

Análise de Cobertura e Capacidade em Redes Móveis *LTE* de Quarta Geração (4G)

David Pernes¹, David Neves¹

¹Área Departamental de Engenharia de Eletrónica
Telecomunicações e de Computadores (ADEETC), ISEL
Lisboa, Portugal
e-mail: [35173; 32422]@alunos.isel.pt

Pedro Vieira^{1,2}, Nuno Cota^{1,2}

²Instituto de Telecomunicações (IT),
Lisboa, Portugal
e-mail: [ncota; pvieira]@deetc.isel.pt

Resumo — Neste projeto tenciona-se realizar um estudo que incida sobre a análise de capacidade e cobertura numa rede *Long Term Evolution (LTE)* de 4ª Geração.

Tendo em conta a complexidade desta tecnologia é necessário o estudo das principais características desta tecnologia tais como o modo de acesso rádio, a sua arquitetura e o seu dimensionamento.

Após o domínio das principais componentes teóricas foram desenvolvidas funções e métodos que suportaram a ferramenta de simulação com componente gráfica em ambiente *MatLab®*. Nesta ferramenta pretendeu-se realizar diversos cenários que incidiram particularmente sobre a influência do *tilt* mecânico/elétrico e influência da altura da antena numa rede *LTE* em termos de cobertura e capacidade.

Numa fase final os resultados serão exportados para a plataforma *Google™ Earth (GE)* por intermédio da ferramenta desenvolvida onde se poderá verificar o comportamento de uma rede *LTE* em ambiente urbano denso irregular.

Palavras – Chave — *Long Term Evolution, Dimensionamento, Cobertura, Capacidade, MatLab®, Google™ Earth*

I. INTRODUÇÃO

O 3GPP *Long Term Evolution (LTE)* corresponde à geração mais recente (4ª geração, 4G) de comunicações móveis, surgindo no âmbito de um processo que produziu no passado as tecnologias GSM/EDGE e UMTS/HSPA. A actual geração de comunicações móveis (UMTS/HSPA) é conhecida globalmente como 3G (de "terceira geração").

O *LTE* foi introduzido na *Release 8* do 3rd Generation Partnership Project (3GPP), sendo baseado numa arquitetura de rede plana "*all IP*". O *LTE* é já uma realidade. As primeiras redes vão sendo testadas um pouco por todo o mundo, e Portugal não é excepção.

O presente artigo pretende estudar o impacto das variações de ângulos de *tilt* e altura de antenas numa rede *LTE*, extraíndo conclusões ao nível da capacidade e cobertura obtida. Para o efeito é necessário entender os principais conceitos por detrás do acesso rádio da tecnologia em causa bem como as principais variáveis presentes no dimensionamento de uma rede *LTE*.

Este artigo encontra-se organizado em 8 secções.

Na secção II pretende-se mostrar ao leitor alguns conceitos relativamente à tecnologia abordada, bem como o seu modo de acesso rádio. Com a secção III expõe-se o algoritmo aplicado para calculo do *link budget* para a tecnologia *LTE*. Através da secção IV é realizada uma apresentação à ferramenta de simulação criada para extração de dados. A secção V trata de apresentar os principais cenários estudados, visando cumprir os objetivos propostos para estudo. Na secção VI apresenta-se uma aplicação dos conteúdos apresentados numa simulação mais realista onde se analisa a capacidade e cobertura de uma rede *LTE* em pleno Bairro Alto. Com a secção VII apresentam-se as principais conclusões do estudo desenvolvido.

II. VISÃO GERAL DA TECNOLOGIA *LTE*

A tecnologia *LTE* representa o mais recente avanço tecnológico na área das telecomunicações. É possível caracterizar a tecnologia *LTE* pela grande variedade de vantagens que esta oferece relativamente às tecnologias precedentes.

Segundo [1], a tecnologia *LTE* foi desenvolvida de modo a cumprir determinados requisitos:

- Suporte a várias larguras de banda 1.4, 3, 5, 10, 15, 20 MHz;
- Utilização de modulação adaptativa (QPSK, 16 QAM e 64 QAM);
- *Downlink*: 100 Mbps;
- *Uplink*: 50 Mbps;
- Suporte a SIMO e MIMO 2x2 e 4x4.;
- Aumento da eficiência Espectral (cerca de 2-4 vezes superior à tecnologia precedente);
- Baixa Latência (< 10 ms);
- Suporte para utilizadores com alta mobilidade (até 350 km/h);

Ao nível do acesso rádio em *LTE* são utilizadas as modulações *Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA)*, para *downlink* e *Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA)*, para *uplink*. Ambas baseiam-se nos mesmos princípios, mas apresentando algumas ligeiras diferenças.

A. LTE Downlink com OFDMA

O conceito em torno da tecnologia *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) procura dividir uma banda larga em múltiplas sub-portadoras com larguras de banda mais reduzidas, onde cada uma terá um débito reduzido a troco de uma maior robustez face à interferência inter-simbólica.

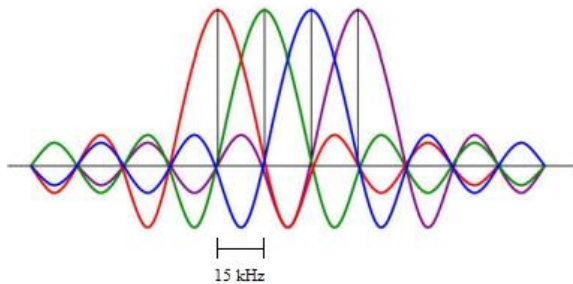


Figura 1 - Espectro das Sub-portadoras.

Cada sub-portadora ocupa uma pequena banda de 15 kHz modulada de forma que as sub-portadoras contíguas possuam o mínimo de interferência. Tal permite um melhor uso do espectro devido à sobreposição espectral das sub-portadoras, aumentando em 50% o uso da banda que lhe é dedicada, ver figura 1.

