

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Área Departamental de Engenharia de Electrónica e
Telecomunicações e de Computadores



Análise do impacto da utilização de Femto-Células em
LTE

Ana Catarina Gonçalves Gago

Licenciada em Engenharia de Electrónica e Telecomunicações e de
Computadores

Trabalho Final de Mestrado para Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de
Electrónica e Telecomunicações

(Documento Final)

Orientador

Professor Nuno António Fraga Juliano Cota

Júri

Presidente: Professor Pedro Manuel de Almeida Carvalho Viera

Vogal: Professor Pedro Joaquim Sebastião

Dezembro de 2013

Agradecimentos

Este trabalho não ficaria completo sem os meus agradecimentos a todos aqueles que me ajudaram e apoiaram durante a sua realização.

Em primeiro lugar agradeço ao meu orientador, professor Nuno Cota, pela sua disponibilidade na constante orientação do presente trabalho, bem como pela sua paciência e simpatia.

À empresa *Vodafone* que, através do empenho dos seus colaboradores, me disponibilizou determinadas informações sem as quais, a realização da presente dissertação se tornaria complicada.

Ao instituto de telecomunicações de *Viena* pela construção e respectiva disponibilização do *System Level Simulator*, sem o qual não teria sido possível a obtenção dos resultados pretendidos.

Ao laboratório de desenvolvimento e investigação do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa pela disponibilização das suas instalações e equipamentos para a execução da presente dissertação bem como aos colegas de trabalho deste mesmo laboratório por todo o apoio e ajuda que me foram concedidos.

Os meus agradecimentos finais vão para a minha família e amigos pelo constante apoio e incentivos dados ao longo da realização deste trabalho.

“O estudo é a valorização da mente ao serviço da felicidade humana”, Fernando Pessoa

Resumo

A procura de serviços de banda larga móvel por parte dos utilizadores tem crescido de forma continuada e a um ritmo exponencial levando a que os operadores estejam constantemente a investir num aumento capacidade suportada pelas redes móveis. Assim os operadores móveis estão a adoptar a utilização de femto-células, de forma a cumprir as necessidades dos utilizadores.

Esta solução introduz alguns problemas ao nível da interferência, comprometendo assim o desempenho global da rede e, limitando a capacidade da mesma. Deste modo, vão ser realizadas simulações para diferentes configurações de rede de forma a perceber qual o impacto que as femto-células têm nas redes já existentes e a vantagem da utilização de métodos de mitigação de interferência. Uma vez que actualmente redes de baixo custo, também são um requisito, vai ser realizada uma análise financeira para perceber a vantagem que as femto-células introduzem.

Assim, os resultados obtidos permitem verificar que as femto-células são uma mais valia para redes com níveis de QoS exigentes, visto serem redes de alta capacidade. No entanto, estas quando aplicadas a grandes áreas acabam por ser um pouco dispendiosas. Desta forma, as femto-células constituem uma boa solução para escoar tráfego de células já existentes, cobrir zonas de sombra ou mesmo dar cobertura a zonas com elevadas necessidades de capacidade.

Palavras-chave: LTE, Femto-células, Desempenho, Simulação

Abstract

The demand for wideband services by the users has been continuously and exponentially increasing, leading the mobile operators to constantly invest in networks that support high capacities. This way the mobile operators have adopted the femtocells solution in order to fulfilling the needs of the users.

This solution introduces some network interference issues, thus jeopardizing the global system performance and limiting the capacity of some cells. In this way, some simulations were done, for different network configurations, in order to find out the femtocells impact in already existent networks and the advantage of using mitigation interference methods. Once low cost networks are also a pre-requisit, it is going to be done a financial study of femtocells.

So, the obtained results show that femtocells are good for networks with high QoS levels but a little bit expensive for cover big areas. In this way, femtocells are a good solution for traffic flow of the existing cells, for cover some shadow zones and for high level demand networks.

Keywords: LTE, Femtocells, Performance, Simulation

Índice

Agradecimentos.....	iii
Resumo.....	v
Abstract	vii
Índice de Figuras	xiii
Índice de Tabelas.....	xvii
Lista de Símbolos	xix
Lista de Acrónimos	xxiii
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento.....	3
1.2. Estado da Arte	4
1.3. Objectivos.....	6
1.4. Estrutura da Dissertação.....	6
2. Conceitos Fundamentais em LTE.....	9
2.1. Introdução.....	11
2.2. Arquitectura da rede LTE.....	11
2.2.1. eNodeBs	13
2.2.2. MME - Mobility Management Entity.....	13
2.2.3. S-GW - Serving Gateway.....	14
2.2.4. P-GW - Packet Data Network Gateway	14
2.2.5. PCRF - Policy and Charging Enforcement Function	14
2.2.6. HSS - Home Subscriber Server	15
2.2.7. Interfaces do Sistema.....	15
2.3. Acesso rádio em LTE.....	16
2.3.1. OFDMA – Orthogonal Frequency Division Multiple Access.....	16
2.3.2. SC-FDMA – Single Carrier Frequency Division Multiple Access	17
2.3.3. MIMO - Multiple Input Multiple Output	18

2.4.	Camada Física	20
2.5.	Canais <i>Uplink</i> e <i>Downlink</i>	22
2.6.	Planeamento rádio em LTE	25
2.6.1.	Cobertura em Uplink	26
2.6.2.	Cobertura em Downlink	29
2.6.3.	Capacidade em Uplink	32
2.6.4.	Capacidade em Downlink.....	32
2.6.5.	Determinação do raio de cobertura.....	33
2.7.	Femto-Células	34
2.7.1.	Arquitectura de Rede	34
2.7.2.	Redes Femto-celulares	36
2.7.3.	Controlo de acesso.....	37
2.7.4.	Técnicas de Coordenação de Interferência - ICIC.....	39
3.	Aspectos para análise de desempenho	43
3.1.	Simulador Vienna System Level	45
3.1.1.	Funcionalidades.....	45
3.1.2.	Implementação	46
3.2.	Modos de Transmissão	48
3.3.	Escalonadores.....	53
3.4.	Modelos de Propagação.....	56
3.5.	Modelo <i>Winner Phase II</i>	59
3.6.	Definição do cenário de estudo	59
3.6.1.	Configurações Gerais e Implementação	60
3.6.2.	Planeamento orientado à capacidade.....	64
3.6.3.	Planeamento orientado à cobertura	66
4.	Análise de Resultados.....	69
4.1.	Análise do desempenho da rede	71
4.2.	Análise Financeira.....	91
4.3.	Cenário real de estudo	98

5.	Conclusões.....	101
5.1.	Trabalho desenvolvido	103
5.2.	Conclusões finais.....	103
5.2.1.	Desempenho da rede	103
5.2.2.	Análise financeira.....	104
5.3.	Trabalho Futuro.....	105
	Bibliografia.....	107
A.	Pseudo-Código do Simulador	113
B.	Especificações das femto-células estudadas	114
C.	CQI, Modulações e Eficiências conseguidas.....	115
D.	Frequências Atribuídas	116
E.	Antena ‘742212’	117
F.	SINR e CQI em ambientes urbanos.....	118
G.	SINR e CQI em meios suburbanos.....	119
H.	Perdas de propagação em redes femto-celulares	120
I.	Tabela com preços das ligações de rede	121
J.	Tabelas de cash-flow realizadas	122

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Suporte de rede heterogéneo extraído de [1].	4
Figura 1.2 – Número de utilizadores esperado até 2015 extraído de [2].	4
Figura 1.3 – Arquitectura de rede com femto-células extraído de [3].	5
Figura 2.1 - Evolução das redes móveis extraído de [9].	11
Figura 2.2 – Arquitectura do sistema E-UTRAN extraído de [10].	12
Figura 2.3 – Estrutura OFDMA extraído de [11][11].	16
Figura 2.4 – Extensão cíclica de um símbolo OFDM extraído de [10].	17
Figura 2.5 – Símbolos de referência OFDM extraído de [10].	17
Figura 2.6 – Escalonamento OFDM no domínio do tempo e frequência extraído de [11][11].	17
Figura 2.7 – Estrutura SC-FDMA extraído de [11][11].	18
Figura 2.8 – MIMO com uma configuração 2x2 extraído de [10].	19
Figura 2.9 – Mapeamento de RS extraído de [12].	19
Figura 2.10 – <i>Trama</i> do tipo 1 extraído de [12].	21
Figura 2.11 – Estrutura do domínio do tempo extraído de [14].	21
Figura 2.12 – <i>Downlink Resource Grid</i> tirado de [15][15].	22
Figura 2.13 – Mapeamento dos canais em LTE extraído de [16].	24
Figura 2.14 – Processos de dimensionamento LTE extraído de [17].	26
Figura 2.15 – Ligação <i>uplink</i> extraído de [18].	26
Figura 2.16 – Valores conseguidos de <i>throughput</i> em função do SINR extraído de [18].	27
Figura 2.17 - Ligação <i>Downlink</i> extraído de [18].	30
Figura 2.18 – <i>Noise Rise</i> em <i>downlink</i> na fronteira da célula extraído de [18].	31
Figura 2.19 – Arquitectura de rede <i>home</i> LTE extraído de [19].	35
Figura 2.20 – Femto-células na arquitectura <i>flat</i> IP extraído de [20].	36
Figura 2.21 – Rede híbrida extraído de [20].	36
Figura 2.22 – Interferência com espectro partilhado extraído de [21].	37
Figura 2.23 – Interferência com espectro dedicado extraído de [21].	37
Figura 2.24 – <i>Closed Access</i> extraído de [20].	38
Figura 2.25 – <i>Open Access</i> extraído de [20].	38
Figura 2.26 – <i>Hybrid Access</i> extraído de [20].	39
Figura 2.27 – Transmissão <i>Downlink</i> com <i>Hard Reuse</i> extraído de [10].	40
Figura 2.28 - Transmissão <i>Downlink</i> com <i>Fractional Reuse</i> extraído de [10].	40
Figura 2.29 - Transmissão <i>Downlink</i> com <i>Soft Reuse</i> extraído de [10].	40

Figura 2.30 – Técnicas ICIC extraído de [22].	41
Figura 3.1 – Diagrama de blocos do simulador <i>Vienna System Level</i> adaptado de [24].	46
Figura 3.2 – Diagrama com esquema das classes do simulador adaptado de [24].	47
Figura 3.3 – Esquerda: perdas de larga escala de um <i>enodeB</i> ; Direita: <i>shadow fading</i> de um <i>site</i> extraído de [24] e [31].	48
Figura 3.4 – Níveis de SINR e de CQI de uma rede hexagonal tri-sectorizada com <i>tilt</i> extraído de [31].	48
Figura 3.5 – Comparação do modo TxD com SISO adaptado de [32].	49
Figura 3.6 – Débitos conseguidos pelos UE e na fronteira da célula, para uma LB=5MHz extraído de [31].	50
Figura 3.7 – Distribuição de potência por utilizador.	51
Figura 3.8 – Mapeamento do débito por UE em função da banda SINR.	52
Figura 3.9 – Comparação dos diferentes modos de transmissão extraído de [24].	53
Figura 3.10 – Esquema do escalonador <i>proportional fair</i> tirado de [33][33].	54
Figura 3.11 – Distribuição de potência do débito por UE para diferentes escalonadores.	56
Figura 3.12 – Comparação de débitos conseguidos para diferentes escalonadores.	56
Figura 3.13 – Diagrama blocos dos módulos desenvolvidos.	58
Figura 3.14 – Rede macro-celular.	61
Figura 3.15 – Rede femto-celular e híbrida.	61
Figura 3.16 – Serviços móveis mais utilizados extraído de [36].	63
Figura 4.1 – Valores de SINR e CQI conseguidos na rede macro-celular, meio urbano.	71
Figura 4.2 - Valores de SINR e CQI conseguidos na rede macro-celular, meio urbano.	72
Figura 4.3 – Distribuição da rede.	73
Figura 4.4 – Relatório com informação da BLER e débito conseguido.	73
Figura 4.5 – Relatório do CQI obtido.	74
Figura 4.6 – Distribuição de CQIs atribuídos.	74
Figura 4.7 - Distribuição da rede.	75
Figura 4.8 - Relatório com informação da BLER e débito conseguido.	75
Figura 4.9 - Relatório do CQI obtido.	76
Figura 4.10 - Distribuição de CQIs atribuídos.	76
Figura 4.11 - Distribuição da rede.	77
Figura 4.12 - Relatório com informação da BLER e débito conseguido.	77
Figura 4.13 - Relatório do CQI obtido.	78
Figura 4.14 - Distribuição de CQIs atribuídos.	78
Figura 4.15 - Distribuição da rede.	79
Figura 4.16 - Variação da atribuição de RBs.	79
Figura 4.17 - Relatório com informação da BLER e débito conseguido.	80

Figura 4.18 - <i>Perdas de percurso</i> na rede macro-celular, meio urbano.	80
Figura 4.19 – Função de distribuição de: (a) Banda SINR; (b) Atenuação máxima da ligação (<i>perdas de percurso</i>).	81
Figura 4.20 - Débito por utilizador em redes sem femto-células.	82
Figura 4.21 – Débito por utilizador em redes sem femto-células.....	82
Figura 4.22 - Eficiência espectral média em redes sem femto-células.....	83
Figura 4.23 - Eficiência espectral média em redes macro-celulares.	83
Figura 4.24 - Débito por utilizador em redes femto-celulares.....	84
Figura 4.25 - Débito por utilizador em redes híbridas.	84
Figura 4.26 - Eficiência espectral média em redes femto-celulares.....	85
Figura 4.27 - Eficiência espectral média em redes híbridas.....	86
Figura 4.28 - Débito por utilizador.....	87
Figura 4.29 - Eficiência espectral média.....	87
Figura 4.30 - Débito por utilizador.....	88
Figura 4.31 - Eficiência espectral média.....	88
Figura 4.32 – Débito médio por UE em função do SINR em redes macro-celulares.	89
Figura 4.33 - Débito médio por UE em função do SINR em redes femto-celulares.....	89
Figura 4.34 - Débito médio por UE em função do SINR em redes híbridas.....	90
Figura 4.35 – Valores de Cash-Flow Acumulado.	97
Figura 4.36 – Variação do Capital Investido.....	97
Figura 4.37 – Mapa de elevação do terreno.	98
Figura 4.38 – Rede macro-celular no Saldanha.	99
Figura 4.39 - Localização dos <i>enodeBs</i> na rede.	99
Figura 4.40 – Mapa <i>perdas de percurso</i> dos três sectores do <i>enodeB 2</i>	100

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Interfaces do plano de controlo tirado de [10].	15
Tabela 2.2 - Interfaces do plano do utilizador tirado de [10].	16
Tabela 2.3 – Número de RBs em função da largura de banda tirado de [14].	22
Tabela 2.4 – Canais de transporte em <i>downlink</i> tirado de [10].	23
Tabela 2.5 - Canais de transporte em <i>uplink</i> tirado de [10].	23
Tabela 2.6 – Débitos conseguidos em <i>downlink</i> tirado de [14].	25
Tabela 2.7 – Margens de desvanecimento para diferentes valores do desvio padrão tirado de [17].	29
Tabela 2.8 – Valores de A para o modelo de propagação <i>Okumura-Hata</i> tirado de [17].	34
Tabela 2.9 – Esquemas presentes nos métodos ICIC tirado de [10].	39
Tabela 3.1 – Configurações a simular.	60
Tabela 3.2 – Configurações fixas de simulação.	62
Tabela 3.3 – Distribuição de serviços da rede.	63
Tabela 3.4 – Número de pontos de acesso para dar cobertura à rede total.	64
Tabela 3.5 – Resultados obtidos na parametrização da rede.	65
Tabela 3.6 – Planeamento por cobertura.	66
Tabela 3.7 - Planeamento por cobertura de uma rede macro celular.	67
Tabela 4.1 – Custos dos elementos constituintes da rede.	93
Tabela 4.2 – Considerações praticadas nas tabelas de <i>cash-flow</i> .	94
Tabela 4.3 – Resultados obtidos.	95

Lista de Símbolos

h_b	Altura do <i>enodeB</i>
h_{busy}	Número de <i>busy hours</i> [s]
h_m	Altura do equipamento do utilizador
$P_{rx,j}$	Potência recebida da estação base j
T_{dia}	Tráfego por utilizador por dia
T_{ue}	Tráfego por utilizador
$\Gamma_{WB,m}$	Banda SINR em <i>downlink</i>
$B_{DL-noise\ rise}$	Margem de interferência média em <i>downlink</i>
B_{IDL}	<i>Noise Rise</i> em <i>downlink</i>
B_{IUL}	Margem de Interferência em <i>uplink</i>
B_{LNF}	Margem de desvanecimento <i>log-normal</i>
CF_k	<i>Cash-Flow</i> ou receita líquida de exploração no período k
$C_{necessaria}$	Capacidade total necessária na rede
F_c	Razão entre a potência média recebida das células vizinhas e a potência da célula de serviço na fronteira da célula
G_a	Soma do ganho da antena do <i>enodeB</i> com o ganho da antena do UE
I_k	Investimentos efectuados no período k
L_{BL}	<i>Body-Loss</i>
L_{BPL}	Perdas de penetração edifícios
L_{CPL}	Perdas de penetração carros
L_j	Perdas dos <i>jumpers</i> e de inserção do TMA
L_p	Atenuação máxima da ligação
L_{pmax}	Perdas máximas admitidas de propagação
L_{pmax}	Atenuação máxima em <i>downlink</i> [dB]
$L_{sa,cell\ range}$	Atenuação do sinal em <i>downlink</i>
$N_{RB,DL}$	Ruído térmico por RB em <i>downlink</i>
$N_{RB,DL}$	Ruído térmico por RB em <i>uplink</i>
$N_{RB,UL}$	Ruído térmico por RB em <i>uplink</i>
N_f	Figura de ruído do <i>enodeB</i>
N_t	Densidade de potência de ruído térmico

N_{ues}	Número de utilizadores
$P_{UE,RB}$	Potência transmitida pelo UE por RB
P_{UE}	Potência total emitida pelos UEs
$P_{nom,ref}$	Soma das potências de todas as unidades rádio da célula no ponto de referência
$P_{tx,RB}$	Potência por <i>resource block</i>
Q_{DL}	Factor de carga em <i>downlink</i>
Q_{UL}	Factor de carga médio do sistema em <i>uplink</i>
$R_{avg,UL}$	Débito médio por utilizador
$R_{req,RB}$	Débito binário por RB
R_{req}	Débito binário disponibilizado a um UE na fronteira da célula
S_{UE}	Sensibilidade do UE
S_{eNodeB}	Sensibilidade do <i>enodeB</i>
$T_{célula,DL}$	<i>Throughput</i> da célula em <i>downlink</i> ,
T_f	Factor de tráfego
T_i	Ritmo de crescimento de tráfego
V_r	Valor residencial dos bens investidos no final da vida útil
W_{RB}	Largura de banda por RB
Y_c	Ano em que o projecto é realizado
Y_s	Ano em que o projecto é iniciado
n_{PRACH}	Número de RBs reservados para o canal PRACH
n_{PUCCH}	Número de RBs reservados para o canal PUCCH
n_{RB}	Número de RB que podem ser alocados de forma a conseguir o débito binário R_{req}
$\gamma_{DL,avg}$	SINR médio resultante
F	Razão dos ganhos das células interferentes com as de serviço
H	Relação entre a atenuação média do sinal da célula de serviço e a atenuação média do sinal a uma determinada distância da antena do <i>site</i> .
σ	Potência de ruído
A	Constante de atenuação obtida em função da frequência
R	Distância
$\alpha(h_m)$	Factor de correcção para antenas à altura dos veículos
i	Estação-base à qual está ligado o UE m
i	Taxa de actualização
k	Período considerado
m	UE que possui um determinado valor de SINR

α	Especificação do tempo ao nível do número de <i>slots</i>
γ	Valor de SINR
η	Eficiência espectral

Lista de Acrónimos

<i>3GPP</i>	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
<i>ACK/NACK</i>	<i>Acknowledgement/Negative Acknowledgement</i>
<i>ACL</i>	<i>Access Control List</i>
<i>AF</i>	<i>Application Function</i>
<i>ANACOM</i>	<i>Autoridade Nacional das Comunicações</i>
<i>AuC</i>	<i>Authentication Center</i>
<i>AWGN</i>	<i>Additive White Gaussian Noise</i>
<i>BBERF</i>	<i>Bearer Binding and Event Reporting Function</i>
<i>BCH</i>	<i>Broadcast Channel</i>
<i>BLER</i>	<i>Block Error Ratio</i>
<i>CCE</i>	<i>Control Channel Element</i>
<i>CDL</i>	<i>Clustered Delay Line</i>
<i>CFI</i>	<i>Control Format Indicator</i>
<i>CLSM</i>	<i>Closed-loop spatial multiplexing</i>
<i>CM</i>	<i>Cubic Metric</i>
<i>CP</i>	<i>Control Plane</i>
<i>CQI</i>	<i>Channel Quality Indicator</i>
<i>CQI</i>	<i>Channel Quality Indicator</i>
<i>CS</i>	<i>Circuit Switched</i>
<i>CSG</i>	<i>Closed Subscriber Group</i>
<i>DCI</i>	<i>Downlink Control Information</i>
<i>DL-SCH</i>	<i>Downlink Shared Channel</i>
<i>DwPTS</i>	<i>Downlink Pilot Time Slot</i>
<i>enodeB</i>	<i>Evolved Node B</i>

<i>EPC</i>	<i>Evolved Packet Core</i>
<i>EPS</i>	<i>Evolved Packet System</i>
<i>E-UTRAN</i>	<i>Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network</i>
<i>FDD</i>	<i>Frequency Division Duplex</i>
<i>FFR</i>	<i>Fractional Frequency Reuse</i>
<i>FTP</i>	<i>File Transfer Protocol</i>
<i>GP</i>	<i>Guard Period</i>
<i>GSM</i>	<i>Global System for Mobile Communications</i>
<i>GTP</i>	<i>GPRS Tunneling Protocol</i>
<i>GUTI</i>	<i>Globally Unique Temporary Identity</i>
<i>HARQ</i>	<i>Hybrid Automatic Repeat Request</i>
<i>HeNB</i>	<i>Home enodeB</i>
<i>HeNB GW</i>	<i>Home enodeB Gateway</i>
<i>HI</i>	<i>HARQ Indication</i>
<i>HII</i>	<i>High Interference Indicator</i>
<i>HSPA</i>	<i>High Speed Packet Access</i>
<i>HSS</i>	<i>Home Subscriber Server</i>
<i>HTTP</i>	<i>Hypertext Transfer Protocol</i>
<i>ICIC</i>	<i>Inter-Cell Interference Coordination</i>
<i>IMSI</i>	<i>International Mobile Subscriber Identity</i>
<i>IMT-A</i>	<i>International Mobile Telecommunications Advanced</i>
<i>IP</i>	<i>Internet Protocol</i>
<i>ITU</i>	<i>International Telecommunication Union</i>
<i>LA</i>	<i>Location Area</i>
<i>LAU</i>	<i>Location Area Update</i>
<i>LTE</i>	<i>Long Term Evolution</i>
<i>MCS</i>	<i>Modulation and Coding Scheme</i>
<i>MIB</i>	<i>Master Information Block</i>

<i>MIESM</i>	<i>Mutual Information Effective Signal to Interference and Noise Ratio Mapping</i>
<i>MIMO</i>	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
<i>MM</i>	<i>Mobility Management</i>
<i>MME</i>	<i>Mobility Management Entity</i>
<i>MME</i>	<i>Mobility Management Entity</i>
<i>OFDMA</i>	<i>Orthogonal Frequency Division multiple Access</i>
<i>OI</i>	<i>Overload Indicator</i>
<i>OLSM</i>	<i>Open-loop spatial multiplexing</i>
<i>OSG</i>	<i>Open Subscriber Group</i>
<i>PAPR</i>	<i>Peak to Average Power Ratio</i>
<i>PBCH</i>	<i>Physical Broadcast Channel</i>
<i>PCEF</i>	<i>Policy and Charging Enforcement Function</i>
<i>PCFICH</i>	<i>Physical Control Format Indicator Channel</i>
<i>PCH</i>	<i>Paging Channel</i>
<i>PCI</i>	<i>Physical Cell Identity</i>
<i>PCRF</i>	<i>Policy and Charging Enforcement Function</i>
<i>PDCCH</i>	<i>Physical Downlink Control Channel</i>
<i>PDSCH</i>	<i>Physical Downlink Shared Channel</i>
<i>P-GW</i>	<i>Packet Data Network Gateway</i>
<i>PHICH</i>	<i>Physical HARQ Indicator Channel</i>
<i>PMCH</i>	<i>Physical Multicast Channel</i>
<i>PMI</i>	<i>Precoding Matrix Indicator</i>
<i>PMIP</i>	<i>Proxy Mobile Internet Protocol</i>
<i>PRACH</i>	<i>Physical Random Access Channel</i>
<i>PRB</i>	<i>Physical Resource Block</i>
<i>PS</i>	<i>Packet Switched</i>
<i>PSS</i>	<i>Primary Synchronization Signal</i>

<i>PTMSI</i>	<i>Packet Temporary Mobile Subscriber Identity</i>
<i>PUCCH</i>	<i>Physical Uplink Control Channel</i>
<i>PUSCH</i>	<i>Physical Uplink Shared Channel</i>
<i>QAM</i>	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
<i>QoS</i>	<i>Quality of Service</i>
<i>QPSK</i>	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>
<i>QPSK</i>	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>
<i>RACH</i>	<i>Random Access Channel</i>
<i>RAU</i>	<i>Routing Area Update</i>
<i>RB</i>	<i>Resource Blocks</i>
<i>RBS</i>	<i>Radio Base Station</i>
<i>RE</i>	<i>Resource Element</i>
<i>REG</i>	<i>Resource Element Group</i>
<i>RI</i>	<i>Rank Indicator</i>
<i>RNTP</i>	<i>Relative Narrowband Transmit Power</i>
<i>ROI</i>	<i>Region of Interest</i>
<i>RRM</i>	<i>Radio Resource Management</i>
<i>RS</i>	<i>Reference Signals</i>
<i>SAE GW</i>	<i>System Architecture Evolution Gateway</i>
<i>SC-FDMA</i>	<i>Single Carrier Frequency Division Multiple Access</i>
<i>SFBC</i>	<i>Space-Frequency Block Codes</i>
<i>S-GW</i>	<i>Serving Gateway</i>
<i>SIB</i>	<i>System Information Blocks</i>
<i>SIMO</i>	<i>Single Input Multiple Output</i>
<i>SINR</i>	<i>Signal to Interference to Noise Ratio</i>
<i>SISO</i>	<i>Single Input Single Output</i>
<i>SMS</i>	<i>Short Message Service</i>
<i>SR</i>	<i>Scheduling Request</i>

<i>SSS</i>	<i>Secondary Synchronization Signal</i>
<i>TA</i>	<i>Tracking Area</i>
<i>TDD</i>	<i>Time Division Duplex</i>
<i>TMA</i>	<i>Tower Mounted Amplifier</i>
<i>TMSI</i>	<i>Temporary Mobile Subscriber Identity</i>
<i>TTI</i>	<i>Transmission Time Interval</i>
<i>TxD</i>	<i>Transmit diversity</i>
<i>UCI</i>	<i>Uplink Control Information</i>
<i>UE</i>	<i>User Equipment</i>
<i>UL-SCH</i>	<i>Uplink Shared Channel</i>
<i>UMTS</i>	<i>Universal Mobile Telecommunication System</i>
<i>UP</i>	<i>User Plane</i>
<i>UpPTS</i>	<i>Uplink Pilot Time Slot</i>
<i>VAL</i>	<i>Valor Actual Líquido</i>
<i>VoIP</i>	<i>Voice-over-IP</i>
<i>WCDMA</i>	<i>WideBand Code-Division Multiple Access</i>

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo será feita a introdução ao trabalho efetuado. Será efetuado um enquadramento do tema em estudo, sendo depois efetuado uma breve abordagem ao estado da arte nos assuntos centrais do trabalho. Após o enquadramento e estado da arte serão descritos os objetivos e a estrutura da dissertação.

1.1. Enquadramento

A procura de serviços de banda larga móvel por parte dos utilizadores tem crescido de forma continuada e a um ritmo exponencial levando a que os operadores de redes móveis estejam constantemente a investir num aumento de capacidade.

Desde o início das redes móveis, um variado número de factores tem contribuído para o aumento da capacidade das mesmas tais como o aumento do espectro, melhores técnicas de transmissão e, principalmente, a adopção de reutilização de frequências. Deste modo, surgiu a tecnologia LTE, que se encontra em ascensão mundialmente e que vem introduzir uma vantagem competitiva relativamente às restantes tecnologias móveis *3GPP - 3rd Generation Partnership Project*.

A motivação para a adopção do LTE, de acordo com a *ITU - International Telecommunication Union* e a *IMT-A - International Mobile Telecommunications-Advanced*, está relacionada com o facto de oferecer maiores capacidades, uma maior eficiência espectral, uma baixa latência, um sistema de comutação de pacotes optimizado, maiores níveis de qualidade de serviço e infra-estruturas mais baratas.

No entanto, o continuado crescimento do número de utilizadores móveis introduz problemas ao nível de cobertura em determinadas áreas tal como, em zonas rurais, alguns locais no interior de edifícios ou subterrâneos. A grande quantidade de utilizadores de dados em ambientes *indoor*, juntamente com as perdas de penetração introduzidas, criou novos desafios à tecnologia LTE visto que a cobertura rádio convencional com macro e micro-células dificilmente conseguem satisfazer a procura *indoor*, bem como as aplicações com elevados ritmos de transmissão.

Deste modo os operadores móveis estão a alterar o paradigma das redes móveis ao adoptaram a utilização de femto-células, de forma a cumprir os requisitos impostos pela tecnologia e as necessidades dos utilizadores, escoando melhor todo o tráfego existente. Enquanto estação-base com recurso à tecnologia *plug-and-play*, auto-configurável e auto-optimizada, as femto-células são rapidamente convertidas como a melhor solução devido à sua capacidade de adaptação aos ambientes em que são utilizadas.

As femto-células consistem em pequenos pontos de acesso que podem ser utilizados em vários tipos de ambientes, não só em ambientes *indoor*, e que podem ser aplicadas em qualquer tecnologia tendo por finalidade aumentar a capacidade da rede. Esta é também uma solução para situações onde não existe cobertura de rede, ou mesmo para quando o nível de sinal recebido é reduzido pois, passa a ser possível efectuar *handover* entre as redes móveis convencionais e os pontos de acesso das femto-células, como é possível de observar na Figura 1.1 Um exemplo da aplicação deste tipo de células é o de fornecimento de serviços móveis em aviões, para um grupo restrito de utilizadores.

Este tipo de células destina-se principalmente a ser utilizado pelo utilizador final, o que introduz novos desafios que irão favorecer o desenvolvimento de soluções completamente autónomas de partilha do espectro.

No entanto, apesar das vantagens acima mencionadas, esta solução possui como desvantagem o facto de introduzir problemas aquando da partilha do espectro com macro-células, visto que poderá ocorrer interferência entre os dois tipos de células.

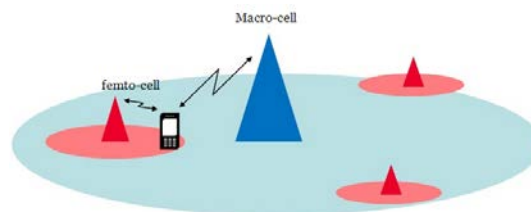


Figura 1.1 - Suporte de rede heterogéneo extraído de [1].

1.2. Estado da Arte

Com o passar dos anos, o número de dispositivos móveis ligados à *Internet* e a aplicações de *cloud* têm vindo a aumentar criando assim uma grande procura por parte dos utilizadores no que diz respeito a cobertura e capacidade das redes móveis, como é visível na Figura 1.2. Em contrapartida, o preço médio pago por capacidade tem vindo a diminuir.

As redes móveis tradicionais não conseguem satisfazer toda a demanda devido ao limite monetário e geográfico do número de *sites* que pode ser construído, ao espectro limitado de cada operador e, ao *backhaul* de cada *site* que é bastante dispendioso. Deste modo, os operadores têm vindo à procura de soluções cada vez mais pequenas, de forma a substituir as redes macro-celulares existentes e, a dar cobertura aos espaços *indoor* e a áreas com elevada procura.

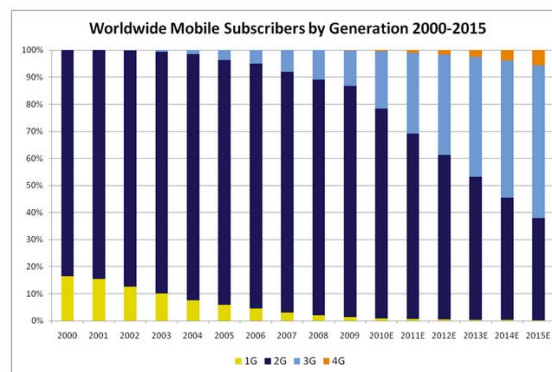


Figura 1.2 – Número de utilizadores esperado até 2015 extraído de [2].

No que diz respeito à arquitectura de rede, o *3GPP Release 8* incluiu uma nova solução para dar apoio aos *enodeB - Evolved Node B*, em ambientes de reduzida cobertura tais como, caves, zonas de sombra, entre outros. Estes pequenos *enodeB* são denominados de femto-células, encontram-se ligadas ao core da rede do operador e utilizam as frequências do mesmo - Figura 1.3.

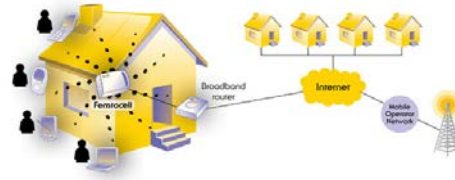


Figura 1.3 – Arquitectura de rede com femto-células extraído de [3].

Assim, de forma a aliviar o escoamento do tráfego suportado pelas redes já existentes, quer em ambientes *outdoor* quer em *indoor* e, os custos de manutenção da rede, os operadores adoptaram como solução as femto-células. Estas células consistem em pequenos pontos de acesso de baixa potência, que operam em frequências licenciadas, são auto-configuráveis e auto-otimizadas, e vão incorporar as funcionalidades dos *enodeB*. Deste modo as femto-células vêm combater a falta de cobertura *indoor*, visto que existem sítios onde o sinal propagado pelas camadas superiores não cumpre os níveis exigidos para uma boa qualidade dos serviços prestados; vêm introduzir maiores níveis de capacidade, pois possuem um raio de cobertura reduzido, para serviços mais exigentes e que levam a que a rede não tenha capacidade de suporte e, vêm permitir uma migração fixo-móvel.

Todas estas vantagens fazem com que as femto-células tenham sido tornadas uma solução viável por parte dos operadores. No entanto, esta solução também vem introduzir alguns problemas no que diz respeito à interferência com a rede macro celular. A utilização de femto-células para *sites indoor*, torna os problemas das infraestruturas e interferências mais fáceis de gerir e mais eficientes monetariamente. Porém, esta é uma solução complexa para a pouca percentagem de utilizadores *indoor* que possuem falta de cobertura móvel. Uma vez que não se encontram totalmente integradas na rede macro, as femto-células que utilizam reutilização de frequência podem criar interferência o que vai afectar o utilizador. Caso exista partilha de espectro entre as femto-células e as macro-células, a capacidade total da rede vai diminuir, afectando assim o utilizador da rede.

O desenvolvimento de femto-células como parte de uma rede heterogénea cria também um problema de escalabilidade. Novos métodos de desenvolvimento e gestão necessitam de ser considerados de forma a evitar visitas a *sites* e controlos de custos consecutivos. Planeamento de alta precisão, compensação do escalonamento da rede para *sites* que estão em baixo e novas parcerias para gerir as unidades de planeamento, o desenvolvimento e a substituição são alguns exemplos de mudanças dos modelos de negócio.

Desta forma, têm sido efectuados diversos trabalhos no âmbito das femto-células tais como o estudo da gestão de potência destas de forma a solucionar problemas de interferência entre células de diferentes camadas, tal como entre femto-células e macro-células, ou somente entre femto-células, especialmente se possuírem os mesmos canais rádio [4]; o estudo de novos esquemas de gestão de interferência baseados na aplicação de reutilização de frequência fraccional [5]; a comparação dos valores da eficiência energética obtidos aquando da utilização de femto-células com uma configuração *SISO - Single Input Single Output*, ou com uma configuração MIMO [6]; o estudo da performance da utilização de variados esquemas de reutilização de frequência [7]; entre outros. Para além de estudos ao nível do desempenho da rede, têm sido também realizados alguns estudos no que diz respeito à viabilidade financeira das femto-células tal como o estudo financeiro, ecológico e energético presente em [8].

1.3. Objectivos

A interferência resultante nas macro-células poderá colocar em causa o desempenho global do sistema, limitando a capacidade em algumas células, devido à reutilização de recursos rádio. É assim fundamental caracterizar o real impacto na introdução de femto-células numa rede LTE, quer em termos de desempenho ou em termos de custo.

O trabalho aqui apresentado pretende caracterizar o impacto da utilização de femto-células numa rede de comunicações móveis LTE. Esta análise será efetuada com base no estudo das técnicas de minimização de interferência entre células, quantificando-se a alteração nos indicadores de desempenho da rede pela utilização deste tipo de cobertura.

Complementarmente será efetuada também uma análise económico-financeira dos custos da introdução e exploração de uma solução baseada em femto-células relativamente às soluções de cobertura convencional.

No âmbito da presente dissertação foi realizado um artigo que foi submetido numa revista científica e exposto numa conferência internacional, onde foram apresentadas as principais conclusões do estudo efectuado bem como alguns dos valores obtidos [9].

1.4. Estrutura da Dissertação

No que diz respeito à estrutura da presente dissertação esta encontra-se dividida em cinco capítulos, que reflectem todo o trabalho desenvolvido e que irão ser descritos de seguida.

No capítulo 2 vão ser definidos alguns conceitos fundamentais de modo a permitir uma mais fácil compreensão do trabalho a realizar. Assim será abordada a tecnologia LTE, o seu modo de

funcionamento; e a solução femto-celular, o seu modo de funcionamento, os problemas que a mesma apresenta e formas de os contornar.

No capítulo 3 são explicados quais os aspectos importantes estudar para a análise de desempenho da rede durante a execução da dissertação. Assim é apresentado o simulador utilizado, o porquê da sua escolha, quais as suas funcionalidades e como é que se encontra estruturado; e, alguns dos estudos realizados para a selecção do cenário final da rede em estudo.

No capítulo 4 será apresentado o cenário definido para o estudo em questão; quais os resultados obtidos após a realização de simulações e análise financeira do projecto; e, algumas conclusões respeitante aos resultados apresentados, evidenciando assim quais as vantagens e desvantagens da utilização das femto-células em LTE.

Por último, no capítulo 5 vão estar presentes as conclusões que foram tiradas ao longo de todo o projecto realizado.

Capítulo 2

Conceitos Fundamentais em LTE

Neste capítulo serão apresentados os principais aspectos tecnológicos de base para a realização do trabalho e compreensão dos resultados apresentados. Será apresentada de início a evolução tecnológica verificada no sector. Seguir-se-á uma descrição geral da arquitetura LTE e uma apresentação mais detalhada sobre as características da interface rádio, designadamente ao nível da definição dos recursos rádio. Finalmente será apresentado o método que serve de base ao cálculo do *link-budget* em LTE e alguns conceitos teóricos importantes sobre femto-células e respectivo modo de funcionamento e problemas existentes.

2.1. Introdução

O permanente desenvolvimento do sector das comunicações móveis está relacionado com a evolução dos equipamentos móveis, com o aumento do número de serviços disponibilizados e, conseqüentemente, com uma maior exigência dos utilizadores no que diz respeito à disponibilização constante e em qualquer lugar dos serviços/mesmos. Tal tem levado a um progresso da rede de forma a proporcionar uma maior qualidade de serviço dos serviços fornecidos e na execução de débitos cada vez mais elevados. Deste modo, surgiu a necessidade do lançamento da nova tecnologia LTE, que vem garantir a competitividade futura dos sistemas 3G, que apresenta uma baixa latência ao nível do plano do utilizador e que, através do aumento da capacidade de cada célula, consegue níveis superiores de qualidade de serviço e débitos transmitidos, comparativamente às tecnologias anteriores como é visível na Figura 2.1.

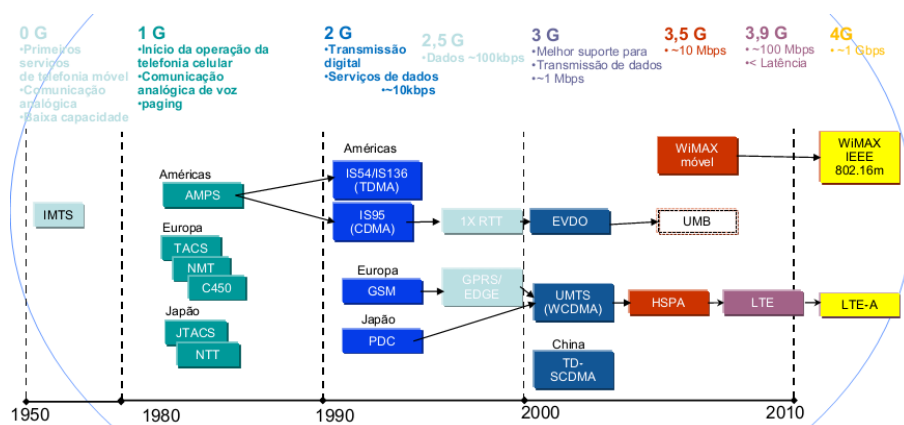


Figura 2.1 - Evolução das redes móveis extraído de [9].

Assim, e de acordo com o *IMT-Advanced*, a utilização do LTE passa a permitir, para *downlink*, débitos de pico iguais a 100Mbps, aquando de uma mobilidade elevada, e de 1Gbps para mobilidades reduzidas. Ao nível da eficiência espectral, esta será de duas a quatro vezes superior à do *HSPA – High Speed Packet Access Release 6*. De acordo com o 3GPP o LTE, com *MIMO – Multiple Input Multiple Output 4x4*, vai possibilitar débitos de pico na ordem dos 300Mbps, em *downlink*, e de 75Mbps em *uplink*.

2.2. Arquitectura da rede LTE

A arquitectura de rede do LTE possui algumas diferenças comparativamente com a arquitectura de uma rede *UMTS - Universal Mobile Telecommunication System*, como é visível na Figura 2.2, passando a ser uma rede mais simples. Isto porque, tal como é visível, alguns dos nós são reduzidos e passa a existir uma nova hierarquia de rede. Assim, a rede está dividida em quatro níveis principais: o

do UE – *User Equipment*, o do E-UTRAN – *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network*, o do EPC – *Evolved Packet Core* e, por fim, o respeitante ao domínio dos serviços. O E-UTRAN é constituído pela malha dos variados *enodeB* interligados pela interface X2. Ao nível do SAE GW – *System Architecture Evolution Gateway*, este representa a combinação do S-GW – *Serving Gateway*, com o P-GW – *Packet Data Network Gateway*. No que diz respeito ao EPC, este é composto pelo MME - *Mobility Management Entity*, pelo HSS - *Home Subscriber Server*, pelo SAE-GW e pelo PCRF - *Policy and Charging Enforcement Function*.

