

# Concepção e Planeamento de Redes sem Fios IEEE 802.16

Vitor Carvalho<sup>\*</sup>, Dany Santos<sup>\*</sup>, Rui P. Marcos<sup>\*</sup>, Rui Costa<sup>\*</sup>, Fernando J. Velez<sup>\*</sup>, Pedro Sebastião<sup>+</sup>, António Rodrigues<sup>+</sup>, José Riscado<sup>†</sup>, José Romão<sup>†</sup>, Victor Cavaleiro<sup>†</sup>,

<sup>\*</sup> IT-DEM, Universidade da Beira Interior, 6201-001 Covilhã, Portugal  
vitorhscarvalho@portugalmail.pt, {santos\_dany, pais\_marcos}@hotmail.com, {ruicosta, fjb}@ubi.pt

<sup>+</sup> Instituto de Telecomunicações/Instituto Superior Técnico,

Av. Rovisco Pais, 1, Torre Norte, 11º, 1049-001 Lisboa, Portugal

{pedro.sebastiao, antonio.rodrigues}@lx.it.pt

<sup>†</sup> DEC-UBI, Universidade da Beira Interior, 6201-001 Covilhã, Portugal

jose.riscado@netc.pt, {jromao, cavaleiro}@ubi.pt

**Resumo:** Esta comunicação aborda aspectos de projecto e planeamento celular duma rede sem fios WiMax (IEEE 802.16) para interligar ponto-a-ponto a Faculdade de Ciências da Saúde da Universidade da Beira Interior (FCS/UBI) ao Hospital Amato Lusitana (Castelo Branco), uma rede ponto-multiponto para ligar a FCS/UBI/Hospital Pêro da Covilhã a toda a área urbana do centro da cidade da Covilhã e uma rede móvel celular dedicada aos serviços públicos de emergência e de segurança, abrangendo toda a região da Beira-Interior, fazendo-se a avaliação detalhada da existência de linha de vista no concelho da Covilhã. Efectuou-se o planeamento tendo em conta aspectos relacionados com a relação portadora-ruído,  $C/N$ , e a relação portadora-interferência, concluindo-se ser necessário usar sectorização e considerar sobreposição de micro-células à estrutura macro-celular (*cell overlay*). Utilizaram-se ferramentas GIS para auxiliar no processo de determinação das posições para as estações de base e da respectiva área com linha de vista, de forma a assegurar um expoente de propagação baixo. Dos resultados para a ligação ponto-a-ponto Covilhã-Gardunha-Castelo Branco, conclui-se que é possível assegurar comunicação com qualidade a 3.5 GHz, mas a 5.8 GHz, como a distância máxima para a qual  $C/N < (C/N)_{min}$  é de 25 km, é necessário aumentar o ganho de pelo menos uma das antenas para assegurar a qualidade da ligação.

## I. INTRODUÇÃO

WiMax (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) é uma norma para redes sem fios de área metropolitana que se está a tornar cada vez mais popular para as comunicações ponto-a-ponto e ponto-multiponto. O WiMax é o nome comercial da norma 802.16 e, tal como o Wi-Fi, irá permitir a interoperabilidade entre equipamentos de fabricantes diferentes; é um novo padrão para redes sem fios de exterior que foi aprovado em Janeiro de 2003 no WiMax Fórum. Enquanto que a norma IEEE 802.16-2004 [2] abrange os utilizadores fixos e portáteis, a IEEE 802.16e [3] abrange o segmento móvel e tem um enorme potencial, permitindo utilização de banda larga em movimento. Antes do IEEE 802.16 já existiam vários projectos de redes sem fios de longa distância, a maioria utilizando equipamentos 802.11b (Wi-Fi) e antenas de ganho elevado. No entanto, as distâncias não superam alguns quilómetros, sendo necessários repetidores intermédios para atingir distâncias mais longas. A partir de um certo limite a única opção é a transmissão via satélite, bastante mais cara.

Dado o nível de aceitação crescente, a tecnologia WiMax, IEEE 802.16, na sua versão “e” (com suporte de mobilidade) é uma das candidatas preferenciais para um sistema de banda larga de apoio à protecção civil e emergência médica na Beira Interior. Em Portugal, como não há nenhum sistema digital de comunicações sem fios para a emergência médica e segurança pública, por exemplo, o TETRA (*TErrestrial Trunked RAdio*), a introdução do WiMax ganha um interesse especial. Com uma abordagem orientada ao serviço, onde as necessidades dos bombeiros, da polícia, das ambulâncias, etc. sejam tidas em consideração, é possível estabelecer uma estrutura para um planeamento inicial de uma rede metropolitana sem fios, onde os utilizadores tenham acesso a comunicações interactivas de voz, dados, vídeo e multimédia. Isto será possível utilizando terminais inovadores, como PDAs ou Tablet PCs, que combinarão a voz com outro tipo de comunicações, incluindo dados, imagem e vídeo. Um exemplo pode ser a comunicação de uma imagem em tempo real desde a zona onde está a decorrer um incêndio para o centro de comando. Durante o tempo de verão, os fogos simultâneos nas florestas são uma calamidade persistente, e as autoridades não têm acesso à informação em tempo real da evolução dos fogos, a fim de coordenar as equipas de bombeiros. Um outro exemplo é a utilização de câmaras de vigilância em ruas comerciais, usando vídeo em tempo real. No contexto das Universidades e Hospitais outras aplicações são *e-learning* e *e-health*; assim, o nosso trabalho tem por base uma estrutura celular, com micro-células que cobrem *hotspots* urbanos sobre uma estrutura macro-celular que cobre toda a região da Beira Interior (*cell overlay*), Fig.1.

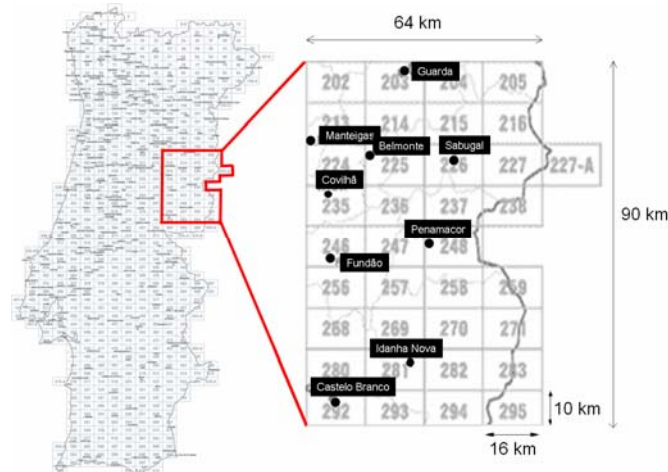


Fig. 1. Beira Interior, Portugal.

Enquanto a estrutura macro-celular é dedicada principalmente a serviços públicos de emergência e de segurança, as micro-células urbanas suportarão também serviços de *e-learning* e *e-health*, entre outros. Para o planeamento celular desta rede móvel WiMax vamos considerar a cobertura global desta região, tendo em conta aspectos de reutilização de recursos e explorando várias possibilidades de aumento de capacidade, por exemplo, sectorização.