A tecnologia de acesso LTE considera diferentes níveis de modulação *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM) que podem ser *Quadrature Phase Shift Key* (QPSK), 16-QAM ou 64-QAM, em função das condições do canal e ritmo de transmissão necessário.

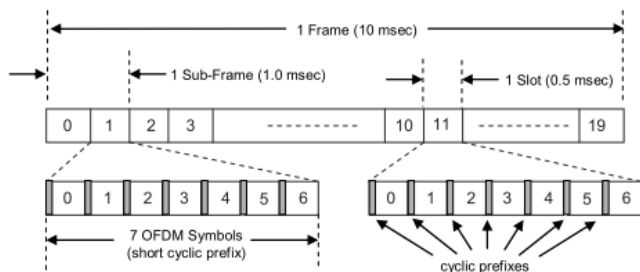


Figura 2 - Trama OFDM [1].

Na figura 2, apresenta-se a estrutura de uma trama OFDM que possui a duração de 10 ms dividida em 20 *slot*'s temporais de 0.5 ms. Cada *slot* temporal permite o envio de 7 símbolos OFDM separados por *Cyclic Prefix*'s (CP). A separação dos símbolos de OFDM com CP permite um melhor sincronismo de bit e uma interferência inter-simbólica reduzida o que facilita a receção da informação.

As principais desvantagens da utilização desta tecnologia baseiam-se na elevada relação entre potência de pico e potência média do sinal (PAPR – *Peak to Average Power Ratio*), e a grande sensibilidade a erros de sincronismo a nível da decodificação do sinal [2].

B. LTE Uplink com SC-FDMA

Relativamente à multiplexagem no *uplink*, esta é tratada recorrendo ao SC-FDMA, como método de acesso múltiplo. A motivação pela qual é utilizada uma técnica de

acesso múltiplo diferente tem que ver com o facto de o OFDMA possuir grandes variações de potência, o que contribui para um aumento significativo do seu PAPR, pelo que se utiliza SC-FDMA para transmitir símbolos binários com uma relação PAPR que pode chegar a ser 3 dB inferior quando comparando ao OFDMA [3]. Tal facto contribui para um melhor aproveitamento de potência dos equipamentos móveis, pois uma vez que estes são alimentados a bateria é essencial que os seus consumos de potência sejam minimizados.

Apesar desta multiplexagem se chamar *single carrier* o SC-FDMA baseia-se também na tecnologia OFDM, utilizando também múltiplas portadoras espaçadas de 15 kHz de modo a manter a robustez do sinal face interferência inter-simbólica.

C. Recursos Rádio

Ao nível da atribuição de recursos rádio, com base na figura 3 é possível verificar uma distribuição de *Resource Blocks*'s (RB) a diferentes *User Equipments* (UE) bastante flexível, tanto no domínio do tempo como no domínio da frequência, o que proporciona uma grande vantagem face às tecnologias precedentes, no sentido em que é possível realizar ajustes ao nível da frequência e do tempo para utilizar de uma forma mais eficaz os recursos rádio disponíveis.

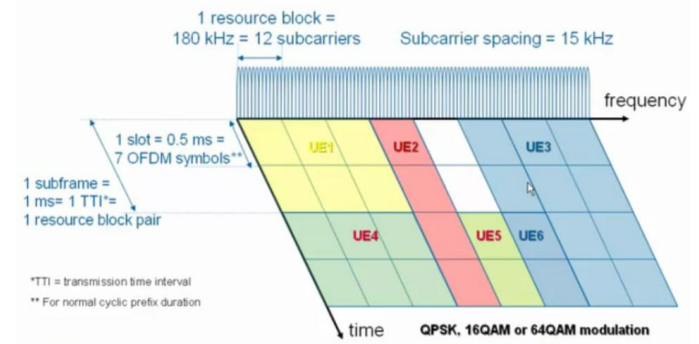


Figura 3 – Organização espectral e temporal de RB's [3].

Cada RB ocupa uma largura de banda de 180 kHz, o que corresponde a 12 sub-portadoras por bloco, com um espaçamento de 15 kHz na frequência e 0.5 ms no tempo, entre portadoras, o que corresponde a 7 símbolos OFDM a cada *time-slot*.

As atuais especificações do LTE, para o modo FDD, suportam canais de diferentes larguras de banda, como se apresenta na tabela 1.

Tabela 1 – Largura de Banda vs RB's [4]

Largura de Banda [MHz]	1.4	3	5	10	15	20
Nº RB's	6	15	25	50	75	100

III. DIMENSIONAMENTO DE POTÊNCIA (LINKBUDGET)

Em comunicações móveis, a cobertura de uma estação rádio é a área geográfica onde uma estação base e uma estação móvel (ou múltiplas) podem estabelecer transmissões nos dois sentidos. A qualidade da comunicação entre a estação-base e a estação móvel depende da potência do sinal no local

geográfico onde se encontra a estação móvel. A atenuação de propagação máxima em LTE, em *uplink*, é dada por,

$$L_{pmax} = P_{UE, RB} - S_{eNodeB} - B_{IUL} - B_{LNF} - L_{BL} - L_{CPL} - L_{BPL} + G_a - L_j \quad (1)$$

onde,

- L_{pmax} , é a atenuação de propagação máxima [dB];
- S_{eNodeB} , é a sensibilidade do *eNodeB* [dBm];
- B_{IUL} , é a margem de interferência de *uplink* expressa logaritmicamente [dB];
- B_{LNF} , é a margem de desvanecimento *log-normal* [dB];
- L_{BL} , perdas de corpo (*body loss*) dos utilizadores [dB];
- L_{CPL} , perdas por penetração em automóveis [dB];
- L_{BPL} , perdas por penetração em edifícios [dB];
- G_a , é a soma dos ganhos máximos na direcção de propagação do *eNodeB* e da antena da estação móvel [dBi];
- L_j , é a perda por inserção do TMA [dB].

