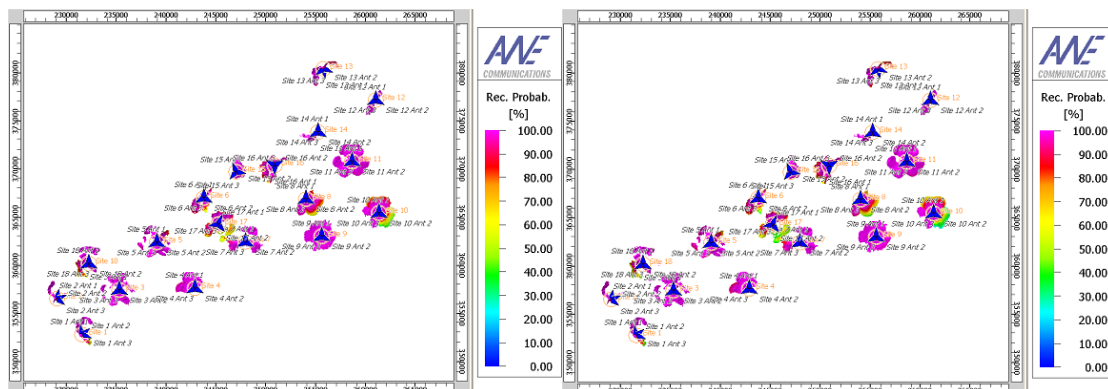
(c) QPSK $\frac{1}{2}$

(d) QPSK $\frac{3}{4}$



(e) 16-QAM $\frac{1}{2}$

(f) 16-QAM $\frac{3}{4}$



(g) 64-QAM $\frac{2}{3}$

(h) 64-QAM $\frac{3}{4}$

Figura 8.21 – Cartas com a probabilidade de recepção no DL

Analisando as cartas da Figura 8.21 e comparando-as com os cartas da Figura 8.19, verificamos que para valores da SNIR inferiores (definidos para cada MCS) a probabilidade de recepção é reduzida, isto é, a potência de T_x necessária a SS para alcançar a BS é reduzida.

Predição de Potência de T_x necessária no DL para Alcançar a SS

As cartas com a predição da potência transmitida necessária no DL são determinadas individualmente para cada MCS, Figura 8.22. São consideradas adicionalmente as capacidades das SSs, definidas para estes MCS, isto é, o factor de ruído na SS, o ganho da antena da SS, etc. Para cada SS é determinada a potência de T_x mínima necessária na BS para alcançar a SS.

Para a determinação da potência necessária é considerada a interferência co-canal e o ruído térmico no sentido descendente.

Se a potência de T_x necessária for maior que a potência de T_x máxima disponível da BS, a SS não será alcançada e o *pixel* não será determinado para a célula.

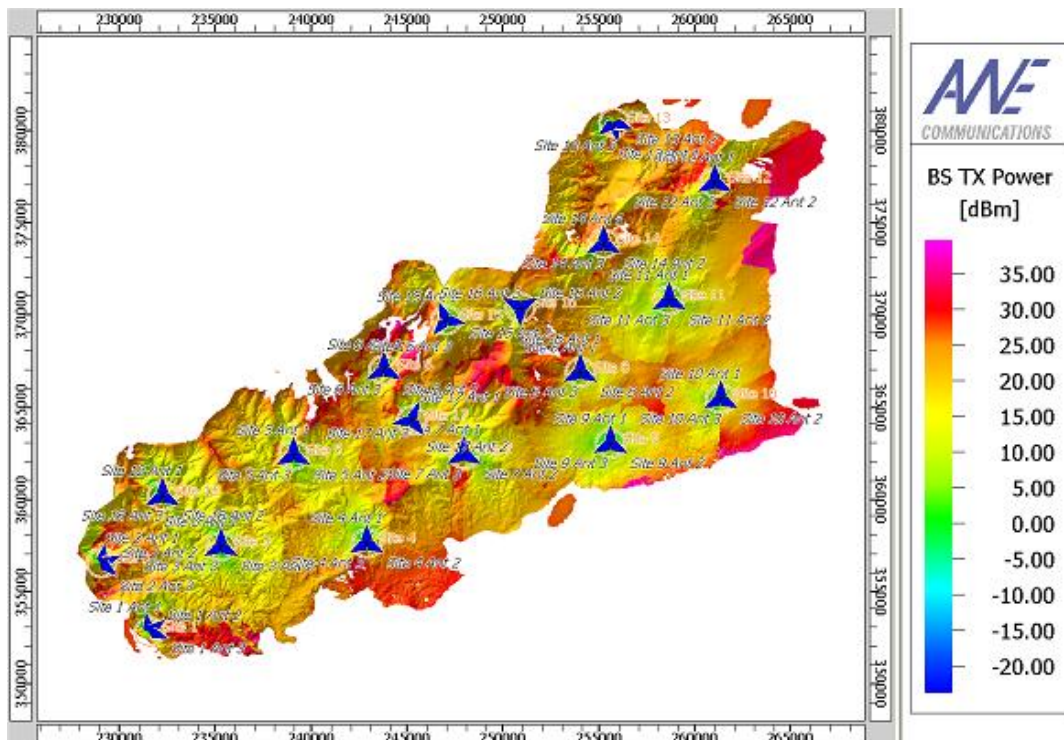
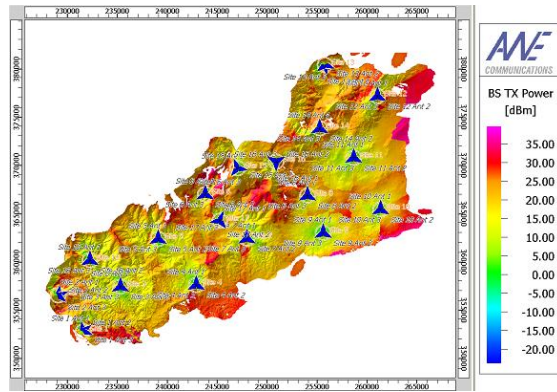
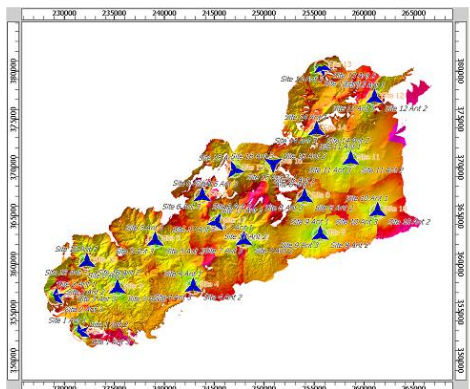


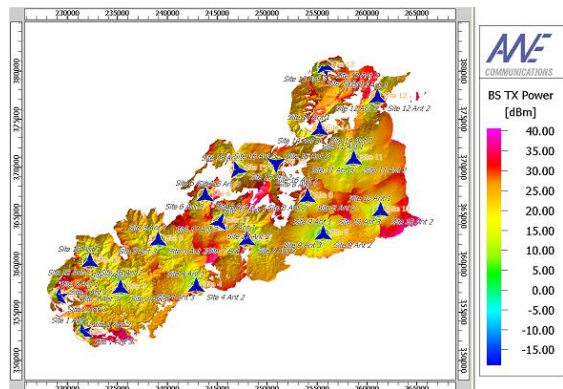
Figura 8. 22 - Cartas com a potência de T_x necessária a BS para alcançar a SS BPSK 1/2



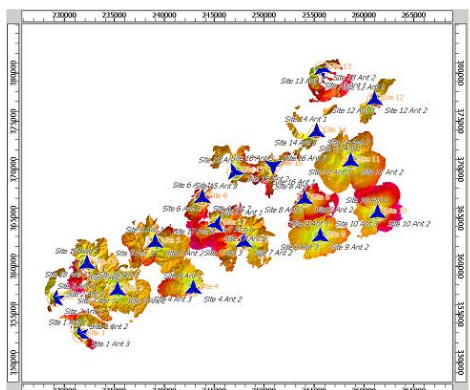
b) BPSK $\frac{3}{4}$



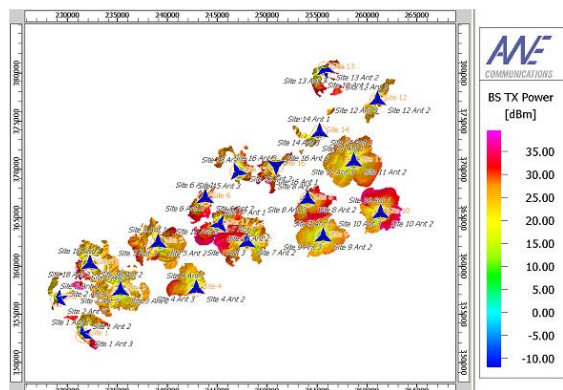
(c) QPSK $\frac{1}{2}$



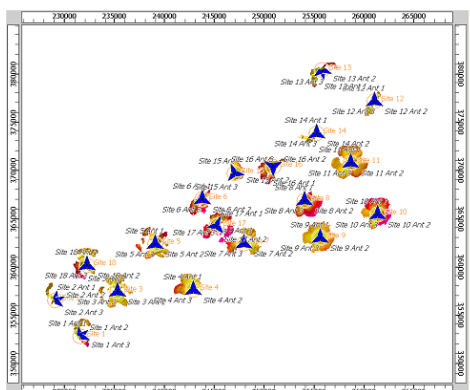
(d) QPSK $\frac{3}{4}$



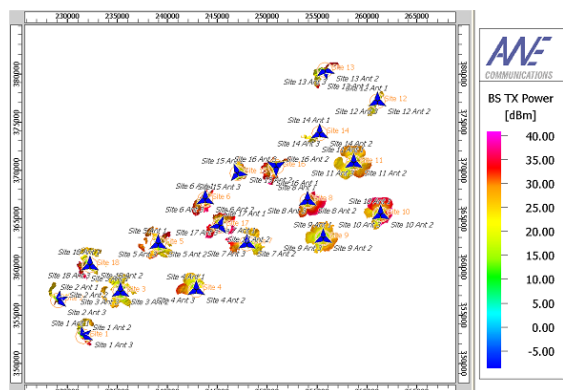
(e) 16-QAM $\frac{1}{2}$



(f) 16-QAM $\frac{3}{4}$



(g) 64-QAM $\frac{2}{3}$



(h) 64-QAM $\frac{3}{4}$

Figura 8. 22 - Cartas com a potência de T_x necessária a BS para alcançar a SS (cont.)

8.4 Resultados Obtidos na Cidade da Covilhã

Nesta Secção apresentam-se os resultados de propagação e planeamento de rede sem fios IEEE 802.16-2004 na área urbana da Covilhã. Neste caso, são utilizadas três estações base com três sectores cada. Os outros parâmetros considerados na simulação desta rede são os mesmos que se utilizaram anteriormente, Tabela 8.1. A Figura 8.23 apresenta a área urbana da Covilhã com as três BSs localizados em locais estratégicos através da optimização feita pela ferramenta GIS.

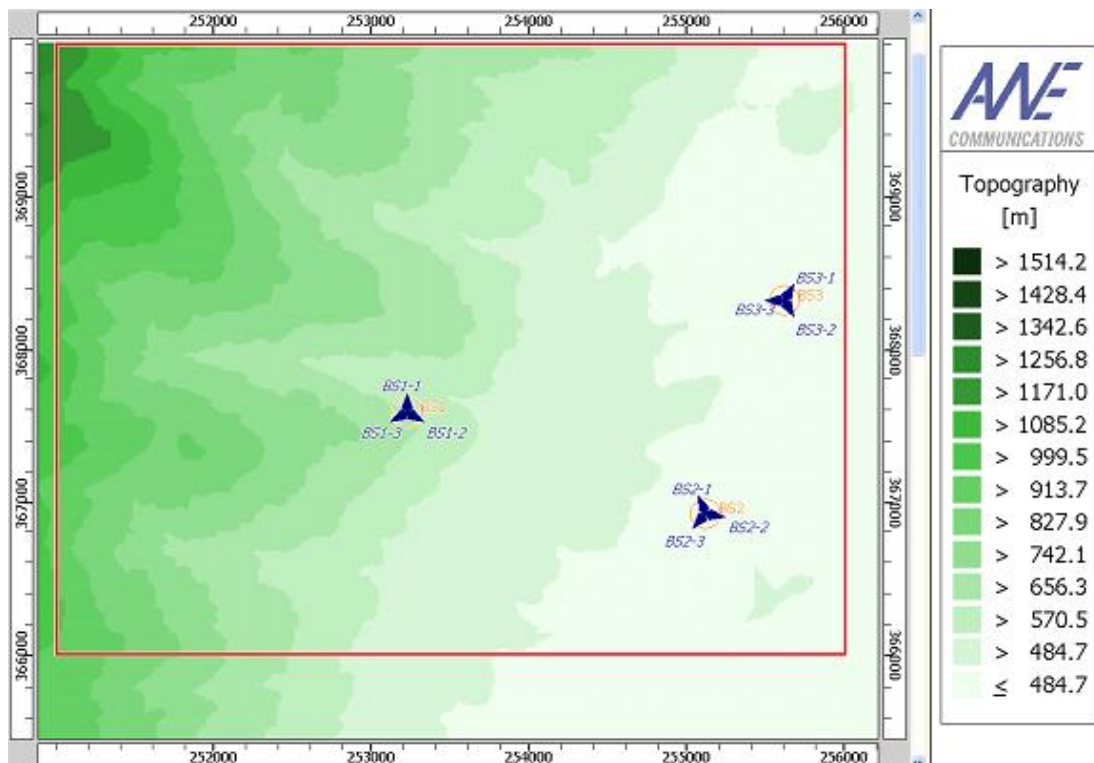


Figura 8.23 - Base de dados topográfica da área urbana da Covilhã com as três BSs de três sectores

8.5 Resultados de Propagação na Cidade da Covilhã

O planeamento das áreas de cobertura das BSs requer a estimação do sinal proveniente dessas estações, bem como das outras que podem estar a funcionar nas mesmas frequências ou frequências adjacentes. É essencial prever as zonas limites onde o nível de sinal é mínimo, e as zonas onde pode haver interferência. Embora neste caso como existem só três células a utilizar frequências diferentes, não haverá grande problema de interferência. A previsão do sinal envolve a estimativa do valor mediano e da variação em torno deste. É muito importante que os modelos de propagação se aproximem da

realidade o melhor possível para que se possam tornar ferramentas fidedignas e indispensáveis no planeamento celular de uma rede de comunicações móveis e sem fios. Na simulação da propagação na cidade da Covilhã vamos analisar os seguintes resultados:

- Intensidade de campo, que é predita individualmente para cada antena emissora, calculada em [dB μ V/m];
- Atenuação, que é predita individualmente para cada antena emissora, calculada em [dB];
- Potência recebida do sinal, que é predito individualmente para cada antena emissora, calculada em [dBm].

8.5.1 Estação Base 1 – Residência Mista da UBI

Esta Secção apresenta os resultados das predições relativas à estação base 1 localizada na residência universitária mista da UBI, Figura 8.24. As antenas da estação base encontram-se a uma altura de 22 metros. A Figura 8.25 apresenta os locais com e sem linha de vista da estação base 1 localizada na residência mista da UBI.

As Figuras 8.26, 8.27 e 8.28 apresentam os resultados da intensidade de campo, de atenuação e da potência recebida, respectivamente, nos três sectores da BS1.



Figura 8.24 - Residência Universitária mista da UBI e a vista do sector 1 a partir da BS

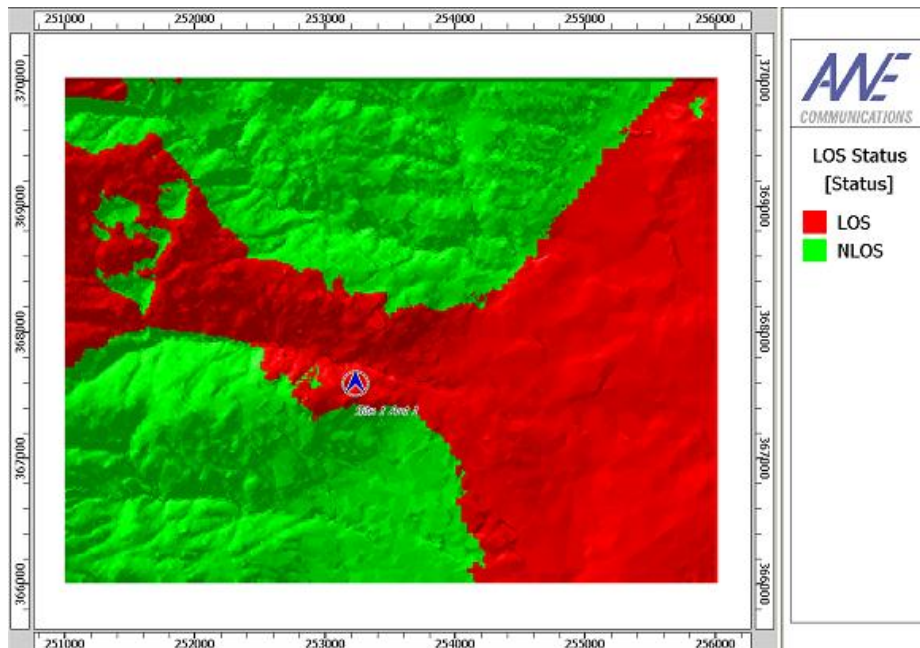
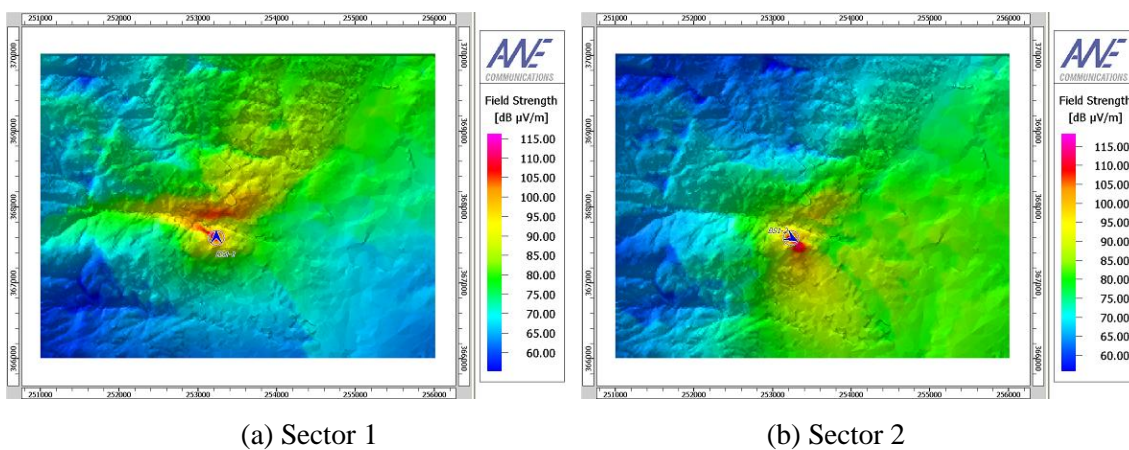
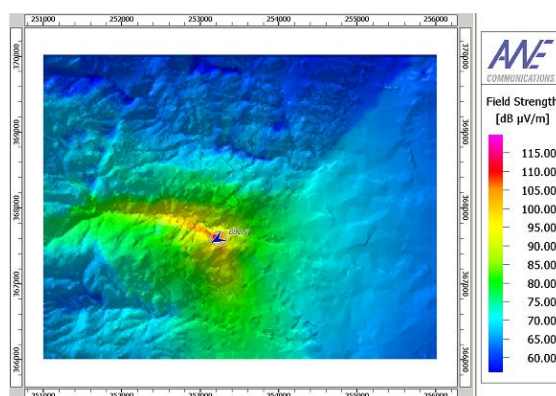