Em zonas urbanas e centros de cidades, através das características e potencialidades desta tecnologia, podemos criar uma rede de área metropolitana sem fios de banda larga orientada às aplicações e serviços. É dada especial atenção a instituições como centros comerciais, estações de camionagem e de comboio, Universidades, Bombeiros, Polícia, Câmara Municipal, Hospitais, Centros de Saúde e outros serviços públicos, onde os utilizadores terão acesso a voz sobre IP (*Internet Protocol*), dados, comunicações vídeo e multimédia. Um exemplo pode ser a comunicação em tempo real a partir do Hospital com a Faculdade de Ciências da Saúde ou a possibilidade dos alunos acederem aos conteúdos que são leccionados na Universidade a partir de casa ou enquanto se deslocam na cidade, *e-learning*, bastando para isso possuírem um computador portátil ou outro terminal multimédia.

A Secção II aborda aspectos de planeamento celular, incluindo a determinação da área de cobertura, através do cálculo da relação portadora-ruído na zona de interesse, e o dimensionamento da reutilização de frequências, através do cálculo da relação portadora-interferência. Na Secção III exploram-se as potencialidades de análise de visibilidade das ferramentas GIS. Descrevem-se os conjuntos de parâmetros do *ArcView* e apresentam-se resultados de descoberta de linha de vista tanto no concelho da Covilhã como na zona urbana da cidade em particular. Na Secção IV dimensiona-se o feixe Hertziano WiMax com repetidor Covilhã-Gardunha-Castelo Branco de forma a se ultrapassar os requisitos mínimos de qualidade para a modulação considerada, recorrendo-se às Recomendações do ITU-R. Deste dimensionamento, resultam valores para os parâmetros tecnológicos do sistema, por exemplo, do ganho das antenas. Finalmente, na Secção V apresentam-se conclusões.

## II. PLANEAMENTO CELULAR

O problema de planeamento de uma rede celular deste tipo tem que ter em conta aspectos de propagação (cobertura e interferência), serviços e aplicações, tele-tráfego, capacidade de sistema, arquitecturas de rede e protocolos, segurança e mobilidade, entre outros aspectos. O projecto MobileMAN (*Mobile IP for Broadband Wireless Metropolitan Area Networks* [5]), um projecto do Instituto de Telecomunicações/Laboratório Associado, concentra-se na investigação e demonstração, através de uma rede piloto, de vários destes aspectos. Neste trabalho, para além da componente ponto-a-ponto, focamos a nossa atenção na componente móvel do WiMax e tratamos com mais detalhe os aspectos de propagação no planeamento duma rede móvel IEEE 802.16e que permita gerir uma frota de ambulâncias e outras unidades móveis de emergência médica ou da Protecção Civil na Beira Interior e, para além disso, suporte uma capacidade mais elevada na zona urbana da Covilhã. No caso citadino, devido à irregularidade do terreno e à elevada densidade de edifícios, a propagação nem sempre é assegurada por ligações em linha de vista, o que se apresenta como uma limitação. No entanto, através dum dimensionamento cuidado, estas dificuldades podem ser ultrapassadas. Neste âmbito, procedemos à análise da visibilidade do terreno para optimização da área de cobertura, através da utilização de ferramentas GIS (*Geographic Information Systems*), sendo a área a cobrir na zona da cidade da Covilhã a apresentada na Fig. 2. 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*).

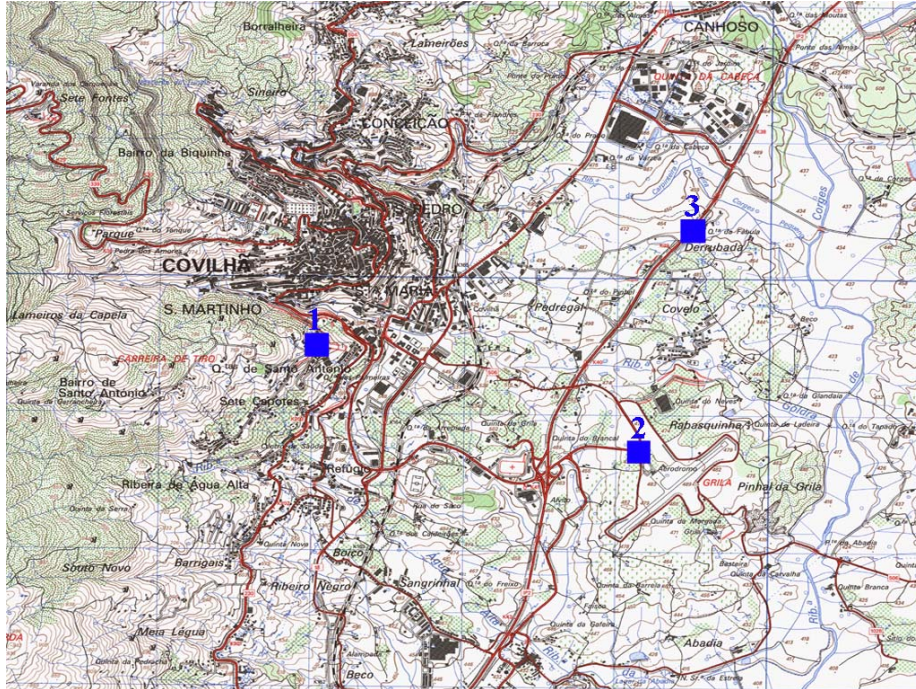


Fig. 2. Área metropolitana da Covilhã com estações de base colocadas em pontos chave (extraído da carta militar nº235 do IGeoE, escala 1/25000).

No âmbito do projecto MobileMAN, para além de se planear a rede de área metropolitana de banda larga sem fios na Covilhã e de se desenvolver ferramentas de planeamento celular, pretende-se também ligar, num futuro próximo, os Hospitais de Castelo Branco, Covilhã e Guarda com uma rede WiMax ponto-a-ponto, utilizando um repetidor na Serra da Gardunha, com o objectivo de aumentar a cooperação entre os Hospitais e a Faculdade de Ciências da Saúde da UBI, contribuindo assim para uma melhoria do serviço prestado ao utente, e para uma maior facilidade no acesso a conteúdos de *e-learning* por parte de professores, alunos, médicos, enfermeiros e demais profissionais de saúde.