Ao conjunto do UE, E-UTRAN e EPC é denominado de EPS – *Evolved Packet System*, e representa a camada de conectividade IP – *Internet Protocol*.

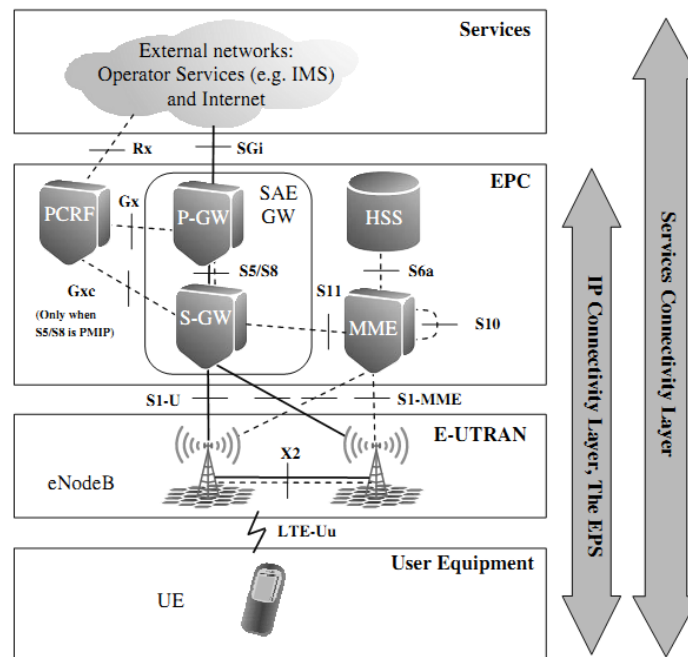


Figura 2.2 – Arquitetura do sistema E-UTRAN extraído de [10].

Em LTE todos os serviços funcionam sobre IP tendo-se assim que as interfaces e nós que assentam numa comutação de circuitos, em gerações anteriores, passam a não estar presentes no E-UTRAN e EPC. Assim esta passa a ser uma rede *flat IP* onde os serviços de voz começaram a ser transportados através de *VoIP - Voice-over-IP*. Uma das principais características da E-UTRAN é a atribuição de ‘inteligência’ às estações-base sendo estas designadas de *enodeB*. Deste modo, todas as funcionalidades rádio passam a estar concentradas nos *enodeB* e estes passam a ser o ponto de terminação de todos os protocolos rádio.

2.2.1. *enodeBs*

Os únicos constituintes da E-UTRAN são os *enodeB* que são essencialmente estações-rádio que controlam todas as funções rádio do sistema. Estes funcionam como uma ligação entre o UE e o EPC visto que são o ponto de terminação de todos os protocolos respeitantes ao UE e transmitem informação, entre a conexão rádio e respectiva conectividade IP, em direcção ao EPC. Durante esta função o *enodeB* realiza a encriptação/descriptação dos dados, que se encontram ao nível do plano do utilizador, *UP – User Plane*, bem como a compressão/descompressão dos cabeçalhos IP. Ao nível do plano de controlo, *CP – Control Plane*, estes elementos da rede são responsáveis pelo *RRM – Radio Resource Management*. Assim controlam a utilização da interface rádio, o que inclui a alocação de recursos com base nos pedidos efectuados, o escalonamento do tráfego de acordo com a qualidade de serviço, *QoS – Quality of Service*, pretendida e monitorizam constantemente a utilização dos recursos da rede.

Respeitante à gestão da mobilidade, *MM – Mobility Management*, os *enodeB* controlam e analisam as medidas do nível de sinal realizadas pelo UE e, consoante os valores das mesmas, são efectuadas decisões de *handover* do UE entre células.

2.2.2. *MME - Mobility Management Entity*

O MME é o principal elemento de controlo na camada EPC sendo que não desempenha qualquer função ao nível do plano do utilizador. Este elemento tem como principais funções a autenticação e segurança do sistema, a gestão de mobilidade e a gestão do perfil de subscrições e conectividade de serviços. Respeitante à autenticação e segurança, quando um UE se regista pela primeira vez na rede a sua autenticação é realizada pelo MME sendo que esta funcionalidade é necessária para garantir que o UE é quem assegura ser e pode ser repetida periodicamente ou quando necessário. De forma a proteger a privacidade do UE, o MME aloca periodicamente a cada UE uma identidade temporária denominada de *GUTI - Globally Unique Temporary Identity*, o que vai permitir que a transmissão do *IMSI – International Mobile Subscriber Identity*, na interface rádio seja minimizada.

Ao nível da gestão da mobilidade, o MME tem registadas as localizações de todos os UE, na sua área de serviço. Quando um UE realiza o seu primeiro registo na rede, o MME vai criar uma nova entrada e indica a localização do mesmo ao *HSS - Home Subscriber Server*, pertencente à rede do UE. O MME vai controlar a configuração e libertação dos recursos necessários, tendo em conta a actividade do UE. O MME vai também realizar a sinalização de *handover* dos UE em modo activo entre *enodeBs*, *S-GWs* ou *MMEs*. Sempre que um UE em modo *idle* receber dados de uma rede externa, o MME vai notificar os *enodeBs*, da área do UE.

2.2.3. S-GW - Serving Gateway

Este elemento da rede tem como principal função gerir e encaminhar os dados no plano do utilizador. Os S-GW são uma parte central da infraestrutura de rede e encontram-se interligados por meio de uma interface S5/S8 ao P-GW. Esta interface possui dois modos de funcionamento: baseado em GTP - GPRS Tunneling Protocol, ou baseado em PMIP - Proxy Mobile Internet Protocol.

No que diz respeito à utilização de GTP, o S-GW vai possuir uma comunicação via túneis GTP em todas as interfaces ao nível do plano do utilizador. Nesta configuração o mapeamento dos serviços IP é efectuado no P-GW e, todo o controlo relacionado com a comunicação é feito pelo MME ou P-GW. Tendo uma configuração PMIP, o S-GW vai efectuar o mapeamento dos serviços e dos túneis GTP nas interfaces SI-U e vai-se encontrar ligado ao PCRF de forma a receber a informação do mapeamento. O S-GW não tem funções ao nível de controlo, visto que é apenas responsável pelos seus recursos e respectiva alocação, sob o pedido do MME, P-GW ou PCRF aquando da necessidade de atribuição, modificação ou remoção de portadoras ao utilizador. Ao nível da mobilidade entre *enodeBs*, o S-GW actua como âncora pois vai efectuar uma troca dos túneis do antigo *enodeB* para o novo ou fornecer recursos para reenvio de dados do antigo *enodeB* para o novo, aquando de *handover* da parte do UE.

2.2.4. P-GW - Packet Data Network Gateway

O P-GW é o elemento de encaminhamento entre o EPS e a rede externa de dados. Realiza funções de filtragem de tráfego e aloca endereços IP ao UE para que este consiga comunicar com redes exteriores. O P-GW inclui o PCEF - Policy and Charging Enforcement Function, o que se traduz na realização da filtragem, taxação, controlo de serviços tendo em conta as políticas atribuídas ao UE e interceptação legal dos dados.

Aquando da realização de *handover* entre S-GW, o P-GW irá receber uma informação para que comute os fluxos de dados para o novo S-GW. Cada P-GW pode estar conectado a um ou mais PCRF, S-GW e redes externas.

2.2.5. PCRF - Policy and Charging Enforcement Function

O PCRF é o elemento da rede responsável pelo controlo e taxação PCC, respeitante ao utilizador. Este efectua decisões relativamente ao tratamento de serviços com base na QoS dos mesmos e fornece informação ao PCEF, que se encontra localizado no P-GW e, se necessário, também ao BBERF - Bearer Binding and Event Reporting Function, que está localizado no S-GW, para que seja possível a atribuição das portadoras apropriadas ao UE, bem como o respectivo controlo. O PCRF é um servidor

que se encontra usualmente localizado com outros elementos da rede, nos centros de comutação do operador. Cada PCRF pode estar associado a um ou mais *AF – Application Function*, P-GW ou S-GW sendo que, existe somente um PCRF associado a cada ligação de dados que cada UE possui.

2.2.6. HSS - Home Subscriber Server

O HSS consiste numa base de dados, que é mantida num ponto central das instalações do operador, que efectua o repositório da informação permanente de subscrições de todos os utilizadores da rede. Esta base de dados guarda também a localização dos utilizadores ao nível dos nós da rede, como por exemplo o MME.

O HSS armazena a cópia principal do perfil de subscrição e a informação ao nível das permissões de *roaming* noutras redes. Respeitante à autenticação, a chave permanente que é utilizada no cálculo dos vectores, será guardada no *AuC – Authentication Center* que tipicamente faz parte do HSS. Toda a sinalização relativa à autenticação é tratada entre o HSS e o MME logo o HSS necessita de estar conectado a todos os MMEs da rede. Para cada UE, o HSS vai estar conectado ao MME que está ao seu serviço e, assim que um segundo MME reporte que está ao serviço do UE, o HSS cancela a localização do mesmo a partir do antigo MME.

2.2.7. Interfaces do Sistema

As interfaces abaixo descritas podem ser observadas na Figura 2.2. Assim tem-se que as interfaces ao nível do plano de controlo são as presentes na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Interfaces do plano de controlo tirado de [10].

Interface	Função
S1-MME	Interface que efectua a ligação entre os <i>enodeB</i> e os MME, sendo assim o ponto de referência do protocolo do plano de controlo
S6A	Interface que liga os MME aos HSS levando a que seja possível a transferência de dados de subscrição e autenticação
Gx	Interface entre o P-GW e o PCRF que vai permitir a transferência de políticas da qualidade de serviço da informação e das regras de tarifação
Rx	Interface que estabelece a ligação entre o PCRF e redes exteriores

No que diz respeito às interfaces do plano do utilizador, é possível observar na Tabela 2.2 as existentes e respectivas funções.

Tabela 2.2 - Interfaces do plano do utilizador tirado de [10].

Interface	Função
X2	Interface que efectua a ligação entre os <i>enodeB</i>
S1-U	Interface entre os <i>enodeB</i> (E-UTRAN) e o S-GW (EPC)
S5	Interface que estabelece a ligação entre os S-GW e os P-GW
S11	Interface que liga o S-GW ao MME
SGi	Interface entre o P-GW e as redes externas

2.3. Acesso rádio em LTE

Ao nível do acesso rádio, o modo de funcionamento do LTE é diferente do *WCDMA - WideBand Code-Division Multiple Access*. Deste modo o acesso múltiplo em *downlink* é realizado com recurso à técnica de *OFDMA - Orthogonal Frequency Division multiple Access* e em *uplink* é efectuado recorrendo à técnica de *SC-FDMA - Single Carrier Frequency Division Multiple Access*.

Neste capítulo vão ser abordados alguns dos princípios básicos de cada uma das duas técnicas, quais os canais existentes para *downlink* e *uplink* e a respectiva estrutura.

2.3.1. OFDMA – Orthogonal Frequency Division Multiple Access

A técnica OFDMA é a utilizada para acesso múltiplo em *downlink* devido ao facto de introduzir uma maior eficiência respeitante à redução de interferências multipercurso - desvanecimento selectivo na frequência, de utilizar uma modulação adaptativa e de possuir uma maior robustez a interferências de banda estreita. Tal é possível devido à alocação de sub-portadoras ortogonais entre si para diferentes utilizadores, levando assim a que seja possível a sobreposição das variadas transmissões sem que seja introduzida interferência no domínio da frequência. Em LTE adoptou-se um espaçamento entre portadoras de 15 kHz, como é visível na Figura 2.3, o que leva a uma maior tolerância ao nível do desvio de *Doppler*.

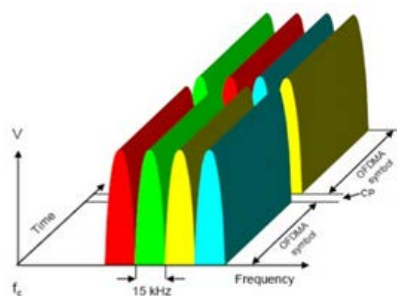


Figura 2.3 – Estrutura OFDMA extraído de [11][11].

Em OFDMA é utilizada extensão cíclica, de forma a evitar a ocorrência de interferência intersimbólica – Figura 2.4 e, é efectuada uma estimação do canal com recurso a símbolos de referência ou piloto – Figura 2.5, possibilitando assim ao receptor uma interpolação dos efeitos do canal nas diferentes sub-portadoras.

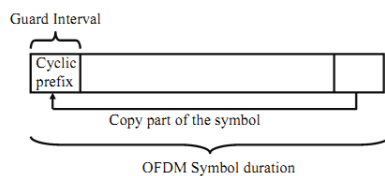


Figura 2.4 – Extensão cíclica de um símbolo OFDM extraído de [10].

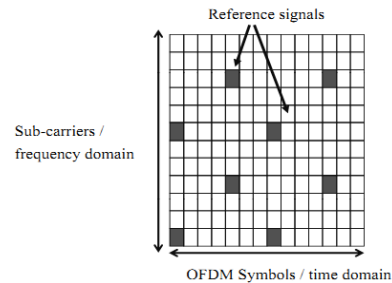


Figura 2.5 – Símbolos de referência OFDM extraído de [10].

Um outro aspecto importante da utilização desta tecnologia é o da capacidade dos *enodeB* de escalonamento das sub-portadoras, consoante as condições do canal – Figura 2.6. Tal permite ao escalonador beneficiar da diversidade no domínio da frequência o que leva à resolução de problemas de desvanecimento, visto que são atribuídas as frequências com melhores níveis de qualidade e, conseqüentemente, a um aumento da capacidade oferecida na célula uma vez o número de retransmissões diminui derivado da diminuição da taxa de erros dos pacotes.

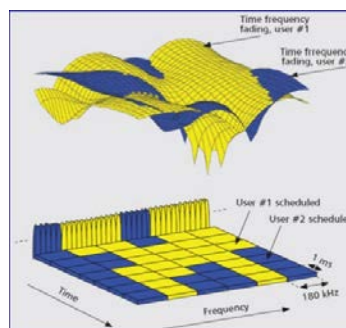


Figura 2.6 – Escalonamento OFDM no domínio do tempo e frequência extraído de [11][11].

A limitação do escalonamento de recursos rádio é a sobrecarga ao nível da sinalização o que levou a que a alocação não fosse realizada a nível de uma sub-portadora mas sim de cada conjunto de 12, que se traduz numa largura de banda de 180 kHz, denominado de *resource block*.

2.3.2. SC-FDMA – Single Carrier Frequency Division Multiple Access

Respeitante ao acesso múltiplo em *uplink* a técnica utilizada é o SC-FDMA, que utiliza muitos dos princípios do OFDMA de forma a conseguir uma maior eficiência espectral.

2x2 ou 4x4, os *reference signals* vão estar mapeados segundo um determinado padrão, como é visível na Figura 2.9.

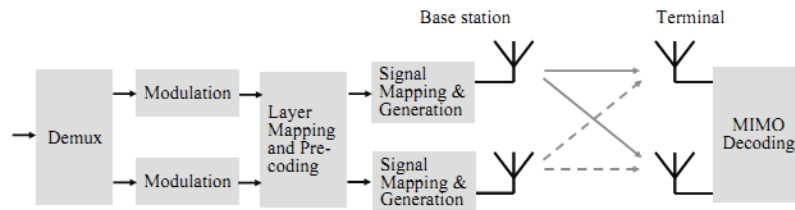


Figura 2.8 – MIMO com uma configuração 2x2 extraído de [10].

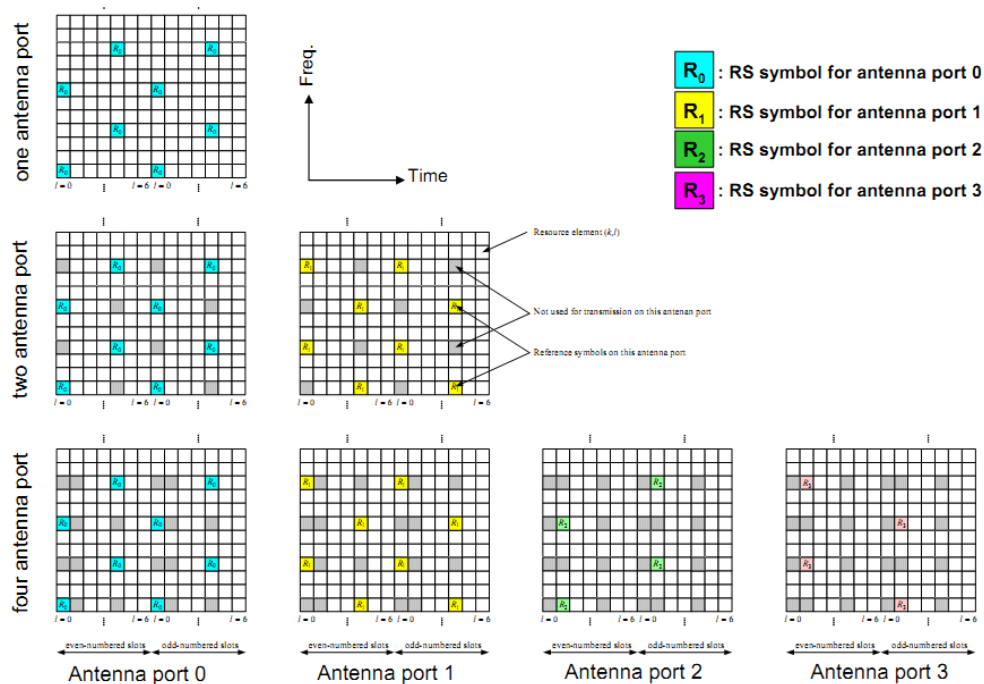


Figura 2.9 – Mapeamento de RS extraído de [12].

Esta técnica requer um valor alto de *SINR* – *Signal to Interference to Noise Ratio* e, à medida a que o número de antenas aumenta tal é conseguido tendo como consequência um aumento da complexidade do transmissor/receptor, bem como do cabeçalho dos RS. Em *uplink* também é suportado MIMO o que leva a um aumento para o dobro da capacidade da célula, aquando da utilização de duas antenas com *reference signals* ortogonais. Existem dois tipos de *reference signals* em *uplink*, de acordo com [10]: *desmodulation*, que são usados para a estimação de canal necessária para que seja feita a desmodulação dos dados, que possuem uma largura de banda igual à dos dados transmitidos em *uplink* e que, se encontram localizados no quarto símbolo SC-FDMA de cada *slot*; *sounding*, que fornecem informações relativamente à qualidade do canal, que será utilizada na optimização do escalonamento de pacotes em *uplink* no domínio da frequência e, que se encontram localizados no último símbolo SC-FDMA da *sub-trama*.

Ao nível do *downlink*, de acordo com [10], existem os sinais de sincronismo que se dividem em *PSS* – *Primary Synchronization Signal* e em *SSS* – *Secondary Synchronization Signal*. Ambos transportam o *PCI* - *Physical Cell Identity*, sendo que existe um total de 504 valores em LTE, agrupados em três grupos de 168 *PCI*, encontram-se no primeiro e décimo primeiro *slot* de uma *trama* e, vão ser utilizados nos procedimentos de procura da célula e de identificação da mesma.

Respeitante à de transmissão em LTE, existem 7 modos possíveis, segundo o definido no *3GPP* [13]:

Modo 1 - *Single-antenna port; port 0*: Este modo de funcionamento possui apenas uma antena a transmitir (*SISO*) enquanto na recepção podem existir duas antenas (*SIMO* – *Single Input Multiple Output*).

Modo 2 - *Transmit diversity (TxD)*: Neste modo os dados a transmitir são repetidos pelas variadas antenas, sendo que cada fluxo vai possuir uma codificação diferente devido à utilização de *SFBC* – *Space-Frequency Block Codes*.

Modo 3 - *Open-loop spatial multiplexing (OLSM)*: Aqui 2 ou 4 fluxos de dados vão transmitir informação diferente, através da utilização de canais paralelos. As condições em que esta transmissão é efectuada vão depender dos valores do *RI* – *Rank Indicator* e do *CQI* – *Channel Quality Indicator*. Este modo é apropriado para situações em que o *enodeB* não possui o *PMI* – *Precoding Matrix Indicator* do UE.

Modo 4 - *Closed-loop spatial multiplexing (CLSM)*: Neste modo o *enodeB* aplica no sinal transmitido a matriz de pré-codificação, que está de acordo com o *PMI* recebido por parte do UE, *RI* e *CQI*.

Modo 5 - *Multi-user MIMO*: Este modo constitui um caso especial do modo 3, no qual diferentes utilizadores vão possuir diferentes fluxos de dados. Este modo pode apresentar problemas de interferência entre UE caso as camadas espaciais utilizadas por cada um não sejam ortogonais entre si.

Modo 6 - *Closed-loop Rank 1 with precoding*: Este modo é considerado o recuo do modo 4, é permitido *beamforming* e a informação é transmitida num único canal espacial.

Modo 7 - *Single-antenna port; port 5*: Modo de *beamforming* onde a mesma informação é enviada numa única camada espacial. Neste um sinal de referência dedicado forma um porto de antena adicional permitindo assim transmissões com mais de quatro antenas.

2.4. Camada Física

Para que fosse possível a transmissão e gestão dos diferentes tipos de dados entre o *enodeB* e o UE, o *3GPP* padronizou as *tramas* utilizadas em LTE. Desta forma, passam a existir dois tipos de *tramas*: a *trama* do tipo 1 que é utilizada em sistemas *FDD* – *Frequency Division Duplex* e *half duplex FDD* e, a

trama do tipo 2 que é somente usada em sistemas *TDD – Time Division Duplex*. As *tramas* que são mais utilizadas na presente tecnologia são as do tipo 1 como tal vai-se proceder a uma breve explicação das mesmas.

As *tramas* do tipo 1 possuem uma duração de 10 ms e encontram-se subdivididas num total de 20 slots de 0,5 ms cada – Figura 2.10. Um *slot* é um conjunto de 7 símbolos *OFDM*, tendo cada um uma duração de 0,5 ms. O conjunto de dois *slots* consecutivos é denominado de *sub-trama*, logo a sua duração é de 1 ms, o que corresponde ao valor de um *TTI – Transmission Time Interval*. A junção de dez *sub-tramas* leva a uma *trama*, que é possível observar na Figura 2.11.

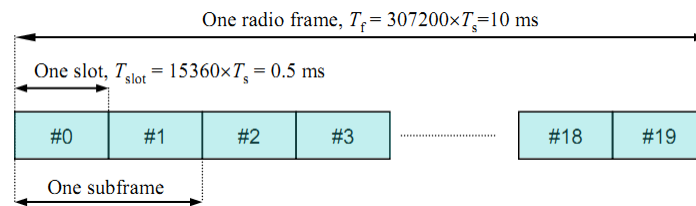


Figura 2.10 – Trama do tipo 1 extraído de [12].

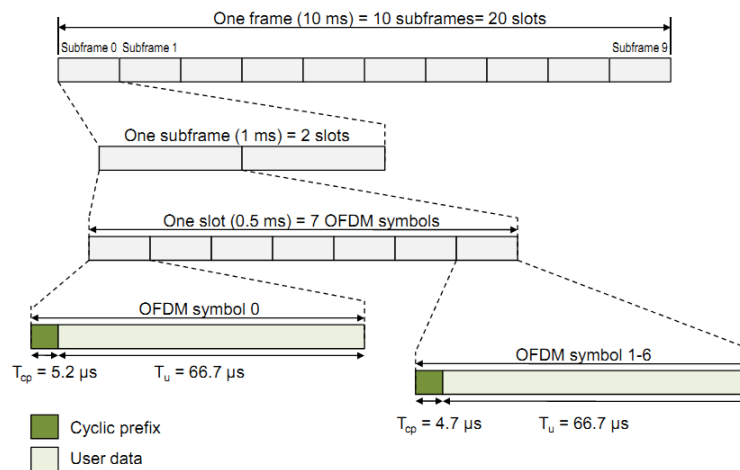


Figura 2.11 – Estrutura do domínio do tempo extraído de [14].

Em LTE o mapeamento de canais e sinais em cada *sub-trama* é descrito por uma *resource grid*, representada na Figura 2.12, que possui o tamanho de uma *trama*, no domínio do tempo e, a largura de banda que está a ser usada, à qual vai corresponder um determinado valor de *RB - Resource Blocks* – Tabela 2.3. Um *resource block* é definido como o conjunto de N_{SC}^{RB} portadoras consecutivas, no domínio da frequência, com N_{Symb}^{DL} símbolos *OFDM* consecutivos, no domínio do tempo. Cada *resource block* corresponde a um *slot* no domínio do tempo - 0,5 ms, e ocupa um total de 180 kHz devido ao conjunto de 12 portadoras, com 15 kHz de largura de banda.

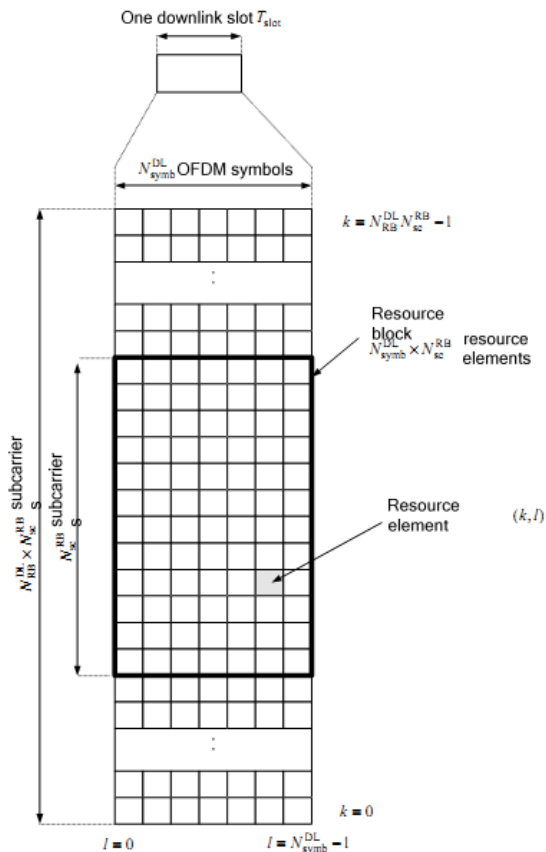


Figura 2.12 – Downlink Resource Grid tirado de [15][15].

Tabela 2.3 – Número de RBs em função da largura de banda tirado de [14].

Largura de Banda [MHz]	Número de RBs
1.4	6
1.6	7
3	15
3.2	16
5	25
10	50
15	75
20	100

Para compreender o conceito de *resource grid* é também necessário ter em conta qual o conceito de *RE - Resource Element*. Um *resource element* resulta da combinação de uma sub-portadora, a unidade mínima no domínio da frequência (k), com um símbolo *OFDM*, a unidade mínima no domínio do tempo (l), sendo identificado pelos respectivos índices (k,l) . Um *resource element* que não se encontra a transmitir é denominado de *hole*. Cada conjunto de quatro *resource elements* constitui um *REG - Resource Element Group* que por sua vez, quando reunidos nove vão dar origem a um *CCE - Control Channel Element*.

Por fim, as modulações utilizadas nesta tecnologia são a *QPSK - Quadrature Phase Shift Keying* $\frac{1}{2}$, *16 QAM - Quadrature Amplitude Modulation* $\frac{3}{4}$, *16 QAM* $\frac{1}{2}$, *64 QAM* 1 e *64 QAM* $\frac{3}{4}$. A utilização destas modulações vai permitir uma boa eficiência aos transmissores, no que diz respeito à potência transmitida, uma maior robustez no que diz respeito ao efeito de *Doppler* e desvanecimento e, maiores débitos nas modulações com mais símbolos visto que é necessário um maior valor do SINR.

2.5. Canais Uplink e Downlink

O LTE é composto por canais lógicos, que é onde será indicado qual o tipo de informação a transportar; por canais de transporte, que vão indicar como é que o UE vai estar ligado à rede e quais

as suas características e, finalmente, por canais físicos que são responsáveis pela alocação de recursos para os diversos utilizadores – Figura 2.13. Esta é uma tecnologia caracterizada pela utilização de recursos alocados dinamicamente e não pela utilização de recursos dedicados a cada utilizador.

Os canais lógicos encontram-se mapeados nos canais de transporte e estes, por sua vez, nos canais físicos. Deste modo, é possível observar na Tabela 2.4 os canais de transporte em *downlink* e, na Tabela 2.5, os canais de transporte em *uplink*.

Tabela 2.4 – Canais de transporte em *downlink* tirado de [10].

Canais de transporte em <i>downlink</i>	Funções
BCH - Broadcast Channel	Transmite os parâmetros necessários à ligação do UE ao sistema, p.e. quais os recursos que estão reservados para um acesso aleatório e, a identificação do operador.
PCH - Paging Channel	Transporta a informação de <i>paging</i> necessária para que o móvel passe do estado de <i>RRC_IDLE</i> para o estado de <i>RRC_CONNECTED</i> .
DL-SCH - Downlink Shared Channel	Transporta os dados do utilizador em ligações ponto a ponto, desde os dados do mesmo à informação de controlo, assumindo que o UE se encontra no estado <i>RRC_CONNECTED</i> ; e a informação de controlo destinada a múltiplos utilizadores. Caso os dados do <i>DL-SCH</i> sejam apenas para um UE, é realizada uma adaptação dinâmica da ligação e retransmissões na camada física.

Tabela 2.5 - Canais de transporte em *uplink* tirado de [10].

Canais de transporte em <i>uplink</i>	Funções
Uplink Shared Channel - UL-SCH	Transporta os dados do utilizador, que se encontra no estado <i>RRC_CONNECTED</i> , bem como sua informação de controlo. Tal como o <i>DL-SCH</i> , este canal também efectua adaptações dinâmicas da ligação e retransmissões.
Random Access Channel – RACH	Utilizado na resposta às mensagens de <i>paging</i> ou para iniciar a passagem de/para o estado <i>RRC_CONNECTED</i> consoante o que a transmissão de dados do UE necessita.

Os canais acima descritos encontram-se mapeados nos canais físicos correspondentes. Assim, para *downlink*, tem-se que os canais PCH e DL-SCH são mapeados no canal *PDSCH - Physical Downlink Shared Channel* e que, apenas uma parte dos parâmetros do BCH são mapeados no *PBCH - Physical Broadcast Channel*, uma vez que os *SIB – System Information Blocks* se encontram no canal DL-SCH. Para além do mencionado, o canal PBCH vai também transportar o parâmetro *MIB – Master Information Block*.

Em *uplink*, o RACH será transmitido no *PRACH - Physical Random Access Channel* e o UL-SCH será transmitido no *PUSCH - Physical Uplink Shared Channel*. Observando a Figura 2.13 é possível verificar que existem quatro canais físicos que não são dão suporte a qualquer canal de transporte. Tal deve-se ao facto de estes quatro canais serem responsáveis pelo controlo da camada física tendo-se assim que esta informação em *downlink* será transportada com recurso a três tipos de mensagens: o *CFI - Control Format Indicator*, que vai indicar o número de recursos dedicados de forma a controlar a utilização dos canais e será mapeado no *PCFICH - Physical Control Format Indicator Channel*; o *HI - HARQ Indication* que tem como finalidade informar se os pacotes enviados foram recebidos com sucesso e é transportado no *PHICH - Physical HARQ Indicator Channel*; e o *DCI - Downlink Control Information* que possui múltiplos formatos consoante a necessidade e, é responsável pelo controlo, quer em *downlink* quer em *uplink*, da alocação de recursos da camada física. Este último tipo de mensagem será suportado pelo *PDCCH - Physical Downlink Control Channel*. No que diz respeito ao *PUCCH - Physical Uplink Control Channel*, este canal transporta informação de controlo no *UCI - Uplink Control Information*, que é idêntico ao DCI do canal PDCCH. Assim, cada UCI transporta a combinação de três tipos de informação consoante a situação: *SR - Scheduling Request*, *Hybrid Automatic Repeat Request (HARQ) Acknowledgement/Negative Acknowledgement (ACK/NACK)*, *CQI*. Cada UCI é transmitido no PUCCH caso o UE não se encontre a transmitir ou então, caso existam dados transmitidos pelo UE, é transmitido no PUSCH.

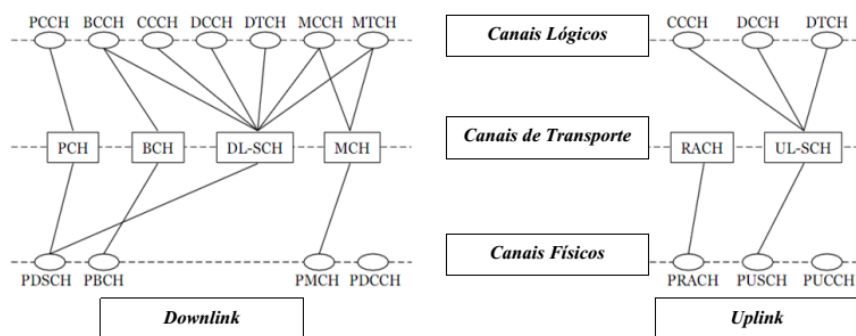


Figura 2.13 – Mapeamento dos canais em LTE extraído de [16].

Observando a Tabela 2.6 é possível verificar os valores dos débitos conseguidos para diferentes tipos de largura de banda, modulação e configurações de antenas. Para chegar a estes valores é necessário ter em conta qual o número de *resource elements* que cada canal possui, o número de *reference signals*, a percentagem de ocupação de cada canal, entre outros.

Tabela 2.6 – Débitos conseguidos em *downlink* tirado de [14].

Modulação e Codificação	Bits/Símbolo	MIMO	1.4	3.0	5.0	10	15	20
			MHz	MHz	MHz	MHz	MHz	MHz
			6	15	25	50	75	100
QPSK ½	1.0	Single stream	0.8	2.2	3.7	7.4	11.2	14.9
16 QAM ½	2.0	Single stream	1.5	4.4	7.4	14.9	22.4	29.9
16 QAM ¾	3.0	Single stream	2.3	6.6	11.1	22.3	33.6	44.8
64 QAM ¾	4.5	Single stream	3.5	9.9	16.6	33.5	50.4	67.2
64 QAM 1/1	6.0	Single stream	4.6	13.2	22.2	44.7	67.2	89.7
64 QAM ¾	9.0	2x2 MIMO	6.6	18.9	31.9	64.3	96.7	129.1
64 QAM 1/1	12.0	2x2 MIMO	8.8	25.3	42.5	85.7	128.9	172.1
64 QAM 1/1	24.0	4x4 MIMO	16.6	47.7	80.3	161.9	243.5	325.1

2.6. Planeamento rádio em LTE

O processo de cálculo da cobertura e capacidade em LTE pode ser realizado de forma arbitrária no entanto, deve cumprir o projecto de dimensionamento que será feito com base na procura por parte dos utilizadores e, consequentemente, nos valores necessários para cobrir os mesmos.

O dimensionamento da rede encontra-se dividido em três partes, como é possível observar na Figura 2.14, sendo que a primeira consiste na identificação dos requisitos da qualidade do sinal na fronteira da célula, a segunda no cálculo da cobertura de rede e a terceira no cálculo da capacidade.

Desta forma, na primeira fase, os requisitos da qualidade do sinal deverão ser expressos em débito binário ou através dos níveis de cobertura para *uplink* e *downlink* juntamente com os valores pretendidos para a capacidade de cada célula e distância entre *sites*. A qualidade de sinal exigida deverá ser determinada com base no *throughput* necessário para uma determinada probabilidade de cobertura, quer em *uplink*, como em *downlink*. Assim, torna-se necessário definir qual o tipo de transmissão – MIMO ou TxD; qual a diversidade recebida no equipamento do utilizador e na estação-base; qual a classe de potência do *RBS* - *Radio Base Station*; qual a potência de *output* do UE; qual a largura de banda e qual a banda de frequência.

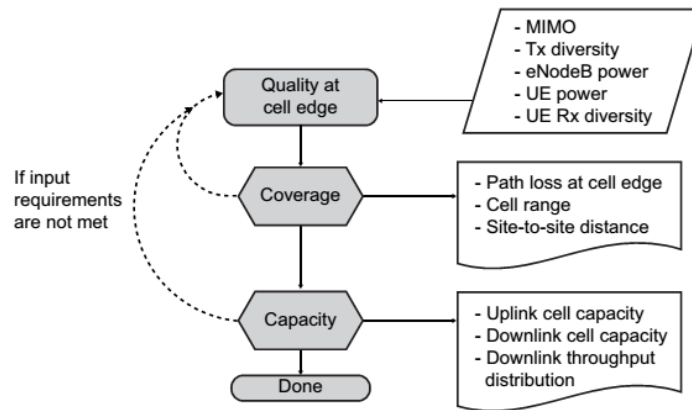


Figura 2.14 – Processos de dimensionamento LTE extraído de [17].

O passo seguinte no dimensionamento da rede passa pelo cálculo da cobertura rádio de rede necessária. Consoante o critério de qualidade, a cobertura pode ser calculada com recurso às *perdas de percurso*, à distância entre *sites* ou ao raio da célula. Posteriormente, se a cobertura não cumprir com os requisitos, a qualidade do sinal na fronteira da célula ou alguns dos pré-requisitos poderão ter de ser redefinidos.

Por fim, vai-se proceder ao cálculo da capacidade de cada célula. Esta será calculada a partir das limitações da cobertura e da qualidade do sinal na fronteira da célula. O cálculo da capacidade vai incluir os seguintes cálculos adicionais: cobertura em *uplink*; cobertura em *downlink*; capacidade em *uplink*; capacidade em *downlink* e por último, uma capacidade de célula alternativa para *downlink* bem como uma distribuição de débito binário.

2.6.1. Cobertura em Uplink

Numa ligação móvel o sinal recebido pelo UE é limitado pela ligação em *uplink* visto que a potência de transmissão do UE é mais baixa do que a potência da estação base - Figura 2.15. Como tal, e de acordo com [17], o *link-budget* tem início no dimensionamento da cobertura em *uplink* que é conseguida através do cálculo do débito binário; do SINR – cujo valor é tirado a partir do débito binário calculado; da sensibilidade do *enodeB*; da margem de interferência em *uplink* e da potência do UE por RB. Os parâmetros referidos são conseguidos com recurso às equações abaixo representadas.

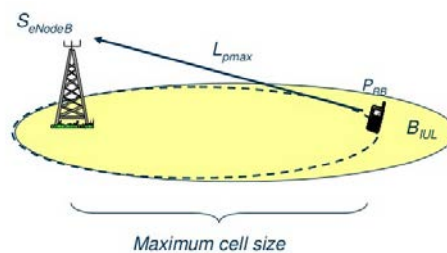


Figura 2.15 – Ligação *uplink* extraído de [18].

Na equação (2.1) é definido o requisito de qualidade da rede que é expresso através do débito binário.

$$R_{req, RB} = R_{req} / n_{RB} \quad (2.1)$$

onde,

$R_{req, RB}$	Débito binário por RB
R_{req}	Débito binário disponibilizado a um UE na fronteira da célula para uma determinada probabilidade de cobertura
n_{RB}	Número de RB que podem ser alocados de forma a conseguir o débito binário R_{req}

Nos sistemas reais o número de RB para cada UE é seleccionado pelo escalonador, num TTI de 1 ms, com base no *throughput* e nos requisitos de potência nesse instante de tempo. O débito binário calculado deve estar de acordo com o serviço para o qual o sistema foi dimensionado tendo em conta as considerações descritas de seguida. Para um valor de n_{RB} pequeno, o débito necessário consegue ser alcançado com um número reduzido de RBs levando assim a um aumento da capacidade, visto que existe um maior número de recursos disponíveis para outros utilizadores. Para um valor de n_{RB} elevado, os blocos de transmissão encontram-se dispersos num intervalo de frequência, com uma potência por RB inferior. Assim pode ser seleccionado um esquema de modulação mais baixo, ou um *coderate* superior, para alcançar o mesmo débito. Tal leva a que o receptor consiga descodificar a transmissão com um valor reduzido de SINR, como se pode verificar na Figura 2.16, conseguindo-se maiores valores de *perdas de percurso* e, conseqüentemente, um menor raio de cobertura.

É portanto necessário ter em consideração no algoritmo de escalonamento, uma solução de compromisso entre alcance e capacidade. Deste modo, em *uplink* todos os RBs devem ser consecutivos e, caso o escalonador seja eficiente, existe uma probabilidade reduzida de n_{RB} ser elevado.

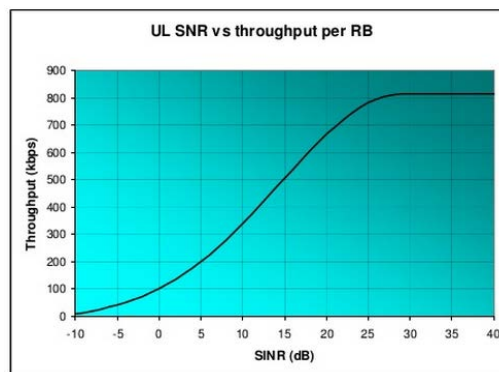


Figura 2.16 – Valores conseguidos de *throughput* em função do SINR extraído de [18].

Um parâmetro importante é a sensibilidade do *enodeB*, que é calculada de acordo com a equação (2.2), visto que representa a potência de sinal necessária no ponto de referência do sistema. Pode-se assumir que o *enodeB* tem uma figura de ruído de 2.5 dB com TMA e de 3 dB sem TMA.

$$S_{eNodeB} = N_t + N_f + 10 \log(W_{RB}) + \gamma = N_{RB,UL} + \gamma \quad (2.2)$$

onde,

S_{eNodeB}	Sensibilidade do <i>enodeB</i> [dBm]
N_t	Densidade de potência de ruído térmico: -174 dBm/Hz
N_f	Figura de ruído do <i>enodeB</i> [dB]
W_{RB}	Largura de banda por RB: 180 kHz
γ	SINR para o canal de tráfego em <i>uplink</i> [dB]
$N_{RB,UL}$	Ruído térmico por RB em <i>uplink</i>

Em LTE um utilizador não interfere com os restantes da célula visto que estes se encontram separados no domínio do tempo e frequência logo, o aumento de ruído (*noise rise*) em *uplink* depende apenas da interferência das células adjacentes. Desta forma, a margem de interferência vai compensar o *noise rise* introduzido. Assim, quanto menor for o número de utilizadores activo, menor é o valor do *noise rise* em *uplink*. No caso de um controlo de potência de malha fechada, a margem de interferência é obtida com recurso à equação (2.3).

$$B_{IUL} = \frac{1}{1 - \gamma Q_{UL} F} \quad (2.3)$$

onde,

B_{IUL}	Margem de Interferência em <i>uplink</i>
γ	SINR mínimo do serviço que introduz mais interferência
Q_{UL}	Factor de carga médio do sistema em <i>uplink</i>
F	Razão dos ganhos médios entre as células interferentes e as células de serviço

Todos os recursos vão partilhar a potência total emitida pelos UEs. Considerando que a todos os RBs é alocado o mesmo valor de potência, a potência por RB é dada pela equação (2.4).

$$P_{UE,RB} = P_{UE} / n_{RB} \quad (2.4)$$

onde,

$P_{UE,RB}$	Potência transmitida pelo UE por RB [dBm]
P_{UE}	Potência total emitida pelos UEs [dBm]

Deste modo, a atenuação máxima permitida em *uplink* é obtida com recurso à equação (2.5) onde se encontram inseridos os parâmetros acima mencionados e margens adicionais.

$$L_{pmax} = P_{UE,RB} - S_{eNodeB} - B_{IUL} - B_{LNF} - L_{BL} - L_{CPL} - L_{BPL} + G_a - L_j \quad (2.5)$$

onde,

L_{pmax}	Perdas máximas admitidas de propagação [dB]
B_{LNF}	Margem de desvanecimento <i>log-normal</i> [dB]
L_{BL}	Body-Loss [dB]
L_{CPL}	Perdas de penetração carros [dB]
L_{BPL}	Perdas de penetração edifícios [dB]
G_a	Soma do ganho da antena do <i>enodeB</i> com o ganho da antena do UE [dBi]
L_j	Perdas dos <i>jumbers</i> e de inserção do TMA [dB]

A margem de desvanecimento *log-normal* vai modelar a área de cobertura para uma determinada probabilidade. Isto é, através da adição desta margem fica assegurada uma probabilidade de estabelecimento e continuidade da ligação. Na Tabela 2.7 é possível observar os diversos valores da margem de desvanecimento para diferentes meios de propagação e probabilidades de cobertura.