Figura 8.25 - Locais com e sem linha de vista a partir da BS 1



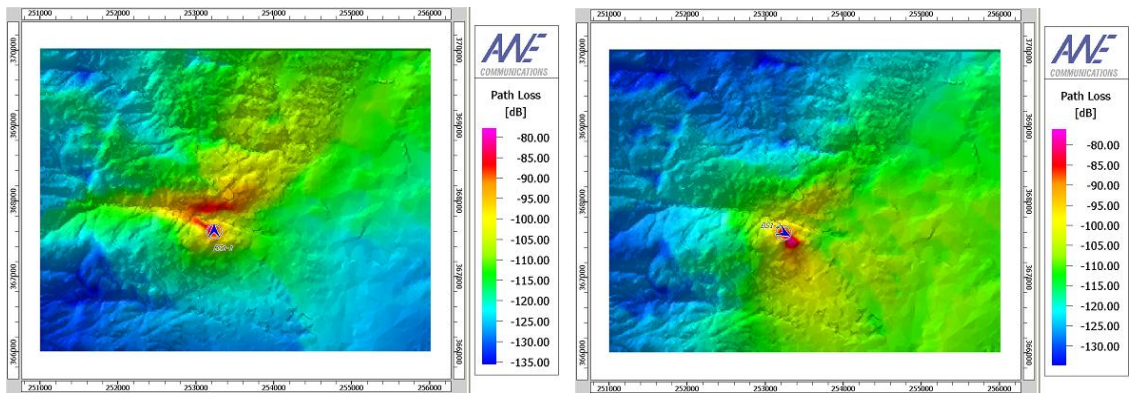
(a) Sector 1

(b) Sector 2



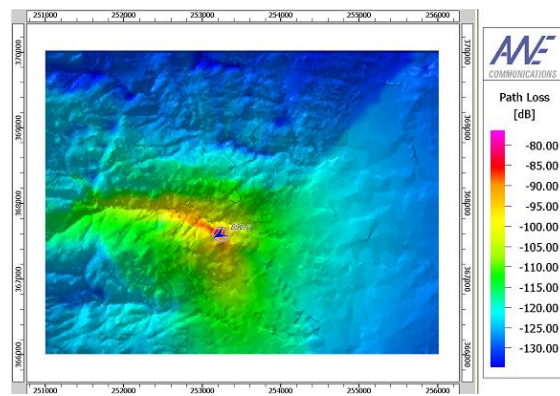
(c) Sector 3

Figura 8.26 - Predição da intensidade de campo na BS 1



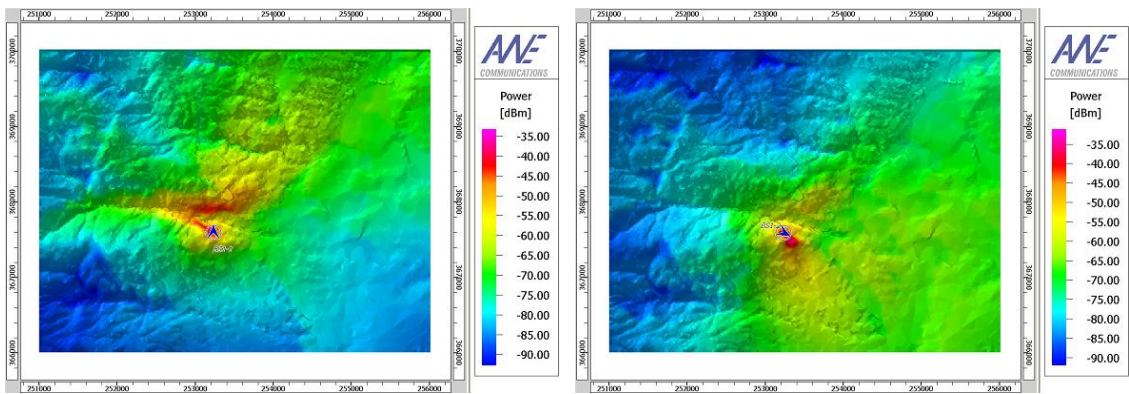
(a) Sector 1

(b) Sector 2



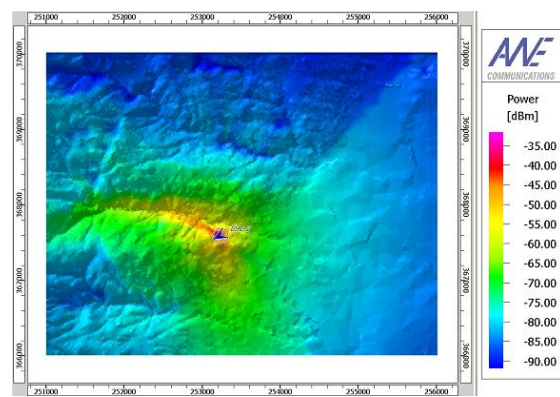
(c) Sector 3

Figura 8.27- Predição da atenuação na BS 1



(a) Sector 1

(b) Sector 2



(c) Sector 3

Figura 8.28 - Predição da potência na BS 1

Através da análise das cartas das Figuras 8.26, 8.27 e 8.28, verificamos que se obtém os melhores resultados com as antenas dos sectores 1 e 2.

A intensidade de campo foi predita a uma altura de 22 metros acima do chão. Devido aos efeitos de sombreamento dos edifícios e do monte que se levantam entre a antena da estação base e a antena do equipamento do utilizador, a intensidade de campo da antena do sector 3, Figura 8.26 (c), apresenta valores baixos na maior parte da área edificada da cidade da Covilhã. De acordo com as Figuras 8.26 (a) e 8.26 (b), a intensidade de campo das antenas dos sectores 1 e 2 apresentam valores mais elevados na maior parte da área edificada da cidade da Covilhã e, portanto, deverá fornecer melhores condições de propagação. Com a atenuação e a potencia recebida verificamos o mesmo tipo de comportamento da intensidade de campo.

A Figura 8.29 apresenta o comportamento da potência em função da distância, onde podemos verificar que a potencia diminui com o aumento da distância

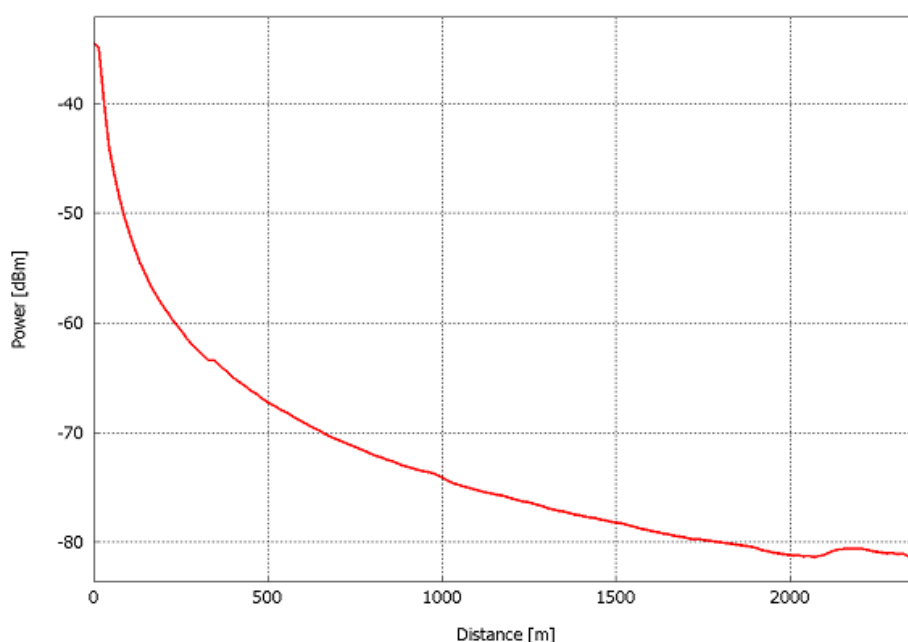


Figura 8.29 - Variação da potência com a distância na BS1

8.5.2 Estação Base 2 – Aeródromo da Covilhã

A estação base 2 encontra-se localizada no aeródromo da Covilhã, Figura 8.30. As antenas da estação base estão a uma altura de 20 metros acima do chão.



Figura 8.30 - Aeródromo da Covilhã e a vista de um dos sectores da BS 2

A Figura 8.31 apresenta os locais com e sem linha de vista a partir da estação base 2. As Figuras 8.32, 8.33 e 8.34 apresentam os resultados da intensidade de campo, atenuação e potência recebida do sinal, respectivamente, nos 3 sectores da estação base.

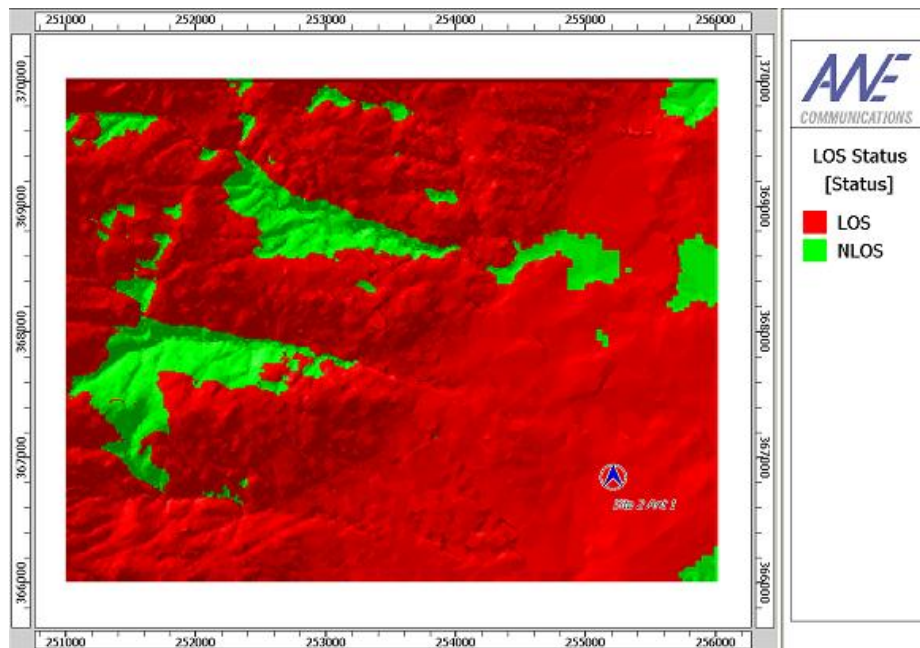
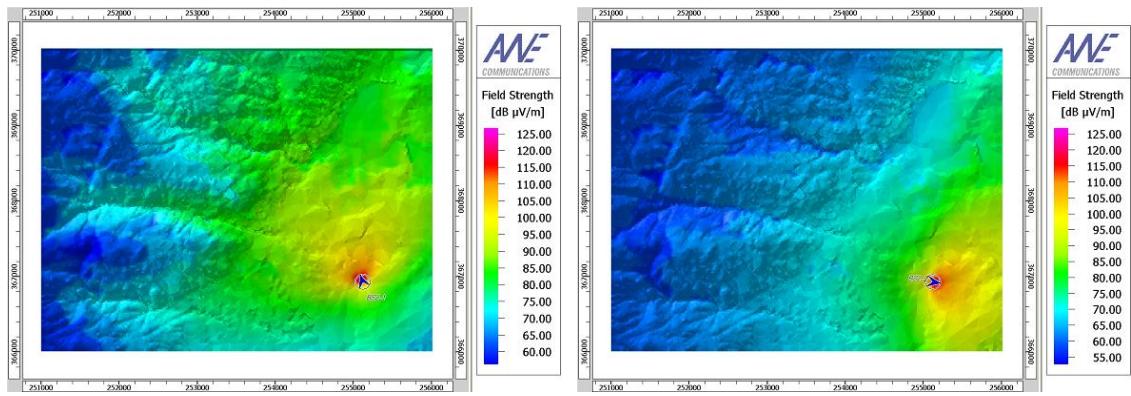
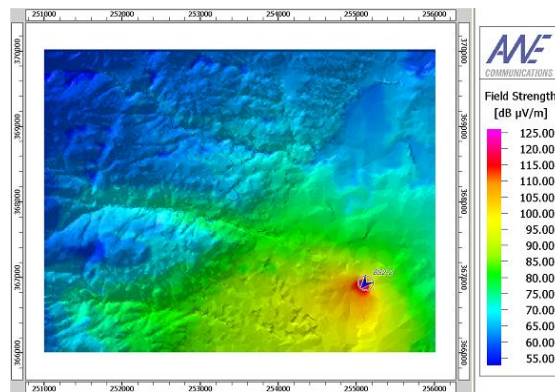


Figura 8.31 - Locais com e sem linha de vista a partir da BS 2



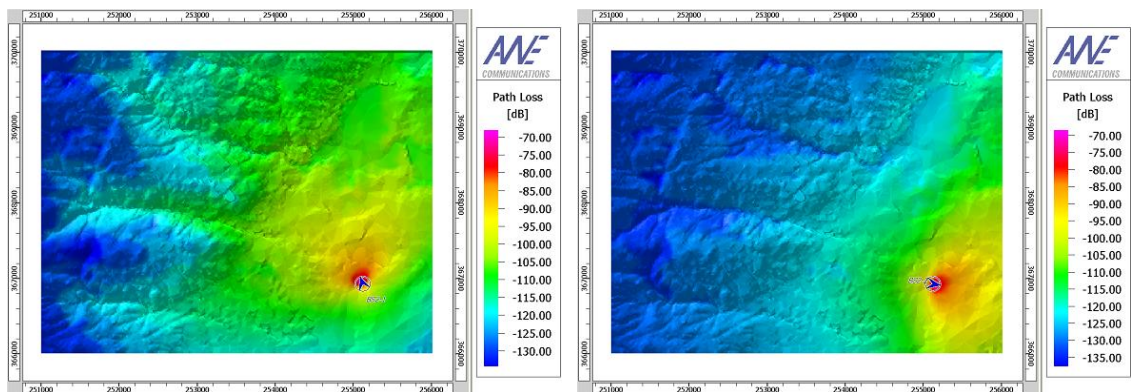
(a) Sector 1

(b) Sector 2



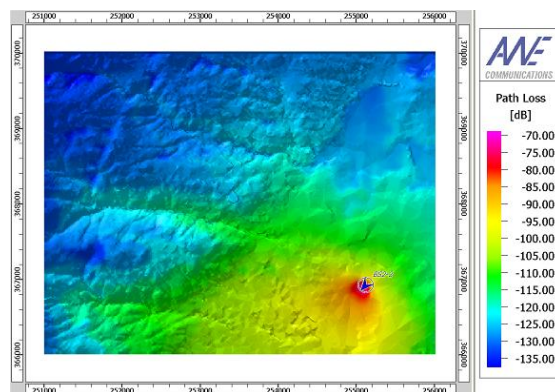
(c) Sector 3

Figura 8.32 - Predição da intensidade de campo na BS 2



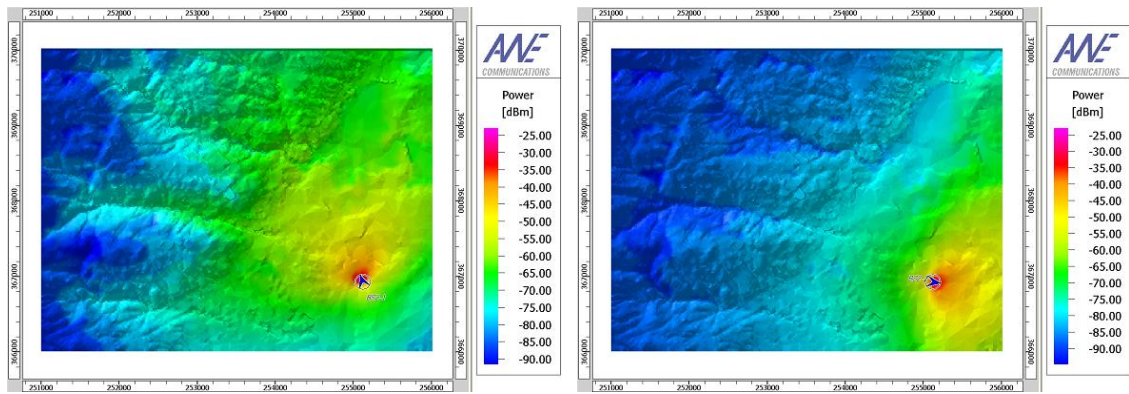
(a) Sector 1

(b) Sector 2



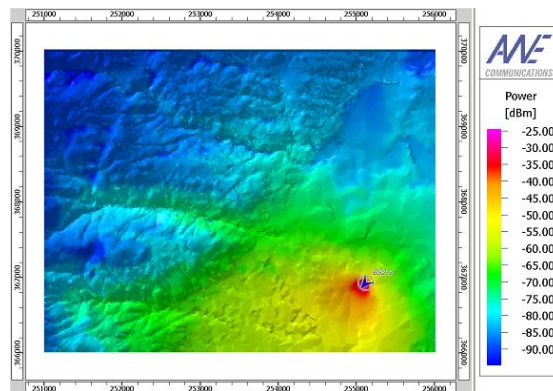
(c) Sector 3

Figura 8.33 - Predição da atenuação na BS 2



(a) Sector 1

(b) Sector 2



(c) Sector 3

Figura 8.34 - Predição da potência na BS 2

Analisando as Figuras 8.32, 8.33 e 8.34 verificamos que conseguimos obter resultados adequados em todos os sectores. Conseguem-se atingir valores elevados de intensidade de campo na maior parte da cidade da Covilhã com todos os sectores. O mesmo se verifica com a atenuação e a potência. Os resultados beneficiam do facto de existir, na zona do aeródromo, uma excelente linha de vista para a zona edificada da Covilhã pois não existem muitos edifícios elevados. A Figura 8.35 apresenta o resultado experimental com a evolução da potência em função do raio da célula.

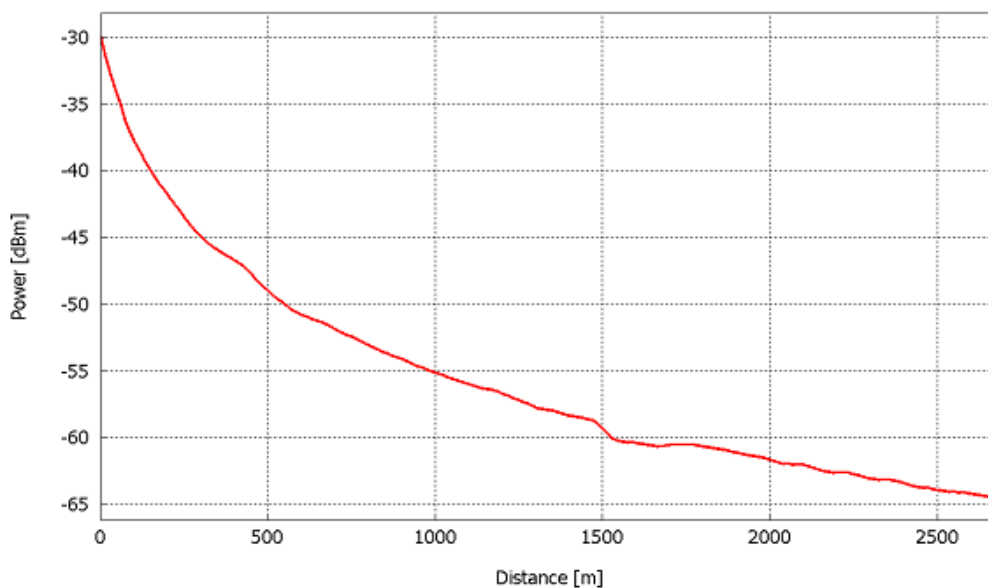


Figura 8.35 - Potência em função da distância na BS 2

8.5.3 Estação Base 3 – Rotunda do Covelo

A estação base 3 encontra-se localizada na rotunda do Covelo, Figura 8.36. As antenas da estação base encontram-se a uma altura de 10 metros acima do chão. A Figura 8.37 apresenta as cartas com os locais com e sem linha de vista da estação base 2. As Figuras 8.38, 8.39 e 8.40 apresentam os resultados da intensidade de campo, atenuação e potência recebida, respectivamente, nos três sectores da estação base.