O planeamento é feito sobre a região da Beira Interior, com uma área de  $64 \times 90 = 5760 \text{ km}^2$ , Fig.1. No processo do planeamento celular, temos que ter em conta a relação portadora-ruído e a relação portadora-interferência simultaneamente. O modelo de propagação baseia-se na fórmula de Friis [7] modificada com expoente de propagação variável. Os diferentes ambientes de propagação são modelados por diferentes expoentes de propagação,  $\gamma$ , que variam desde  $\gamma=2$ , para o espaço livre, por exemplo, áreas rurais, até  $\gamma=3$  e  $\gamma=4$ , em áreas urbanas sem e com sombra, respectivamente [7]. O número de macro-células necessárias para cobrir a área considerada é de aproximadamente 35 e 62 células, para distâncias de cobertura de 8 e 6 km, respectivamente; estes valores são obtidos dividindo a área total pela área de cada célula hexagonal. A análise da relação portadora-ruído,  $C/N$ , realça as limitações na cobertura, Fig. 3. A ferramenta de planeamento que está a ser desenvolvida permitirá alcançar resultados como os da Fig. 4. Utiliza-se a fórmula de Friis substituindo-se o expoente de propagação 2 por  $\gamma$ , considera-se  $P_e=0 \text{ dBW}$ ,  $G_e+G_r=25 \text{ dBi}$ , uma largura de banda de 5 MHz e um factor de ruído de 3 dB [2] (onde  $P_e$  é a potência de emissão,  $G_e$  é o ganho da antena de emissão e  $G_r$  é o ganho da antena de recepção). A atenuação causada pela chuva é considerada como o pior caso.

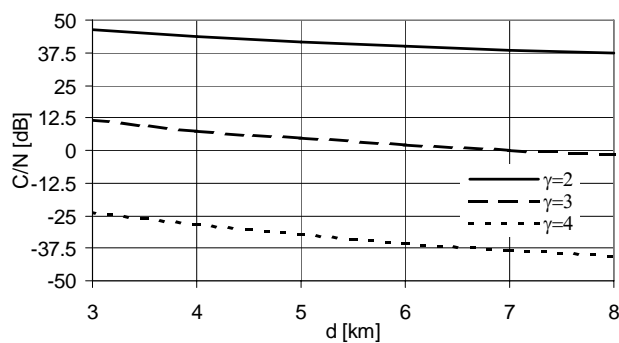


Fig. 3. Relação portadora-ruído,  $f=3.5 \text{ GHz}$  (diferentes  $\gamma$ ).

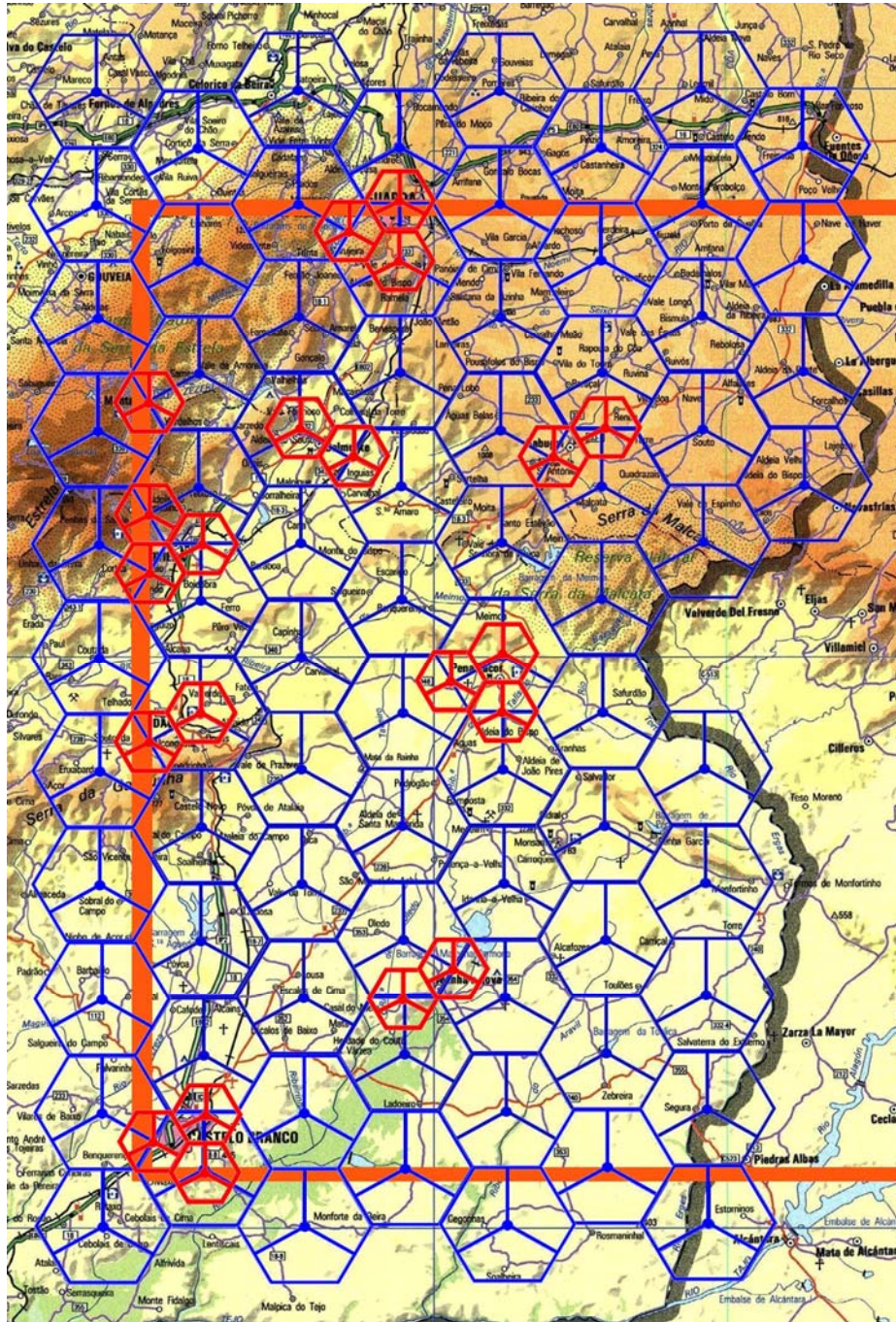


Fig. 4. Disposição celular na Beira Interior,  $R = 6$  km.

Sabendo que os valores de  $(C/N)_{min}$  são da ordem dos 6-8 dB [2] para uma modulação de ordem baixa (QPSK), a Fig.3 mostra que só é possível ultrapassar esse valor para  $\gamma=2$  e  $\gamma=3$ ; contudo, para  $\gamma=3$  esta conclusão só é válida para distâncias até 4 km, Tabela I. Para modulações de ordem superior (por ex., 16-QAM) os valores de  $(C/N)_{min}$  são da ordem dos 16-18 dB [8] e só será possível ultrapassar o valor de limiar para  $\gamma=2$ .

Tabela I: Distâncias de cobertura possíveis.

