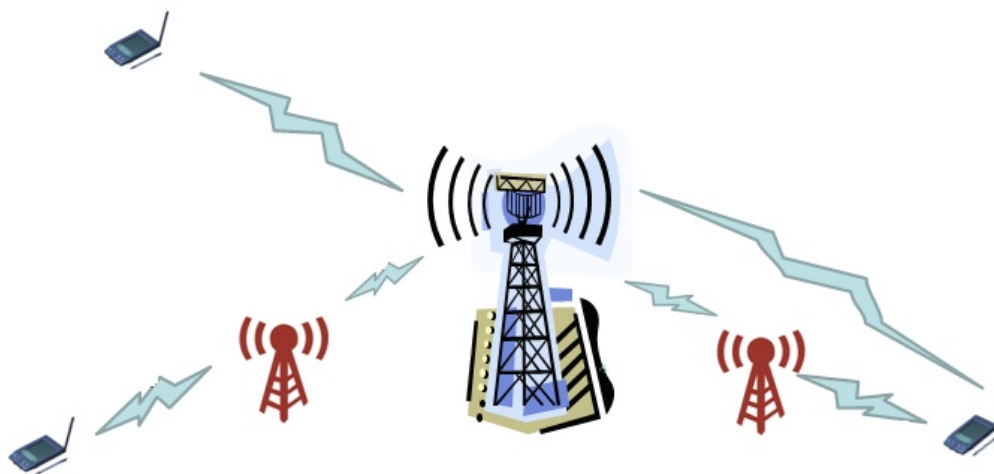


**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**  
Área Departamental de Engenharia de Electrónica e  
Telecomunicações e de Computadores



**Avaliação do Impacto Energético Resultante da  
Utilização de Repetidores em Sistemas LTE**

**JOSÉ MARIA PEREIRA NASCIMENTO**  
(Licenciatura em Engenharia de Telecomunicações e Electrónica)

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

**Orientador:**

Professor Doutor António João Nunes Serrador

**Júri:**

Presidente:

Professor Doutor Pedro Manuel de Almeida Carvalho Vieira

Vogais:

Professor Doutor Filipe Cardoso

Professor Doutor António João Nunes Serrador

**Outubro 2012**



## Agradecimentos

A elaboração desta dissertação resultou de uma trajectória interposta por muitos desafios, incertezas, surpresas, decepções e gratificantes sucessos. Percorrer este caminho só foi possível com a mobilização de uma grande vontade e perseverança, indispensáveis em cada momento da jornada para encontrar o melhor rumo, fazer as melhores opções e tomar as melhores decisões.

Este caminho não foi percorrido na solidão, foi percorrido com o apoio de varias pessoas que directa ou indirectamente participaram neste percurso, deixando de algum modo impressa a sua marca. Na impossibilidade de me dirigir em particular a todas, as quais expresso a minha profunda gratidão, realço aquelas que merecem maior destaque:

- Ao meu orientador, Professor Doutor António Serrador, pela elevada competência e exigência na elaboração da presente dissertação, na confiança depositada e pelo apoio e encorajamento incondicional que ajudou a tornar este trabalho uma valida e agradável experiencia.
- A minha esposa Sónia, que sempre esteve a meu lado, pela paciência e incentivo em prosseguir este trilho. Sou grato pelo seu amor, pelo companheirismo e por ter assumido muitas das minhas tarefas na labuta diária.
- Aos meus filhos, Tiago e Tomás, pelas horas que ficaram sem a atenção do pai e não puderam usufruir da sua cumplicidade.



## Resumo

Actualmente uma grande preocupação global refere-se ao contínuo aumento do custo da energia, resultante da procura e do impacto ambiental. A escalada do custo da energia obriga a procura sistemática de melhores sistemas que permitam diminuir esse custo. Nas comunicações móveis sem fios a economia de energia obtida pelo aumento da eficiência do equipamento das estações-base é insuficiente, pelo qual é necessário também encontrar soluções ao nível da arquitectura.

O LTE define os repetidores como um recurso de baixo consumo para aumentar a cobertura e ou capacidade da rede. Nesta dissertação é avaliado um método de economia de energia baseado na substituição de uma estação-base central, circundada por outras estações-base, por um determinado número de repetidores. A cobertura e a capacidade resultante é avaliada assim como a energia poupada.

Os resultados obtidos permitem verificar que se pode poupar até 1 000,00 € anuais e 20 kW diários com a substituição de uma estação-base, completamente rodeada por outras estações, por um número de repetidores compreendido entre 1 e 9 dependendo da ISD (até 1750 m). Verifica-se ainda um ganho de eficiência energética de até 13% ao nível do sistema.

Palavras-chave

Eficiência Energética, energia, LTE, repetidores



## Abstract

Currently a major global concern refers to the continuous rising of energy cost, caused by traffic demand and environmental impact. The escalating cost of energy requires systematic search for enhanced systems to reduce this cost. Energy savings achieved by mobile wireless increased equipment efficiency is insufficient; thereby it is also necessary to find new architecture solutions.

LTE defines repeaters as a resource for low-power coverage increase and network capacity. This thesis evaluates a method of energy savings based on replacing a base station, surrounded by other base stations, for a certain number of repeaters. The resulting coverage and capacity is kept, while system energy is saved.

Results show that we can save up to 1 000.00 € annual and 20 kWh daily, replacing one base station, completely surrounded by other stations by a number of repeaters between 1 and 9 depending on ISD (up to 1750 m). There is still a gain in energy efficiency up to 13% at system level.

Keywords:

Energy Efficiency, energy, LTE, repeaters



# Índice

Agradecimentos.....	iii
Resumo.....	v
Abstract.....	vii
Índice.....	ix
Índice de Figuras.....	xi
Índice de Tabelas.....	xiii
Acrónimos.....	xv
Lista de Símbolos.....	xix
1 Introdução.....	1
1.1 Objectivos.....	1
1.2 Motivação.....	2
1.3 Organização.....	3
2 Enquadramento Tecnológico.....	5
2.1 Arquitectura da rede LTE.....	6
2.1.1 Elementos da Rede LTE.....	7
2.1.2 Arquitectura de Protocolos.....	9
2.2 Canais e Sinais Físicos LTE.....	10
2.2.1 Canais e Sinais Físicos.....	11
2.2.2 Canais de Transporte.....	12
2.2.3 Canais Lógicos.....	13
2.3 Técnicas de Acesso Múltiplo.....	13
2.3.1 OFDM.....	14
2.3.2 OFDMA.....	15
2.3.3 SC-FDMA.....	18
2.3.4 MIMO.....	20
2.4 LTE-Advanced.....	20
2.4.1 Requisitos.....	21
2.4.2 Tecnologia.....	21
2.5 Repetidores.....	22
2.5.1 Tipos de Repetidores.....	22
2.5.2 Tipo 1.....	23
2.5.3 Tipo 2.....	25
3 Cobertura e Capacidade.....	29

3.1	Balanço de Potência.....	29
3.2	Débito Binário.....	30
3.3	Relação Sinal-Ruído.....	32
3.4	Modelos de Propagação.....	33
3.4.1	COST 231 HATA.....	33
3.4.2	COST 231 Walfisch-Ikegami.....	34
3.4.3	3GPP.....	37
3.5	Comparativo dos Modelos de Propagação.....	39
3.6	Cobertura e Capacidade.....	41
3.6.1	Transmissão eNB-UE.....	44
3.6.2	Transmissão RN-UE.....	46
3.7	Conclusões.....	48
4	Cenários e Resultados.....	49
4.1	Cenários de Referência.....	49
4.2	Energia no Sistema.....	50
4.3	Métricas Adoptadas.....	52
4.3.1	Potencia por Área e Potência por Bit Relativa a eNB.....	52
4.3.2	Potencia por Área e Potência por Bit Relativa aos RNs.....	55
4.4	Consumo Energético.....	58
4.5	Ganho Efectivo.....	63
4.6	Custo Unitário da eNB e dos RNs.....	68
5	Conclusões.....	71
5.1	Deduções Principais.....	71
5.2	Trabalho Futuro.....	73
	Referencias.....	75

## Índice de Figuras

Figura 2.1 – Arquitectura básica da rede LTE (extraído de [3]).	6
Figura 2.2 – Arquitectura da rede LTE (extraído de [4]).	7
Figura 2.3 – Protocolos da rede LTE (extraído de [5]).	9
Figura 2.4 – Estrutura dos canais lógicos de transporte e físicos do LTE (extraído de [6]).	11
Figura 2.5 – Disposição das portadoras na modulação FDM e OFDM.	14
Figura 2.6 – Configuração de acesso no OFDM (extraído de [7]).	14
Figura 2.7 – Transmissão OFDMA (extraído de [8]).	15
Figura 2.8 – Diferença entre OFDM e OFDMA (extraído de [9]).	16
Figura 2.9 – Configuração de acesso no OFDMA (extraído de [9]).	16
Figura 2.10 – Transmissão SC-FDMA (extraído de [8]).	18
Figura 2.11 – Transmissão de símbolos QPSK em OFDMA e em SC-FDMA (extraído de [10]).	19
Figura 2.12 – Configuração MIMO (extraído de [11]).	20
Figura 2.13 – Repetidores Tipo 1 e do Tipo 2 (extraído de [12]).	22
Figura 2.14 – Interface de acesso Uu e Un (extraído de [13]).	23
Figura 2.15 – Transmissão em banda (extraído de [14]).	24
Figura 2.16 – Repetidores do Tipo 2 cooperativo (extraído de [14]).	27
Figura 3.1 – Visualização dos parâmetros definidos no modelo COST 231 WI.	35
Figura 3.2 – Comparativo dos modelos de propagação.	39
Figura 4.1 – Estrutura celular em estudo.	49
Figura 4.2 – COST 231 HATA potência na eNB.	53
Figura 4.3 – COST 231 WI potência na eNB.	54
Figura 4.4 – 3GPP potência na eNB.	55
Figura 4.5 – COST 231 HATA potência relativa aos RNs.	56
Figura 4.6 – COST 231 WI potência relativa aos RNs.	57
Figura 4.7 – 3GPP potência relativa aos RNs.	58

Figura 4.8 – Carga de 1% nos cenários de referência e alternativo.....	59
Figura 4.9 – Carga de 10% nos cenários de referência e alternativo.....	60
Figura 4.10 – Carga de 25% nos cenários de referência e alternativo. ....	61
Figura 4.11 – Carga de 50% nos cenários de referência e alternativo. ....	61
Figura 4.12 – Carga de 75% nos cenários de referência e alternativo. ....	62
Figura 4.13 – Carga de 100% nos cenários de referência e alternativo. ....	63
Figura 4.14 – Ganho efectivo quando aplicado o modelo COST231 HATA.....	64
Figura 4.15 – Ganho efectivo quando aplicado o modelo COST231 WI. ....	65
Figura 4.16 – Ganho efectivo quando aplicado o modelo 3GPP. ....	65
Figura 4.17 – Custo anual por ISD para a estimativa COST 231 HATA.....	66
Figura 4.18 – Custo anual por ISD para a estimativa COST 231 WI.....	67
Figura 4.19 – Custo anual por ISD para a estimativa 3GPP.....	68

## Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – <i>Resource Blocks</i> e subportadoras por largura de banda .....	17
Tabela 2.2 – Parâmetros físicos dos RB. ....	17
Tabela 3.1 – Débito binário máximo no DL [16]. ....	31
Tabela 3.2 – Categorias do UE [15]. ....	31
Tabela 3.3 – Largura de Banda e SNR. ....	32
Tabela 3.4 – Parâmetros para o modelo de propagação COST 231 HATA. ....	33
Tabela 3.5 – Parâmetros para o modelo de propagação COST 231 WI. ....	34
Tabela 3.6 – Parâmetros para o modelo de propagação 3GPP. ....	37
Tabela 3.7 – Parâmetros do sistema. ....	40
Tabela 3.8 – Parâmetros da eNB. ....	40
Tabela 3.9 – Parâmetros do UE. ....	40
Tabela 3.10 – Parâmetros do RN. ....	41
Tabela 3.11 – COST 231 HATA transmissão da eNB para o UE. ....	41
Tabela 3.12 – COST 231 HATA transmissão da eNB para o RN. ....	42
Tabela 3.13 – COST 231 HATA transmissão do RN para o UE. ....	42
Tabela 3.14 – COST 231 WI transmissão da NB para o UE. ....	42
Tabela 3.15 – COST 231 WI transmissão da eNB para o RN. ....	42
Tabela 3.16 – COST 231 WI transmissão do RN para o UE. ....	43
Tabela 3.17 – 3GPP transmissão da eNB para o UE. ....	43
Tabela 3.18 – 3GPP transmissão da eNB para o RN. ....	43
Tabela 3.19 – 3GPP transmissão do RN para o UE. ....	43
Tabela 3.20 – COST 231 HATA débito binário médio da eNB por ISD. ....	44
Tabela 3.21 – COST 231 WI débito binário médio da eNB por ISD. ....	45
Tabela 3.22 – 3GPP débito binário médio da eNB por ISD. ....	46
Tabela 3.23 – COST 231 HATA débito binário médio dos RN por ISD. ....	47

Tabela 3.24 – COST 231 WI débito binário médio dos RN por ISD.....	47
Tabela 3.25 – 3GPP, débito binário médio dos RN por ISD.....	48
Tabela 4.1 – Parâmetros para o modelo energético (adaptado de [20]). .....	51
Tabela 4.2 – Distribuição da carga pelo dia. ....	66
Tabela 4.3 – Custo energético diário para a eNB e os RNs. ....	69

## Acrónimos

2G	2ª Geração de comunicações móveis
3G	3ª Geração de comunicações móveis
3GPP	3 <sup>rd</sup> Generation Partnership Project
ACK	Acknowledge
AF	Amplify-and-Forward
ARQ	Automatic Repeat reQuest
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BCCH	Broadcast Control CHannel
BCH	Broadcast CHannel
BER	Bit Error Rate
BLER	Block Error Rate
CAPEX	CAPital EXpenditure
CCCH	Common Control CHannel
CDMA	Code Division Multiple Access
CE	Comissão Europeia
CFI	Control Format Indicator
CoMP	Coordinated Multiple Point
CRS	Cell-specific Reference Signal
DCCH	Dedicated Control CHannel
DCI	Downlink Control Indicator
DF	Decode-and-Forward
DFT	Discrete Fourier Transform
DL	DownLink
DL-SCH	DownLink Shared CHannel
DTCH	Dedicated Traffic CHannel

EDGE	Enhanced Data rates for GSM Evolution
eNB	evolved NodeB
EPC	Evolved Packet Core
EPS	Evolved Packet System
EUTRAN	Evolved-UTRAN
FDD	Frequency Division Duplex
FDM	Frequency Division Multiplex
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FFT	Fast Fourier Transform
GERAN	GSM EDGE Radio Access Network
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communications
GTP	Generic Tunneling Protocol
GW	GateWay
HARQ	Hybrid Automatic Repeat reQuest
HI	Hybrid-ARQ
HLR	Home Location Register
HSDPA	High-Speed Downlink Packet Access
HSS	Home Subscription Server
IFFT	Inverse FFT
IP	Internet Protocol
ISD	InterSite Distance
LTE	Long Term Evolution
LOS	Line Of Sight
MAC	Medium Acces Control
MBMS	Multimedia Broadcast Multicast Service
MCCH	Multicast Control CHannel
MCH	Multicast CHannel
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
MME	Mobility Management Entity
MTCH	Multicast Traffic Channel
NAK	Not Acknowledged
NAS	Non-Access Stratum

NB	Node B
NLOS	Non Line of Sight
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OPEX	Operational EXpenditure
PA	Power Amplifier
PAPR	Peak to Average Power Ratio
PBCH	Physical Broadcast CHannel
PCCH	Paging Control CHannel
PCEF	Policy Control Enforcement Function
PCFICH	Physical Control Format Indicator Channel
PCH	Paging CHannel
PCI	Physical Cell Identity
PCRF	Policy Control and Charging Rules Function
PDCCCH	Physical Downlink Control CHannel
PDCP	Packet Data Convergence Protocol
PDN	Packet Data Network
PDP	Protocol Data Package
PDSCH	Physical Downlink Shared CHannel
PUSCH	Physical Uplink Shared CHannel
PDN-GW	PDN-GateWay
PHICH	Physical Hybrid-ARQ Indicator CHannel
PHY	Physical Layer
PMCH	Physical Multicast CHannel
PRACH	Physical Random Access CHannel
PRB	Physical Resource Block
PUCCH	Physical Uplink Control CHannel
PUSCH	Physical Uplink Shared CHannel
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality Of Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RACH	Random Access CHannel
RAN	Radio Access Network

RB	Resource Block
RE	Resource Element
RLC	Radio Link Control
RN	Relay Node
RNC	Radio Network Controller
RRC	Radio Resource Controller
RRM	Radio Resource Management
S1-U S1	User Plane Interface
SAE	System Architecture Evolution
SAE-GW	SAE-GateWay
SC-FDMA	Single-Carrier Frequency Division Multiple Access
SCH	Synchronization CHannel
SGSN	Serving GPRS Suport Node
SGW	Serving GateWay
SINR	Signal-to-Interference plus Noise Ratio
SISO	Single-Input Single-Output
SNR	Signal to Noise Ratio
SON	Self-Organizing Networks
SU-MIMO	Single User-MIMO
TCP	Transmission Control Protocol
TDD	Time Division Duplex
TTI	Transmission Time Interval
UDP	User Datagram Protocol
UCI	Uplink Control Indicator
UE	User Equipment
UL	UpLink
UL-SCH	UpLink-Shared CHannel
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UTRAN	UMTS Terrestrial Radio Access Network
VLR	Visitor Location Register
WCDMA	WideBand Code Division Multiple Access

## Lista de Símbolos

$\varphi$	Ângulo formado pela orientação da rua e da direcção de incidência
$a$	Parâmetro relacionado com o ambiente (urbano, suburbano ou rural)
$b$	Distancia entre edificios
$B$	Largura de Banda
$B_{eff}$	Largura de Banda eficaz
$C_{cap}$	Capacidade da célula
$d$	Distância
$D_{bin}$	Débito Binário
$f$	Frequência
$G_{RX}$	Ganho da antena de recepção
$G_{TX}$	Ganho da antena de transmissão
$h_b$	Altura da antena emissora
$h_m$	Altura do UE
$h_{RN}$	Altura do RN
$h_{Roof}$	Altura da cobertura dos edificios
$I_M$	Interface Marging
$k$	Constante de Boltzmann
$k_a$	Dependência da perda no percurso relativamente a altura dos edificios
$k_d$	Dependência da perda no percurso relativamente a distância
$k_f$	Dependência da perda no percurso relativamente a frequência
$L_0$	Atenuação em espaço livre
$L_{bRB}$	Largura de Banda de um RB
$L_{bsh}$	Atenuação relativa a altura dos edificios
$L_{msd}$	Atenuação por difracção

$L_{ori}$	Factor de correcção empírico
$L_{rts}$	Atenuação por difracção e dispersão no ultimo obstáculo
$L_{RX}$	Perdas nos cabos e outros no lado da recepção
$L_{TX}$	Perdas nos cabos e outros no lado da transmissão
$NF$	Figura de Ruído
$N_{RB}$	Número de RBs
$P_{LLOS}$	Perda no percurso linha de vista
$P_{LNLOS}$	Perda no percurso fora da linha de vista
$P_{REFSENS}$	Potência da sensibilidade de referência
$P_{RX}$	Potência recebida
$P_{TX}$	Potência de transmissão
$T$	Temperatura em Kelvin
Tbs	Transport Block Size
$SNR_{eff}$	Relação sinal-ruído eficaz
$t_{cont}$	Taxa de contenção
$UE_{bps}$	Débito binário requerido no utilizador
$w$	Largura da rua

# 1 Introdução

Actualmente uma das maiores preocupações no mundo é o aumento do consumo de energia que está em curso e o seu efeito sobre o ambiente. A Comissão Europeia (CE) concordou em cortar as emissões de gases de efeito estufa em 20% até 2020 e melhorar a eficiência energética em 20% em todos os equipamentos [1].

As redes de comunicações móveis consomem actualmente 0,5% da produção global de energia [2]. No entanto, para satisfazer a procura crescente por mais capacidade no acesso a banda larga sem fios é necessário aumentar o consumo de energia.

O que se torna evidente é que o custo da energia até agora negligenciado, é, e vai continuar a ser uma grande preocupação. A actual e futura implantação de redes de telecomunicações tem de considerar o custo da implantação da infra-estrutura no contexto das componentes do custo da energia (localização, energias alternativas, eficiência dos equipamentos, etc).

## 1.1 Objectivos

A importância no custo/benefício resultante da utilização de repetidores no planeamento/cobertura LTE já foi abordado/ estudado sob diversas perspectivas. Nesta dissertação pretende-se estudar e avaliar o impacto das modernas estratégias de instalação de repetidores LTE no ganho de eficiência energética obtido do lado da infra-estrutura e resultante da utilização de repetidores no planeamento LTE. Esta dissertação deverá avaliar e comparar os diferentes ganhos energéticos obtidos de diferentes abordagens de planeamento para um cenário de referência comum que deverá incluir níveis de carga variáveis assim como o modelo de

potência das estações base em LTE. Esta avaliação deverá garantir o nível de satisfação dos utilizadores semelhante a utilização única de estações base.

### 1.2 Motivação

O aumento do custo da energia, resultante da procura e do impacto ambiental, obriga a procura sistemática de sistemas que permitam diminuir estes custos. Nas comunicações móveis sem fios o alvo principal tem sido as estações-base onde a electrónica já permitiu reduzir os consumos, mas ainda insuficientes para compensar a procura crescente de débitos binários cada vez maiores.

Os operadores enfrentam o investimento em redes mais densas para satisfazer a procura de altos débitos binários e o continuo aumento do custo da energia, resultante do aumento da procura e do impacto ambiental.

Os projectos tradicionais de redes, com base em pressupostos de escassez espectro e de alto custo das estações-base, produziram os atuais sistemas celulares 3G e 4G (LTE). Estes últimos, caracterizados pela eficiência de espectro muito elevada, mas baixa eficiência energética. A actual implantação de redes tem favorecido estratégias com poucas estações-base de alta potência [2].

O método-chave para proporcionar cobertura dentro de edifícios tem sido até recentemente, proporcionar no exterior potência suficiente para realizar a cobertura no interior - solução que não é eficiente em termos energéticos.

Melhorias continuas efectuadas na electrónica e no processamento de sinal estão a diminuir o consumo de energia dos diversos componentes do sistema de comunicações. No entanto, estas melhorias não são suficientes para compensar ou acompanhar o aumento no consumo de energia necessário para proporcionar a capacidade requerida. É evidente que as soluções para este problema têm que ser encontradas ao nível de arquitectura e não apenas pelo aumento da eficiência das componentes individuais.