No que diz respeito às perdas de penetração, estas contabilizam as atenuações associadas ao tipo de cobertura que se está a fornecer: *outdoor*; *indoor* ou *in-car* e, à morfologia da área em questão.

Tabela 2.7 – Margens de desvanecimento para diferentes valores do desvio padrão tirado de [17].

Meio de propagação	σ [dB]	Probabilidade de Cobertura				
		98%	95%	90%	85%	75%
Rural, Suburbano	6	5.5	2.9	0.5	-1.2	-3.7
Urbano	8	8.1	4.9	1.8	0.2	-3.4
Urbano Denso e Suburbano <i>Indoor</i>	10	10.6	6.7	3.1	0.6	-3.1
Urbano <i>Indoor</i>	12	13.1	8.4	4.2	1.3	-3.1
Urbano Denso <i>Indoor</i>	14	15.3	9.9	5.1	1.8	-3.2

2.6.2. Cobertura em Downlink

O *link-budget* em *downlink* é também realizado visto que tem como propósito determinar qual o sentido que limita a ligação e o débito que consegue ser oferecido na fronteira da célula, Figura 2.17, estabelecendo assim uma comparação com o débito exigido. De forma a ser conseguido o valor máximo de atenuação, e de acordo com [17], é necessário calcular previamente o máximo de perdas possíveis em *uplink*; o débito necessário; a potência por RB; a margem de interferência em *downlink*;

o *link-budget* em *downlink*; a sensibilidade do UE; o débito na fronteira da célula e por fim, o *link-budget* final. De seguida serão explicados mais pormenorizadamente alguns dos parâmetros mencionados.

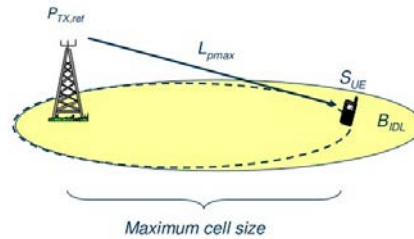


Figura 2.17 - Ligação Downlink extraído de [18].

O valor das perdas máximas permitidas em *uplink*, L_{pmax} , é o começo dos cálculos em *downlink* pois será necessário para se obter o *noise rise* estimado da presente ligação. Caso o L_{pmax} de *downlink* seja inferior ao de *uplink*, o *link-budget* de ambas as ligações deve ser recalculado, incluindo o *noise rise*. Respeitante à potência em LTE, esta é partilhada por todos os RBs. Como tal, não existe controlo de potência para cada RB tendo-se assim que os utilizadores são escalonados a um ritmo elevado, a cada milissegundo. Assim, a potência por RB é dada pela equação (2.6).

$$P_{tx, RB} = P_{nom, ref} / n_{RB} \quad (2.6)$$

onde,

$P_{tx, RB}$	Potência por <i>resource block</i>
$P_{nom, ref}$	Soma das potências de todas as unidades rádio da célula no ponto de referência [W]

O *noise rise* em *downlink*, na fronteira da célula é tirado pela equação (2.7) e vai variar consoante as curvas representadas na Figura 2.18.

$$B_{IDL} = 1 + \frac{P_{tx, RB} Q_{DL} F_c}{N_{RB, DL} L_{sa, cell range}} \quad (2.7)$$

onde,

B_{IDL}	<i>Noise Rise</i> em <i>downlink</i>
Q_{DL}	Factor de carga em <i>downlink</i>
F_c	Razão entre a potência média recebida das células vizinhas e a potência da célula de serviço na fronteira da célula
$N_{RB, DL}$	Ruído térmico por RB em <i>downlink</i> , definido pela equação (2.2) sendo que o valor de N_f para um UE é igual a 7 dB

$L_{sa,cell\ range}$

Atenuação do sinal em *downlink*, correspondente ao L_{pmax} , dada pela equação (2.8)

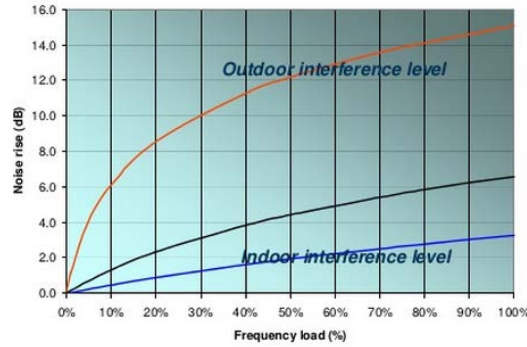


Figura 2.18 – Noise Rise em *downlink* na fronteira da célula extraído de [18].

$$L_{sa,cell\ range} = L_{pmax} + L_{BL} + L_{CPL} + L_{BPL} - G_a + L_j \quad (2.8)$$

Deste modo, o *link-budget* em *downlink* é conseguido com recurso à equação (2.9).

$$L_{pmax} = P_{tx,RB} - S_{UE} - B_{IDL} - B_{LNF} - L_{BL} - L_{CPL} + G_a - L_j \quad (2.9)$$

onde,

L_{pmax} Atenuação máxima em *downlink* [dB]
 S_{UE} Sensibilidade do UE dada pela equação (2.10) [dBm]

$$S_{UE} = N_t + N_f + 10 \log(W_{RB}) + \gamma = N_{RB,DL} + \gamma \quad (2.10)$$

onde,

$N_{RB,DL}$ Ruído térmico por RB em *uplink*
 γ SINR na fronteira da célula obtido com recurso à equação (2.11) [dB]

$$\gamma = P_{tx,RB} - L_{pmax} - N_{RB,DL} - B_{IDL} - B_{LNF} - L_{BL} - L_{CPL} - L_{BPL} + G_a - L_j \quad (2.11)$$

O débito oferecido por RB passa a ser definido pelo SINR estimado da fronteira da célula. O débito resultante é assim multiplicado pelo número de RBs resultando no débito máximo oferecido na fronteira da célula. A partir do valor calculado é possível observar se a ligação é limitada por *uplink* ou por *downlink* isto porque, caso R seja superior ao débito pretendido, R_{req} , a ligação é limitada por *uplink* e o *link-budget* está terminado. Caso contrário a ligação é limitada por *downlink*, sendo assim necessário recalcular o raio máximo da célula, através do valor de R_{req} , e os restantes parâmetros do *link-budget* de *downlink*.

2.6.3. Capacidade em Uplink

O dimensionamento da capacidade é importante para a fase seguinte, a do dimensionamento da ligação de transmissão e dos *enodeBs*.

Os cálculos da capacidade são baseados no desempenho da célula *target*. Através da distribuição dos utilizadores e da geometria da rede é possível estimar qual o *throughput* para a fronteira da célula.

O método de cálculo é especificado para um determinado factor de carga visto que será encontrada a capacidade máxima que a célula de serviço consegue suportar num determinado momento, tendo em conta o factor de carga das células vizinhas. É pouco provável que todas as células do sistema estejam completamente carregadas na mesma altura. Deste modo, para determinar a capacidade em *uplink*, é necessário efectuar o cálculo do SINR e do *throughput* de cada célula.

No que diz respeito ao SINR, o seu valor será conseguido de forma idêntica à do dimensionamento da cobertura. O débito por RB, $R_{RB,UL}$, é originado pelo SINR médio e pelo número de recursos alocados, n_{RB} . Ao fazer variar a carga Q_{UL} na equação (2.3), o débito médio por utilizador presente na equação (2.12) não vai sofrer qualquer tipo de variação. No entanto o débito por célula e o raio de cobertura da mesma vão sofrer alterações como é visível na equação (2.13).

$$R_{avg,UL} = R_{RB,UL}(n_{RB} - n_{PUCCH} - n_{PRACH}) \quad (2.12)$$

$$T_{célula,UL} = Q_{UL}R_{avg,UL} \quad (2.13)$$

O débito médio por utilizador, $R_{avg,UL}$, é dimensionado de forma proporcional ao número de RBs, n_{RB} , que são tirados a partir da relação com a largura de banda presente na Tabela 2.3. Em *uplink*, um ou mais RBs são reservados para o canal PUCCH, para os utilizadores que se encontram em modo *idle*. Por este motivo, o número de RBs disponíveis para o cálculo da capacidade em *uplink* é reduzido n_{PUCCH} . O mesmo acontece com o canal PRACH, decrementando-se assim n_{PRACH} . Assim, é possível dizer que a capacidade da célula em *uplink* é dada pela equação (2.14).

$$Capacidade = T_{RB} \times Q \times (LB - 2) \quad (2.14)$$

2.6.4. Capacidade em Downlink

As fases pelas quais passa a obtenção da capacidade em *downlink* vão ser as mesmas que em *uplink*. A capacidade em *downlink* é obtida de forma diferente na medida em que não é calculada com o SINR da fronteira da célula (2.7) mas sim com o SINR da localização média na célula. Assim, é necessário definir a margem de interferência média, $B_{DL-noise\ rise}$, através de (2.15) para a respectiva localização.

$$B_{DL-noise\ rise} = 1 + \frac{P_{tx,RB} Q_{DL} F}{N_{RB,DL} L_{sa,cell\ range}} \quad (2.15)$$

Deste modo o SINR médio resultante, $\gamma_{DL,avg}$, é dado pela equação (2.16) onde, o parâmetro H vai representar a relação entre a atenuação média do sinal da célula de serviço e a atenuação média do sinal a uma determinada distância da antena do *site*. Este factor vai depender da geometria do *site*, do diagrama de radiação da antena, do expoente de propagação do sinal e da altura da antena.

$$\gamma_{DL,avg} = \frac{P_{tx,RB}}{B_{DL-noise\ rise} N_{RB,DL} H L_{sa,cell\ range}} \quad (2.16)$$

Tal como em *uplink* o débito médio por utilizador da equação (2.17) é dimensionado de forma proporcional ao número de RBs, n_{RB} , que é tirado a partir da relação com a largura de banda visível na Tabela 2.3.

$$R_{avg} = n_{RB} R_{RB,DL} \quad (2.17)$$

O *throughput* da célula em *downlink* é assim conseguido com recurso à equação (2.18).

$$T_{célula,DL} = Q_{DL} n_{RB} R_{RB,DL} \quad (2.18)$$

2.6.5. Determinação do raio de cobertura

Depois da realização dos cálculos acima mencionados, torna-se possível determinar qual o raio de cobertura de cada *enodeB* tendo em conta os valores de atenuação máxima permitida. Desta forma, após a aplicação das equações (2.19), (2.20), (2.21) e (2.22) tiradas de [17], obtém-se o valor do alcance do respectivo *enodeB*.

$$R = 10^\alpha \quad (2.19)$$

$$\alpha = \frac{L_p - A + 13.82 \log(h_b) + a(h_m)}{44.9 - 6.55 \log(h_b)} \quad (2.20)$$

$$a(h_m) = 3.2(\log(11.75 \times h_m))^2 - 4.97 \quad (2.21)$$

$$L_p = A - 13.82 \log(h_b) - a(h_m) + (44.9 - 6.55 \log(h_b)) \log R \quad (2.22)$$

onde,

R	Distância [km]
L_p	Atenuação máxima da ligação [dB]

A	Constante de atenuação dada em função da frequência e pela Tabela 2.8 [dB]
h_b	Altura do <i>enodeB</i> [m]
h_m	Altura do equipamento do utilizador [m]
$a(h_m)$	Factor de correcção para antenas à altura dos veículos – a possui um valor de 0 dB para $h_m = 1.5m$ [dB]

Tabela 2.8 – Valores de A para o modelo de propagação *Okumura-Hata* tirado de [17].

Ambiente de Propagação	Frequência [MHz]							
	700	850	900	1700	1800	1900	2100	2600
Urbano	144.3	146.2	146.8	153.2	153.8	154.3	155.1	157.5
Suburbano	133.5	136.1	136.9	145.4	146.2	146.9	147.9	151.1
Rural	125.1	127.0	127.5	133.6	134.1	134.6	135.3	137.6
Aberto	116.1	117.8	118.3	123.8	124.3	124.8	125.4	127.5

2.7. Femto-Células

As femto-células trouxeram um paradigma às comunicações móveis, principalmente ao nível da tecnologia LTE. A reduzida área de cobertura celular, aplicada principalmente em áreas de cobertura interior, permite aumentar a capacidade do sistema na globalidade, aumentando a eficiência espectral. Contudo a interferência resultante nas macro-células poderá colocar em causa o desempenho global do sistema, limitando a capacidade em algumas células, devido à reutilização de recursos rádio.

2.7.1. Arquitectura de Rede

A normalização das femto-células só foi efectuada depois da normalização do conceito de *3G wireless*. Assim, os problemas associados à normalização das femto-células em *3G* foram abordados de forma a influenciar alterações no desenvolvimento das mesmas. As femto-células podem também contribuir para o desenvolvimento de serviços em LTE na medida em que o número de *transceivers* dos *enodeBs* passa a ser superior. Tal vem introduzir um problema visto que existe um número limitado de torres rádio à disposição dos operadores. Ao utilizar femto-células, os operadores conseguem aumentar a cobertura para qualquer local desde que exista uma infraestrutura de acesso de banda larga. Desta forma a capacidade da fornecer cobertura LTE sem ser preciso aumentar o número de portadoras será significativamente superior.

Na Figura 2.19 é possível observar um diagrama de rede de LTE que inclui uma rede de femto-células. Nesta, o UE vai-se encontrar ligado ao *HeNB* – *Home enodeB*, que é um *enodeB* em pequena escala, que se encontra na casa do utilizador, e que tem como finalidade fornecer cobertura LTE no local onde

o utilizador o colocar. O *HeNB* está interligado à rede móvel do operador através de uma *gateway* de banda larga - *broadband access gateway*, e de uma interface de banda larga. O *core* da rede do operador obtém acesso ao *HeNB* ligado via uma *gateway* de segurança (*security gateway*) que tem como finalidade proteger o *core* contra ataques à rede. Do lado seguro da *gateway* de segurança encontra-se o *HeNB GW – Home enodeB Gateway*. O *HeNB GW* é responsável por agregar o tráfego de vários *HeNBs* e enviá-lo para a rede EPC do operador. A interface *S1-MME* transporta dados através da interface *S1-MME* do LTE. O *HeNB* comunica com a rede EPC através da interface *S1-U* do LTE via a *gateway* de segurança.

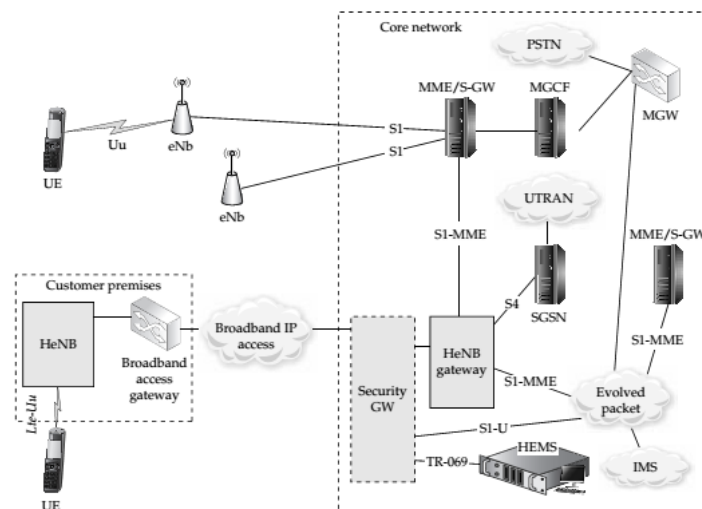


Figura 2.19 – Arquitetura de rede home LTE extraído de [19].

Quando um UE por qualquer motivo troca de femto-célula, é estabelecida uma conexão com a femto-célula que lhe é mais próxima e a respectiva autenticação. De seguida, a femto-célula cria uma associação à *gateway* que vai resultar na alocação de um endereço IP para o UE. Uma vez terminado o procedimento de ligação a uma femto-célula, o utilizador passa a estar capacitado para aceder aos serviços do operador. Quando o UE se desloca, é efectuado um *handover* entre femto-células. A nova femto-célula cria uma associação com a *gateway* enquanto a antiga liberta a ligação que tinha estabelecida com o UE, fazendo assim com que a *gateway* acompanhe a localização do utilizador. Durante todo o processo, o endereço de IP atribuído ao UE não é alterado. Quando é efectuado troca de tráfego entre o UE e uma determinada entidade, é usado como IP de destino o IP atribuído ao dispositivo durante o procedimento de ligação. O IP encontra-se associado à *gateway* aonde o UE se encontra ancorado logo, a *gateway* vai reencaminhar o tráfego para o nó aonde o utilizador pertence. Deste modo, a *gateway* tem como funcionalidade omitir a mobilidade do utilizador da *Internet* e, ser um ponto fixo da rede através do qual todo o tráfego de e para o utilizador é transportado.

A arquitectura *flat IP* sobre a qual as femto-células assentam permite a fácil adição de femto-células na rede, como é visível na Figura 2.20; a não existência de problemas de escalabilidade das mesmas na

rede, visto que deixa de existir uma rede por camadas; uma reconfiguração de rede mínima; *backhaul* reduzido, bem como os custos operacionais da rede; e por fim, auto-configuração e otimização dos equipamentos.

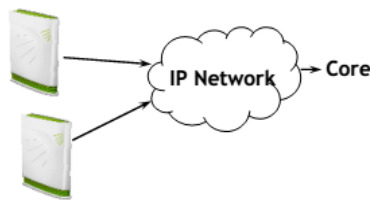


Figura 2.20 – Femto-células na arquitectura *flat IP* extraído de [20].

2.7.2. Redes Femto-celulares

O constante aumento da rede móvel tem vindo a ser solucionado com a sobreposição das femto-células nas redes já existentes. Existem três tipos de cenários onde estas podem ser aplicadas: em zonas residenciais; em zonas empresariais; ou em zonas públicas onde são denominadas de metro-células. A implementação da presente solução em ambientes empresariais é a mais complexa na medida em que é necessário um desenvolvimento e planeamento adicional dos problemas de radiofrequência, para a configuração e otimização automática, que vão ter um maior impacto neste ambiente do que nos restantes.

Cada um destes cenários pode ser implementado por cima das infraestruturas e tecnologias móveis já existentes como é representado na Figura 2.21.

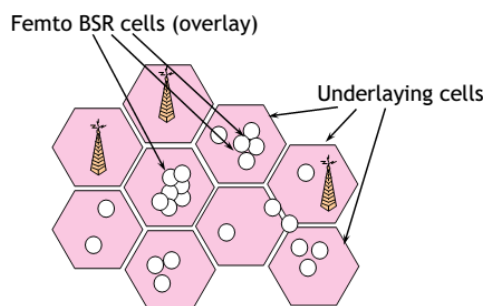


Figura 2.21 – Rede híbrida extraído de [20].

Quando a rede de femto-células se encontra sobreposta à rede macro-celular, existem três métodos de desenvolvimento que podem ser aplicados. Num primeiro, as duas camadas podem possuir a mesma frequência, Figura 2.22, o que vem introduzir uma determinada complexidade ao nível do planeamento da rede; a segunda opção passa por as duas camadas trabalharem com frequências diferentes, Figura 2.23, o que ajuda a reduzir os níveis de interferência entre redes; o terceiro método consiste num compromisso entre os dois métodos anteriormente apresentados onde alguns dos canais são partilhados e os restantes são reservados para as camadas superiores. Neste método as camadas

superiores conseguem redireccionar os dispositivos móveis que se encontram nas proximidades das femto-células e que se encontram nos canais partilhados, para canais dedicados das mesmas.

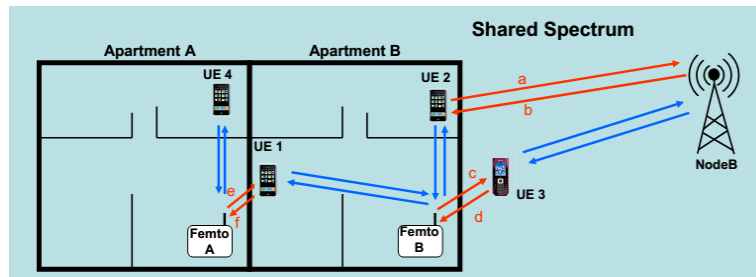


Figura 2.22 – Interferência com espectro partilhado extraído de [21].

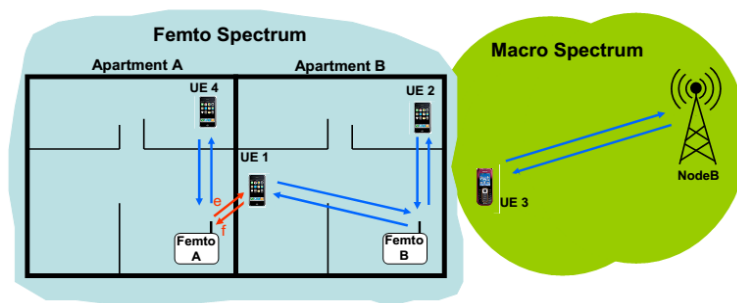


Figura 2.23 – Interferência com espectro dedicado extraído de [21].

Uma vez que os operadores não têm capacidade para atribuir canais dedicados às macro e femto-células, foram desenvolvidas técnicas avançadas de mitigação de interferência que conduzem a operações mais seguras e a um maior nível de QoS entre as duas camadas.

2.7.3. Controlo de acesso

De forma a evitar um congestionamento da rede femto-celular devido ao excesso de utilizadores, este tipo de células utiliza técnicas de controlo de acesso que têm como funcionalidade restringir ou autorizar o acesso de UEs à rede.

As femto-células possuem três modos de acesso: *closed access control mode* - Figura 2.24, *open access control mode* - Figura 2.25 e, o *hybrid access control mode* - Figura 2.26. O modo de controlo fechado, conhecido como CSG, é bastante utilizado em soluções residenciais e, apenas os utilizadores que se encontram registados é que estão habilitados a utilizar os recursos da rede femto-celular. Os UEs autorizados são os que se encontram na *ACL – Access Control List*, que está guardada em cada femto-célula, que tem capacidade para 32 entradas e que é gerida pelo dono de cada femto-célula ou pelo próprio operador. Sempre que um UE tentar aceder à rede, a femto-célula vai efectuar um pedido do IMSI, para verificar se este se encontra na ACL e, caso o UE não pertença à mesma, a femto-célula

rejeita a chamada. Assim a identificação do UE é realizada através da utilização do IMSI sendo que, se o IMSI não se encontra disponível, é atribuído um ao UE pela femto-célula à qual ele pertence.

Para um UE que não pertença à CSG, a femto-célula efectua um pedido de IMSI para o UE e tenta registá-lo na *gateway*. A *gateway* efectua então o controlo de acesso e pode ou não autorizar o utilizador a usar a rede. Caso o UE possa utilizar a rede, a femto-célula inclui o seu CSG ID na mensagem inicial para o *core* da rede e este vai efectuar o controlo de acessos do UE com base no seu CSG ID.

O controlo de acessos é efectuado durante o procedimento de *LAU – Location Area Update*, de *RAU – Routing Area Update* ou de *GPRS attach*, que ocorre quando existe uma tentativa do UE de mudança de uma macro para uma femto-célula. O LAU é iniciado porque as femto e macro-células possuem *LA*s – *Location Areas* diferentes. O procedimento de LAU iniciado pelo UE só tem continuidade para o resto da rede se a femto-célula verificar que o UE pertence à ACL desta. Um processo idêntico ao explicado ocorre no RAU. Os motivos de utilização deste modo estão relacionados com a limitação dos recursos da rede e com questões de segurança.

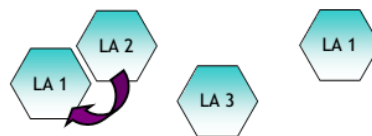


Figura 2.24 – Closed Access extraído de [20].

Em modo de controlo aberto, conhecido como OSG, não existe qualquer controlo de utilizadores e costuma ser usado para cobrir zonas de sombra das macro-células ou para dar cobertura a alguns locais *indoor*. Assim, para um UE que não pertença à OSG, não é realizado o pedido do IMSI e o registo do UE na *gateway* é efectuado através do *TMSI – Temporary Mobile Subscriber Identity/PTMSI – Packet Temporary Mobile Subscriber Identity*. A *gateway* deve sempre aceitar o pedido de acesso e atribuir um ID ao utilizador. Para um UE que pertença à OSG, uma vez que não existe um ID para aceder à rede, a femto-célula não inclui este tipo de informação na mensagem logo não existe controlo de acesso no *core* da rede.

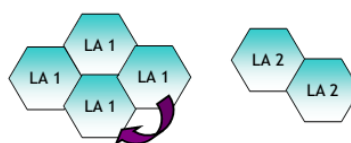


Figura 2.25 – Open Access extraído de [20].

No modo híbrido, as femto-células apresentam uma combinação do modo aberto e do modo fechado ao mesmo tempo. Assim uma femto-célula híbrida é uma célula que, para além de possuir um CSG ID, permite também que os utilizadores que não são membros usem a cobertura disponível. No

entanto, o sinal disponibilizado será limitado na medida em que tais utilizadores só se encontram autorizados a possuir serviços com um determinado nível de QoS e a ter baixa prioridade comparativamente aos utilizadores que pertençam à CSG. Apesar de neste modo ser permitido o acesso à rede aos utilizadores que não estão na CSG, é necessário existir forma de controlar quais são os UEs que têm permissões e quais os que não têm para atribuir o respectivo nível de QoS. Embora o controlo de acesso seja opcional, a femto-célula necessita da informação de quais os UEs que são membros da CSG pois, no caso dos UEs que não o são, a femto-célula pode limitar a capacidade destes e, quando atingido esse limite, o UE é reencaminhado para a macro célula de serviço devido aos recursos limitados das femto-células.



Figura 2.26 – Hybrid Access extraído de [20].

2.7.4. Técnicas de Coordenação de Interferência - ICIC

Em LTE existe um conjunto de técnicas disponíveis para que a interferência entre células vizinhas seja minimizada. Os esquemas *ICIC - Inter-Cell Interference Coordination*, definidos pela *Release 8* incidem principalmente no domínio da partilha de frequências entre células e no ajuste da potência transmitida pelas mesmas. A interface X2 inclui sinalização para transporte de informação relativa à interferência e ao escalonamento. Os métodos ICIC são caracterizados da forma apresentada na Tabela 2.9.

Tabela 2.9 – Esquemas presentes nos métodos ICIC tirado de [10].

Esquemas	Caracterização
Esquemas Reactivos	Baseados em medidas já realizadas. Estas medidas são utilizadas para avaliar a performance da rede e, caso a interferência detectada seja elevada, são tomadas as decisões apropriadas para a redução da mesma. As decisões passam pelo ajuste dos níveis da potência transmitida ou por acções de escalonamento de dados.
Esquemas Pró-activos	Neste esquema os <i>enodeBs</i> informam os seus vizinhos de como vão realizar o escalonamento dos variados utilizadores para que os <i>enodeBs</i> vizinhos tenham em conta a informação recebida nas suas decisões. Este tipo de esquemas é suportado por troca de sinalização entre <i>enodeBs</i> através da interface X2.

As técnicas ICIC do *3GPP Release 8*, Figura 2.30, foram concebidos para melhorar a performance dos canais de partilha de dados, quer em *uplink* - PUSCH, quer em *downlink* - PDSCH. No que diz respeito a configurações de potência em *downlink*, os esquemas pró-activos ICIC são facilitados pelo indicativo *standard RNTP – Relative Narrowband Transmit Power*. Este é um indicador por *PRB* –

Physical Resource Block para os *enodeBs* vizinhos, que informa qual o nível máximo previsto de potência a transmitir. A partir desta informação os *enodeBs* vizinhos ficam a saber a que PRBs é que a célula vai atribuir um maior nível de potência e, consoante a informação obtida, vão ser atribuídos diferentes padrões de potência às respectivas células, permitindo assim uma melhoria das condições de SINR para os UEs. É específico da implementação a frequência com que um novo indicador RNTP é enviado de um *enodeB*. Ao atribuir diferentes níveis de potência a cada PRB, torna-se possível configurar dinamicamente diferentes padrões de reutilização. Estes padrões variam desde *full reuse*, onde é atribuído um nível de potência igual a todos os PRBs; a *hard reuse* - Figura 2.27; a *fractional reuse*, como é visível na Figura 2.28; a *soft reuse*, onde é efectuado um escalonamento ao longo de toda a largura de banda disponível e, onde são atribuídos diferentes níveis de potência aos utilizadores - Figura 2.29. Neste último tipo de reutilização, os utilizadores que se encontram na fronteira da célula possuem maiores níveis de potência enquanto, os que se encontram junto do *enodeB* vão ter atribuídos PRBs com menores níveis de potência. Quando o mesmo utilizador possui vários PRBs alocados, cada um deles deve ter a mesma potência de transmissão. O conceito de *fractional reuse* passa pela atribuição de um padrão de reutilização igual a um, dentro da banda de frequência, aos utilizadores que se encontram perto do *enodeB* enquanto, para os que se encontram na fronteira da célula, é atribuído um padrão de reutilização na banda complementar de frequência com, por exemplo, uma reutilização *hard frequency* de 3 - Figura 2.27.

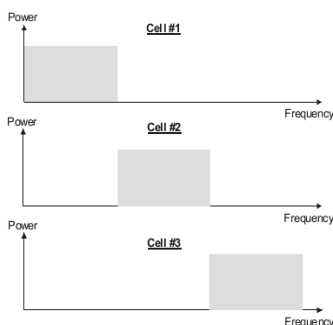


Figura 2.27 – Transmissão Downlink com Hard Reuse extraído de [10].

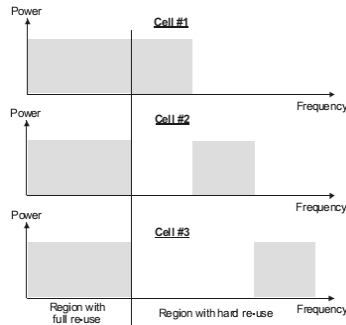


Figura 2.28 - Transmissão Downlink com Fractional Reuse extraído de [10].

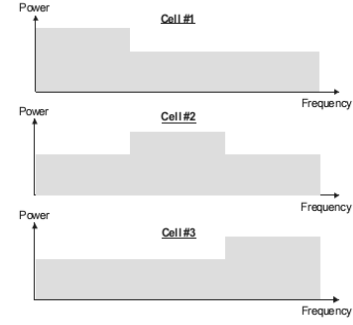


Figura 2.29 - Transmissão Downlink com Soft Reuse extraído de [10].

Ao nível de configurações de potência em *uplink*, as técnicas pró-activas ICIC são baseadas no *HII* – *High Interference Indicator*. Este indicador consiste no envio de uma mensagem, através da interface *X2* aos *enodeBs* vizinhos, que possui apenas um bit por PRB. Este bit vai indicar se as células de serviço vão escalonar os UEs que se encontram na sua fronteira e que vão causar uma interferência elevada entre células. Diferentes mensagens *HII* podem ser enviadas da célula de serviço para diferentes *enodeBs*. A decisão de quando é que é enviada uma nova mensagem *HII* de um *enodeB* e da acção do mesmo aquando da recepção de uma mensagem não está normalizada pelo *3GPP* e é especificada pelos fornecedores. O principal conceito dos *HII* passa por informar os *enodeBs* vizinhos da célula de serviço de quais os PRBs que a mesma pretende escalonar como utilizadores com elevada

interferência. Assim, os *enodeBs* vizinhos passam a ter como objectivo escalonar os utilizadores de reduzida interferência nos PRBs de elevada interferência, evitando assim escalonar os utilizadores que se encontram na fronteira de duas células com o mesmo PRB. O LTE possui também um esquema reactivo para *uplink* que é baseado no *OI – Overload Indicator*. Neste esquema o *enodeB* mede qual o nível de potência da interferência e de ruído em *uplink* de um conjunto de PRBs e, tendo por base os resultados obtidos, cria relatórios *OI*. Relatórios *OI* reduzidos, médios ou elevados podem ser enviados, através da interface *X2*, às células vizinhas. É de ter em conta que o *OI* incide na interferência entre células logo, não inclui assim qualquer informação do tráfego transportado ou da interferência gerada pelos utilizadores na célula de serviço. Uma das utilizações da informação *OI* que é trocada entre *enodeBs* passa por um ajuste dinâmico dos parâmetros de controlo de potência em malha aberta, em *uplink*, de forma a manter o nível máximo de interferência e ruído desejado.

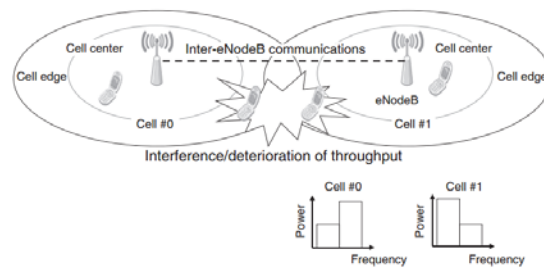


Figura 2.30 – Técnicas ICIC extraído de [22].

Capítulo 3

Aspectos para análise de desempenho

Neste capítulo será apresentada qual a abordagem seguida na realização da presente dissertação. Assim, será efectuada a apresentação do simulador utilizado, quais as suas funcionalidades, como é que se encontra estruturado e os fluxogramas do mesmo de forma a ser mais perceptível o seu modo de funcionamento. Vão também ser apresentados alguns dos estudos que foram necessários realizar, de modo a ser possível definir o cenário ideal para a realização das simulações propostas e, vai ser apresentado qual o cenário de estudo.

3.1. Simulador Vienna System Level

Uma vez que a solução em estudo ainda se encontra em estudo e desenvolvimento, torna-se necessário a realização de simulações de forma a conseguir testar os cenários definidos e a otimizar o já desenvolvido no âmbito das femto-células em LTE. Desta forma, torna-se necessário trabalhar com simuladores precisos de modo a aferir o desempenho da rede a diferentes níveis. Assim foi escolhido o simulador *Vienna System Level* [23] de forma a ser possível a realização de determinados testes ao nível do sistema tais como ao escalonamento, à mobilidade dos utilizadores e à gestão de interferência.

3.1.1. Funcionalidades

Os motivos que levaram à escolha do presente simulador estão relacionados com o facto de este ser facilmente disponibilizado para fins académicos, existindo assim uma colaboração entre diferentes instituições de ensino e centros de investigação e, por possuir as funcionalidades que são necessárias para a realização do estudo que se pretende efectuar. No que diz respeito à implementação, este simulador oferece uma grande flexibilidade visto que a sua construção passa por uma programação orientada por objectos. O código do mesmo é modular e tem uma estrutura baseada em objectos o que resulta num código mais organizado, perceptível e de simples manutenção sendo assim facilitada a inserção de novo código no simulador.

Na Figura 3.1, é possível observar o diagrama de blocos com a estrutura do *Vienna System Level Simulator*. Neste, a parte correspondente ao *core* encontra-se dividida em dois principais blocos: o do modelo de medidas da ligação e o do modelo de desempenho da ligação. É importante mencionar que a camada física não se encontra presente neste simulador visto que tal o torna mais simples em algumas implementações de determinados modelos.

O modelo de medidas da ligação reflete a qualidade da ligação mas não considera as medidas de qualidade para efectuar a adaptação da ligação e alocação de recursos. Por outro lado, e tendo como base os resultados obtidos da qualidade da ligação, o modelo de desempenho da ligação vai determinar qual o *BLER* – *Block Error Ratio*, e débito da ligação. A qualidade da ligação é dada pelo SINR enquanto para a qualidade do canal, para além do próprio canal, também é necessário saber a fracção do canal que foi atribuída a um UE especificamente.

Na qualidade da ligação é mapeado o conjunto de SINRs para um único valor de SINR, através das curvas *AWGN* - *Additive White Gaussian Noise*, via a função de compressão *MIESM* - *Mutual Information Effective Signal to Interference and Noise Ratio Mapping*.

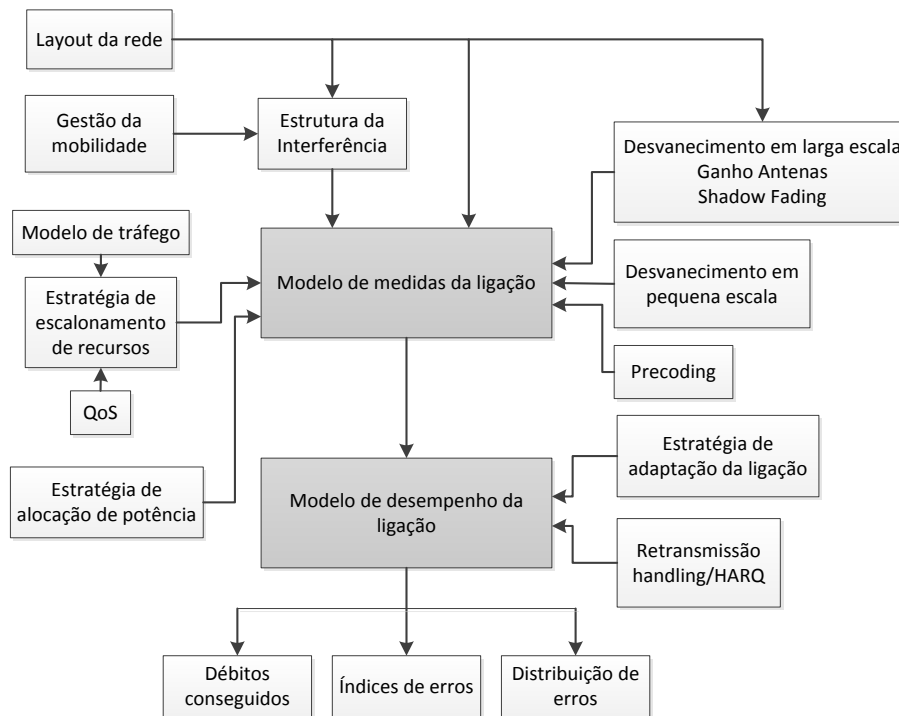


Figura 3.1 – Diagrama de blocos do simulador *Vienna System Level* adaptado de [24].

No final da simulação será apresentado um gráfico com a estrutura da rede na *ROI – Region of Interest*, composta pelos *enodeBs*, respectiva área de cobertura e utilizadores e um gráfico com os débitos conseguidos e índices de erros da rede.

3.1.2. Implementação

Tal como mencionado no subcapítulo anterior, o simulador escolhido possui uma implementação orientada aos objectos, sendo que as relações entre os mesmos se encontram definidas no esquema da Figura 3.2. Assim, cada elemento da rede a simular tem uma classe que o caracteriza e que contém os dados e estruturas necessárias para a obtenção dos resultados pretendidos.

No que diz respeito à geração da rede, existem várias topologias de rede que podem ser adoptadas: *sites* tri-sectorizados, com ou sem *tilt*; *sites* tri-sectorizados com femto-células; *sites* com seis sectores e *tilt*; *sites* omnidireccionais e, finalmente, *sites* de uma rede importada. Relativamente à distribuição dos *enodeBs* na rede, estes podem estar assentes sobre uma grelha hexagonal ou podem não se encontrar equidistantes caso seja seleccionada a importação de mapas. Cada *enodeB* possui um escalonador, como é visível na Figura 3.2, e que pode ser *round robin*; *best cqi*; *proportional fair* ou *FFR – Fractional Frequency Reuse*. Ao nível dos modelos de tráfego existentes, os serviços que são possíveis de atribuir são *ftp*, *http*, *video*, *voip* e *gaming* no entanto, por omissão é adoptado um *full buffer* ou seja, em *downlink* são efectuadas transmissões por vários utilizadores, tantas quanto for possível. Geralmente um escalonador vai atribuir a cada UE um conjunto de recursos físicos e, para

cada conjunto, o *precoding* e *MCS – Modulation and Coding Scheme* apropriado. Porém, a atribuição efectiva é realizada consoante o algoritmo de escalonamento e o *feedback* recebido por parte do UE.

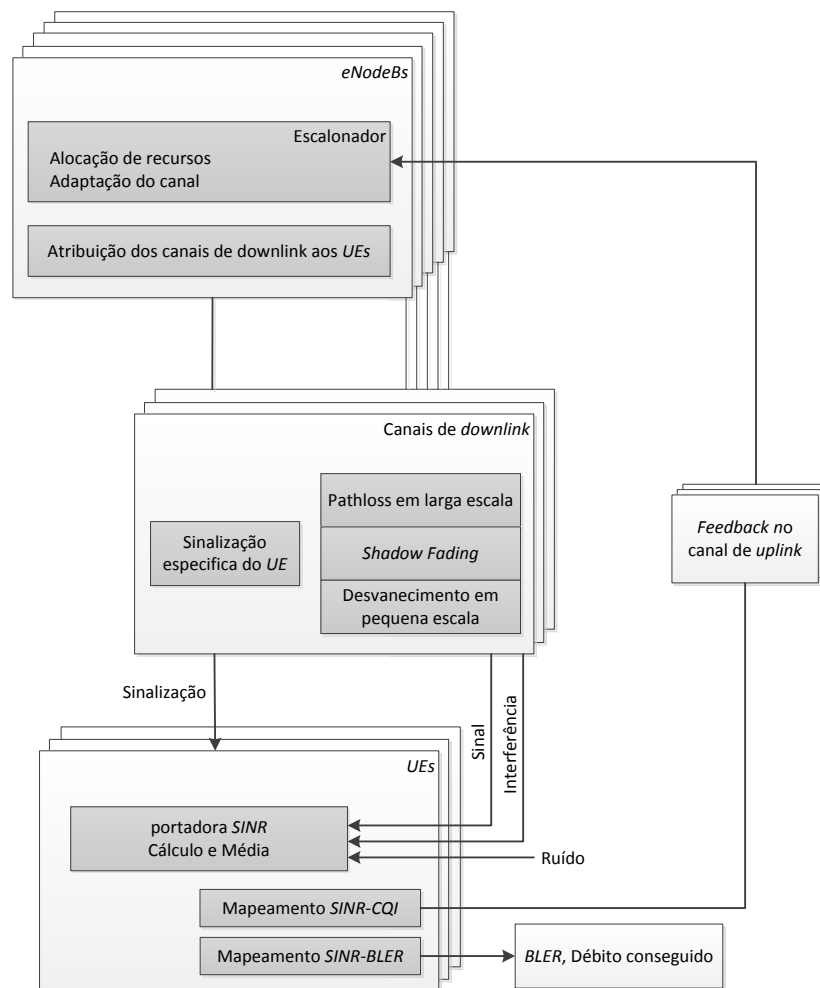


Figura 3.2 – Diagrama com esquema das classes do simulador adaptado de [24].