Em *downlink*, a atenuação de propagação máxima é,

$$L_{pmax} = P_{Tx, RB} - S_{UE} - B_{IDL} - B_{LNF} - L_{BL} - L_{CPL} - L_{BPL} + G_a - L_j \quad (2)$$

onde,

- $P_{Tx, RB}$, é a potência de emissão por *RB* no ponto de referência do sistema [dBm];
- S_{UE} , é a sensibilidade da estação móvel [dBm];
- B_{IDL} , é a margem de interferência de *downlink* expressa logaritmicamente [dB];
- B_{LNF} , é a margem de desvanecimento *log-normal* [dB];
- L_{BL} , perdas de penetração no corpo dos utilizadores [dB];
- L_{CPL} , perdas por penetração em automóveis [dB];
- L_{BPL} , perdas por penetração em edifícios [dB];
- G_a , é a soma dos ganhos máximos na direcção de propagação do *eNodeB* e da antena da estação móvel [dBi];
- L_j , é a perda por inserção do TMA [dB].

Após o cálculo das perdas totais, é possível chegar ao valor dos raios de célula através do modelo de propagação *Okumura-Hata* [5]:

$$R = 10^\delta \text{ [km]} \quad (3)$$

$$\delta = \frac{L_p - A + 13.82 \log_{10}(h_b) + a(h_m)}{44.9 - 6.55 \log_{10}(h_b)} \quad (4)$$

Onde,

- L_p , é a mediana da atenuação de propagação [dB];
- A , é um valor fixo de atenuação dependente da frequência, que num ambiente urbano e para um valor de frequência de 2600 MHz tem o valor de 157,5 dB;
- h_b , é a altura da antena em *m*;
- h_m , é a altura da estação móvel em *m*;

• $a(h_m)$ [dB] é um factor de correcção para altura da estação móvel (a é igual a 0 para $h_m = 1.5 \text{ m}$). É calculado da seguinte forma:

$$a(h_m) = 3.2(\log_{10}(11.75h_m))^2 - 4.97 \quad (5)$$

A relação inversa é a seguinte:

$$L_p = A - 13.82 \log_{10}(h_b) - a(h_m) + (44.9 - 6.55 \log_{10}(h_b)) \log_{10}(R) \text{ [dB]} \quad (6)$$

O método de dimensionamento por capacidade permite obter a capacidade máxima que pode ser suportada momentaneamente por uma célula, dado a carga do sistema das células adjacentes. Em *uplink* a capacidade é calculada da seguinte forma:

$$R_{avg, UL} = R_{RB, UL}(n_{RB} - n_{PUCCH} - n_{PRACH}) \quad (7)$$

onde,

- $R_{RB, UL}$, é o *bit rate* por *RB* em *uplink* [kbps];
- n_{RB} , é o número de *RB*'s utilizados;
- n_{PUCCH} , é o número de *RB*'s reservados para o *Physical Uplink Control Channel*;
- n_{PRACH} , é o número de *RB*'s reservados para o *Physical Random Access Channel*.

Adicionalmente,

$$T_{cell, UL} = Q_{UL} R_{avg, UL} \quad (8)$$

sendo $T_{cell, UL}$ a capacidade de uma célula em *uplink*, Q_{UL} a carga do sistema em *uplink* e $R_{avg, UL}$ o *bit rate* disponível para um utilizador em *uplink*.

Em *downlink*, é utilizado o método dos anéis [5] para calcular a capacidade de uma célula. Este método cria curvas de *Throughput versus path loss*, e fornece um método alternativo para o cálculo da capacidade de uma célula em *downlink*. Este método envolve o cálculo, em média, da capacidade de cada anel e soma-lo de forma a obter uma estimativa da capacidade total da célula. [5]

Os *inputs* necessários são as perdas por propagação L_{pmax} de *uplink* ou *downlink*. O ângulo de *tilt* da antena e a carga do sistema Q_{DL} também são *inputs* necessários para os cálculos. Os cálculos seguem os seguintes passos:

- Atenuação do sinal em cada anel, $L_{sa, i}$;
- Cálculo do ângulo equivalente de *tilt*;
- SINR de cada anel;
- *Throughput* da célula.

A área da célula é modelada por um hexágono. Esta área é dividida em N anéis, cada um com uma área proporcional a $(d_i^2 - d_{i-1}^2)$, onde d_i é o raio exterior do anel i . A diferença das perdas do percurso L_{pi} estão modeladas para serem sempre iguais em todos os anéis da célula.

A atenuação do sinal no limite da célula (último anel) $L_{sa, cellrange}$ é calculado a partir do valor de L_{pmax} de acordo com (2). O valor máximo de perdas de propagação no ar L_{pmax} é extraído do *Link Budget* de *uplink* ou *downlink*.

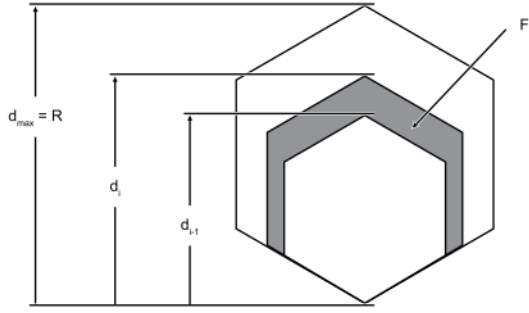


Figura 4 – Regiões das diferentes modulações [5].

A atenuação do sinal num anel i , $L_{sa,i}$ pode ser calculada a partir de uma relação de distância utilizando a seguinte equação,

$$L_{sa,i} = L_{sa,cellrange} + 10m \log_{10} \left(\frac{d_i}{d_{max}} \right) [dB] \quad (9)$$

onde, m é um expoente de perdas por propagação do percurso (tipicamente 3.5), $L_{sa,cellrange}$ e $L_{sa,i}$ são expressos em dB .