$C/N_{min}$	$\gamma=2$	$\gamma=3$
Modulações de ordem baixa (6-8 dB)	$d=1-10$ km	Até $d=4$ km
Modulações de ordem alta (16-18 dB)	$d=1-10$ km	Impossível

Assim, podemos dizer que em espaços livres (áreas rurais) a cobertura não é uma limitação, enquanto que em zonas urbanas, para grandes distâncias, é impossível garantir a cobertura e então é necessário utilizar células de 3-4 km. Uma proposta para superar esta limitação é sobrepor a estrutura macro-celular com micro-células (*cell overlay*). Adicionalmente, em áreas urbanas, é necessária uma escolha cuidadosa da colocação e da altura das antenas das estações de base, BSs, para assegurar uma percentagem elevada de linha de vista dentro das células, garantindo que o expoente da propagação é no máximo da ordem de  $\gamma=3$ , para zonas urbanas sem sombra.

Relativamente à interferência do co-canal [4], com este modelo simples da propagação a relação da portadora-interferência é dada pela seguinte expressão

$$C/I = \frac{1}{2(q-1)^{-\gamma} + 2q^{-\gamma} + 2(q+1)^{-\gamma}}, \quad (1)$$

onde  $q=D/R = \sqrt{3k}$  depende somente da relação entre a distância da cobertura,  $R$ , e a distância de reutilização,  $D$ , ou, alternativamente, depende do padrão de reutilização,  $k$ . Considerando antenas omnidireccionais [4], para  $\gamma=2$ , necessitamos de utilizar um padrão de reutilização maior ou igual a 12 para superarmos um  $(C/I)_{min}=6-8$  dB, Fig.3.

Se as antenas forem sectoriais de  $120^\circ$ , a relação da portadora-interferência é obtida doutra forma

$$C/I = \frac{R^{-\gamma}}{(D+0.7)^{-\gamma} + (D-0.22)^{-\gamma}} = \frac{1}{(q+0.7)^{-\gamma} + (q-0.22)^{-\gamma}}. \quad (2)$$

Como se mostra na Fig.5, conseguem-se melhores resultados;  $k=3-4$  é suficiente. No entanto, para modulações de ordem mais elevada, seria necessário um padrão reutilização de pelo menos 19 para superar  $(C/I)_{min}=15-16$  dB. Com antenas omnidireccionais e para  $\gamma=2$  e  $\gamma=3$  são necessários padrões de reutilização mínimos de 12 e 4-7, respectivamente, enquanto que com antenas sectoriais os valores respectivos são 3-4 e 3, Tabela II.

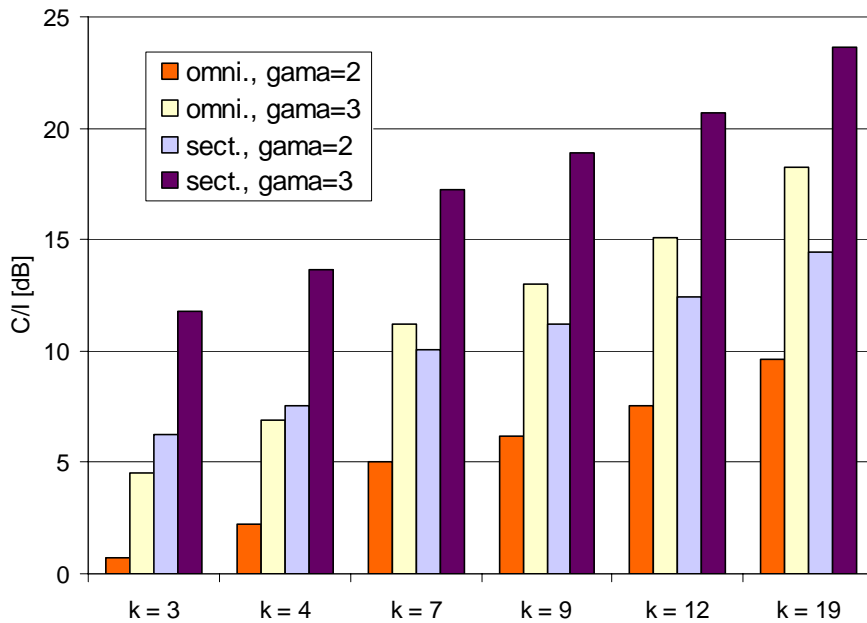


Fig. 5. Relação portadora-interferência em diferentes ambientes com antenas omnidireccionais e sectoriais.

Assim, na implementação desta rede, será utilizada sectorização para reduzir o padrão de reutilização para valores aceitáveis, e a utilização de micro-células é sugeridas para superar problemas da cobertura nas cidades ou zonas de densidade populacional elevadas, Fig.5. Para além disso, na ferramenta de planeamento celular que está a ser desenvolvida no projecto MobileMAN incorporar-se-ão funcionalidades de escolha/optimização de posições de altitude elevada para as BSs.

Tabela II: Comparação dos padrões de reutilização para antenas omnidireccionais e sectoriais.

$k$ para dado $(C/I)_{min}$	$\gamma=2$	$\gamma=3$
Omnidireccional	12	4-7
Sectorial	3-4	3

### III. OPTIMIZAÇÃO DA PERCENTAGEM DE LINHA DE VISTA

#### A. Parâmetros

Em zonas urbanas com sombra, devido aos obstáculos urbanos e ao relevo irregular do terreno, o expoente de propagação pode ser alto. Logo, a localização das estações de base tem de ser cuidadosamente escolhida para conseguirmos uma percentagem elevada de linha de vista na área de interesse, reduzindo o valor de  $\gamma$ .

Para alcançar esta optimização utilizaram-se as potencialidades das ferramentas GIS. A partir delas, foi possível escolher a melhor posição das estações de base baseada no modelo digital de terreno, Fig. 6, Especificando alguns parâmetros conseguimos saber quais as zonas da célula que têm linha de vista com cada uma das estações de base. A função de análise de visibilidade no *ArcView* requer a especificação de seis conjuntos de parâmetros para o cálculo da visibilidade [6]:

i) *SPOT* – elevação do observador acima do solo. No nosso caso utilizou-se um *SPOT* nulo, ou seja, como pior caso a elevação do terreno corresponde à altura do observador,

ii) *OFFSETA* e *OFFSETB* – *OFFSETA* é a distância vertical em metros adicionada à altitude do observador. *OFFSETB* é a distância vertical em metros adicionada à altitude do “alvo”,

iii) *AZIMUTH1* e *AZIMUTH2* – Estes são os limites dos ângulos horizontais. O varrimento é efectuado na direcção dos ponteiros do relógio, a partir do *AZIMUTH1* para o *AZIMUTH2*. Os valores são dados desde de  $0^\circ$  até  $360^\circ$ , onde  $0^\circ$  é orientado para Norte. No nosso caso, *AZIMUTH1*= $0^\circ$  e *AZIMUTH2*= $360^\circ$ ,

iv) *VERT1* e *VERT2* – Os ângulos de *VERT1* e *VERT2* são expressos em graus, entre  $90^\circ$  e  $-90^\circ$ . São os limites dos ângulos verticais, correspondendo ao limite superior e inferior do varrimento, respectivamente. Os ângulos positivos são acima do plano horizontal, enquanto que os ângulos negativos estão abaixo. O plano horizontal ( $0^\circ$ ) é definido pelo valor de  $z$  do ponto de observação acrescido do valor *OFFSETA*,

v) *RADIUS1* e *RADIUS2* – *RADIUS1* e *RADIUS2* são os limites da distância de procura quando identificamos as áreas visíveis a partir de cada observador. Os pontos além da distância de procura *RADIUS2* não são considerados como possíveis alvos e logo, são excluídos da análise,

vi) Observadores e Alvos – Estes são especificados por um *Point* ou por uma *Line Theme* mais a *Grid Theme*, respectivamente.