Figura 8.36 - Rotunda do Covelo e a vista de um dos sectores a partir da BS 3

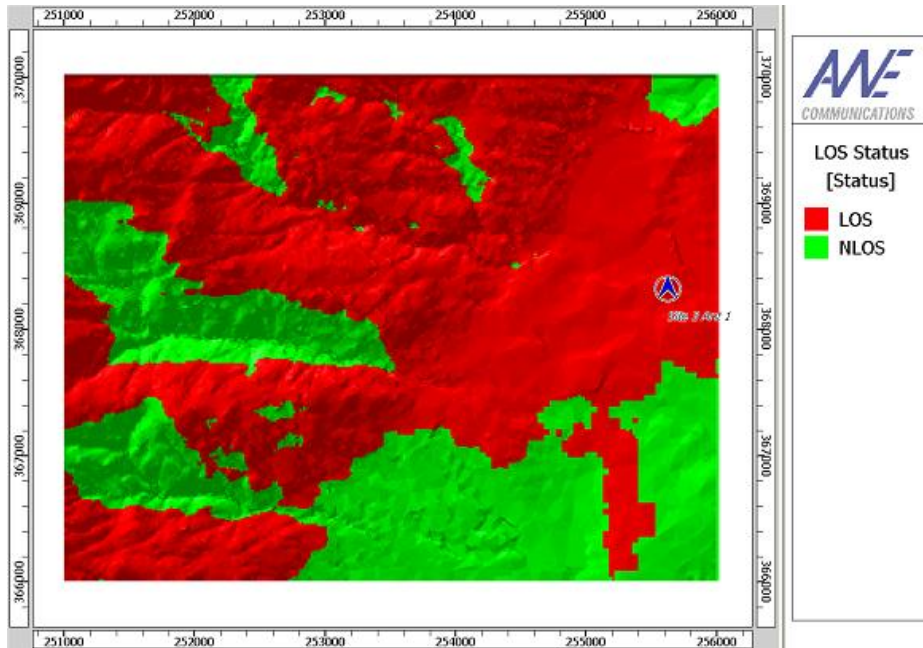
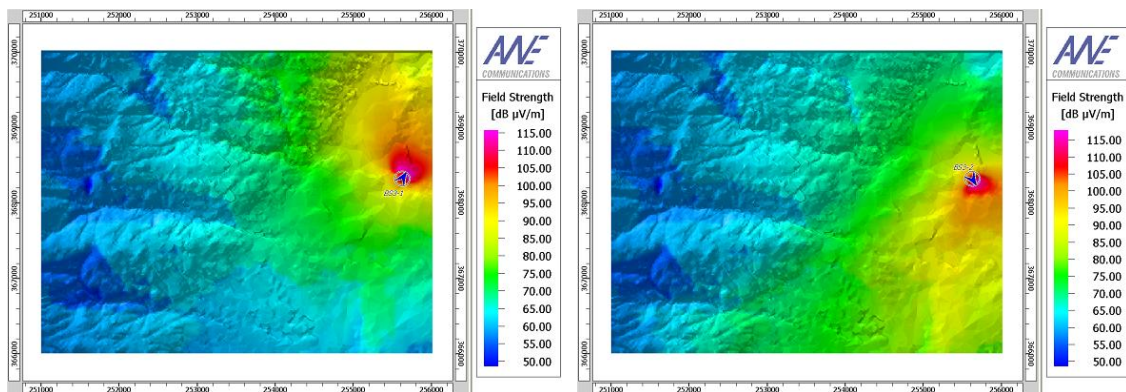
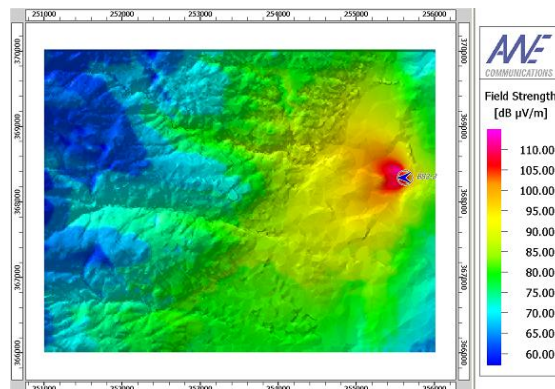


Figura 8.37 - Locais com e sem linha de vista a partir da BS 3



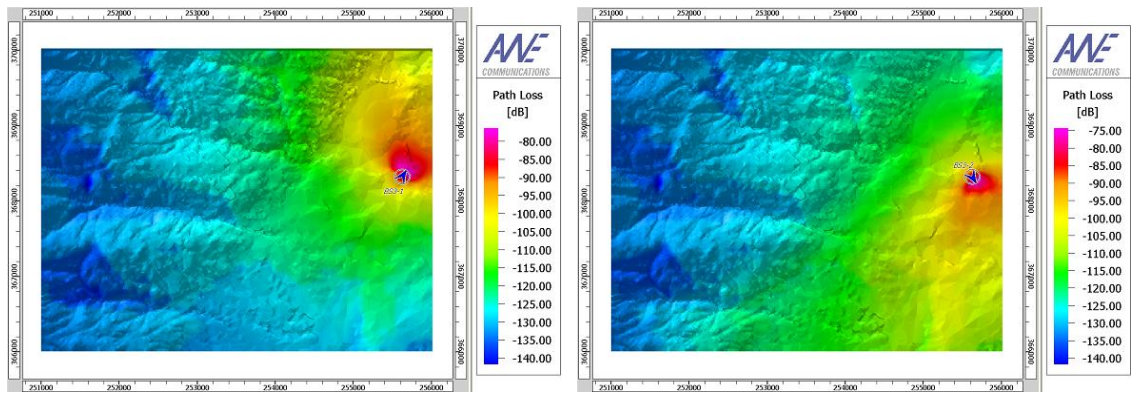
(a) Sector 1

(b) Sector 2



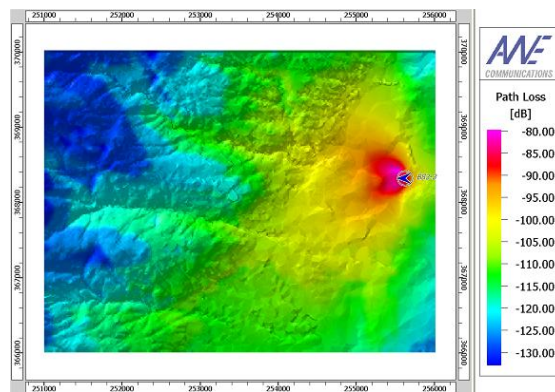
(c) Sector 3

Figura 8.38 - Predição da intensidade de campo na BS 3



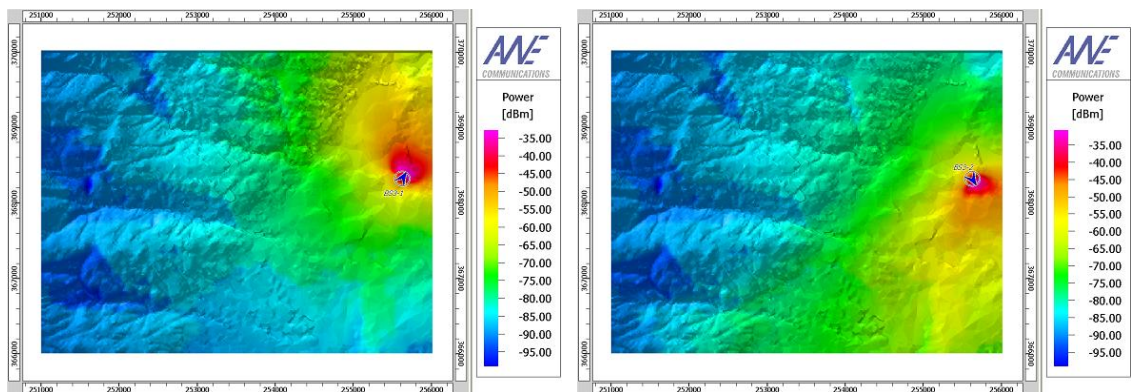
(a) Sector 1

(b) Sector 2



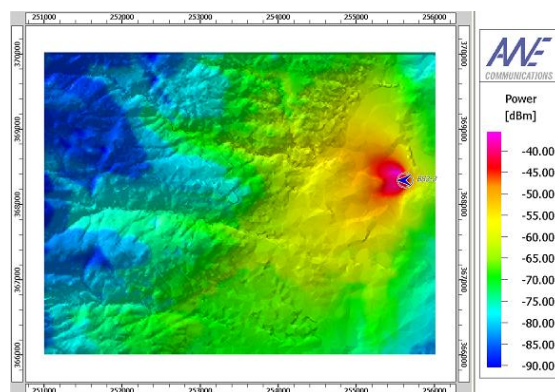
(c) Sector 3

Figura 8.39 - Predição da atenuação na BS 3



(a) Sector 1

(b) Sector 2



(c) Sector 3

Figura 8.40 - Predição da potência na BS 3

Analisando as Figuras 8.38, 8.39 e 8.40 verificamos que todos os sectores apresentam excelentes resultados ao longo de toda a área urbana da Covilhã. Isto deve-se ao facto de na zona da rotunda do Covelo não existirem edifícios altos e montes e, logo, obtém-se uma linha de vista directa para a parte edificada da Covilhã. A Figura 8.41 apresenta o comportamento da potência em função da distância.

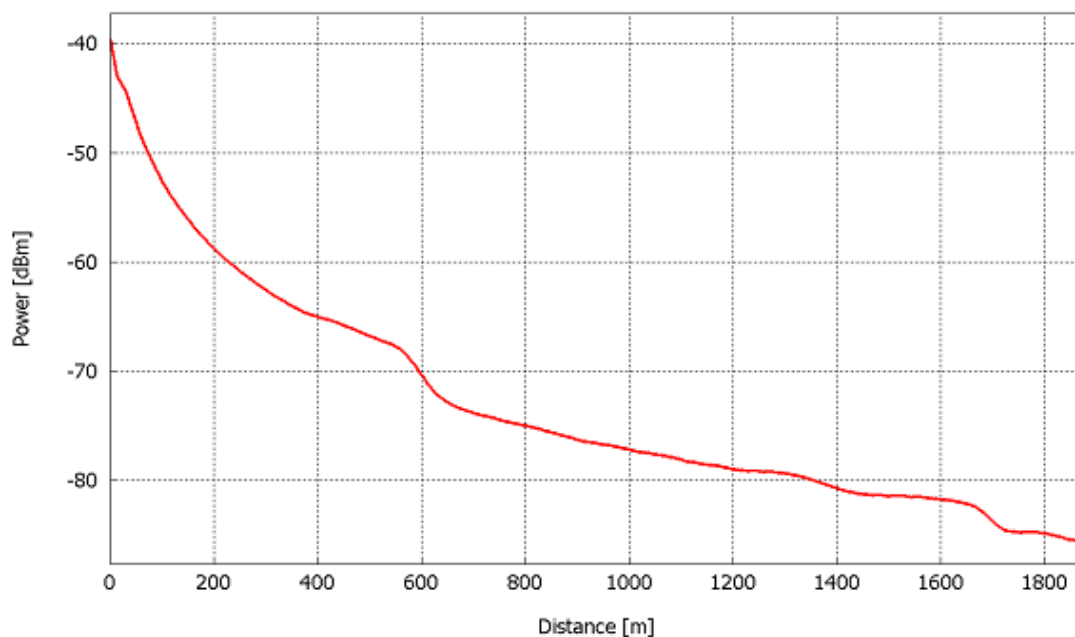


Figura 8.41 - Potência em função da distância na BS 3

8.6 Análise da Rede na Cidade da Covilhã

Nesta Secção apresentam-se os resultados da simulação do planeamento da rede sem fios IEEE 802.16-2004 na cidade Covilhã. Para o planeamento de rede na cidade da Covilhã serão considerados os mesmos procedimentos e especificações utilizados no planeamento do concelho da Covilhã.

Pela optimização das estações base feita no Capítulo anterior podemos obter a área de cobertura individualmente para cada local (BS) ou para a área inteira. Com base nas predições da potência recebida, atenuação para cada antena e os MCS, Tabela 8.2, obtemos diferentes resultados de planeamento rede, que nos permitem analisar o desempenho da rede.

Predição da Potência Recebida Máxima no DL

A Figura 8.42 apresenta a predição da potência recebida máxima no sentido descendente, DL. A potência recebida máxima no DL de todas as células é determinada para cada *pixel* (estação subscritora).

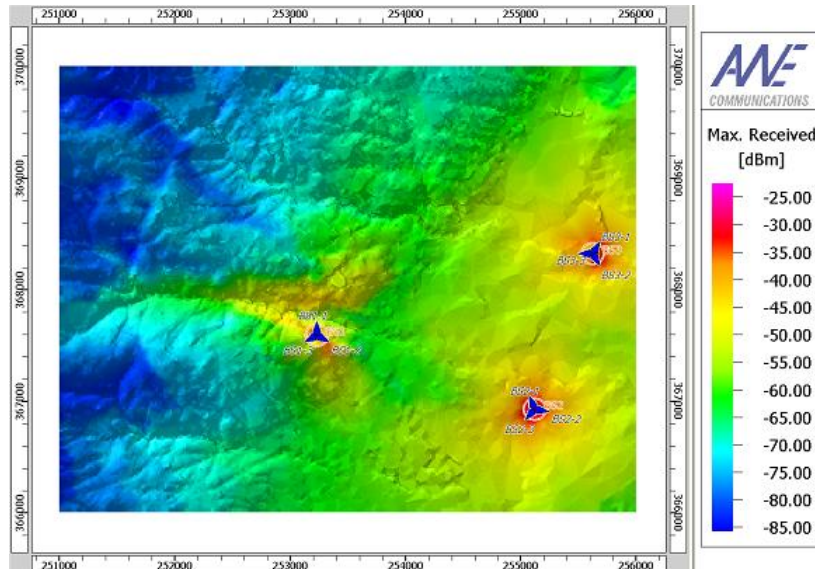


Figura 8.42 - Predição da potência recebida máxima no DL

Com o resultado da predição da potência recebida máxima, Figura 8.42, podemos fazer a análise de cobertura através da definição de um limiar da potência recebida. A Figura 8.43 apresenta a análise de cobertura através do limiar da potência recebida em que o limiar definido é de -80 dBm. A cor do *pixels* representa se eles estão acima vermelho, ou abaixo verde do limiar.

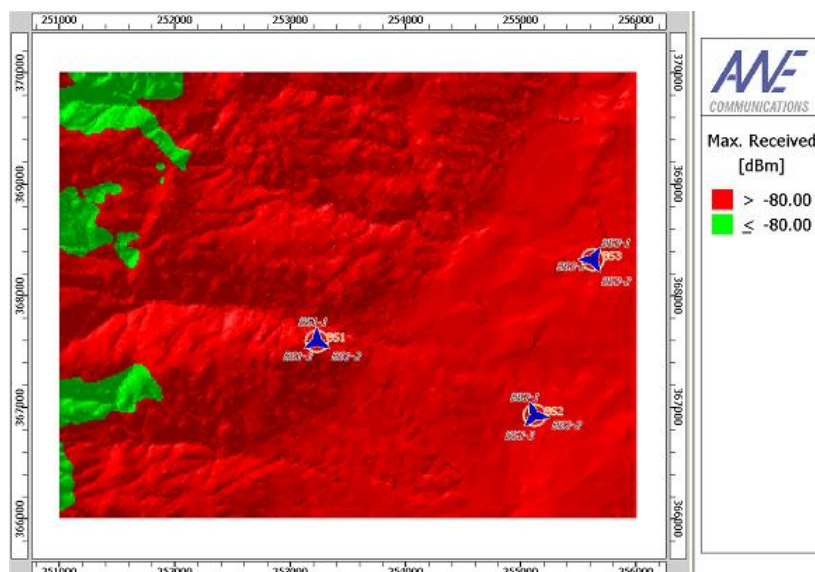


Figura 8.43 - Cobertura na cidade da Covilhã com as três BS

Analisando o resultado da Figura 8.43, verificamos que, como ja-se tinha concluído anteriormente, com as três estações base com antenas sectoriais, conseguimos cobrir a maior parte da cidade da Covilhã.

Predição do Ritmo de Transmissão Máximo no DL

No processo de planeamento da rede, é interessante verificar qual o esquema de modulação e codificação estão disponíveis nos diferentes locais. A Figura 8.44 apresenta a predição do ritmo de transmissão de dados máximo alcançáveis em todos os locais possíveis na área de cobertura, o que é muito importante pois assim pode-se saber onde esperar o máximo e o mínimo de ritmo de transmissão.

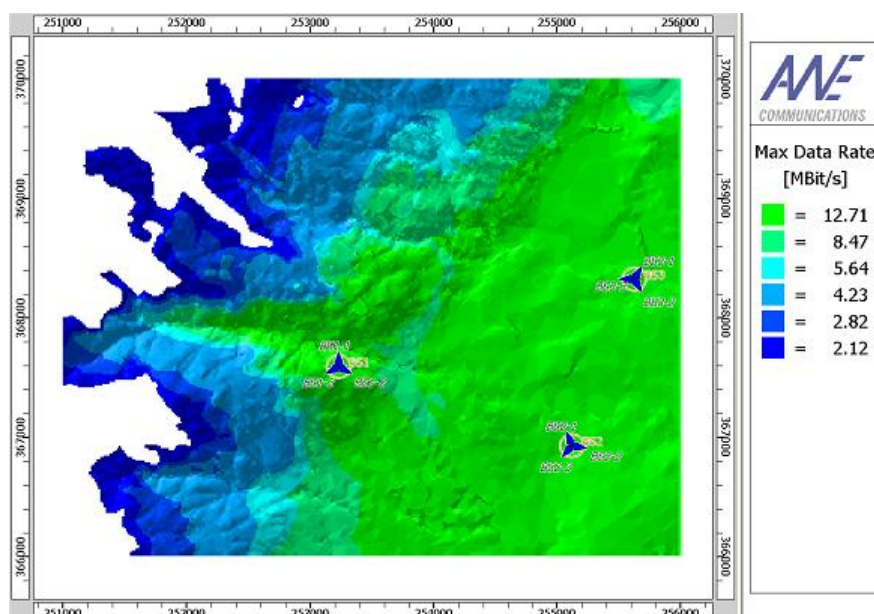


Figura 8.44 - Predição de ritmos de transmissão máximos alcançáveis

Analisando o mapa da Figura 8.44, pode-se observar que se consegue alcançar a modulação de ordem superior na maior parte da cidade da Covilhã. Esta situação é mais visível para as estações base 2 e 3, localizadas no aeródromo e a rotunda do Covelo, respectivamente, que conseguem ter uma excelente linha de vista para a zona edificada da cidade.

Para visualizarmos a análise feita acima consideremos os seguintes gráficos das Figuras 8.45, 8.46 e 8.47 que representam a variação do ritmo de transmissão máxima com a distância nas três estações base e as Figuras 8.48 e 8.49 representam a probabilidade e a probabilidade cumulativa do ritmo de transmissão máxima alcançável, respectivamente.