Respeitante à distribuição dos utilizadores e das femto-células, esta pode tomar uma forma homogénea na ROI ou uma forma constante por célula. O cálculo das perdas máximas permitidas, que será necessário para a determinação do SINR, é efectuado consoante o modelo e meio de propagação seleccionados. Assim é possível optar por um modelo de espaço livre, *COST 231* [25], *TS 36.942* [26] ou *TS 25.814* [27] e por um meio urbano micro, urbano macro, suburbano macro ou rural. O SINR será determinado pelo nível de sinal, interferência e níveis de potência de ruído que por sua vez estão dependentes da disposição da célula, que é dada pelas posições dos *enodeBs*, perdas de larga escala e *shadow fading* e, pela variação temporal do desvanecimento em pequena escala. Na Figura 3.3 é visível um exemplo obtido pelo simulador das perdas de larga escala de um *site* e do *shadow fading* que o mesmo possui. Por fim, neste simulador é possível testar quatro modos de transmissão sendo eles SISO, TxD, OLSM, CLSM e, toda a simulação é realizada durante um valor de TTI e ao longo da ROI na qual se encontram posicionados os *enodeBs* e UEs e onde se vai realizar a transmissão do DL-SCH. Por último, os modelos de geração de canal que se encontram disponíveis são o *ITU*

Pedestrian A channel, PedA [28]; *ITU Pedestrian B channel, PedB* [28]; Extensão dos modelos *ITU* de canal para sistemas de banda larga, *extPedB* [29]; *ITU Vehicular A channel, VehA* [28]; *ITU Vehicular B channel, VehB* [28] e o modelo de canal *WINNER+* [30].

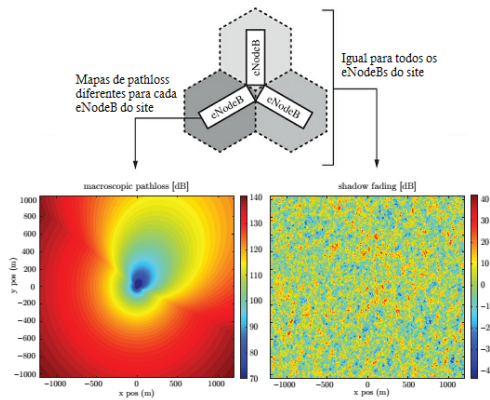


Figura 3.3 – Esquerda: perdas de larga escala de um *enodeB*; Direita: *shadow fading* de um *site* extraído de [24] e [31].

Depois de tudo o que foi acima mencionado, no anexo A é apresentado o pequeno pseudo-código do ciclo principal do simulador [31], onde são visíveis alguns dos passos já explicados.

Na Figura 3.4 é possível observar um exemplo da rede que é conseguida no final de uma simulação para um cenário com *enodeBs*, distribuídos de forma hexagonal, e tri-sectorizados.

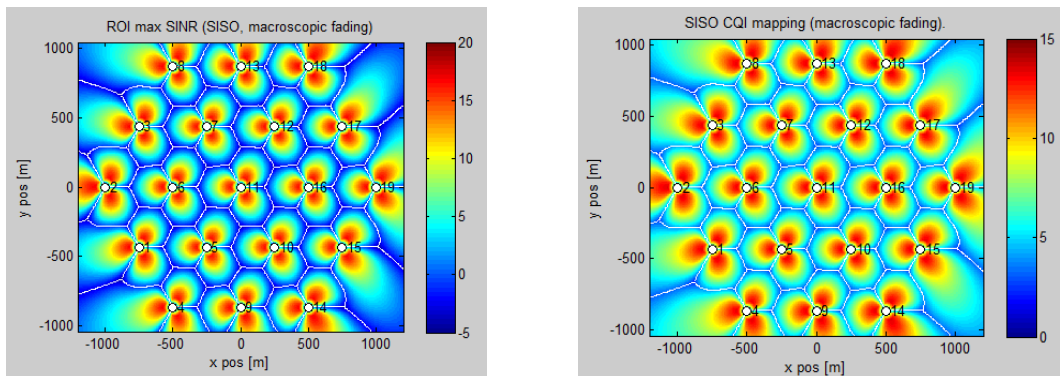


Figura 3.4 – Níveis de SINR e de CQI de uma rede hexagonal tri-sectorizada com *tilt* extraído de [31].

3.2. Modos de Transmissão

Tal como já mencionado, em LTE existem vários modos de transmissão sendo que os implementados são o SISO, TxD, OLSM e CLSM. Neste sentido, o presente ponto tem como finalidade perceber qual o modo que vai permitir a obtenção de maiores débitos e banda SINR.

Os primeiros modos a serem estudados foram o SISO e o TxD 2x2. De forma a ser possível chegar a algumas conclusões relativamente aos melhores débitos conseguidos, foram utilizados os resultados obtidos de um estudo já efectuado, com recurso ao *System e Link Level Simulators*, e que são visíveis

na Figura 3.5. Assim, no gráfico abaixo representado é estabelecida uma comparação entre o modo SISO e TxD ao nível do sistema e da ligação de uma rede móvel. Deste modo, é visível que os débitos conseguidos são superiores para o modo TxD face aos conseguidos com o SISO. Ao nível da camada, é possível concluir que a diferença entre os resultados nos simuladores *link level* e no *system level* é praticamente desprezável tendo em conta que os valores são muito semelhantes.

Respeitante à variação dos valores obtidos existe uma proporcionalidade entre o débito e o SINR visto que, quanto maior forem os valores de SINR, maior vão ser os valores do débito. Tal era expectável tendo em conta que valores superiores de SINR traduzem-se em valores inferiores de interferência. No entanto a partir de determinados valores de SINR, os valores de débito tendem a ser constantes. Assim, para o modo de transmissão TxD tal acontece para valores de SINR superiores a 20dB enquanto que com o modo de transmissão SISO, os valores de *throughput* estabilizam para valores de SINR superiores a 30dB. Apesar de serem conseguidos débitos superiores com TxD para os mesmos valores de SINR, o valor máximo atingido com SISO é superior ao valor máximo do modo TxD. Os débitos em TxD vão sofrer uma variação mais rápida com o aumento do SINR do que os do SISO sendo que, para valores de SINR superiores a 25dB, o débito vai tender a ser constante e a ter como valor 4.9Mbps. Com SISO os débitos também tendem a ficar constantes em torno dos 5.1Mbps mas, como este modo possui uma variação mais lenta, tal só acontece para valores de SINR superiores a 37dB.

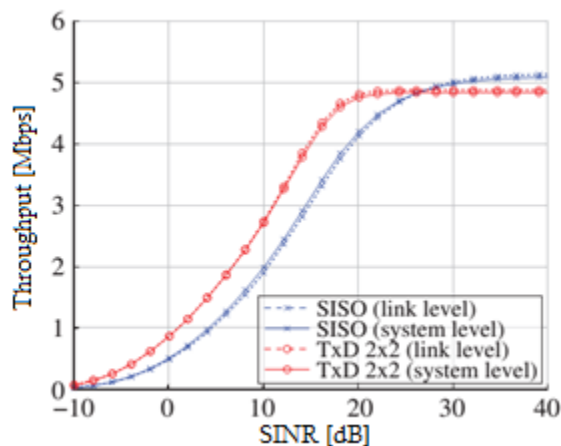


Figura 3.5 – Comparação do modo TxD com SISO adaptado de [32].

Estabelecendo agora a comparação entre o modo TxD e OLSM, a partir da Figura 3.6 é possível observar os débitos conseguidos na fronteira da célula e por utilizador para cada um dos modos de transmissão e para um escalonador *round robin* e *max C/I*. A simulação que permitiu a obtenção dos gráficos abaixo representados foi realizada mais uma vez com recurso ao simulador escolhido para a presente dissertação, para uma distribuição de utilizadores constante por célula, onde vão existir 20 utilizadores por cada sector e, para uma largura de banda de 5MHz.

Assim, para o escalonador *round robin*, o modo de transmissão que permite um melhor desempenho da rede é o OLSM visto que são conseguidos maiores débitos na fronteira de cada célula e, uma maior percentagem de utilizadores da rede vai ter acesso a débitos superiores. Ou seja, para o modo TxD, a probabilidade de um utilizador possuir débitos até 300kbps é de aproximadamente 72% enquanto para o modo OLSM, a probabilidade de serem atingidos débitos inferiores e iguais a 300kbps é de aproximadamente 92%.

Para o escalonador *max C/I*, verifica-se que com TxD existe uma maior probabilidade de serem conseguidos os mesmos valores de débito quando comparando com o modo OLSM e que, ao nível da fronteira de cada célula, o modo que possui probabilidades superiores é o OLSM. Isto porque, apesar da curva probabilística do modo OLSM ter uma variação mais lenta, esta possui valores até débitos de aproximadamente 23Mbps enquanto que no modo TxD, a mesma só possui valores para débitos até aproximadamente 12Mbps. Ao nível dos débitos conseguidos por utilizador para OLSM e TxD, os valores são bastante próximos sendo que são ligeiramente superiores para o modo TxD. Deste modo, e utilizando o exemplo acima descrito para o modo TxD, a probabilidade de um utilizador possuir um débito até 300kbps é de aproximadamente 92% enquanto para o modo OLSM, a probabilidade de serem obtidos valores de débito no mesmo intervalo é de aproximadamente 90%. Assim, tendo em conta que a diferença percentual entre os débitos por utilizador é reduzida, o modo de transmissão mais eficaz para um escalonador *max C/I* é o OLSM.

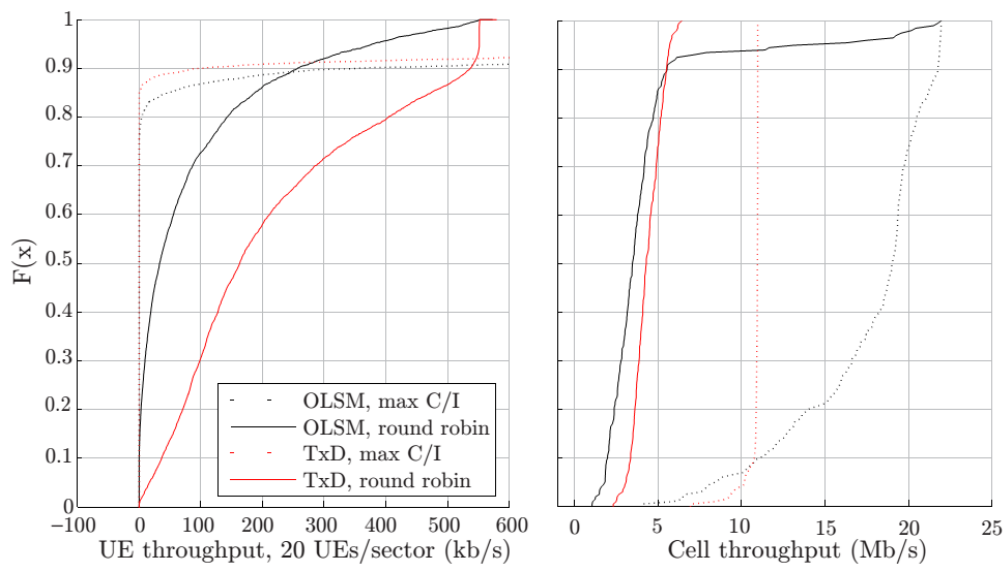


Figura 3.6 – Débitos conseguidos pelos UE e na fronteira da célula, para uma LB=5MHz extraído de [31].

Na Figura 3.7 e Figura 3.8 estão representados dois gráficos que resultam da comparação entre o modo SISO o modo CLSM 2×2 , 4×2 e 4×4 para uma rede com utilizadores com mobilidade a 5km/h, largura de banda igual a 20MHz, com o modelo de canal *Winner II*, um escalonador *round robin* e com uma distribuição constante de 20 utilizadores por célula. Assim, na Figura 3.7 é possível verificar que o modo onde cada utilizador consegue atingir maiores valores de débito é o CLSM 4×4 . No entanto para

os restantes modos, os valores percentuais de débitos atingidos são superiores levando assim à conclusão que a probabilidade de serem conseguidos débitos inferiores é superior e que, quando o valor dos mesmos aumenta, a sua probabilidade de obtenção vai diminuir devido à capacidade da rede. Os pontos pretos representados na imagem constituem os valores médios das curvas tendo-se assim que para SISO, a probabilidade de serem conseguidos valores até 1.4Mbps é de 58%; para CLSM 2x2 o valor médio probabilístico é de 56% para débitos até 2.2Mbps; para CLSM 4x2, 61% dos utilizadores conseguem débitos até 2.7Mbps e, finalmente para CLSM 4x4, 60% dos utilizadores irão conseguir valores até 4Mbps.

Outro parâmetro que é mencionado nos gráficos abaixo representados é o nível de justiça do escalonador, J , conhecido como *fairness*. Para garantir que o tempo médio de resposta a todos os utilizadores da rede é reduzido, e que os recursos da rede são alocados de forma justa, passou a existir alguma preocupação com o parâmetro *fairness* do escalonador. Deste modo fazendo uma análise aos valores do índice de *fairness* da Figura 3.7, o modo que garante uma maior igualdade aos utilizadores da célula é o SISO o que leva a que débitos conseguidos inferiores, face aos restantes modos. No subcapítulo seguinte, é feita uma análise do impacto que o parâmetro de *fairness* tem nos débitos conseguidos na célula.

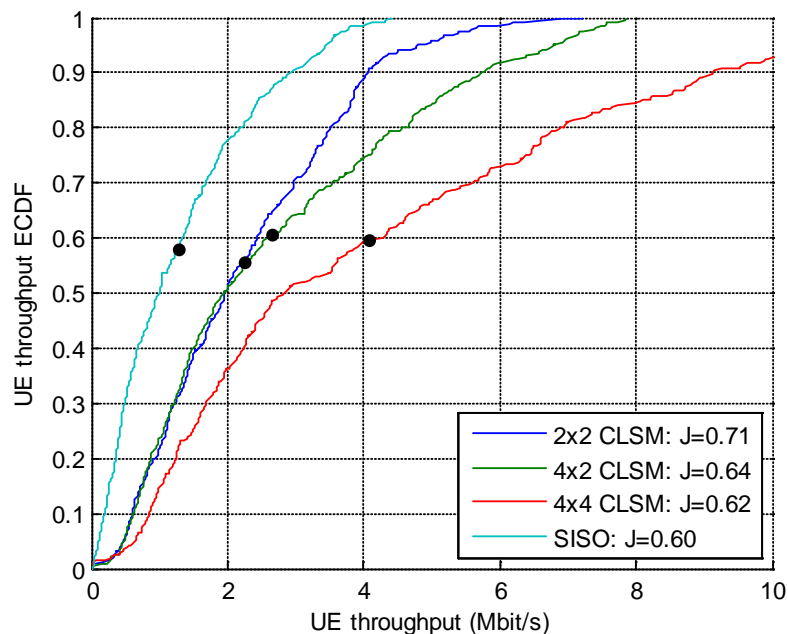


Figura 3.7 – Distribuição de potência por utilizador.

Um dos parâmetros mais importantes do projecto de uma rede de comunicações móveis é a banda SINR em *downlink* - *wideband* SINR. Este parâmetro consiste na relação entre a potência média recebida no tempo e frequência da estação de serviço e a potência média recebida pelas células interferentes juntamente com o ruído como é possível de observar pela equação (3.1).

$$\Gamma_{WB,m} = 10 \log \left(\frac{p_{rx,i(m)}}{\sum_{j \neq i} p_{rx,j} + \sigma} \right) \text{ [dB]} \quad (3.1)$$

onde,

$p_{rx,j}$	Potência recebida da estação base j
σ	Potência de ruído
m	UE que possui determinada <i>wideband</i> SINR
i	Estação-base à qual está ligado o UE m

Deste modo, Figura 3.8 é visível que para valores de SINR maiores são conseguidos débitos superiores, o que era o espectável na medida em que valores mais altos de SINR indicam a presença de menos interferentes no sinal transmitido. O modo CLSM 4×4 apresenta níveis máximos de débito bastante superiores face aos restantes visto que são atingidos os 12Mbps enquanto com CLSM 4×2 o valor máximo é de aproximadamente 8Mbps, com CLSM 2×2 são conseguidos 6Mbps e com *SISO* é possível chegar aos 4.5Mbps.

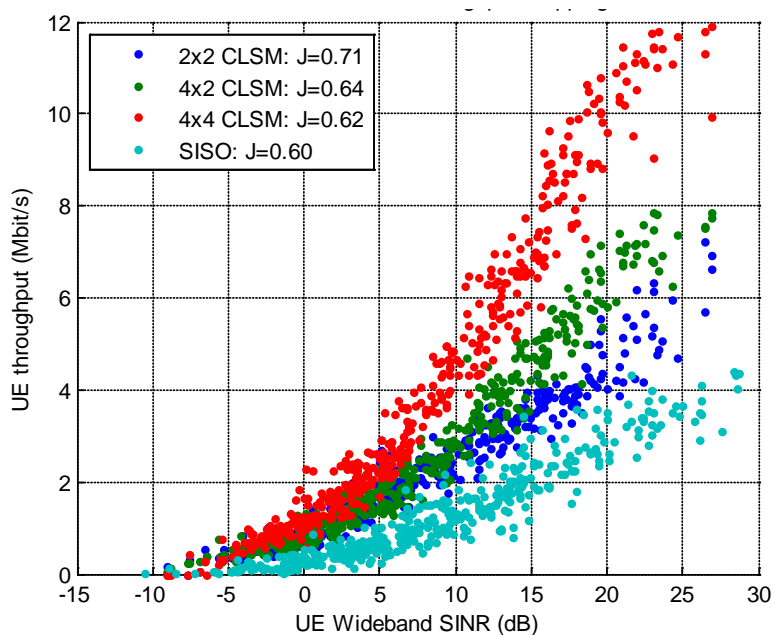


Figura 3.8 – Mapeamento do débito por UE em função da banda SINR.

Finalmente, na Figura 3.9 encontra-se visível a diferença entre os quatro modos de transmissão de onde é possível concluir que o modo que permite maiores débitos a maiores valores de SINR é o CLSM 4×2 . A partir da análise que foi efectuada às diferentes configurações da antena para o modo CLSM, com recurso à Figura 3.7, pode-se afirmar que a configuração melhor é a CLSM 4×4 .

Deste modo, para as simulações que vão ser realizadas durante a execução da presente dissertação, será utilizado o modo de transmissão CLSM 4×4 .

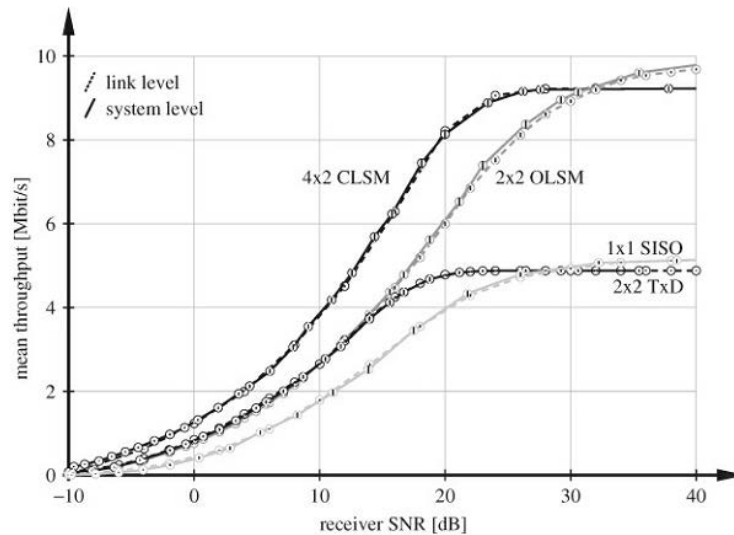


Figura 3.9 – Comparação dos diferentes modos de transmissão extraído de [24].

3.3. Escalonadores

O desempenho da rede no que diz respeito ao débito conseguido e aos atrasos existentes aquando da troca de pacotes está relacionado com o número de recursos disponíveis para os múltiplos utilizadores da rede, que possuem diferentes tipos de serviços logo diferentes necessidades de QoS. O escalonador seleccionado tem que ter em conta os diferentes requisitos de QoS, para satisfazer os utilizadores, e que passam pela prioridade atribuída ao utilizador, pela garantia de débito, por requisitos de atraso e/ou pela classe de tráfego do utilizador.

Assim de forma a optimizar a capacidade de cada célula, foi adoptada a solução de um escalonador para gerir a alocação de recursos. Os algoritmos de escalonamento têm como finalidade definir a partilha dos recursos disponíveis por todos os utilizadores que pertencem à célula. No entanto, é preciso ter em conta que as características do UE vão afectar o processo de escalonamento na recepção dos pacotes.

Tal como já mencionado os escalonadores que o simulador seleccionado disponibiliza são o *round robin*, o *proportional fair*, o *best cqi* e o FFR.

O *round robin* é o escalonador mais utilizado, menos complexo e vai alocar os recursos físicos de igual forma ou seja, todos os utilizadores têm a mesma probabilidade atribuição de recursos e, com boas condições de qualidade. Os recursos vão ser alocados ciclicamente e durante o mesmo tempo. Consoante a implementação, a dimensão dos blocos de transporte pode ser baseada no CQI reportado e na potência e códigos disponíveis ou o CQI pode ser ignorado levando a uma alocação sem dar importância às condições rádio.

O escalonador *best CQI* atribui os recursos ao utilizador da rede que possui o maior valor de CQI. Esta abordagem é um pouco tendenciosa na medida em que favorece os utilizadores que possuem boas condições rádio. Assim enquanto o débito total da rede é aumentado, os UE que se encontrem na fronteira da célula raramente obtêm serviço. Ao nível da *fairness*, este escalonador tem um valor reduzido visto que existe uma grande variação na qualidade de serviço conseguida levando assim a um desagrado dos utilizadores da rede.

Finalmente, o escalonador *proportional fair* é o mais complexo dos abordados e tira como partido o facto dos sinais que os UEs recebem possuírem um desvanecimento não correlacionado. Este escalonador tenta servir o UE que possui um canal com melhores condições tentando manter um acesso aos recursos da rede justo para os restantes UEs. Na Figura 3.10 é visível a variação do SINR ao longo do tempo para três utilizadores que leva a que o utilizador que possui um valor superior é servido em primeiro lugar, como já mencionado.

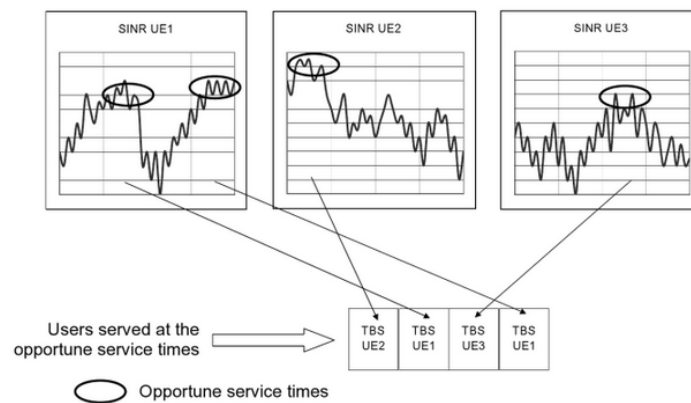


Figura 3.10 – Esquema do escalonador *proportional fair* tirado de [33][33].

Para decidir qual o utilizador a escalonar é definida uma prioridade a cada utilizador, com recurso à equação (3.2) e (3.3) onde, α é uma especificação do tempo ao nível do número de *slots*. Assim, caso o α possua valores elevados a prioridade do utilizador vai levar algum tempo a aumentar enquanto que, no caso de o α possuir valores reduzidos, a prioridade do utilizador vai aumentar rapidamente.

$$P_i = \frac{CQI_i(t)}{\lambda_i(t)} \quad (3.2)$$

$$\lambda_i(t + 1) = (1 - 1/\alpha)\lambda_i(t) + 1/\alpha \times Débito_{momento} \quad (3.3)$$

As equações acima descritas indicam que caso a qualidade do canal melhore, a prioridade aumenta caso contrário, a prioridade diminui. Uma das características deste escalonador é que atribui prioridade a aplicações sensíveis ao atraso, tal como em *HTTP - Hypertext Transfer Protocol*.

Posto isto na Figura 3.11 e Figura 3.12 encontram-se representadas para diferentes escalonadores as curvas de distribuição de potência do débito conseguido, o nível de *fairness* e a comparação do débito

médio, com o da fronteira da célula, com o máximo. Os pontos pretos assinalam os valores médios da distribuição de potência conseguida em cada um dos escalonadores. Os gráficos obtidos resultaram de uma simulação para uma rede com um modo de transmissão CLSM 2x2, uma largura de banda de 20MHz, com o modelo de canal *Winner II channel*, uma distribuição constante de 20 utilizadores por célula, que possuem mobilidade e se deslocam a 5 km/h.

Deste modo estabelecendo uma comparação do débito médio para cada escalonador, através da Figura 3.12, verifica-se que no *best CQI* são conseguidos maiores valores, seguido do *proportional fair* e do *round robin*. No que diz respeito ao índice de *fairness*, tem-se que o mais justo para os utilizadores é o *proportional fair*, seguido do *round robin* e do *best CQI*. Isto porque, o escalonador *best CQI* tenta maximizar o débito total conseguido e ignora o índice de *fairness* ao atribuir os recursos aos utilizadores que possuam melhores condições de canal, daí possuir o valor mais baixo. Devido à forma como são atribuídos os recursos, torna-se bastante perceptível que o débito máximo conseguido por este escalonador seja muito superior ao dos restantes enquanto, o débito na fronteira da célula é inexistente. Respeitante ao *round robin*, este possui um índice de *fairness* satisfatório pois a atribuição de recursos a cada utilizador é feita de igual forma e é independente do *feedback* recebido, o que resulta no pior desempenho dos três escalonadores no que diz respeito ao débito médio disponibilizado. O *proportional fair* vai dar ênfase à diversidade multi-utilizador, uma vez que beneficia o utilizador que possui melhores condições de canal, levando assim a bons níveis de *fairness* e débitos conseguidos. A diversidade multi-utilizador consiste no ganho obtido numa transmissão para utilizadores que possuem condições rádio favoráveis. Assim, tanto o escalonador *round robin* como o *proportional fair*, vão conseguir valores bastante próximos ao nível do débito médio, máximo e da fronteira da célula.

Deste modo, após o estudo acima realizado é possível concluir que os escalonadores que apresentam melhor relação entre o índice de *fairness* e o débito médio são o *round robin* e o *proportional fair* visto que têm valores muito semelhantes. Assim, a decisão de qual dos dois escalonadores adoptar é tomada em função da Figura 3.11. A partir do gráfico apresentado é visível que com o *round robin* as percentagens conseguidas são melhores do que as do *proportional fair* apesar de que, para valores superiores a aproximadamente 4.5Mbps, o *proportional fair* consegue valores percentuais ligeiramente superiores. As conclusões apresentadas, juntamente com o facto de o *round robin* atingir aproximadamente os 7.3Mbps enquanto o *proportional fair* atinge apenas os 6.5Mbps, com o maior grau de complexidade que o *proportional fair* possui, levam a que o escalonador seleccionado para o estudo que será feito na presente dissertação seja o *round robin*.

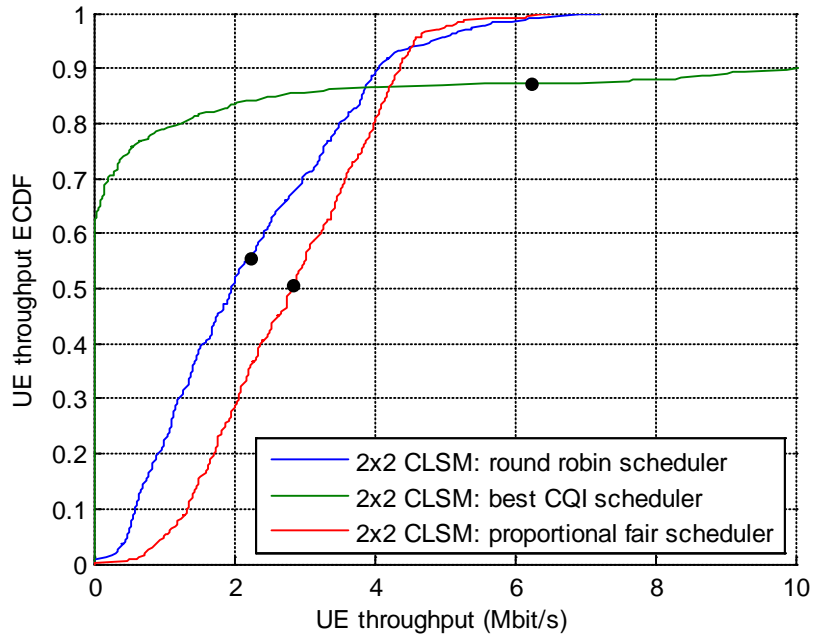


Figura 3.11 – Distribuição de potência do débito por UE para diferentes escalonadores.

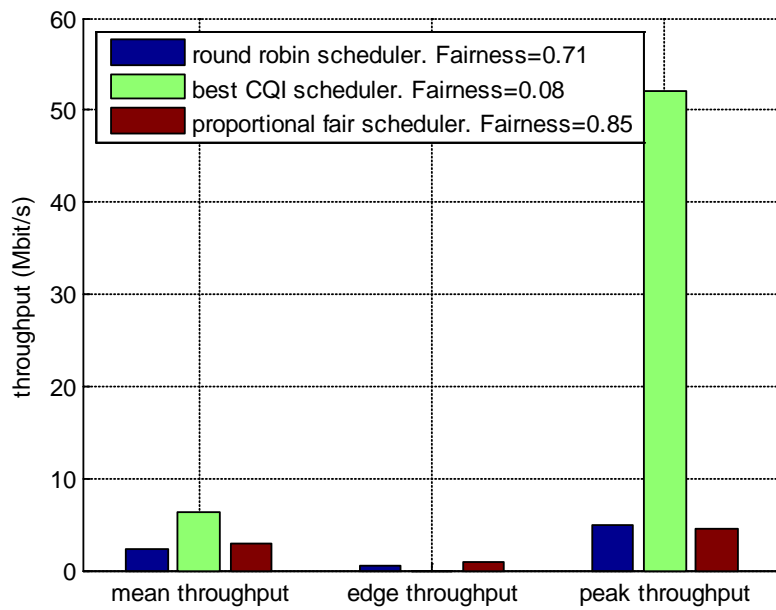


Figura 3.12 – Comparação de débitos conseguidos para diferentes escalonadores.

3.4. Modelos de Propagação

Tal como já mencionado, o simulador seleccionado possui vários modelos de propagação para o cálculo de perdas máximas admissíveis em ambientes *outdoor*. Assim os modelos existentes são o de espaço livre; o modelo *COST 231* que pode ser aplicado a meios urbanos, com macro e micro-células respectivamente e, a meios suburbanos com macro-células; o modelo *TS 36.942* que se encontra definido para meios urbanos e rurais; e o modelo *TS 25.814*.

As perdas em espaço livre são obtidas com recurso à equação (3.4), onde é considerada a velocidade da luz e recebido como parâmetro de entrada a frequência de funcionamento e a distância em metros. As perdas do sinal vão depender do ambiente em questão como tal, é aplicado o coeficiente α para as contabilizar.

$$L = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^\alpha = \left(\frac{4\pi d f}{c}\right)^\alpha \quad [\text{dB}] \quad (3.4)$$

De acordo com as fórmulas definidas no modelo *COST 231*, este vai receber como parâmetro de entrada a frequência de trabalho; o tipo de ambiente de propagação, de forma a serem carregadas as configurações de rede adequadas como a altura da estação e dos telhados, a distância mínima considerada, entre outros; e a distância a que se está da estação.

Com a utilização do modelo *TS 36.942*, as perdas máximas permitidas na ligação vão ser calculadas através da equação (3.5) para meios urbanos e da equação (3.6) para meios rurais.

$$L = 40(1 - 4 \times 10^{-3} \times D_{hb}) \times \log(R) - 18 \log(D_{hb}) + 21 \log(f) + 80 \quad [\text{dB}] \quad (3.5)$$

$$L = 69.55 + 26.16 \times \log(f) - 13.82 \log(H_b) + (44.9 - 6.55 \times \log(H_b)) \times \log(R) - 4.78(\log(f))^2 + 18.33 \log(f) - 40.94 \quad [\text{dB}] \quad (3.6)$$

Assim este modelo recebe como parâmetro de entrada a frequência; o tipo de ambiente para atribuir as devidas alturas; e a distância a que o utilizador está.

Ao nível do modelo *TS 25.814*, a equação utilizada é a (3.7) e, para uma frequência de 2GHz é considerado $I = 128.1$ enquanto que para uma frequência de 900MHz é considerado $I = 120.9$. Este modo recebe como parâmetro de entrada a frequência de funcionamento e a distância.

$$L = I + 37.6 \log(R) \quad [\text{dB}] \quad (3.7)$$

No que diz respeito aos cálculos das perdas de propagação *indoor*, é utilizado o *Dual-Slope* [34]. Este é um modelo é constituído por dois troços sendo que um contabiliza as perdas *outdoor* e outro as perdas *indoor* originadas pelas várias paredes, portas e pisos. No presente simulador, a distinção dos dois troços é feita através de uma distância limitadora da área *indoor*. O valor obtido será diferente para os vários tipos de edifícios devido à sua robustez – residenciais, escritórios, comerciais, entre outros. Ao nível dos parâmetros de entrada, vão ser recebidos o expoente de perdas, a limitação de área e as perdas das paredes existentes.

Aplicado aos cenários que se pretende simular na presente tese, o modelo *TS 36.942* não possui os requisitos necessários visto que foi concebido para distâncias elevadas levando assim a que os resultados não sejam tão precisos para distâncias reduzidas. O modelo *TS 25.814* tem como

desvantagem o facto de só permitir simular frequências de 900MHz e 2GHz, que são um pouco afastadas das pretendidas.

Deste modo, entre todos os modelos acima descritos, o que mais se enquadra nos cenários de simulação que vão ser efectuados e o que possui os meios de propagação que se pretende simular é o *COST 231*.

Um dos objectivos finais do presente trabalho é aplicar a solução mais vantajosa ao nível do desempenho da rede e a nível financeiro a um cenário real. Assim, o cenário seleccionado foi o Saldanha, visto ser um meio urbano, que possui uma densidade populacional adequada para o estudo em questão e, ser um potencial local de utilização de femto-células para escoamento de tráfego ou mesmo cobertura de determinados locais *indoor*. No entanto, este último objectivo introduz a necessidade de desenvolvimento de módulos complementares visto que o presente simulador, aquando da importação de ficheiros de mapas, necessita de determinados ficheiros de perdas que não se possuía.

Desta forma, foram desenvolvidos os módulos representados na figura abaixo representada onde é visível um primeiro módulo, que efectua o cálculo das distâncias de cada *enodeB* a cada *pixel*; um segundo módulo que contém o modelo de propagação *COST 231* implementado; e por último, um terceiro módulo que são gerados os ficheiros de perdas com as extensões necessárias de modo a que o simulador consiga importar os mapas e a extrair os resultados necessários.

Cada um dos presentes módulos tem os *inputs* representados e vai gerar os ficheiros necessários para o funcionamento do módulo seguinte, como se encontra representado.

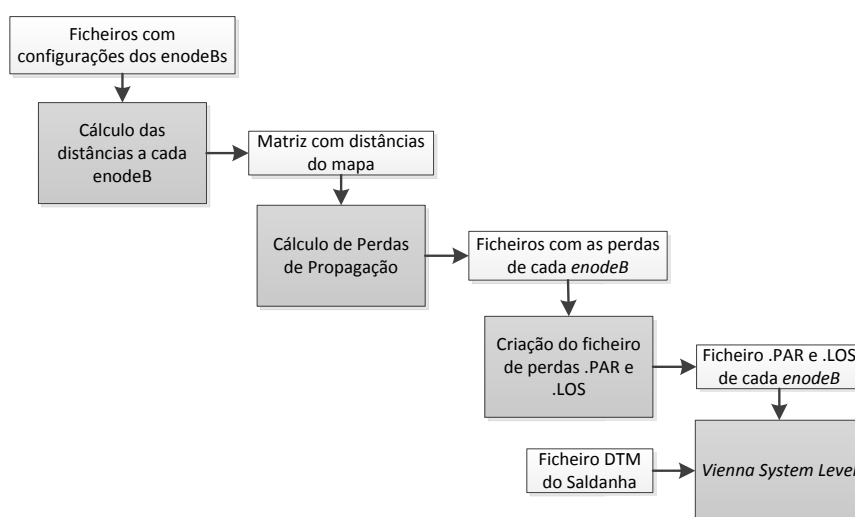


Figura 3.13 – Diagrama blocos dos módulos desenvolvidos.

3.5. Modelo *Winner Phase II*

O *Winner Phase II* é um modelo que consegue descrever um número aleatório de cenários de propagação, de acordo com [35], com as respectivas configurações de rede, para uma única ou múltiplas ligações. Os parâmetros do canal são determinados estocasticamente, tendo como base as distribuições estatísticas extraídas das medições do canal, e a partir das distribuições definidas. Os modelos de canal suportam tecnologia multi-antena, antenas com polarização, redes multi-utilizador, multi-células e ligações com vários saltos na rede.

Assim, neste modelo existem dois níveis de aleatoriedade. No primeiro estão inseridos os parâmetros de larga escala como o *shadow fading*, o *delay spread*, entre outros, que são tirados a partir de distribuições de funções tabuladas. No segundo nível vão-se encontrar os parâmetros de pequena escala como atrasos, potências e direcções que vão ser definidos de acordo com as tabelas das distribuições de funções usadas e os parâmetros de larga escala. Nesta fase, a configuração da geometria de rede é fixa e apenas as variáveis independentes entram na fase inicial aleatória. Através da escolha de diferentes fases iniciais, passam a ser geradas simulações com o modelo em questão. Quando as fases iniciais são fixas, o modelo é determinístico.

As principais funções que o *Winner Phase II* possui passam pela parametrização do modelo com base em medidas; possibilidade de 17 cenários diferentes, com a inclusão de ambientes indoor; modelos estocásticos para simulações ao nível do sistema; modelos fixos *CDL - clustered delay line*, de forma a serem conseguidas simulações calibradas; suporte de um diagrama radiação *3D* e, visualização dos parâmetros do canal de larga escala da rede. As expressões utilizadas por este modelo são possíveis de consultar em [35] bem como os cenários de possível simulação.

3.6. Definição do cenário de estudo

De forma a verificar as vantagens introduzidas pelas femto-células e a concluir qual o cenário onde é conseguido um melhor desempenho da rede, para um menor número de pontos de acesso, vão ser estudadas várias configurações de rede. Assim vão ser comparados os resultados obtidos com as seguintes soluções:

- Macro e Micro-celular sem femto-células;
- Femto-celular;
- Híbrida.

No que diz respeito às soluções híbridas, estas consistem na junção das duas soluções macro-celulares e femto-celulares bem como na junção das soluções micro-celulares e femto-celulares.

Tabela 3.1 – Configurações a simular.

Configuração	Mobilidade	Densidade Populacional	Ambiente de Propagação
Macro-Celular Micro-Celular Femto-Celular Híbrida	Com mobilidade	2000 Utilizadores/km ²	Urbano Macro
			Urbano Micro
			Suburbano Macro
		4000 Utilizadores/km ²	Urbano Macro
			Urbano Micro
			Suburbano Macro
	Sem mobilidade	6000 Utilizadores/km ²	Urbano Macro
			Urbano Micro
			Suburbano Macro
		2000 Utilizadores/km ²	Urbano Macro
			Urbano Micro
			Suburbano Macro
4000 Utilizadores/km ²	Urbano Macro		
	Urbano Micro		
	Suburbano Macro		
6000 Utilizadores/km ²	Urbano Macro		
	Urbano Micro		
	Suburbano Macro		

Todas as soluções acima descritas irão ser estudadas para diversas configurações de rede, como é visível na Tabela 3.1, de forma a poder comparar o desempenho da rede nas variadas situações. Assim foi feito variar o tipo de mobilidade dos utilizadores, a densidade populacional da rede e o ambiente de propagação da mesma. No seguinte subcapítulo, vai ser explicado o porquê das diferentes configurações de rede.

3.6.1. Configurações Gerais e Implementação

Neste subcapítulo vão ser explicados quais os parâmetros de rede que irão ser fixos durante a realização de todas as simulações da presente dissertação; vai ser explicado o porquê da escolha de determinados parâmetros de simulação; e, quais os cálculos e estudos que foram efectuados de forma a ser possível seleccionar a melhor implementação de rede.

Na Figura 3.15 e Figura 3.14 encontram-se apresentadas as topologias de rede obtidas após a simulação das soluções acima mencionadas onde cada ponto vermelho representa um *enodeB*, cada ponto azul um utilizador activo na rede e, cada losango vermelho uma femto-célula. No eixo das

abscissas e ordenadas são representadas as coordenadas cartesianas da região, ao longo da ROI, definindo assim a área em estudo.

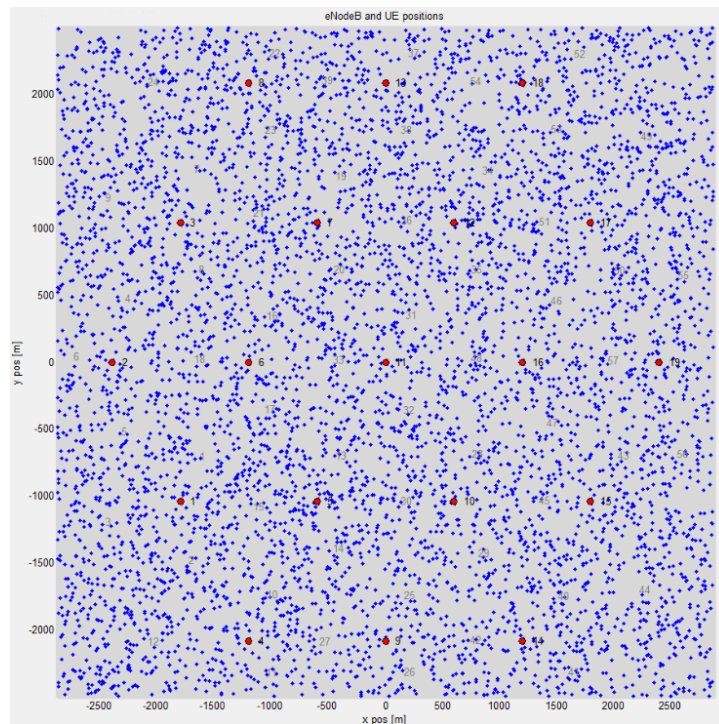


Figura 3.14 – Rede macro-celular.