Um método para reduzir o consumo energético passa por trocar o número de estações-base que operam na rede por outras mais eficazes. Outra abordagem, é dinamicamente desligar algumas das estações de base quando o tráfego da rede é baixo. Ao desligar ou remover estações-base, há questões de cobertura e capacidade que têm de ser resolvidos, e para tal, o standard LTE define

os repetidores como um recurso para aumentar a capacidade e a cobertura de redes LTE. A utilização de repetidores em LTE é diferente da utilização de repetidores em sistemas mais antigos, pois em LTE não se trata apenas de reenviar/ repetir o sinal, existe processamento e tratamento do sinal dependendo do tipo de repetidor.

### 1.3 Organização

Esta dissertação é composta por 6 capítulos denominadas Introdução, Enquadramento Tecnológico, Cobertura e Capacidade, Cenários e Resultados e Conclusões.

Na Introdução é descrito o enquadramento do tema da dissertação, a descrição dos objectivos, a motivação e a organização da mesma. O Enquadramento Tecnológico fornece um conjunto de conhecimentos básicos relativos a rede e ao sistema LTE, técnicas de transmissão e noções sobre repetidores LTE. Cobertura e Capacidade, nesta parte da dissertação são abordadas e aplicadas técnicas de planeamento para estimativa de cobertura e capacidade de uma estação-base. Estas técnicas são ainda aplicadas a repetidores do tipo 1 para obtenção das mesmas estimativas. São apresentados 3 modelos de propagação, COST 231 HATA, COST 231 Walfish Ikegami e 3GPP, para estabelecer um comparativo e corroborar os resultados. Na parte da dissertação dedicada a Cenários e Resultados, são apresentados dois cenários, Cenário de referência e Cenário alternativo. O cenário de referência é composto por 7 estações-base agrupadas num *cluster* redondo. O cenário alternativo difere do cenário de referência na estação-base central que é substituída por um determinado número de repetidores, obtido de forma a poderem fornecer a mesma cobertura e capacidade da estação-base substituída. Os resultados são apresentados na forma de potencia por área, potencia por bit, ganhos em relação a percentagem e ganho em moeda corrente (€). Na parte dedicada as Conclusões, são apresentadas as deduções obtidas a partir dos resultados. São ainda apresentadas algumas propostas de trabalho futuro, partindo do trabalho desenvolvido, pois existem outras simulações para além daquelas que foram realizadas e que podem originar resultados interessantes



## 2 Enquadramento Tecnológico

Os factores que impulsionaram o desenvolvimento do LTE foram entre outros: a evolução da capacidade da rede fixa, a necessidade de capacidade adicional na rede móvel, a necessidade da entrega de dados móveis a baixo custo e a concorrência com outras tecnologias sem fios. O aumento do débito binário na rede fixa obrigou a rede móvel a acompanhar de modo a proporcionar compatibilidade entre as redes e aplicações informáticas que nelas funcionam.

O *3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project* (3GPP) é actualmente o organismo dominante no desenvolvimento especificações para os sistemas de comunicações móveis em todo o mundo. Tecnologias desenvolvidas pelo 3GPP como GSM/ EDGE, *Code Division Multiple Access Wideband* (WCDMA)/ HSPA, servem quase 90% dos utilizadores de redes de comunicações móveis globais [15].

As especificações do 3GPP são definidas em documentos que são divididos/ referenciados em versões, onde cada versão tem um conjunto de características adicionais comparado com a versão anterior. A elaboração do LTE começou com um estudo de viabilidade iniciado em Dezembro de 2004 e foi finalizado com sua produção de mais um documento do 3GPP, na ocasião versão 7 (3GPP TR25.913 Release 7). As especificações do núcleo do LTE foram incluídos na versão 8 (3GPP TR36.913 Release 8).

Alguns requisitos e objectivos essenciais podem ser resumidos da seguinte forma:

- Eficiência espectral 2 a 4 vezes superior à do HSPA;
- Débito binário de pico superior a 100 Mbps no DL e 50 Mbps no UL;
- Tempo de resposta inferior a 10 ms;
- Comutação de pacotes optimizada;
- Optimização da eficiência energética do terminal;
- Compatibilidade com as redes existentes, 2G e 3G;

- Redução da complexidade da rede em relação a rede da geração anterior;
- Flexibilidade nas larguras de banda desde os 1,4 MHz até aos 20 MHz.

O LTE é também pode ser referido como *Evolved UMTS Terrestrial Radio Access* (EUTRA) ou *Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network* (EUTRAN).

### 2.1 Arquitectura da rede LTE

A arquitectura da rede LTE reflecte a integração de serviços baseados em *Internet Protocol* (IP) nas comunicações móveis, a optimização no desempenho da rede e a melhoria na relação custo-eficiência. Apresentando várias diferenças face à arquitectura da rede UMTS, a rede LTE é uma arquitectura plana que reduz os nós envolvidos nas ligações e também apresenta uma nova hierarquia. A arquitectura divide-se basicamente em duas partes denominadas *Evolved Packet Core* (EPC) e *Evolved-Terrestrial Radio Access Network* (EUTRAN), Figura 2.1.

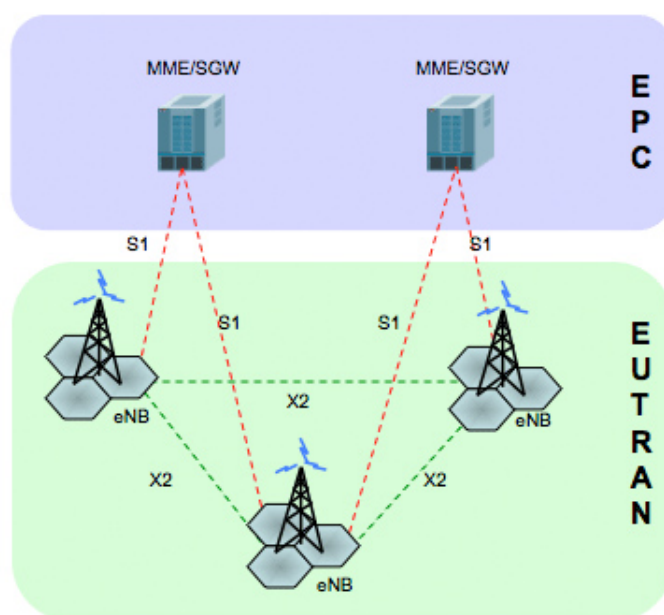


Figura 2.1 – Arquitectura básica da rede LTE (extraído de [3]).

A estação-base, agora denominada de *evolved Node B*, eNodeB ou simplesmente eNB, foi-lhe atribuído um papel mais relevante, passou a ter mais capacidade de processamento e decisão. Todas as tarefas e funcionalidades de rádio são agora realizadas na eNB, destacando-se: a Gestão

de Recursos de Rádio (RRM), o Controlo da Ligação de Rádio (RLC), o Controlo de Recursos de Rádio (RRC), o Protocolo de Convergência de Pacotes de Dados (PDCP), o controlo de portadora de rádio, o controlo de admissão de rádio, o controlo de mobilidade da ligação, a atribuição dinâmica de recursos e a configuração de medição/relatórios também são realizados ao nível do eNB.

### 2.1.1 Elementos da Rede LTE

Os principais elementos que compõem a rede LTE são o EUTRAN e o EPC [21], Figura 2.1. O EUTRAN consiste apenas nas eNBs que estão interligadas através da interface X2, Figura 2.1, para comunicarem entre si de modo poderem efectuar *handover* ou outra função de coordenação.

O EPC possui o *Serving GateWay* (SGW), o *Mobility Management Entity* (MME) e o *Packet Data Network Gateway* (PDN-GW), Figura 2.2, estando interligados às eNBs através da interface S1 ou de uma *Radio Access Network* (RAN). O SGW e o MME juntos são responsáveis por tarefas semelhantes as controladas pelo *Serving GPRS Support Node* (SGSN) do UMTS. Na prática, estas duas entidades podem ser implementadas no mesmo hardware, ou separadas em níveis diferentes. Quando separadas, a interface S11 é a responsável pela comunicação entre estas entidades. O SGW e o PDN-GW compõem o *System Architecture Evolution Gateway* (SAE-GW). As funcionalidades do RNC da rede UMTS estão agora divididas entre o eNB e o SGW, que também tem as funcionalidades do *Serving GPRS Support Node* (SGSN) da rede GSM.

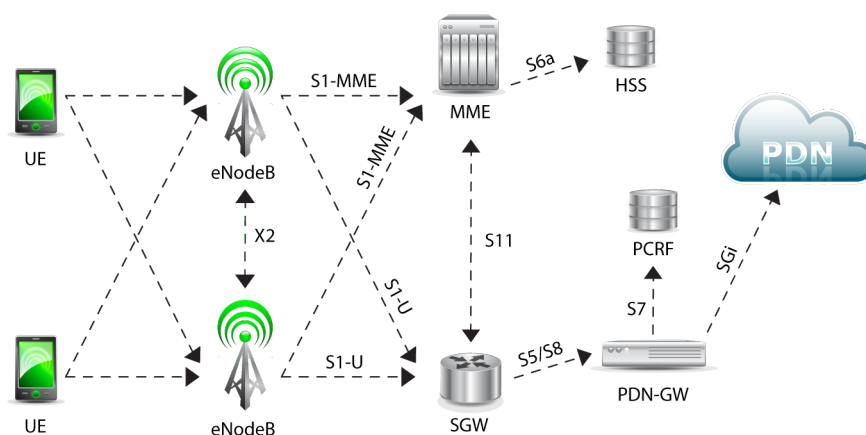


Figura 2.2 – Arquitectura da rede LTE (extraído de [4]).

O MME é responsável pela mobilidade do móvel e pela sinalização, incluindo autenticação, estabelecimento de conexões, suporte ao *handover* entre diferentes eNBs e entre diferentes tecnologias (ex. GSM, UMTS, faz a gestão do acesso do *User Equipment* (UE) à rede através da interacção com o *Home Subscriber Server* (HSS) de forma a autenticar os utilizadores. É equivalente ao *Home Location Register* (HLR) e ao *Visitor Location Register* (VLR) da rede UMTS. Fornece ainda a função do plano de controlo para permitir a mobilidade contínua entre o LTE e as redes móveis 2G/3G. Também é responsável pelo móvel quando em modo *idle* (quando ainda não há o estabelecimento de conexões com alguma portadora). O MME é ainda responsável pela selecção do PDN-GW quando o móvel solicita ligações com endereços IP da rede. A capacidade do MME depende da carga de sinalização da rede.

O SGW actua como o ponto de ligação entre a rede de acesso rádio (EUTRAN) e a rede Core (EPC). Encaminha os pacotes de dados de e para a eNB e para o PDN-GW, realiza a contabilização e o controlo dos dados do utilizador. Também serve de âncora de mobilidade local para os *handovers* entre eNBs ou para a passagem entre redes 3GPP.

No LTE o “router” chama-se *Packet Data Network* (PDN- GW), é responsável por desempenhar as mesmas tarefas que o *Gateway GPRS Support Node* (GGSN) do UMTS. Serve como ponto de entrada e de saída do tráfego de dados do UE e de interface entre as redes LTE e as redes fixas ou outras. Também faz a gestão da atribuição de endereços IP e suporta a filtragem de pacotes para cada utilizador.

O *Policy Control and charging Rules Function* (PCRF) dá permissão ou rejeita pedidos de multimédia. Cria e faz a actualização do contexto do protocolo de pacotes de dados (PDP) e controla a atribuição de recursos. Também fornece as regras de tarifação com base no fluxo de serviços de dados para o PDN-GW.

O HSS é idêntico ao HLR do UMTS, é considerado um *enhanced* HLR. O HSS é a combinação dos dados dos móveis utilizado simultaneamente pelo GSM, UMTS e LTE. A interacção entre o HSS e a MME é realizada pela interface S6a, como ilustrado na Figura 2.2.

Os interfaces entre os diferentes elementos da arquitectura dividem-se em 2 grupos denominados plano de controlo e plano de utilizador/ dados [21], sendo:

Plano de Controlo:

- S1-MME – Ponto de referência para o protocolo do plano de controlo entre o EUTRAN e o MME;
- S6a – Interface entre o MME e o HSS que permite a transferência de dados de subscrição e de autenticação;
- S7 – Interface entre o PCRF e o PDN-GW que permite a transferência das políticas de Qualidade de Serviço (QoS) e das regras de tarifação;

Plano de Utilizador/ Dados:

- X2 – Interligação entre eNBs;
- S1-U – Interface entre a eNB (E-UTRAN) e o SGW (EPC);
- S5 – Faz a ligação em termos do Plano de Utilizador e a gestão dessa ligação entre o SGW e o PDN-GW;
- S11 – Interface entre o SGW e o MME;
- SGi – Interface entre o PDN-GW e as redes externas.

### 2.1.2 Arquitectura de Protocolos

O 3GPP teve como bases no desenvolvimento dos protocolos da interface rádio da rede EUTRAN, também conhecida como LTE, os seguintes pontos:

- Simplificar a arquitectura de protocolos existente;
- Inexistência de canais dedicados com objectivo de se obter uma camada *Media Access Control* (MAC) simplificada;
- Evitar a existência de funções similares entre os elementos do Acesso (EUTRAN) e do Core (EPC);

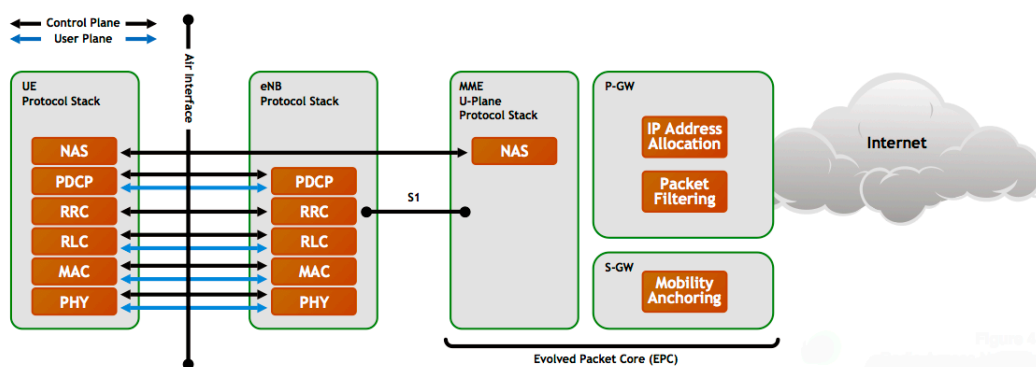


Figura 2.3 – Protocolos da rede LTE (extraído de [5]).

Os protocolos da interface rádio do LTE dividem-se em dois grupos denominados protocolos do plano do utilizador (*User Plane*) e protocolos do plano de controlo (*Control Plane*) como ilustrado na Figura 2.3.

As funções dos protocolos ilustrados na Figura 2.3 são definidos da seguinte forma [21]:

- ***Non-Access Stratum (NAS)*** – a camada NAS é responsável pela mobilidade do UE e por manter a conectividade IP entre a UE e o PDN GW.
- ***Resource Radio Control (RRC)*** – esta camada é responsável pela transmissão e paginação. Ela também trata da gestão das ligações RRC, controle da portadora rádio, funções de mobilidade e relatórios de medição e controle do UE.
- ***Packet Control Protocol Dados (PDCP)*** – é responsável pela compressão do cabeçalho IP para evitar a sobrecarga desnecessária na carga útil. Também é responsável pela cifragem e verificação da integridade dos dados.
- ***Rádio Link Control (RLC)*** – responsável pela segmentação/ concatenação, manuseamento e retransmissão na entrega sequencial de mensagens para as camadas superiores.
- ***Media Access Control (MAC)*** – este protocolo lida com o ARQ, gestão do UL e do DL. A função de gestão está localizada na eNB. Existe uma entidade MAC por célula para ambos UL e DL. O HARQ está presente em ambos UE e eNB.
- ***Physical Layer (PHY)*** – a Camada Física lida com a codificação/ decodificação, modulação/ desmodulação, múltiplas antenas (MIMO), etc. Oferece serviços para camada MAC mapear os canais de transporte.

## 2.2 Canais e Sinais Físicos LTE

A camada de acesso ao meio realiza o mapeamento entre os canais lógicos e os canais de transporte, organizando os acessos dos diferentes terminais e dos serviços que utilizam, tanto no DL como no UL, dependendo das prioridades. A Figura 2.4 apresenta o mapeamento dos canais lógicos, de transporte e físicos do *LTE*.

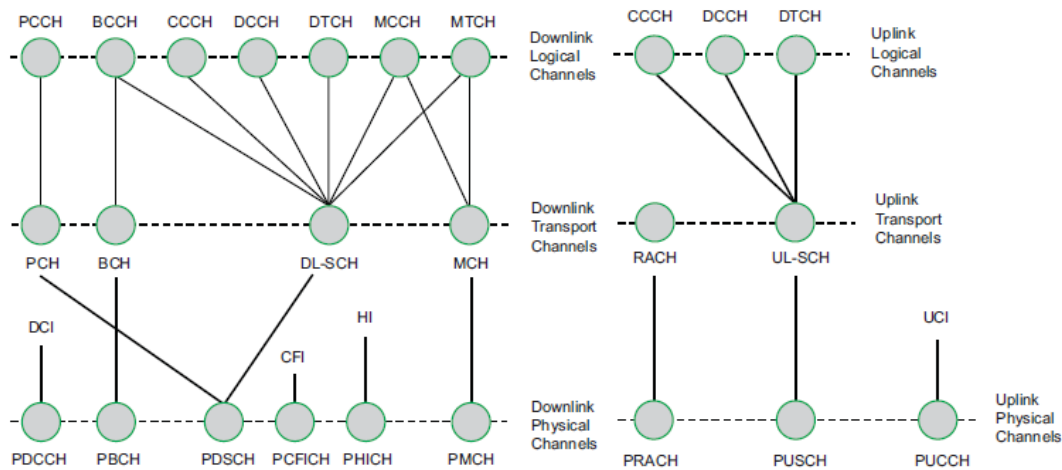


Figura 2.4 – Estrutura dos canais lógicos de transporte e físicos do LTE (extraído de [6]).

Os canais lógicos no sistema fornecem os serviços e funções requeridos pelas camadas mais altas, NAS, para a entrega de aplicações e serviços, Figura 2.3. Os canais lógicos por sua vez, são mapeados pelos canais de transporte na camada 2, através de elementos RRC. Estes canais são responsáveis pelo controlo e administração do fluxo de dados, tais como retransmissões, controle de erros e priorização. O tráfego oriundo dos UEs é administrado na camada 2 pelo protocolo PDCP. A interface ar e as conexões da camada física são controladas e administradas pela camada 1, através do RLC e MAC.

### 2.2.1 Canais e Sinais Físicos

Os canais da interface rádio no LTE podem ser separados em dois tipos [21], canais físicos e sinais físicos. Os canais físicos correspondem a um conjunto de elementos que transportam informações produzidas pelas camadas mais altas, NAS. Os sinais físicos correspondem a um conjunto de elementos utilizados unicamente pela camada física, que não transportam informações produzidas pelas camadas mais altas.

Canais Físicos de DL:

- *Physical Downlink Control Channel* (PDCCH) - Transporta informações de alocação de recursos;
- *Physical Broadcast Channel* (PBCH) - Transporta informações dos móveis que solicitam acesso a rede;
- *Physical Downlink Shared Channel* (PDSCH) - Transporta informações do Downlink Shared Channel (DL-SCH);

- *Physical Control Format Indicator Channel* (PCFICH) - Fornece ao móvel o número de símbolos OFDM utilizados no PDCCHs;
- *Physical Hybrid ARQ Indicator Channel* (PHICH) - Respostas de ACK/NAKs (Acknowledge/Negative Acknowledge) das transmissões de UL;
- *Physical Multicast Channel* (PMCH) - Transporta informações de *Multicast*;

Sinais Físicos de DL:

- Sinal de Referência;
- Sinal de Sincronização;

Canais Físicos de UL:

- *Physical Random Access Channel* (PRACH) - Canal de UL utilizado para funções de acesso aleatório;
- *Physical Uplink Shared Channel* (PUSCH) - Transporta as informações do UL-SCH;
- *Physical Uplink Control Channel* (PUCCH) - Respostas de ACK/NAKs das transmissões de DL;

Sinais Físicos de UL:

- Sinal de Referência de Desmodulação – Associado às transmissões de PUSCH ou PUCCH;

### 2.2.2 Canais de Transporte

Com o objectivo de se reduzir a complexidade da arquitectura de protocolos do LTE, o número de canais de transporte foi reduzido. Isto foi possível pela utilização de canais compartilhados, e não de canais dedicados [21].

Os canais de transporte no DL são:

- *Paging Channel* (PCH) - Utilizado para transmitir PCCH;
- *Broadcast Channel* (BCH) - Canal de transporte mapeado pelo BCCH;
- *Downlink Shared Channel* (DL-SCH) - Principal canal para transferência de dados de , responsável pela alocação dinâmica dos recursos através de verificações da modulação, codificação e potência de transmissão;
- *Multicast Channel* (MCH) - Utilizado na transmissão das informações do MCCH;

Os canais de transporte no UL são:

- *Random Access Channel* (RACH) - Utilizado para requerimentos do acesso aleatório;
- *Uplink Shared Channel* (UL-SCH) - Principal canal para transferência de dados no , responsável pela alocação dinâmica dos recursos, através de verificações da modulação, codificação e potência de transmissão;

### 2.2.3 Canais Lógicos

Os canais lógicos podem ser classificados em canais lógicos de controlo e canais lógicos de tráfego [21].

São canais lógicos de controlo:

- *Paging Control Channel* (PCCH) - Utilizado para informações de *paging*;
- *Broadcast Control Channel* (BCCH) - Fornece informações sistémicas para todos os terminais ligados na eNB;
- *Common Control Channel* (CCCH) - Utilizado para informações de acesso aleatório;
- *Dedicated Control Channel* (DCCH) - Transporta informações específicas de controlo para cada móvel (controlo de potência, *handover*, etc);
- *Multicast Control Channel* (MCCH) - Transmissão de informações necessárias para a repetição de *multicast*,

Os canais lógicos de tráfego são:

- *Dedicated Traffic Channel* (DTCH) - Canal Ponto a Ponto (UL e DL), utilizado para transmitir dados aos utilizadores;
- *Multicast Traffic Channel* (MTCH) - Utilizado para transmissão de dados *multicast*;

## 2.3 Técnicas de Acesso Múltiplo

A procura de soluções para tornar a transmissão de dados mais eficiente e ao mesmo tempo aumentar o volume de dados levou o 3GPP a desenvolver e a otimizar técnicas de acesso múltiplo como OFDM, OFDMA, SC-FDMA e MIMO.