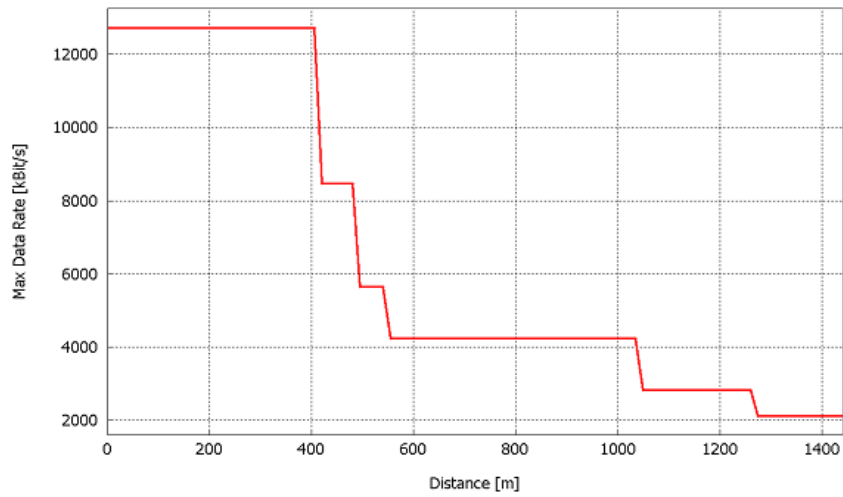


Figura 8.45 - Ritmo de transmissão máxima em função da distância medida na BS 1

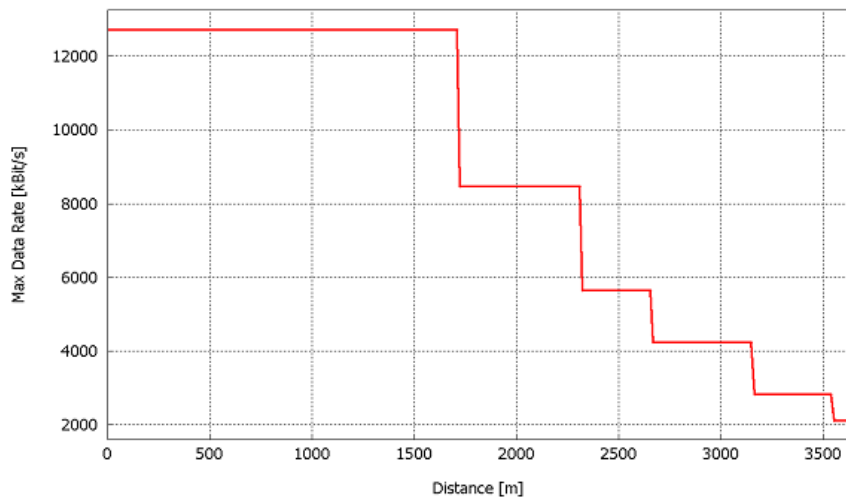


Figura 8.46 - Ritmo de transmissão máxima em função da distância medida na BS 2

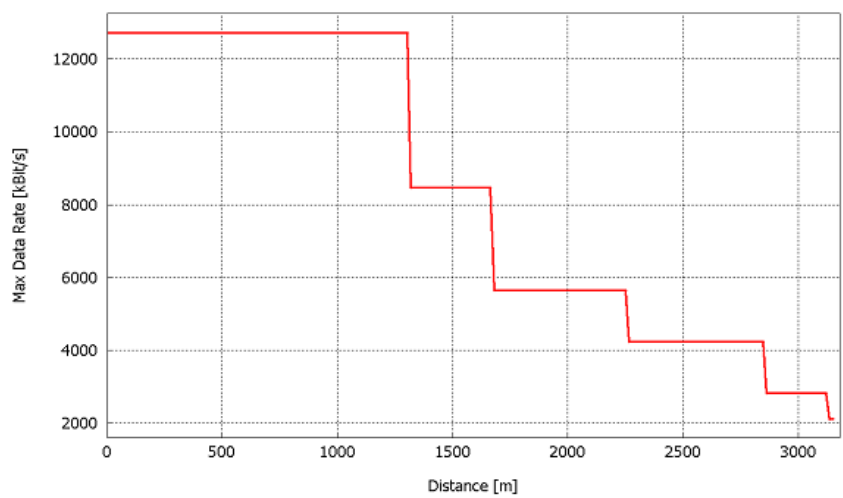


Figura 8.47 - Ritmo de transmissão máxima em função da distância medida na BS 3

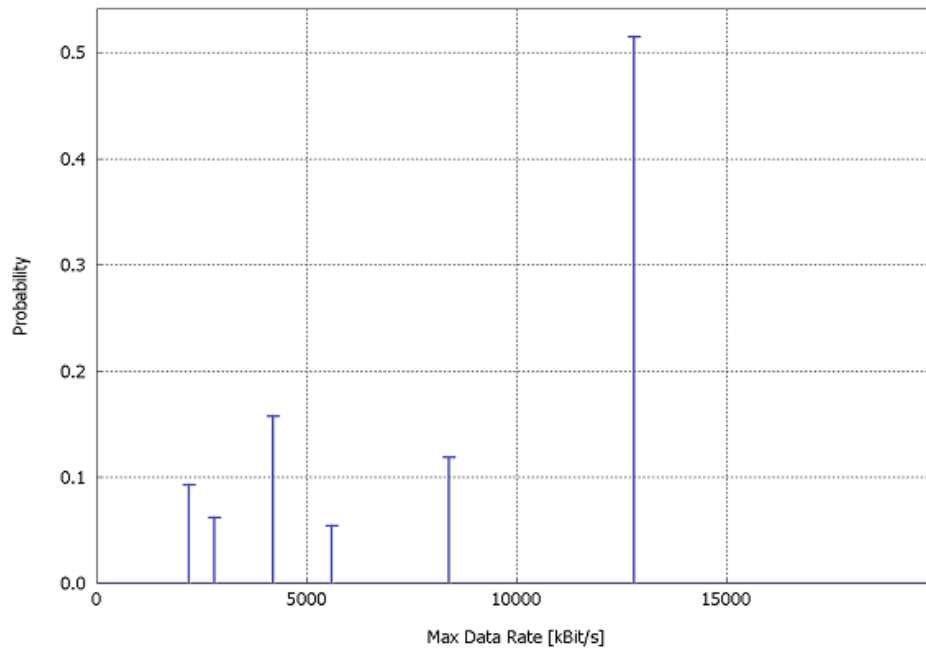


Figura 8.48 - Probabilidade de ritmo de transmissão máxima alcançável

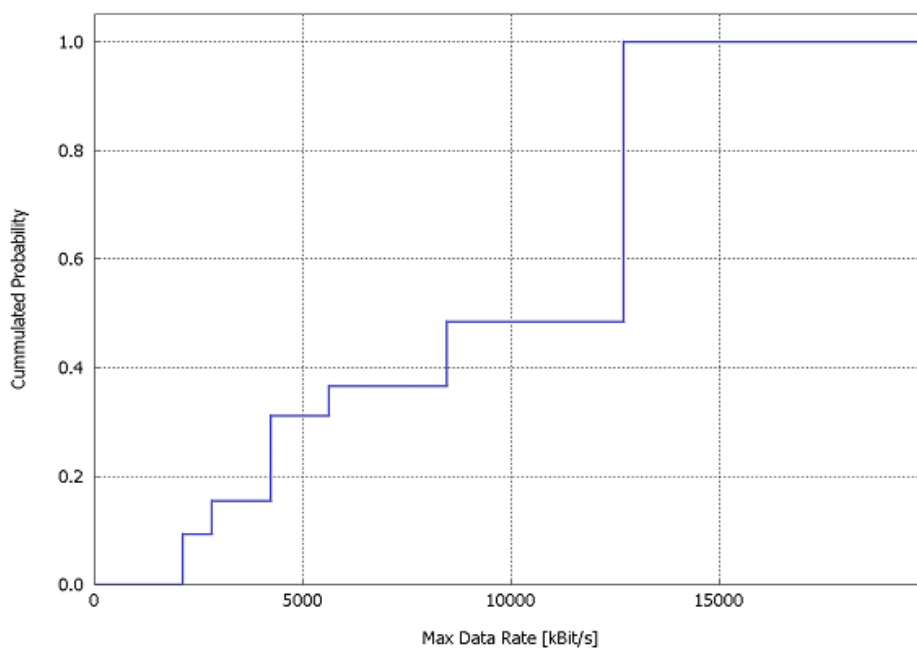


Figura 8.49 - Probabilidade cumulativa do ritmo de transmissão máxima alcançável

Analisando o gráficos das 8.45, 8.46 e 8.47 verificamos que a estação base 2 apresenta melhores resultados. Até uma distância de 1.7 km, a rede suporta a modulação de ordem superior, que corresponde a um ritmo transmissão de 12.27 Mbps. Por outro lado, a estação base 1 só suporta a modulação de ordem superior até uma distância de

aproximadamente 0.4 km. Este resultado é devido à estação base 1 encontrar-se numa zona com prédios e montes.

Com a modulação de ordem média, que corresponde a um ritmo de transmissão de 8.47 Mbps é possível alcançar um raio de até 2.7 km na estação base 1 e um raio de até 0.58 km para a BS2. A modulação de ordem baixa por exemplo (4.23 Mbps) é possível alcançar até um raio de 3.2 km para a BS2 e de 1 km para a BS1.

Nas Figuras 8.48 e 8.49 verificamos que existe uma probabilidade de mais de 50 % de alcançar o ritmo de transmissão de 12.27 Mbps, que corresponde a modulação de ordem superior (64-QAM) em toda área urbana da cidade. Em seguida temos com 17 % o ritmo de transmissão de 4.23 Mbps e com 13 % o ritmo de transmissão de 8.47 Mbps que correspondem as modulações de ordem inferior e media respectivamente.

Predição de Células de Serviço (*Best Server*)

A para cada *pixel* (estação subscritora) é atribuída uma célula (estação base). Esta célula é a célula de serviço para a estação subscritora e todos os *pixels* neste local.

A Figura 8.50 apresenta as cartas com as células “melhor servidor” (*best server*) para cada um dos esquemas de modulação e codificação, MCS.

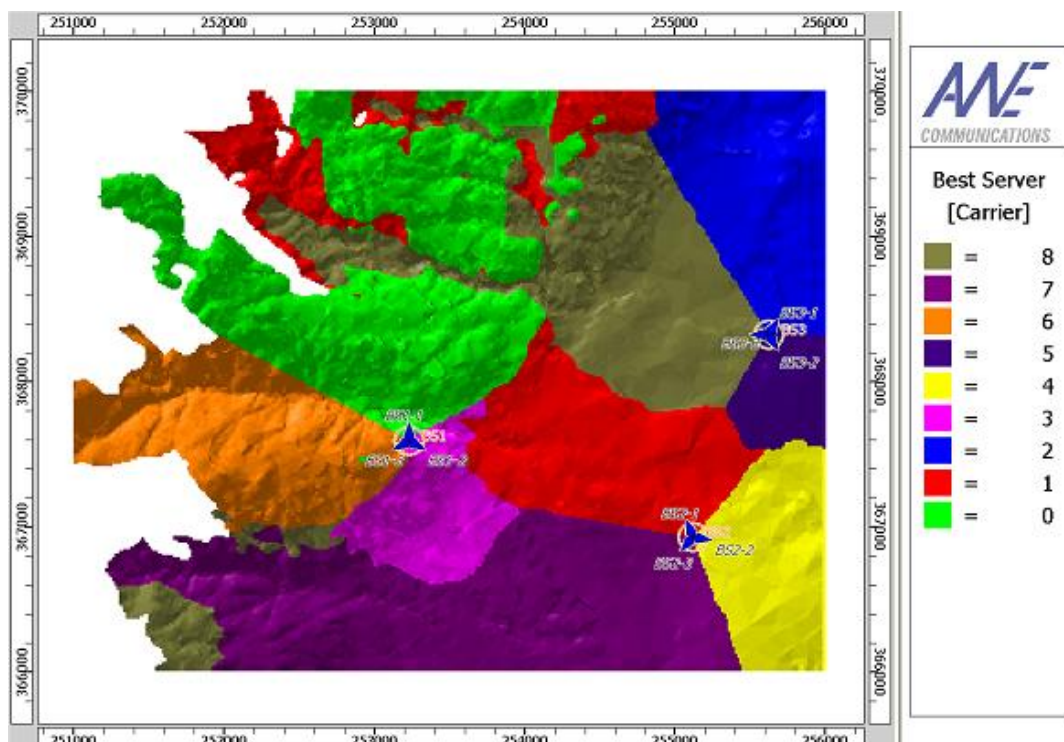
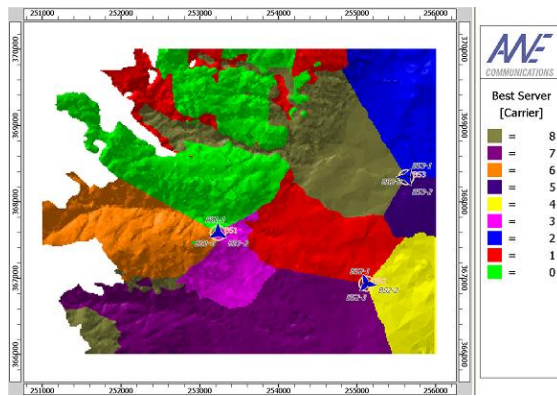
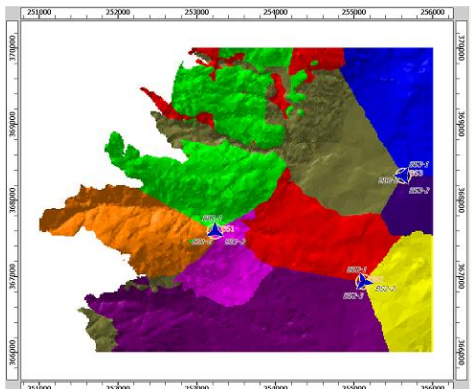


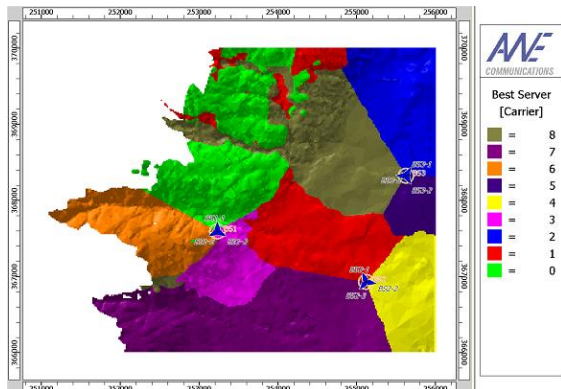
Figura 8.50 - Cartas com as células “melhor servidor” para BPSK ½



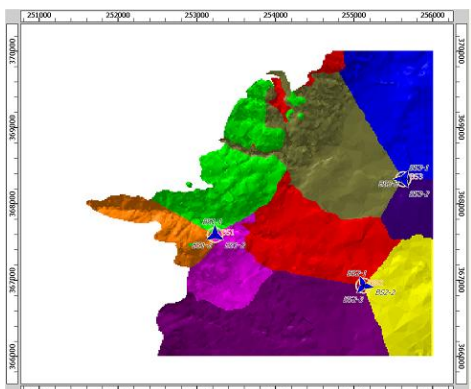
(b) BPSK $\frac{3}{4}$



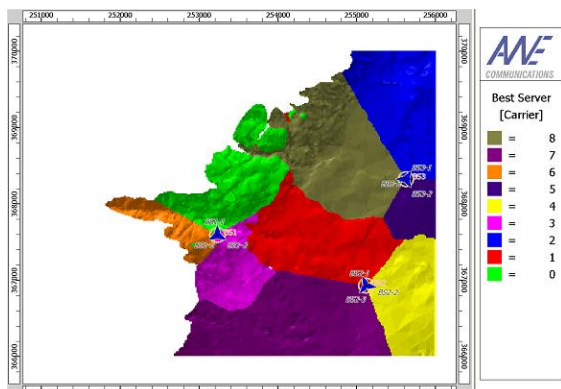
(c) QPSK $\frac{1}{2}$



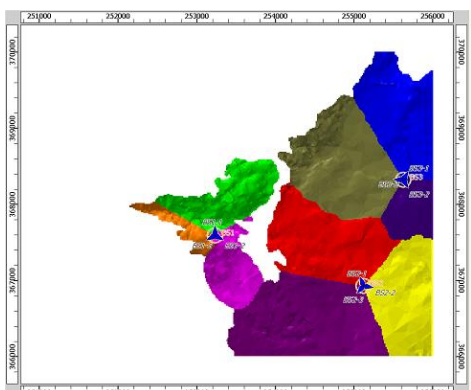
(d) QPSK $\frac{3}{4}$



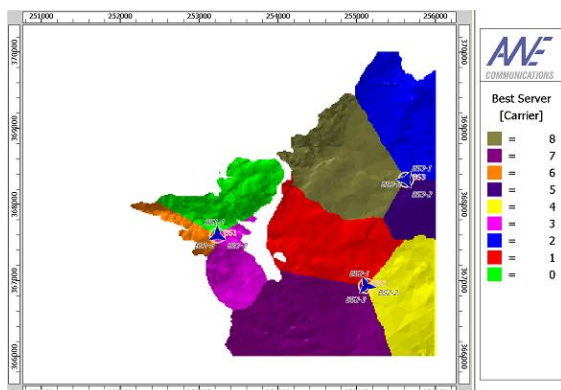
(e) 16-QAM $\frac{1}{2}$



(f) 16-QAM $\frac{3}{4}$



(g) 64-QAM $\frac{2}{3}$



(h) 64-QAM $\frac{3}{4}$

Figura 8.50 - Cartas com as células “melhor servidor” (cont.)

Analisando as cartas da Figura 8.50, verificamos que, à medida que aumentamos a ordem de modulação a área de serviço da célula diminui. Isto é devido ao facto de só conseguirmos ordens de modulação elevada nas zonas próximas das antenas da estação base.

As estações base 2 e 3 por estarem numa zona quase plana, têm maior distância de cobertura em relação à estação base 1 que se encontra numa zona edificada e com montes.

Predição de Número de Portadoras Recebidas no DL

As cartas com a predição do número de portadoras recebidas no DL, são determinados individualmente para cada MCS, Figura 8.51. Adicionalmente, consideram-se as capacidades das SSs, definidos para estes MCS, isto é a potência de emissão máxima disponível na SS, o ganho da antena da SS, etc.

Determina-se o número de portadoras recebidas e canais para cada *pixel* (SS). Uma portadora é recebida se a potência de recepção no sentido descendente, DL, está sobre um limiar definido individualmente para cada MCS. O número de portadoras acima dum determinado limiar é muito importante para análise do *handover* porque podemos ver facilmente o número de alternativas disponíveis. Como a norma utilizada não suporta o *handover*, este resultado seria relevante no planeamento da norma IEEE 802.16e-2005.

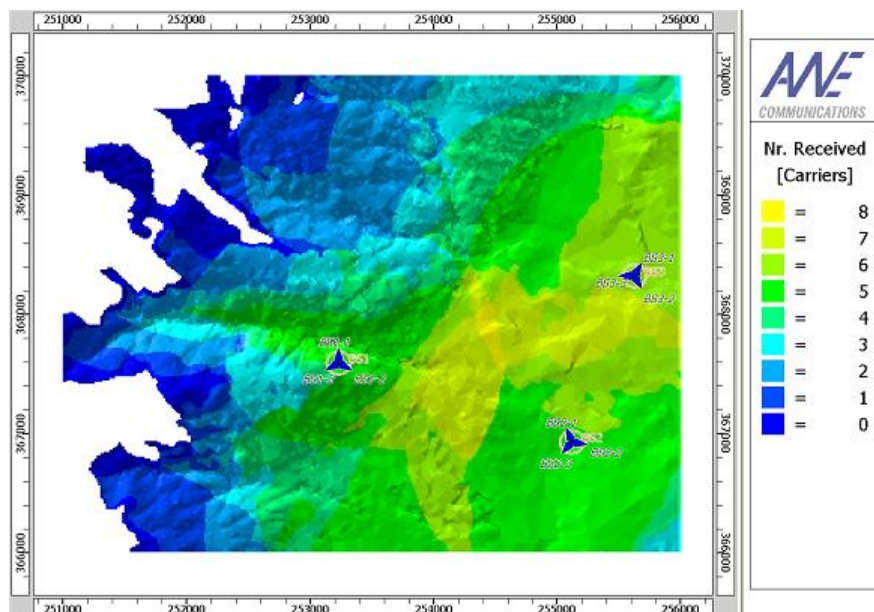
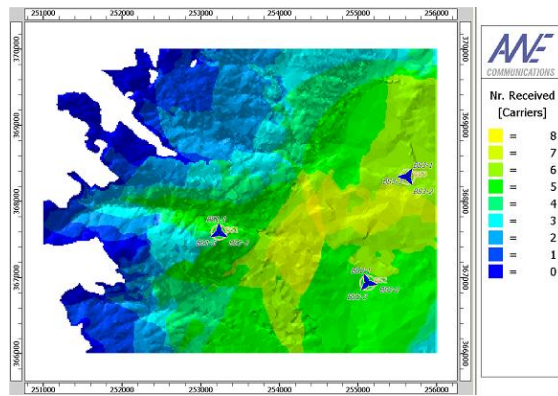
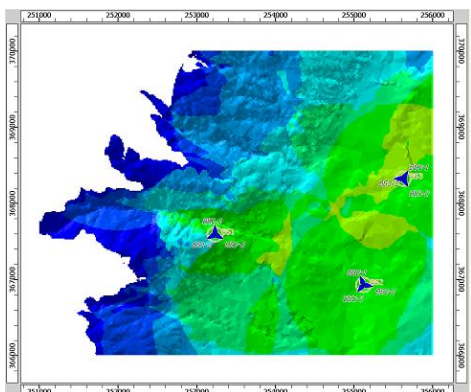


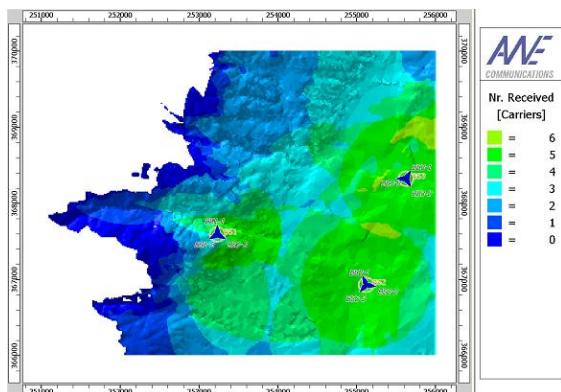
Figura 8.51 - Carta com o número de portadoras recebidos na SS no DL para BPSK 1/2



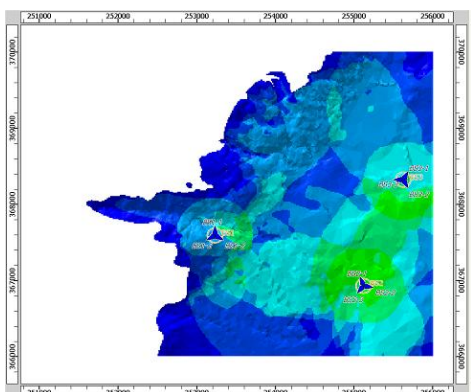
(b) BPSK $\frac{3}{4}$



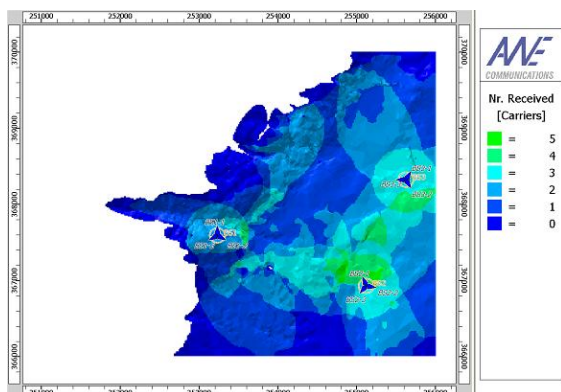
(c) QPSK $\frac{1}{2}$



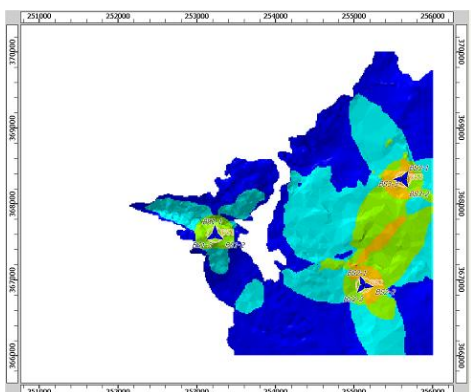
(d) QPSK $\frac{3}{4}$



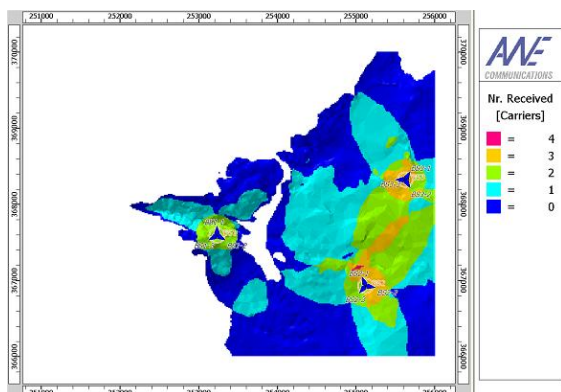
(e) 16-QAM $\frac{1}{2}$



(f) 16-QAM $\frac{3}{4}$



(g) 64-QAM $\frac{2}{3}$



(h) 64-QAM $\frac{3}{4}$

Figura 8.51 - Cartas com o número de portadoras recebidas na SS no DL (cont.)