A área de estudo é a correspondente a cinco ortofotos com escala de 1:10000. Com base nas ortofotos foi realizada a digitalização das curvas de nível e pontos cotados que serviram de base à elaboração do modelo digital de terreno em formato TIN (*Triangulated Irregular Network*), Fig. 6, através do uso do software *ArcView 9.0*.

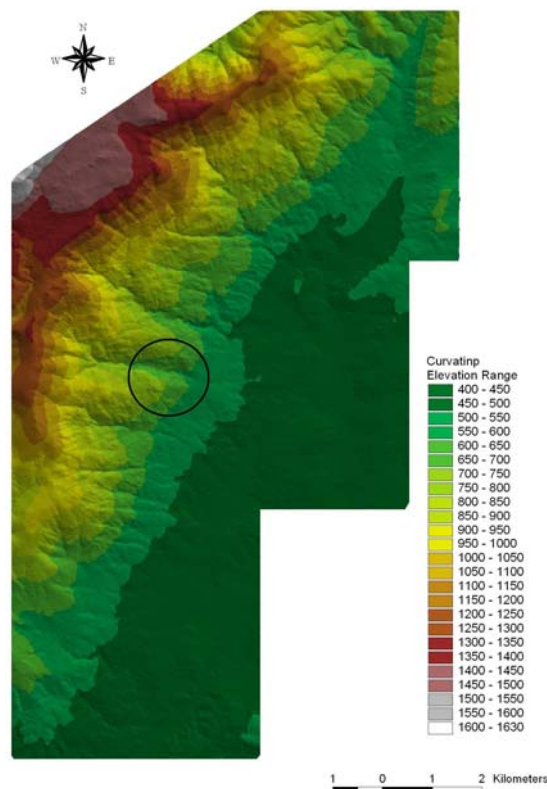


Fig. 6. Modelo digital de terreno (TIN) [1].

## B. Áreas Rurais e Urbanas

Utilizaram-se ferramentas GIS que possibilitam a análise de existência de linha de vista e a escolha da melhor localização para as estações de base, incluindo a sua altura e o ângulo vertical de orientação. Na Fig. 7 apresenta-se um exemplo de cobertura do concelho da Covilhã, uma zona com uma área aproximada de 550 km<sup>2</sup>.

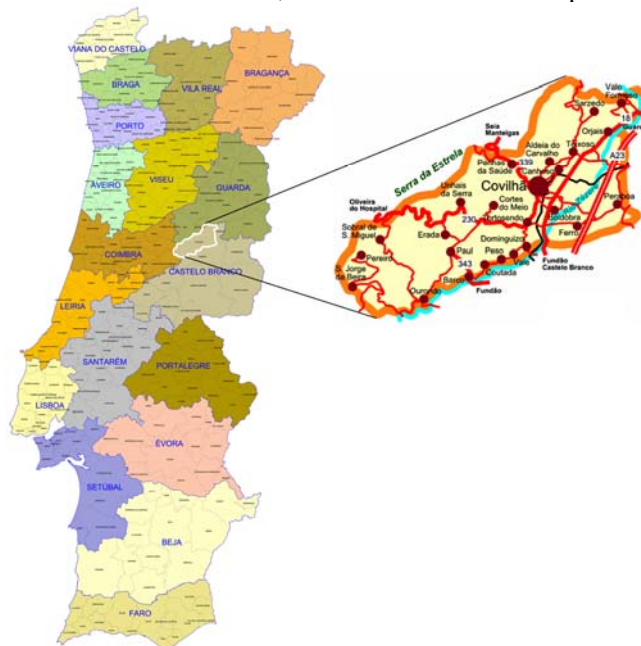


Fig. 7. Concelho da Covilhã.

Devido ao relevo irregular desta zona montanhosa, utilizam-se células com distâncias de cobertura de valor baixo, de aproximadamente 3 km, cerca de metade da proposta para a cobertura macro-celular de toda a região da Beira Interior. Considerando 18 estações de base (representadas com círculos), utilizando o modelo digital de terreno e o *ArcGIS 9.0* (extensão *3D Analyst*), obtém-se uma cobertura com LoS de, aproximadamente, 70% da área total, Fig. 8. Utilizam-se 15 antenas omnidireccionais (apesar de duas delas só cobrirem sectores de 180°), enquanto que as restantes três estações de base têm duas antenas sectoriais de 180° cada uma. Nas localidades existe 83% de cobertura com linha de vista o que garante um expoente de propagação  $\gamma=2$  em áreas rurais e  $\gamma=3$  em zonas urbanas. Para além disso, as principais estradas para a Serra da Estrela, um importante destino turístico de Portugal, também são cobertas em LoS com as BSs.

Na Fig. 9, apresenta-se o modelo de reutilização de frequências proposto, onde  $R$  é a distância de cobertura e  $D_1$  e  $D_2$  são as distâncias consideradas para o cálculo da interferência. Considerando o relevo do terreno na contabilização de eventuais obstruções à interferência, esta proposta garante que a relação portadora-interferência seja sempre inferior a 16-18 dB, o limiar considerado para modulações de ordem elevada; no entanto, existe uma situação pior para  $f_6$ , para a qual apenas podemos utilizar modulações de ordem baixa, pois  $C/I = 7.3$  dB.

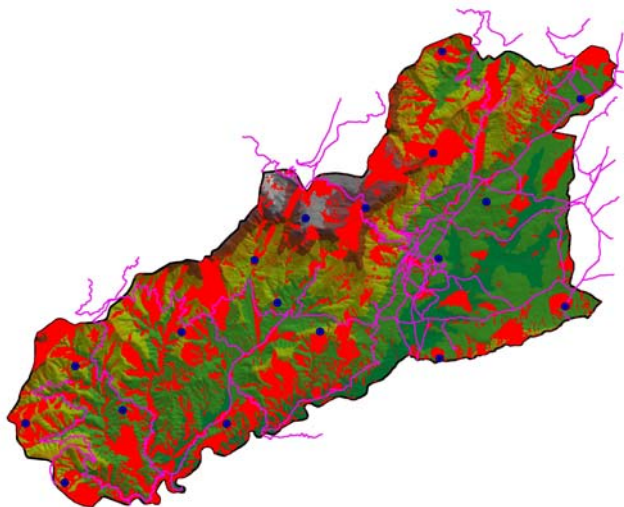


Fig. 8. Determinação de linha de vista no concelho da Covilhã.