### 2.3.1 OFDM

O OFDM, é uma técnica baseada na multiplexagem pela divisão da frequência (FDM). Ao contrario de utilizar bandas de guarda entre portadoras para poder separa-las, o OFDM faz uma sobreposição das mesmas, como demonstrado na Figura 2.5, permitindo obter um ganho espectral de até 50% em relação ao FDM. Esta técnica distribui a informação de dados sobre um determinado número de subportadoras com espaçamentos precisos que permite a ortogonalidade entre portadoras, prevenindo interferência interportadora na desmodulação. O OFDM utiliza um grande número de subportadoras de banda estreita para uma transmissão multi-portadoras.

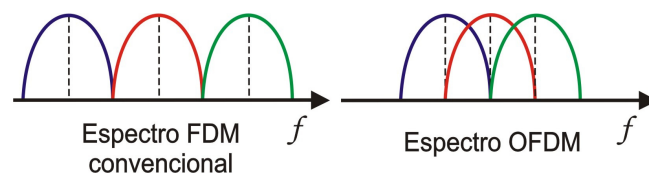


Figura 2.5 – Disposição das portadoras na modulação FDM e OFDM.

O recurso físico básico no DL LTE pode ser visto como uma grelha de tempo-frequência como ilustrada na Figura 2.6. No domínio da frequência, o espaçamento entre as subportadoras é  $\Delta f = 15$  kHz. O tempo de duração do símbolo OFDM é  $1/\Delta f +$  prefixo cíclico. O prefixo cíclico é transmitido antes de cada símbolo OFDM como medida de prevenção ao multipercurso.

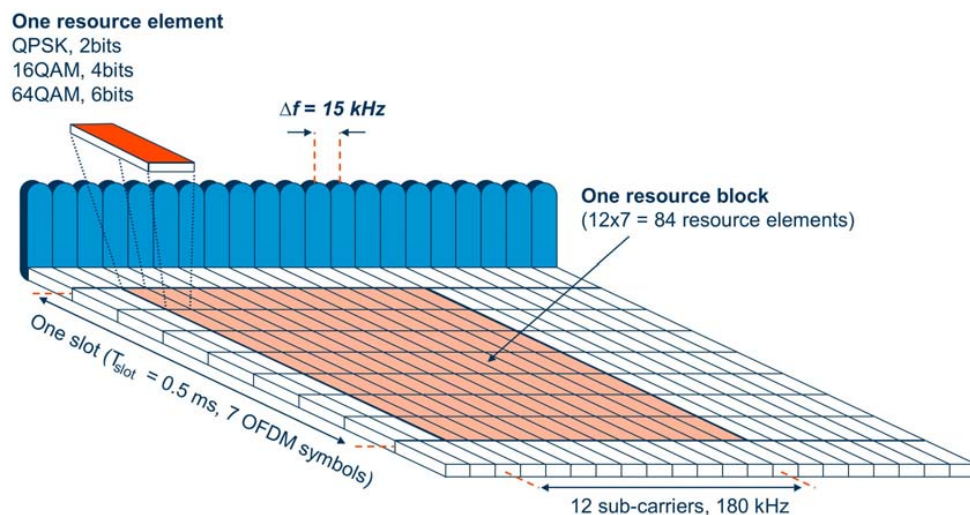


Figura 2.6 – Configuração de acesso no OFDM (extraído de [7]).

Os símbolos OFDM são agrupados em *Resource Blocks* (RBs). Os RBs têm um tamanho total de 180 KHz no domínio da frequência e 0,5 ms no domínio do tempo. Cada Intervalo de tempo de 1 ms de transmissão (TTI) equivale a dois *time slots*.

Em vez de transmitir um fluxo com um elevado débito binário numa portadora, o OFDM utiliza um grande número de subportadoras ortogonais pouco espaçadas na frequência que são transmitidas em paralelo. Cada subportadora é modulada com um esquema de modulação convencional (QPSK, 16QAM ou 64QAM) a um débito de símbolo relativamente baixo. A combinação de múltiplas subportadoras permite altos débitos binários.

Como benefícios resultantes da utilização do OFDM obtemos alta eficiência espectral, robustez contra a interferência de radiofrequência e a baixa distorção por propagação multipercurso.

### 2.3.2 OFDMA

A transmissão de dados no DL em LTE utiliza OFDMA que a semelhança do OFDM permite transmitir dados em múltiplas portadoras em simultâneo. Na Figura 2.7 observa-se um esquema tipo que caracteriza a transmissão OFDMA, utiliza a IFFT na transmissão e a FFT na recepção.

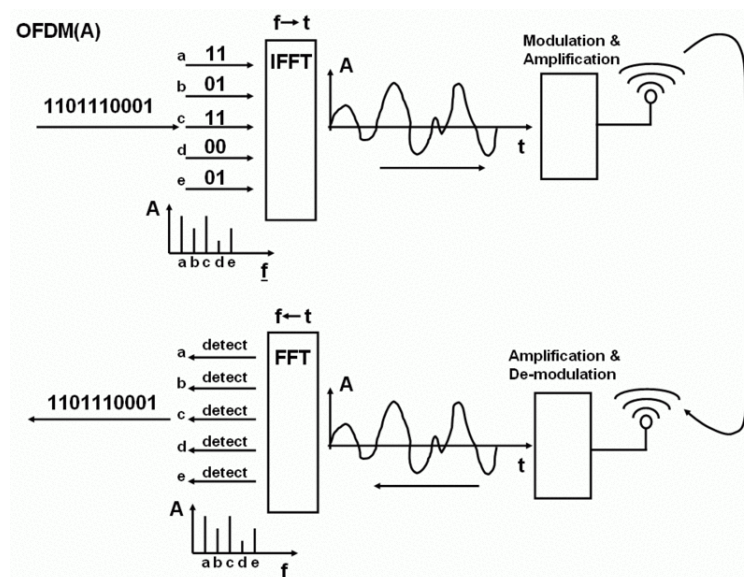


Figura 2.7 – Transmissão OFDMA (extraído de [8]).

O OFDMA distribui a cadeia de bits de informação por um determinado número de subportadoras (cada uma com a sua própria frequência) as quais é aplicada uma IFFT, função

matemática que permite passar do domínio da frequência para o domínio do tempo, permitindo transportar em conjunto todas as subportadoras. Depois o sinal é modulado, amplificado e transmitido. Na recepção, o sinal é amplificado e desmodulado e tratado com a função matemática FFT, que permite passar o sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência e consequentemente reconstruir o sinal original.

A tecnologia OFDMA permite a atribuição dinâmica de subconjuntos de subportadoras ao longo dos diferentes utilizadores no canal, tal como apresentado na Figura 2.8. O resultado é um sistema mais robusto e com maior capacidade.

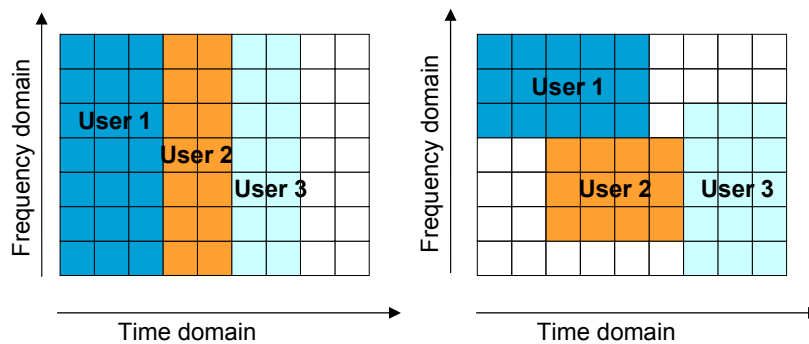


Figura 2.8 – Diferença entre OFDM e OFDMA (extraído de [9]).

A camada física do OFDMA, utilizado no DL do LTE, tem como suporte o OFDM,. Do mesmo modo que o OFDM, o OFDMA utiliza múltiplas subportadoras sobrepostas no domínio da frequência, como pode ser observado na Figura 2.9.

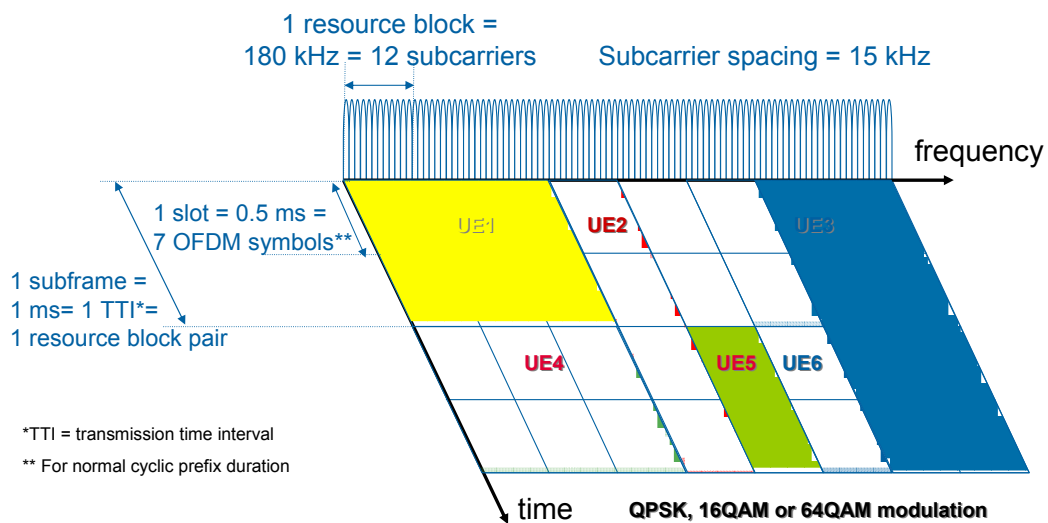


Figura 2.9 – Configuração de acesso no OFDMA (extraído de [9]).

A principal diferença está na subdivisão das subportadoras em grupos, onde cada grupo é formado por 12 subportadoras espaçadas 15 kHz e formando um RB. O número de RBs está associado à largura de banda conforme apresentado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – *Resource Blocks* e subportadoras por largura de banda

	Largura de banda [MHz]					
	1,4	3	5	10	15	20
Resource Blocks	6	15	25	50	75	100
Subportadoras	72	180	300	600	900	1200

Um símbolo OFDM tem a duração de 66,667  $\mu$ s e a duração do prefixo cíclico padrão é de 4,7  $\mu$ s (Tabela 2.2), assim, o tempo total de transmissão de um símbolo OFDM é de 71,367  $\mu$ s.

Tabela 2.2 – Parâmetros físicos dos RB.

Prefixo Cíclico	Subportadoras (kHz)	N.º de Subportadoras	Simbolos OFDM
Normal	15	12	7
Estendido	15	12	6

O prefixo cíclico é transmitido antes de cada símbolo OFDM como medida de prevenção ao multipercurso. Para aplicações onde existe grande degradação por multipercurso, um prefixo cíclico de 16,67  $\mu$ s pode ser utilizado, no entanto quanto maior for o prefixo cíclico mais reduzido é o débito binário, no entanto a duração do símbolo mantém-se.

Como os dados são alocados em RBs, um UE pode ser alocado num RB inteiro no domínio da frequência. No domínio do tempo, a alocação deve ser analisada e pode ser modificada na transmissão em intervalos de 1 ms (esta decisão é tomada na eNB). O conjunto de múltiplas subportadoras são independentes quanto a modulação e no LTE elas podem ser moduladas em QPSK, 16QAM ou 64QAM.

O RB é a referência ao menor conjunto de dados agregados que contem 12 subportadoras e 7 símbolos para cada subportadora (no caso de se utilizar o prefixo cíclico curto). Este grupo de 12 subportadoras tem uma banda de 180 kHz e 0.5 ms de duração no domínio do tempo, 1 *time slot*. 2 *times slots* são agrupados numa subtrama, referente a um *Transmit Time Interval* (TTI). 10 subtramas são agrupados para formar uma trama única com a duração de 10 ms (Figura 2.9). A menor quantidade de RBs que pode ser alocada a um único utilizador num determinado instante

de tempo são dois RBs, uma subtrama ou um TTI. Para aumentar o débito binário para os UEs, a alocação dos recursos da rede pode concatenar vários RBs.

É importante referir que nem todos os *Resource Elements* (REs) de um RB são alocados para a transmissão de dados, também podem ser utilizados para outros fins, como por exemplo, referência do canal piloto e medidas de qualidade dos canais do DL.

No domínio da frequência as subportadoras são agregadas em bandas de 180 kHz cada, e dependendo do prefixo cíclico utilizado (normal ou estendido), o número de subportadoras e símbolos OFDM transportados em 180 kHz podem variar de acordo com o exposto na Tabela 2.2.

### 2.3.3 SC-FDMA

No UL utiliza-se o *Single Carrier FDMA* (SC-FDMA) que de modo semelhante ao OFDM, utiliza intervalos de guarda com prefixos cíclicos entre os blocos de símbolos transmitidos. Na Figura 2.10 observa-se a técnica de transmissão SC-FDMA que utiliza a FFT na transmissão e a IFFT na recepção.

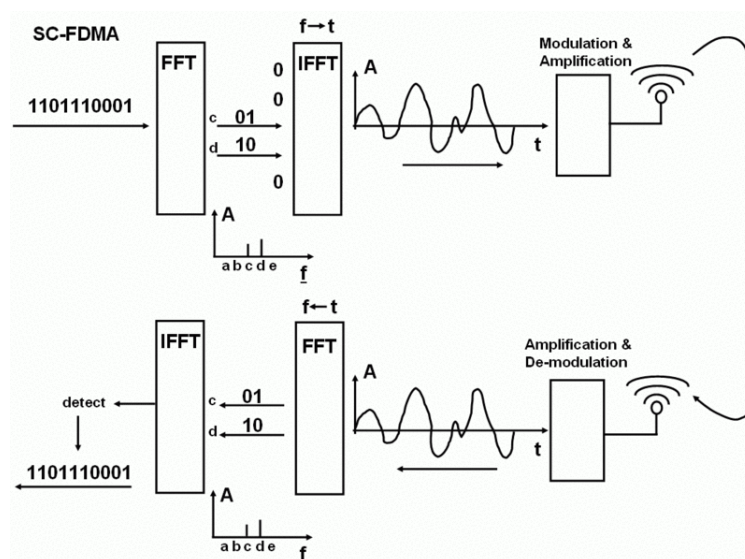


Figura 2.10 – Transmissão SC-FDMA (extraído de [8]).

A principal vantagem do SC-FDMA comparado com o OFDM e o OFDMA, é que os sinais apresentam um baixo *Peak-to-average Power Ratio* (PAPR) o qual diminui a necessidade da utilização de transmissores complexos. O SC-FDMA combina o baixo PAPR do SC utilizado no GSM

com o bom desempenho relacionado ao multipercurso do OFDM. O SC-FDMA também transmite dados com múltiplas subportadoras como no OFDMA.

Na Figura 2.11 pode-se observar que no OFDMA os quatro símbolos QPSK são transmitidos paralelamente, cada um em sua subportadora, e no SC-FDMA os quatro símbolos são transmitidos em série e em quatro tempos diferentes. No OFDMA, cada subportadora só transporta informações de um símbolo específico, enquanto que no SC-FDMA, cada subportadora contém informações de todos os símbolos transmitidos. No UL, os dados também são transmitidos em 12 subportadoras, como no DL e com o mesmo TTI de 1ms.

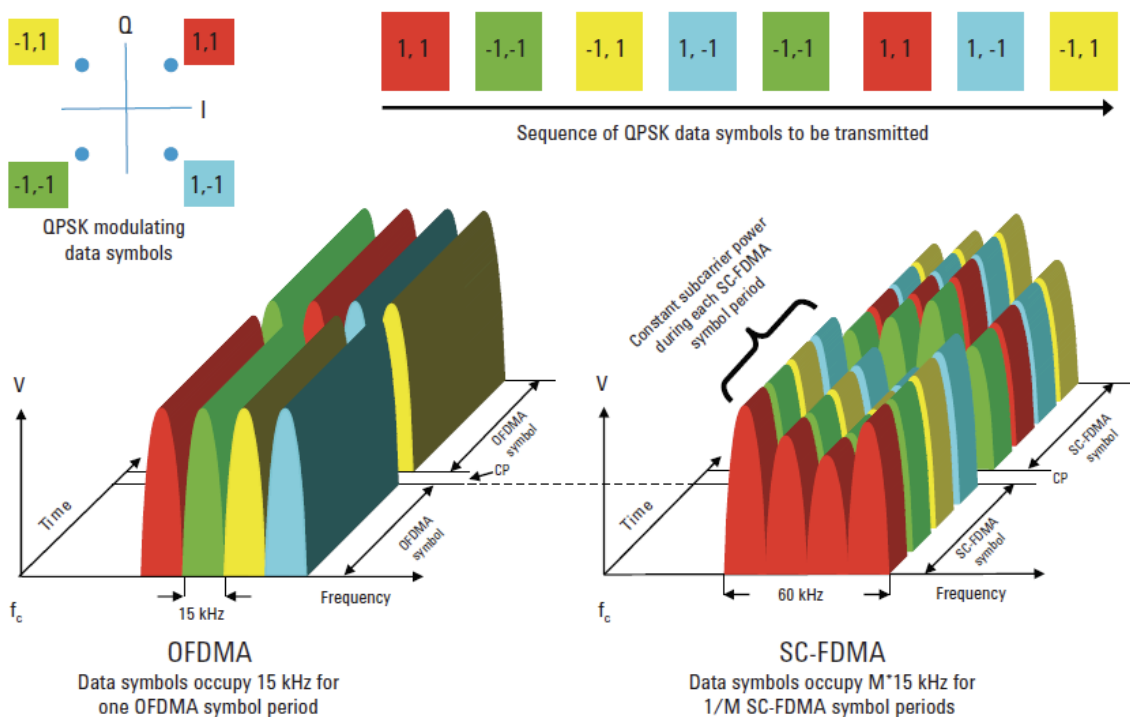


Figura 2.11 – Transmissão de símbolos QPSK em OFDMA e em SC-FDMA (extraído de [10]).

Algumas das principais diferenças que caracterizam o OFDMA e SC-FDMA são:

- No OFDMA são formados grupos de entrada de bits (0s e 1s) para montar as subportadoras que são processadas com a IFFT para se ter um sinal no tempo.
- No SC-FDMA primeiro aplica-se uma FFT sobre os grupos de entrada de bits para os espalhar sobre todas as subportadoras, e depois aplica-se a IFFT ao resultado que cria o sinal no tempo.

### 2.3.4 MIMO

MIMO, esta tecnologia é caracterizada pela utilização de múltiplas antenas na transmissão e na recepção dos sistemas de comunicação sem fios. O MIMO permite obter ganhos significativos no débito binário sem a necessidade de se utilizar mais banda ou potência de transmissão. A Figura 2.12 ilustra um esquema de transmissão e recepção de dados com a utilização de MIMO.

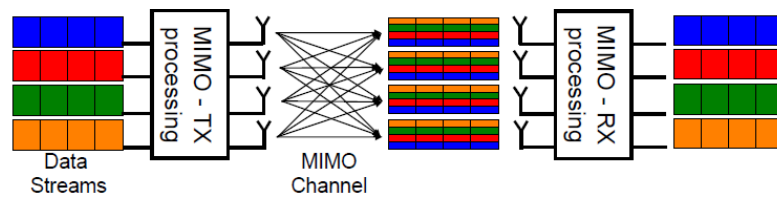


Figura 2.12 – Configuração MIMO (extraído de [11]).

A tecnologia MIMO aproveita-se da propagação multipercurso para aumentar a taxa de transmissão e o alcance, reduz as taxas de erro por bit (eficiência espectral) através do envio e recepção de mais de um sinal no mesmo canal ao mesmo tempo, ao invés de tentar eliminar os efeitos da propagação de multipercurso.

## 2.4 LTE-Advanced

As varias entidades relacionadas com as comunicações sem fios têm disputado vários assuntos sobre o futuro das comunicações sem fios. No entanto, um aspecto comum referiu-se à necessidade de ampliar a capacidade das redes móveis e de fornecer maiores débitos binários para os UEs, o que de facto mostra a necessidade de novos projectos de rede. O padrão LTE-*Advanced* tem vindo a ser desenvolvido pela 3GPP com intuito de ir ao encontro dessa necessidade. O LTE-*Advanced* é assim um nome para a versão mais recente do padrão LTE versão 10.

As novas capacidades deste sistema estão previstas para lidar com uma vasta gama de débitos binários e larguras de banda suportados de acordo com a procura de serviços e da economia, em ambientes multi-utilizador.

### 2.4.1 Requisitos

Com o intuito de ser uma evolução das redes LTE, o projecto *LTE-Advanced* apresenta alguns requisitos. Alguns dos acordos já celebrados entre fornecedores e o 3GPP confirmam como requisitos os a seguir descritos:

- Débito binário de pico de 1 Gbps no DL e de 500 Mbps no UL;
- Eficiência espectral de 30 bps/Hz no DL e de 15 bps/Hz no UL;
- Suporte à agregação espectral e à largura de banda escalável;
- Largura de banda até 100 MHz para o DL e 50 MHz para o UL;
- Débito binário médio para o UE é 3 vezes maior do que no LTE R8;
- Mobilidade igual a do padrão LTE versão 8;
- Compatibilidade com as redes das gerações anteriores.

Tal como no LTE, o *LTE-Advanced* deverá ser totalmente baseado no protocolo IP e mantém toda a compatibilidade com a versão anterior.

### 2.4.2 Tecnologia

Sendo uma evolução do LTE, o *LTE-Advanced* aporta novas técnicas, destacando-se as seguintes:

- Nós repetidores (RN), são utilizados para aumentar a cobertura e ou capacidade, permitindo a um UE distante ou com serviços limitados, comunicar com a eNB e ou obter um aumento na qualidade dos serviços;
- Soluções de duas antenas de transmissão no UE para UL *Single User MIMO* (SU-MIMO) e diversidade de MIMO;
- Escalabilidade de largura de banda superior a 20 MHz, potencialmente até 100 MHz também conhecida por agregação de portadoras.
- Transmissão e recepção *Coordinated Multiple Point* (CoMP), que se refere à transmissão MIMO coordenada entre diferentes transmissores, em sectores diferentes ou até mesmo em eNBs diferentes, em casos extremos;
- Organização Autónoma da Rede (SON);

## 2.5 Repetidores

Um dos principais incentivos à utilização do LTE é a sua capacidade para alcançar altos débitos. No entanto, os altos débitos apenas são alcançados na proximidade da estação-base, diminuindo o débito à medida que nos afastamos. O uso de tecnologias como o OFDM, MIMO e outras técnicas avançadas de correcção de erros não são suficientes para resolver o problema. Assim, o standard *LTE-Advanced* define os repetidores como um recurso para aumentar a capacidade e a cobertura das redes LTE.

A utilização de repetidores LTE é diferente da utilização de repetidores em sistemas mais antigos, pois em LTE não se trata apenas de reenviar/ repetir o sinal, em LTE um utilizador comunica com um repetidor que por sua vez comunica com a estação-base. Do ponto de vista de um utilizador, um repetidor LTE é transparente ou aparece como uma nova estação-base.