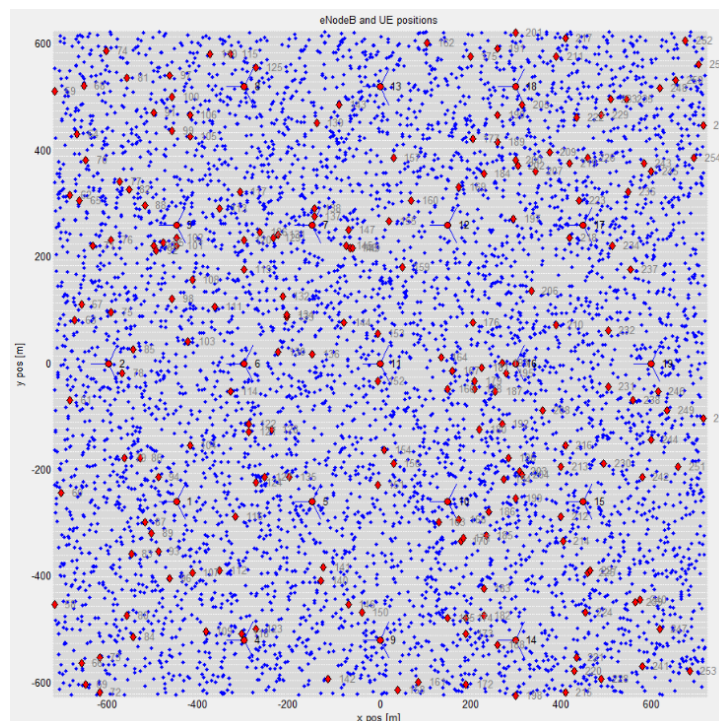


Figura 3.15 – Rede femto-celular e híbrida.

As soluções em estudo vão ser aplicadas num cenário de rede que possui configurações fixas e variáveis sendo que as variáveis irão ser descritas de seguida.

Tabela 3.2 – Configurações fixas de simulação.

Parâmetros	Valor
Anéis de Interferência	2
Geometria da rede	Hexagonal regular
Raio da área <i>indoor</i>	20 m
Modelo de propagação	COST 231
Escalonador	Round Robin
Frequência da rede	2.14 GHz
Largura de Banda	20 MHz
Distribuição de femto-células	Constante na <i>ROI</i>
Perdas de penetração	20 dB
Antena seleccionada	Kathrein, modelo 742212, anexo E
Altura da antena	21 m
<i>Tilt</i> Eléctrico e Mecânico	8° e 0°
Modelo de canal	<i>Winner</i> +
Potência de transmissão dos <i>enodeB</i>	49 dBm
Potência de transmissão das femto-células	20 dBm
Modo de transmissão	CLSM 4x4

Os estudos realizados em subcapítulos anteriores permitiu definir algumas das configurações que vão ser fixas ao longo das simulações que vão ser efectuadas, e que são possíveis de observar na Tabela 3.2.

Ao nível dos parâmetros da rede variáveis, os ambientes de propagação que serão estudados são ambientes urbanos e suburbanos. A presente decisão está relacionada com o facto de as femto-células serem uma solução para cobrir zonas de sombra e para escoar tráfego das células das camadas superiores. Como tal, não faria sentido realizar simulações para ambientes onde existe uma densidade populacional reduzida, como por exemplo nos ambientes rurais.

No que diz respeito ao número de utilizadores presentes na rede, este irá variar entre 2000, 4000 e 6000 de forma a ser possível observar qual o impacto que a variação do número de utilizadores na rede tem na capacidade média oferecida por utilizador, na eficiência de rede e, nos níveis de qualidade de serviço conseguidos. Um outro estudo que irá ser realizado, consiste na análise dos valores obtidos para utilizadores estáticos e para utilizadores pedestres. Respeitante aos utilizadores que possuem

mobilidade, foi seleccionado um modelo pedestre e não veicular devido ao peso computacional que tal acarretava. Assim, a velocidade considerada para utilizadores pedestres irá ser igual a 5km/h.

Ao nível de modelos de tráfego, irá ser adoptado o modelo *fullbuffer* que o simulador disponibiliza e que se traduz no máximo de transferência de dados durante o tempo de simulação. Irão também ser apresentados uns resultados onde os utilizadores possuem um modelo com as distribuições indicadas na Tabela 3.3, de forma a ser possível determinar qual a influência no desempenho da rede. A distribuição abaixo representada tem por base os valores do relatório do primeiro trimestre de 2013 [36] disponibilizado pela ANACOM - Autoridade Nacional das Comunicações sendo que, foi atribuída uma maior percentagem ao serviço *HTTP* porque foi considerado o serviço de aplicações sociais no mesmo.

Tabela 3.3 – Distribuição de serviços da rede.

Serviços	Distribuição
HTTP	30%
FTP	20%
Video	20%
Gaming	20%
Voip	10%

Assim a partir da Figura 3.16 é possível retirar que, no primeiro trimestre do corrente ano os serviços móveis mais utilizados, para além de fazer e receber chamadas, foram *SMS – Short Message Service*; acesso à *Internet*; serviço de *roaming*; aplicações sociais; *email* e *banking*.

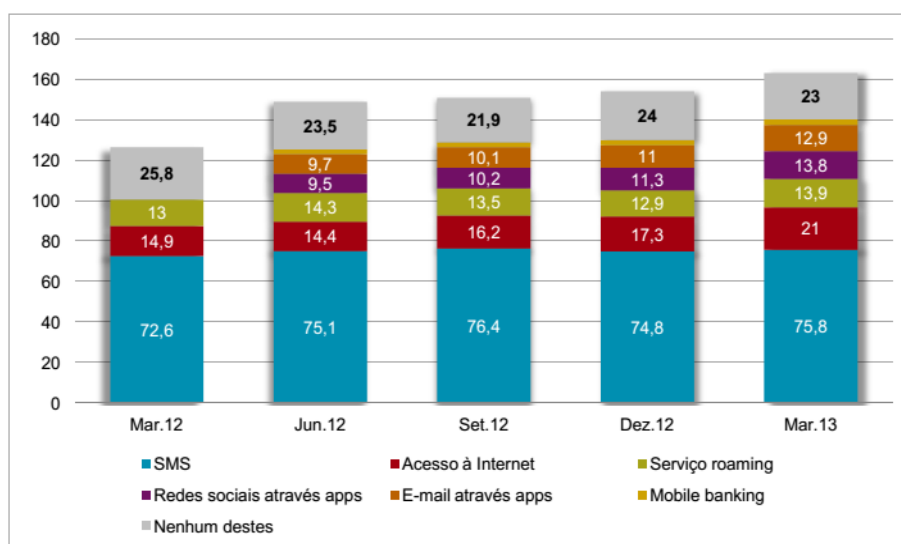


Figura 3.16 – Serviços móveis mais utilizados extraído de [36].

Relativamente à faixa de frequências será utilizado o valor de 2.14GHz, visto que é a frequência disponibilizada pelo simulador que mais se aproxima da maior frequência utilizada pelos operadores,

de 2.6GHz. Ao nível da largura de banda, optou-se por uma de 20MHz visto ser a que vai permitir maior número de recursos disponíveis logo, maiores capacidades. Para o cálculo das perdas de propagação em ambientes *indoor*, irão ser considerados 20dB de perdas de penetração visto ser o valor típico, de acordo com [37][37] [38].

No que diz respeito ao número de *enodeBs* e femto-células considerado, foi realizada um planeamento por cobertura e um planeamento por capacidade de forma a ser possível estabelecer uma comparação entre os resultados obtidos nos dois planeamentos levando assim a soluções mais optimizadas no que diz respeito ao número de células na rede. Tal estudo é apresentado no subcapítulo seguinte.

3.6.2. Planeamento orientado à capacidade

Tendo como base as femto-células da *Vodafone*, cujas tabelas de características se encontram representadas no anexo *B*, verifica-se que cada ponto de acesso tem a capacidade de suporte de 4 ou 8 chamadas *CS – Circuit Switched* ou *PS – Packet Switched*. Considerando que a potência utilizada é de 20dBm e que as chamadas são PS, retira-se que as femto-células escolhidas têm uma capacidade de suporte de 8 utilizadores. Assim tendo em conta o número de utilizadores presentes nos testes realizados, tem-se que o número de pontos de acesso necessário para as diversas densidades populacionais é o representado na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Número de pontos de acesso para dar cobertura à rede total.

Número de utilizadores	Número de Femto-Células
2000	250
4000	500
6000	750

Uma vez que o simulador utilizado é um pouco pesado computacionalmente e necessita de uma memória elevada para a obtenção dos resultados, foram realizadas simulações apenas para 2000 utilizadores; para redes femto-celulares apenas; e para ambientes urbanos e suburbanos.

No que diz respeito ao cálculo do número de *enodeBs* necessário para dar cobertura ao total de utilizadores presente na rede, foram realizadas algumas considerações. Assim, para o cálculo das capacidades necessárias, foram utilizadas as equações presentes em [8] e abaixo representadas.

$$T_{ue} = T_f \times (Y_c - Y_s + 1)^{T_i} [Gbps] \quad (3.8)$$

$$T_{dia} = \frac{T_{ue}}{22} [Gbps] \quad (3.9)$$

$$C_{necessaria} = \frac{T_{dia} \times 8 \times N_{ues}}{h_{busy} \times 3600} [Gbps] \quad (3.10)$$

onde,

T_{ue}	Tráfego por utilizador
T_{dia}	Tráfego por utilizador por dia
$C_{necessaria}$	Capacidade total necessária na rede
h_{busy}	Número de <i>busy hours</i> [s]
N_{ues}	Número de utilizadores
T_f	Factor de tráfego; $T_f = 3.778$
Y_c	Ano em que o projecto é realizado
Y_s	Ano em que o projecto é iniciado
T_i	Ritmo de crescimento de tráfego; $T_i = 1.4389$

Assim, com recurso à equação (3.8), foi obtido o valor do tráfego por utilizador por mês considerando 2011 o ano de início e 2013 o ano de realização do projecto. De seguida, aplicou-se a equação (3.9) de forma a conseguir o tráfego gerado por cada utilizador por dia onde foram considerados apenas os dias úteis do mês. Depois de calculados os valores referidos, foi utilizada a equação (3.10) para determinar qual a capacidade total necessária para dar cobertura a todos os utilizadores da rede onde foram considerados 2000 utilizadores e um número de *busy hours* igual a 8 devido a estatísticas apresentadas em [39]. Desta forma, é possível observar os valores conseguidos através da Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Resultados obtidos na parametrização da rede.

Parâmetros	Valores Obtidos [Gbps]
T_{ue}	10.24
T_{dia}	0.47
$C_{necessaria}$	0.26

Depois de saber qual a capacidade requerida, torna-se necessário descobrir qual a capacidade que cada *enodeB* suporta. Assim através da utilização da equação (3.11) de uma eficiência espectral igual a 2.7 de acordo com [40], η ; uma largura de banda de 20MHz; e *sites* tri-sectorizados, tem-se que cada *enodeB* suporta 162Mbps tendo em conta a largura de banda de trabalho e todas as configurações mencionadas.

$$Capacidade_{site} = LB \times \eta \times N_{sectores} \text{ [Mbps]} \quad (3.11)$$

Deste modo o número de *enodeBs* necessário para dar suporte aos 2000 utilizadores é igual a 2. Uma vez que no simulador utilizado para a obtenção de resultados não é possível realizar um planeamento isolado da área de cobertura, foi realizado um planeamento em função da mesma e não por capacidade, como será de seguida demonstrado.

3.6.3. Planeamento orientado à cobertura

Para a execução de um planeamento orientado à cobertura, é necessário saber qual a área em estudo. Uma vez que estão a ser considerados 2 anéis de interferência e que a distância máxima entre *enodeBs* é de 400m, a área em estudo é de 3.4 km². Assim, na Tabela 3.6 encontram-se presentes os resultados obtidos para as quatro soluções estudadas relativamente ao número de *enodeBs* e femto-células necessário para dar cobertura à área considerada. Os valores apresentados foram conseguidos com recurso à equação abaixo representada - (3.12).

$$Área_{site} = \frac{3\sqrt{3}}{2} \times r^2 [km^2] \quad (3.12)$$

É possível concluir que o número de femto-células necessário para dar cobertura a uma área de 3.4 km² é bastante elevado comparativamente com o número de células das camadas superiores.

Tabela 3.6 – Planeamento por cobertura.

Solução Implementada	Raios Considerados [m]	Área de Cobertura por célula [km ²]	Número de células necessárias
Macro-células em meio suburbano	200	0.104	32
Macro-células em meio urbano	150	0.059	55
Micro-células em meio urbano	100	0.026	125
Femto-células	20	0.0010	3240

Os raios de cobertura acima definidos possuem valores em nada reais no entanto foram utilizados em simulações devido ao facto de serem os valores máximos que o simulador suportava para o número de utilizadores proposto e soluções femto-celulares e híbridas. Uma vez que nas soluções macro-celulares foram conseguidos valores de cobertura superiores, no subcapítulo seguinte são apresentados resultados com os mesmos. Assim, foram definidos os valores apresentados na Tabela 3.7, bem como o número de *enodeBs* necessário para dar cobertura à área simulada. Um factor importante a mencionar é que o número de anéis de interferentes foi mantido levando assim a que a área em estudo aumentasse de 3.4 km² para 36 km².

Tabela 3.7 - Planeamento por cobertura de uma rede macro celular.

Solução Implementada	Raios Considerados [m]	Área de Cobertura por célula [km ²]	Número de células necessárias
Macro-células em meio suburbano	750	1.46	25
Macro-células em meio urbano	650	1.10	33
Micro-células em meio urbano	500	0.650	56
Femto-células	20	0.0010	36000

Capítulo 4

Análise de Resultados

Neste capítulo pretende-se efetuar uma análise detalhada dos resultados obtidos nos diversos cenários estudados. Serão abordados os diferentes aspectos estudados relativamente à utilização, ou não, de femto-células e os ganhos conseguidos ao nível de desempenho de rede. A par dos resultados de desempenho será igualmente estudado o impacto económico das várias variantes de rede de forma a ser possível concluir qual a melhor solução e quais as vantagens, e desvantagens, de utilização das femto-células.

4.1. Análise do desempenho da rede

No presente subcapítulo vai-se proceder a uma análise do desempenho da rede em cada solução, cumprindo as configurações de rede apresentadas no subcapítulo anterior. Assim será possível perceber quais as vantagens da utilização das femto-células, quais os cenários em que estas apresentam mais-valias e, se são uma boa solução quando aplicadas ao LTE para escoar tráfego ou cobrir zonas de sombra.

De modo a ser possível realizar uma análise do desempenho da rede, torna-se necessário avaliar qual o desvanecimento da rede; quais os valores de SINR e CQI conseguidos, considerando o desvanecimento do canal; quais as capacidades obtidas, considerando o mencionado; quais os valores de eficiência espectral por utilizador conseguidos, que são dados pela tabela presente em anexo C; e, quais os valores da eficiência espectral por célula conseguidos. No final de cada simulação, vão ser apresentados um conjunto de valores que vão permitir fazer a análise mencionada sendo estes o valor do débito médio conseguido por UE; o valor de SINR e CQI das células; o débito médio, de fronteira e de pico conseguido para cada utilizador; a eficiência espectral média por UE; os índices de *fairness* conseguidos; a ocupação média dos RB; e a taxa de ocupação de cada *rank*. Uma vez que a eficiência espectral média por célula não é obtida, foi necessário calculá-la através da equação (4.1) sendo que os valores máximos conseguidos para *downlink* não ultrapassam os 5 bit/Hz de acordo com [26].

$$\text{Eficiência Espectral média por célula} = \frac{\text{Débito médio conseguido por célula}}{\text{Largura de Banda}} \quad (4.1)$$

Depois do explicado, começou por se realizar uma análise dos valores de interferência obtidos na área em estudo. Os valores apresentados de seguida são para uma rede macro-celular, com 6000 utilizadores móveis, ambiente urbano.

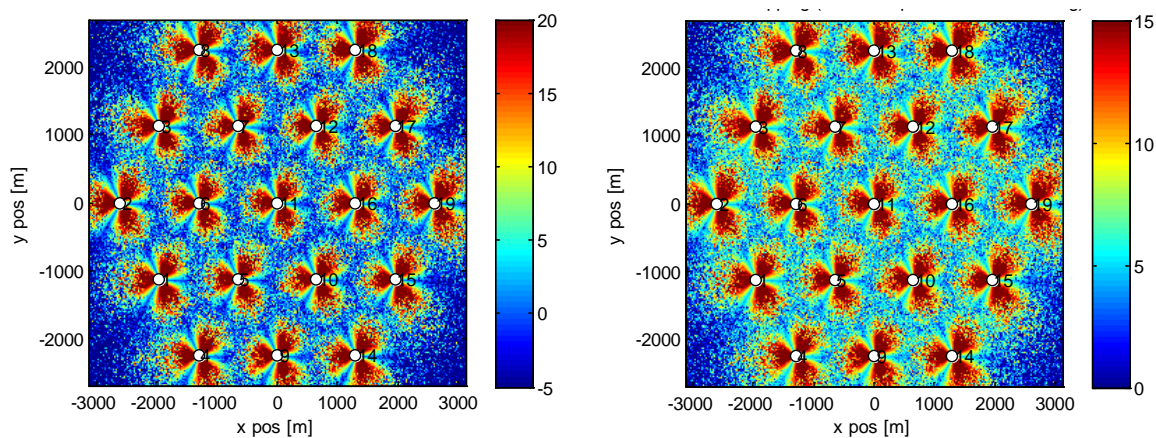


Figura 4.1 – Valores de SINR e CQI conseguidos na rede macro-celular, meio urbano.

Assim, na Figura 4.1 é possível observar na figura mais à esquerda quais os valores de SINR conseguidos tendo em conta o desvanecimento do canal e, na figura mais à direita quais os valores de CQI correspondentes. No que diz respeito aos níveis de SINR conseguidos, os valores junto do *enodeB* são melhores do que os da fronteira do mesmo visto que é onde a interferência se faz sentir menos. A presença de interferência está relacionada com a interferência introduzida pelos utilizadores das células vizinhas e também com o facto de as células se encontrarem a trabalhar todas à mesma frequência levando assim à existência de interferência co-canal, sendo que esta última é mais visível nas redes femto-celulares. O mapeamento de CQI é realizado consoante os valores do SINR obtido logo, é perceptível que os valores superiores sejam perto do *enodeB*.

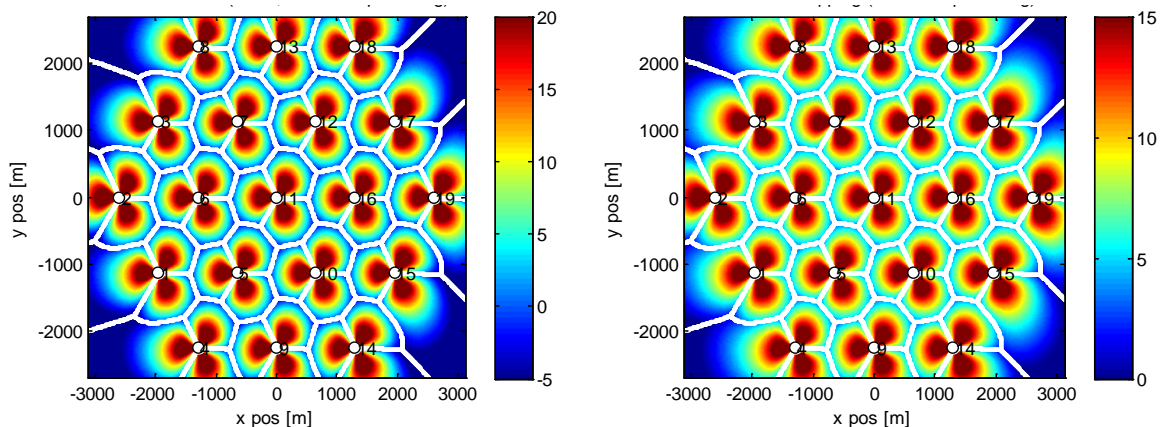


Figura 4.2 - Valores de SINR e CQI conseguidos na rede macro-celular, meio urbano.

Observando a Figura 4.2, é possível verificar a mesma configuração de rede que na Figura 4.1 com a diferença de que não existe desvanecimento no canal levando assim à obtenção de melhores valores tanto para o SINR como para o CQI. Aonde a diferença é mais significativa é na fronteira de cada célula. É também visível que, o presente simulador não suporta o conceito de *handover* uma vez que não existem coberturas de célula sobrepostas. Este é também um factor que contribui para níveis de CQI inferiores.

Os presentes resultados são obtidos em todas as soluções em estudo. No anexo G é também possível observar os mesmos gráficos mas para um ambiente suburbano e como tal, conclui-se que os valores do nível de sinal conseguidos vão ser superiores para meios suburbanos face aos meios urbanos. Tal era espectável visto que no meio suburbano vai estar menos presente a influência de obstáculos logo, vão ser conseguidas menos perdas da qualidade do sinal na ligação, levando assim à obtenção de valores de CQI superiores. Respeitante à influência do número de utilizadores da rede, no anexo F encontra-se representado o mesmo cenário de rede mas com 2000 utilizadores e, é possível observar que existe uma pequena diferença nos níveis de sinal conseguidos na fronteira da célula. A diferença assinalada está relacionada com o facto de um maior número de utilizadores introduzir uma maior interferência nas células adjacentes.

No que diz respeito aos valores de CQI, foram realizadas simulações de forma a perceber a qualidade do sinal conseguido através da análise dos relatórios emitidos. Assim, foram seleccionados utilizadores localizados na fronteira da célula e junto do *enodeB*. Os resultados abaixo apresentados são para uma rede macro-celular, CLSM 2x2; com 10 utilizadores por *site*; e, com uma distância entre *enodeBs* de 500m.

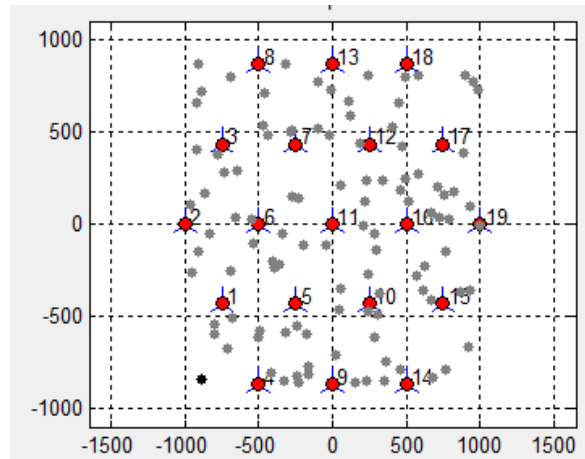


Figura 4.3 – Distribuição da rede.

Primeiramente irá ser avaliado um utilizador que se encontra localizado na fronteira da célula e que está sujeito a uma menor interferência das células vizinhas, como é visível na Figura 4.3. Ao nível da Figura 4.4, da Figura 4.5 e da Figura 4.6 é possível observar a os valores de BLER, débito e CQI que o mesmo possui.

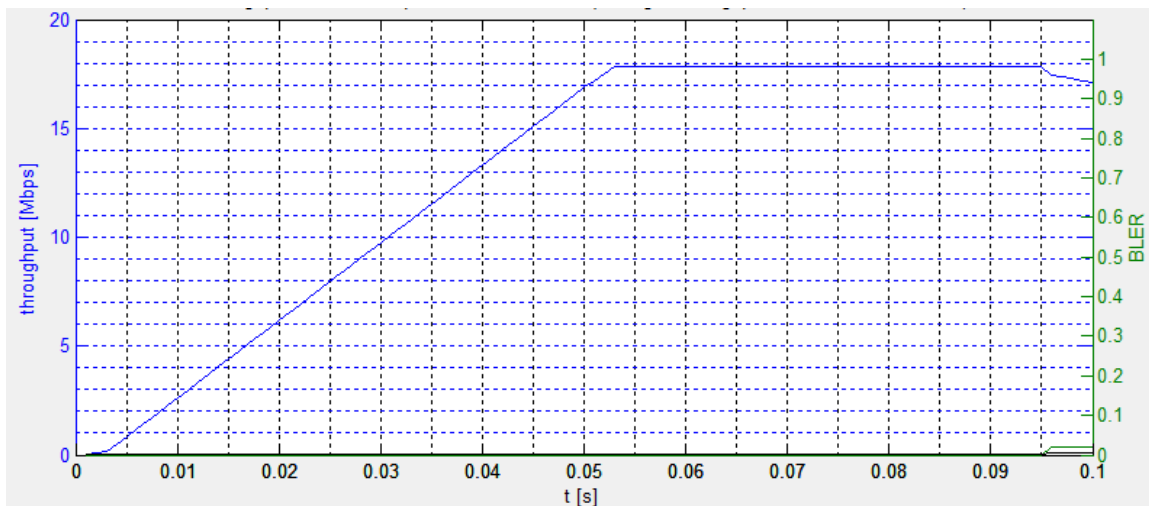


Figura 4.4 – Relatório com informação da BLER e débito conseguido.

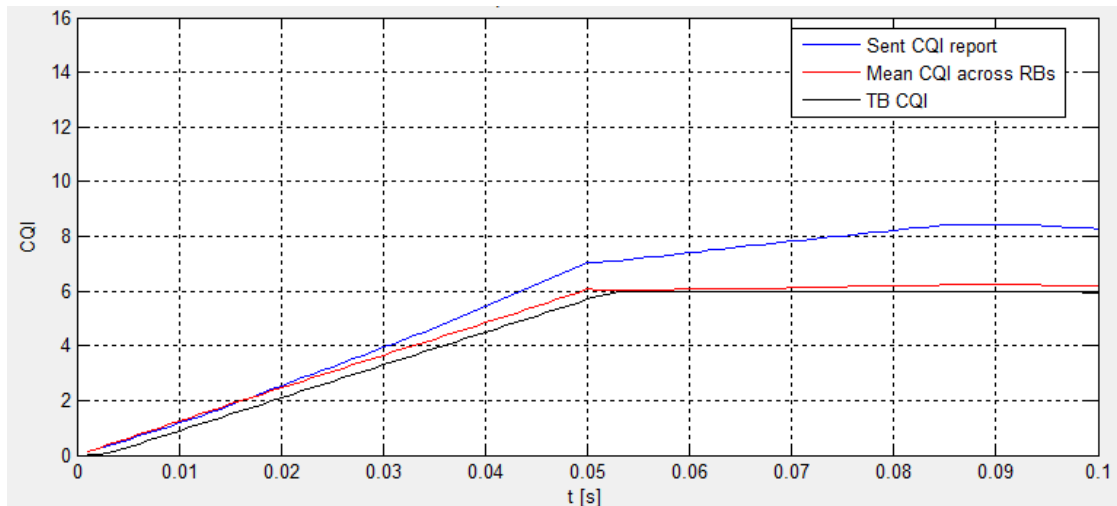


Figura 4.5 – Relatório do CQI obtido.

Nas figuras acima representadas é possível verificar que o débito máximo conseguido pelo utilizador na fronteira da célula é de 18Mbps. O valor em questão só é conseguido após o tempo de atribuição de recursos ao utilizador, após o que, este mesmo valor passa a ser constante. No que diz respeito ao BLER, este assume valores máximos quando o débito máximo é atingido.

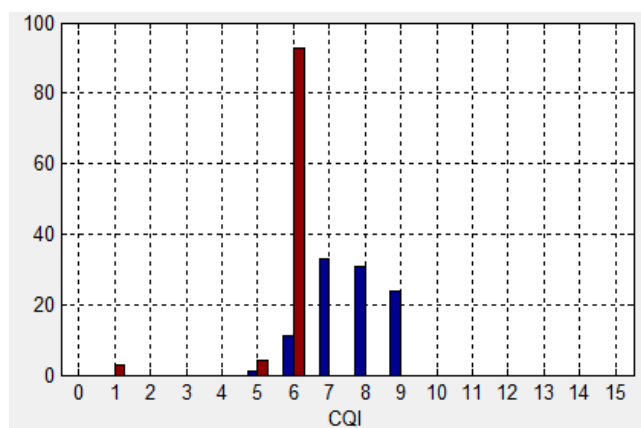


Figura 4.6 – Distribuição de CQIs atribuídos.

Fazendo uma análise dos relatórios de CQI, pela Figura 4.5 e pela Figura 4.6, é visível que estes registam um crescimento linear durante o período de tempo inicial e que, ao fim desse tempo, o valor médio de CQI passa a ser igual a 6. No que diz respeito aos valores de CQI enviados, é visível que estes são ligeiramente superiores aos do CQI médio e que, a partir do momento em que os recursos são atribuídos, existe uma pequena variação dos valores obtidos.

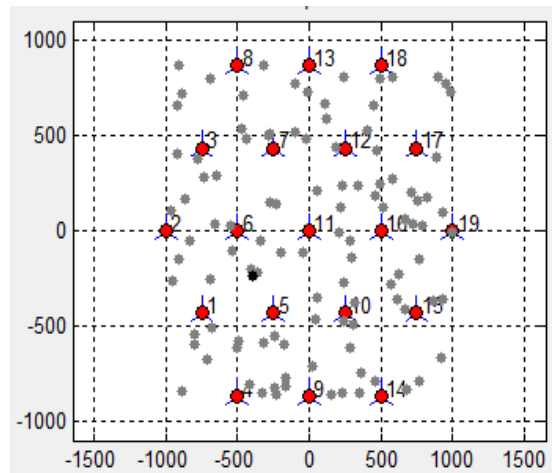


Figura 4.7 - Distribuição da rede.

O segundo caso de estudo, representado na Figura 4.7, consiste na análise dos valores conseguidos por um utilizador que se encontra na fronteira do *enodeB* 1 e que está sujeito a bastante interferência da parte das células vizinhas. Os valores de BLER, débito e CQI que o utilizador atinge são possíveis de analisar através da Figura 4.8, da Figura 4.9 e da Figura 4.10.

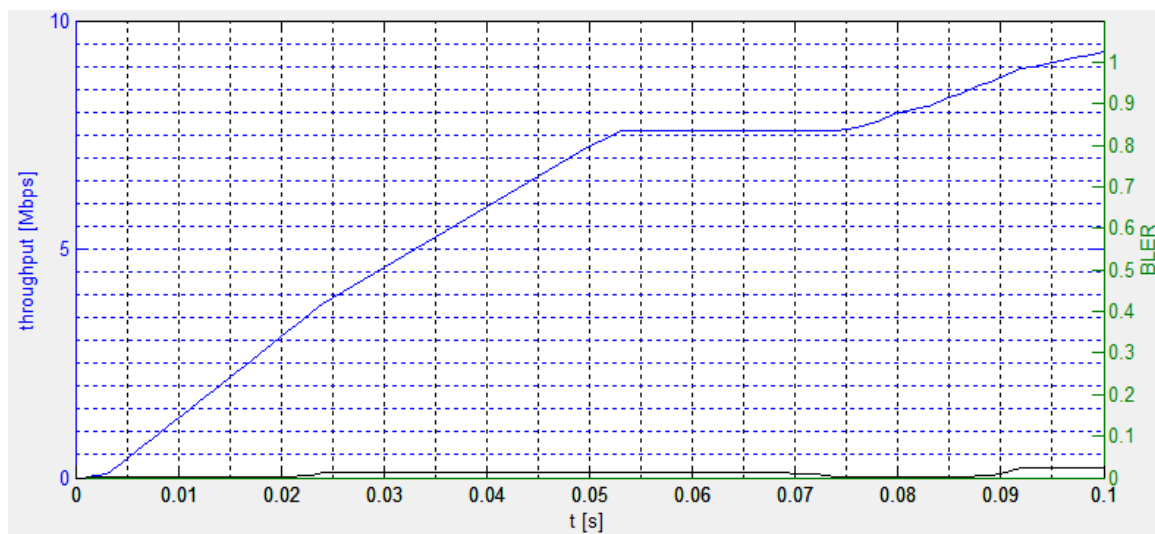


Figura 4.8 - Relatório com informação da BLER e débito conseguido.

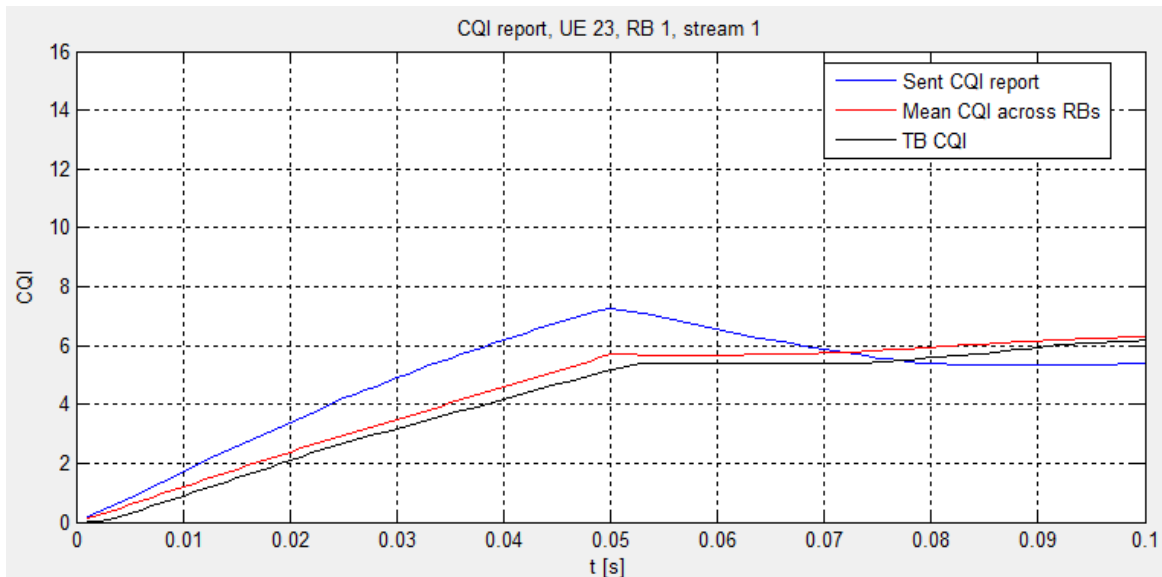


Figura 4.9 - Relatório do CQI obtido.

Analisando as figuras acima representadas é possível verificar que a variação dos débitos conseguidos, da BLER e dos valores de CQI obtidos para o presente utilizador, vai ser mais inconstante do que a do primeiro utilizador. Tal está relacionado com o facto do presente utilizador se encontrar situado no meio de mais *enodeBs* e utilizadores levando assim a que os valores de interferência sejam superiores aos do utilizador inicial que se encontra na fronteira da área em estudo. Ao nível do débito conseguido por utilizador, este apresenta uma variação praticamente linear durante um período inicial, seguido de valores constantes durante algum tempo e de uma subida dos mesmos até ao final do tempo de simulação. As variações descritas estão relacionadas com o facto do débito de 7.5Mbps só ser conseguido após a atribuição de recursos sendo que, ao fim de algum tempo, o débito máximo conseguido vai aumentar, passando a ter valores de 9.5Mbps, devido ao facto de terem sido atribuídos mais recursos ao mesmo utilizador.

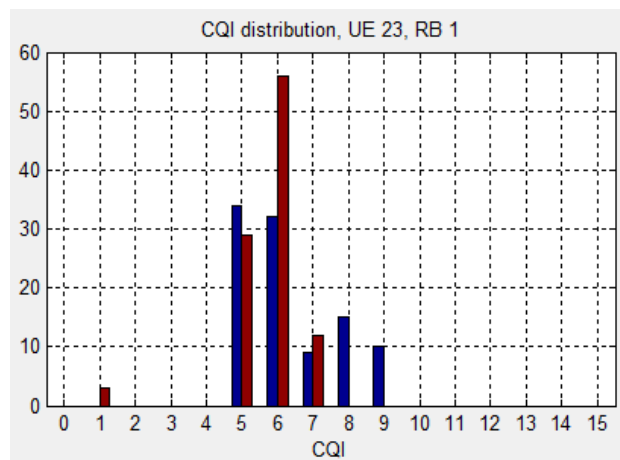


Figura 4.10 - Distribuição de CQIs atribuídos.

Os valores de CQI enviados possuem um valor máximo de 7 sendo que, daí para a frente, tendem a diminuir atingindo valores iguais a 5. No que diz respeito aos valores de CQI médios, o valor máximo conseguido é de 6 e a sua variação é mais ou menos constante.

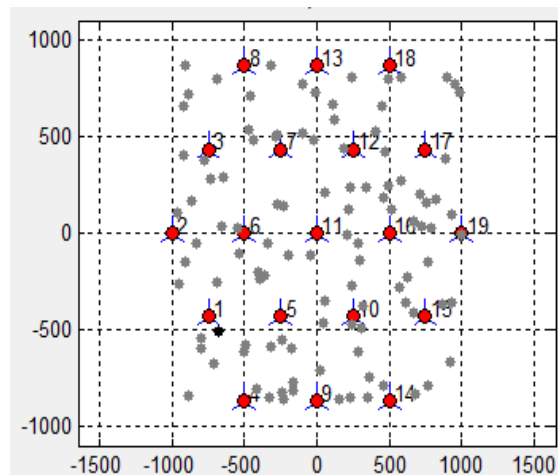


Figura 4.11 - Distribuição da rede.

Por último, irão ser estudados os valores conseguidos para utilizadores que se encontrem perto do *enodeB*, como é o caso representado na Figura 4.11.

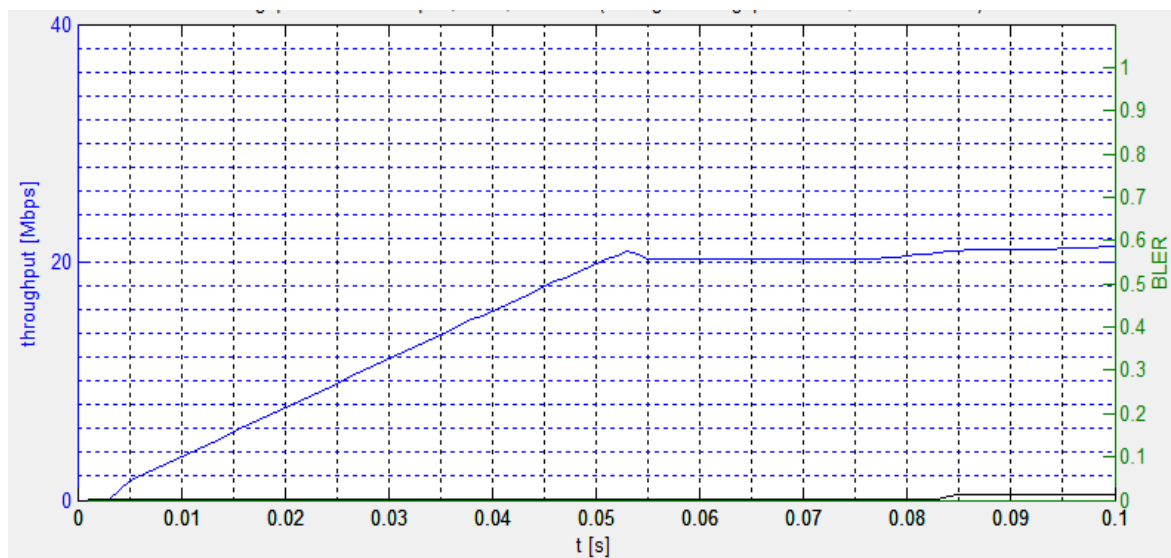


Figura 4.12 - Relatório com informação da BLER e débito conseguido.

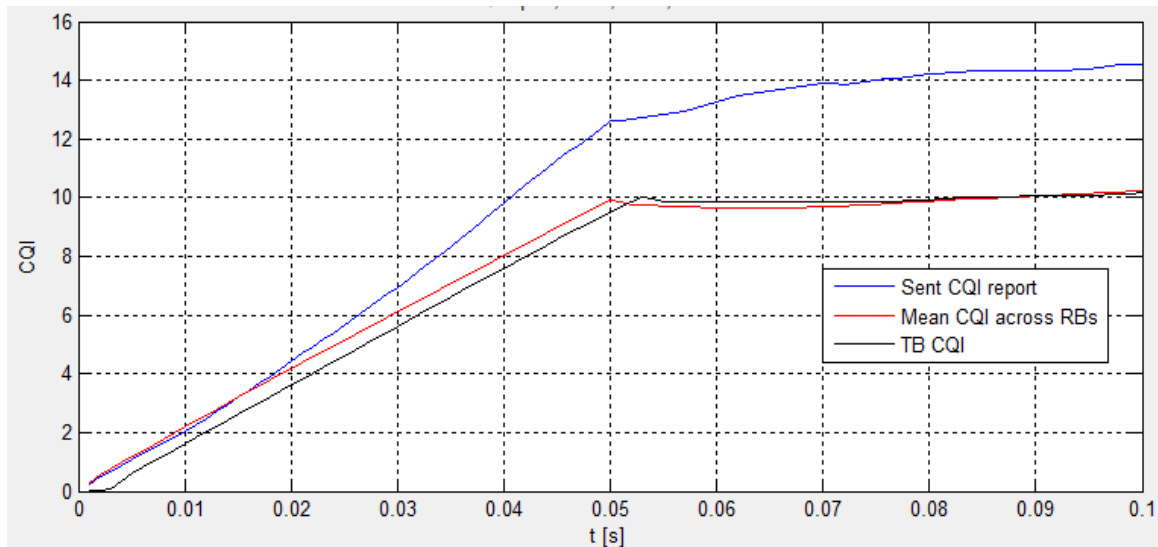


Figura 4.13 - Relatório do CQI obtido.

Ao nível da Figura 4.12, da Figura 4.13 e da Figura 4.14, são apresentados os valores de débito, CQI e BLER conseguidos para um utilizador que se encontra na posição representada na Figura 4.11. Assim é visível que este, apesar de também estar sujeito à presença de interferentes, possui valores de débito estáveis e iguais a 20Mbps e, valores de BLER, mais reduzidos quando comparado com os valores anteriormente apresentados.

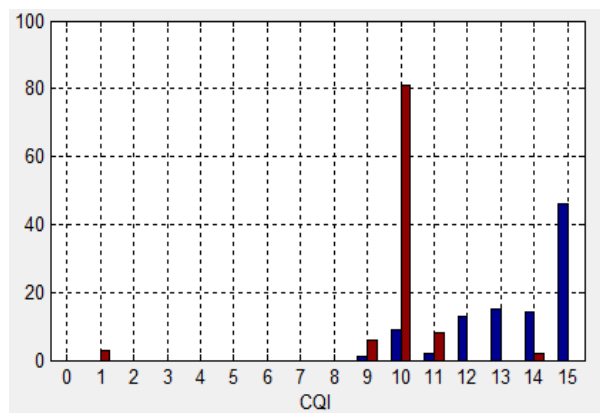


Figura 4.14 - Distribuição de CQIs atribuídos.

Ao nível do CQI, pode-se verificar que são conseguidos valores médios constantes e iguais a 10 enquanto que os valores enviados são um pouco superiores, na ordem dos 13 e, vão registar variações crescentes até aproximadamente 15.

Após as três análises acima realizadas, é possível verificar que os utilizadores que se encontram junto do *nodeB* são os que vão apresentar valores de CQI superiores; valores de BLER inferiores; e, débitos superiores e mais estáveis, como era esperado.

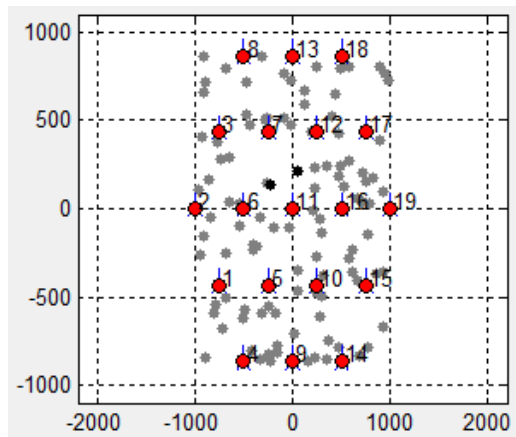


Figura 4.15 - Distribuição da rede.