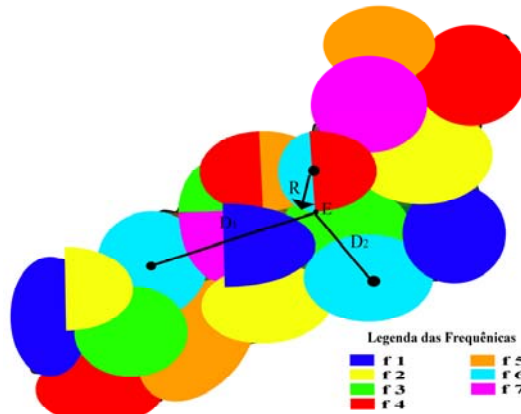


Fig. 9. Reutilização de frequências no concelho da Covilhã.

### C. Iluminação da Cidade da Covilhã

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 utilização de três estações de base com antenas sectoriais. A primeira antena foi colocada na Residência Universitária Mista da UBI, a segunda no Aeródromo da Covilhã e a terceira na rotunda do Covelo, Fig. 2. Embora a largura de feixe das antenas seja  $120^\circ$ , optou-se por escolher o ângulo definido entre o *AZIMUTH1* e o *AZIMUTH2* como  $360^\circ$  para sermos nós, posteriormente a escolher o melhor ângulo, isto é, podemos escolher qual a área que queremos cobrir ou posicionar o ângulo onde existem mais pontos com linha de vista. O ângulo definido entre o *VERT1* e o *VERT2* foi definido como  $15^\circ$  devido à restrição das antenas existentes no mercado.

Na Fig. 10 apresenta-se o resultado para as zonas onde existe linha de vista com as três estações de base consideradas, calculados utilizando o *ArcGIS 9.0* [1] (extensão *3D Analyst*).

A seta branca representa o aumento de altitude, desde 400 m até 850 m. No processo de optimização tivemos o cuidado de cobrir com linha de vista os locais e instituições mais importantes da cidade, tais como, os edifícios da Universidade da Beira Interior, a Câmara Municipal, o Hospital, Centro de Saúde e os Bombeiros, entre outros, Fig. 10.

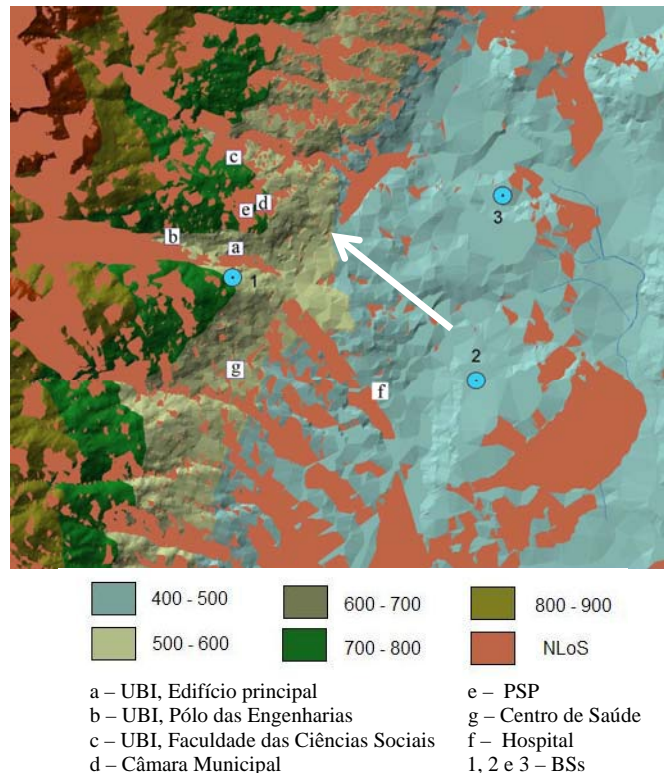


Fig. 10. Área de interesse, com linha de vista a partir das três estações de base, a partir do modelo digital de terreno.

Na área de estudo, com a solução das três estações de base (BSs 1, 2 e 3), e depois de algumas iterações, se não considerarmos as zonas sem acesso pedestre ou automóvel, atingimos uma percentagem de cobertura com linha de vista de aproximadamente 75% na zona da Covilhã. Nestas zonas, garante-se que o expoente de propagação é  $\gamma=3$ . Para além disso, teremos que utilizar três frequências diferentes de forma a evitar a interferência co-canal. Da nossa experiência local na zona da Covilhã, em alturas de grandes incêndios, existem grandes áreas de fumo denso, com dezenas de quilómetros de extensão. Embora a atenuação específica do fumo não seja considerada, é importante realçar que pode vir a ser um factor a ter em conta no dimensionamento dum sistema de comunicação de apoio à Protecção Civil, e é necessário mais investigação para determinar esses valores.

#### IV. LIGAÇÃO PONTO-A-PONTO COM REPETIDOR

Nesta fase do projecto MobileMAN, pretende-se dimensionar a ligação ponto-a-ponto com um repetidor, Covilhã-Gardunha-Castelo Branco, Fig. 11, tendo em conta que, para as localizações escolhidas para as estações de base, existe desobstrução total do elipsóide de Fresnel entre a Covilhã e a Gardunha e a Gardunha e Castelo Branco, Fig. 12, o projecto das ligações ponto-a-ponto assemelha-se ao dimensionamento de feixes Hertzianos digitais.



Fig. 11. Ligações ponto-a-ponto entre a Covilhã e Castelo Branco e a Covilhã e Guarda, com repetidor na Serra da Gardunha.

Nos feixes Hertzianos digitais, para além do desvanecimento uniforme (a simples redução da amplitude do sinal, uniforme ao longo da banda [8]), existe desvanecimento selectivo que, para além de reduzir a potência do sinal recebido e aumentar a taxa de erros binários, por diminuição da relação portadora-ruído, pode aumentar muito a taxa de erros binário por distorção inter-simbólica. Este fenómeno deve-se ao facto de o canal de transmissão deixar de ser linear. No entanto, na IEEE 802.16 a probabilidade de erro devido ao desvanecimento selectivo é nula quando existe linha de vista [2, p. 350].

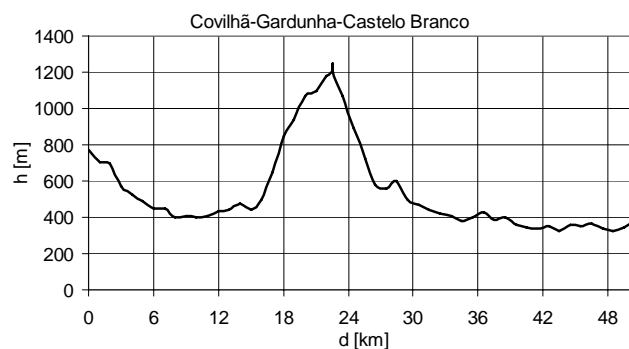


Fig. 12. Percurso obstruído com um repetidor (numa torre com 40 m).