O $tilt$ β é utilizado como *input* para seleccionar o valor F utilizado na equação (10). Os valores de F foram obtidos a partir de simulações com um raio de célula fixo de 1000 m e para uma altura das antenas de 30 m para vários ângulos de $tilt$. Os resultados das simulações foram agregados em valores médios de F para cada anel, com representado na figura 4.

Para combinar o alcance e altura da antena para efeitos de dimensionamento, o ângulo de $tilt$ β tem de ser transformado num ângulo de $tilt$ equivalente β_{eq} . O ângulo equivalente de $tilt$ β_{eq} é utilizado para escolher o correto valor de F tabelado, com base em dados empíricos [5]. Este ângulo é calculado da seguinte forma:

$$\beta_{eq} = \beta \frac{d_{max} 30}{1000 h_b} \quad (10)$$

O valor d_{max} é obtido a partir de um modelo de propagação escolhido através de L_{pmax} .

Como os valores de $L_{sa,i}$ e F_i estão modelados para serem constantes dentro de um anel, o SINR γ também irá ser constante. O valor de γ num anel é dado pela seguinte equação (todas as quantidades são lineares):

$$\gamma_i = \frac{1}{Q_{DL} F_i + (N_{RB,DL} L_{sa,i}) / P_{tx, RB}} \quad (11)$$

onde,

- $P_{tx, RB}$, é a potência de transmissão no ponto de referência do sistema por RB ;
- Q_{DL} , é a carga do sistema em *downlink*;
- F_i , é o valor de F no anel i ;
- $N_{RB,DL}$, é o ruído térmico por RB em *downlink*.

Com a SINR γ_i como *input*, o valor do *bit rate* no anel i , $R_{i, RB, DL}$, pode ser calculado a partir de relações semi-empíricas.

Se os utilizadores estão modelados para serem uniformemente distribuídos na área de uma célula, o número de utilizadores no anel i é diretamente proporcional à área do

anel i . A proporção de utilizadores no anel i , $p_{users,i}$ é calculada com,

$$p_{users,i} = \frac{(d_i^2 - d_{i-1}^2)}{d_{max}^2} \quad (12)$$

O *bit rate* por RB é igual a:

$$R_{RB, DL} = \sum_i p_{users,i} R_{i, RB, DL} \quad (13)$$

O *bit rate* médio de um utilizador por célula é calculado da seguinte forma,

$$R_{avg, DL} = n_{RB} R_{RB, DL} \quad (14)$$

e finalmente, a capacidade da célula em *downlink* pode ser calculada através de,

$$T_{cell, DL} = n_{RB} R_{avg, DL} \quad (15)$$

IV. FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO

A. Principais Características

Após a correta compreensão do algoritmo de planeamento e dos seus parâmetros, optou-se por desenvolver uma ferramenta que possibilita o estudo que vá para além da variação do $tilt$ mecânico/elétrico e altura da antena sobre ambiente urbano irregular. Esta ferramenta de simulação foi desenvolvida através do ambiente MatLab® 7.12 (R2011a) e permite implementar uma rede *LTE* de 4G realizando os diversos cálculos de *Link Budget* de forma mais realista. Procurou-se manter o modo de funcionamento da aplicação tão simples quanto possível, de modo a torná-la fácil de manusear e rápida a responder aos diversos pedidos do utilizador.

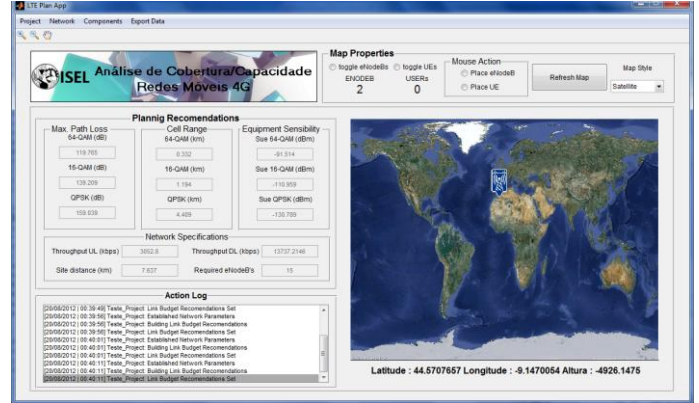


Figura 5– Aplicação LTE Plan App

Na figura 5 apresenta-se o *layout* da aplicação *LTE Plan App*. A janela principal da aplicação encontra-se dividida em 4 painéis de forma a facultar uma boa organização à disposição dos dados e ferramentas disponibilizadas, sejam eles os painéis, *Map Properties*, *Planning Recommendations*, *Action Log* e o Mapa.

Map Properties – Neste painel disponibilizam-se as ferramentas para manipulação do mapa e introdução de componentes na rede. Encontram-se 2 contadores com o número de *eNodeB*'s e *UE*'s dispostos pela rede, 2 botões para omitir a visibilidade dos componentes no mapa, 2 botões que alteram a acção por clique do rato sobre o mapa e ainda uma *popup box* para seleccionar o estilo de mapa seja ele baseado

em imagens de satélite, altura do terreno, estradas ou um misto de estradas e imagens de satélite.

Planning Recommendations – As recomendações de planeamento são disponibilizadas assim que o utilizador define a rede. São disponibilizadas informações relativamente à sensibilidade dos equipamentos, raios de célula, *path loss* máximos para os diferentes tipos de modelação, *throughput* de *downlink/uplink*, distância inter-celular e ainda o número de *eNodeB*'s necessários. Nota: O *throughput* apresentado é o *throughput* por célula e campo *Required eNodeB*'s reflete o número de *eNodeB*'s que cobrem uma área hexagonal com raio máximo igual ao raio de célula para a modulação QPSK.

Action Log – Painel que realiza o registo de todas as ações do utilizador. Em adição, também são incluídos registos de erros e informações adicionais ao estado da aplicação.