Analisando as cartas da Figura 8.51, verificamos que, quando temos níveis superiores de modulação e codificação o número de portadoras recebidas na estação subscritora na ligação descendente, DL, diminui, Figura 8.52, ou seja, quando a rede suporta níveis superiores de modulação não conseguimos receber todas as portadoras disponíveis.

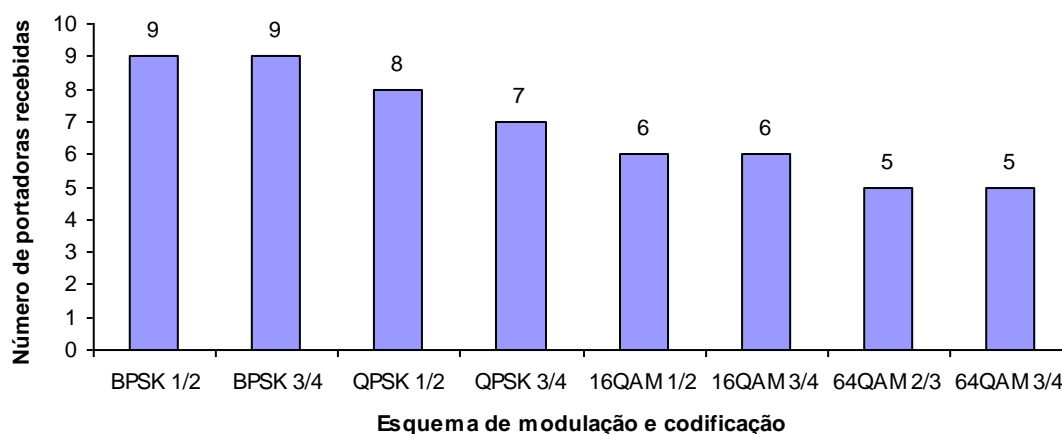


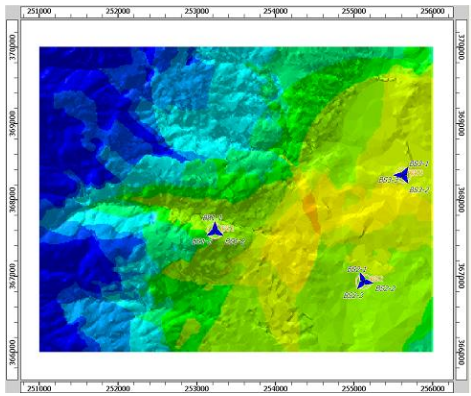
Figura 8.52 - Número de portadoras em função do MCS

Da análise do gráfico da Figura 8.52, verificamos que, à medida que temos um nível de modulação superior o número de portadoras diminui independentemente do código. A única exceção ocorre para a modulação QPSK que o número de portadoras varia com o tipo de codificação utilizada.

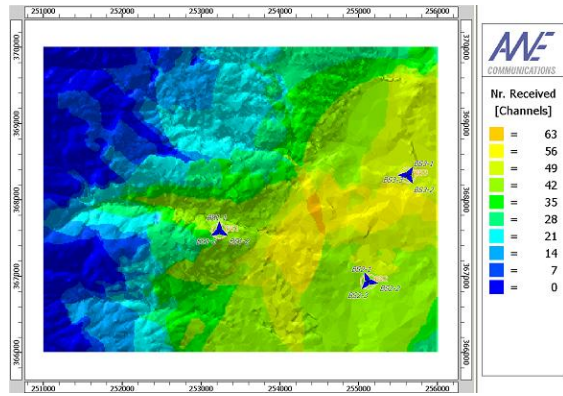
Predição de Número de Canais Recebidos no DL

As cartas com a predição do número de canais recebido no DL são determinadas individualmente para cada MCS, Figura 8.53. São consideradas adicionalmente as capacidades das SSs definido individualmente para cada MCS, isto é, o factor de ruído da SS, o ganho da antena da SS, etc.

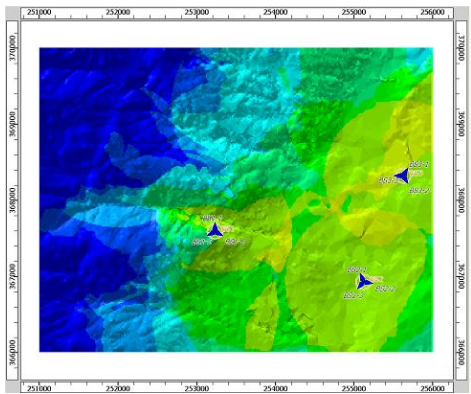
Para cada SS é determinado o número de portadores recebidos. Nos sistemas com acesso múltiplo TDMA, o número de canais é o número de portadoras recebidas multiplicado com o número de *time slots* em cada portadora. O número de canais pode não ser constante em cada portadora, isto é, a primeira portadora numa célula pode ter 7 canais (*time slots*) e a segunda portadora na célula pode ter 8 canais (*time slots*).



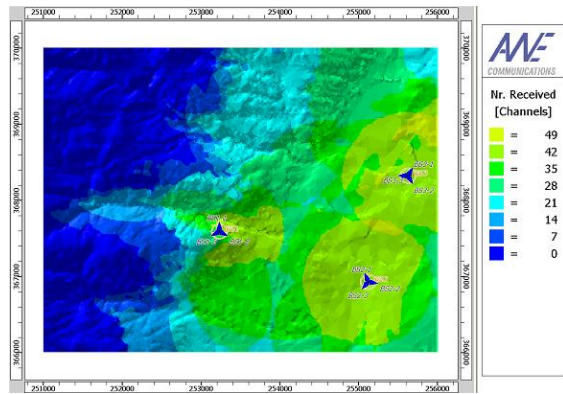
(a) BPSK $\frac{1}{2}$



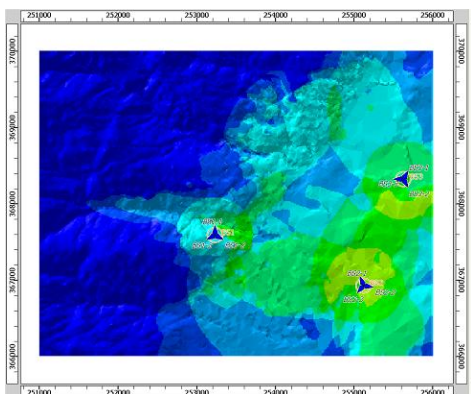
(b) BPSK $\frac{3}{4}$



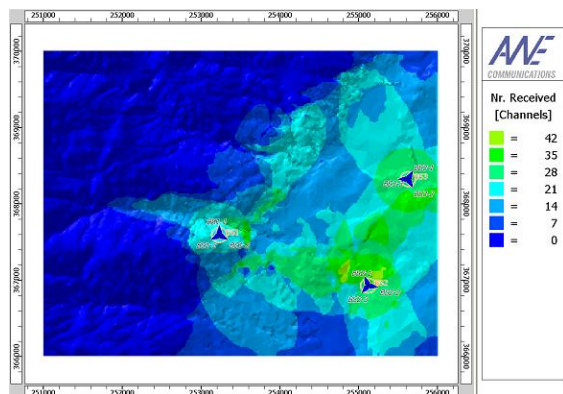
(c) QPSK $\frac{1}{2}$



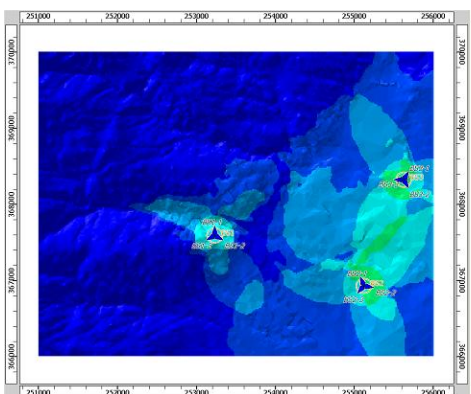
(d) QPSK $\frac{3}{4}$



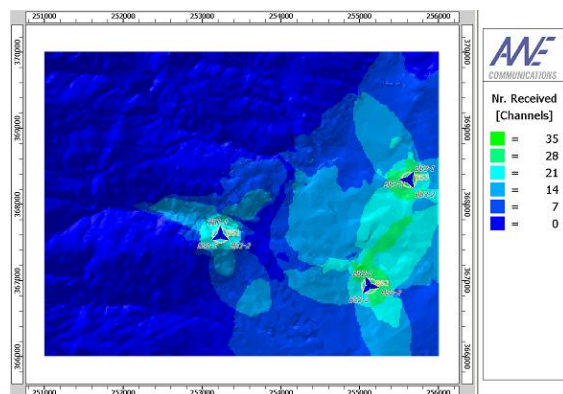
(e) 16-QAM $\frac{1}{2}$



(f) 16-QAM $\frac{3}{4}$



(g) 64-QAM $\frac{2}{3}$



(h) 64-QAM $\frac{3}{4}$

Figura 8.53 - Cartas com o número de canais recebidos na SS no DL

Analisando os mapas da Figura 8.53 verificamos que, quando temos ordens superiores de modulação e codificação, o número de canais recebidos diminui, isto é, para níveis superiores de modulação a estação subscritora “recebe” poucos canais dos disponíveis. Enquanto que para o nível de modulação de ordem inferior temos 63 canais disponíveis para a modulação de ordem média temos 56 canais e para a modulação de ordem elevada temos 35 canais, Figura 8.54.

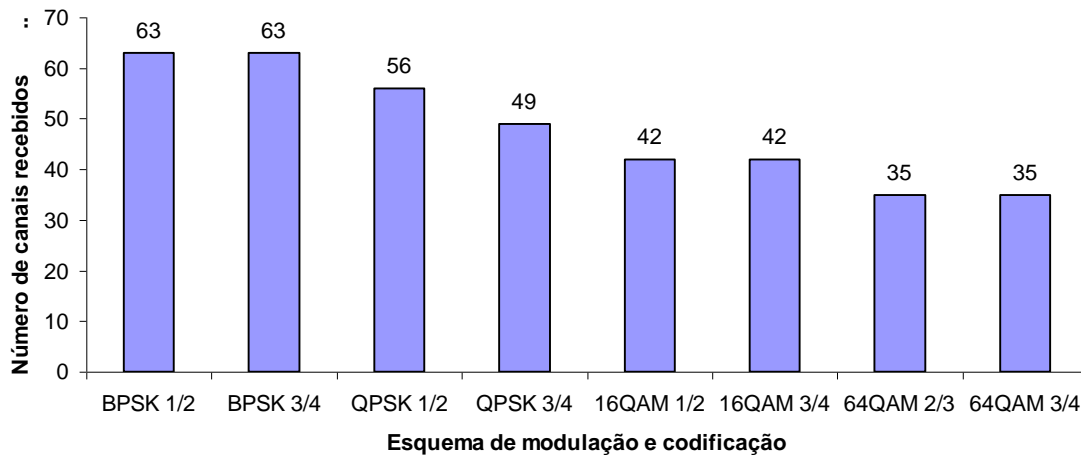


Figura 8.54 - Número de canais recebidos em função do MCS

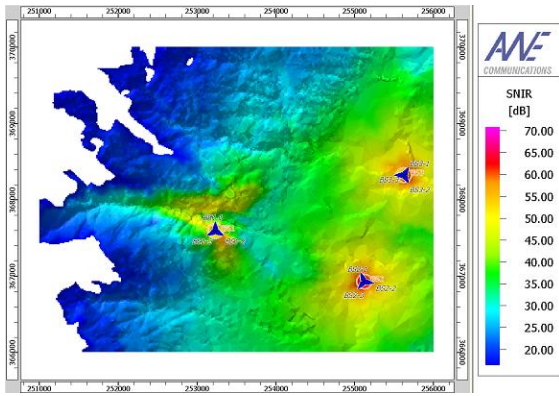
Da análise do gráfico da Figura 8.54, verificamos que com a modulação QPSK há uma variação do número de canais para os diferentes códigos, o que não acontece com as outras modulações.

Predição do SNIR no DL

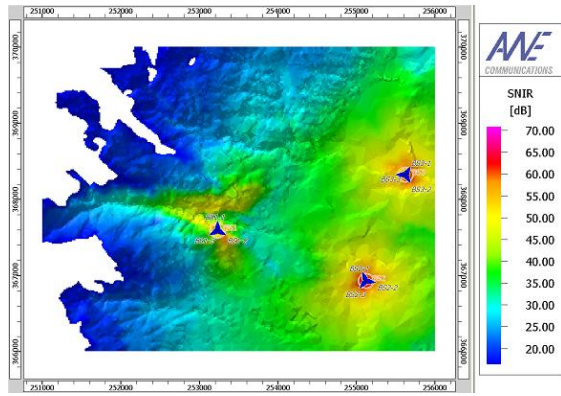
As cartas com a predição do SNIR no DL é determinada individualmente para cada MCS, Figura 8.55. São consideradas adicionalmente as capacidades das SSs, definidas para cada MCS, isto é, a potência de emissão máxima disponível na SS, o ganho da antena da SS, etc.

Se o valor da SNIR (*Signal to Noise plus Interference Ratio*) máximo estiver abaixo do mínimo necessário, definido individualmente para cada MCS, não é determinado o *pixel* (preenchido a cor) para uma célula.

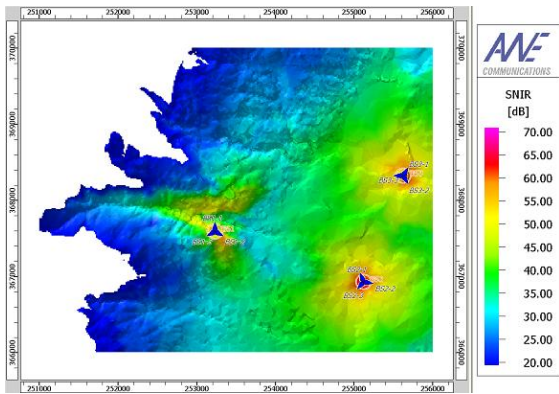
Para cada SS é determinado o SNIR no DL para a célula de serviço. O SNIR é a soma da interferência co-canal e com o ruído térmico determinado pela relação entre potência recebida na célula de serviço.



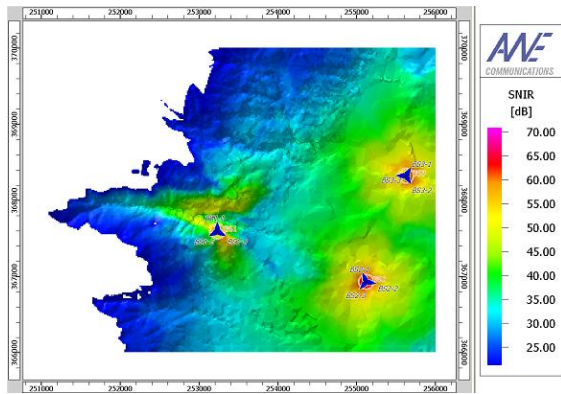
(a) BPSK $\frac{1}{2}$



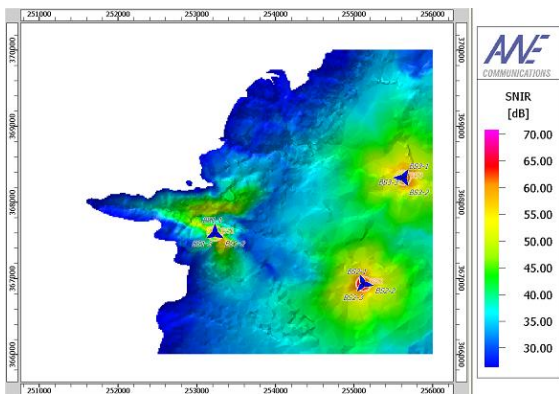
(b) BPSK $\frac{3}{4}$



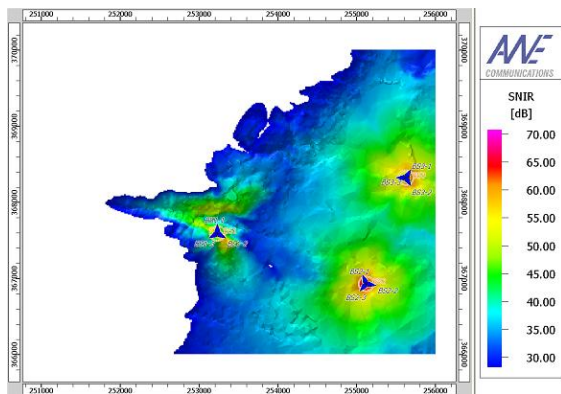
(c) QPSK $\frac{1}{2}$



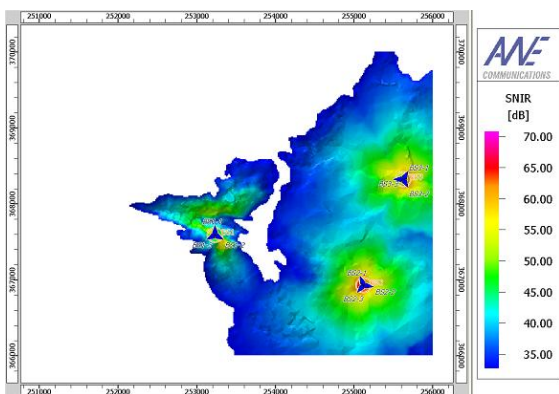
(d) QPSK $\frac{3}{4}$



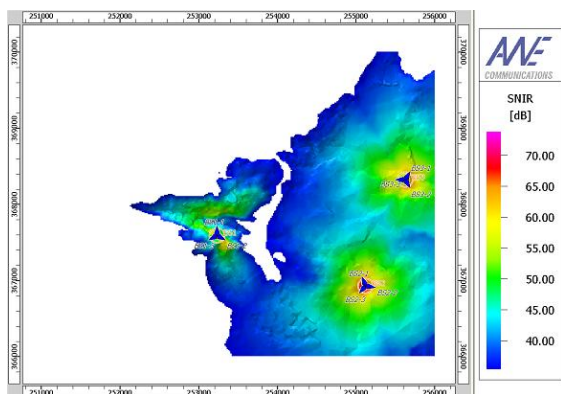
(e) 16-QAM $\frac{1}{2}$



(f) 16-QAM $\frac{3}{4}$



(g) 64-QAM $\frac{2}{3}$



(h) 64-QAM $\frac{3}{4}$

Figura 8.55 - Cartas com a predição do SNIR no DL

Analisando as cartas da Figura 8.55, verificamos que para níveis de modulação superior temos valores elevados de SNIR como cada sector opera com a sua própria frequência a interferência não é relevante.