Designa-se por margem de uma ligação de feixes Hertzianos a relação, habitualmente expressa em dB, entre a potência recebida em condições estáveis de propagação, isto é, sem desvanecimento, e a potência recebida que conduz a uma dada taxa de erros binários. Em geral toma-se para esta taxa de erros um valor elevado, tipicamente  $10^{-3}$ , a partir do qual as interrupções da ligação, por perda de sincronismo de trama, são frequentes. A margem da ligação corresponde, portanto, ao desvanecimento que é possível tolerar sem interrupções significativas. Na maior parte dos casos a margem para o desvanecimento uniforme, é superior a 30-35 dB.

Com desvanecimento, o  $C/N_{(min)}$  em dB é dado pela expressão seguinte [8],

$$\left(\frac{C}{N}\right)_{\min\_com\_desvanecimento} = \left(\frac{C}{N}\right)_{\min} + m_u, \quad (3)$$

onde  $m_u$  é a margem de desvanecimento uniforme, expressa em dB.

Sabe-se que no estudo do desvanecimento para percursos em linha de vista e sem reflexões apreciáveis, em clima temperado continental e terreno ondulado médio, condições usuais na Europa Ocidental, a probabilidade  $P$  de a potência recebida  $p$  ser igual ou inferior a  $p_0$ , no mês mais desfavorável, pode ser estimada por uma expressão do tipo

$$P(p \leq p_0) = k_t \frac{p_0}{p_n}, \quad (4)$$

onde  $p_n$  é a potencia recebida sem desvanecimento.

Introduzindo a noção de margem da ligação  $m = p_n/p_0$ , a expressão anterior virá

$$P(p \leq p_0) = \frac{F}{m} \Leftrightarrow m = \frac{F}{P}, \quad (5)$$

onde  $F$  é o factor de ocorrência do desvanecimento profundo, uma constante que engloba a dependência dos factores: geoclimático, tipo de terreno, inclinação do raio directo, comprimento da ligação e frequência de trabalho, e que está de acordo com o modelo de Morita [8],

$$F = 1.4 \times 10^{-8} \times f_{[GHz]} \times [d_{[km]}]^{3.5}. \quad (6)$$

Numa abordagem simples, a probabilidade de ocorrência de erros,  $P$ , não pode exceder

$$\text{Cláusula 1 (ber}=10^{-6}) \quad P_1 = \frac{0.004 \times d}{2500}, \text{ com } d \geq 280, \quad (7)$$

$$\text{Cláusula 2 (ber}=10^{-3}) \quad P_2 = \frac{0.00054 \times d}{2500}, \text{ com } d \geq 280, \quad (8)$$

de acordo com as recomendações da ITU-R anteriores a 1997 e que se adaptaram para WiMax. Identifica-se a potência  $p_0$  como a potência na recepção correspondente a uma dada taxa de erros binários máxima admissível; a probabilidade de a potência recebida ser inferior a  $p_0$  é equivalente à probabilidade daquela taxa ser excedida,  $P_c$ . Considere-se agora, que a probabilidade da taxa de erros ser excedida pode ser decomposta em duas parcelas, uma  $P_u$ , causada pelo desvanecimento uniforme, e outra  $P_s$  devida à distorção do sinal provocada pelo desvanecimento selectivo. A recomendação F.1093-1 da ITU-R sugere que, com  $\alpha=2$  [8]

$$P_c = P_u + P_s, \quad (9)$$

onde  $\alpha$  é um dos parâmetros definidos na recomendação.

À decomposição da probabilidade de erros ser excedida corresponde uma decomposição equivalente da margem

$$\frac{1}{m} = \frac{1}{m_u} + \frac{1}{m_s}, \quad (10)$$

onde  $m_u$  é a margem da ligação (se só existisse desvanecimento uniforme), ou margem uniforme,  $m_s$  é a margem relativa ao desvanecimento selectivo e  $m$  a margem da ligação.

Como referido anteriormente, na IEEE 802.16, quando existe  $LoS$ ,  $P_s = 0$ , logo,  $P_c = P_u$  e  $m = m_u$ . Então podemos afirmar que  $C/N_{(min)}$  com desvanecimento, em dB, é dado por

$$\left(\frac{C}{N}\right)_{\min\_com\_desvanecimento} = \left(\frac{C}{N}\right)_{\min} + m + m_{extra}, \quad (11)$$

onde  $m$  é a margem de desvanecimento expressa em dB e  $m_{extra}$  é uma margem adicional de 3 dB, que se considera. Considera-se  $(C/N)_{\min} = 16$  dB.

Utilizando a fórmula de Friis com expoente de propagação igual a 2 e considerando uma largura de banda de 20 MHz (para a ligação ponto-a-ponto),  $P_e=0$  dBW,  $G_e+G_r=2 \times 23.8=47.6$  dBi e um factor de ruído de 3 dB, guias de onda de 10m a alimentar as antenas (com atenuação específica  $A_e=A_r=0.051$  dBm) obtiveram-se os resultados para a relação portadora-ruído,  $C/N$ , Figs. 13 e 14. Considera-se também a atenuação da chuva,  $\gamma_{chuva}=0.015$  dB/km.

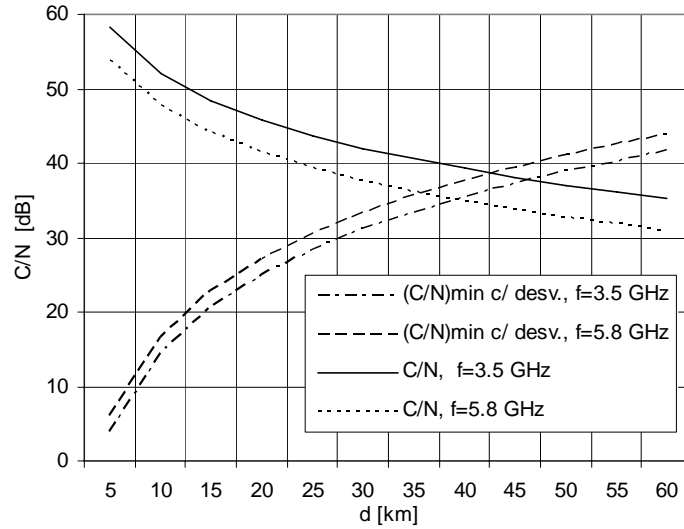


Fig. 13. Comparação da relação portadora-ruído com o limiar de qualidade,  $(C/N)_{\min\_com\_desvanecimento}$ , tendo em conta a margem da ligação relativo à cláusula 1.