Mapa – O mapa funciona com importações de imagens estáticas fornecidas pelo serviço da *Google*TM e obtidas através da *Google*TM *Static Maps API v2* [6]. Sobre o mapa encontra-se implementada uma função que determina a posição atual do ponteiro do rato, realizando automaticamente o cálculo do ponto geográfico e o levantamento da cota de terreno expressando o resultado na zona abaixo do mapa. São também disponibilizadas funcionalidades de *zoom in/out* e arrastamento através dos 3 botões presentes no canto superior esquerdo da janela.

Destacam-se as seguintes funcionalidades:

- Criação/importação de Projetos em ficheiros *.mat com estrutura bem definida;
- Definição dos diversos parâmetros de uma rede *LTE* e construção de recomendações para a criação da rede;
- Importação de mapas através do serviço *Google*TM *Static Maps*;
- Importação de cotas de terreno reais através do *Google*TM *Elevation Service* [7];
- Geoposicionamento de elevada precisão de estações *eNodeB* e UE.
- Registo de ações realizadas por cada sessão.
- Exportação de dados para a plataforma *Google*TM *Earth* (*GE*).

Encontram-se implementados 4 separadores que vão de encontro a algumas das funcionalidades acima referidas sendo eles: *Project*, *Network*, *Components* e *Export Data*.

Project – Serve de *popup* para mais 3 opções distintas, permitindo a criação de novos projetos, abertura de projetos já gravados ou salvar o atual projeto.

Network – Após clique, abre-se uma nova janela que permite a parametrização da rede.

Components – Permite a criação ou edição de *eNodeB*'s ou *UE*'s.

Export Data – Implementa a funcionalidade de exportação de dados para o *GE*.

B. Exportação para o *Google*TM *Earth*

A exportação de dados para a plataforma *Google Earth* (*GE*) vem possibilitar ao utilizador uma melhor visão da

cobertura e da capacidade de uma rede dimensionada com uma correta disposição de *eNodeB*'s e *UE*'s. Esta funcionalidade é implementada com recurso à *GE MatLab*[®] *toolbox* que permite a criação de ficheiros .kml (*Keyhole Markup Language*) a serem posteriormente lidos e interpretados pelo *GE*, ver figura 6.

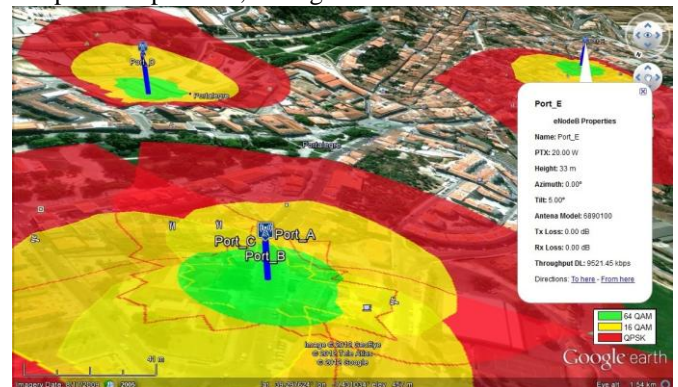


Figura 6 – Exemplo de dados exportados para o *GE*

O processo que envolve a exportação do cálculo das áreas de cobertura para o *GE* revela ser um algoritmo bastante pesado do ponto de vista computacional, devido ao elevado número de operações matriciais e importações de cotas de terrenos necessárias para uma correta aproximação da cobertura. Uma vez que o ganho de uma antena de um *eNodeB* pode variar em função do seu azimute optou-se por criar zonas de cobertura com uma resolução 1°, ou seja, são calculados 360 pontos geográficos distantes do raio de célula QPSK, maior raio possível para se estabelecer comunicações.

Tendo estes 360 pontos sido calculados procede-se ao levantamento dos perfis de terreno desde a localização do *eNodeB* para estes 360 pontos. Os perfis de terreno possuem uma amostragem de 30 pontos por cada perfil de terreno solicitado, de modo a tornar o processo simples, mas realista.

Procede-se então ao cálculo do *link budget* para cada um desses perfis de terreno pois a cada direção existem diferentes condições de ganho, devido ao padrão de radiação, ângulo de *tilt* e posição relativa ao *eNodeB*, e de atenuação, devido à difração da onda eletromagnética sobre possíveis obstáculos encontrados. Com base nas sensibilidades determinadas como mínimas para se estabelecerem comunicações para os diversos tipos de modulações, é possível definir fronteiras que delimitam o uso de determinada modulação.

As diferentes cores, presentes na figura 6, ilustram as diferentes áreas que permitem a utilização de determinado tipo de modulação. A cor verde representa a modulação 64-QAM, a amarela representa a modulação 16-QAM e a vermelho representa-se a modulação QPSK.

A cada *eNodeB* é adicionada uma descrição que indica os parâmetros que definem determinado *eNodeB*, bem como um cilindro que simula a altitude da antena relativamente ao solo.

Por cada *UE* é apenas introduzida uma descrição com o respetivo ícone, e informação do nível de potência disponível naquele ponto e qual o *eNodeB* recomendado para se obter o melhor serviço possível.

V. ANÁLISE DE RESULTADOS

Os seguintes resultados foram obtidos a partir de simulações implementando as equações de dimensionamento de cobertura e capacidade apresentadas na secção III, fazendo variar o ângulo de *tilt* das antenas e a sua respetiva altura. Para realizar estas simulações, foram considerados os parâmetros de rede apresentados na tabela 2:

Tabela 2 – Parâmetros de entrada da Rede Simulada.