A Figuras 8.56 apresenta o comportamento de SNIR medido em função da distância.

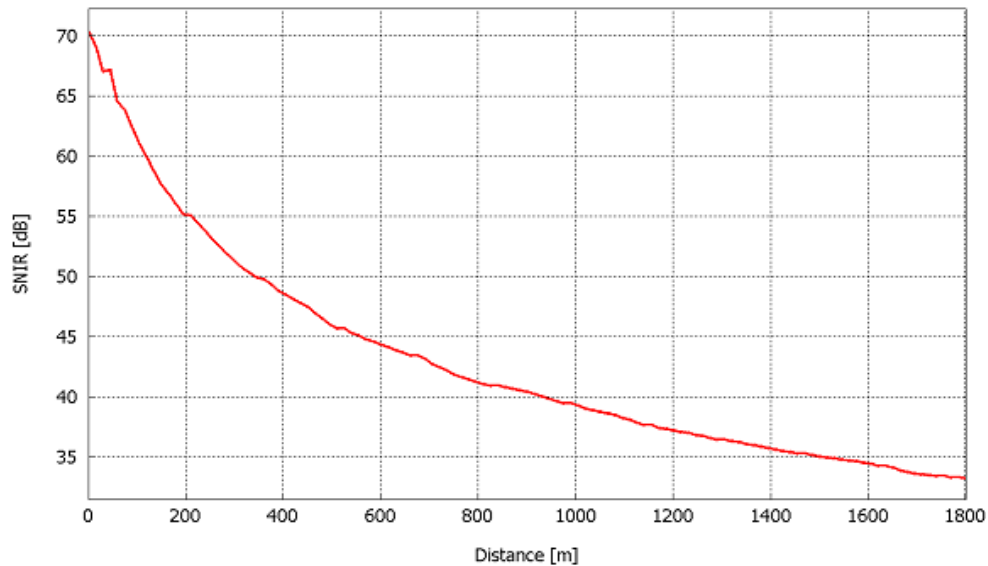


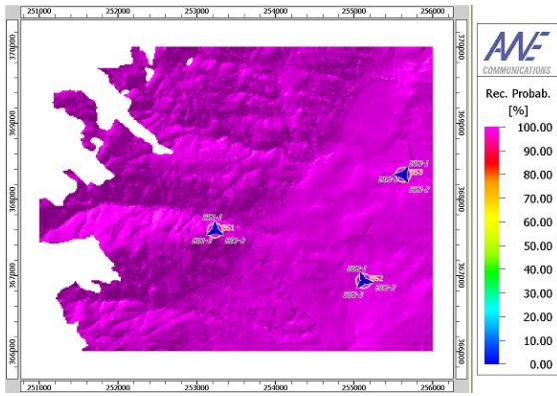
Figura 8.56 - SNIR em função da distância

É possível suportar todas as ordens de modulação visto que o SNR mínimo é de 21 dB para a modulação de ordem superior, Tabela 8.2.

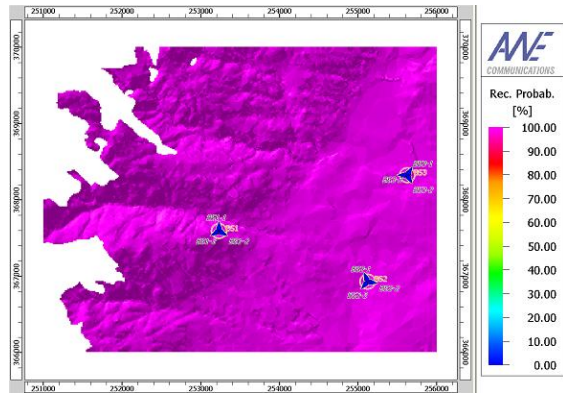
Probabilidade de Recepção no DL

As cartas com a probabilidade de recepção no DL é determinada individualmente para cada MCS Figura 8.57. São consideradas adicionalmente as capacidades das SSs, definidas para cada MCS, isto é, a potência de emissão máxima disponível na SS, o ganho da antena da SS, a margem de desvanecimento rápido, etc.

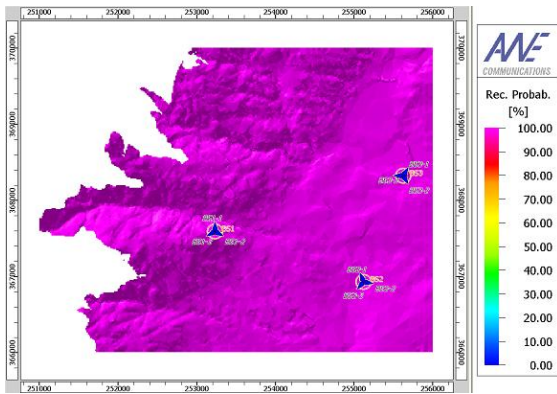
A probabilidade de recepção é determinada baseada na previsão da SNIR. É utilizada a distribuição de Rayleigh, e dependendo do valor de SNIR mínimo exigido definido para a MCS, é determinada a probabilidade de se ultrapassar o valor de SNIR mínimo necessário.



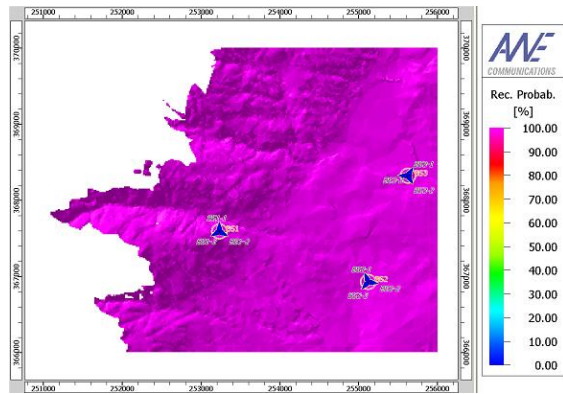
(a) BPSK $\frac{1}{2}$



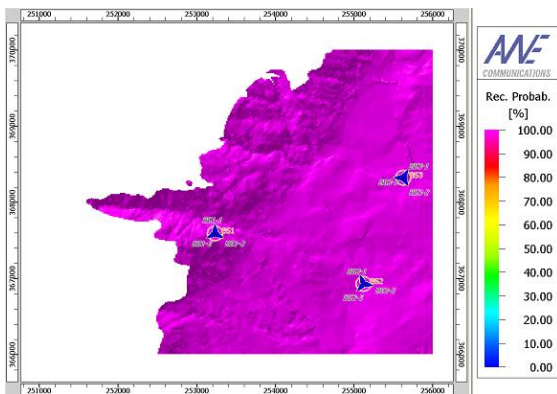
(b) BPSK $\frac{3}{4}$



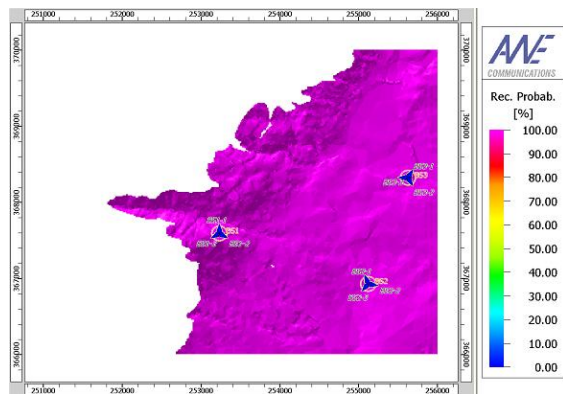
(c) QPSK $\frac{1}{2}$



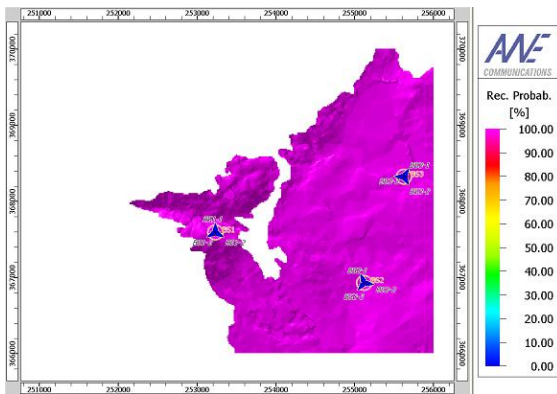
(d) QPSK $\frac{3}{4}$



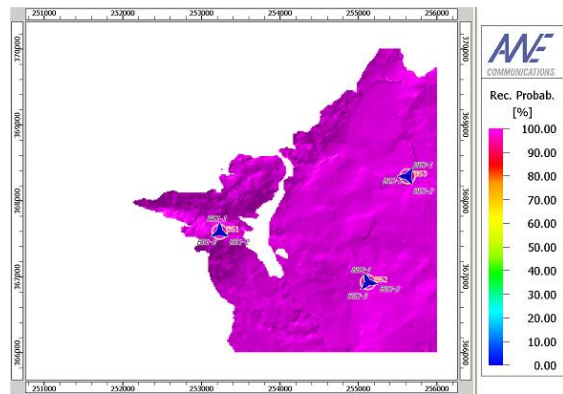
(e) 16-QAM $\frac{1}{2}$



(f) 16-QAM $\frac{3}{4}$



(g) 64-QAM $\frac{2}{3}$



(h) 64-QAM $\frac{3}{4}$

Figura 8.57 - Cartas com a probabilidade de recepção (SS alcançar a BS)

Analisando as cartas da Figuras 8.57, verificamos que temos 100 % de probabilidade de recepção para todos os esquemas de modulação e codificação, MCS, ou seja 100 % de probabilidade da transmissão da estação subscritora alcançar a estação base em toda a área coberta. Este facto é devido a conseguirmos valores muito elevados de SNIR em toda a área de cobertura, que ultrapassam os mínimos necessários, Figura 8.55.

Predição de Potência de T_x necessária para Alcançar a SS

As cartas com a predição da potência de T_x necessária para Alcançar a SS é determinada individualmente para cada MCS, Figura 8.58. São consideradas adicionalmente as capacidades das SSs, definidas para cada MCS, isto é, o factor de ruído na SS, o ganho da antena da SS, etc.

Para cada SS, é determinada a potência de emissão mínima necessária na BS para alcançar a SS. Consideram-se a interferência co-canal e ruído térmico no sentido descendente, DL para a determinação da potência necessária.

Se a potência T_x necessária for superior que a potência de T_x máxima disponível na BS, a SS não será alcançada e o *pixel* não será determinado para uma célula.

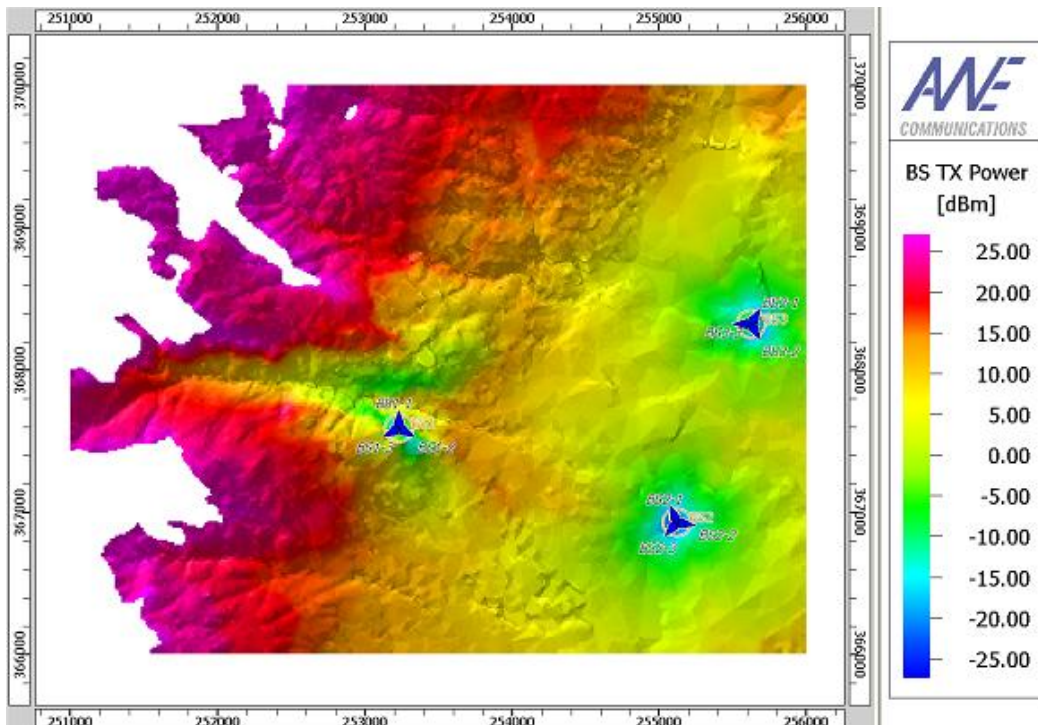
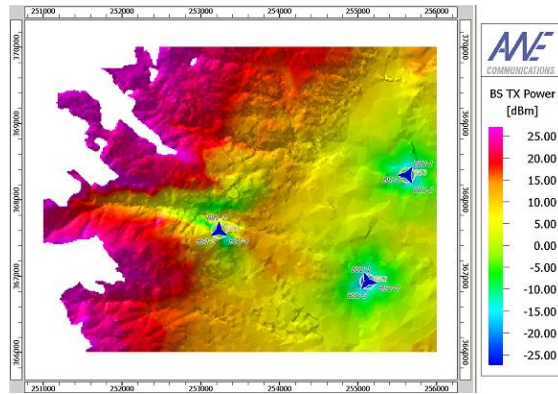
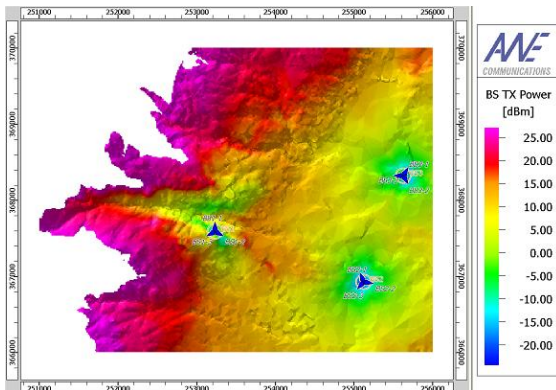


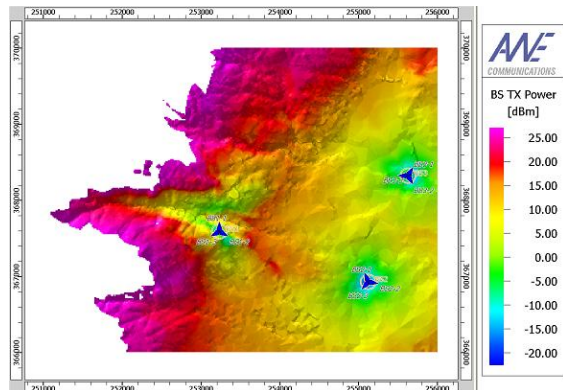
Figura 8.58 - Potência de T_x necessária para a BS alcançar a SS para BPSK $\frac{1}{2}$



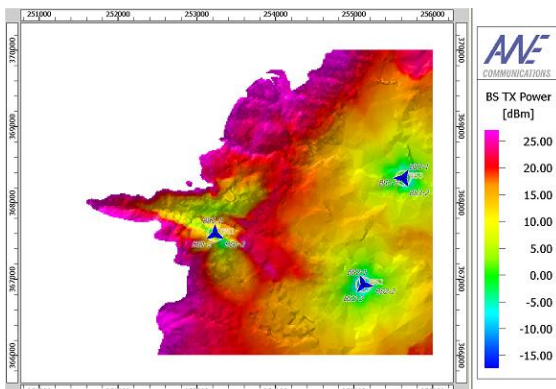
(b) BPSK $\frac{3}{4}$



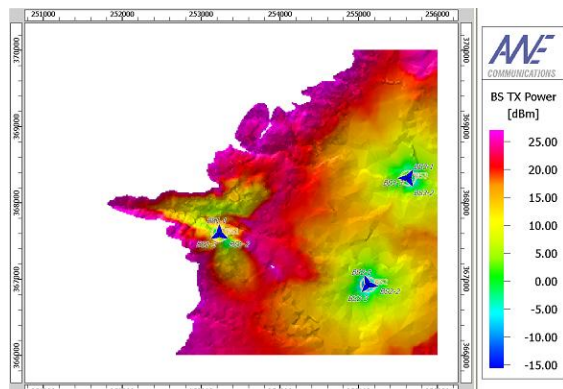
(c) QPSK $\frac{1}{2}$



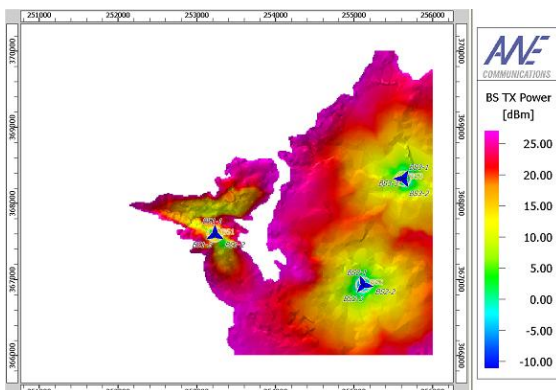
(d) QPSK $\frac{3}{4}$



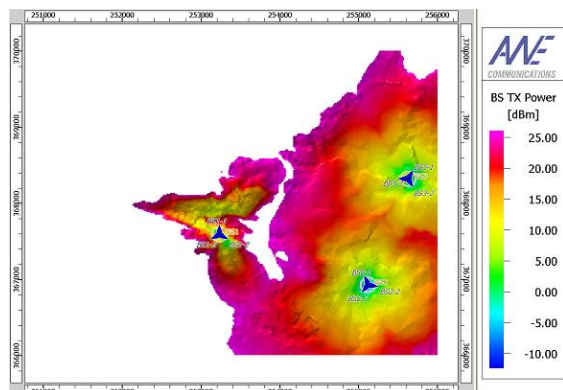
(e) 16-QAM $\frac{1}{2}$



(f) 16-QAM $\frac{3}{4}$



(g) 64-QAM $\frac{2}{3}$



(h) 64-QAM $\frac{3}{4}$

Figura 8.58 - Potência de T_x necessária para a BS alcançar a SS (cont.)

8.7 Tempos de Cálculos

Na Tabela 8.3 apresenta-se os tempos de cálculo bem como os principais parâmetros que influenciam no desempenho da simulação do planeamento da rede sem fios IEEE 802.16-2004 no concelho da Covilhã apresentado nas Secções anteriores. Note-se que o tempo de simulação total consiste em partes diferentes (predição de propagação e análise de rede). Mesmo que alguns parâmetros não sejam necessários para calcular uma das componentes, ambas as partes têm de ser refeitas novamente. A parte da análise de rede é baseada nos resultados da potência determinados durante a predição da propagação.

Na predição da propagação tem que se ter em consideração para cada célula e tem que ser recalculada para uma célula (antena) se a sua posição, a sua altura, o diagrama de radiação da antena ou a orientação da antena (azimute ou *tilt*) for alterado. Não é necessário recalcular a propagação se só for alterada a configuração da potência ou o sistema de rede porque isto é considerado durante análise de rede.

Tabela 8.3 - Tempos de cálculos para o concelho da Covilhã

Cenário de Simulação	
Área de simulação	550 km ²
Número de células	18
Propagação	
Raio da predição	5 km
Resolução	25 m
Modelo	<i>Dominant Path</i>
Tempo de cálculo por célula	9 min
Tempo total de cálculo	≈ 3 h
Análise Estática da Rede	
Resolução	25 m
Leitura da base de dados e propagação	≈ 40 s
<i>Scan</i> da análise de cobertura	≈ 15 min
<i>Scan</i> da análise da capacidade	≈ 15 min
Tempo total de cálculo	≈ 45 min

8.8 Sumario e Conclusões

Neste Capítulo apresentou-se a simulação do planeamento de uma rede sem fios IEEE 802.16-2004 no concelho e na cidade da Covilhã utilizando a ferramenta de planeamento de redes móveis e sem fios WinProp.