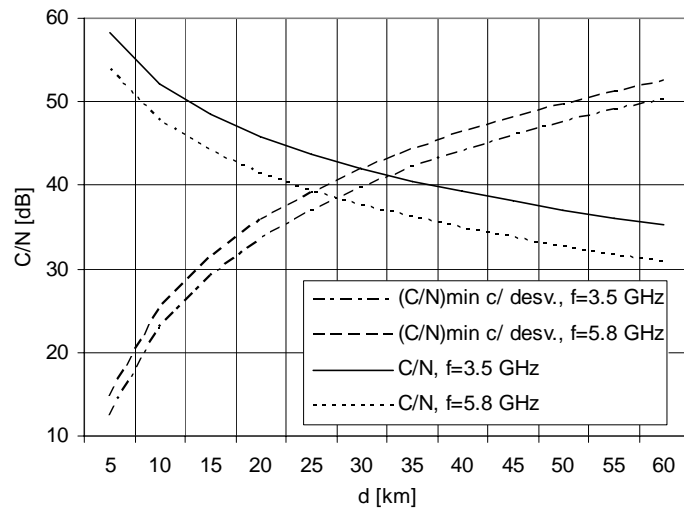


Fig. 14. Comparação da relação portadora-ruído com o limiar de qualidade,  $(C/N)_{\min\_com\_desvanecimento}$ , tendo em conta a margem da ligação relativo à cláusula 2.

Nessas Figuras, compara-se a curva de  $C/N$  com as curvas de  $(C/N)_{\min\_com\_desvanecimento}$ , obtidas a partir de (5) e de (11), para as 1ª e 2ª cláusula, respectivamente. Conclui-se que a ligação com repetidores Covilhã-Gardunha-Castelo Branco, onde a distância do primeiro salto é 22.5 km e a do segundo é de 28.5 km, é possível de assegurar a 3.5 GHz, mas a 5.8 GHz, como a distância máxima para a qual  $C/N < (C/N)_{\min}$  é 25 km, é necessário aumentar o ganho de pelo menos uma das antenas em cerca de 4 dB para assegurar a qualidade da ligação. Algum cuidado terá de ser posto na análise da soma da probabilidade de erro de bit nas duas ligações consecutivas.

## V. CONCLUSÕES

Conclui-se que o número de células para cobrir a região da Beira Interior é de 62 e 35 células para distâncias de cobertura de 6 km e 8 km, respectivamente. Em espaço livre (áreas rurais) a cobertura não é uma limitação. Em zonas urbanas, para grandes distâncias, é impossível a cobertura, logo é necessário usar células com distâncias de cobertura 3-4 km. Os valores de  $(C/N)_{\min}$  situam-se na ordem dos 6-8 dB para uma modulação de ordem baixa (QPSK) e só são possíveis de alcançar para  $\gamma=2$  e  $\gamma=3$ , contudo, para  $\gamma=3$  só é válido para distâncias até 4 km. Para modulações de ordem superior (por exemplo, 16-QAM) os valores de  $(C/N)_{\min}$  situam-se na ordem dos 16-18 dB e só será possível ultrapassar  $(C/N)_{\min}$  para  $\gamma=2$ .

Da análise da relação portadora-interferência chegou-se à conclusão que, com antenas omnidirecionais, para se obterem expoentes de propagação  $\gamma=2$  e  $\gamma=3$ , são necessários padrões de reutilização mínimos,  $k$ , de 12 e 4-7,

respectivamente, enquanto que, com antenas sectoriais, os valores respectivos são 3-4 e 3. Também se conclui que se terá que utilizar sectorização para reduzir o padrão de reutilização para valores aceitáveis.

Sugere-se a sobreposição para superar problemas de coberturas em grandes áreas de densidade populacional. Para além disso, nestes locais, a sectorização aumentará a capacidade de sistema.

Em zonas urbanas com sombras, derivadas dos obstáculos urbanos e do relevo do terreno, o expoente de propagação é alto. À medida que as condições de propagação pioram, é necessário utilizar ferramentas GIS para descobrir os locais a partir de onde existe maior percentagem de área coberta com linha de vista. Com base no *ArcView*, utilizando 18 estações de base, garante-se 70 % de cobertura em toda a área do concelho da Covilhã. Para além disso, na zona das localidades, garante-se 83 % de cobertura em linha de vista. Em termos de reutilização, propôs-se um esquema com sete frequências diferentes que garante os critérios de qualidade.

De forma a aumentar a capacidade, a solução mais apropriada para resolver o problema da iluminação da cidade da Covilhã é a colocação de três estações de base com antenas sectoriais, estando a primeira antena colocada na Residência Universitária Mista, a segunda no Aeródromo da Covilhã e a terceira na rotunda do Covelo. No processo de optimização teve-se o cuidado de cobrir com linha de vista os locais e instituições mais importantes da cidade. Após algumas iterações, atingimos aproximadamente 75% da área coberta com linha de vista, sem se considerar algumas zonas sem acesso quer pedonal, quer automóvel. Nas zonas com linha de vista, o expoente de propagação considerado é  $\gamma=3$ , enquanto que em zonas rurais se garante  $\gamma=2$ . Para além disso, na Covilhã têm que se utilizar três frequências diferentes, de forma a evitar a interferência co-canal.

Dos resultados para a ligação ponto-a-ponto Covilhã-Gardunha-Castelo Branco, onde a distância do primeiro salto é 22.5 km e a do segundo é de 28.5 km, com as hipóteses consideradas conclui-se que é possível de assegurar a 3,5 GHz, mas a 5.8 GHz, como a distância máxima para a qual  $C/N < (C/N)_{min}$  é 25 km, é necessário aumentar o ganho de pelo menos uma das antenas em cerca de 4 dB para assegurar a qualidade da ligação.

No projecto MobileMAN as arquitecturas de rede para interoperabilidade e IP móvel entre redes Wi-Fi e WiMax (por exemplo, considerando IPv6), aspectos de segurança em IEEE 802.16 e a consideração de serviços multimédia e aplicações para plataformas móveis também serão considerados. Em termos de demonstração, o MobileMAN vai-se concentrar essencialmente na versão fixa/portátil da norma, mas existem contactos exploratórios com representantes da protecção civil, forças de segurança e emergência médica, com o objectivo de se poderem concretizar projectos de demonstração mais abrangentes.

#### REFERÊNCIAS

- [1] Vitor Cavaleiro, *Condicionamento Geotécnico à Expansão do Núcleo Urbano da Covilhã*, Vol. 1, Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2001.
- [2] IEEE, *Draft IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks – Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems*, IEEE 802.16-REVd/D5, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, New York, USA, May 2004.
- [3] IEEE, *Draft IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks – Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems - Amendment for Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands*, IEEE 802.16e/D9, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, New York, USA, June 2005.
- [4] W. C. Y. Lee, *Mobile Cellular Telecommunications systems*, McGraw-Hill, New York, New York, USA, 1989.
- [5] MobileMAN, [http://www.it.pt/project\\_detail\\_p.asp?ID=501](http://www.it.pt/project_detail_p.asp?ID=501)
- [6] Sanjay Rana, Jeremy Morley, *Optimising Visibility Analyses Using Topographic Features on the Terrain*, Centre for Advanced Spatial Analysis, University College London, London, UK, 2002.
- [7] Theodore S. Rappaport, *Wireless Communications – Principles and Practice*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA, 2002.
- [8] Carlos Salema, *Feixes Hertzianos*, IST Press, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2002.