### 2.5.1 Tipos de Repetidores

Um repetidor, designado por *Repeater Node* (RN) não é mais que um equipamento que auxilia as transmissões entre uma eNB e um UE. Baseado neste princípio a utilização de repetidores tem como principal objectivo o aumento de cobertura ou de capacidade de uma eNB.

O padrão do 3GPP *LTE-Advanced* definiu dois tipos básicos de repetidores, repetidores Tipo 1 e repetidores Tipo 2, Figura 2.13, conhecidos também como não transparentes e transparentes, sendo esta caracterização obtida pela capacidade que o repetidor tem para gerir recursos.

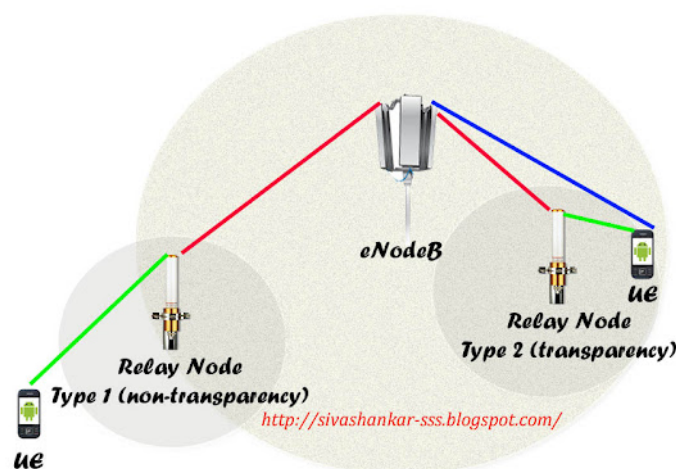


Figura 2.13 – Repetidores Tipo 1 e do Tipo 2 (extraído de [12]).

### 2.5.2 Tipo 1

Um repetidor deste tipo é um repetidor não transparente, aparece ao UE como uma eNB. Este repetidor além de ter uma identificação própria, fornece sincronização, difusão e canais de controlo [14] [19].

A comunicação com a eNB (*backhaul link*) é sem fios e compatível com a interface Uu (interface de comunicação entre o UE e a eNB) definida no padrão 3GPP, o qual garante compatibilidade com a versão 8 dos UEs na eNB, Figura 2.14. Este Tipo de repetidor aumenta a cobertura da eNB permitindo que um UE fora da área de cobertura comunique com a eNB via RN. A principal característica deste Tipo de repetidor é a sua capacidade de gerar a sua própria identificação e transmitir os seus próprios canais de sincronização, comportando-se como uma eNB em miniatura.

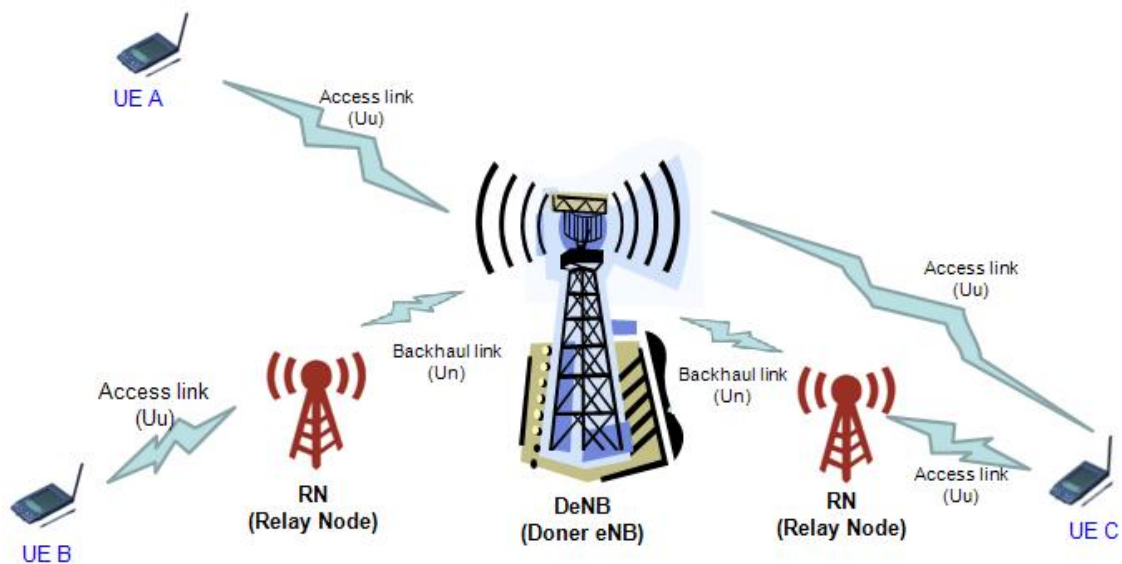


Figura 2.14 – Interface de acesso Uu e Un (extraído de [13]).

Um RN tem dois pares transmissor/ receptor sem fios, um para a ligação de acesso ao UE designado *Uu interface* (Uu) e outro para a ligação á eNB designado *Un interface* (Un), esta situação provoca auto-interferência pelo qual é necessário alcançar e providenciar um isolamento suficiente entre a parte transmissora e a receptora. Caso contrário a auto-interferência criada pelo RN vai degradar o sinal até ao limite (sem comunicação) não permitindo a recepção do sinal dos UEs ou da eNB.

Para obter o isolamento adequado entre os pares emissor/ receptor podem ser aplicadas diversas estratégias. Podemos obter isolamento no tempo (diferentes *time-slots*) para a emissão e recepção, na frequência, diferentes frequências para a emissão e recepção, ou ainda na configuração das antenas com a aplicação de antenas mais restritivas no seu diagrama de radiação. Estas estratégias originaram no padrão 3GPP [19] a diferenciação de três Tipos de repetidores do Tipo 1 [14] [19]:

- Repetidores Tipo 1 - estes repetidores operam em banda (*Inband*), ou seja, a ligação entre a eNB e o RN e a ligação entre o RN e o UE partilham a mesma frequência de portadora (Figura 2.15 a)). O isolamento neste caso é feito no domínio do tempo. Salienta-se no entanto que alguns dos *subframes* são reservados para a ligação *backhaul* (ligação RN – eNB) e não podem ser usados para o link de acesso aos UEs ligados.
- Repetidores do Tipo 1a – este repetidores operam fora da banda (*OutBand*), ou seja, são usadas frequências de portadoras diferentes para o *backhaul* (ligação RN – eNB) e para o link de acesso ao UE (Figura 2.15 b)). Obtemos um isolamento no domínio da frequência. As frequências a atribuir para as transmissões eNB-RN e para o RN-UE são controladas pela função da eNB RRM.
- Repetidor Tipo 1b – a operação deste Tipo de repetidor também é na banda, mas o isolamento entre os pares emissor/ receptor não é feito no domínio do tempo, mas através de uma configuração de antenas adequada.

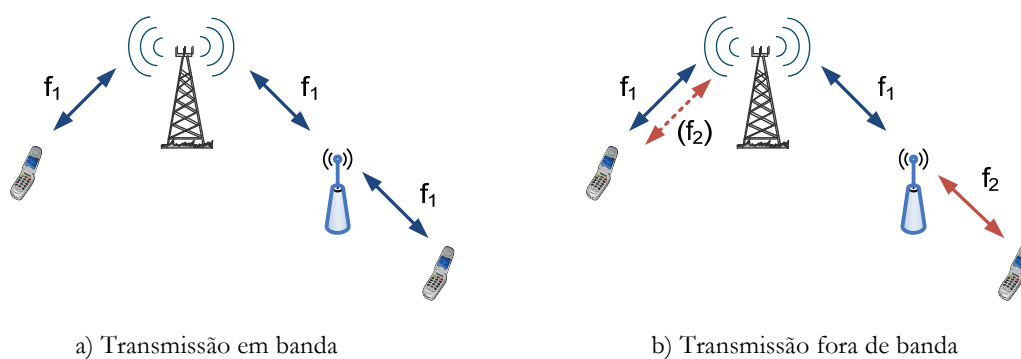


Figura 2.15 – Transmissão em banda (extraído de [14])

A partir do descrito, a operação *InBand* do RN é mais complexa, uma vez que o isolamento no domínio do tempo necessita de uma configuração mais sofisticada da interface  $U_n$ , interface com o UE. Em contraste, a operação *OutBand* do RN é mais simples, pois apenas requer o planeamento da frequência adequada. Normalmente a portadora destinada ao *backhaul* (ligação RN – eNB) é atribuída a frequência mais baixa, de modo ficar menos dependente da distância e

consequentemente da atenuação, podendo deste modo ser instaladas no limite de cobertura da macro célula. Assim, nenhuma funcionalidade adicional é necessária além da versão 8 do LTE, ou seja, a interface Un (ligação RN – eNB) comporta-se da mesma forma que a ligação Uu (ligação eNB ou RN com UE).

Destacam-se dois aspectos importantes, comuns aos dois modos de operação, *InBand* e *OutBand* [14]:

- Os repetidores suportam FDD e TDD para separar a transmissão descendente da transmissão ascendente.
- Agregação de portadoras, o agrupamento de mais de uma portadora no *backhaul* ou link de acesso, para ampliar os recursos de espectro, é suportado por ambos os modos de operação (*InBand* e *OutBand*).

### 2.5.3 Tipo 2

Estes repetidores, são responsáveis por auxiliar o UE dentro da área da cobertura da eNB, tem como objectivo melhorar a qualidade de serviço e a capacidade do canal, partilha a identificação da estação-base assim como as suas mensagens de controlo. A utilização deste tipo de repetidor permite obter uma melhoria global do sistema pela diversidade multipercurso e por ganhos de transmissão na estação móvel.

O repetidor do Tipo 2 é transparente ao UE, pois este não sabe que o está usar. O padrão 3GPP define para um repetidor do Tipo 2 as seguintes características:

- Não têm uma identificação própria pelo qual não criam novas células.
- São transparentes para equipamentos móveis LTE da versão 8 do padrão LTE.
- Podem transmitir *Physical Shared Channel* (PDSCH).
- Não transmitem RS (CRS) e *Physical Downlink Control CHannel* (PDCCH) que são específicos da célula (eNB).
- Não transmitem CRS e PDCCH os UE's servidas por este repetidor obtém as informações de controlo e sinalização do nível 1 e 2 do PDCCH da eNB.

Estes RNs só podem ser usados em cenários onde a recepção de PDCCH em link directo (eNB-UE) é possível, ou seja tem de haver ligação entre a eNB e o UE. Assim, estes repetidores não

podem ser usados para extensão de cobertura como os repetidores do Tipo 1, mas podem ser utilizados para aumentar a capacidade existente dentro da área de cobertura de uma eNB.

Uma vez que os repetidores Tipo 2 não tem a sua própria identificação, a sua funcionalidade básica é encaminhar informação para o UE. A estes repetidores são associados entre outros os seguintes esquemas de repetição de informação:

- Amplify-and-Forward (AF).
- Decod-and-Forward (DF).

*Amplify-and-Forward* (AF) – esta técnica de repetição amplifica o sinal rádio proveniente da eNB e repete-o para o UE. Da mesma forma, o sinal proveniente do UE é amplificado e retransmitido para a eNB. Esta esquema envolve apenas a camada física ou a camada 1 (*layer 1*) do protocolo de comunicação.

As vantagens resultantes da utilização deste tipo de RNs consistem na sua simplicidade, baixo custo e pouco atraso de processamento. As desvantagens residem no facto deste tipo de repetidor não distinguir o sinal do ruído ou interferência, amplificando e retransmitindo a interferência intercelular e o ruído ao mesmo tempo que amplificam o sinal recebido deteriorando a relação sinal interferência e potência de ruído (SINR) ao mesmo tempo que reduz o rendimento-melhoria do ganho.

*Decode-and-Forward* (DF) – nesta técnica os sinais são recebidos e decodificados pelo retransmissor, recodificados e enviados para o destino. Neste tipo de retransmissão o ruído e a interferência são descartados, obtendo uma melhoria na relação ao SINR, ao contrario do que acontece com a técnica AF, no entanto verifica-se algum atraso devido ao processamento inerente.

Do ponto de vista da operação os repetidores do Tipo 2 podem ser categorizados em repetidores não-cooperativos e cooperativos, Figura 2.16, sendo o foco principal nos repetidores cooperativos (por não transmitirem o seu próprio PDCCH e CRS).

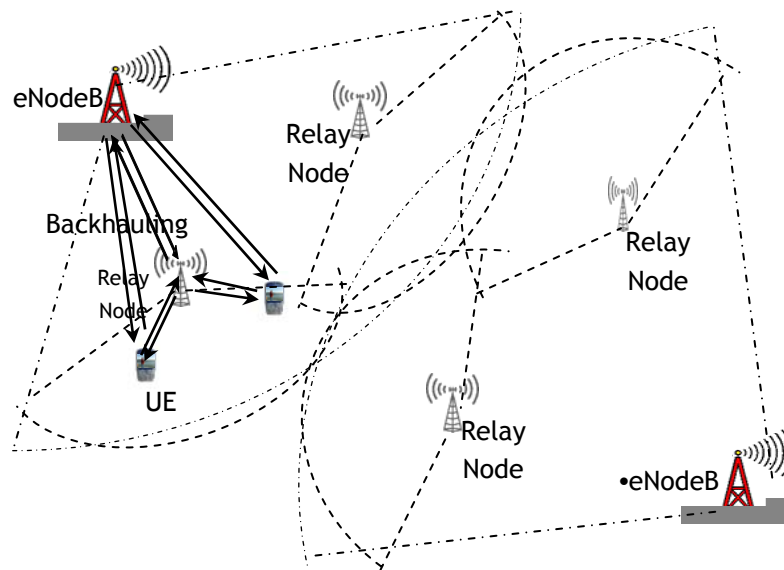


Figura 2.16 – Repetidores do Tipo 2 cooperativo (extraído de [14]).

O objectivo dos repetidores cooperativos é melhorar a eficiência do DL e do UL [14], ou seja, a melhoria da capacidade através da transmissão e recepção cooperativa entre o RN e a eNB. No esquema de cooperação, um repetidor Tipo 2 coordena a transmissão/ recepção com uma eNB com a finalidade de maximizar o desempenho no UL e DL. No entanto, para uma cooperação completa o UE deve receber sempre os canais de controle da eNB. Estes repetidores necessitam de ter uma área de cobertura em sobreposição com alguma parte da cobertura da eNB como mostrado na Figura 2.16. A eNB e o RN tem deste modo a transmissão e recepção cooperativa nas áreas de cobertura sobrepostas.

A principal diferença entre repetidores do Tipo 1 e do Tipo 2 reside na área de cobertura. Os repetidores do Tipo 1 têm a sua própria identificação (diferente da identificação de uma eNB), criando assim as suas próprias células. O UE necessita de fazer *handover* quando se move entre a área de cobertura de uma eNB e a área de cobertura de um RN Tipo 1 ou entre a área de cobertura de dois RNs Tipo 1. Por outro lado, a área de cobertura dos repetidores do Tipo 2 cooperativos é coincidente com a área de cobertura da eNB, pelo qual não são necessários procedimentos adicionais para um UE quando se move dentro da área de cobertura sobreposta.

Os repetidores do Tipo 2 cooperativos necessitam de coordenação com a eNB para detectar se um UE está numa área de cobertura sobreposta. É necessário uma maior coordenação na transmissão do UL e na recepção do DL para melhorar o desempenho na área sobreposta. Estes

repetidores necessitam ter na configuração do sistema, coordenação e sincronização com o eNB, operação e alocação de recursos para otimizar o desempenho do sistema.

São assumidos os seguintes esquemas base de repetidores Tipo 2 cooperativos [14]:

- *Decode-and-Forward* ou *Amplify-and-Forward*, com uma ou duas antenas no transmissor e no receptor do repetidor (RN);
- TDD por divisão no tempo da fase de transmissão e recepção no repetidor, ou seja, *half-duplex* (o repetidor transmite e recebe, mas não ao mesmo tempo);
- A cada UE é atribuído apenas um RN, além de uma eNB;
- O factor de reutilização de frequência é de um entre o RN e a eNB.

A função dos repetidores Tipo 2 não-cooperativos é de transmitir informações entre a eNB e o UE, sem uma transmissão ou recepção conjunta com qualquer uma das eNBs [14]. Este modo de operação também é chamado de repetição *two-hop*. Considera-se que o objectivo dos repetidores Tipo 2 não-cooperativos é fornecer extensão de cobertura implícita sem planeamento celular e suporte de *handover*. Para atingir este objectivo os repetidores do Tipo 2 terão de transmitir CRS da mesma eNB ao UE com os mesmos elementos de recurso (REs) com a mesma sequência de geração desde a partilha da identificação baseado nas características dos repetidores do Tipo 2 descritos antes. Entretanto, isso pode causar muitos problemas na ligação entre UE e eNB do ponto de vista da camada física, bem como da perspectiva da camada superior, uma vez que a estação-base não pode distinguir entre eNBs e RNs.

## 3 Cobertura e Capacidade

Esta parte da dissertação visa fornecer os métodos necessários para a realização de uma estimativa de cobertura e de capacidade de uma estação-base. O raio de cobertura e o débito binário proporcionado é relevante para estimar o número de RNs necessários à substituição da estação-base sem degradar os serviços fornecidos por ela.

### 3.1 Balanço de Potência

Para efectuar uma estimação de cobertura é necessário estabelecer uma relação entre as potências de emissão, de recepção e de perdas no percurso da transmissão/ recepção no sistema.

O balanço de potência, referido por *Link Budget*, serve essencialmente para o cálculo da cobertura. É através do *Link Budget* que é calculado a máxima atenuação no percurso, referido por *Path Loss* ( $P_L$ ), ou seja, as máximas perdas de potência que podem existir entre as antenas emisoras e as antenas receptoras. Neste documento é aplicada a expressão genérica (3.1) para a obtenção da máxima atenuação admissível. A expressão é utilizada para o DL e UL.

$$P_{L[\text{dB}]} = P_{TX[\text{dBm}]} + G_{TX[\text{dBi}]} - L_{TX[\text{dB}]} + G_{RX[\text{dBi}]} - L_{RX[\text{dB}]} - P_{RX[\text{dBm}]} \quad (3.1)$$

Onde  $P_L$  é a perda no percurso,  $P_{TX}$  e  $P_{RX}$  são as potências de emissão e recepção,  $G_{TX}$  e  $G_{RX}$  são os ganhos das antenas emissor e receptor,  $L_{TX}$  e  $L_{RX}$  são as perdas nos cabos e outras perdas no transmissor e receptor respectivamente.

Em LTE, a máxima atenuação é determinada pelo tipo de serviço sendo o raio de célula definido pelo serviço mais exigente.

Para estimar a cobertura máxima de uma célula, considera-se a mínima potência recebida,  $P_{RX}$ . Nesta dissertação iguala-se a potência recebida a potência de referência da sensibilidade ( $P_{REFSENS}$ ) que é a média mínima da potência recebida na antena em que há um SNR suficiente para que um esquema de modulação específico atinja um débito binário mínimo de 95% do máximo (medido com o transmissor na potência máxima), e pode ser obtido por (3.2) [15].

$$P_{REFSENS[\text{dBm/Hz}]} = kTB_{[\text{dBm/Hz}]} + NF_{[\text{dB}]} + SNR_{[\text{dB}]} + I_M_{[\text{dB}]} \quad (3.2)$$

A densidade térmica do ruído,  $kT$ , assume o valor de -174 [dBm/Hz] sendo  $k$  a constante de Boltzmann ( $1,380662 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$ ) e  $T$  a temperatura do receptor, assumido 15 °C (288.15 °Kelvin). O  $kTB$  representa o nível de ruído térmico numa largura de banda específica  $B$  definida por (3.3). Deste modo o  $kTB$  pode ser obtido por (3.4). Salienta-se que para largura de bandas inferiores a 5 [MHz] o  $P_{REFSENS}$  é calculado para todos os RBs da banda, e para larguras de banda superiores o  $P_{REFSENS}$  é calculado para um conjunto de 25 RBs [15].

$$B_{[\text{Hz}]} = N_{RB} \cdot L_{b_{RB}[\text{Hz}]} \quad (3.3)$$

Onde  $N_{RB}$  é o número de RBs e  $L_{b_{RB}}$  é a largura de banda de um RB ( $180 \times 10^3$  Hz)

$$kTB = -174_{[\text{dBm/Hz}]} + 10 \log B_{[\text{Hz}]} \quad (3.4)$$

Nesta dissertação é assumido 9 dB para a Figura de Ruído do UE. A  $I_M$ , é uma margem de implementação, é uma margem introduzida para diferenciar a exigência do SNR entre a teoria e a prática, assumido 2 dB [15].

## 3.2 Débito Binário

Nesta dissertação extrai-se das tabelas do 3GPP [16] o débito binário máximo no DL, que considera os cabeçalhos e a modulação usada para obter o tamanho do bloco de transporte (Tbs). A Tabela 3.1 é um extracto das tabelas do 3GPP [16], considerando que no DL a modulação QPSK transporta 2 bits por símbolo, 16QAM transporta 4 bits por símbolo e 64QAM 6 bits por

símbolo. A Tabela 3.1 refere-se ao débito binário máximo considerando que a configuração das antenas é SISO.

Tabela 3.1 – Débito binário máximo no DL [16].

<b>LTE - Débito Binário máximo no percurso descendente [Mbits/s]</b>						
<b>Modulação</b>	<b>Largura de Banda [MHz/RB]</b>					
	<b>1.4/6</b>	<b>3/15</b>	<b>5/25</b>	<b>10/50</b>	<b>15/75</b>	<b>20/100</b>
<b>QPSK</b>	0,94	2,34	4,01	7,99	11,80	15,80
<b>16 QAM</b>	1,80	4,58	7,74	15,26	22,90	30,50
<b>64 QAM</b>	4,39	11,06	18,34	36,70	55,00	75,30

As tabelas do 3GPP também são válidas para obter débito máximo no UL. No entanto o MIMO não foi considerado pela versão 8 do 3GPP, pelo qual no UL só é considerada uma antena de transmissão e a modulação 64QAM só é usada pelos equipamentos da categoria 5 referenciados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Categorias do UE [15].

	<b>Categorias do UE</b>				
	<b>Cat 1</b>	<b>Cat 2</b>	<b>Cat 3</b>	<b>Cat 4</b>	<b>Cat 5</b>
<b>Débito binário máximo no DL [Mbps]</b>	10	50	100	150	300
<b>Débito binário máximo no UL [Mbps]</b>	5	25	50	50	75
<b>Máximo número de bits recebidos numa TTI</b>	10296	51024	102048	149776	299552
<b>Máximo número de bits transmitidos numa TTI</b>	5160	25456	51024	51024	75376
<b>Largura de banda suportada [MHz]</b>	20				
<b>Modulações suportadas em DL</b>	QPSK - 16QAM - 64QAM				
<b>MIMO em DL</b>	Opcional	2x2			4x4
<b>Modulações suportadas no UL</b>	QPSK - 16QAM				64QAM

Nesta dissertação, o débito binário médio da célula é obtido pela distribuição proporcional dos seus RBs pela área correspondente a cada esquema de modulação. Depois de obtidos os RBs por área e por esquema de modulação recorre-se às tabelas do 3GPP que permitem transformar os RBs em débito binário considerando o esquema de modulação. A média será obtida considerando a soma dos débitos binários obtidos das tabelas por cada modulação.