Por último vai ser apresentado o gráfico da Figura 4.16 que demonstra a atribuição de recursos rádio, ao longo do tempo de simulação, aos utilizadores apresentados na Figura 4.15. Deste modo, é visível que enquanto que a um dos utilizadores é realizada uma atribuição de recursos contante ao longo do tempo de simulação, aos restantes a mesma irá oscilar. Tal reflecte-se nos valores de débitos conseguidos bem como na qualidade de serviço disponibilizada a cada utilizador.

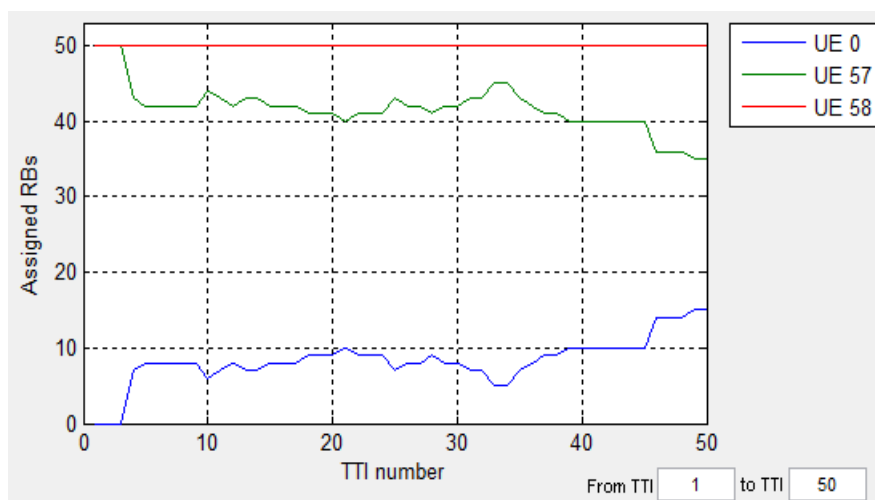


Figura 4.16 - Variação da atribuição de RBs.

Através da Figura 4.17 é possível verificar quais os débitos conseguidos sendo que, o débito máximo de 17Mbps é conseguido após a atribuição de recursos a cada um dos utilizadores e que, após esse período, este tende a diminuir ligeiramente. Ao nível dos valores de BLER obtidos, estes vão ser elevados durante a atribuição do maior valor de débito.

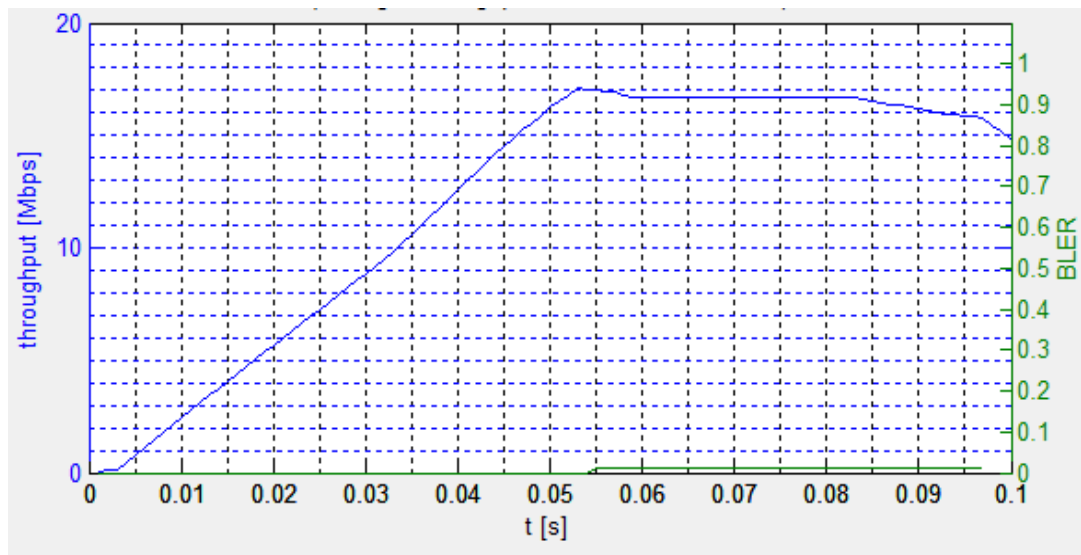


Figura 4.17 - Relatório com informação da BLER e débito conseguido.

Na Figura 4.18 é possível verificar as perdas do nível de sinal que o utilizador sofre à medida a que se afasta do *enodeB*. Esta é um complemento de algumas das observações acima realizadas visto que os valores obtidos se devem às interferências presentes na rede e desvanecimento do canal. O *enodeB* apresentado é o 11 visto ser o que se encontra localizado no centro da ROI, estando assim sujeito a uma maior atenuação do sinal e, sendo assim visível que as células interferentes se encontram distribuídas de forma homogénea.

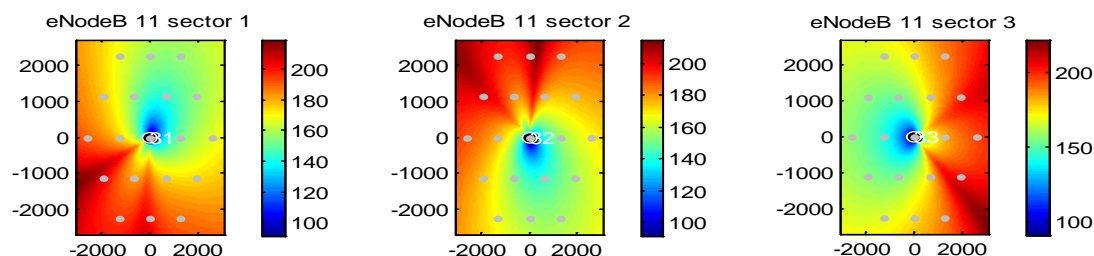


Figura 4.18 - Perdas de percurso na rede macro-celular, meio urbano.

No anexo *H* encontram-se representados os mesmos gráficos mas para soluções femto-celulares e é visível que nestas as células interferentes não se encontram distribuídas de forma homogénea e que existem em maior número sendo que nas soluções híbridas o mesmo acontece. Tal contribui para um valor de perdas mais elevado ao longo da célula, como se pode observar.

Na Figura 4.19, encontram-se representadas as funções de distribuição dos variados valores de banda SINR e dos variados valores de atenuação máxima da ligação.

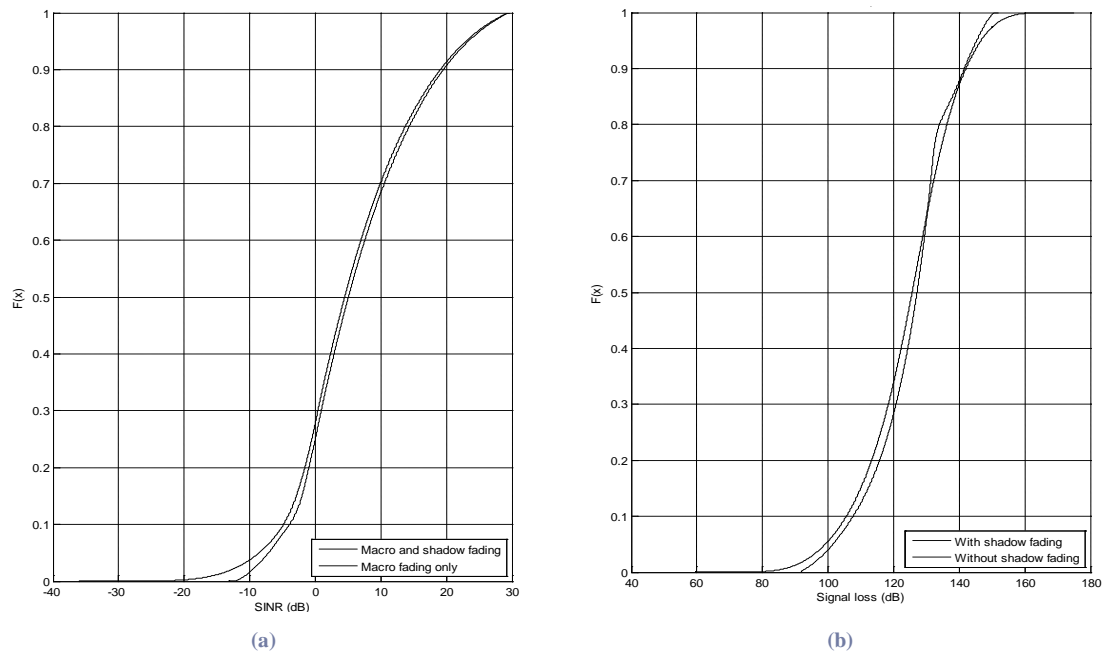


Figura 4.19 – Função de distribuição de: (a) Banda SINR; (b) Atenuação máxima da ligação (*perdas de percurso*).

Nestas é possível observar que o seu comportamento é idêntico ao de uma distribuição normal e que, a probabilidade de ocorrerem valores superiores de SINR e de atenuação é superior. No que diz respeito ao gráfico da esquerda presente na figura, é visível que a probabilidade de ocorrência de valores de SINR inferiores a -20dB é igual a zero enquanto que, a probabilidade de obtenção de valores de SINR iguais a 30 dB será de 100%. Ao nível da figura à direita, é possível observar que a probabilidade de serem conseguidos valores de atenuação inferiores a 80dB é igual a zero e que, a probabilidade de serem conseguidos valores superiores a 160dB é máxima.

No gráfico referente ao SINR, pode-se verificar que a curva conseguida para o desvanecimento total – *macro* e *shadow fading*, é bastante próxima da curva conseguida para o desvanecimento em larga escala – *macro fading*, sendo que na primeira a probabilidade de serem conseguidos valores mais elevados de SINR é superior, como era espectável. Respeitante ao gráfico das perdas máximas permitidas, é possível observar que a curva que contabiliza o *shadow fading* é aproximadamente igual à curva que não o contabiliza. No entanto, é notório que a probabilidade de serem conseguidos valores de atenuação com *shadow fading* superiores aos valores sem *shadow fading* é superior até aos 135dB de atenuação. Daí para a frente, a variação da curva que não contabiliza o *shadow fading* aumenta obtendo-se assim probabilidades de obtenção de valores de atenuação superiores.

Após a análise realizada ao nível das perdas existentes ao longo da rede, torna-se mais fácil entender os resultados obtidos ao nível da capacidade por utilizador e da rede e que se encontram representados nos gráficos abaixo. Tal como a análise realizada anteriormente, vai-se proceder apenas à demonstração dos resultados obtidos para um dos cenários de rede. Assim foram seleccionados os resultados de uma rede que possui 6000 utilizadores e com um modelo de tráfego *fullbuffer*. Foi

atribuída mobilidade aos utilizadores visto que os valores de débito conseguidos para estes vão ser inferiores aos dos utilizadores estáticos, uma vez que os estáticos estão menos susceptíveis à presença do desvanecimento de pequena escala.

Na Figura 4.20 e na Figura 4.21 encontram-se representados os débitos médios por utilizador para redes que não possuem femto-células. A diferença presente nas duas simulações é que os resultados obtidos na Figura 4.20 são para uma rede que possui os raios presentes na Tabela 3.7 enquanto que os resultados presentes na Figura 4.21 são para os raios mais pequenos, presentes na Tabela 3.6.

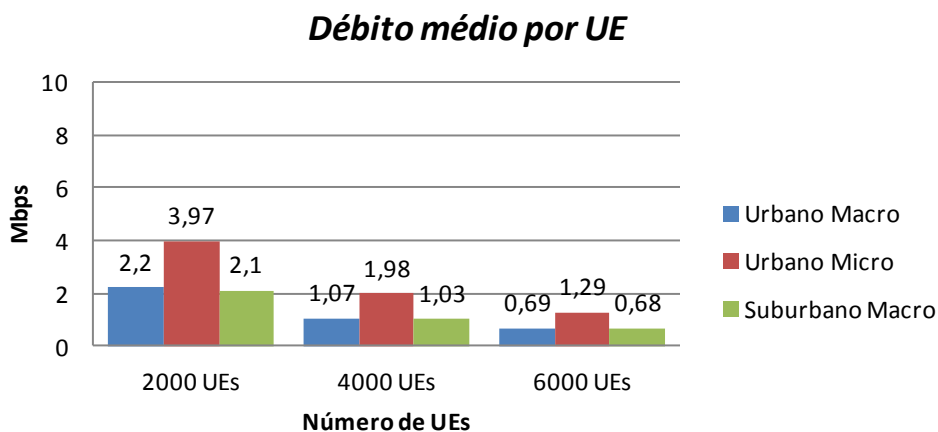


Figura 4.20 - Débito por utilizador em redes sem femto-células.

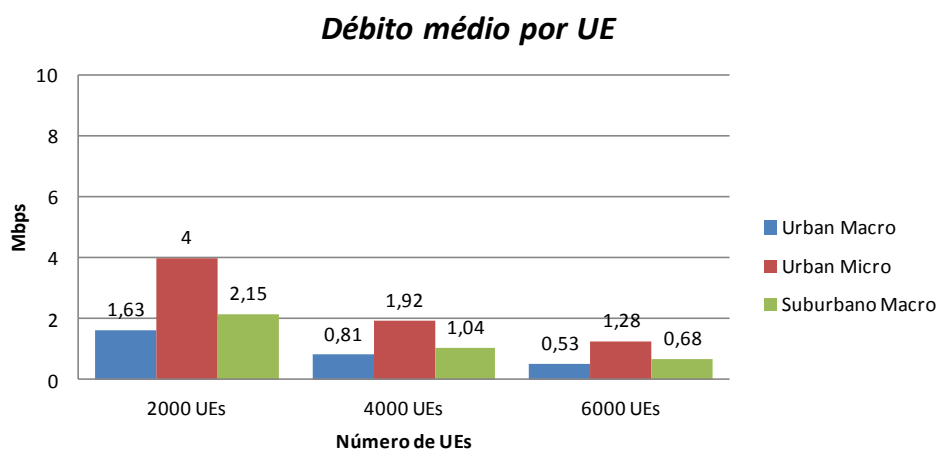


Figura 4.21 – Débito por utilizador em redes sem femto-células.

É possível observar que os valores conseguidos são próximos não se verificando assim grande diferença aquando da alteração dos raios de cobertura. Tal está relacionado com o facto do número total de *enodeBs* ser igual a 57, para meios urbanos com macro-células e meios suburbanos, nos dois cenários. No que diz respeito ao meio urbano com micro-células, já existe uma pequena diferença

sendo que, na configuração de rede apresentada na Figura 4.20 se encontram presentes 111 *enodeBs* e, na Figura 4.21, existem 183 *enodeBs*.

No que diz respeito aos valores de eficiência espectral por célula, na Figura 4.22 encontram-se representados os valores conseguidos para raios de cobertura superiores enquanto que na Figura 4.23 se encontram é visível os valores de eficiência espectral para raios de cobertura inferiores. Pode-se verificar que os valores conseguidos em ambos os cenários são próximos sendo que com células que possuem raios de cobertura superiores os valores de eficiência vão ser maiores. O resultado obtido faz sentido na medida em que raios de cobertura superiores vão cobrir mais utilizadores e porque, o presente simulador não possui o conceito de *handover*. Assim, o número de chamadas caídas diminui levando assim a resultados de QoS superiores. Ao nível do meio suburbano, os valores vão ser mais elevados para raios inferiores do que para raios superiores.

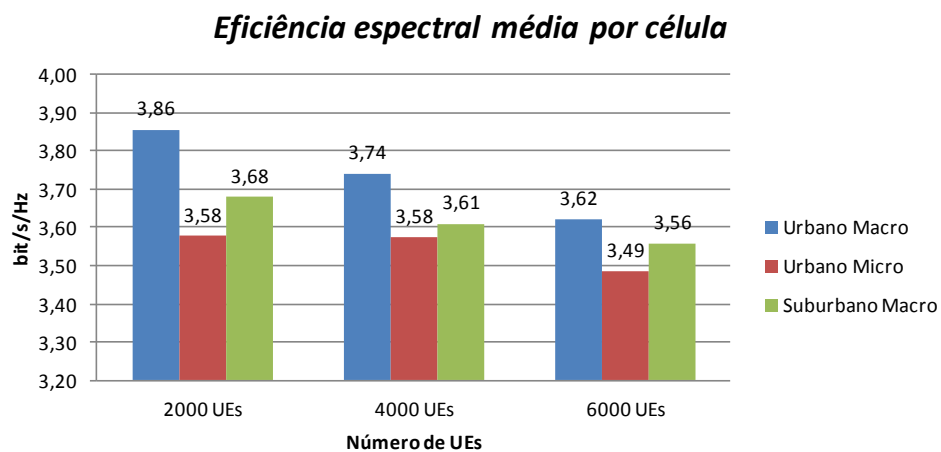


Figura 4.22 - Eficiência espectral média em redes sem femto-células.

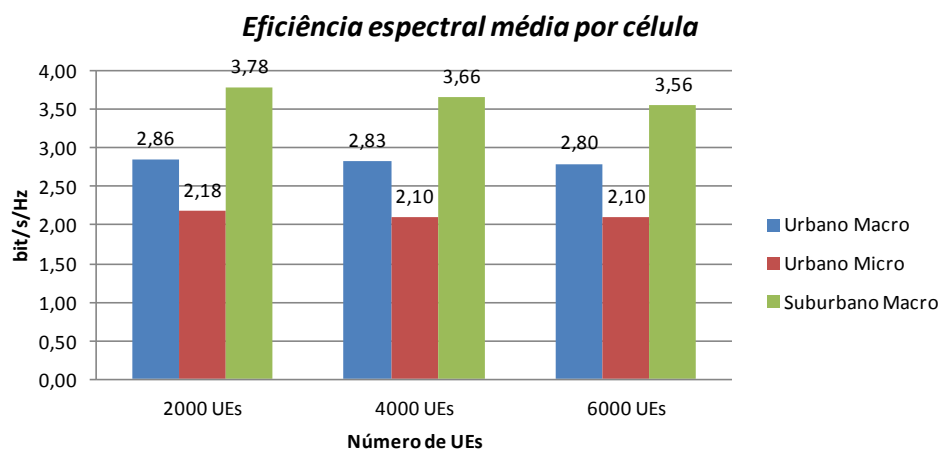


Figura 4.23 - Eficiência espectral média em redes macro-celulares.

Depois da análise realizada, vão ser apresentados os resultados obtidos para os raios de cobertura apresentados na Tabela 3.6 sendo que, para redes que não possuam femto-células, vão ser aplicados os raios de cobertura da Tabela 3.7. Tal deve-se ao facto de não existir uma grande variação nos dois cenários, como explicado anteriormente, do simulador conseguir suportar tais configurações e, ao facto de serem valores mais reais.

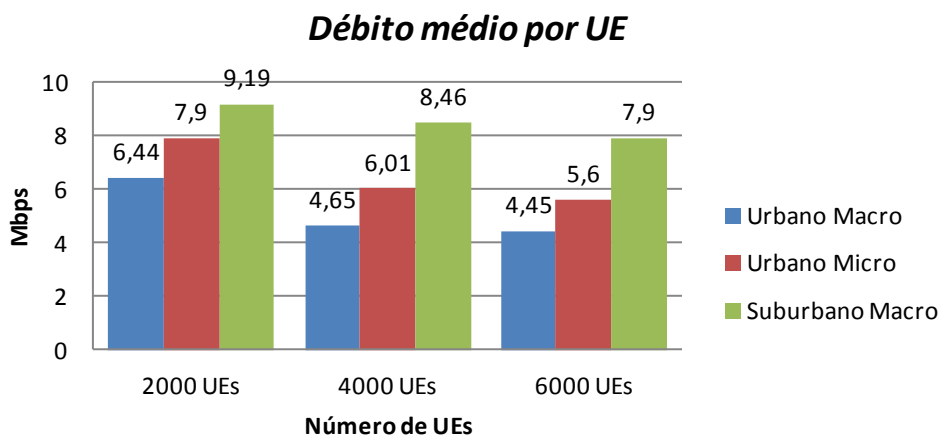


Figura 4.24 - Débito por utilizador em redes femto-celulares.

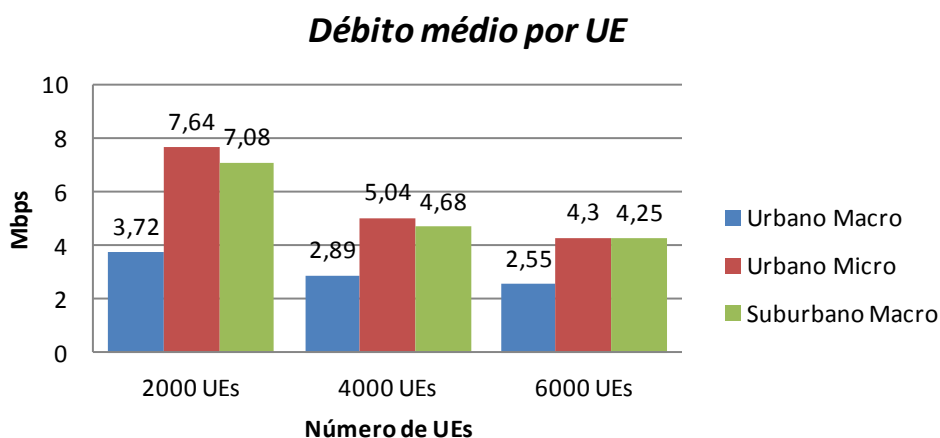


Figura 4.25 - Débito por utilizador em redes híbridas.

Para realizar uma análise dos valores acima indicados, é preciso ter em conta que para um modo de transmissão MIMO 4x4, a 20MHz, o débito esperado para *downlink* é de 325Mbps logo, para 2000, 4000 e 6000 utilizadores o débito médio por utilizador é de aproximadamente 6Mbps, 12Mbps e 18Mbps respectivamente. Assim é visível que para a população de 2000 utilizadores, os débitos médios conseguidos são relativamente próximos do esperado, e os mais elevados, enquanto que para 4000 e 6000 utilizadores os valores já vão ser um pouco diferentes. Tal deve-se ao facto de um maior número de utilizadores necessitar de um maior número de recursos levando assim a menos recursos

atribuídos por utilizador. Desta forma, o número de utilizadores activo é elevado levando a que o valor de interferência entre utilizadores seja elevado. Outro factor que contribui para os débitos conseguidos, está relacionado com o facto de a frequência utilizada ser igual para todos os elementos da rede, tal como já mencionado, levando assim à existência de interferência entre células tendo esta valores mais significativos em redes femto-celulares e híbridas. Estabelecendo uma comparação entre as capacidades obtidas para cada uma das soluções apresentadas, é visível que a que possui maiores valores é a de uma rede femto celular seguida da rede híbrida. Tal evidencia as vantagens introduzidas pelas femto-células. No que diz respeito à influência do número de utilizadores, pelos motivos acima referidos, não ser obtidas capacidades superiores para um menor número de utilizadores do que para maior número de utilizadores elevado.

Ao nível da influência do ambiente de propagação, é possível observar que as capacidades conseguidas são relativamente próximas sendo que, o meio que consegue maiores valores é o meio urbano com micro-células, seguido do suburbano e do urbano com macro-células. O facto de serem conseguidos melhores valores no ambiente suburbano face ao urbano macro é perceptível na medida em que existe uma menor influência do desvanecimento e uma cobertura inferior face a ambientes urbanos logo a ocorrência de interferência é inferior. O facto de serem conseguidos valores de capacidade superiores em ambientes urbanos com micro-células está relacionado com o facto de o modelo de propagação utilizado, não contabilizar determinados parâmetros em soluções micro-celulares levando assim à obtenção de resultados pouco precisos.

De forma a realizar uma análise completa do desempenho da rede e que permita retirar conclusões no que diz respeito à solução mais vantajosa, torna-se ainda necessário um estudo dos valores obtidos para a eficiência espectral por célula, com recurso à equação (4.1), e que se encontram presentes nas figuras abaixo representadas.

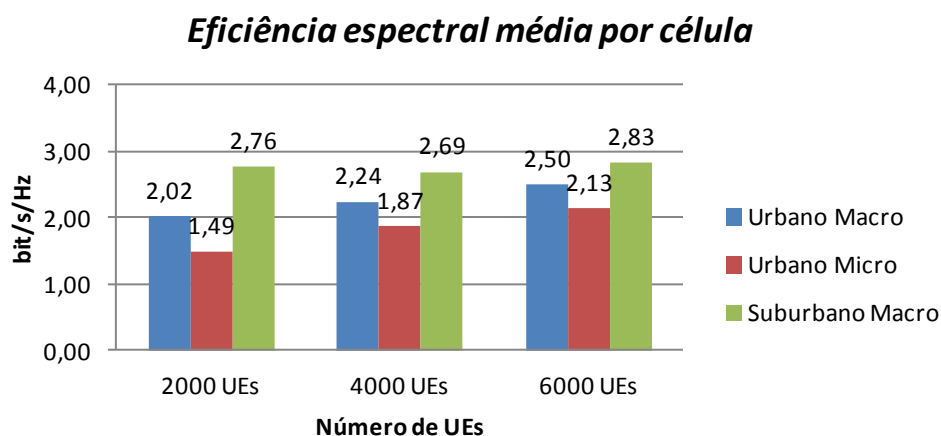


Figura 4.26 - Eficiência espectral média em redes femto-celulares.

Eficiência espectral média por célula

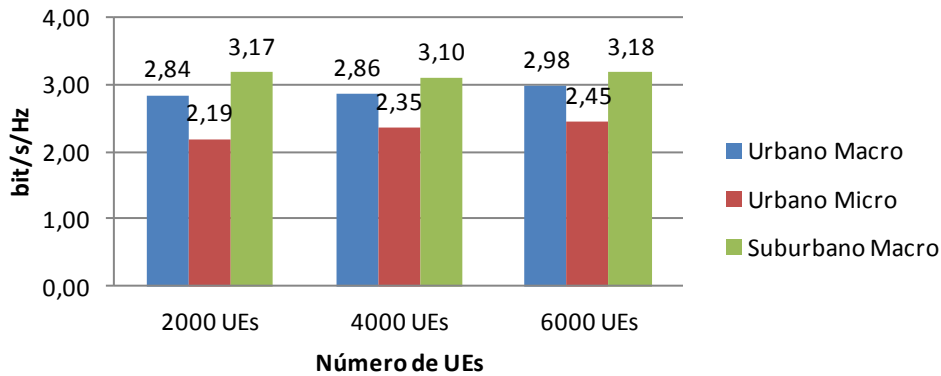


Figura 4.27 - Eficiência espectral média em redes híbridas.

Observando a Figura 4.22, a Figura 4.26 e a Figura 4.27 é visível que os valores da eficiência espectral por célula são bastante próximos para os diferentes ambientes de propagação e soluções em estudo. Tal indica que a alocação de recursos de cada célula está a ser efectuada de forma justa pelos utilizadores de cada célula. O meio que possui valores superiores em redes femto-celulares e híbridas é o suburbano, seguido do meio urbano com macro-células e do meio urbano com micro-células. Na solução que não possui femto-células, são conseguidos valores superiores para o meio urbano macro celular, seguido do meio suburbano e do meio urbano com micro-células. Respeitante às soluções em estudo, a que apresenta melhores valores de eficiência é a rede macro celular sendo que, a rede femto celular é a que vai apresentar valores inferiores. No entanto, a diferença dos dois não é significativa levando assim a concluir que uma solução femto celular ou híbrida são preferíveis a redes macro-celulares quando existe a necessidade de dar cobertura a utilizadores de serviços com grandes ritmos de transmissão.

Os valores da eficiência espectral por célula são elevados tendo em conta o apresentado em [41], visto que o modo de transmissão que está a ser utilizado é MIMO 4×4 e a largura de banda seleccionada é de 20MHz. Um canal rádio com a largura de banda mencionada vai apresentar um número de recursos disponíveis superior, face às restantes larguras de banda, logo torna-se mais fácil gerir os pedidos dos utilizadores da rede, tendo-se assim maiores níveis de eficiência espectral se o escalonador que estiver a ser usado for justo.

Uma outra análise que foi realizada, tal como mencionado em capítulos anteriores, foi a da introdução de uma determinada distribuição de serviços. Assim, de modo a perceber a diferença entre o modelo de tráfego acima apresentado e o modelo de tráfego que possui a distribuição de serviços apresentada na Tabela 3.3, foram extraídos resultados para uma rede macro-celular, com 2000 utilizadores, com mobilidade.

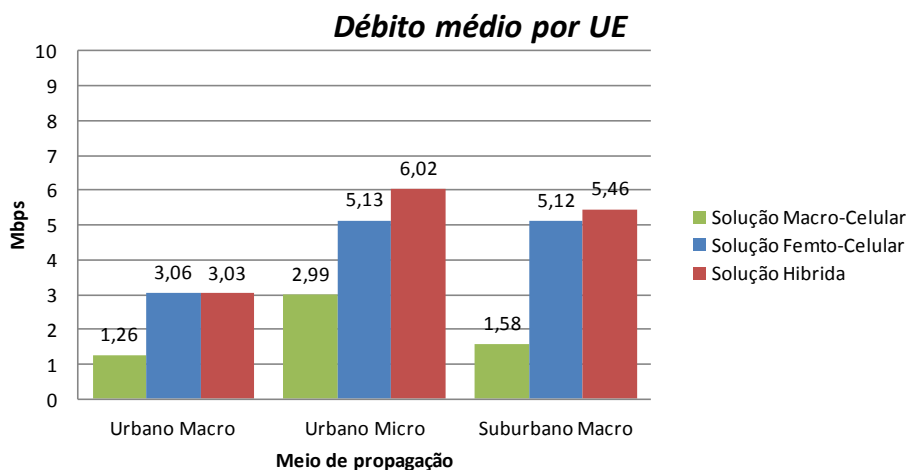


Figura 4.28 - Débito por utilizador.

Observando os débitos conseguidos verifica-se que com a distribuição de serviços utilizada, Figura 4.28, os valores de débito conseguidos vão ser bastante inferiores aos obtidos com o modelo *fullbuffer*. Tal indica que para os serviços seleccionados é necessário uma maior alocação de recursos, visto possuírem um *data rate* elevado, e serem serviços que precisam de níveis de QoS elevados como por exemplo o *video*. No entanto as simulações realizadas foram com o modelo *fullbuffer* visto ser o que permitiu extrair resultados para diversos cenários de rede, com diferentes condições e densidades populacionais.

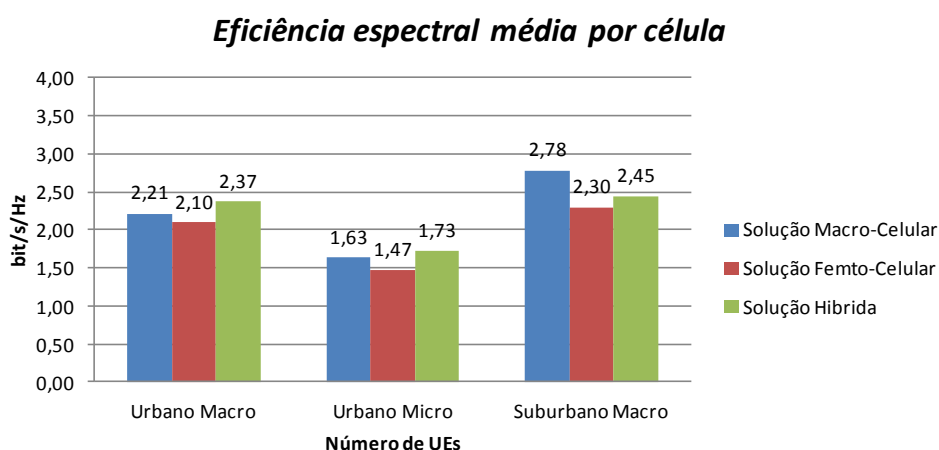


Figura 4.29 - Eficiência espectral média.

No que diz respeito aos valores de eficiência espectral por célula, Figura 4.29, é possível observar que os valores conseguidos vão ser inferiores aos valores de um modelo *fullbuffer*. Isto deve-se ao facto de existirem percentagens de utilização de serviços diferentes levando assim a que uma determinada fracção populacional necessite de mais recursos do que as restantes. Assim, é introduzida uma desigualdade entre utilizadores o que contribui para valores de eficiência inferiores.

De forma a ser possível perceber qual a influência que o modo de acesso às femto-células tem nos débitos conseguidos, foram realizadas simulações para ambientes femto-celulares, com 2000 utilizadores que possuem mobilidade.

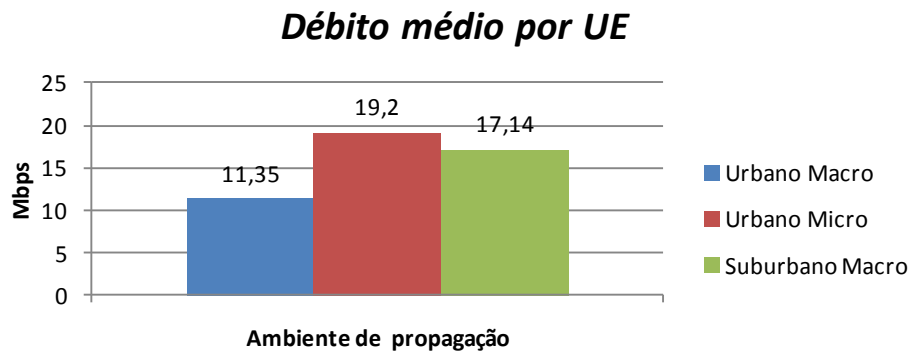


Figura 4.30 - Débito por utilizador.

Assim, na Figura 4.30 é possível verificar que os débitos conseguidos são significativamente superiores aos conseguidos nas situações anteriormente apresentadas e estudadas. Tal era espectável visto que cada femto-célula passa a ter apenas um número restrito de utilizadores levando assim a que cada utilizador possua mais recursos atingindo assim maiores valores de capacidade. Na Figura 4.31 estão representados os valores de eficiência espectral obtidos onde é visível que as femto-células com o modo de acesso CSG são muito mais eficientes do que em modo OSG. O ambiente que torna mais perceptível o aumento de eficiência introduzido pelas femto-células em modo CSG é o ambiente urbano macro devido ao facto de os valores de interferência presentes neste serem superiores.

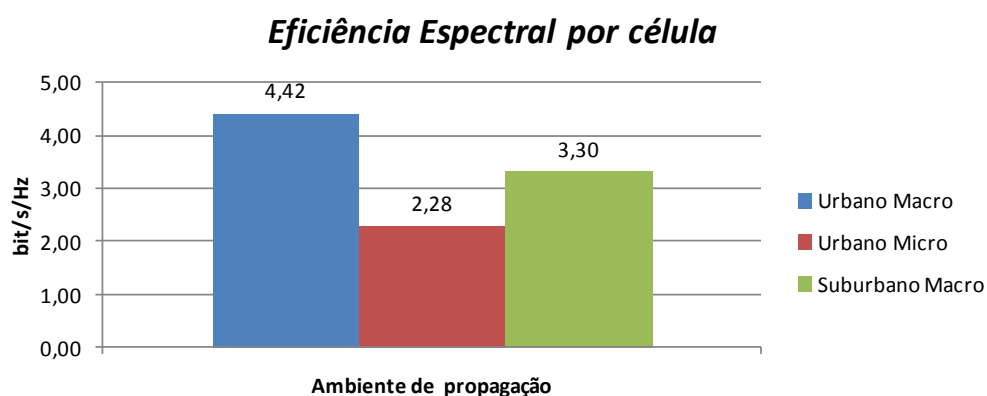


Figura 4.31 - Eficiência espectral média.

Uns gráficos que ajudam a perceber a variação de alocação de recursos em função da largura de banda necessária são os da Figura 4.32, Figura 4.33 e Figura 4.34 onde se pode comparar os valores do débito conseguido por UE em função da banda SINR para redes macro-celulares, femto-celulares e

híbridas. A banda SINR consiste na divisão do nível de sinal disponibilizado pela soma das interferentes e potência de ruído existente. Assim à medida a que o SINR aumenta, o débito por utilizador vai também aumentar, tal como era expectável, visto que o número de interferentes diminui logo a qualidade do sinal aumenta. Para valores superiores de SINR e de débitos conseguidos, os níveis de variância da rede vão aumentar uma vez que, melhores valores de SINR se traduzem em mais recursos disponíveis. Desta forma, a existência de um maior número de utilizadores de serviços, e de diferentes serviços, com necessidades de débitos diferentes, vai levar a que exista uma grande discrepância entre os débitos conseguidos na rede. Das três soluções de rede apresentadas, a que permite valores de débito por utilizador superiores é a de uma rede femto-celular e, a que permite valores inferiores de débito é a macro-celular.

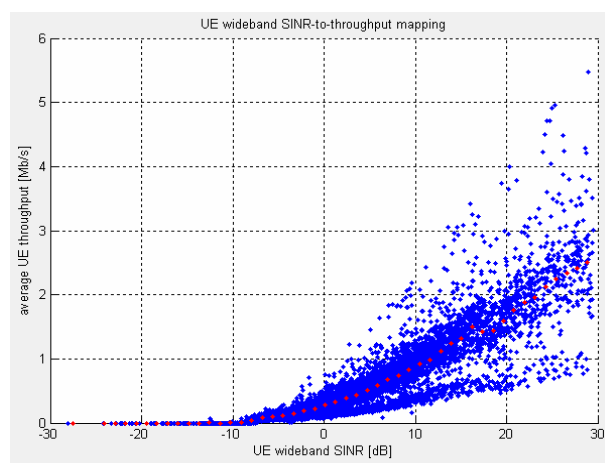


Figura 4.32 – Débito médio por UE em função do SINR em redes macro-celulares.

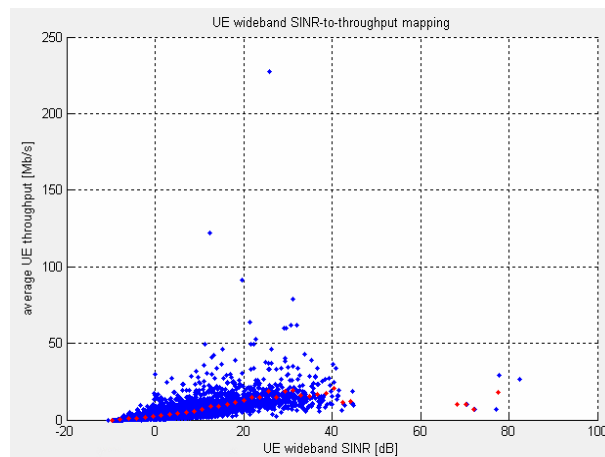


Figura 4.33 - Débito médio por UE em função do SINR em redes femto-celulares.

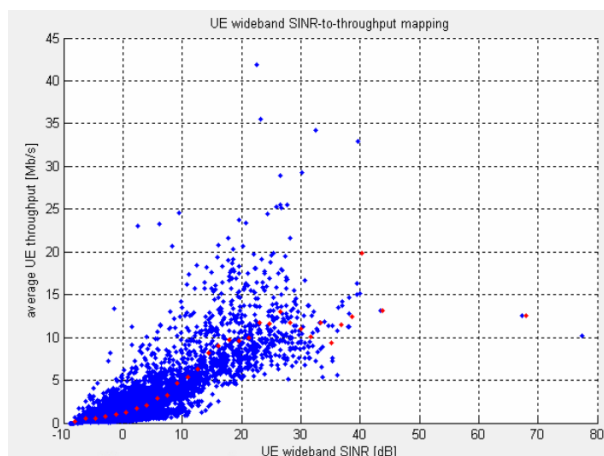


Figura 4.34 - Débito médio por UE em função do SINR em redes híbridas.

Fazendo agora uma análise dos resultados acima comentados tendo em conta as técnicas de coordenação de interferência utilizadas, torna-se bastante perceptível o porquê dos débitos conseguidos. Isto porque, a frequência utilizada nas femto-células foi igual à das macro-células logo, a interferência entre a camada superior e as femto-células é significativa pois passa a existir interferência co-canal que, com canais adjacentes não existiria. Outro método que é relevante para os resultados obtidos consiste no modo de acesso às femto-células. Nas presentes simulações foi utilizado um modo OSG ou seja, todos os utilizadores que se encontrassem no raio de cobertura das femto-células poderiam aceder aos recursos das mesmas. Esta não é a melhor solução no que diz respeito à interferência entre camadas, como foi possível observar pelos resultados acima apresentados, mas é a que permite um número de pontos de acesso mais reduzido, o que no presente simulador é relevante. Por último, poderiam ser atribuídos níveis de potência diferentes às femto-células e às macro-células no entanto, o simulador seleccionado só permite a utilização de uma única potência.

Respeitante a redes que necessitem de dar cobertura a uma densidade populacional elevada e com a necessidade de serviços pouco exigentes ao nível de capacidades e valores de QoS requeridos, a melhor solução é a de redes macro ou micro-celulares. Ao nível de zonas de sombra, a adopção de femto-celulas constitui uma boa solução caso seja realizado um planeamento otimizado e, com as técnicas de mitigação de interferência mais apropriadas. Isto para que a interferência introduzida pela presente solução nas redes já existentes não seja elevada levando a que o ganho de capacidade que as femto-células introduzem, deixe de existir. Uma outra vantagem que as femto-células apresentam é que são maioritariamente utilizadas em ambientes indoor, que é um grande consumidor de tráfego logo, vão permitir um escoamento do mesmo levando assim a uma melhoria nos níveis de QoS conseguidos.

4.2. Análise Financeira

O aumento do tráfego móvel tem vindo a ser compensado através do aumento do espectro disponível para as comunicações móveis e do aumento do número de *sites* com respectivas optimizações. Assim o objectivo dos operadores passa por possuir *sites* que consigam cumprir com os requisitos necessários, ao menos preço possível.

No que diz respeito à solução em estudo, a variação dos custos de investimento está directamente relacionada com o número de femto-células utilizadas para dar cobertura à zona pretendida. Um dos factores que influencia o número de femto-células necessárias para a rede é o cenário em que são utilizadas ou seja, se são para cobrir zonas de sombra ou se são para escoar tráfego e o método de controlo de acesso adoptado. Caso seja adoptada uma solução CSG o número de femto-células é necessariamente superior do que na solução OSG fazendo assim com que, eventualmente, uma rede macro celular acabe por ser mais viável financeiramente. Deste modo a presente avaliação financeira é importante visto que permite quantificar a rentabilidade que uma solução femto-celular apresenta para os operadores, face às restantes. Desta forma, serão apresentadas as três fases de análise do projecto sendo elas compostas pelo cálculo dos valores do custo total da rede, dos valores do VAL - Valor Actual Líquido e, dos valores do *payback*.

Assim o custo total da rede é obtido com recurso ao CAPEX - capital investido na solução e, ao OPEX - custos operacionais da mesma. No que diz respeito ao valor do CAPEX, este consiste no custo da aquisição de todo o equipamento; no custo de cada *site*; e, no custo das ligações existentes entre os *enodeBs* e as centrais. No OPEX, são contabilizados os custos de manutenção dos *sites*; os custos de aluguer dos mesmos se for o caso; e os custos administrativos, de vendas e gerais.