Na simulação teve em conta o projecto de propagação e análise de rede, podendo-se extrair as seguintes conclusões:

- Os resultados obtidos na simulação do projecto de propagação no concelho da Covilhã são satisfatório;
- Na cidade da Covilhã temos uma probabilidade de recepção de 100 % devido a não existência de interferência co-canal;
- Os resultados globais obtidos na cidade da Covilhã são satisfatórios visto que só temos três estações com sectores e com frequências diferentes;
- O ritmo de transmissão máximo é muito importante pois pode-se saber onde esperar o máximo e o mínimo de ritmo de transmissão;
- Com as antenas colocadas nos locais estratégicos e bem optimizados conseguiu-se alcançar ordens de modulação/codificação média na maior parte da cidade da Covilhã.

Capítulo 9

Conclusões e Sugestões para Trabalho Futuro

Este Capítulo apresenta as conclusões do trabalho realizado consolidando os resultados expostos anteriormente e extraindo as conclusões e considerações relevantes. Para além disso, são apresentadas as principais contribuições alcançadas durante a elaboração desta dissertação. Finalmente, são apresentadas algumas sugestões para trabalho futuro.

9.1 Conclusões

Neste trabalho foi feita a simulação do planeamento de uma rede sem fios IEEE 802.16-2004 no concelho e na cidade da Covilhã utilizando a ferramenta de planeamento de redes móveis e sem fios WinProp. Para além disso foi apresentada uma abordagem analítica para uma escolha eficiente do padrão de reutilização a utilizar para minimizar a interferência e aumentar a capacidade global do sistema. Também foram apresentadas a optimização das estações base realizada pela ferramenta GIS e criadas bases de dados topográficos e de vectores para o concelho e cidade da Covilhã.

Dos resultados obtidos na simulação conclui-se que é possível utilizar o padrão de reutilização igual a 7 no concelho da Covilhã. Concluimos também que obtemos melhores resultados em termos de cobertura e ritmos de transmissão com antenas sectoriais em detrimento das antenas omnidireccionais. A opção de sub-canalização no *uplink* melhora significativamente os resultados de cobertura no sentido ascendente caso se consigam utilizar as modulações de ordem superiores em coroas com raio superior nas células, aumenta-se a capacidade de sistema.

A utilização de sectorização permite reduzir o padrão de reutilização enquanto que a sub-canalização permite melhorar a cobertura nos sistemas WiMAX.

A redução do padrão de reutilização corresponde de forma discreta a um aumento de capacidade, e não a melhoraria de cobertura, embora de forma indirecta também permite melhorar a capacidade do sistema, dado que se utiliza modulação e codificação adaptativa.

A utilização da sub-canalização no UL para raios de cobertura superiores a 2 km equilibra o ritmo de transmissão médio em relação ao caso de DL, isto é, ritmo de transmissão médio para o DL com raio de cobertura de 3 km é igual a 6.753 Mbps e para o UL é igual a 6.751 Mbps.

Dos resultados obtidos nas simulações podemos verificar que a técnica de sectorização é bastante útil para aumentar a cobertura e a capacidade do sistema.

Os resultados obtidos podem ser melhorados com uma optimização adequado do azimute e o *tilt* das antenas.

Na Cidade da Covilhã utilizando canais (frequências) diferentes para cada antena obtém-se excelentes resultados visto que não temos interferência co-canal.

A principal conclusão a tirar deste trabalho é que a largura de banda será ou é o recurso mais importante no planeamento de uma rede sem fios de banda larga e tem que ser gerida de uma forma criteriosa.

As vantagens que se verificaram com a utilização da sub-canalização no UL, motivam que esta técnica venha a ser explorado também no DL, o que será uma realidade com a norma IEEE 802.16e, WiMAX móvel

9.2 Sugestões para Trabalho Futuro

Diversos estudos complementares podem ser realizados com base nos resultados apresentados nesta dissertação com o objectivo de continuar o trabalho. A seguir apresentam-se as algumas dessas sugestões para trabalho futuro:

1. Fazer o planeamento de uma rede sem fios IEEE 802.16e (WiMAX Móvel) com a nova ferramenta de planeamento WinProp (versão de Fevereiro de 2008, recentemente adquirida);
2. Fazer o planeamento CNP (*Combined Network Planning*) de uma rede WiMAX no concelho ou cidade da Covilhã. Com a base de dados de vector tendo a informação das alturas e matérias dos edifícios;
3. Desenvolver ferramentas de planeamento celular;
4. Fazer uma análise custos/benefícios, tendo em conta resultados de capacidade de sistema para dados misturas de aplicações e serviços em cenário de desenvolvimento típico;
5. Explorar o reutilização fraccionária e outras técnicas de reutilização avançadas em WiMAX móvel;
6. Explorar o WiMAX em redes em malha (*mesh*);
7. Explorar o efeito dos algoritmos de *scheduling* e das melhorias dos protocolos MAC no planeamento;
8. Realizar estudos experimentais de cobertura e interferência com equipamento WiMAX.

ANEXOS

ANEXO A: Características da Antena Sectorial WiMAX 3500 MHz

120°

MODEL NUMBER:
WiMAX 3500MHz 120°

ELECTRICAL
Regulatory compliance
ETSI CS2 (3.30 - 3.80 GHz)

Frequency
3.30 - 3.80 GHz

Polarisation
Vertical

Peak Gain
15.3 dBi

Azimuth beamwidth
120°

Elevation beamwidth
8°

Electrical downtilt
<1°

Front to back ratio
>25 dB

Cross polar
>20 dB

Connector
N-type (F)

VSWR
1.5:1 (3.4 - 3.72 GHz)

Power rating
50W

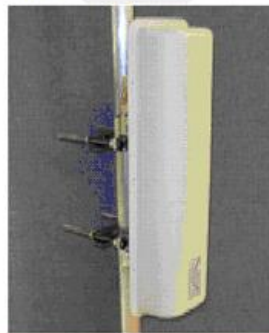
Base Station 120° Sector Antenna

Discreet design offers light weight, minimum impact, installation.

Fully adjustable mounting kit available allowing easy 'out of box' implementation and configuration.

High quality product with robust, UV stable long-life radome

2-year product warranty.

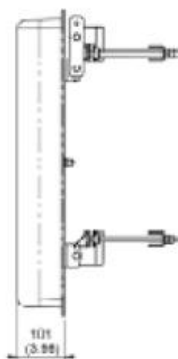


MECHANICAL

FRONT VIEW



SIDE VIEW



PICTORIAL VIEW



END VIEW



Mounting kit options
Galvanised steel
+/-10° adjustment
Pole diameter 50-115mm

Operating temp
-40 to +60°C

Weight
5.5kg

Wind loading @ 160kph
21.1 kg

Radome
Light grey

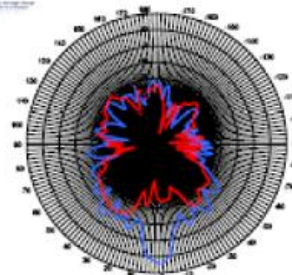
Dimensions
650x200x100

RADIATION PATTERN

Good low side lobe performance optimises frequency re-use.

Elevation beam-shaping with null-fill below horizon provides excellent long range and near-field coverage.

In-house anechoic test facility provides certification of radiation patterns guaranteed to ETSI or other regulatory authorities.



Model	3500-120-000001
Series Name	3500MHz
Part Number	3500-120-000001
Frequency	3.30-3.80 GHz
ETSI	ETSI CS2 (3.30-3.80 GHz)
Class	CS2

0.00-2.00 dBm/deg (0.00-2.00 dBm/deg)

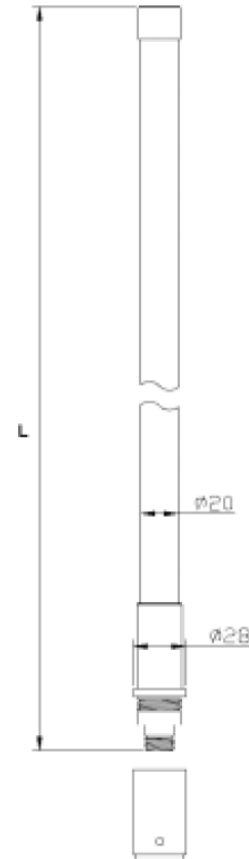
ANEXO B: Características da Antena Omnidireccional GP 3500-XX



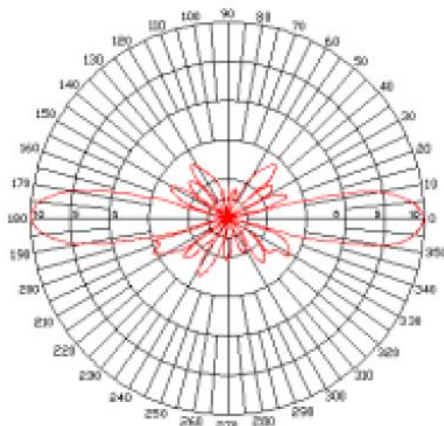
GP3500-XX
3.5 GHz Omnidirectional antenna for WIMAX
18860.10 / 18860.12



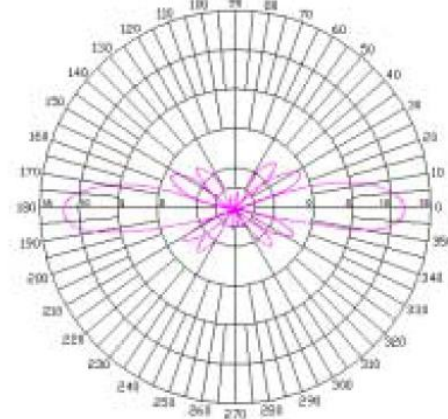
Technische Daten / specifications	
Antennenform type of antenna	Gestockte Dipole / stacked dipole array
Frequenzbereich Frequency range	3400-3600 MHz
Anschluß Connector	N-Buchse N female
Impedance	50 Ohm
Polarization	Vertical
Belastbarkeit Power rating	10 Watt
Gewinn Gain	GP3500-10: 10 dBi GP3500-12: 12 dBi
Öffnungswinkel vertikal vertical beamwidth	GP3500-10: 12° GP3500-12: 10°
Gehäuse/ cover	GFK / fibreglass
Halterung Mount	Edelstahl Stainless steel
Durchmesser diameter	20.0 mm
Gewicht weight	520 / 550 g
Länge Total length [L]	520/ 610 mm



Vertikaldiagramm / vertical pattern



Vertikaldiagramm / vertical pattern



WiMo Antennen und Elektronik GmbH
Am Gäxwald 14, D-76863 Herxheim Tel. (07276) 96680 FAX 6978
<http://www.wimo.com> e-mail: info@wimo.com

ANEXO C: Especificações de Rádio do Equipamento BreezeMAX 3000 da Alvarion

Item	Description				
Frequency	Unit/Band	Uplink (MHz)	Downlink (MHz)		
	AU-ODU-3.3e	3366-3385	3316-3335		
	AU-ODU-3.3f	3381-3400	3331-3350		
	AU-ODU-3.3g	3300-3324	3376-3400		
	AU-ODU-3.5a	3399.5-3453.5	3499.5-3553.5		
	AU-ODU-3.5b	3450-3500	3550-3600		
	AU-ODU-3.6a	3600-3653.5	3700-3753.5		
	AU-ODU-3.6b	3646.5-3700	3746.5-3800		
Operation Mode	FDD, Full duplex				
Channel Bandwidth	<input checked="" type="checkbox"/> 3.5 MHz <input checked="" type="checkbox"/> 1.75 MHz				
Central Frequency Resolution	0.125 MHz				
Antenna Port (AU-ODU)	N-Type, 50 ohm				
Max. Input Power (at AU-ODU antenna port)	-50 dBm before saturation, -17 dBm before damage				
Output Power (at AU-ODU antenna port)	AU-ODU: 28 dBm +/-1 dB maximum. AU-ODU-HP: 34 dBm +/-1 dB maximum Power control range: From 13 dBm to the maximum supported by the unit. In 3.6 GHz ODUs, the minimum power is 18 dBm.				
Modulation	OFDM modulation, 256 FFT points; BPSK, QPSK, QAM16, QAM64				
FEC	Convolutional Coding: 1/2, 2/3, 3/4				
Bit Rate and Typical Sensitivity (PER=1%)		3.5 MHz bandwidth		1.75 MHz bandwidth	
	Modulation & Coding	Net Phy Bit Rate (Mbps)	Sensitivity (dBm)	Net Phy Bit Rate (Mbps)	Sensitivity (dBm)
	BPSK 1/2	1.41	-100	0.71	-103
	BPSK 3/4	2.12	-98	1.06	-101
	QPSK 1/2	2.82	-97	1.41	-100
	QPSK 3/4	4.23	-94	2.12	-97
	QAM16 1/2	5.64	-91	2.82	-94
	QAM16 3/4	8.47	-88	4.24	-91
	QAM64 2/3	11.29	-83	5.65	-86
	QAM64 3/4	12.71	-82	6.35	-85