### 3.3 Relação Sinal-Ruído

Os valores máximos do débito binário só podem ser obtidos em condições ideais ou mesmo perfeitas. O débito binário máximo teórico fornecido pode ser obtido a partir do teorema de Shannon. O teorema (3.5) fornece a capacidade ou o débito binário ( $D_{bin}$ ) máximo em função da largura de banda ( $B$ ) e da relação sinal-ruído ( $SNR$ ).

$$D_{bin[Mbps]} = B_{[MHz]} \cdot \log_2(1 + SNR) \quad (3.5)$$

Como é sabido o débito binário obtido pela equação de Shannon (3.5) não pode ser alcançado na prática, devido aos vários problemas de implementação. Para representar esses mecanismos de perda, é sugerido por [16] uma fórmula modificada de Shannon (3.6) que se aproxima do débito binário máximo do sistema LTE em condições de ruído branco (AWGN – *Additive White Gaussian Noise*).

$$D_{bin[Mbps]} = B_{eff} \cdot B_{[MHz]} \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{SNR}{SNR_{eff}} \right) \quad (3.6)$$

Onde, em condições de ruído branco (AWGN),  $B_{eff}$  é referente a eficiência da largura de banda do sistema LTE e assume o valor de 0.75 e o  $SNR_{eff}$  é referente a eficiência implementação do  $SNR$  e assume o valor de 1.25, traduzindo-se a equação modificada de Shannon. Esta aproximação não sendo perfeita é suficientemente próxima para os fins práticos desta dissertação.

Com o débito binário máximo fornecido pelas tabelas do 3GPP e com a equação de Shannon modificada podemos obter uma aproximação da relação sinal-ruído ( $SNR$ ) para uma determinada largura de banda e débito binário. O  $SNR$  da Tabela 3.3 foi obtido com a aplicação de (3.6).

Tabela 3.3 – Largura de Banda e SNR.

SNR [dB] por Largura de Banda						
Modulação	Largura de Banda [MHz]					
	1.4	3	5	10	15	20
<b>QPSK</b>	-5,77	-1,12	2,03	2,01	1,93	1,96
<b>16 QAM</b>	-2,53	2,91	6,88	6,76	6,77	6,77
<b>64 QAM</b>	2,63	10,37	17,22	17,23	17,24	17,69

Obtido o  $P_{REFSENS}$  com a utilização de (3.2), calcula-se a perda no percurso com (3.1) e recorrendo a um modelo de propagação (apresentado na secção seguinte) é possível obter o raio da célula.

### 3.4 Modelos de Propagação

Um modelo de propagação é uma formulação matemática para caracterizar a propagação da onda rádio em função da frequência, da distância e de outras condições que influenciam a propagação.

Os modelos de propagação são definidos para diferentes ambientes (urbanos, suburbanos, rurais, indoor, outdoor) e alguns deles impõem as suas condições (distâncias mínimas ou máximas, alturas da estação emissora mínimas ou máxima, etc) o que é um problema para seleccionar o mais adequado, aquele que melhor se adapta ao ambiente em apreciação.

Os repetidores definidos no LTE são elementos da rede relativamente novos, ainda não é claro qual o modelo de propagação mais adequado. Nesta dissertação são estudados 3 modelos de propagação, o modelo COST 231 HATA [18], o modelo COST 231 Wlfish Ikegami [18] e o modelo do 3GPP [17]. Estes modelos foram escolhidos pela sua popularidade, obtida pelos resultados confiáveis obtidos ao longo dos anos.

#### 3.4.1 COST 231 HATA

Este modelo [18] é um modelo estatístico geral baseado no modelo de Okumura e assume como parâmetros limite os apresentados na Tabela 3.4. Este modelo, também conhecido por COST 231 HATA, foi projectado para efectuar predições onde a superfície do terreno não é bem conhecida.

Tabela 3.4 – Parâmetros para o modelo de propagação COST 231 HATA.

Parametro	Descrição	Restrições	Unidades
$f$	Frequência	$150 \leq f \leq 2000$	MHz
$d$	Distância	$1 \leq d \leq 20$	km
$b_b$	Altura da estação emissora	$30 \leq b_b \leq 200$	m
$b_m$	Altura da estação receptora	$1 \leq b_m \leq 10$	m
$C$	Factor de correcção	0 ou 3	dB

O modelo não considera as características da envolvente e não é recomendado para situações onde a estação-base está abaixo da altura dos obstáculos predominantes. É apenas válido para distâncias superiores a 1 km, no entanto, é amplamente utilizado por muitos autores para distâncias inferiores confirmando a sua viabilidade.

O *Path loss* do modelo COST 231 HATA é definido por (3.7) onde o parâmetro  $a(h_r)$  e o factor  $C$ , dependentes do ambiente (urbano, suburbano ou rural), são definidos por (3.8) e (3.9).

$$P_L = 46.3 + 33,9 \log f - 13.82 \log h_b - a(h_r) + (44.9 - 6.55 \log h_b) \log h_b + C \quad (3.7)$$

$$a(h_r) = \begin{cases} (1.1 \log f - 0.7) \cdot h_m - (1.56 \log f - 0.8) & \text{para cidades pequenas ou suburbanas} \\ 3.2 \cdot (\log(11.75 \cdot h_m))^2 - 4.97 & \text{para cidades metropolitanas} \end{cases} \quad (3.8)$$

$$C = \begin{cases} 0 \text{ dB} & \text{para cidades pequenas ou suburbanas} \\ 3 \text{ dB} & \text{para cidades metropolitanas} \end{cases} \quad (3.9)$$

### 3.4.2 COST 231 Walfisch-Ikegami

O modelo de propagação COST 231 WI [18] é uma extensão do modelo COST 231 HATA e utiliza os parâmetros definidos na Tabela 3.5. É um modelo estatístico não determinístico, tal como o modelo COST 231 HATA, apenas usa valores característicos e não considera a topologia do terreno, não considera o multipercurso e é apenas confiável para terrenos homogêneos.

Tabela 3.5 – Parâmetros para o modelo de propagação COST 231 WI.

Parâmetro	Descrição	Restrições	Unidades
$f$	Frequência	$800 \leq f \leq 2000$	MHz
$d$	Distância	$0,02 \leq d \leq 2$	km
$h_b$	Altura da estação emissora	$4 \leq h_b \leq 50$	m
$h_m$	Altura da estação receptora	$1 \leq h_m \leq 3$	m
$h_{Roof}$	Altura dos edifícios		m
$w$	Largura da rua		m
$b$	Distância entre edifícios		m
$\varphi$	Orientação da rua em relação ao ângulo de incidência	$0 \leq \varphi \leq 90$	°

A Figura 3.1 permite visualizar os parâmetros definidos para modelo COST 231 WI e outros parâmetros definidos nesta secção.

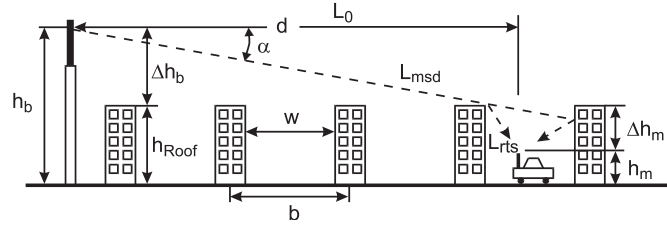


Figura 3.1 – Visualização dos parâmetros definidos no modelo COST 231 WI.

Este modelo faz a distinção quando o UE está entre linha-de-vista (LOS) e fora-da-linha-de-vista (NLOS). Quando a distância entre o emissor e o receptor é pequena o modelo considera que o receptor está em LOS e o *Path loss* é dado por (3.10).

$$P_{L[\text{dB}]} = 42,64 + 26 \log d_{[\text{km}]} + 20 \log f_{[\text{MHz}]} \quad \text{para } d > 0,02 \text{ km} \quad (3.10)$$

Quando a distância entre o emissor e o receptor aumenta o modelo considera que o receptor passa a estar em NLOS e o *Path loss* é fornecido por (3.11) que considera o *Path loss* em espaço livre (3.12), a difracção dos vários obstáculos ao longo do caminho da propagação (3.13) e a atenuação provocada pela difracção e dispersão da borda do ultimo obstáculo (antes do receptor) (3.14).

$$P_{L[\text{dB}]} = \begin{cases} L_{0[\text{dB}]} + L_{rts[\text{dB}]} + L_{msd[\text{dB}]} & ; L_{rts} + L_{msd} > 0 \\ L_{0[\text{dB}]} & ; L_{rts} + L_{msd} \leq 0 \end{cases} \quad (3.11)$$

Onde  $L_0$  é a atenuação em espaço livre dado por (3.12) e  $L_{rts}$  representa a difracção e dispersão causada pelo último obstáculo para o receptor definido por (3.13).  $L_{msd}$  representa a perda por difracção devido a “borda” dos múltiplos obstáculos e é definido por (3.14).

$$L_{0[\text{dB}]} = 32,45 + 20 \log d_{[\text{km}]} + 20 \log f_{[\text{MHz}]} \quad (3.12)$$

$$L_{rts[\text{dB}]} = -16,9 - 10 \log w_{[\text{m}]} + 10 \log f_{[\text{MHz}]} + 20 \log (h_{Roof[\text{m}]} - h_{m[\text{m}]}) + L_{ori} \quad (3.13)$$

$$L_{msd[\text{dB}]} = L_{bsh[\text{dB}]} + k_a + k_d \log d_{[\text{km}]} + k_f \log f_{[\text{MHz}]} - 9 \log b_{[\text{m}]} \quad (3.14)$$

O parâmetro  $L_{ori}$  de (3.13) é um factor de correcção que considera o ângulo formado pela orientação da rua relativamente a direcção da incidência (em graus) e é definida por (3.15). Os parâmetros  $L_{bsh}$ ,  $k_a$ ,  $k_d$ ,  $k_f$  de (3.14) são definidos por (3.16), (3.17), (3.18) e (3.19) e referem-se a dependência da *Path loss* (perda no percurso) do modelo relativamente a altura dos edifício ( $L_{bsh}$ ,  $k_a$ ), a distância ( $k_d$ ) e a frequência ( $k_f$ ).

$$L_{ori} = \begin{cases} -10 + 0.354 * \varphi & ; 0 < \varphi < 35 \\ 2.5 + 0,075(\varphi - 35) & ; 35 \leq \varphi < 55 \\ 4 - 0.114(\varphi - 55) & ; 55 \leq \varphi < 90 \end{cases} \quad (3.15)$$

$$L_{bsh[dB]} = \begin{cases} -18 \log \left( 1 + (h_{b[m]} - h_{Roof[m]}) \right) & ; h_b > h_{Roof} \\ 0 & ; h_b \leq h_{Roof} \end{cases} \quad (3.16)$$

$$k_a = \begin{cases} 54 & ; h_b > h_{Roof} \\ 54 - 0.8 (h_{b[m]} - h_{Roof[m]}) & ; d \geq 0.5 \text{ km e } h_b \leq h_{Roof} \\ 54 - 0.8 (h_{b[m]} - h_{Roof[m]}) \cdot 2d & ; d < 0.5 \text{ km e } h_b \leq h_{Roof} \end{cases} \quad (3.17)$$

$$k_d = \begin{cases} 18 & ; h_b > h_{Roof} \\ 18 - 15 \frac{(h_{b[m]} - h_{Roof[m]})}{h_{Roof[m]}} & ; h_b \leq h_{Roof} \end{cases} \quad (3.18)$$

$$k_f = \begin{cases} -4 + 0.7 \left( \frac{f_{[MHz]}}{925} - 1 \right) & \text{para cidades pequenas ou suburbanas} \\ -4 + 1.5 \left( \frac{f_{[MHz]}}{925} - 1 \right) & \text{para áreas metropolitanas} \end{cases} \quad (3.19)$$

Normalmente são realizadas estimativas assumindo que o receptor se encontra em LOS ou em NLOS, no entanto, estimativas mais precisas devem considerar a probabilidade de o receptor estar (efectivamente) em LOS (3.21). A união de (3.10) e (3.11) para o *Path loss* em LOS e NLOS respectivamente, considera a probabilidade para a LOS em função da distância ao receptor definida por (3.20). Salienta-se que  $d_{c0}$  é uma distância que define o ponto de rotura entre LOS e NLOS e foi definido como sendo 0,5 km em estudos e medições efectuados na cidade de Estocolmo.

$$prob(LOS) = \max \left( \frac{h_{b[m]} - h_{Roof[m]}}{h_{b[m]}} \cdot \frac{d_{c0[Km]} - d_{[Km]}}{d_{c0[Km]}}, 0 \right) ; d < d_{c0}, h_b > h_{Roof} \quad (3.20)$$

A equação final para o cálculo do *Path loss* para o modelo COST 231 Walfish Ikegami considerando a probabilidade de o receptor estar ou não em LOS, é fornecido por (3.21).

$$P_{L[\text{dB}]} = \text{prob}(\text{LOS}) \cdot P_{L\text{LOS}[\text{dB}]} + (1 - \text{prob}(\text{LOS})) \cdot P_{L\text{NLOS}[\text{dB}]} \quad (3.21)$$

### 3.4.3 3GPP

O modelo de propagação definido pelo 3GPP [19] define 2 ambientes denominados “CASE 1” e “CASE 3” referentes a ambientes urbanos e suburbanos/ rurais respectivamente. Este modelo diferencia a propagação entre a eNB e o UE, entre eNB e o RN e entre o RN e o UE. É muito restrito, pois foi especificado considerando os parâmetros definidos na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Parâmetros para o modelo de propagação 3GPP.

Parametro	Descrição	Restrições	Unidades
$f$	Frequência	2	GHz
$d$	Distância		km
$h_b$	Altura da estação emissora	32	m
$h_m$	Altura da estação receptora	1,5	m
$h_{\text{RN}}$	Altura do repetidor	5	m

Este modelo define o *Path loss* entre a eNB e o UE, quando o UE está em LOS por (3.22), e quando o UE está NLOS por (3.23).

$$P_{L\text{LOS}[\text{dB}]} = 103,4 + 24,2 \log d_{[\text{Km}]} \quad (3.22)$$

$$P_{L\text{NLOS}[\text{dB}]} = 131,1 + 42,8 \log d_{[\text{Km}]} \quad (3.23)$$

A probabilidade de o receptor estar em LOS em função da distância é fornecida por (3.24) e (3.25), consoante o ambiente em que se insere (urbano, suburbano ou rural).

$$\text{prob}(\text{LOS}) = \min\left(\frac{0,018}{d}, 1\right) \cdot \left(1 - e^{-\frac{d}{0,063}}\right) + e^{-\frac{d}{0,063}} \quad \text{“CASE 1” Urbano} \quad (3.24)$$

$$\text{prob}(\text{LOS}) = e^{-\frac{d-0,01}{0,2}} \quad \text{“CASE 3” Suburbano} \quad (3.25)$$

Onde é  $prob(LOS)$  probabilidade de estar em LOS.

Quando o receptor é um RN a altura da recepção aumenta permitindo a eNB aumentar o raio de cobertura. Neste caso, o *Path loss* entre a eNB e o RN é fornecido por (3.26) e (3.27), LOS e NLOS respectivamente.

$$P_{L_{LOS}_{[dB]}} = 100,7 + 23,5 \log d_{[Km]} \quad (3.26)$$

$$P_{L_{NLOS}_{[dB]}} = 125,2 + 36,3 \log d_{[Km]} \quad (3.27)$$

Como o receptor está mais alto a probabilidade de estar em LOS ou NLOS em função da distância também se altera. As alterações são evidenciadas por (3.28) e (3.29) referentes a ambientes urbanos e suburbanos/ rural respectivamente.

$$prob(LOS) = \min\left(\frac{0,018}{d}, 1\right) \cdot \left(1 - e^{-\frac{d}{0,072}}\right) + e^{-\frac{d}{0,072}} \quad \text{“CASE 1” Urbano} \quad (3.28)$$

$$prob(LOS) = e^{-\frac{d-0,01}{0,23}} \quad \text{“CASE 3” Suburbano} \quad (3.29)$$

O *Path loss* entre o RN e o UE é definido considerando que o RN opera na banda (*InBand*), ou seja, a banda usada para a interligação entre a eNB e o RN é a mesma banda utilizada para a interligação entre o RN e o UE. Neste caso o 3GPP define que o *Path loss* entre o RN e o UE é fornecido por (3.30) e (3.31), referentes a localização do UE, LOS ou NLOS respectivamente.

$$P_{L_{LOS}_{[dB]}} = 103,8 + 20,9 \log d_{[Km]} \quad (3.30)$$

$$P_{L_{NLOS}_{[dB]}} = 145,4 + 37,5 \log d_{[Km]} \quad (3.31)$$

Como se alteraram as condições de emissão a probabilidade de o UE estar LOS em função da distância também se altera e nestas circunstâncias a probabilidade de estar em LOS é fornecido por (3.32) e (3.33) caso o ambiente seja urbano ou suburbano/ rural respectivamente.

$$prob(LOS) = 0,5 - \min\left(0,5, 5 e^{-\frac{0,156}{d}}\right) + \min\left(0,5, 5 e^{-\frac{d}{0,03}}\right) \quad \text{“CASE 1” Urbano} \quad (3.32)$$

$$prob(LOS) = 0,5 - \min\left(0,5, 3 e^{-\frac{0,3}{d}}\right) + \min\left(0,5, 3 e^{-\frac{d}{0,095}}\right) \quad \text{“CASE 3” Suburbano} \quad (3.33)$$

### 3.5 Comparativo dos Modelos de Propagação

Com a finalidade de comparar os diferentes modelos de propagação usaram-se parâmetros iguais para todos os modelos e assim obter o gráfico comparativo da Figura 3.2 que evidencia as diferenças entre os modelos de propagação para uma transmissão eNB-UE considerando os parâmetros característicos de cada modelo e os elementos comuns facultados pelas tabelas 3.7, 3.8 e 3.9.

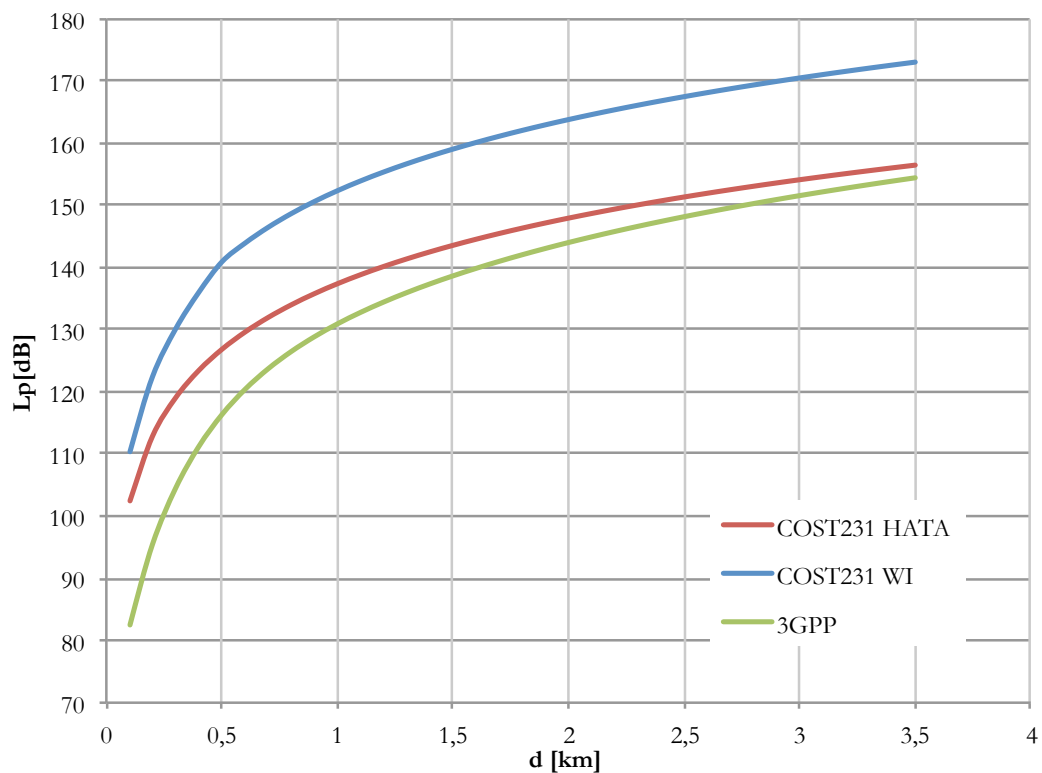


Figura 3.2 – Comparativo dos modelos de propagação.

Os parâmetros do sistema referidos na Tabela 3.7 caracterizam o ambiente onde se insere a comparação dos 3 modelos de propagação. Os parâmetros definidos na Tabela são diferentemente utilizados pelos modelos, apenas o modelo COST 231 WI utiliza todos os parâmetros.

Tabela 3.7 – Parâmetros do sistema.

Descrição	Ref.	Valor	Unidades
Frequencia	$f$	2000	MHz
Largura de Banda	$B$	10	MHz
Altura dos edificios	$h$	27	m
Distancia entre edificios	$b$	35	m
Largura da rua	$w$	17,5	m
Angulo	$\varphi$	90	°
Interface Marging	$IM$	2	dB

Tabela 3.8 – Parâmetros da eNB.

Descrição	Ref.	Valor	Unidades
Altura	$h_b$	32	m
Potencia de emissão	$P_{TX}$	46	dBm
Figura de Ruído	$NF$	5	dB
Ganho da antena	$G_{TX}$	9	dB
Perdas nos cabos	$L_{TX}/L_{RX}$	2	dB

Tabela 3.9 – Parâmetros do UE.

Descrição	Ref.	Valor	Unidades
Altura	$h_m$	1,5	m
Potencia de emissão	$P_{TX}$	23	dBm
Figura de Ruído	$NF$	9	dB
Ganho da antena	$G_{RX}$	0	dB

O modelo de propagação COST231 HATA é apenas valido para distancias superiores a 1 km, é no entanto utilizado por muitos autores para distancias inferiores confirmando a sua viabilidade.

O modelo de propagação COST 231 WI é o mais completo porque considera mais parâmetros que os outros. No entanto a estimativa é pouco fiável quando a estação emissora está ao mesmo nível ou abaixo da altura dos obstáculos.

Relativamente ao modelo de propagação definido pelo 3GPP, este modelo tem um comportamento próximo do modelo COST 231 HATA e foi definido com vista a utilização em LTE, sendo o mais optimista dos modelos apresentados.