Um dos parâmetros importantes aquando de uma análise financeira de um projecto é o VAL visto que é um dos indicadores mais utilizados na avaliação da viabilidade do mesmo. O VAL é calculado a partir das receitas líquidas de exploração actualizadas - *cash-flows*, a uma determinada taxa de actualização, diminuído dos valores investidos actualizados à mesma taxa. Caso o valor obtido seja positivo o projecto é rentável mas caso contrário, o projecto não demonstra ter capacidade de gerar lucros suficientes, não possuindo assim condições para avançar e para ser viável. Assim através do valor obtido a partir da equação (4.2), presente em [42], é possível optar pela melhor solução que será a que apresentar um VAL superior.

$$VAL = - \sum_{k=0}^n \frac{I_k}{(1+i)^k} + \sum_{k=0}^n \frac{CF_k}{(1+i)^k} + \frac{V_r}{(1+i)^n} \quad (4.2)$$

onde,

I_k Investimentos efectuados no período k

CF_k	Cash-Flow ou receita líquida de exploração no período k
V_r	Valor residencial dos bens investidos no final da vida útil
k	Período considerado
i	Taxa de actualização

Por último, um outro critério que foi utilizado na análise das variadas soluções foi o do período de recuperação, mais conhecido como *payback*. Com este, procura-se analisar o risco que está inerente a um determinado projecto, utilizando o factor tempo como medida de risco, uma vez que quanto mais rápido é o reembolso do investimento, menor é o risco de um projecto [42]. Deste modo, o *payback* do projecto foi calculado com recurso à equação (4.3).

$$Payback = \sum_{k=0}^n \frac{CF_k}{(1+i)^k} = \sum_{k=0}^n \frac{I_k}{(1+i)^k} \quad (4.3)$$

Depois disto, começando pela parametrização do capital investido na rede macro celular, os custos CAPEX considerados foram os do *core*; do *backhaul*, que incluem as ligações estabelecidas entre os *enodeBs* e as centrais; os custos de aquisição, construção e instalação dos vários *sites*; e os da aquisição do espectro. Ao nível das ligações, o preço das mesmas foi tirado com recurso à tabela presente no anexo I e, foi considerado que numa das ligações o S-GW e o *enodeB* se encontravam na mesma central enquanto que, nas restantes os mesmos se encontravam em centrais diferentes. Respeitante à rede femto-celular o CAPEX é idêntico ao da rede macro celular, visto que se está presente uma arquitectura *flat* IP, com a excepção de que vão ser incluídos os custos da *security gateway* e do *HeNB gateway* e retirados os custos de aquisição, construção e instalação dos *sites*. Caso as femto-células sejam utilizadas em soluções *outdoor*, esta última parcela passa a ser considerada, o que não é a solução estudada.

No que diz respeito aos custos OPEX, as parcelas contabilizadas nas macro-células foram as dos custos de manutenção e operações dos *sites*; as dos custos de aluguer dos mesmos; e, as dos custos *SG&A* - *Sales, General e Administrative*, onde estão incluídos os custos das vendas, marketing e subsídios e, os custos relacionados com os clientes e respectiva facturação. Nas femto-células, estes custos são idênticos aos das macro-células mas sem a contabilização da manutenção e aluguer do *site* visto que tal passa a ser da responsabilidade do utilizador.

Todos os parâmetros acima mencionados encontram-se apresentados na Tabela 4.1, com as excepção dos custos *SG&A*, visto que não foi possível obter um valor de referência para os mesmos. No que diz respeito ao custo de aquisição do lote da gama dos 2.6GHz, este não foi contabilizado para o estudo visto que tal foi considerado um investimento já realizado para projectos anteriores do operador. Na tabela abaixo representada é possível observar uma breve descrição de cada variável e exemplos de alguns dos custos praticados e que foram utilizados no presente estudo.

Tabela 4.1 – Custos dos elementos constituintes da rede.

Parcelas consideradas	Descrição	Custo [k€]	Referência
$C_{espectro}$	Custo de aquisição do espectro	146 000.00	[39]
	Custo de aquisição de um lote na gama 2.6GHz	3 000.00	[39]
$C_{backhaul}$			
$C_{transporte}$	Ligações <i>Fast Ethernet</i> 100Mbps (co-localizadas)	2.40	[43]
	Ligações <i>Fast Ethernet</i> 100Mbps (centrais diferentes)	3.60	
	Ligações <i>Fast Ethernet</i> 1Gbps (co-localizadas)	3.60	
	Ligações <i>Fast Ethernet</i> 1Gbps (centrais diferentes)	4.80	
$C_{Equipamento}$	Equipamento de rede	146.60	[44]
C_{core}	Custo do <i>core</i> da rede		[45][46] [47]
	Cisco ASR 5000 Core Platform	42.80	[45]
	Cisco ASR 5000 PCRF	42.80	[47]
	Custo do equipamento com funções de <i>Security</i> e <i>Home enodeB gateway</i>	6.80	[48]
C_{sites}	Custo do <i>site</i> , respectiva aquisição e construção	108.00	[44]
C_{femto}	Custo do ponto de acesso da femto-célula	0.145	[49]
$C_{manutenção}$	Custos de manutenção do <i>site</i> , como fracção do capital investido nos equipamentos, por ano	$0,12 \times C_{equip}$	[50]
$C_{gestão}$	Custos de aluguer dos <i>site</i> por ano	14.40	[44]

O capital investido na rede macro e femto-celular foi conseguido através da utilização dos valores acima representados na equações (4.4), (4.5), (4.6) e (4.7), onde n é representativo do número de estações existentes.

$$CAPEX_{macro} = c_{sites} + c_{core} + c_{backhaul} + c_{transporte} \times n \quad (4.4)$$

$$CAPEX_{femto} = c_{core} + c_{backhaul} + c_{security\ GW} + c_{HeNB\ GW} + c_{transporte} \times n \quad (4.5)$$

$$OPEX_{macro} = c_{manutenção} + n(c_{gestão} + c_{SG\&A}) \quad (4.6)$$

$$OPEX_{femto} = n \times c_{SG\&A} \quad (4.7)$$

De modo a que os operadores consigam suportar o custo de lançamento da rede torna-se necessário a realização de um empréstimo, que vai ter o valor do capital investido, a cumprir em N anos e a ser pago com a taxa de r . O capital investido na rede macro celular vai ter o valor apresentado pela equação (4.8) e, no caso da solução femto-celular, vai ter o valor igual ao resultado da equação (4.9).

No caso das redes híbridas, o custo total do investimento é dado pela soma do custo de implementação de uma rede macro e de uma rede femto-celular.

$$C_{total\ macro} = c_{sites} + c_{core} + c_{backhaul} + c_{espectro} + c_{transporte} \times n + c_{manutenção} + n(c_{gestão} + c_{SG\&A}) \quad (4.8)$$

$$C_{total\ femto} = c_{core} + c_{backhaul} + c_{security\ GW} + c_{HeNB\ GW} + c_{transporte} \times n + n \times c_{SG\&A} \quad (4.9)$$

A segunda fase de estudo passou pela execução do VAL do projecto onde foram realizadas algumas considerações. Para a determinação deste critério foi necessário construir tabelas com os valores das receitas líquidas, *cash-flow*, do projecto, que se encontram no anexo J, e onde foram assumidas as taxas indicadas na Tabela 4.2. O valor do imposto sobre rendimentos apresentado na presente tabela é constituído pelo valor do imposto sobre o rendimento das pessoas colectivas – 25% e, pelo valor da derrama – 1,5%.

Tabela 4.2 – Considerações praticadas nas tabelas de *cash-flow*.

Taxas anuais consideradas	Valor atribuído
Taxa de actualização	10%
Taxa de provisão	10%
ISR - Imposto Sobre Rendimentos	26,5%
Taxa de crescimento de vendas	3%
Taxa de juro da amortização dos empréstimos	7%
Taxa de amortização dos equipamentos	10%
Taxa de crescimento da manutenção	3%

De modo a ser possível preencher as tabelas de *cash-flow*, foi preciso proceder à execução do mapa de amortizações dos custos dos equipamentos da rede e aquisição dos *sites*, das tabelas das necessidades de fundo de maneió e da agenda de amortização do empréstimo concedido. Para efeitos de estudo, considerou-se que a duração do empréstimo concedido seria de 5 anos para as soluções femto-celulares e de 10 anos para as soluções macro-celulares e híbridas e que, o operador em questão, seria a *Vodafone* visto que as femto-células utilizadas no subcapítulo anterior são do presente operador.

Na construção da tabela de *cash-flow*, os custos variáveis são constituídos pelos custos de gestão dos *sites* e, os custos fixos são dados pelo custo do equipamento de rede e manutenção de cada *site*. Na tabela de fundo de maneió, foram consideradas as vendas, os fornecedores, as licenças e a manutenção e aluguer dos *sites*. Os fornecedores encontram-se subdivididos nos fornecedores de imobilizado ou seja, os equipamentos da rede; nos fornecedores das linhas de transporte e, na instalação de cada *site*. Um dos parâmetros que não foi contabilizado foi o que corresponde aos clientes da rede pois foi assumido que, no final do ano, todos os clientes efectuaram o pagamento correspondente ao valor das vendas. Por último considerou-se que o valor a pagar a fornecedores, à excepção das linhas de

transmissão, foi coberto no final do primeiro ano e que, o valor anual de vendas é igual ao volume das receitas de todos os utilizadores da rede. Assim, após um estudo realizado sobre os tarifários que a *Vodafone* possui actualmente, e definindo um universo de 2000 utilizadores, foi considerado que cada utilizador iria pagar pelo serviço disponibilizado 35€ levando assim a que existisse um volume de vendas anual de 840 000 €. Os custos considerados para a manutenção e vendas na solução macro celular, femto celular e híbrida foram os mesmos.

A terceira e última fase da análise financeira consiste na determinação do período de recuperação do investimento que foi realizado através da equação (4.10) visto a equação acima representada, (4.3), ser um pouco de difícil resolução.

Periodo Payback

$$= \text{Número anos negativos} \quad (4.10)$$

$$- |Cash - Flow \text{ Actualizado último ano negativo}| / (Cash$$

$$- Flow \text{ Acumulado ano positivo})$$

Depois de tudo o acima explicado, foram definidos os cenários de estudo de forma a ser possível estabelecer uma comparação entre as variadas soluções verificando assim qual a mais rentável. Assim, foram extraídos os valores dos parâmetros acima mencionados para soluções macro-celulares, femto-celulares e híbridas, para altas e baixas capacidades. Respeitante ao número de *enodeBs* da rede macro-celular, foram considerados 19 *enodeBs* enquanto, no estudo da rede femto-celular foram considerados 50 pontos de acesso. Ao nível da rede híbrida, todo o projecto de investimento da solução foi executado para 50 femto-células e 19 *enodeBs*.

Tabela 4.3 – Resultados obtidos.

Solução de rede	Capital Investido [k€]	VAL [k€]	Payback
Rede macro-celular			
Capacidades de 100Mbps	2 652.9	1 682.7	5 Anos, 6 meses
Capacidades de 1Gbps	2 675.7	1 690.1	5 Anos, 11 meses
Rede femto-celular			
Capacidades de 100Mbps	417.9	2 259.7	Ano do investimento inicial
Capacidades de 1Gbps	477.9	2 274.9	Ano do investimento inicial
Rede Híbrida			
Capacidades de 100Mbps	2 840.6	1 608.8	6 Anos, 4 meses
Capacidades de 1Gbps	2 923.4	1 635.5	6 Anos, 7 meses

Realizando uma análise da Tabela 4.3 é visível que para capacidades de 1Gbps os valores do capital investido vão ser superiores quando comparados com os da solução de 100Mbps mas que fica mais em

conta investir numa rede de 1Gbps do que numa rede de 100Mbps visto que os valores do período de recuperação e do investimento inicial não são muito diferentes dos valores obtidos para redes macro-celulares.

No que diz respeito ao valor do VAL, este assume valores sempre positivos nas soluções de rede apresentadas permitindo assim concluir que o valor acumulado das receitas líquidas, *cash-flow*, é superior ao do capital investido. Tal indica que o investimento realizado em cada solução é viável e vantajoso e que é um investimento a implementar. Caso o VAL possuísse valores negativos, tal era indicador de que as receitas líquidas eram inferiores ao valor do capital investido levando assim a que o projecto a realizar não possuísse racionalidade financeira. Deste modo, fazendo uma quantificação monetária das variadas soluções através do VAL, é possível observar que a solução mais viável para ambas as capacidades é a de uma rede femto-celular, visto que o VAL desta é superior ao das restantes soluções.

Ao nível do payback os valores conseguidos são superiores na rede híbrida, como era espectável, uma vez que o capital investido na mesma é superior ao da rede macro e femto-celular levando assim a que o período de recuperação do investimento efectuado seja superior. Desta forma é visível que o investimento inicial na rede híbrida é recuperado ao fim de 6 anos, na rede macro-celular ao fim de aproximadamente cinco anos e, na rede femto-celular, é logo no ano do investimento inicial uma vez que, o valor anual de receitas é praticamente igual ao dobro do valor do investimento. Deste ponto de vista, as soluções femto-celulares são preferíveis na medida em que o retorno do investimento inicial é mais rápido do que nos restantes soluções.

Depois de tudo isto é possível concluir que, para situações onde já exista uma rede macro celular construída e seja necessário escoar tráfego de células já existentes ou, dar cobertura a utilizadores com serviços mais exigentes ao nível da capacidade requerida, torna-se mais vantajoso um investimento em femto-células nas zonas pretendidas do que na construção de um novo *site*. Tal está relacionado com o facto da adopção de uma rede macro celular acarretar custos de construção e de manutenção que a solução femto celular não possui. Caso seja necessário dar cobertura a utilizadores de serviços de reduzida capacidade, acaba por ser mais viável montar um novo *enodeB* na zona em questão, uma vez que um número de estações mais reduzido dá cobertura a um maior número de utilizadores quando comparado com as femto-células e porque se iria estar a disponibilizar recursos que não iriam ser utilizados.

Uma outra conclusão que foi possível retirar é que, diminuindo o número de *enodeBs* da rede e aumentando o número de femto-células, o valor do capital inicial é reduzido bem como o valor do período de recuperação do mesmo. Assim é possível concluir que, num cenário onde é necessário dar cobertura a uma determinada zona ou seja, onde a rede tenha de ser construída de raiz, é mais eficiente optar por uma rede híbrida. No entanto é preciso ter em consideração que a distribuição das estações

deve ser realizada de forma otimizada de forma a dar cobertura a todos os utilizadores e a diminuir o número de *enodeBs* e de pontos de acesso necessários. Para tal, é preciso ter em conta que antes de tomar uma decisão é necessário realizar uma análise da procura e verificar quais as necessidades dos utilizadores a cobrir e a qual a melhor forma de o fazer.

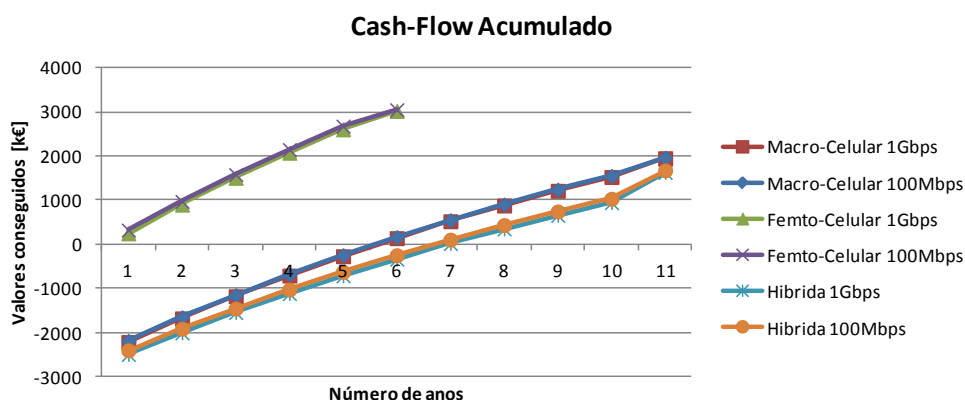


Figura 4.35 – Valores de Cash-Flow Acumulado.

Na Figura 4.35 é possível comparar os valores de *cash-flow* acumulados para cada uma das soluções estudadas. Assim, é visível o ano em que o investimento nas soluções macro-celulares e híbridas é recuperado do mesmo modo que é visível que a solução femto-celular, logo no primeiro ano, possui logo valores positivos. No que respeita à diferença entre os valores obtidos para redes de 1Gbps e de 100Mbps, é visível que esta possui valores bastante reduzidos sendo assim mais viável a implementação de redes de maior capacidade.

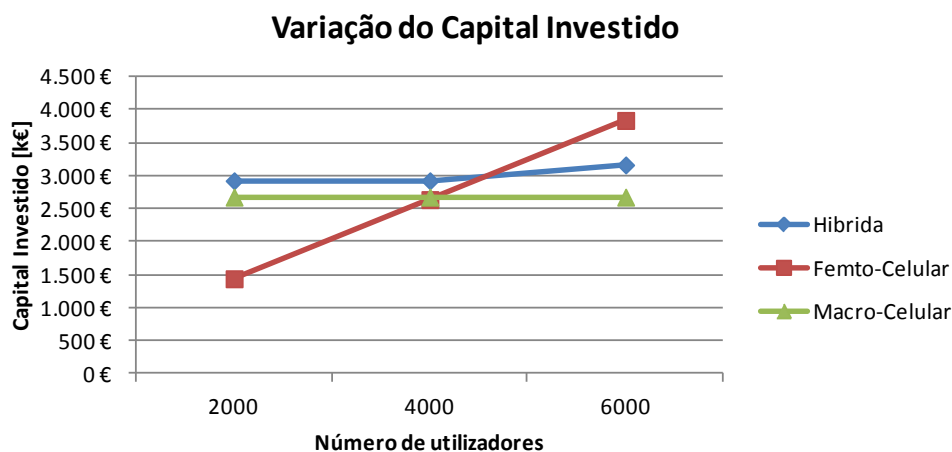


Figura 4.36 – Variação do Capital Investido.

Na Figura 4.36 encontra-se representado um gráfico com a variação do custo do capital investido em função do número de utilizadores da rede. Assim, é visível que a diferença do valor para soluções

macro-celulares e híbridas é relativamente reduzida e não vai existir uma variação brusca quando são introduzidos mais utilizadores na rede. No que diz respeito às soluções femto-celulares, é possível verificar que o valor inicial do capital investido é significativamente mais reduzido que o das restantes soluções no entanto, a variação do mesmo em função do número de utilizadores vai ser muito mais acentuada.

4.3. Cenário real de estudo

Após todo o estudo que foi realizado e apresentado nos subcapítulos anteriores, foi possível perceber as vantagens que a utilização de femto-células introduz; quais os meios que permitem melhores resultados; e qual a variação dos débitos fornecidos consoante o número de utilizadores da rede.

Assim, o que se pretende neste capítulo é apresentar a melhor solução de aplicação das femto-células num cenário real e verificar quais os débitos que se conseguiria. Deste modo, foi escolhida a zona do Saldanha em Lisboa, como já mencionado em capítulos anteriores, visto ser um ambiente urbano e com uma densidade populacional que justifica a utilização da presente solução.

Uma vantagem que a introdução de um cenário real apresenta passa pela obtenção de resultados mais realistas na medida em que são tidos em conta valores de atenuação reais. Tal está relacionado com o facto de serem consideradas elevações do terreno que nas simulações anteriores não existiam - Figura 4.37 e, a presença de obstáculos entre o utilizador e o *enodeB*, que também não era contabilizado no modelo de propagação implementado.

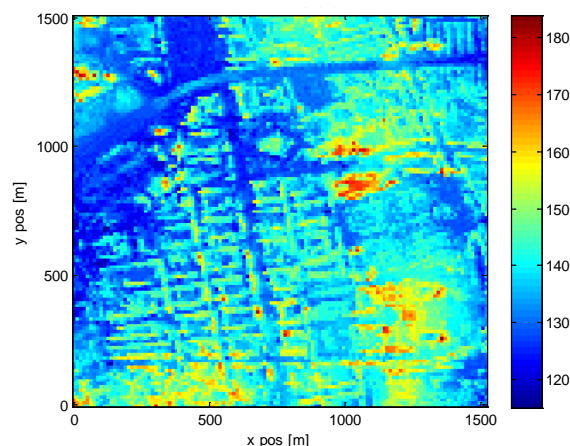


Figura 4.37 – Mapa de elevação do terreno.

No final de todo o estudo realizado, é possível afirmar que a solução híbrida é a mais viável. No entanto, devido a limitações do simulador utilizado, não foi possível a obtenção de resultados com a presente solução de rede. Desta forma, vão ser apresentados resultados para uma solução macro-celular, na zona do Saldanha, com recurso ao simulador utilizado e aos ficheiros desenvolvidos.

Tal como mencionado anteriormente, os módulos desenvolvidos têm como parâmetros de entrada os ficheiros de configuração dos *sites* presentes na área em estudo. Cada ficheiro de configuração possui informações sobre a altura a que o *site* se encontra, qual a polarização da antena do mesmo, quantos sectores o *site* possui, entre outros. Um dos parâmetros que o ficheiro mencionado contém, é a localização geográfica de cada *site* no mapa a dimensionar. Dito isto, foi realizada uma grelha hexagonal com recurso à ferramenta *Google Earth*, com a localização dos *enodeBs* necessários para dar cobertura à área em estudo. Assim, na Figura 4.38 é visível a grelha mencionada e a respectiva localização de cada *enodeB*. No que diz respeito aos mesmos, foi considerado que cada um possui um raio de cobertura de 650m visto ser o valor utilizado para os cenários macro-celulares anteriormente estudados.

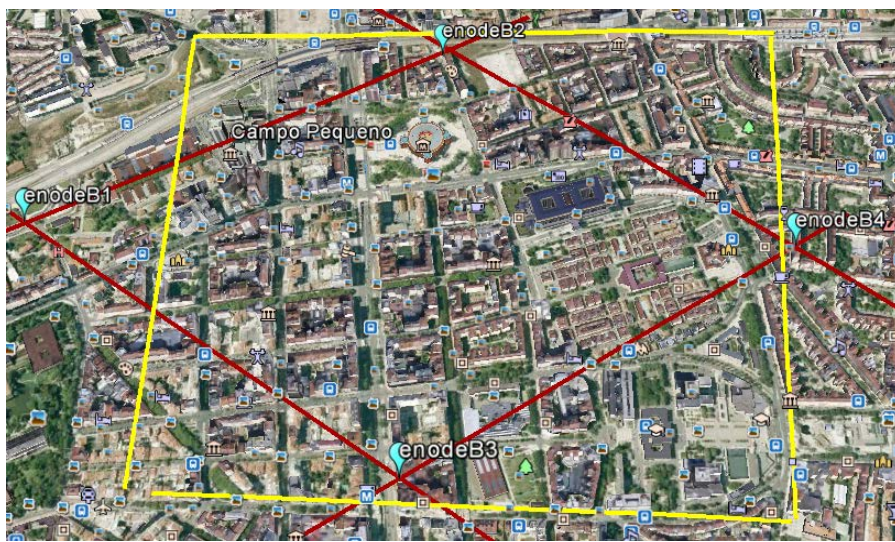


Figura 4.38 – Rede macro-celular no Saldanha.

Deste modo, após a introdução dos ficheiros necessários com a localização dos *sites* acima representados e do ficheiro DTM do Saldanha, foram obtidos os valores das perdas de propagação e de capacidade abaixo representados.

Assim, na Figura 4.39 é visível a distribuição dos *enodeBs* de acordo com as posições carregadas pelo ficheiro de configuração de cada *site*.

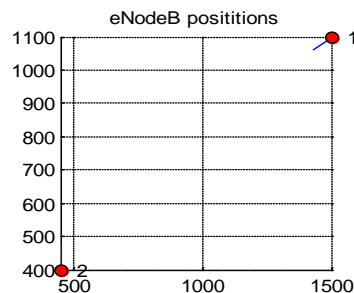


Figura 4.39 - Localização dos *enodeBs* na rede.

No que respeita às imagens abaixo apresentadas, na Figura 4.40, é possível observar os valores de perdas existentes nos três sectores do *enodeB* 2. Estabelecendo uma comparação com os valores anteriormente obtidos, é possível verificar que os valores de perdas de propagação no terreno são bastante superiores aos obtidos nos resultados anteriores. Tal está relacionado com os valores da elevação do terreno que nunca tinham sido contabilizados.

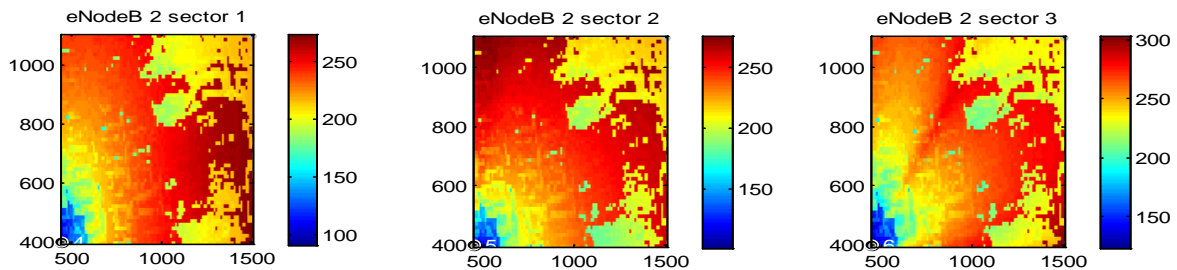


Figura 4.40 – Mapa *perdas de percurso* dos três sectores do *enodeB* 2.

Para além dos gráficos apresentados, foi também obtido o valor médio da capacidade por sector, igual a 2.56Mbps e, o valor da capacidade máxima por sector, igual a 146.67Mbps. Para um cenário macro-celular sem importação de um mapa real foi obtido o valor 156.87Mbps para a capacidade máxima por sector sendo assim possível verificar qual o impacto que a importação de um mapa real tem no desempenho da rede. Assim é visível que para o Saldanha, os valores de capacidade conseguidos são inferiores aos valores de capacidade dos mapas que o simulador dispõe uma vez que com a introdução do Saldanha passam a ser contabilizadas as elevações do terreno no cálculo das capacidades oferecidas.

Capítulo 5

Conclusões

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões do estudo aqui apresentado. Será efetuada uma descrição breve do trabalho desenvolvido sendo depois apresentadas as conclusões finais relativamente ao desempenho de rede e no desempenho económico-financeiro das diversas soluções. Finalmente será apresentado o trabalho futuro.

5.1. Trabalho desenvolvido

A presente dissertação teve como principal objectivo realizar uma análise das vantagens que a utilização de femto-células constitui para o mercado móvel actual, quando aplicadas ao LTE. Deste modo, foi realizado um estudo sobre a tecnologia utilizada, de forma a compreender o motivo da sua existência; o seu modo de funcionamento; e, quais as vantagens que apresenta face às restantes tecnologias. Um segundo estudo que foi realizado, foi no âmbito das femto-células tendo em conta que foi necessário perceber o enquadramento destas nas redes móveis; qual a sua utilidade para os operadores; e, quais os problemas que estas introduzem levando assim à sua reduzida utilização por parte dos operadores e utilizadores. Desta forma, foram abordadas os problemas de interferência introduzidos e quais as técnicas de mitigação de interferência utilizadas.

Após a realização de todo o estudo teórico foram realizados alguns estudos de forma a ser possível analisar quais os modos de transmissão que possibilitam débitos binários superiores, quais os escalonadores que permitiam maiores níveis de justiça no que diz respeito à atribuição de recursos na célula e quais os modelos de propagação mais apropriados para o presente estudo.

Depois de decididas quais as configurações que permitiam melhores resultados ao nível de débitos conseguidos, foram definidos vários cenários de teste de forma a concluir quais os que proporcionavam um melhor desempenho da rede e condições mais favoráveis à utilização de redes femto-celulares. Posteriormente foi apresentada uma análise financeira do projecto de modo a poder observar se a adopção de redes femto-celulares compensa o investimento nas mesmas ou não.

Por último, após toda a análise realizada, foi desenvolvido código de forma a ser puder integrar um cenário real no simulador utilizado e observar os resultados obtidos.

5.2. Conclusões finais

Depois de todo o trabalho desenvolvido, e ao longo da execução do mesmo, foram tiradas algumas conclusões ao nível do desempenho das femto-células e, de um ponto de vista financeiro. Assim, de seguida vão ser apresentadas as conclusões finais do trabalho respeitante a cada uma das análises realizadas.

5.2.1. *Desempenho da rede*

As femto-células apresentam como desvantagem o facto de introduzirem alguma interferência nas redes das camadas superiores. No entanto existem métodos que permitem contornar e reduzir a interferência introduzida, que permitem uma maior eficiência espectral da rede e, uma mais fácil

transição do utilizador entre redes macro e femto-celulares. Assim, verificou-se que a solução que consiste na partilha de canais entre as femto e as macro-células vem introduzir maiores níveis de liberdade ao nível da gestão da interferência entre células, principalmente em ambientes urbano densos mas, também requer um nível de gestão de interferência máximo no que diz respeito à rede macro-celular devido às femto-células que possuem co-canal. Ao nível do método de canais dedicados entre a rede macro e femto-celular, existe a vantagem de minimizar a interferência entre as duas camadas de rede e de simplificar o desenvolvimento da rede femto-celular. Esta é uma melhor solução para ambientes rurais onde o operador pode possuir canais rádio que não estão a ser utilizados. Respeitante à aplicação do método híbrido acima abordado, é o mais complexo na medida em que os operadores móveis não têm capacidade para atribuir canais dedicados às femto-células.

No que diz respeito aos níveis da capacidade acima obtidos é possível concluir que, mesmo sem a aplicação de técnicas de mitigação de interferência, existe um ganho nas capacidades obtidas por utilizador. No que respeita aos valores da eficiência por utilizador e aos valores da eficiência da rede, os melhores resultados são os da solução macro-celular sendo que a rede femto-celular é a que vai apresentar valores inferiores. No entanto a diferença dos dois não é significativa levando assim a concluir que uma solução femto-celular ou híbrida são preferíveis a redes macro-celulares para redes onde são necessários ritmos de transmissão e níveis de QoS elevados. Assim, para redes onde não existam grandes requisitos de QoS e de ritmos de transmissão e um número elevado de utilizadores, as redes macro-celulares são a solução mais viável visto que são conseguidos valores de capacidade por utilizador inferiores e possuem coberturas elevadas.

Nos estudos realizados foi também possível verificar que a presença de interferência nas redes femto-celulares e macro-celulares é preocupante na medida em que afecta os débitos conseguidos por utilizador e as estatísticas da rede logo, a implementação de uma boa técnica de mitigação de interferência e um planeamento optimizado são a chave para o bom desempenho de uma rede híbrida.

Em suma, é possível afirmar que as redes femto-celulares são uma boa solução para dar suporte a utilizadores que necessitem de elevados níveis de transmissão e de bons níveis de QoS. No entanto é preciso ter em conta que as femto-células dão cobertura a um grupo reduzido de utilizadores levando assim a que, quanto maior for o número de utilizadores, maior será o número de femto-células necessário.

5.2.2. *Análise financeira*

No que diz respeito à análise financeira realizada, é visível que o investimento numa rede femto-celular difere apenas nos custos operacionais face ao investimento em redes macro-celulares e que, as femto-células são a solução mais viável para redes de grande capacidade visto que o custo da rede para o operador é inferior e o seu retorno é mais rápido. Ao nível dos resultados obtidos para uma rede

híbrida é visível que as femto-células, quando aplicadas a áreas de cobertura de dimensão significativa, são um pouco dispendiosas para o operador. Isto porque, o número de pontos de acesso teria de ser elevado contribuindo assim para um elevado investimento da parte do operador na infraestrutura de rede. Respeitante à adopção de redes macro-celulares para dar cobertura a zonas de elevado nível de QoS, seria uma má opção tendo em conta que estas são redes de reduzida capacidade. Do mesmo modo que apostar na construção de redes femto-celulares para zonas onde não existem níveis de QoS exigentes, constitui também uma menos valia pois haveria recursos desperdiçados.

Para situações onde já exista cobertura móvel e seja necessário escoar tráfego de células já existentes ou, dar cobertura a utilizadores com serviços mais exigentes ao nível da capacidade requerida, deve ser uma prioridade para os operadores o investimento em femto-células nas zonas pretendidas do que na construção de um novo *site* uma vez que esta medida contribui para redes mais económicas. A adopção de uma solução híbrida vem também introduzir vantagens ao nível de novos negócios na área.

No entanto é preciso ter em conta que, aquando da realização de um investimento em femto-células torna-se necessário um planeamento celular mais cuidadoso de forma a conseguir o menor número de pontos de acesso possível, a dar cobertura a todos os utilizadores, a introduzir valores de interferência reduzidos com as camadas superiores e, uma maior robustez nos serviços disponibilizados. Foi também possível concluir que a solução femto-celular não é uma boa solução para um número elevado de utilizadores visto que não é uma rede de baixo custo.

Deste modo a aplicação de femto-células sobre redes macro-celulares já existentes em LTE, constitui uma solução viável de um ponto de vista de desempenho da rede e económico para os operadores.

5.3. Trabalho Futuro

Após a realização de todo o trabalho acima explicado, para trabalho futuro propõe-se o desenvolvimento de um simulador que seja mais orientado para redes femto-celulares de forma a que seja possível verificar de uma forma mais pormenorizada, o impacto que as técnicas de mitigação de interferência apresentam para as camadas de rede superiores. Isto porque o simulador utilizado é bastante complexo a nível computacional não permitindo assim a implementação de redes com dimensões um pouco mais reais, bem como a extracção de resultados variados para diferentes técnicas ICIC.

Assim seria interessante um simulador que aplicasse, de forma eficiente, a atribuição de variadas frequências a cada camada de rede, que permitisse uma atribuição de diferentes níveis de potência e a aplicação conjunta de redes CSG e OSG.

No que diz respeito ao modelo de propagação implementado, seria também interessante que fosse utilizado um modelo mais apropriado e real de forma a obter resultados mais fidedignos.

Por último, seria também interessante se existisse a possibilidade da realização de medidas dos níveis de sinal obtidos em diferentes condições permitindo assim uma comparação entre os valores espectáveis e os valores reais.

Bibliografia

- [1] Q. Dr. Hyung G. Myung, "Towards 4G, Technical Overview of LTE and LTE-Advanced," IEEE GLOBECOM 2011, 2011.
- [2] Airvana, "LTE Femtocells, The need for LTE femtocells," [Online]. Available: <http://www.airvana.com/technology/lte-femtocells/>. [Acedido em 2013].
- [3] FutureCom, "Femtocell para iniciantes," [Online]. Available: <http://futurecom.com.br/blog/femtocell-para-iniciantes/>. [Acedido em 2013].
- [4] G. D. V. K. A. P. Christos Bouras, "Power Management over Co-channel Femtocells in LTE-A Systems".
- [5] P. L. a. J. Shin, "Interference Management in LTE FemtoCell Systems Using Fractional Frequency Reuse".
- [6] W. G. T. O. Siyi Wang, "Energy Efficiency Evaluation of SISO and MIMO between LTE-femtocells and 802.11n Networks".
- [7] S.-E. E. a. B. Fourestié, "On frequency allocation in 3G LTE systems".
- [8] P. S. L. G. A. C. Filipe Vaz, "Technical, Financial and Environmental assessment of femtocell deployments in LTE-A networks".
- [9] A. Gago e N. Cota, "Performance Evaluation of Femtocells Usage on LTE," *ELSEVIER*, 2013.
- [10] H. H. a. A. Toskala, LTE for UMTS OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access, WILEY.
- [11] B. Y. Cho, "3GPP R8 LTE Overview," Intel Corporation.
- [12] S. Electronics, "LTE PHY Spec.," 24 Junho, 2008.
- [13] E. T. 1. 213, "LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures (3GPP TS 36.213 version 8.8.0 Release 8)," 2009-10.
- [14] N. Cota, "OFDM Fundamentals," Julho, 2011.
- [15] E. T. 136, "LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Channels and Modulation (3GPP TS 36.211 version 8.9.0 Release 8)," 2010.

- [16] J. Nascimento, “Análise de Desempenho em Redes Móveis Long Term Evolution”.
- [17] Ericsson, “Coverage and Capacity Dimensioning,” Março, 2010.
- [18] P. Persson, “LTE radio access, Radio interface dimensioning & planning,” Ericsson, [Online]. Available: <http://www.slideshare.net/allabout4g/lte-radio-access-radio-interface-dimensioning-planning>. [Acedido em 2013].
- [19] M. R. Joseph Boccuzzi, *Femtocells, Design & Application*, McGraw Hill.
- [20] Alcatel-Lucent, “TMO54050, 9365 Femto BSR Cluster R 2.2 Overview,” 2009.
- [21] Y. Shapira, “Femtocells, Technology and Practices,” IMS formation, Julho, 2010.
- [22] M. M. Kimio Watanabe, “Outdoor LTE Infrastructure Equipment (eNodeB),” FUJITSU, Janeiro, 2012.
- [23] “Institute of Telecommunications,” Technische Universitat Wien, [Online]. Available: <https://www.nt.tuwien.ac.at/downloads/featured-downloads>. [Acedido em 2013].
- [24] C. M. M. R. M. W. Sebastian Caban, *Evaluation of HSDPA and LTE*, Wiley.
- [25] J. H. L. B. Walfisch, “A Theoretical Model of UHF Propagation in Urban Environments,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Dezembro, 1988.
- [26] E. T. 1. 942, “LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Frequency (RF) system scenarios (3GPP TR 36.942 version 8.4.0 Release 8),” Julho, 2012.
- [27] 3. T. 25.814, “3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Physical layer aspects for evolved Universal Terrestrial Radio Access (UTRA) (Release 7),” Setembro, 2006.
- [28] R. I.-R. M.1225, “Guidelines for evaluation of radio transmission technologies for IMT-2000,” 1997.
- [29] P. E. M. F. F. Troels B. Sorensen, “Extension of the ITU Channel Models for Wideband (OFDM) Systems,” *IEEE*, 2005.
- [30] P. K. M. K. M. N. ., M. A. L. Hentilä, “MATLAB implementation of the WINNER Phase II,” Dezembro 2007. [Online]. Available: http://projects.celtic-initiative.org/winner+/phase_2_model.html. [Acedido em 2013].
- [31] M. W. M. R. Josep Colom Ikuno, “System level simulation of LTE networks,” Maio, 2010.

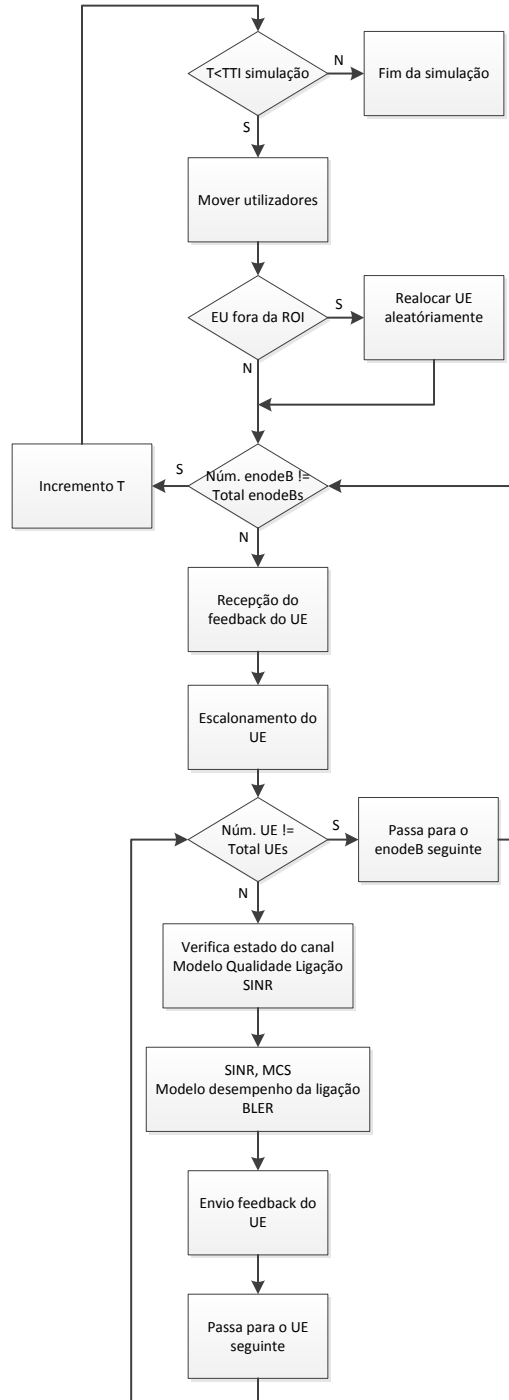
- [32] I. o. Telecommunications, “Vienna LTE Simulators, System Level Simulator Documentation, v1.7r1119”.
- [33] C. Chavallier, C. Brunner, A. Garavaglia, K. Murray e K. Baker, WCDMA UMTS Deployment Handbook, Planning and Optimization Aspects, Wiley, 2006.
- [34] 3. T. R. W. (. Meeting#51, “Simulation assumptions and parameters for FDD HeNB RF requirements,” Maio, 2009.
- [35] “WINNER II Channel Models, Part I,” Setembro 2007. [Online]. Available: <http://projects.celtic-initiative.org/winner+/WINNER2-Deliverables/D1.1.2v1.1.pdf>. [Acedido em 2013].
- [36] ANACOM, “Relatório e Contas 2012,” 2012.
- [37] Afridi e A. Khan, “Macro and Femto network aspects for realistic LTE usage scenarios,” Master's Degree Project, Stockholm, Sweden, 2011.
- [38] A. A. G. B. A. Guillaume de la Roche, LTE-Advanced and Next Generation Wireless Networks, Channel Modelling and Propagation, Wiley, 2013.
- [39] ANACOM. [Online]. Available: <http://www.anacom.pt/>. [Acedido em 2013].
- [40] T. K. K. I. P. I. Z. K. B. R. K. P. M. J. R. Preben E. Mogensen, “LTE-Advanced: The Path towards Gigabit/s in Wireless Mobile Communications,” IEEE, 2009.
- [41] J. Xu, “LTE-Advanced Signal Generation and Measurement Using SystemVue”.
- [42] E. C. N. C. Maria da Nazaré Barroso, Cálculo e instrumentos financeiros, Da prática para a teoria, Escolar Editora, 2ª edição.
- [43] P. Wholesale, “ORCE - Oferta de Referência de Circuitos Ethernet, Anexos 2, Preços,” 2013.
- [44] J. P. Zoraida Frias, “Techno-economic analysis of femtocell deployment in long-term evolution networks,” 2012.
- [45] Cisco, “Cisco ASR 5000 Multimedia Core Platform,” [Online]. Available: http://www.cisco.com/en/US/prod/collateral/wireless/ps11035/ps11047/ps11072/data_sheet_c78-606223.html. [Acedido em 2013].
- [46] M. Online, “ASR-5000 Multimedia Core Platform Complete Chassis,” [Online]. Available: http://shop.mcdiventi.co.uk/Cisco-ASR5000-CHSSYS-K9-ASR-5000-Multimedia-Core-Platform-Complete-Chassis.html?utm_campaign=applegate.co.uk&utm_medium=referral&utm_source=applegate.co.uk.