Network Properties					
Network		Traffic Demands			
Environment	Urban	UL Traffic (kbps)	100000	DL Traffic (kbps)	200000
Frequency (MHz)	2600	UL System Load (%)	32	DL System Load (%)	35
Bandwidth (MHz)	20	UL Specs		DL Specs	
Nº RB UL	5	Emission Power (dBm)	23	Emission Power (W)	20
Cov. Prob. (%)	95	Av. Ant. Height (m)	1,5	Av. Ant. Height (m)	30
Área (km ²)	2	Av. Gain (dBi)	2,7	Av. Gain (dBi)	15,8
Antenna Arr.	MIMO	Bit Rate @ Cell Edge. (kbps)	500	Bit Rate @ Cell Edge. (kbps)	5000
Doppler Model	EPA 5 Hz	Losses			
HPBW (°)	7	Jumper Loss	0	Body Loss	3
HPBW (°)	90	Car Loss	0	Building Loss	18

Nas simulações, também foi considerada a utilização de uma antena real com *tilt* mecânico, de forma a tornar as simulações mais realistas. Para este efeito foi utilizada a antena *BMV090X12x000* que tem o diagrama de radiação horizontal e vertical apresentado na figura 7.

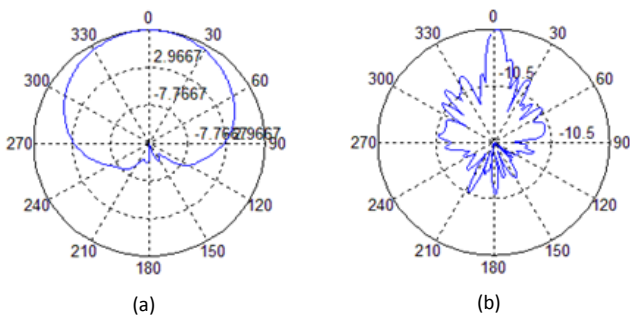


Figura 7 – Diagramas de radiação da Antena considerada: (a) horizontal, (b) vertical.

A. Cobertura em função do Ângulo de Tilt

Na tabela 3, observa-se a relação da distância de cobertura com o ângulo de *tilt* para uma altura da estação base de 30 m e uma altura da estação móvel de 1,5 m:

Tabela 3 – Cobertura vs *Tilt*

Tilt [°]	L _{pmax} [dB]	D _{max} [km]
1°	126.501	0.501
3°	126.497	0.500
5°	126.444	0.4987
7°	126.324	0.495
9°	126.046	0.486
11°	125.727	0.476
13°	125.281	0.4622
15°	125.0397	0.4550

Tabela 4 – Cobertura vs *Tilt* (hb = 50 m)

Tilt [°]	L _{pmax} [dB]	D _{max} [km]
1°	126.501	0.5989
3°	126.497	0.5987
5°	126.444	0.5965
7°	126.324	0.5917
9°	126.046	0.5806
11°	125.727	0.5681
13°	125.281	0.5511
15°	125.0397	0.5421

Ao analisar a tabela 3, pode-se concluir que o aumento da inclinação de uma antena provoca uma diminuição do raio de célula. Este efeito ocorre devido à mudança de direcção do padrão de radiação vertical. À medida que se aumenta o ângulo de *downtilt*, o padrão de radiação vertical da antena muda em direcção ao solo, o que reduz o ganho e por sua vez reduz também a distância de cobertura dessa mesma antena. Geralmente, recorre-se ao *downtilt* da antena de forma a garantir que a célula cobre a área desejada de uma determinada rede, e uma consequente redução da interferência de células adjacentes.

Verifica-se, também, ao comparar os valores das tabelas 3 e 4, que ao aumentar a altura da estação base é possível aumentar a cobertura.

B. Débito binário de um utilizador em função do Tilt

A seguinte simulação foi feita utilizando MIMO 2x2 e uma altura da estação base com 30 m:

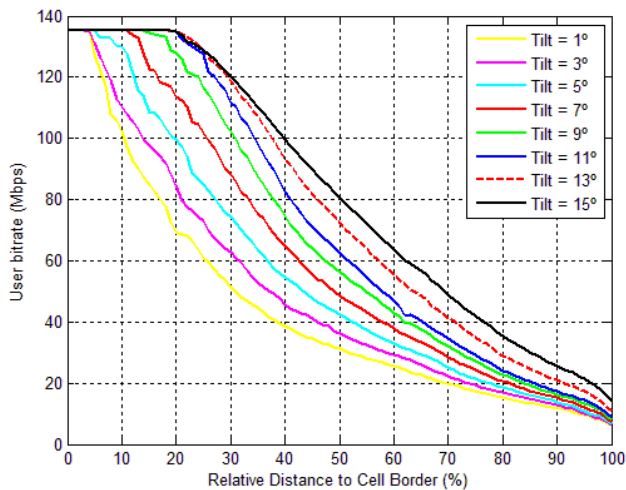


Figura 8 – Débito Binário de um utilizador em função da distância relativa à célula e do *tilt*

Observando o gráfico da fig. 8, verifica-se que há medida que um utilizador se afasta da célula, o *bitrate* vai diminuindo devido ao aumento da interferência (diminuição da SINR), mas existem ângulos de *tilt* que para a mesma distância da célula que aumentam o *bitrate* melhorando a qualidade de serviço naquela área e possibilitando o uso de modulações que necessitem de débitos mais elevados. Consta-se que no caso simulado, o ângulo de 15° de *tilt* maximiza o *bitrate* disponível para um utilizador. É possível utilizar um esquema de *downtilting* mais agressivo, mas pode ter como consequência perda de cobertura criando “buracos” de cobertura na rede móvel.

Nos gráficos que se seguem, foi testado o *bitrate* para diferentes valores de altura da antena de forma a observar como é que este parâmetro influencia o débito binário disponível.