### 3.6 Cobertura e Capacidade

Como verificado anteriormente a estimativa de cobertura depende da potência de emissão, do modelo de propagação utilizado e da sensibilidade do receptor. O raio de cobertura nesta dissertação obtém-se a partir do débito binário apresentado na Tabela 3.1 e com a formula alterada de Shannon obtém-se com (3.6) o SNR. Considera-se ainda que o RN é do tipo 1 comportando-se como uma estação-base em miniatura definida pelos parâmetros da Tabela 3.10.

Tabela 3.10 – Parâmetros do RN.

Descrição	Ref.	Valor	Unidades
Altura do Repetidor	$b_{RN}$	5	m
Potencia de emissão	$P_{TX}$	30	dBm
Figura de Ruído	$NF$	5	dB
Ganho das antenas	$G_{TX}/G_{RX}$	7	dBi

Sendo valores típicos os referentes a potência de emissão, figura de ruído e ganho das antenas, a altura do repetidor é 5 m por ser a altura média dos postes de iluminação publica, local onde se podem colocar os RN, diminuindo assim os custos de implementação.

Assim, com a equação do *Link Budget* (3.1) e com a aplicação das equações que definem o modelo de propagação COST 231 HATA obtém-se os elementos definidos nas tabelas 3.11, 3.12 e 3.13 que contêm o raio de cobertura e a área correspondente referente a transmissão eNB-UE, eNB-RN e RN-UE a partir do débito binário e do SNR que é comum aos 3 tipos de transmissão.

Tabela 3.11 – COST 231 HATA transmissão da eNB para o UE.

Transmissão eNB - UE (LB = 10 MHz)						
	[Mbps]	SNR [dB]	RefSens [dBm]	$L_p$ [dB]	Raio [km]	Area [km <sup>2</sup> ]
<b>QPSK</b>	7,99	2,01	-94,46	147,46	1,94	9,80
<b>16QAM</b>	15,26	6,76	-89,71	142,71	1,42	5,25
<b>64QAM</b>	36,69	17,23	-79,24	132,24	0,71	1,33

Tabela 3.12 – COST 231 HATA transmissão da eNB para o RN.

Transmissão eNB - RN (LB = 10 MHz)						
	[Mbps]	SNR [dB]	RefSens [dBm]	L <sub>p</sub> [dB]	Raio [km]	Area [km <sup>2</sup> ]
<b>QPSK</b>	7,99	2,01	-98,46	156,46	6,88	123,10
<b>16QAM</b>	15,26	6,76	-93,71	151,71	5,04	65,98
<b>64QAM</b>	36,69	17,23	-83,24	141,24	2,53	16,66

Tabela 3.13 – COST 231 HATA transmissão do RN para o UE.

Transmissão RN - UE (LB = 10 MHz)						
	[Mbps]	SNR [dB]	RefSens [dBm]	L <sub>p</sub> [dB]	Raio [km]	Area [km <sup>2</sup> ]
<b>QPSK</b>	7,99	2,01	-94,46	129,46	0,34	0,30
<b>16QAM</b>	15,26	6,76	-89,71	124,71	0,26	0,17
<b>64QAM</b>	36,69	17,23	-79,24	114,24	0,14	0,05

Usando as equações que definem o modelo de propagação COST 231 WI com a equação do *Link Budget*, obtêm-se os elementos definidos nas tabelas 3.14, 3.15 e 3.16 que incluem o raio de cobertura e a área correspondente, referente a transmissão eNB-UE, eNB-RN e RN-UE. Os resultados foram obtidos de forma semelhante aos resultados obtidos para o modelo de propagação COST 231 HATA.

Tabela 3.14 – COST 231 WI transmissão da eNB para o UE.

Transmissão eNB - UE (LB = 10 MHz)						
	[Mbps]	SNR [dB]	RefSens [dBm]	L <sub>p</sub> [dB]	Raio [km]	Area [km <sup>2</sup> ]
<b>QPSK</b>	7,99	2,01	-94,46	147,46	1,10	3,17
<b>16QAM</b>	15,26	6,76	-89,71	142,71	0,83	1,78
<b>64QAM</b>	36,69	17,23	-79,24	132,24	0,44	0,50

Tabela 3.15 – COST 231 WI transmissão da eNB para o RN.

Transmissão eNB - RN (LB = 10 MHz)						
	[Mbps]	SNR [dB]	RefSens [dBm]	L <sub>p</sub> [dB]	Raio [km]	Area [km <sup>2</sup> ]
<b>QPSK</b>	7,99	2,01	-98,46	156,46	2,06	11,01
<b>16QAM</b>	15,26	6,76	-93,71	151,71	1,54	6,20
<b>64QAM</b>	36,69	17,23	-83,24	141,24	0,82	1,74

Tabela 3.16 – COST 231 WI transmissão do RN para o UE.

Transmissão RN - UE (LB = 10 MHz)						
	[Mbps]	SNR [dB]	RefSens [dBm]	L <sub>p</sub> [dB]	Raio [km]	Area [km <sup>2</sup> ]
<b>QPSK</b>	7,99	2,01	-94,46	129,46	0,13	0,04
<b>16QAM</b>	15,26	6,76	-89,71	124,71	0,10	0,03
<b>64QAM</b>	36,69	17,23	-79,24	114,24	0,06	0,01

Igualmente, com o *Link Budget* e as equações referentes ao modelo de propagação 3GPP obtêm-se os elementos definidos nas tabelas 3.17, 3.18 e 3.19 que incluem o raio de cobertura e a área correspondente, referente a transmissão eNB-UE, eNB-RN e RN-UE respectivamente.

Tabela 3.17 – 3GPP transmissão da eNB para o UE.

Transmissão eNB - UE (LB = 10 MHz)						
	[Mbps]	SNR [dB]	RefSens [dBm]	LP [dB]	Raio [km]	Area [km <sup>2</sup> ]
<b>QPSK</b>	7,99	2,01	-94,46	147,46	2,40	14,94
<b>16QAM</b>	15,26	6,76	-89,71	142,71	1,86	8,96
<b>64QAM</b>	36,69	17,23	-79,24	132,24	1,06	2,90

Tabela 3.18 – 3GPP transmissão da eNB para o RN.

Transmissão eNB - RN (LB = 10 MHz)						
	[Mbps]	SNR [dB]	RefSens [dBm]	LP [dB]	Raio [km]	Area [km <sup>2</sup> ]
<b>QPSK</b>	7,99	2,01	-98,46	156,46	7,26	136,99
<b>16QAM</b>	15,26	6,76	-93,71	151,71	5,37	75,03
<b>64QAM</b>	36,69	17,23	-83,24	141,24	2,77	19,87

Tabela 3.19 – 3GPP transmissão do RN para o UE.

Transmissão RN - UE (LB = 10 MHz)						
	[Mbps]	SNR [dB]	RefSens [dBm]	LP [dB]	Raio [km]	Area [km <sup>2</sup> ]
<b>QPSK</b>	7,99	2,01	-94,46	129,46	0,38	0,37
<b>16QAM</b>	15,26	6,76	-89,71	124,71	0,28	0,20
<b>64QAM</b>	36,69	17,23	-79,24	114,24	0,15	0,06

Nas tabelas anteriores destaca-se o pequeno raio de cobertura fornecido pelo modelo de propagação COST 231 WI.

Verifica-se que o raio de cobertura na transmissão eNB-RN é 2 a 3 vezes maior, dependente do modelo de propagação, devido a altura de recepção do RN. Este facto permite aumentar a

cobertura de uma eNB com o auxílio de RNs do tipo 1, pois pode-se colocar o RN a distâncias que o UE já não comunica directamente com a eNB porque está fora de cobertura, no entanto, o RN continua sob a cobertura da eNB permitindo trocas de dados com débitos binários maiores devido a maior sensibilidade do RN e da eNB. A cobertura total será aproximadamente o equivalente ao raio de cobertura da transmissão eNB-UE mais o raio de cobertura da transmissão RN-UE. O raio de cobertura não pode ser o equivalente ao raio de transmissão eNB-UE mais o raio relativo a transmissão RN-UE porque o RN não tem potência suficiente para alcançar a eNB da mesma forma.

### 3.6.1 Transmissão eNB-UE

Considerando que os modelos de propagação se inserem num ambiente urbano e considerando os parâmetros em avaliação definidos nas tabelas 3.7, 3.8, 3.9 e 3.10, obtemos os resultados apresentados nas tabelas 3.20, 3.21 e 3.22. Estas, elucidam os resultados obtidos para cada modelo de propagação para as transmissões entre a eNB e o UE. Nas referidas tabelas verifica-se a área de cobertura correspondente a cada esquema de modulação em percentagem da área definida pela *InterSite Distance* (ISD).

Considerando que no estudo em curso a largura de banda é de 10 MHz, os RBs correspondentes (50 RBs) são distribuídos em função da área definida pelo esquema de modulação. O débito binário correspondente aos RBs é obtido das tabelas do 3GPP [16]. Salienta-se que um utilizador tem no mínimo 2 RB atribuídos.

Tabela 3.20 – COST 231 HATA débito binário médio da eNB por ISD.

COST 231 HATA												
ISD		Transmissão eNB-UE										
ISD [m]	Area [km <sup>2</sup> ]	64QAM			16QAM			QPSK			Debito binário médio [Mbps]	# eNB
		Area %	# RB	Debito binário [Mbps]	Area %	# RB	Debito binário [Mbps]	Area %	# RB	Debito binário [Mbps]		
500	0,22											
750	0,49	100	50	36,70	0	0	0				36,70	
1000	0,87											
1250	1,35	98	48	35,16	2	2	0,60	0	0	0	35,76	1
1500	1,95	68	34	25,46	32	16	4,97				30,42	
1732	2,60	51	26	19,08	49	24	7,22				26,30	

A Tabela 3.21 retracts a transmissão entre a eNB e o UE para o modelo de propagação COST 231 HATA. Nesta Tabela verifica-se que até a ISD de 1000 m a estimativa permite fornecer um débito binário médio igual ao máximo e para ISD superiores a 1000 m, o débito binário médio diminui com o aumento da ISD.

Tabela 3.21 – COST 231 WI débito binário médio da eNB por ISD.

<b>COST 231 Walfish Ikegami</b>												
<b>ISD</b>		<b>Transmissão eNB-UE</b>										
<b>ISD [m]</b>	<b>Área [km<sup>2</sup>]</b>	<b>64QAM</b>			<b>16QAM</b>			<b>QPSK</b>			<b>Debito binário médio [Mbps]</b>	<b># eNB</b>
		<b>Área %</b>	<b># RB</b>	<b>Debito binário [Mbps]</b>	<b>Área %</b>	<b># RB</b>	<b>Debito binário [Mbps]</b>	<b>Área %</b>	<b># RB</b>	<b>Debito binário [Mbps]</b>		
<b>500</b>	0,22											
<b>750</b>	0,49	100	50	36,70	0	0	0				36,70	
<b>1000</b>	0,87	58	28	20,62	42	22	6,71	0	0	0	27,33	1
<b>1250</b>	1,35	37	18	13,54	63	32	9,91				23,45	
<b>1500</b>	1,95	26	12	8,76	66			9	4	0,62	19,29	
<b>1732</b>	2,60	19	10	7,48	49	24	7,22	31	16	2,54	17,24	

Relativamente a transmissão entre a eNB e o UE para o modelo de propagação COST 231 WI (Tabela 3.21), verifica-se uma degradação das estimativas com o aumento da ISD. A degradação é devida a sensibilidade do modelo relativamente a altura da antena emissora e a altura dos obstáculos circundantes. Quando a altura dos obstáculos circundantes é superior a altura da antena emissora o modelo produz estimativas com um alto valor para a perda no percurso.

O modelo de propagação (3GPP) representado na Tabela 3.22 caracteriza-se por fornecer estimativas congruentes e espectáveis relativamente a perda no percurso. Podemos observar que uma eNB é suficiente não só para cobrir a área máxima definida pela ISD mas também porque permite fornecer o esquema de modulação mais exigente para todas as ISDs.

Tabela 3.22 – 3GPP débito binário médio da eNB por ISD

3GPP												
ISD		Transmissão eNB-UE										
ISD [m]	Area [km <sup>2</sup> ]	64QAM			16QAM			QPSK			Debito binário médio [Mbps]	# eNB
		Area %	# RB	Debito binário [Mbps]	Area %	# RB	Debito binário [Mbps]	Area %	# RB	Debito binário [Mbps]		
500	0,22											
750	0,49											
1000	0,87	100	50	36,70	0	0	0	0	0	0	36,70	1
1250	1,35											
1500	1,95											
1732	2,60											

Nas tabelas apresentadas nesta secção destaca-se que o número de eNBs necessário para cada ISD é uma em todos os modelos de propagação. No entanto, o débito binário médio diminui com o aumento da ISD, em particular no modelo COST 231 WI.

### 3.6.2 Transmissão RN-UE

Em relação a uma eNB, um RN é limitado pela sua potência e pela altura da antena emissora. As tabelas 3.23, 3.24, e 3.25 evidenciam as diferenças de capacidade e cobertura em relação a transmissão entre a eNB e o UE. As tabelas são idênticas as apresentadas na secção anterior relativas a transmissão eNB-UE.

As tabelas proporcionam por cada ISD a percentagem da área coberta por cada esquema de modulação, a quantidade de RB atribuídos a essa área, e o seu respectivo débito binário, obtido das tabelas do 3GPP [16], considerando que a largura de banda utilizada é de 10MHz.

Destaca-se na Tabela 3.23 a diferença entre o número de RNs necessários para substituir uma eNB em cobertura e em capacidade para área definida pela ISD. A quantidade de RN necessários é a suficiente para a garantir um débito binário médio semelhante ao da eNB substituída.

Tabela 3.23 – COST 231 HATA débito binário médio dos RN por ISD.

COST 231 HATA													
ISD		Transmissão RN-UE											
ISD [m]	Area [km <sup>2</sup> ]	64QAM			16QAM			QPSK			Debito binário médio [Mbps]	# RN Cobertura	# RN Capacidade
		Area %	# RB	Debito binário [Mbps]	Area %	# RB	Debito binário [Mbps]	Area %	# RB	Debito binário [Mbps]			
500	0,22	24	12	8,76	55	28	8,50	21	10	1,54	18,81	1	2
750	0,49	11	6	4,39	25	12	3,62	65	32	5,16	13,18	2	3
1000	0,87	6			14	6	1,80	80	40	6,20	9,48	3	4
1250	1,35	4	2	1,48	9	4	1,22	87	44	6,97	9,67	5	5
1500	1,95	3			6			91	46	7,22	9,93	7	7
1732	2,60	2	0	0	5	2	0,60	93			7,82	9	9

Salienta-se que o débito binário médio fornecido pelos RNs relativos à capacidade, é superior ao binário médio fornecido pela eNB, permitindo deste modo aumentar o débito binário médio. Por exemplo, na ISD de 500m temos 2 RN x 18,81 MHz = 37,62MHz, superior aos 36,70 MHz fornecidos no máximo por uma eNB.

Tabela 3.24 – COST 231 WI débito binário médio dos RN por ISD.

COST 231 Walfish Ikegami													
ISD		Transmissão RN-UE											
ISD [m]	Area [km <sup>2</sup> ]	64QAM			16QAM			QPSK			Debito binário médio [Mbps]	# RN Cobertura	# RN Capacidade
		Area %	# RB	Debito binário [Mbps]	Area %	# RB	Debito binário [Mbps]	Area %	# RB	Debito binário [Mbps]			
500	0,22	5	2	1,48	8	4	1,22	87	44	6,97	9,67	5	5
750	0,49	2			4	2	0,60	94			9,56	12	12
1000	0,87	1			2			97	48	7,48	8,08	20	20
1250	1,35	1	0	0	1			98			7,48	31	31
1500	1,95	1			1	0	0	99	50	7,99	7,99	45	45
1732	2,60	0			1			99				59	59

Para o modelo de propagação COST 231 WI, constata-se na Tabela 3.24 que o modelo não se aplica a transmissões onde o emissor está abaixo dos obstáculos envolventes. Verifica-se que o modelo não é confiável para os parâmetros de sistema em avaliação, pois os valores da Tabela 3.24 afastam-se muito dos valores obtidos para os outros 2 modelos de propagação em avaliação.

Os resultados obtidas na Tabela 3.25 são semelhantes/ próximos aos resultados obtidos na Tabela 3.23. As estimativas fornecidas por este modelo de propagação são ligeiramente mais

optimistas que as estimativas fornecidas pelo modelo de propagação COST 231 HATA. Verificamos nas tabelas 3.23 e 3.25 que o desempenho da rede usando o modelo 3GPP é mais eficiente, pois tem um débito binário médio superior e para ISD maiores de 1000 m necessita de menos RNs.

Tabela 3.25 – 3GPP, débito binário médio dos RN por ISD.

3GPP													
ISD		Transmissão RN-UE											
ISD [m]	Area [km <sup>2</sup> ]	64QAM			16QAM			QPSK			Debito binário médio [Mbps]	# RN Cobertura	# RN Capacidade
		Area %	# RB	Debito binário [Mbps]	Area %	# RB	Debito binário [Mbps]	Area %	# RB	Debito binário [Mbps]			
500	0,22	26	14	10,30	68	34	10,30	5	2	0,30	20,89	1	2
750	0,49	12	6	4,39	30	16	4,97	58	28	4,39	13,75	2	3
1000	0,87	7	4	2,98	17	8	2,47	76	38	5,99	11,45	3	4
1250	1,35	4	2	1,48	11	6	1,80	85	42	6,71	9,99	4	
1500	1,95	3	2	1,48	8	4	1,22	89	44	6,97	9,67	6	6
1732	2,60	2	2	1,48	6	2	0,60	92	46	7,22	9,30	8	8

### 3.7 Conclusões

Neste capítulo, após a apresentação dos métodos de cálculo necessários, concluiu-se que a quantidade de eNBs necessárias para efectuar a cobertura das áreas definidas pelas ISD apresentadas é 1 eNB. Embora seja apenas necessário uma eNB para todas as ISDs o débito binário médio baixa com o aumento da ISD. Esta evidencia é particularmente acentuada no cálculo efectuado para o modelo de propagação COST 231 WI, onde o débito binário decresce mais rapidamente com o aumento da ISD, quando comparado com os outros modelos de propagação.

Obteve-se ainda a quantidade de RNs necessários (entre 2 e 9) para substituir uma eNB em cobertura e capacidade para todas as ISDs e modelos de propagação. Nesta avaliação verificou-se a proximidade nas estimativas dos modelos de propagação COST 231 HATA e 3GPP. O modelo de propagação COST 231 WI providenciou uma estimativa com um elevado número de RN resultante do facto de este modelo não ser fidedigno para estimativas cuja antena de transmissão está abaixo dos obstáculos circundantes.

## 4 Cenários e Resultados

Este capítulo visa demonstrar o ganho obtido no consumo energético resultante da substituição de uma eNB por um determinado número de RNs (tipo 1). Presume-se que a eNB substituída esta rodeada por outras eNB iguais, sendo o número de RNs calculado em função das necessidades de cobertura e de capacidade definidas pela eNB substituída.

Com a finalidade de aferir os resultados, a cobertura e a capacidade da eNB substituída será definida para diferentes *Inter Site Distance* (ISD) e para os diferentes modelos de propagação apresentados no Capítulo 3.

### 4.1 Cenários de Referência

Nesta dissertação estão definidos 2 cenários referidos por “cenário de referência” e “cenário alternativo” cuja disposição é definida pelas Figuras 4.1 a) e 4.1 b) respectivamente.

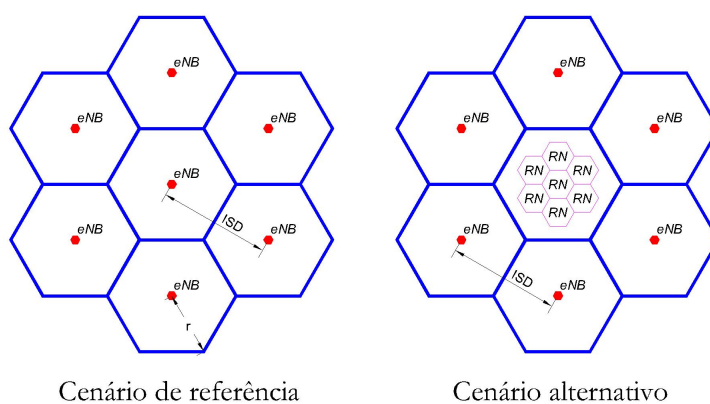


Figura 4.1 – Estrutura celular em estudo.

O cenário de referência consiste num agrupamento ideal de 7 células hexagonais equidistantes cuja distância entre elas é definida pela *Inter Site Distance* (ISD). Para avaliar o cenário relativamente a cobertura e a capacidade faz-se variar a ISD e aplicam-se os modelos de propagação definidos no Capítulo 3. A aplicação dos modelos de propagação fornecerá um cenário de referência por cada um dos modelos.

O cenário alternativo é um cenário no qual se substitui a célula central do cenário de referência por um determinado número de RNs. A quantidade de RNs será definido pela ISD, pelo modelo de propagação aplicado e pelas particularidades de cobertura e capacidade da célula central substituída. O numero de RN deverá ser suficiente para no mínimo garantir a mesma cobertura e QoS da eNB substituída.

Os cenários de referência e alternativo distinguem-se pelo agrupamento central. No cenário de referência a célula central é igual as células circundantes e no cenário alternativo a célula central é substituída por um determinado número de RNs do tipo 1, quantificado essencialmente pelas características da célula central substituída.

Considera-se que ambos os cenários estão inseridos num ambiente urbano e são caracterizados pelos parâmetros do sistema utilizados nesta dissertação definidos na Tabela 3.7. A definição dos cenários considera ainda os parâmetros definidos nas tabelas 3.8, 3.9 e 3.10 referentes a características da eNB, do UE e do RN respectivamente.

### 4.2 Energia no Sistema

O projecto EARTH [20] define o consumo de uma estação-base em função da sua carga (4.1), e faculta a Tabela 4.1 que proporciona os elementos necessários a (4.1) para diferentes tipos de estações-base. A equação (4.1) e a Tabela 4.1 são em conjunto o modelo energético que permite calcular o consumo individual de cada estação-base, em função da carga, e assim obter a energia no sistema em apreciação.

$$P_{in[W]} = P_{0[W]} + \Delta_P \cdot P_{out[W]}, \quad 0 \leq P_{out} \leq P_{max} \quad (4.1)$$

Onde,  $P_{in}$  é a potência/ energia consumida pela estação-base,  $P_{out}$  a potência de emissão da estação-base e  $P_{max}$  é a potência de emissão máxima com a máxima carga e  $P_0$  é a mínima potência consumida para a mínima potência emitida. Salienta-se que nesta dissertação, e de acordo com projecto EARTH [20] a mínima potência consumida é 1% da potência máxima para uma carga de 0%.