ANEXO D: Cartas com os Locais LoS, no Concelho da Covilhã

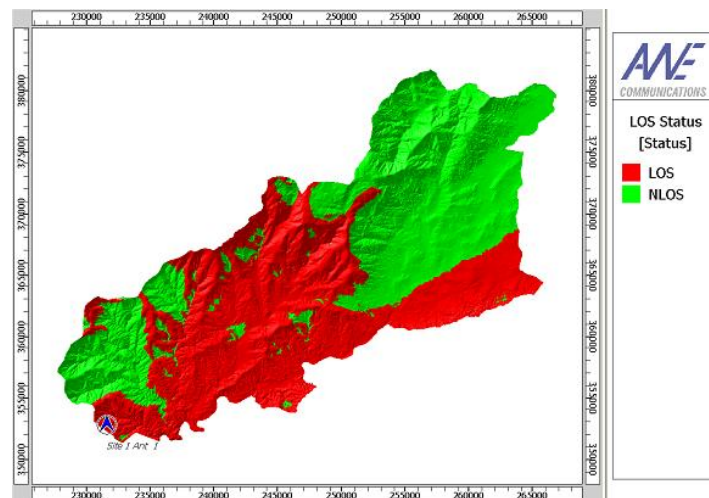


Figura D.1 - Locais com linha de vista da estação base 1

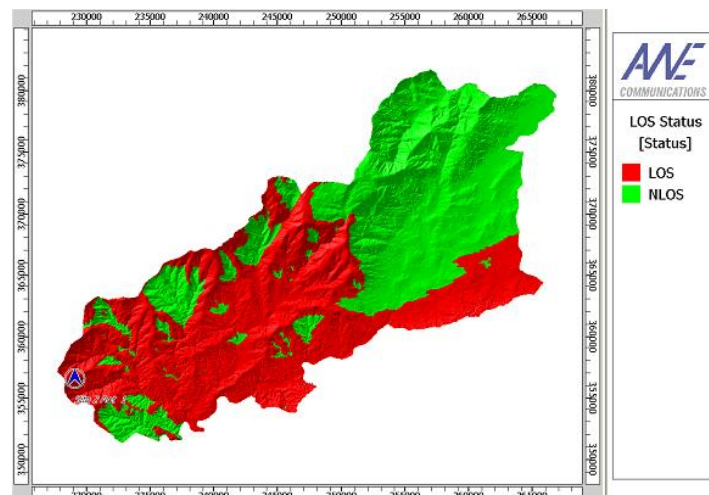


Figura D.2 - Locais com linha de vista da estação base 2

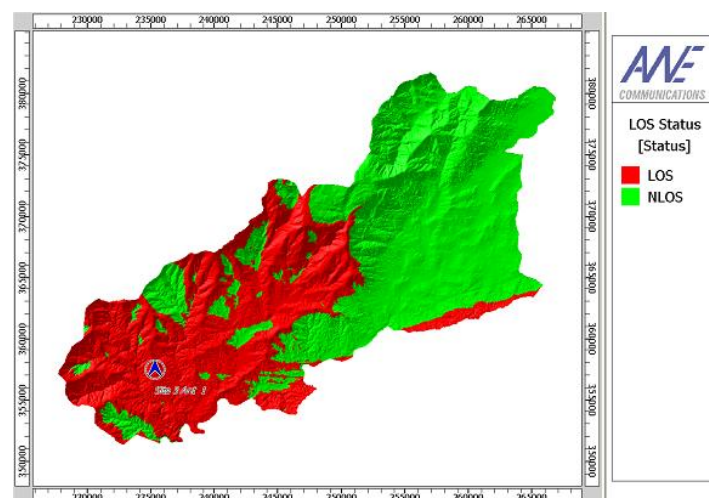


Figura D.3 - Locais com linha de vista da estação base 3

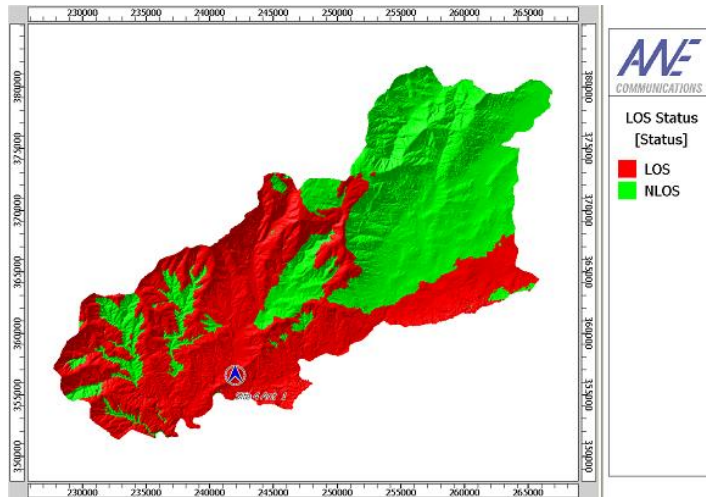


Figura D.4 - Locais com linha de vista da estação base 4

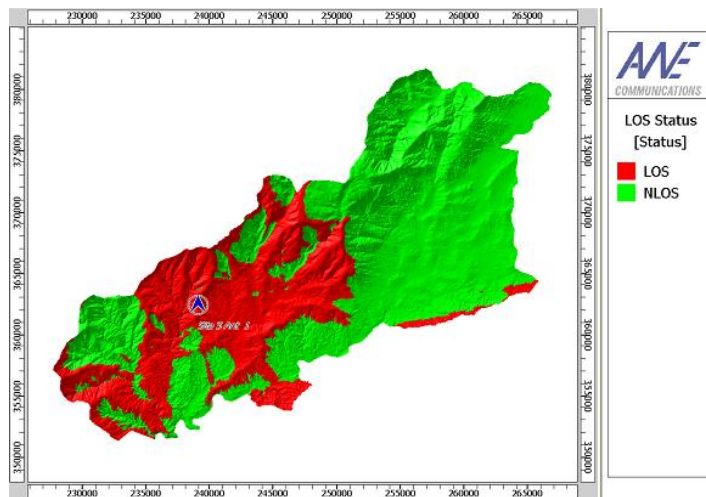


Figura D.5 - Locais com linha de vista da estação base 5

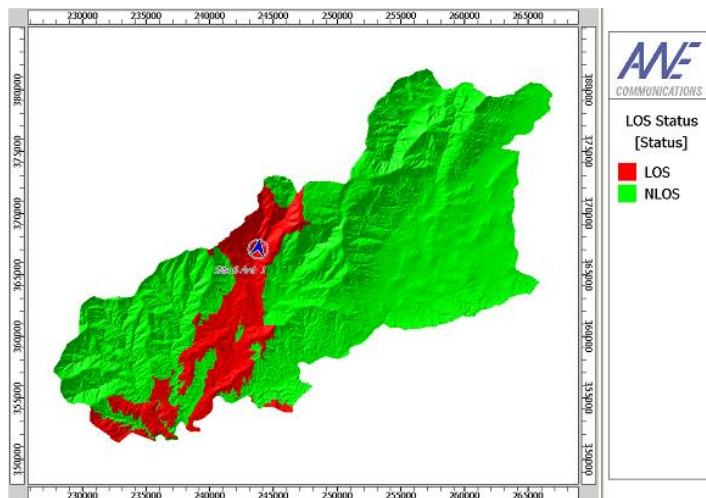


Figura D.6 - Locais com linha de vista da estação base 6

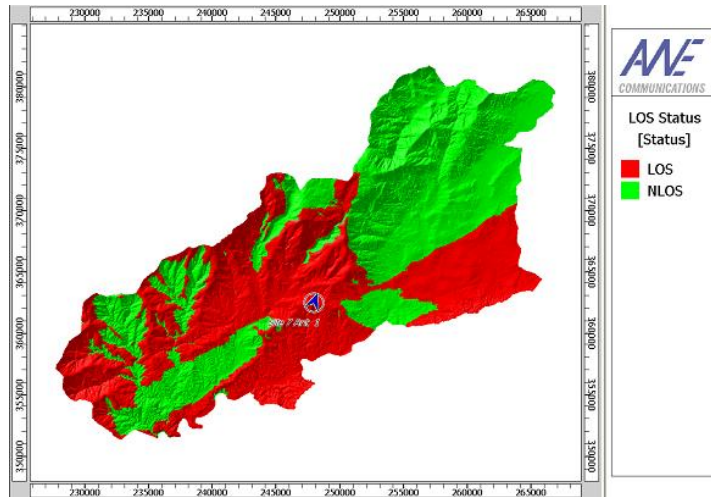


Figura D.7 - Locais com linha de vista da estação base 7

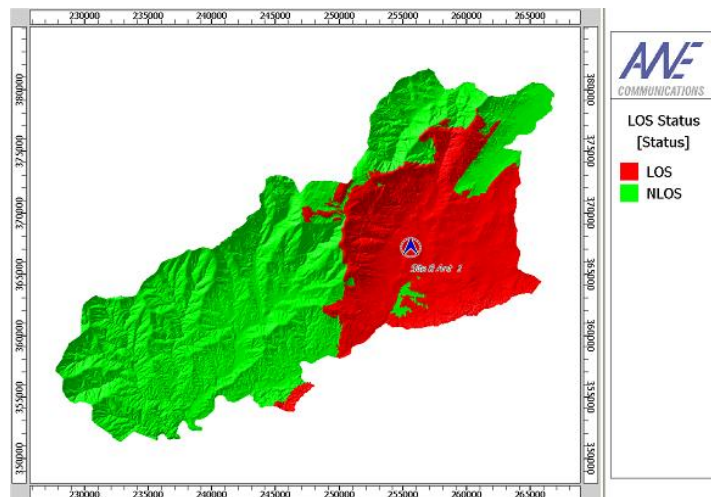


Figura D.8 - Locais com linha de vista da estação base 8

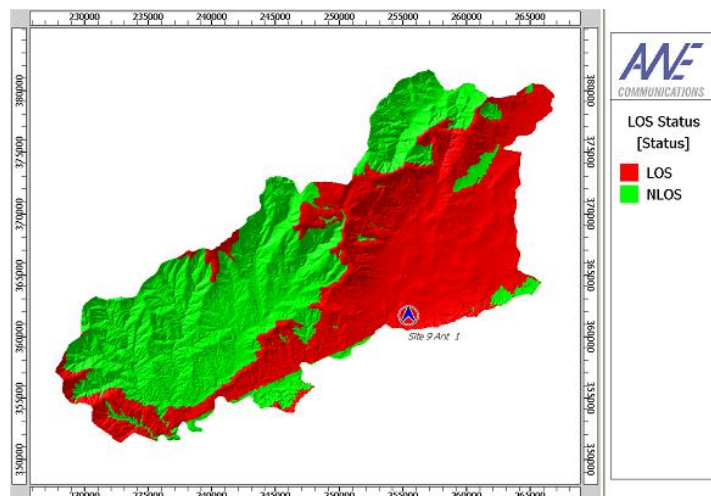


Figura D.9 - Locais com linha de vista da estação base 9

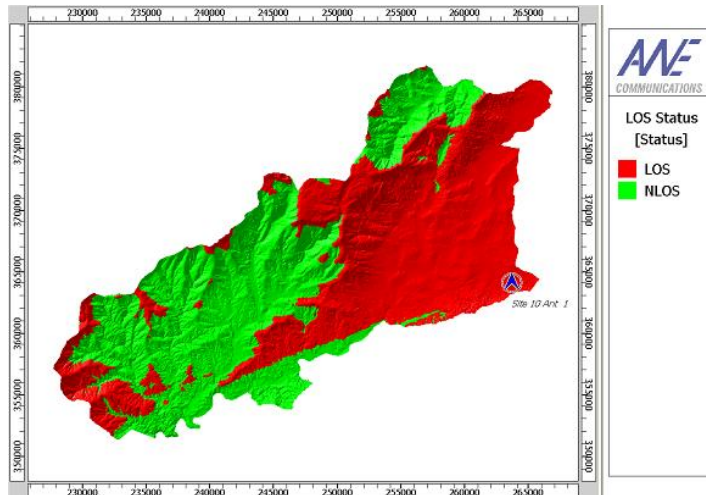


Figura D.10 - Locais com linha de vista da estação base 10

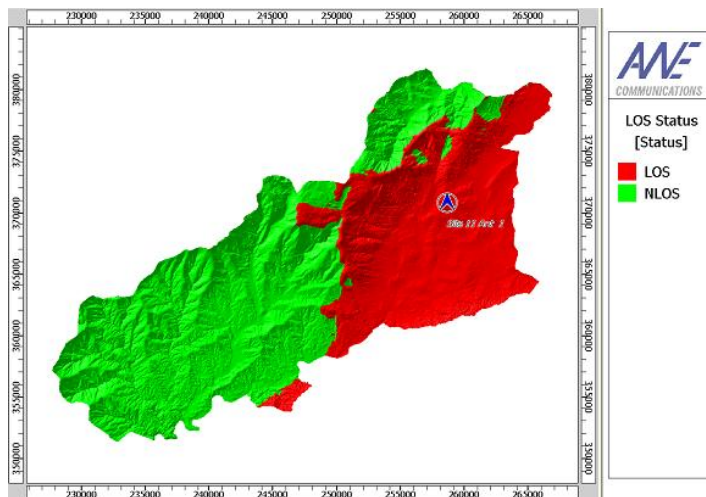


Figura D.11 - Locais com linha de vista da estação base 11

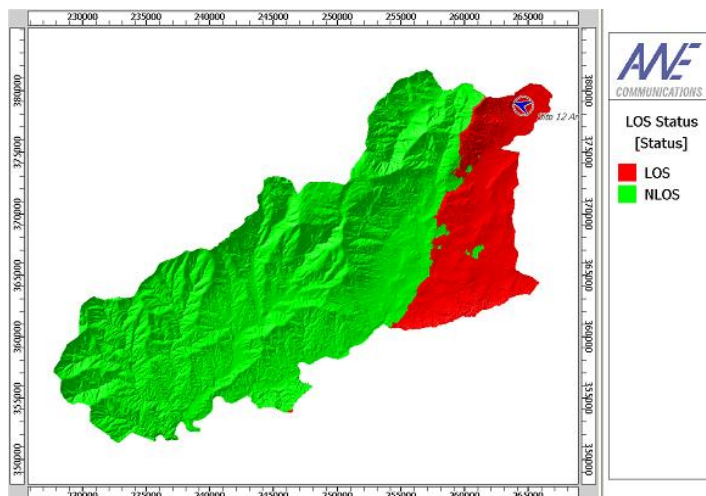


Figura D.12 - Locais com linha de vista da estação base 12

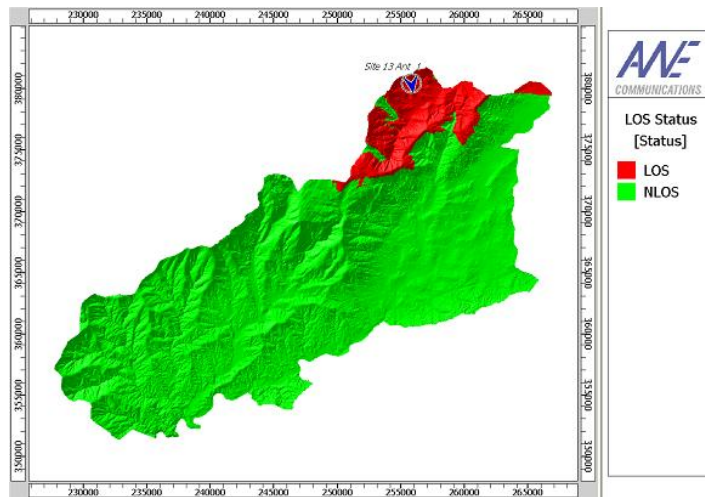


Figura D.13 - Locais com linha de vista da estação base 13

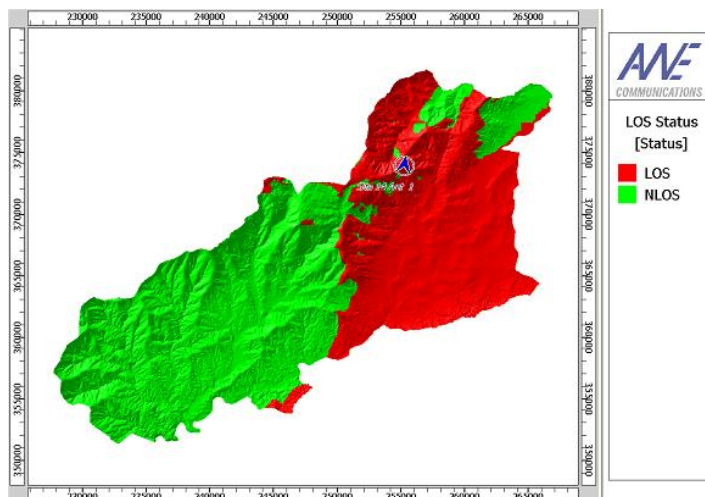


Figura D.14 - Locais com linha de vista da estação base 14

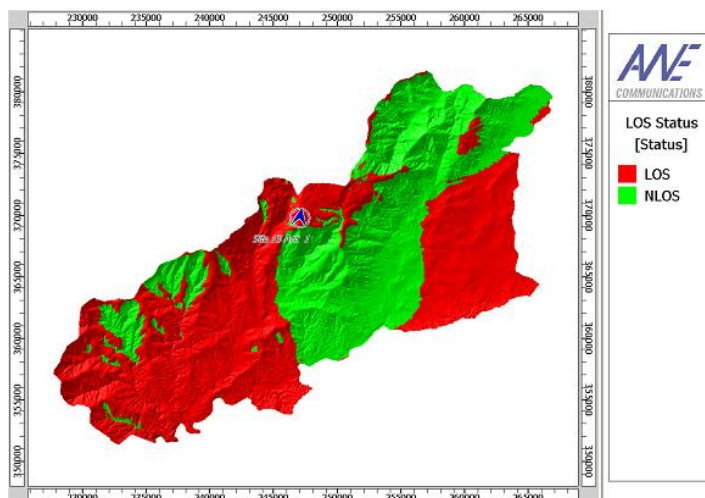


Figura D.15 - Locais com linha de vista da estação base 15

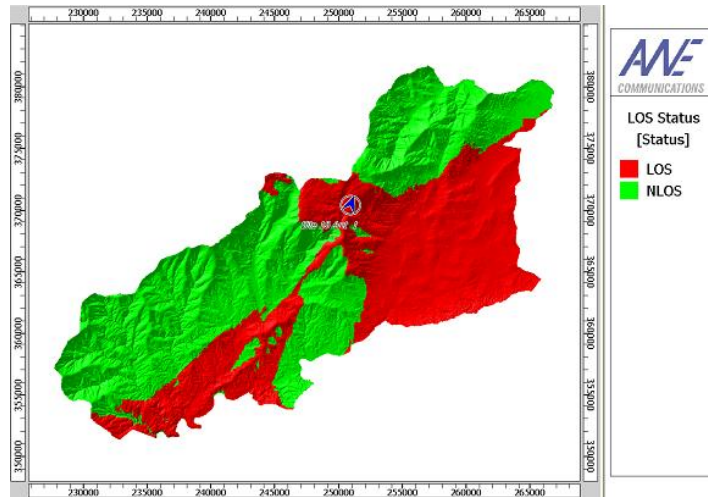


Figura D.16 - Locais com linha de vista da estação base 16

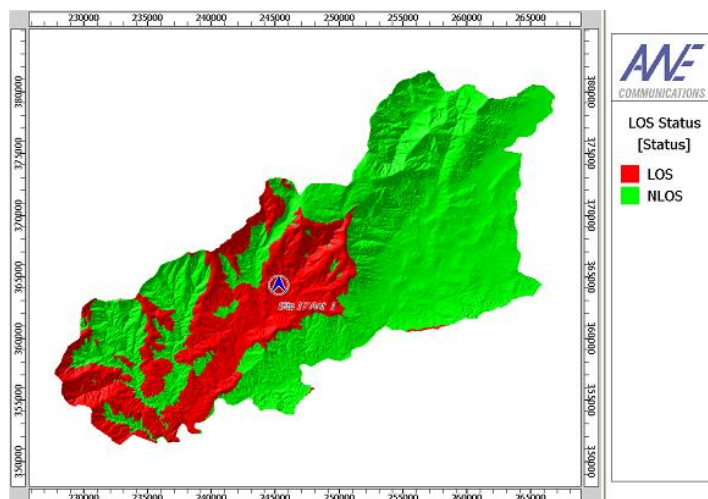


Figura D.17 - Locais com linha de vista da estação base 17

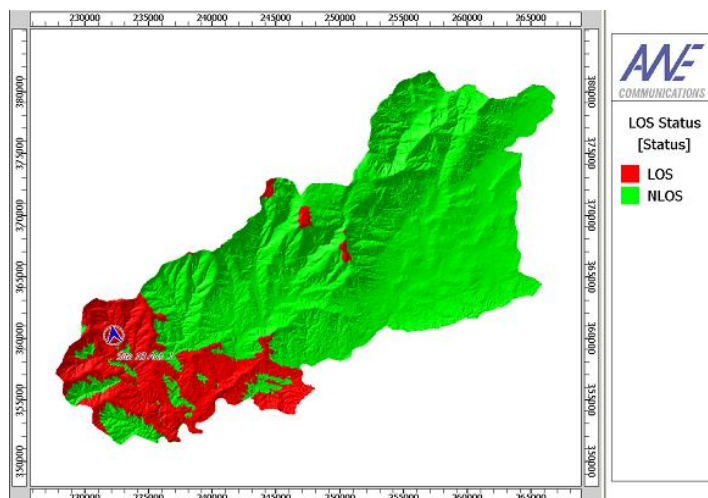


Figura D.18 - Locais com linha de vista da estação base 18

Referências

- [Alva06] www.alvarion.com
- [AnGM07] J. G. Andrews, A. Ghosh, R. Muhamed, *Fundamentals of WiMAX: Understanding Broadband Wireless Networking*, Prentice Hall, USA, 2007
- [Damo98] E. Damosso, *COST 231 View on the Evolution towards 3rd Generation Systems*, Bruxelles: ed., Digital Mobile Rádio, Final Report of the COST 231 Project, published by the European Commission, 1998.
- [Eklu02] C. Eklund, *IEEE Standard 802.16: A Technical Overview of the WirelessMAN™ Air Interface for Broadband Wireless Access. IEEE C802.16.02/05*, 2002. (http://www.ieee802.org/16/docs/02/C80216-02_05.pdf)
- [IEEE04] IEEE 802.16, IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks – *Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems*, IEEE Std.802.16, Oct. 2004.
- [Inte04] INTEL Corporation, *IEEE 802.16 Medium Access Control and Service Provisioning*, White Paper, Intel, Aug. 2004.
(<http://www.intel.com/ebusiness/pdf/>)
- [LePe99] Per H. Lehne and Magne Peterson, “*An Overview of Smart Antennna Technology for Mobile Communications System*”, *IEEE Communications Surveys*, Fourth Quarter 1999 vol.2 no.4.
- [MaSa05] Rui Marcos; Dany Santos; *Planeamento de uma Rede sem Fios IEEE 802.16e no Concelho da Covilhã*, Projecto Final de Curso, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal, 2005.
- [Nuay07] Loutfi Nuaymi, *WiMAX: Technology for Broadband Wireless Access*, John Wiley & Sons, West Sussex, UK, 2007.
- [Ohrt05] Frank Ohrtman, *WiMAX Handbook: Building 802.16 Wireless Network*, McGraw-Hill Communications, New York, New York, USA, 2005.
- [Pars92] D. Parsons, *The Mobile Radio Propagation Channel*, Pentech Press, London, UK, 1992.
- [Rapp02] T. S. Rappaport, *Wireless Communications - Principles and Praticce*, Second Edition, Prentice Hall, Upper Sanddle River, NJ, USA, 2002.

- [RARG07] Daniel Rob Daniel Robalo, João Ambrósio, Carlos Reis, David Gouveia, Marco Marques, Fernando J. Velez, Rui Costa, Cláudio Comissário, José Riscado, Victor Cavaleiro, “Projecto e planeamento de redes sem fios IEEE 802.16”, *Actas da Engenharias’ 2007 – Inovação e Desenvolvimento*, Covilhã, Portugal, Nov. 2007
- [RMAR08] Daniel Robalo, Marco Marques, João Ambrósio, Carlos Reis, David Gouveia, Fernando J. Velez, Rui Costa, Cláudio Comissário, José Riscado, Victor Cavaleiro, “Projecto e Instalação de Feixes Pré-WiMAX,” *Actas 3ª Conferencia Ibérica de Sistemas y Tecnologías de la Información*, Ourense, Espanha, Jun. 2008.
- [Sale03] Carlos Salema, *Microwave Radio Links*, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, USA, 2003.
- [Shak06] Mo Shakouri, *WiMAX Enabling Personal Broadband*, in *Proc. of WiMAX World Europe*, Vienna, Austria, May 2006
- [SVCR08a] Pedro Sebastião, F. Velez, Rui Costa, Daniel Robalo, Cláudio Comissário and Antonio Rodrigues, “Planning and Deployment of WiMAX and Wi-Fi Networks for Health Sciences Education,” accepted for publication in *Teletronikk*, May 2008.
- [SVCR08c] Pedro Sebastião, Fernando J. Velez, Rui Costa, Daniel Robalo, Cláudio Comissário, António Rodrigues, “Planeamento e Desenvolvimento de Sistemas Celulares IEEE 802.16 – 2004,” *Actas 3ª Conferencia Ibérica de Sistemas y Tecnologías de la Información*, Ourense, Espanha, Jun. 2008.
- [Tane02] A. Tanenbaum, *Computer Networks*, 4th ed., Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, USA, 2002.
- [Tong06] Wen Tong, “*MIMO Will Power WiMAX and Beyond*”, Presentation at Global WiMAX Summit in China, Oct. 2006.
- [VCRM08] Fernando J. Velez, Rui Costa, Daniel Robalo, Marco Marques, Cláudio Comissário, José Riscado, Victor Cavaleiro, “Design and Installation of Pre-WiMAX Radio Links and Relays,” in *Proc. of WPMC 2008 - The 11th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications*, Lapland, Finland, Sep. 2008.

- [VCSM05] Fernando J. Velez, Vitor Carvalho, Dany Santos, Rui P. Marcos, Rui Costa, Pedro Sebastião and António Rodrigues, “*Planning of an IEEE 802.16e Network for Emergency and Safety Services,*” in *Proc. of 3G 2005 - IEE International Conference on 3G Mobile Communication Technologies*, London, UK, Oct. 2005.
- [Vele95] Fernando J. Velez, *Uma Ferramenta Interactiva de Planeamento Microcelular para Comunicações Móveis em Ambiente Urbano na Banda das Ondas Milimétricas*, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal, 1995.
- [Wima04] WiMAX Forum, *WiMAX. IEEE 802.16 Standard and WiMAX Igniting Broadband Wireless Access*, White Paper, “WiMAX Forum™” and “WiMAX Forum CERTIFIED™”, 2004.
(<http://www.WiMAXforum.org/news/downloads/WiMAXWhitepaper.pdf>)
- [Wima06a] WiMAX Forum, *Mobile WiMAX – Part I: A Technical Overview and Performance Evaluation*, White Paper, “WiMAX Forum™” and “WiMAX Forum CERTIFIED™”, 2006.
(<http://www.WiMAXforum.org/news/downloads/WiMAXWhitepaper.pdf>)
- [Wima06b] WiMAX Forum, *A Comparative Analysis of Mobile WiMAX™ Deployment Alternatives in the Access Network*, White Paper, “WiMAX Forum™” and WiMAX Forum CERTIFIED™”, 2006.
(<http://www.WiMAXforum.org/news/downloads/WiMAXWhitepaper.pdf>)
- [Wima06c] WiMAX Forum, *Mobile WiMAX – Part II: A Comparative Analysis*, White Paper, “WiMAX Forum™” and WiMAX Forum CERTIFIED™”, 2006.
(<http://www.WiMAXforum.org/news/downloads/WiMAXWhitepaper.pdf>)
- [Winp07] <http://www.awe-communications.com>
- [Yaco02] M. Yacoub, *Celular Communication Systems*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA, 1992.