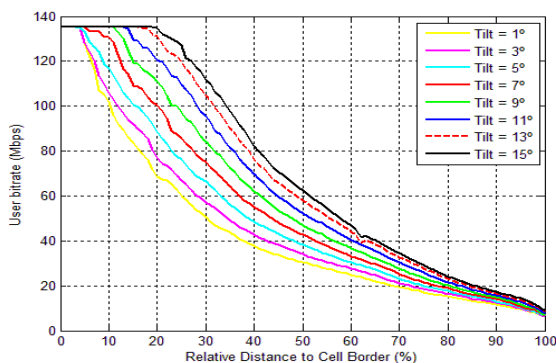


Figura 9 – Débito Binário de um utilizador em função da distância relativa à célula e do *tilt* (hb = 50 m)

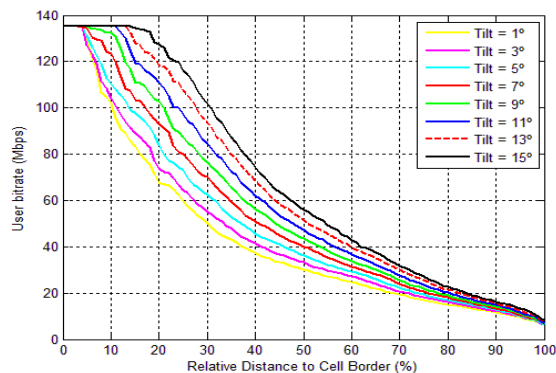


Figura 10 – Débito Binário de um utilizador em função da distância relativa à célula e do *tilt* (hb = 70 m)

Verifica-se que quando se aumenta a altura da estação base, a influência do *tilt* na capacidade torna-se cada vez mais pequena. Isto deve-se ao facto do ângulo de *tilt* equivalente diminuir com a altura da estação base (equação 10), sendo a diferença entre os diversos ângulos de *tilt* reais cada vez mais pequena, o que por sua vez aproxima os valores de interferência para cada ângulo de *tilt* e observa-se uma aproximação cada vez maior dos valores de *bitrate* disponível para um utilizador.

VI. CASO DE ESTUDO: BAIRRO ALTO

Com o intuito de se comprovar algumas das conclusões tecidas nas secções anteriores e ainda explorar a aplicação desenvolvida, apresenta-se um caso de estudo na zona do Bairro Alto em Lisboa. A escolha desta zona prende-se com o facto de ser uma zona cuja morfologia do terreno e edifícios é bastante irregular.



Figura 11 – Zona de estudo.

Na figura 11 verifica-se a área que se quer cobrir colorida com fundo azul. Ainda na mesma figura encontra-se destacado o ponto que designa a localização da antena. Apontando a antena com um azimuth de 0° (sendo 0° o norte geográfico) é possível estabelecer linha de vista com grande parte da zona que se pretende facultar serviços móveis.

Dados os equipamentos disponíveis, seleccionou-se a antena Amphenol© *BMV090X12x000* como solução para o

problema, pois a antena possui um *Half Power Beam Width* (HPBW) horizontal de 90° e um ganho máximo de 13.7 dBi.

A antena colocada possui as seguintes características:

Tabela 5 – Características da Antena.

<i>PTX</i>	20 W
<i>Height</i>	20 m
<i>TX Loss</i>	5,2 dB
<i>RX Loss</i>	3,2 dB
<i>Antenna Arrangement</i>	MIMO
<i>Horizontal HPBW</i>	90°
<i>Vertical HPBW</i>	7°
<i>Azimuth</i>	0°
<i>Max Gain</i>	13.7 dBi

A seguinte sequência de figuras ilustra a variação da cobertura por efeito de *downtilt*. Os *plots* de cobertura foram realizados com uma precisão de 1° de azimute perfazendo o levantamento de 360 perfis de terreno com uma amostragem de 30 pontos de cotas de terreno por perfil

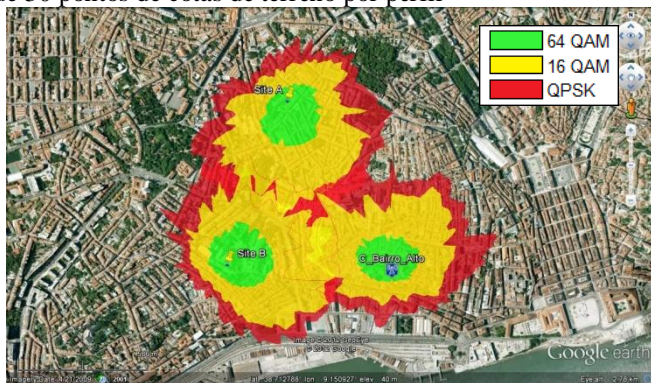


Figura 12 – Rede LTE com *Tilt* 0°

Na figura 12 é possível observar a cobertura da rede sem qualquer tipo de *tilt* em acção. Verifica-se que existe uma certa interferência intercelular e algumas zonas de sombra (azul) derivada à falta de antenas na localização.

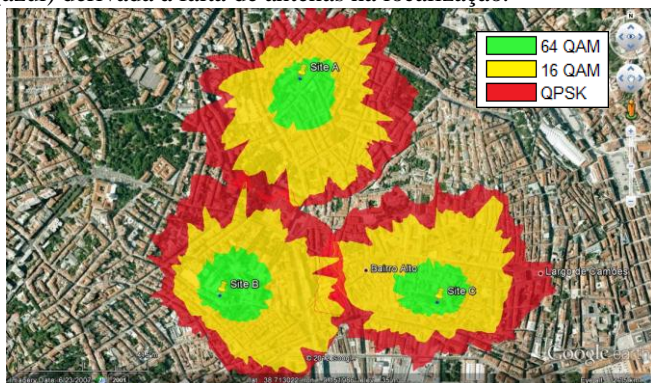


Figura 13 – Rede LTE com *Tilt* 4°

Com a figura 13 constata-se que com o aumento do *tilt*, ocorre uma alteração no diagrama de radiação que se torna mais amplo e com menos alcance fazendo recuar o raio de cobertura. No entanto observa-se um aumento da cobertura de serviço para modulações mais exigentes como 16-QAM. Persistem ainda zonas de interferência intercelular predominantemente na zona de cobertura do *site B* e surge uma zona de sombra entre o *site A* e a *site C*.