Tabela 4.1 – Parâmetros para o modelo energético (adaptado de [20]).

Tipo de estação-base	$P_{max}$ [W]	$P_0$ [W]	$\Delta p$
<b>Macro</b>	40,00	712,00	14,50
<b>Micro</b>	6,30	106,00	6,35
<b>Repetidor</b>	1,00	60,45	7,38
<b>Pico</b>	0,25	14,90	8,40
<b>Femto</b>	0,10	10,10	15,00

O consumo energético dos RNs ainda não foi alvo de estudo detalhado para obtenção de um modelo. Isto deve-se em grande parte ao proteccionismo dos fabricantes em fornecer os dados relativos ao consumo dos repetidores, pois trata-se de um factor de estratégia económica. Assim, os parâmetros  $P_{in}$  e  $\Delta p$  necessários a equação 4.1 são definidos por interpolação entre os dois tipos de estação-base que mais se aproximam, por excesso estações-base micro e por defeito estações-base pico, considerando ainda que o RN é do tipo 1 tendo uma potência de emissão máxima de 1W, Tabela 4.1.

Usando a equação (4.1) é possível calcular a potência máxima consumida por uma estação-base tipo macro, 1292 W, e a potência máxima consumida por um repetidor, 67.83 W. Estes resultados permitem verificar que o consumo de um RN é aproximadamente 19 vezes inferior ao consumo de uma estação-base tipo macro. Sendo assim promissor que os repetidores terão um lugar no aumento da eficiência energética das redes LTE.

Como exemplo obtido de [22], a relação de custo entre uma estação-base do tipo macro e um RN é de 9, considerando que a potência de emissão da estação-base é 20 W e a potência de emissão do RN é 5 W [22]. Verifica-se assim que a utilização de RNs não deve ser considerada apenas pelo seu consumo energético, mas também pelo custo relacionado com a sua instalação (CAPEX) e exploração (OPEX).

Nesta dissertação a relação de potências máximas entre a estação-base e o RN é de 19, pelo qual e a relação de custo entre a estação-base e o RN será superior a 9 mas não proporcional, pois a relação além do consumo energético deve considerar os custos relacionados com a instalação e exploração.

### 4.3 Métricas Adoptadas

Para efectuar uma análise sob a perspectiva do consumo energético são definidos duas métricas:

- Potencia por unidade de área, medido em  $[W/km^2]$ ;
- Potencia por bit, medido em  $[W/Mbps]$ ;

A potência por área é a potencia usada por uma estação-base, dividida pela área de cobertura da mesma. Esta métrica está intimamente relacionada com as emissões de  $CO_2$ . Esta medida é relevante para avaliar cenários onde a carga de tráfego é baixa.

A potência por bit corresponde a potência necessária para transmitir uma determinada quantidade de bits. É uma medida de eficiência energética, especialmente quando a medida esta a ser efetuada em cenários onde a carga de tráfego é alta.

#### 4.3.1 Potencia por Área e Potência por Bit Relativa a eNB

Os modelos de propagação pelos seus atributos condicionam a estimativa de cobertura proporcionando diferentes consumos energéticos em relação à distância de cobertura. Na Figura 4.2 é apresentado uma projecção da evolução da potência por área  $[W/km^2]$  e da potência por bit  $[W/Mbps]$  referente ao modelo de propagação COST 231 HATA aplicado a eNB.

A projecção da evolução da potência por área  $[W/km^2]$  descreve que o aumento da ISD acomoda uma distribuição da mesma potência por uma área maior, logo diminui a potência por área. Este facto deve-se a estimativa deste modelo de propagação, que com uma única eNB satisfaz em cobertura todas as áreas referentes as ISD em avaliação.

Relativamente a potência por bit  $[W/Mbps]$  representada na Figura 4.2, permanece constante até aproximadamente 1250 m, porque a estimativa do modelo de propagação permite providenciar o esquema de modulação 64QAM (débito binário máximo) até a distância de 1250 m como

mostrado na Tabela 3.21. Depois de 1250 m o débito binário é menor e dividido por uma área crescente.

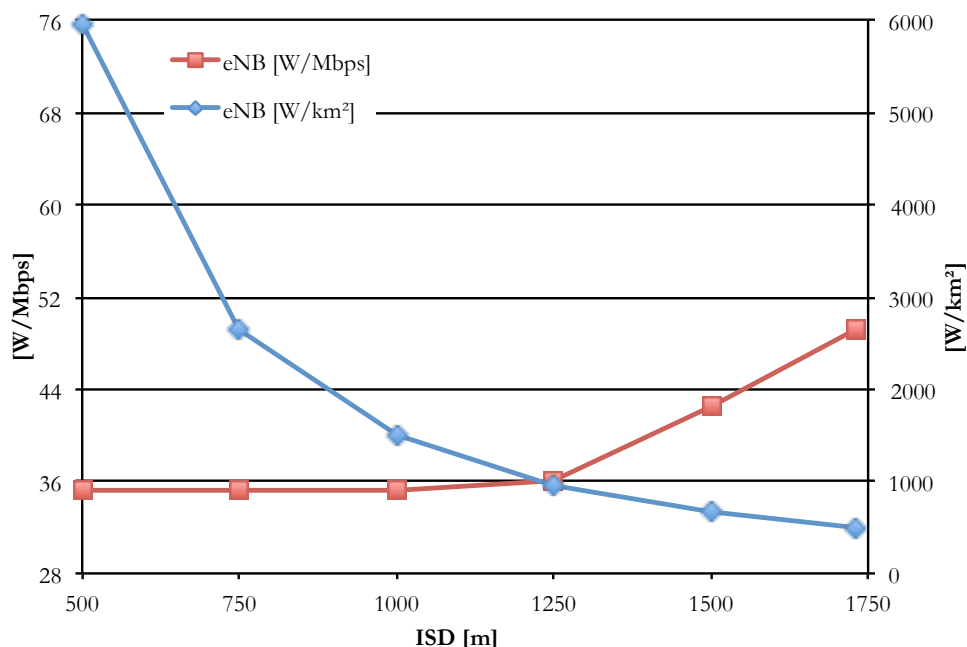


Figura 4.2 – COST 231 HATA potência na eNB.

A evolução da potência por área [W/km<sup>2</sup>] representada na Figura 4.3 descreve a distribuição da mesma potência por uma área que aumenta com a ISD para o modelo COST 231 WI. A curva que descreve evolução da potência por área [W/km<sup>2</sup>] é igual a curva da potência por área da Figura 4.2. Esta igualdade acontece porque ambos os modelos de propagação estimam que só é necessária uma eNB para todas as ISDs, como comprovado na Tabela 3.21 relativa a transmissão eNB-UE para o modelo de propagação COST 231 WI.

A evolução da potência por bit [W/Mbps] na Figura 4.3, reflecte as características do modelo de propagação COST 231 WI. Verifica-se que este modelo de propagação depois da ISD de 750 m tem um aumento da potência por bit acentuado devido ao débito binário médio que diminui acentuadamente para as ISDs superiores a 750 m, como referenciado na Tabela 3.21.

As estimativas de cobertura para o modelo de propagação COST 231 WI são mais pessimistas em relação as estimativas fornecidas pelos outros modelos utilizados nesta dissertação.

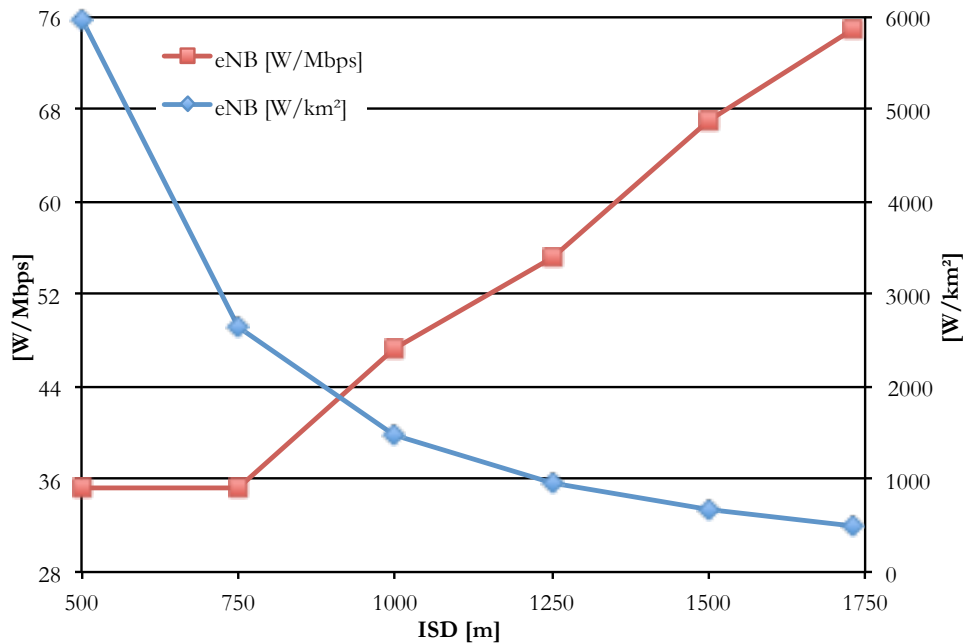


Figura 4.3 – COST 231 WI potência na eNB.

A evolução da potência por área  $[W/km^2]$  representada na Figura 4.4, reflecte a distribuição da mesma potência por uma área que aumenta com a ISD para o modelo de propagação 3GPP, pelo qual a potência por área diminui com o aumento da ISD. Esta evolução é igual a curva da energia por área das Figuras 4.2 e 4.3 porque os modelos de propagação utilizados prevêem que só é necessária uma eNB para todas as ISDs verificadas.

Relativamente a evolução da potência por bit  $[W/Mbps]$  na Figura 4.4, ela é constante devido as características do modelo de propagação cuja estimaco de capacidade permite fornecer o débito binário máximo para todas áreas correspondentes as ISDs em analise com uma nica eNB, Tabela 3.22.

As Figuras 4.2, 4.3 e 4.4, ilustram a potência por bit e a potência por área em funo da ISD relativamente a uma eNB para os modelos de propagao apresentados no Capitulo 3. Neles se verifica que a potência por área  igual em todos os modelos de propagao, devido ao facto de ser apenas necessário uma eNB para todas as ISDs, ou seja, uma eNB  suficiente para cobrir as áreas definidas pela ISDs.

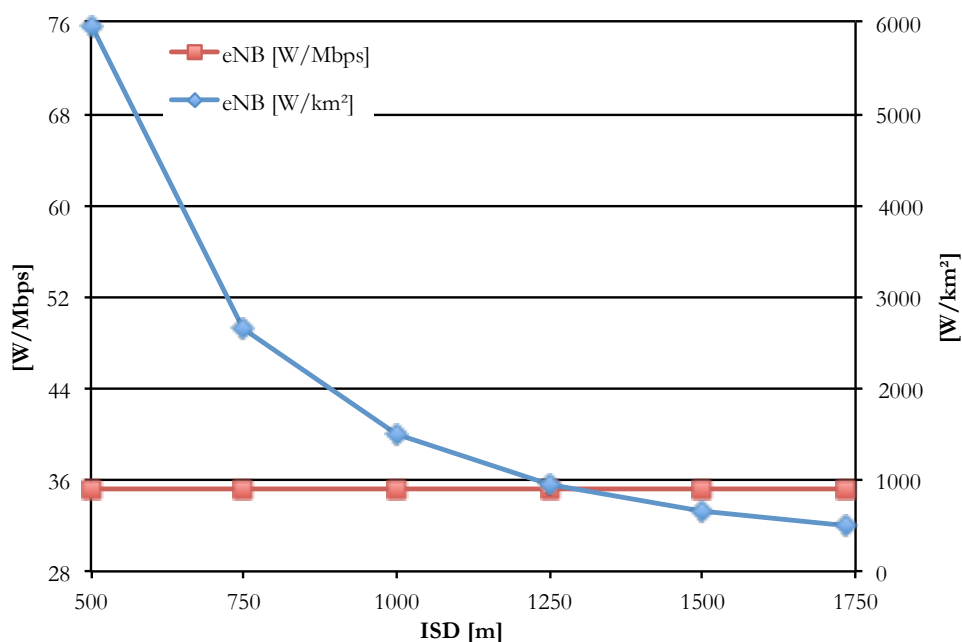


Figura 4.4 – 3GPP potência na eNB.

Relativamente potência por bit [W/Mbps] o comportamento é condicionado pelas características do modelo de propagação, pois embora seja apenas necessário uma eNB para qualquer ISD, a potência é distribuída de maneira diferente com a distância, obtemos assim diferentes débitos binários com o aumento da eNB.

### 4.3.2 Potencia por Área e Potência por Bit Relativa aos RNs

As Tabelas 3.23, 3.24 e 3.25 forneceram a quantidade de RNs do tipo 1 necessários para substituir uma eNB cuja área de cobertura é definida pela ISD. O débito binário é obtido pela multiplicação do número de RNs necessários pelo débito binário médio de um único RN, para cada ISD. A energia consumida é relativa ao número de RNs necessários à substituição de uma eNB mantendo um débito binário suficientemente próximo do anteriormente fornecido pela eNB, para não comprometer a QoS que existia anteriormente.

A Figura 4.5 representa a Potencia por área [W/km<sup>2</sup>] relativa a transmissão RN-UE para o modelo de propagação COST 231 HATA. À semelhança do que aconteceu com a eNB, Figura 4.2, com o aumento da ISD, conseqüentemente a área, diminui a potência por área [W/km<sup>2</sup>]. No

entanto a evolução não é tão acentuada porque com o aumento da ISD também aumenta o número de repetidores (Tabela 3.23) necessários para substituir a eNB em cobertura e capacidade.

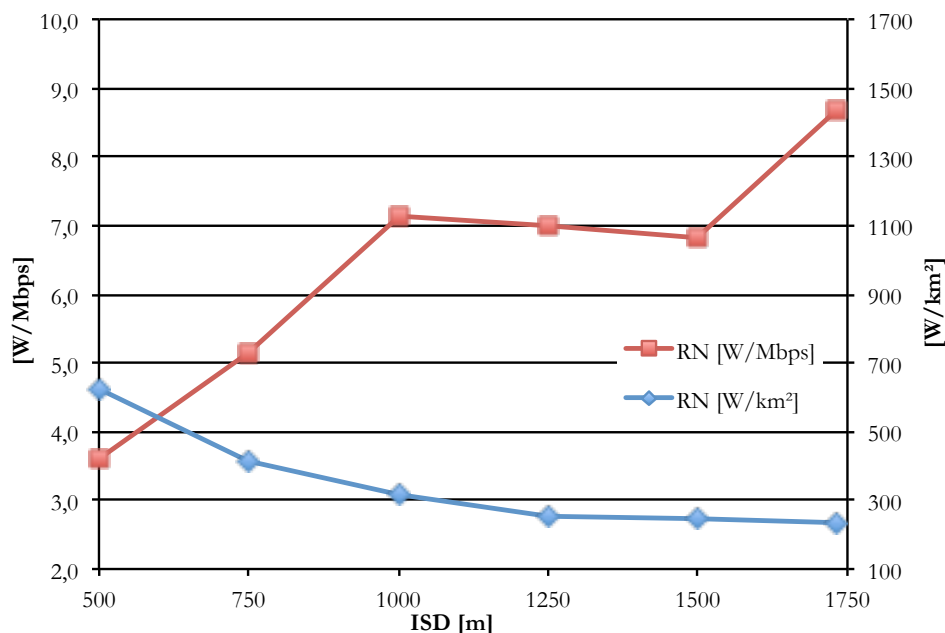


Figura 4.5 – COST 231 HATA potência relativa aos RNs.

Relativamente a potência por bit [W/Mbps] existe um inflexão nos 1000 m de ISD devido ao número de RNs estimado para essa ISD, estes fornecem um débito binário médio superior ao fornecido pela eNB substituída, Tabela 3.23, mantendo um consumo energético reduzido. O débito binário fornecido pelos RNs aumenta mais rapidamente que área relativa a ISD até aos 1500 m.

O número de RNs obtido é relativo a cobertura e/ ou capacidade e considera-se o número necessário para satisfazer as duas condições (capacidade e cobertura), mesmo que uma delas fique sobre dimensionada.

Relativamente à curva da potência por bit [W/Mbps] observada na Figura 4.6, esta reflecte o elevado número de RNs necessário para substituir a eNB central que consequentemente representa valores elevados para a energia por bit.

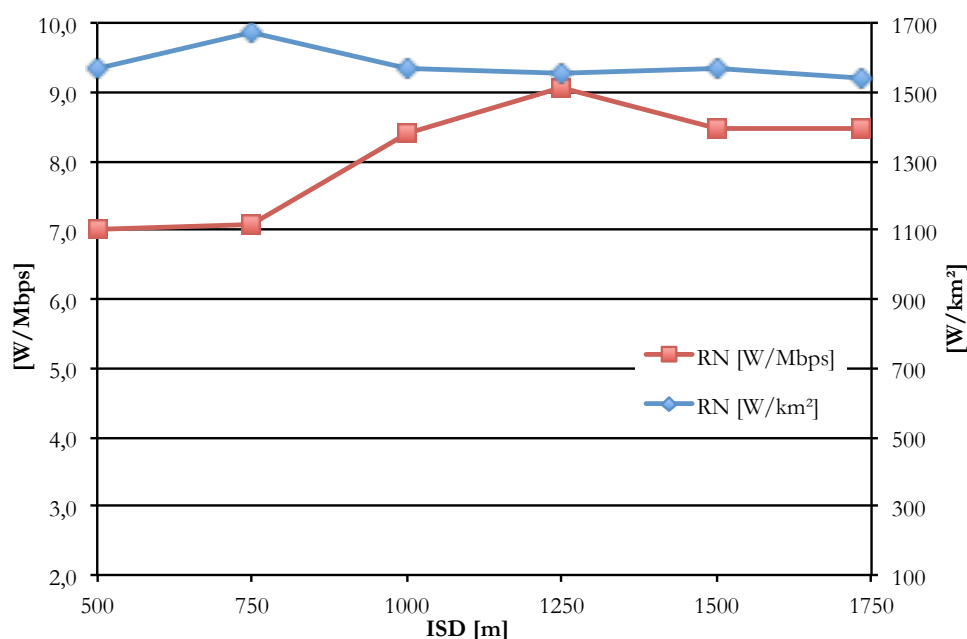


Figura 4.6 – COST 231 WI potência relativa aos RNs.

O gráfico da Figura 4.6 reflecte os dados da Tabela 3.24 onde se verifica o elevado número de RN necessários para substituir uma eNB qualquer que seja a ISD, isto resulta do facto de este modelo de propagação ser muito sensível a altura da estação-base em relação aos obstáculos circundantes. Salienta-se que o RN se encontra a 5 m de altura e os obstáculos circundantes a 27 m de altura, Tabelas 3.7 e 3.10.

Na Figura 4.6 verifica-se uma elevada potência por área [ $\text{W}/\text{km}^2$ ] relativa as estimativas fornecidas nas Figuras 4.5 e 4.7. Como referido o modelo de propagação estima um elevado número de RNs para substituir um eNB qualquer que seja a ISD.

Na Figura 4.7 verificamos que a potência por área [ $\text{W}/\text{km}^2$ ] diminui com o aumento da ISD. Esta diminuição é superior aquela verificada para o modelo COST 231 HATA porque necessita de menos RNs nas ISD maiores, Tabelas 3.23 e 3.25, logo tem uma potência por área [ $\text{W}/\text{km}^2$ ] inferior para as ISD superiores a 1000 m e igual para ISD inferiores a 1000 m.

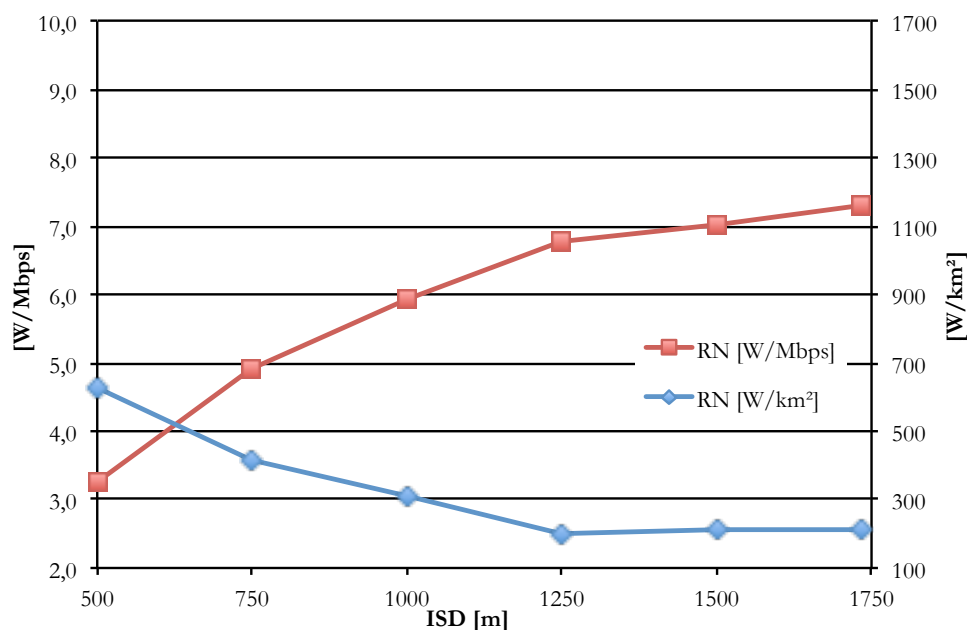


Figura 4.7 – 3GPP potência relativa aos RNs

O desenvolvimento da potência por bit [W/Mbps] no gráfico da Figura 4.7 é análogo ao do gráfico da Figura 4.5 demonstrando as semelhanças entre os 2 modelos de propagação. Neste modelo (3GPP) a evolução da potência por bit é mais suavizada devido ao número de RNs por ISD que são em menor número, Tabela 3.25.

Esta secção permitiu verificar as similitudes entre o modelo de propagação COST 231 HATA e 3GPP e a discrepância do modelo COST 231 WI. Verificou-se que o modelo COST 231 WI para as transmissões RN-UE diverge mais, pois fornece resultados muito afastados dos resultados obtidos para os outros modelos de propagação considerados.

#### 4.4 Consumo Energético

A carga na estação-base é um factor preponderante no sistema. O aumento da carga influencia directamente o consumo energético e condiciona a cobertura e a capacidade do sistema.

Na Figura 4.8 é ilustrado o consumo do sistema em repouso, caracterizado por representar 1 % da carga máxima, para o cenário de referência e para o cenário alternativo. A projecção

“Consumo Sem RNs” é relativa ao cenário de referência e aparece inalterável para todas as ISD. Esta projecção representa o facto de apenas ser necessário uma eNB para qualquer ISD. As restantes projecções do consumo de energia referem-se aos cenários alternativos, um por cada modelo de propagação.