- [Acedido em 2013].
- [47] M. Online, “PCRF Active Session Block,” [Online]. Available: http://shop.mcidiventi.co.uk/Cisco-MIXS-00-PC3S41-PCRF-10-000-Active-Session-Block.html?utm_campaign=applegate.co.uk&utm_medium=referral&utm_source=applegate.co.uk. [Acedido em 2013].
- [48] M. Online, “Cisco ASR 5000 - RightToManage,” [Online]. Available: <http://shop.mcidiventi.co.uk/Cisco-UCSS-UNW4A5000-3-1-Prime-Network-4-3YPASS-Cisco-ASR-5000-RightToManage.html>. [Acedido em 2013].
- [49] “Vodafone Portugal,” [Online]. Available: <http://www.vodafone.pt/main/Particulares/Servicos/VozVideo/Vodafone-Sinal-Max>. [Acedido em 2013].
- [50] L. T. W. H. L. G. S. Holger Claussen, “Financial Analysis of a Pico-Cellular Home Network Deployment,” 2007.
- [51] Ericsson, “Control Channel Dimensioning,” Março, 2010.
- [52] V. Portugal, “Relatório e contas, Abril de 2012 a Março de 2013,” [Online]. Available: <http://prologica.ipapercms.dk/Vodafone/RelatorioeContas/RelatorioeContas2012/>. [Acedido em 2013].
- [53] “Overview of 3GPP Release 8 V0.2.11,” 2013-06.
- [54] P. A. N. Barreto, “Rumo à 4a Geração de Comunicações Móveis Tecnologias e Desafios,” UnB, Maio, 2010.

ANEXOS

A. Pseudo-Código do Simulador

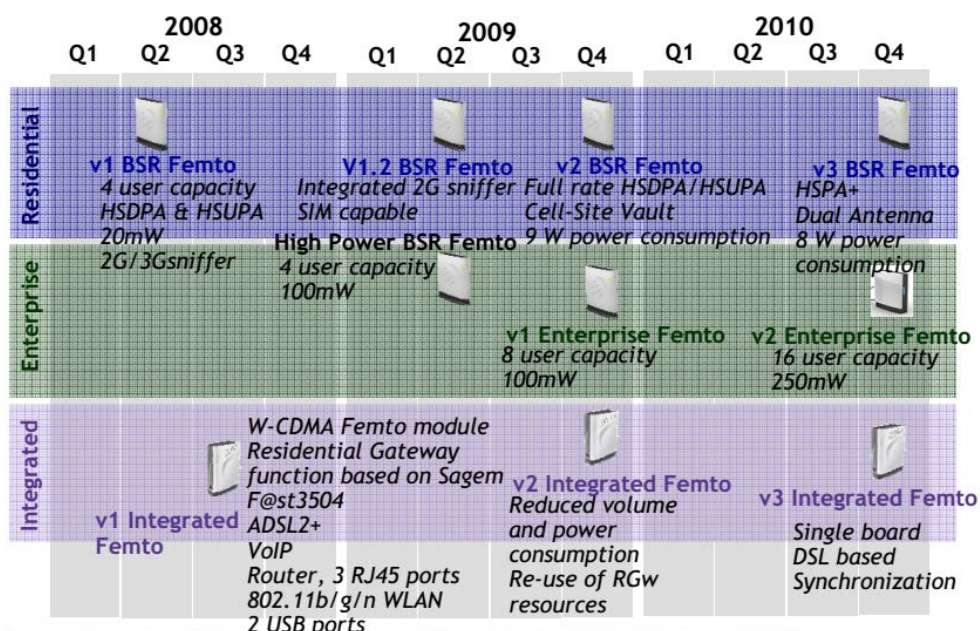
De forma a ser mais fácil perceber o modo de funcionamento do simulador utilizado, foi realizado um pequeno fluxograma que contém o pseudo-código das principais fases de execução do mesmo.



B. Especificações das femto-células estudadas

As presentes especificações técnicas pertencem às femto-células que a *Vodafone* actualmente está a utilizar para a tecnologia 3G.

BSR Femto Hardware	Mobility	Architecture and interfaces
Standalone Femto (20,100mW)	Cell Reselection to/from macro layer (2G or 3G, intra/inter freq)	3GPP-compliant IuCS interface
Integrated Femto	Handover Femto to Macro 3G	3GPP-compliant IuPS interface
Supports 2100 MHz	Handover Femto to Macro 2G	IuPS-CP over IP
Services	Handover Femto to Femto (CS)	IPC Support of Multiple Gateways
CS AMR 12.2 speech call	Hierarchical Cell Structure	Security
Emergency call handling	Femto Specific	Ciphering
Short Message Service (SMS)	Femto access restriction	IPSec and AAA
CS Data 64 kbps Support	Open Access	2 IPSec tunnels
PS R99 RABs	Femto cell coverage indicator	Network Firewall
PS HSDPA RABs	Remote Software upgrade	Local Security Solution for Femto BSR
CS AMR12.2+PS I/B RAB comb.	Femto Auto-configuration	Other
Support of Location Based Services (RANAP Signaling)	Femto Self-optimization	Clock synchronization
HSDPA Support (7,2 Mbps)	Network Listening	Access Class Barring
HSUPA Support (1,45 Mbps)	White list (ACL) administration	DSAC/RNAR
Multiple PDP Contexts	Automatic fallback to Macro in case of failure in core	3GPP R6 Compliance
RRM	NAT Traversal	FMS and Operability
Call admission control (CAC)	2G/3G sniffer	Call Trace
Congestion control	Detection of location change	BSR Counters
Pre-emption for emergencies	Tone Generation during CS setup	HDM/WMS functions for fBSR mgmt
Power control (PC)	Detection of collapsing LAI	BSR Femto file server storage
Dynamic Bearer Control (DBC)	System Capacity	FMS for BSG/IPC Fault management
Transport	4/8 simultaneous CS or PS calls	FMS Launch point for BSG & IPC toolset
QoS on backhaul	64.000 Femto/Cluster	FMS-WMS East-West Interface
Diff Serv. Marking		FMS HW configuration and capacity
		WPS for BSG, fBSR Configuration Mgmt



C.CQI, Modulações e Eficiências conseguidas

Na seguinte tabela encontram-se representadas quais as modulações que possibilitam determinados níveis de eficiência e de CQI. É também apresentado qual o *code-rate* presente em cada modulação.

No simulador utilizado, a presente tabela encontra-se implementada permitindo assim extrair os resultados acima apresentados.

Índice de CQI	Modulação	Code Rate Aproximado	Eficiência (<i>bits</i> de informação por símbolo)
0	Sem transmissão	-	-
1	QPSK	0.076	0.1523
2	QPSK	0.12	0.2344
3	QPSK	0.19	0.3770
4	QPSK	0.3	0.6016
5	QPSK	0.44	0.8770
6	QPSK	0.59	1.1758
7	16QAM	0.37	1.4766
8	16QAM	0.48	1.9141
9	16QAM	0.6	2.4063
10	64QAM	0.45	2.7305
11	64QAM	0.55	3.3223
12	64QAM	0.65	3.9023
13	64QAM	0.75	4.5234
14	64QAM	0.85	5.1152
15	64QAM	0.93	5.5547

D. Frequências Atribuídas

A tabela abaixo representada apresenta quais as frequências que os operadores móveis compraram e estão a utilizar para a tecnologia LTE. Encontra-se também representado o preço por lote bem como a largura de banda de cada um deles.

Número de lotes comprados	Faixa de Frequências	Tamanho dos lotes	Preço do Lote
-	450 MHz	$2 \times 1,25MHz$	-
6	800 MHz	$2 \times 5MHz$	45.000.000
1	900 MHz	$2 \times 5MHz$	30.000.000
6	1800 MHz	$2 \times 5MHz$	4.000.000
3	1800 MHz	$2 \times 4MHz$	3.000.000
-	2.1 GHz	$5MHz$	-
12	2.6 GHz	$2 \times 5MHz$	3.000.000
2	2.6 GHz	$25MHz$	3.000.000

E. Antenna '742212'

Multi-band F-Panel

1710-2170

Dual Polarization

X

Half-power Beam Width

65°

Adjust. Electrical Downtilt

0°-8°

set by hand or by optional RCU (Remote Control Unit)

KATHREIN

Antennen · Electronic

XPoI F-Panel 1710-2170 65° 18dBi 0°-8°T

Type No.	742 212		
Frequency range	1710-2170		
	1710 – 1880 MHz	1850 – 1990 MHz	1920 – 2170 MHz
Polarization	+45°, -45°	+45°, -45°	+45°, -45°
Gain	2 x 17.5 dBi	2 x 17.7 dBi	2 x 18 dBi
Half-power beam width Copolar +45°/-45°	Horizontal: 67° Vertical: 7°	Horizontal: 65° Vertical: 6.7°	Horizontal: 63° Vertical: 6.5°
Electrical tilt continuously adjustable	0°-8°	0°-8°	0°-8°
Sidelobe suppression for first sidelobe above horizon	0° ... 2° ... 5° ... 8° T 17 ... 17 ... 15 ... 15 dB	0° ... 2° ... 5° ... 8° T 20 ... 20 ... 18 ... 18 dB	0° ... 2° ... 5° ... 8° T 20 ... 20 ... 18 ... 16 dB
Front-to-back ratio (180° ± 30°)	Copolar: > 30 dB Total power: > 25 dB	Copolar: > 30 dB Total power: > 25 dB	Copolar: > 30 dB Total power: > 25 dB
Cross polar ratio Maindirection Sector	0° ±60° Typically: 25 dB > 10 dB	Typically: 25 dB > 10 dB	Typically: 25 dB > 10 dB
Isolation, between ports	> 30 dB	> 30 dB	> 30 dB
Impedance	50 Ω	50 Ω	50 Ω
VSWR	< 1.5	< 1.5	< 1.5
Intermodulation IM3 (2 x 43 dBm carrier)	< -150 dBc		
Max. power per input	300 W (at 50 °C ambient temperature)		



1710 – 1880 MHz: +45°/-45° Polarization



Horizontal Pattern

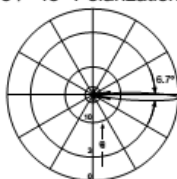


Vertical Pattern
0°-8° electrical downtilt

1850 – 1990 MHz: +45°/-45° Polarization



Horizontal Pattern



Vertical Pattern
0°-8° electrical downtilt

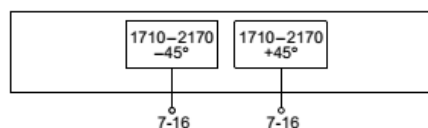
1920 – 2170 MHz: +45°/-45° Polarization



Horizontal Pattern



Vertical Pattern
0°-8° electrical downtilt



Mechanical specifications

Input	2 x 7-16 female
Connector position	Bottom
Adjustment mechanism	1x, Position bottom continuously adjustable
Weight	7.5 kg
Wind load	Frontal: 130 N (at 150 km/h) Lateral: 110 N (at 150 km/h) Rearside: 310 N (at 150 km/h)
Max. wind velocity	200 km/h
Packing size	1574 x 172 x 92 mm
Height/width/depth	1302 / 155 / 69 mm

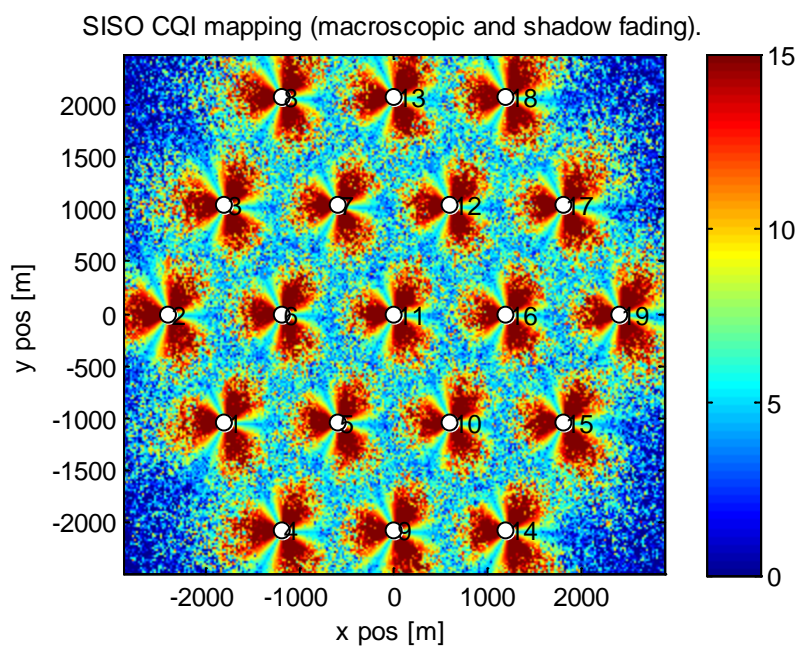
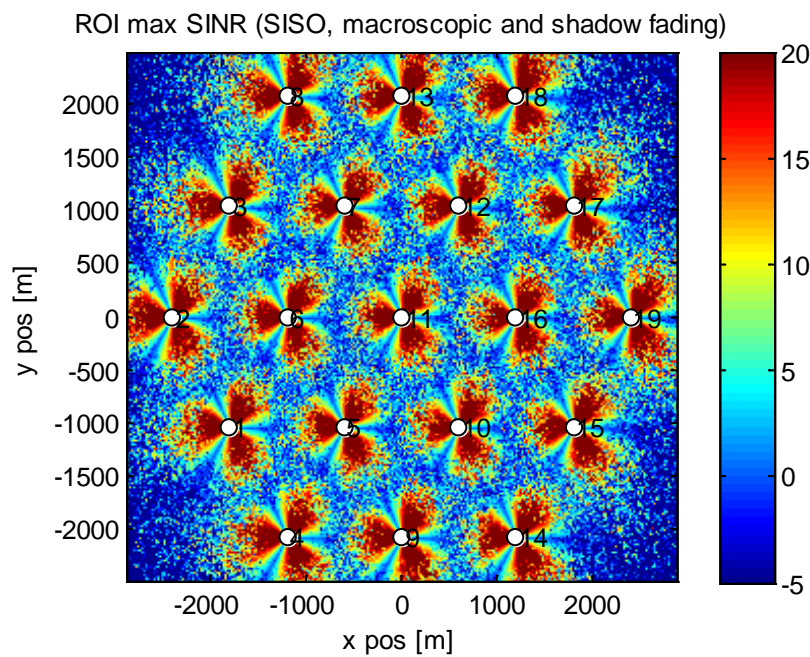
Internet: <http://www.kathrein.de>

KATHREIN-Werke KG · Anton-Kathrein-Straße 1 – 3 · PO Box 10 04 44 · D-83004 Rosenheim · Germany · Telephone +49 8031 1 84-0 · Fax +49 8031 1 84-9 73

page 1 of 4 **742 212**

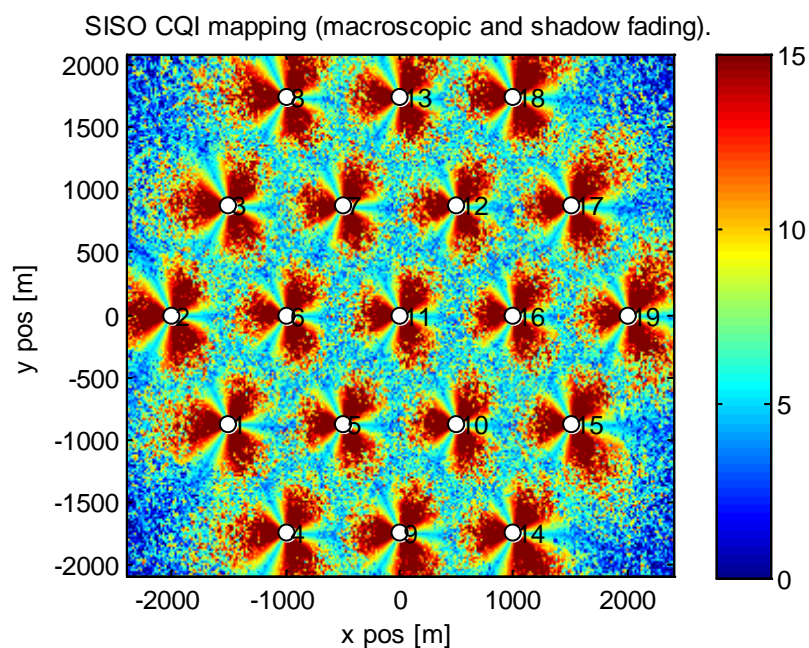
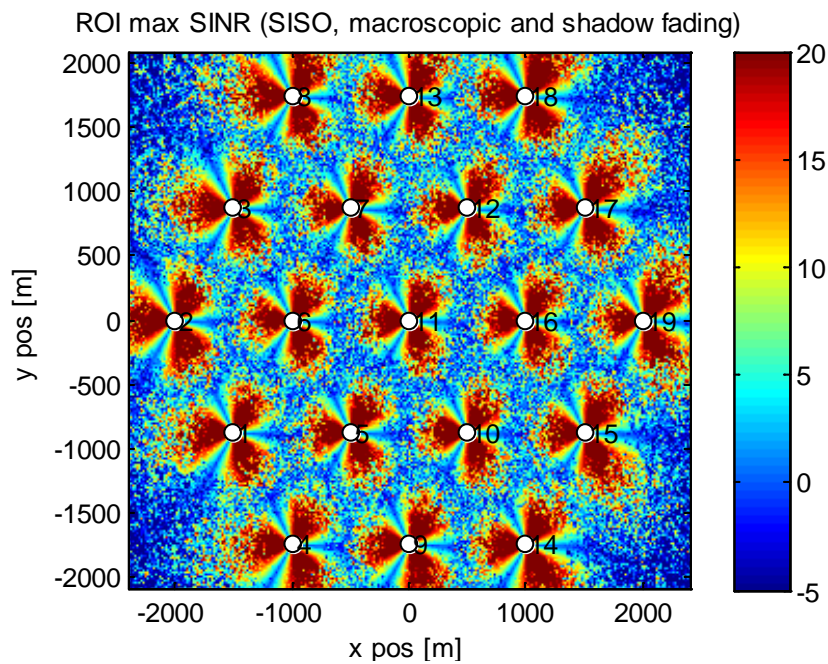
F. SINR e CQI em ambientes urbanos

As figuras abaixo apresentadas apresentam os níveis de sinal conseguido na rede, perante a presença de desvanecimento, bem como os respectivos valores de CQI. Estas são de uma rede macro-celular, com 2000 utilizadores e para ambientes urbanos.



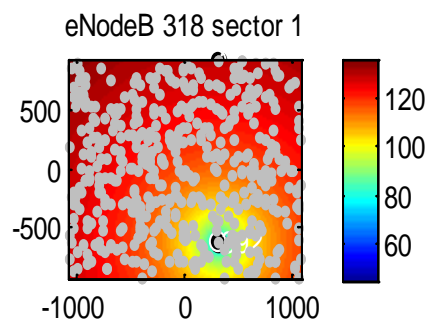
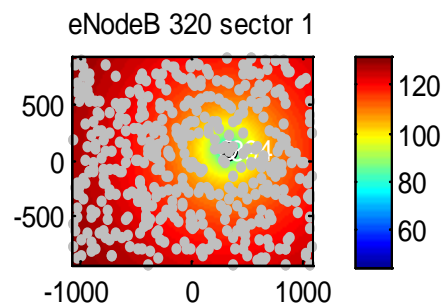
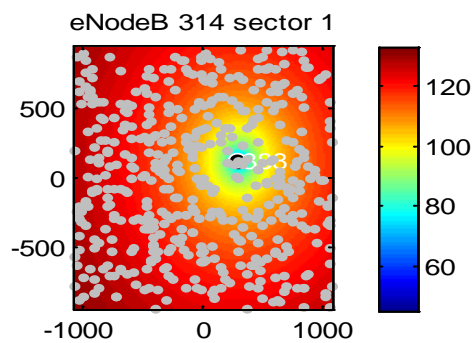
G. SINR e CQI em meios suburbanos

As figuras abaixo apresentadas apresentam os níveis de sinal conseguido na rede, perante a presença de desvanecimento, bem como os respectivos valores de CQI. Estas são de uma rede macro-celular, com 2000 utilizadores e para ambientes urbanos.



H. Perdas de propagação em redes femto-celulares

As figuras abaixo apresentadas são representativas dos valores de perdas de propagação existentes em três femto-células de toda a rede. Deste modo, é possível verificar que a quantidade de células interferentes é elevada.



I. Tabela com preços das ligações de rede

O cálculo financeiro da componente de *backhaul* da rede, do presente trabalho, foi realizado com recurso a tabela abaixo representada. Esta possui o preço anual de ligações de rede com capacidade de 10Mbps, 100Mbps e 1Gbps.

			Débito			
			10Mbps	100Mbps	1Gbps	
Preço de instalação do PL interno			125 €	125 €	375 €	
Preço de instalação do PL externo			375 €	375 €	1 125 €	
Mensalidade do PL interno			30 €	30	50 €	
Mensalidade do PL externo	GR	Urbano	100 €	100 €	150 €	
		Lisboa/Porto	Regional	150 €	150 €	225 €
	Restantes GR	Urbano	150 €	150 €	225 €	
		Regional	250 €	250 €	375 €	
	Intra GR	GR	Urbano	40 €	50 €	100 €
			Lisboa/Porto	Regional	75 €	100 €
Restantes GR		Urbano	75 €	100 €	200 €	
		Regional	155 €	200 €	400 €	
Mensalidade do TP	Rota 1		575 €	750 €	1 500 €	
	Rota 2		1 150 €	1 500 €	3 000 €	
	Rota 3		2 300 €	3 000 €	6 000 €	
	Inter GR	Rota 4 (inter-ilhas)		2 650 €	5 790 €	14 475 €
		Rota 5 (CAM)	TP CAM 1	4 625 €	10 180 €	33 590 €
			TP CAM 2	5 040 €	11 085 €	36 585 €
	TP CAM 3		5 450 €	11 990 €	39 580 €	

J. Tabelas de cash-flow realizadas

Neste anexo vão ser apresentadas todas as tabelas de cash-flow que foram realizada ao longo da análise financeira de cada solução. Assim, as tabelas vão ser apresentadas por solução de rede e capacidade da mesma.

– Rede Femto-Celular com ligações de 1 Gbps

Ano	0	1	2	3	4	5
Vendas	0	840,000	865,200	891,156	917,891	945,427
Custos variáveis						
Gestão do site (aluguer)		0	0	0	0	0
Custos Fixos						
Manutenção do site		0	0	0	0	0
Descretizações						
Equipamento		23,914	23,914	23,914	23,914	23,914
Provisões/Ajustamentos	0	84,000	86,520	89,116	91,789	94,543
Resultados Operacionais	0	816,086	841,286	867,242	893,977	921,513
Encargos Financeiros	0	33,456	27,638	21,413	14,753	7,626
Resultado antes de Impo	0	782,630	813,648	845,829	879,224	913,888
Matéria Colectável	0	782,630	813,648	845,829	879,224	913,888
ISR	0	207,397	215,617	224,145	232,994	242,180
Resultado depois de Impo	0	575,233	598,031	621,684	646,230	671,707
Cash-Flow de Exploração	0	716,603	736,103	756,127	776,685	797,790
Investimento						
Capital Fixo	477,941	0	0	0	0	0
Fundo de Maneio	245,494	264,341	142,521	26,735	27,537	-706,627
Total de Investimento	232,447	-264,341	-142,521	-26,735	-27,537	706,627
Valor Residual						
Capital Fixo	0	0	0	0	0	789,857
Fundo de Maneio	0	0	0	0	0	-706,627
Imposto sobre mais valias	0	0	0	0	0	209,312
Total de Valor Residual	0	0	0	0	0	-126,082
Coefficiente de Actualização	1.00	0.91	0.83	0.75	0.68	0.62
Cash-Flow de Investimento	723,435	264,341	142,521	26,735	27,537	-1,496,485
Cash-Flow Líquido	-723,435	452,262	593,582	729,392	749,149	2,294,275
Cash-Flow do Projecto	0	716,603	736,103	756,127	776,685	671,708
Cash-Flow Global Actualizado	0	651,457	608,350	568,089	530,487	417,078
Cash-Flow Global Acumulado	245,494	896,951	1,505,301	2,073,390	2,603,877	3,020,955
Saldo	477,941	-173,516	-781,866	-1,349,956	-1,880,442	-2,297,520

– Rede Femto-Celular com ligações de 100Mbps

Ano	0	1	2	3	4	5
Vendas	0	840.000	865.200	891.156	917.891	945.427
Custos variáveis						
estão do site (aluguer)		0	0	0	0	0
Custos Fixos						
Manutenção do site		0	0	0	0	0
Descretizações						
Equipamento		23.914	23.914	23.914	23.914	23.914
Provisões/Ajustamento	0	84.000	86.520	89.116	91.789	94.543
Resultados Operacionais	0	816.086	841.286	867.242	893.977	921.513
Encargos Financeiros	0	29.256	24.169	18.725	12.901	6.668
Resultado antes de Im	0	786.830	817.117	848.517	881.076	914.845
Matéria Colectável	0	786.830	817.117	848.517	881.076	914.845
ISR	0	208.510	216.536	224.857	233.485	242.434
Resultado depois de Ir	0	578.320	600.581	623.660	647.591	672.411
Cash-Flow de Exploração	0	715.490	735.184	755.415	776.195	797.536
Investimento						
Capital Fixo	417.941	0	0	0	0	0
Fundo de Maneio	320.127	264.341	127.888	26.735	27.537	-766.627
Total de Investimento	97.814	-264.341	-127.888	-26.735	-27.537	766.627
Valor Residual						
Capital Fixo	0	0	0	0	0	773.957
Fundo de Maneio	0	0	0	0	0	-766.627
Imposto sobre mais valias	0	0	0	0	0	205.099
Total de Valor Residual	0	0	0	0	0	-197.769
Coefficiente de Actualização	1,00	0,91	0,83	0,75	0,68	0,62
Cash-Flow de Investimento	738.068	264.341	127.888	26.735	27.537	-1.540.585
Cash-Flow Líquido	-738.068	451.149	607.296	728.680	748.658	2.338.121
Cash-Flow do Projecto	0	715.490	735.184	755.415	776.195	599.767
Cash-Flow Global Actualizado	0	650.445	607.590	567.554	530.151	372.408
Cash-Flow Global Acumulado	320.127	970.573	1.578.163	2.145.717	2.675.868	3.048.277
Saldo	417.941	-232.505	-840.095	-1.407.649	-1.937.800	-2.310.209

– Rede Macro-Celular com ligações de 1Gbps

Ano	0	1	2	3	4	5
Vendas		840.000	865.200	891.156	917.891	945.427
Custos variáveis						
Gestão do site (aluguer)		273.600	273.600	273.600	273.600	273.600
Custos Fixos						
Manutenção do site		27.872	28.708	29.569	30.456	31.370
Depreciações						
Equipamento + site		228.427	228.427	228.427	228.427	228.427
Provisões/Ajustamentos		84.000	86.520	89.116	91.789	94.543
Resultados Operacionais		310.101	334.465	359.560	385.408	412.031
Encargos Financeiros		187.302	173.745	159.240	143.719	127.112
Resultado antes de Imposto		122.800	160.720	200.320	241.689	284.919
Matéria Colectável		122.800	160.720	200.320	241.689	284.919
ISR		32.542	42.591	53.085	64.047	75.503
Resultado depois de Imposto		90.258	118.129	147.235	177.641	209.415
Cash-Flow de Exploração	0	589.986	606.821	624.017	641.576	659.497
Investimento						
Capital Fixo	2.675.738	0	0	0	0	0
Fundo de Maneio	-2.216.703	2.308.630	25.095	25.848	26.623	27.422
Total de Investimento	4.892.441	-2.308.630	-25.095	-25.848	-26.623	-27.422
Valor Residual						
Capital Fixo	0	0	0	0	0	0
Fundo de Maneio	0	0	0	0	0	0
Imposto sobre mais valias	0	0	0	0	0	0
Total de Valor Residual	0	0	0	0	0	0
Coefficiente de Actualização	1,00	0,91	0,83	0,75	0,68	0,62
Cash-Flow de Investimento	459.035	2.308.630	25.095	25.848	26.623	27.422
Cash-Flow Líquido	-459.035	-1.718.644	581.726	598.170	614.953	632.075
Cash-Flow do Projecto	0	589.986	606.821	624.017	641.576	659.497
Cash-Flow Global Actualizado	0	536.351	501.505	468.834	438.205	409.495
Cash-Flow Global Acumulado	-2.216.703	-1.680.352	-1.178.847	-710.013	-271.808	137.687
Saldo	2.675.738	2.139.387	1.637.882	1.169.048	730.843	321.348

Ano	6	7	8	9	10
Vendas	973.790	1.003.004	1.033.094	1.064.087	1.096.009
Custos variáveis					
Gestão do site (aluguer)	273.600	273.600	273.600	273.600	273.600
Custos Fixos					
Manutenção do site	32.311	33.281	34.279	35.307	36.367
Depreciações					
Equipamento + site	228.427	228.427	228.427	228.427	228.427
Provisões/Ajustamentos	97.379	100.300	103.309	106.409	109.601
Resultados Operacionais	439.452	467.697	496.788	526.753	557.616
Encargos Financeiros	109.342	90.329	69.984	48.215	24.923
Resultado antes de Imposto	330.110	377.368	426.804	478.538	532.693
Matéria Colectável	330.110	377.368	426.804	478.538	532.693
ISR	87.479	100.003	113.103	126.812	141.164
Resultado depois de Imposto	242.631	277.366	313.701	351.725	391.530
Cash-Flow de Exploração	677.779	696.421	715.421	734.776	754.480
Investimento					
Capital Fixo	0	0	0	0	0
Fundo de Maneio	28.244	29.092	29.964	30.863	-315.078
Total de Investimento	-28.244	-29.092	-29.964	-30.863	315.078
Valor Residual					
Capital Fixo	0	0	0	0	909.307
Fundo de Maneio	0	0	0	0	-315.078
Imposto sobre mais valias	0	0	0	0	240.966
Total de Valor Residual	0	0	0	0	353.263
Coefficiente de Actualização	0,56	0,51	0,47	0,42	0,39
Cash-Flow de Investimento	28.244	29.092	29.964	30.863	-1.224.385
Cash-Flow Líquido	649.534	667.330	685.457	703.912	1.978.865
Cash-Flow do Projecto	677.779	696.421	715.421	734.776	1.107.743
Cash-Flow Global Actualizado	382.588	357.374	333.749	311.617	427.083
Cash-Flow Global Acumulado	520.276	877.650	1.211.399	1.523.016	1.950.099
Saldo	-61.241	-418.615	-752.364	-1.063.981	-1.491.064

– Rede Macro-Celular com ligações de 100Mbps

Ano	0	1	2	3	4	5
Vendas		840.000	865.200	891.156	917.891	945.427
Custos variáveis						
Gestão do site (aluguer)		273.600	273.600	273.600	273.600	273.600
Custos Fixos						
Manutenção do site		27.872	28.708	29.569	30.456	31.370
Depreciações						
Equipamento + site		228.427	228.427	228.427	228.427	228.427
Provisões/Ajustamentos		84.000	86.520	89.116	91.789	94.543
Resultados Operacionais		310.101	334.465	359.560	385.408	412.031
Encargos Financeiros		185.706	172.265	157.883	142.494	126.029
Resultado antes de Imposto		124.396	162.201	201.677	242.913	286.002
Matéria Colectável		124.396	162.201	201.677	242.913	286.002
ISR		32.965	42.983	53.444	64.372	75.791
Resultado depois de Imposto		91.431	119.217	148.233	178.541	210.211
Cash-Flow de Exploração	0	589.563	606.429	623.658	641.251	659.210
Investimento						
Capital Fixo	2.652.938	0	0	0	0	0
Fundo de Maneio	-2.190.657	2.308.630	25.095	25.848	26.623	27.422
Total de Investimento	4.843.595	-2.308.630	-25.095	-25.848	-26.623	-27.422
Valor Residual						
Capital Fixo	0	0	0	0	0	0
Fundo de Maneio	0	0	0	0	0	0
Imposto sobre mais valias	0	0	0	0	0	0
Total de Valor Residual	0	0	0	0	0	0
Coefficiente de Actualização	1,00	0,91	0,83	0,75	0,68	0,62
Cash-Flow de Investimento	462.281	2.308.630	25.095	25.848	26.623	27.422
Cash-Flow Líquido	-462.281	-1.719.067	581.334	597.810	614.628	631.788
Cash-Flow do Projecto	0	589.563	606.429	623.658	641.251	659.210
Cash-Flow Global Actualizado	0	535.967	501.181	468.563	437.983	409.317
Cash-Flow Global Acumulado	-2.190.657	-1.654.690	-1.153.509	-684.946	-246.963	162.355
Saldo	2.652.938	2.116.971	1.615.791	1.147.227	709.244	299.927

Ano	6	7	8	9	10
Vendas	973.790	1.003.004	1.033.094	1.064.087	1.096.009
Custos variáveis					
Gestão do site (aluguer)	273.600	273.600	273.600	273.600	273.600
Custos Fixos					
Manutenção do site	32.311	33.281	34.279	35.307	36.367
Depreciações					
Equipamento + site	228.427	228.427	228.427	228.427	228.427
Provisões/Ajustamentos	97.379	100.300	103.309	106.409	109.601
Resultados Operacionais	439.452	467.697	496.788	526.753	557.616
Encargos Financeiros	108.410	89.559	69.388	47.805	24.711
Resultado antes de Imposto	331.042	378.138	427.401	478.948	532.906
Matéria Colectável	331.042	378.138	427.401	478.948	532.906
ISR	87.726	100.207	113.261	126.921	141.220
Resultado depois de Impo	243.316	277.931	314.140	352.027	391.686
Cash-Flow de Exploração	677.532	696.217	715.263	734.667	754.424
Investimento					
Capital Fixo	0	0	0	0	0
Fundo de Maneio	28.244	29.092	29.964	30.863	-341.124
Total de Investimento	-28.244	-29.092	-29.964	-30.863	341.124
Valor Residual					
Capital Fixo	0	0	0	0	903.265
Fundo de Maneio	0	0	0	0	-341.124
Imposto sobre mais valias	0	0	0	0	239.365
Total de Valor Residual	0	0	0	0	322.776
Coefficiente de Actualização	0,56	0,51	0,47	0,42	0,39
Cash-Flow de Investimento	28.244	29.092	29.964	30.863	-1.244.389
Cash-Flow Liquido	649.288	667.126	685.299	703.804	1.998.813
Cash-Flow do Projecto	677.532	696.217	715.263	734.667	1.077.199
Cash-Flow Global Actualizado	382.449	357.270	333.676	311.570	415.307
Cash-Flow Global Acumulado	544.804	902.073	1.235.749	1.547.319	1.962.626
Saldo	-82.522	-439.792	-773.468	-1.085.038	-1.500.345

– Rede Híbrida com ligações de 1Gbps

Ano	0	1	2	3	4	5
Vendas	0	840.000	865.200	891.156	917.891	945.427
Custos variáveis						
Aluguer do site (aluguer)		273.600	273.600	273.600	273.600	273.600
Custos Fixos						
Manutenção do site		28.697	29.558	30.445	31.358	32.299
Depreciações						
Equipamento		23.914	23.914	23.914	23.914	23.914
Provisões/Ajustamen	0	84.000	86.520	89.116	91.789	94.543
Resultados Operacion	0	513.789	538.128	563.197	589.019	615.615
Encargos Financeiros	0	204.641	189.829	173.981	157.024	138.879
Resultado antes de Imposto	0	309.148	348.299	389.216	431.995	476.736
Matéria Colectável	0	309.148	348.299	389.216	431.995	476.736
ISR	0	81.924	92.299	103.142	114.479	126.335
Resultado depois de Imposto	0	227.224	256.000	286.074	317.516	350.401
Cash-Flow de Exploração	0	539.779	556.263	573.085	590.243	607.737
Investimento						
Capital Fixo	2.923.438	0	0	0	0	0
Fundo de Maneio	-2.499.670	2.315.480	25.069	25.821	26.596	27.394
Total de Investimento	5.423.107	-2.315.480	-25.069	-25.821	-26.596	-27.394
Valor Residual						
Capital Fixo	0	0	0	0	0	0
Fundo de Maneio	0	0	0	0	0	0
Imposto sobre mais v	0	0	0	0	0	0
Total de Valor Residual	0	0	0	0	0	0
Coefficiente de Actualização	1,00	0,91	0,83	0,75	0,68	0,62
Cash-Flow de Investimento	423.768	2.315.480	25.069	25.821	26.596	27.394
Cash-Flow Líquido	-423.768	-1.775.701	531.194	547.263	563.647	580.343
Cash-Flow do Projecto	0	539.779	556.263	573.085	590.243	607.737
Cash-Flow Global Actualizado	0	490.708	459.721	430.567	403.144	377.357
Cash-Flow Global Acumulado	-2.499.670	-2.008.962	-1.549.240	-1.118.673	-715.529	-338.172
Saldo	2.923.438	2.432.730	1.973.008	1.542.441	1.139.297	761.941

Ano	6	7	8	9	10
Vendas	973.790	1.003.004	1.033.094	1.064.087	1.096.009
Custos variáveis					
Gestão do site (aluguer)	273.600	273.600	273.600	273.600	273.600
Custos Fixos					
Manutenção do site	33.268	34.266	35.294	36.352	37.443
Depreciações					
Equipamento	23.914	23.914	23.914	23.914	23.914
Provisões/Ajustamentos	97.379	100.300	103.309	106.409	109.601
Resultados Operacionais	643.009	671.224	700.286	730.220	761.052
Encargos Financeiros	119.464	98.691	76.463	52.679	27.230
Resultado antes de Imposto	523.544	572.534	623.824	677.542	733.822
Matéria Colectável	523.544	572.534	623.824	677.542	733.822
ISR	138.739	151.721	165.313	179.549	194.463
Resultado depois de Impo	384.805	420.812	458.510	497.993	539.359
Cash-Flow de Exploração	625.562	643.717	662.197	680.995	700.105
Investimento					
Capital Fixo	0	0	0	0	0
Fundo de Maneio	28.216	29.062	29.934	30.832	-38.735
Total de Investimento	-28.216	-29.062	-29.934	-30.832	38.735
Valor Residual					
Capital Fixo	0	0	0	0	1.516.906
Fundo de Maneio	0	0	0	0	-38.735
Imposto sobre mais valias	0	0	0	0	401.980
Total de Valor Residual	0	0	0	0	1.076.191
Coefficiente de Actualiz	0,56	0,51	0,47	0,42	0,39
Cash-Flow de Investimento	28.216	29.062	29.934	30.832	-1.555.640
Cash-Flow Liquido	597.347	614.655	632.263	650.163	2.255.745
Cash-Flow do Projecto	625.562	643.717	662.197	680.995	1.776.295
Cash-Flow Global Actualizado	353.114	330.329	308.920	288.808	684.839
Cash-Flow Global Acumulado	14.941	345.270	654.190	942.998	1.627.837
Saldo	408.827	78.498	-230.421	-519.230	-1.204.068

– Rede Híbrida com ligações de 100Mbps

Ano	0	1	2	3	4	5
Vendas	0	840.000	865.200	891.156	917.891	945.427
Custos variáveis						
Aluguer do site (aluguer)		273.600	273.600	273.600	273.600	273.600
Custos Fixos						
Manutenção do site		28.697	29.558	30.445	31.358	32.299
Depreciações						
Equipamento		23.914	23.914	23.914	23.914	23.914
Provisões/Ajustame	0	84.000	86.520	89.116	91.789	94.543
Resultados Operacio	0	513.789	538.128	563.197	589.019	615.615
Encargos Financeiro	0	198.845	184.453	169.053	152.576	134.946
Resultado antes de Imposto	0	314.944	353.675	394.144	436.443	480.669
Matéria Colectável	0	314.944	353.675	394.144	436.443	480.669
ISR	0	83.460	93.724	104.448	115.657	127.377
Resultado depois de Imposto	0	231.484	259.951	289.696	320.785	353.292
Cash-Flow de Exploração	0	538.243	554.838	571.779	589.065	606.694
Investimento						
Capital Fixo	2.840.638	0	0	0	0	0
Fundo de Maneio	-2.405.081	2.315.480	25.069	25.821	26.596	27.394
Total de Investimento	5.245.718	-2.315.480	-25.069	-25.821	-26.596	-27.394
Valor Residual						
Capital Fixo	0	0	0	0	0	0
Fundo de Maneio	0	0	0	0	0	0
Imposto sobre mais valias	0	0	0	0	0	0
Total de Valor Residual	0	0	0	0	0	0
Coefficiente de Actualização	1,00	0,91	0,83	0,75	0,68	0,62
Cash-Flow de Investimento	435.557	2.315.480	25.069	25.821	26.596	27.394
Cash-Flow Liquido	-435.557	-1.777.237	529.769	545.958	562.469	579.300
Cash-Flow do Projecto	0	538.243	554.838	571.779	589.065	606.694
Cash-Flow Global Actualizado	0	489.312	458.544	429.586	402.339	376.709
Cash-Flow Global Acumulado	-2.405.081	-1.915.769	-1.457.225	-1.027.639	-625.300	-248.591
Saldo	2.840.638	2.351.326	1.892.782	1.463.196	1.060.857	684.148

Ano	6	7	8	9	10
Vendas	973.790	1.003.004	1.033.094	1.064.087	1.096.009
Custos variáveis					
estão do site (alugue	273.600	273.600	273.600	273.600	273.600
Custos Fixos					
Manutenção do site	33.268	34.266	35.294	36.352	37.443
Depreciações					
Equipamento	23.914	23.914	23.914	23.914	23.914
Provisões/Ajustame	97.379	100.300	103.309	106.409	109.601
Resultados Operac	643.009	671.224	700.286	730.220	761.052
Encargos Financeir	116.081	95.895	74.297	51.187	26.459
Resultado antes de Imposto	526.928	575.329	625.989	679.034	734.594
Matéria Colectável	526.928	575.329	625.989	679.034	734.594
ISR	139.636	152.462	165.887	179.944	194.667
Resultado depois de Imposto	387.292	422.867	460.102	499.090	539.926
Cash-Flow de Exploração	624.666	642.977	661.623	680.599	699.900
Investimento					
Capital Fixo	0	0	0	0	0
Fundo de Maneio	28.216	29.062	29.934	30.832	-133.324
Total de Investimento	-28.216	-29.062	-29.934	-30.832	133.324
Valor Residual					
Capital Fixo	0	0	0	0	1.494.964
Fundo de Maneio	0	0	0	0	-133.324
Imposto sobre mais valias	0	0	0	0	396.165
Total de Valor Residual	0	0	0	0	965.475
Coefficiente de Actualização	0,56	0,51	0,47	0,42	0,39
Cash-Flow de Investimento	28.216	29.062	29.934	30.832	-1.628.287
Cash-Flow Líquido	596.450	613.914	631.689	649.767	2.328.187
Cash-Flow do Projecto	624.666	642.977	661.623	680.599	1.665.375
Cash-Flow Global Actualizado	352.608	329.949	308.652	288.641	642.074
Cash-Flow Global Acumulado	104.017	433.966	742.617	1.031.258	1.673.332
Saldo	331.540	1.592	-307.060	-595.701	-1.237.775