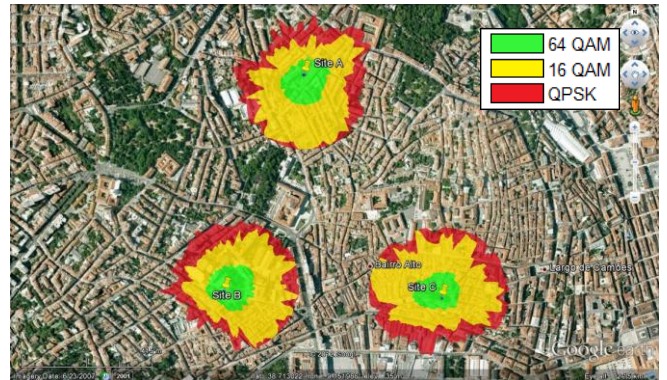


Figura 14 – Rede LTE com *Tilt* 8°

Observando agora a rede com um *tilt* de 8°, figura 14, verificam-se grandes modificações na disposição da cobertura do terreno passando a ser nula a existência de interferência intercelular a troco do surgimento de um aumento considerável das zonas de sombra na rede.

Ao nível dos serviços observa-se um aumento na área de cobertura de serviços mais exigentes aumentando desta forma o *throughput* da rede, ver tabela 6.

Tabela 6 – *Throughput* vs *Tilt*

<i>Tilt</i> [°]	0°	4°	8°
<i>Throughput</i> [kbps]	28883,88	29148,9	30243,63

VII. CONCLUSÕES

Neste artigo, começou-se por estudar os efeitos do *downtilt* mecânico no *link budget* em LTE. Verificou-se que à medida que se aumenta este ângulo, o raio de cobertura de uma célula diminui. Em termos de capacidade, verificou-se o contrário: para um utilizador à mesma distância de uma célula, à medida que se aumenta o *tilt* da antena, a capacidade aumenta, permitindo uma melhor qualidade e um débito maior na transmissão de dados. A diminuição na cobertura é explicada devido ao aumento da atenuação do diagrama vertical da antena, enquanto o aumento da capacidade é obtido devido à redução da interferência de células vizinhas (redução do fator F com o aumento do *downtilt*). Concluiu-se que o *downtilt* é uma técnica eficaz na redução da interferência de células adjacentes, e que quando bem definido dentro de uma rede celular, a rede pode ser otimizada desta forma a nível de cobertura e capacidade.

Os efeitos da variação da altura da antena numa estação base LTE foram objeto de estudo. Observou-se que a nível de cobertura, existe um aumento de cobertura com a altura, para o mesmo ângulo de *tilt*. A nível de capacidade, verificou-se

que o aumento da altura da antena reduz o efeito de *tilt* na capacidade. O aumento de cobertura ocorre devido ao aumento da área que possui linha de vista com a antena, o que provoca uma redução nas atenuações de obstáculos associadas à ligação rádio, o que aumenta o raio de célula. A redução do efeito do *tilt* na capacidade quando se aumenta a altura da antena ocorre devido à redução do ângulo equivalente de *tilt*. A redução do ângulo equivalente de *tilt* à medida que se aumenta a altura da antena (para diferentes ângulos de *tilt* reais) provoca uma aproximação dos valores de interferência, o que por sua vez aproxima os valores de capacidade de uma célula.

Em planeamento de redes móveis surge frequentemente o problema da sobreposição de coberturas de diferentes células. Se a sobreposição de duas células vizinhas for muito grande, existe uma elevada interferência intercelular entre as duas células, o que provoca uma grande sobrecarga no sistema. Conclui-se então que existe um compromisso importante entre o ângulo de *tilt* e a altura da antena. Quando se seleciona o ângulo de *tilt* ótimo, o objetivo é que se obtenha um nível de potência elevado na área onde a célula é suposto servir, e para lá da área de serviço da célula, a potência tem que ser o mais baixa possível, de forma a reduzir a interferência com células vizinhas.

Ao aumentar a altura da antena pode ocorrer a sobreposição da cobertura com células adjacentes, e se for implementada uma estratégia agressiva de *downtilting* irão existir perdas significativas de cobertura, o que reduz significativamente a eficiência da rede móvel, sendo essencial encontrar o compromisso ideal entre estes dois parâmetros, de forma a otimizar a rede. Finalmente, é de referir que os cálculos para a determinação do *link budget* são aproximações, pois os métodos de cálculo de interferência são puramente empíricos. Uma otimização mais correta apenas pode ser obtida através da medição do nível de sinal no terreno.

A tecnologia e os pressupostos existentes em torno do planeamento de uma rede *LTE* de 4G revelam ser bastante complexos e bastante dependentes tanto da qualidade de serviço como da cobertura, pelo que é necessário um grande conhecimento face à tecnologia para se poder efetuar um planeamento correto e otimizado.

VIII. REFERÊNCIAS

- [1] – Technical Specification Group Radio Access Network Requirements, 3GPP TR 25.913 V9.0.0 (2009-12) Release 9.
- [2] – Rui dos Santos Silva Leitão, Sincronismo Digital em *Orthogonal Frequency Multiplexing*, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, Dezembro 2008.
- [3] – [http://www.eventhelix.com/lte/tutorial/webpresentation.htm#Part 2: LTE Parameters and Downlink Modulation](http://www.eventhelix.com/lte/tutorial/webpresentation.htm#Part%20:LTE%20Parameters%20and%20Downlink%20Modulation), site acedido em Abril 2012.
- [4] – Harri Holma and Antti Toskala, *LTE for UMTS OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access*, John Wiley & Sons, Ltd., 2009©.
- [5] – Ericsson, Coverage and Capacity Dimensioning Recommendation, 2010©
- [6] – Google™ Static Maps API v2, <https://developers.google.com/maps/documentation/staticmaps/?hl=pt-BR>, site acedido a Junho 2012.
- [7] – Google™ Elevation Service, <https://developers.google.com/maps/documentation/elevation/?hl=pt-BR#>, site acedido em Junho 2012.