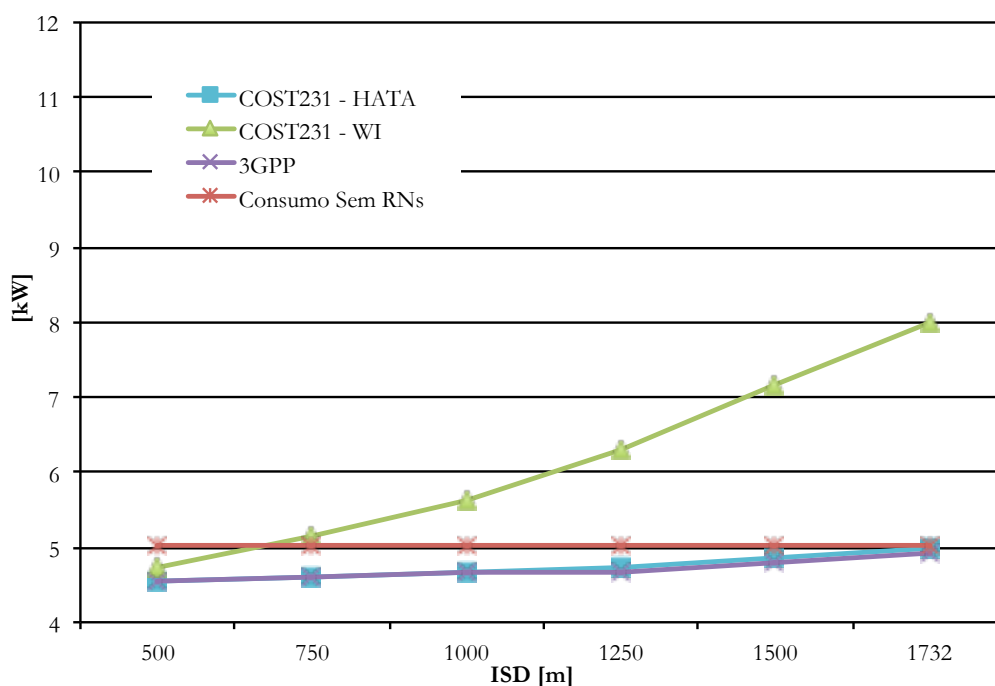


Figura 4.8 – Carga de 1% nos cenários de referência e alternativo.

Na Figura 4.8 destaca-se a projecção do consumo do cenário alternativo referente ao modelo de propagação COST 231 WI, pela evolução abrupta em relação as outras projecções, com o aumento da ISD. Esta evolução deve-se as características do modelo de propagação que penalizam a estimativa de cobertura quando a relação entre a altura dos obstáculos envolventes e a altura da estação-base é elevada.

Observa-se na Figura 4.8 que os consumos relativos aos cenários alternativos referentes aos modelos de propagação COST 231 HATA e 3GPP são inferiores em relação ao cenário de referência, no entanto, a partir da ISD de 1250 m o consumo dos cenários alternativos aproxima-se do consumo do cenário de referência, devido ao aumento do número de RNs que é mais acentuado a partir da ISD de 1250 m.

A Figura 4.9 apresenta o consumo energético relativo a uma de carga de 10% no sistema para os cenários em avaliação. É visível um aumento no consumo de energia proporcional a carga e á semelhança da Figura 4.8, verifica-se que com o aumento da ISD a energia consumida pelos cenários alternativos (excepto para COST 231 WI) se aproxima da energia consumida pelo cenário de referência com realce depois dos 1250 m de ISD. No entanto é visível um ligeiro afastamento no consumo das projecções referentes aos modelos de propagação COST 231 HATA e 3GPP em relação ao cenário de referência, projecção “Consumo Sem RNs.

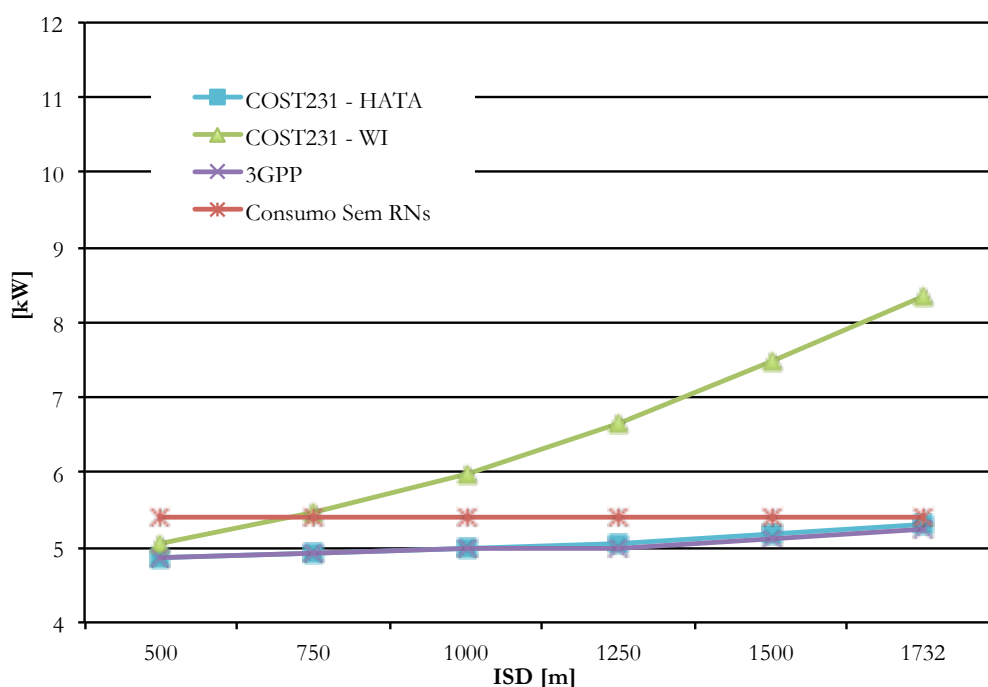


Figura 4.9 – Carga de 10% nos cenários de referência e alternativo.

A Figura 4.9 evidencia a inexequibilidade de considerar ou aplicar o modelo COST 231 WI como cenário alternativo pois a projecção afasta-se demasiado das suas congéneres.

Na Figura 4.10 observa-se o consumo energético do sistema para os cenários em avaliação com uma carga de 25%. As projecções traduzem o aumento do consumo de energia proporcional á carga, continua a verificar-se o mau desempenho relativo a estimativa providenciada pelo modelo COST 231 WI. É ainda observável um aumento no afastamento dos consumos dos cenários alternativos ( COST 231 HATA e 3GPP) em relação ao cenário de referência. Este afastamento aumentou em relação ao caso de 10%.

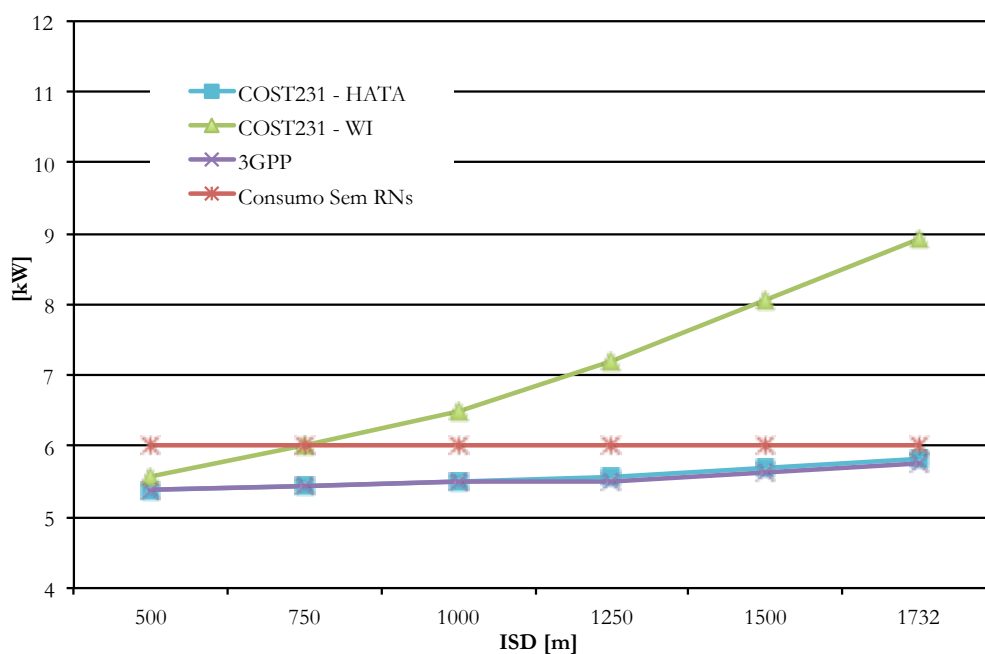


Figura 4.10 – Carga de 25% nos cenários de referência e alternativo.

A Figura 4.11, apresenta o sistema com uma carga de 50%. Nela é observável o aumento do consumo proporcional a carga para todos os cenários e também o afastamento do consumo dos cenários alternativos em relação ao cenário de referência.

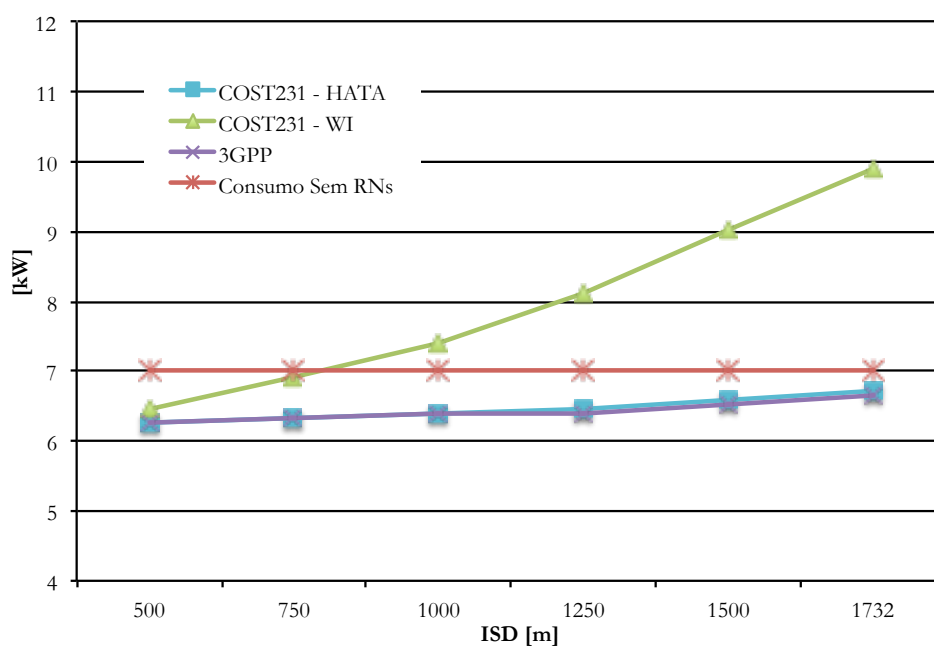


Figura 4.11 – Carga de 50% nos cenários de referência e alternativo.

Este afastamento é mais notório nas ISDs inferiores a 1250 m. Continua-se a observar a discrepância da projecção COST 231 WI em relação as suas congéneres.

A carga de 75% representada na Figura 4.12, traduz o aumento do consumo proporcional a carga e o aumento da diferença no consumo entre os cenários alternativos e o cenário de referência. Salienta-se que o cenário alternativo referente a projecção COST 231 WI tem consumos inferiores ao cenário de referência até a ISD de 750 m, não acompanhando no entanto as projecções das suas congéneres.

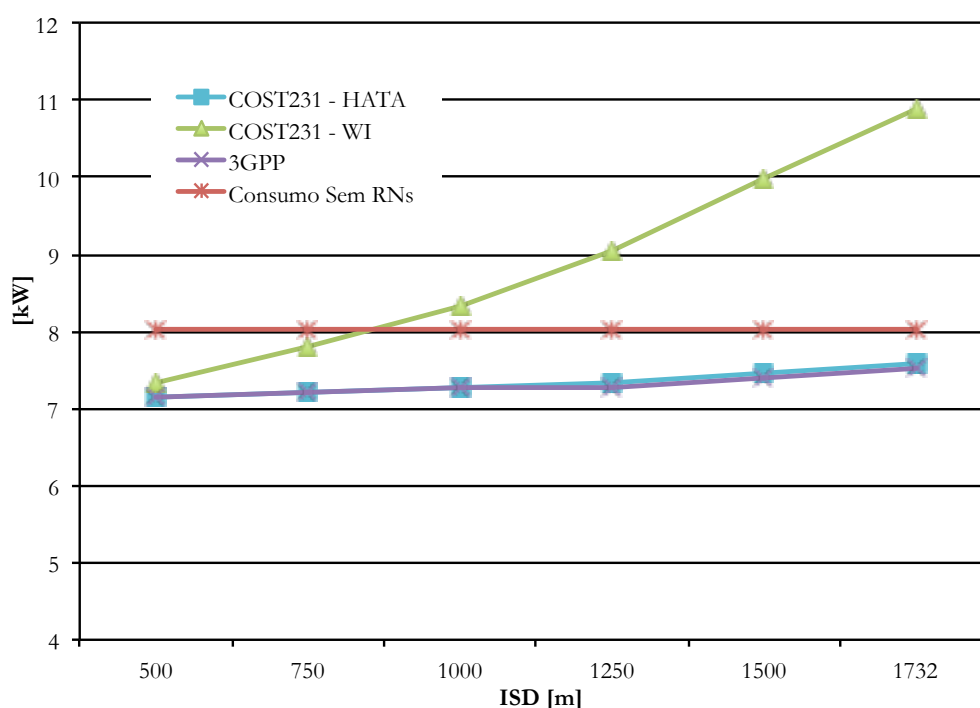


Figura 4.12 – Carga de 75% nos cenários de referência e alternativo.

É visível na Figura 4.13 que a carga máxima proporciona a maior diferença no consumo energético entre os cenários alternativos e o cenário de referência. O consumo dos cenários alternativos tem uma evolução pouco significativa até a ISD de 1250 m, distância partir da qual se verifica um aumento mais acentuado no consumo, aproximando-se do consumo do cenário de referência. No entanto na máxima ISD continuamos ter uma diferença de aproximadamente 0,750 kW no consumo.

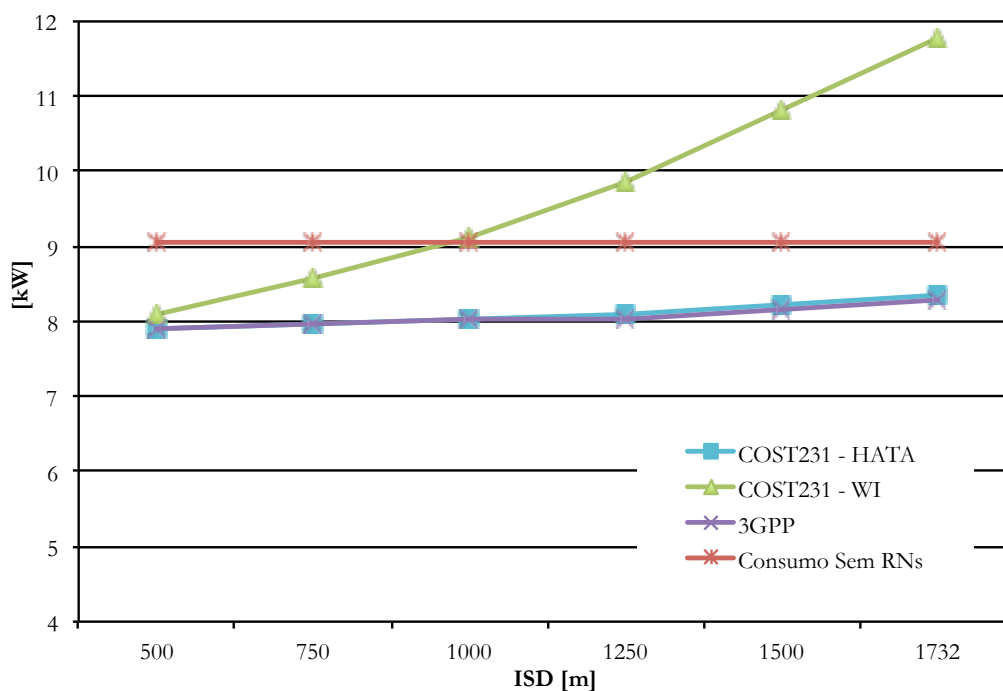


Figura 4.13 – Carga de 100% nos cenários de referência e alternativo.

Nas figuras anteriores, Figuras 4.8 a 4.13, verificou-se que a diferença no consumo entre os cenários alternativos e o cenário de referência tem aumentado com a carga. Verificou-se que para ISDs superiores a 1250 m a diferença no consumo entre os cenários alternativos e o cenário de referência diminui mais acentuadamente. No entanto, o consumo do cenário de referência não é alcançado, mesmo para a ISD de 1732 m com uma carga de 1%, onde ainda se verifica uma diferença de aproximadamente 0,05 kW.

## 4.5 Ganho Efectivo

Esta secção visa quantificar o ganho percentual relativamente a carga por cada ISD, com o intuito de verificar de forma clara a evolução do ganho na evolução da ISD com a carga.

Na Figura 4.14, constata-se que, para o cenário alternativo referente ao modelo de propagação COST 231 HATA, o maior ganho é obtido para a carga máxima e para a ISD mínima. Note-se que a evolução do aumento da carga também aumenta o ganho. No entanto, o ganho não

aparece proporcional a carga devido ao número de RNs necessários por cada ISD que não é proporcional.

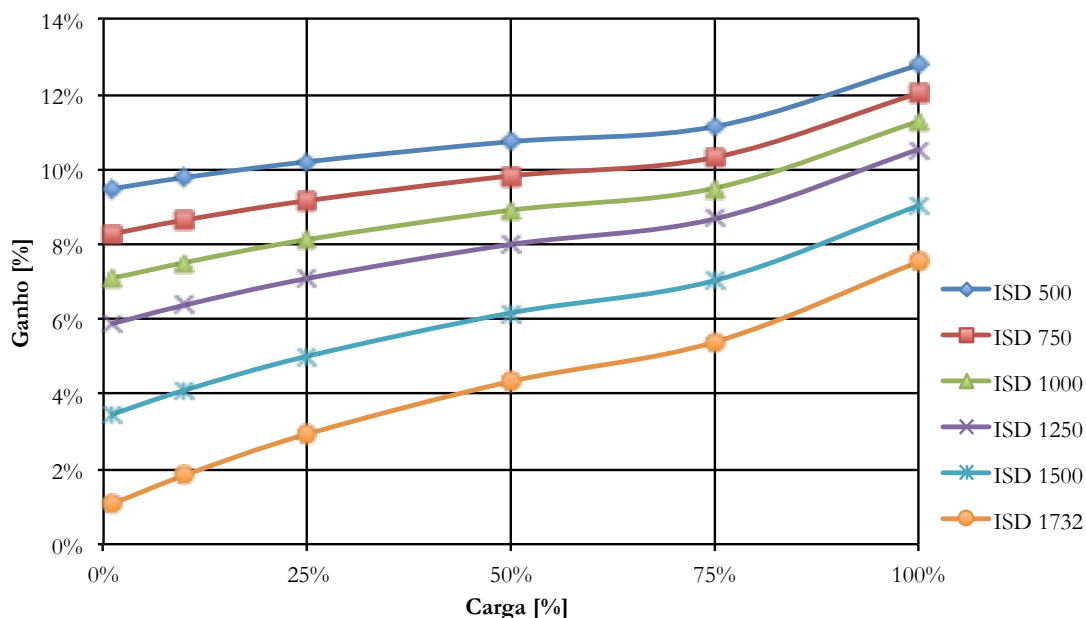


Figura 4.14 – Ganho efectivo quando aplicado o modelo COST231 HATA.

A Figura seguinte, Figura 4.15, representa o cenário alternativo referente as estimativas providas pelo modelo de propagação COST 231 WI. Como referido anteriormente as estimativas deste modelo de propagação são muito penalizadas pela distância e em especial pela altura dos obstáculos circundantes.

É visível na Figura 4.15 que para a ISD mínima e para a carga máxima ainda temos um ganho de aproximadamente 8%. No entanto, para as restantes ISDs os ganhos são mesmo negativos e não merecem apreciação pelos motivos descritos anteriormente em relação a este modelo de propagação.

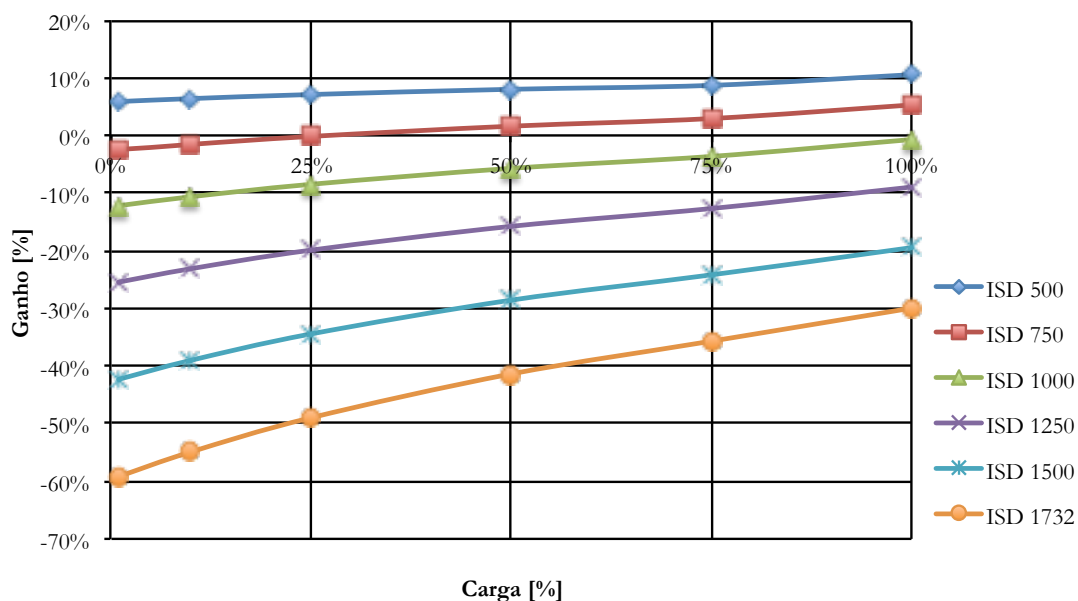


Figura 4.15 – Ganho efectivo quando aplicado o modelo COST231 WI.

A Figura 4.16 representa o ganho obtido quando aplicamos o cenário alternativo relativo ao modelo de propagação definido pelo 3GPP. Destaca-se que para a ISD de 1000 m e 1250 m o ganho é igual porque com o mesmo número de repetidores pode-se satisfazer as necessidades de cobertura e capacidade relativas a eNB substituída para ambas as ISDs.

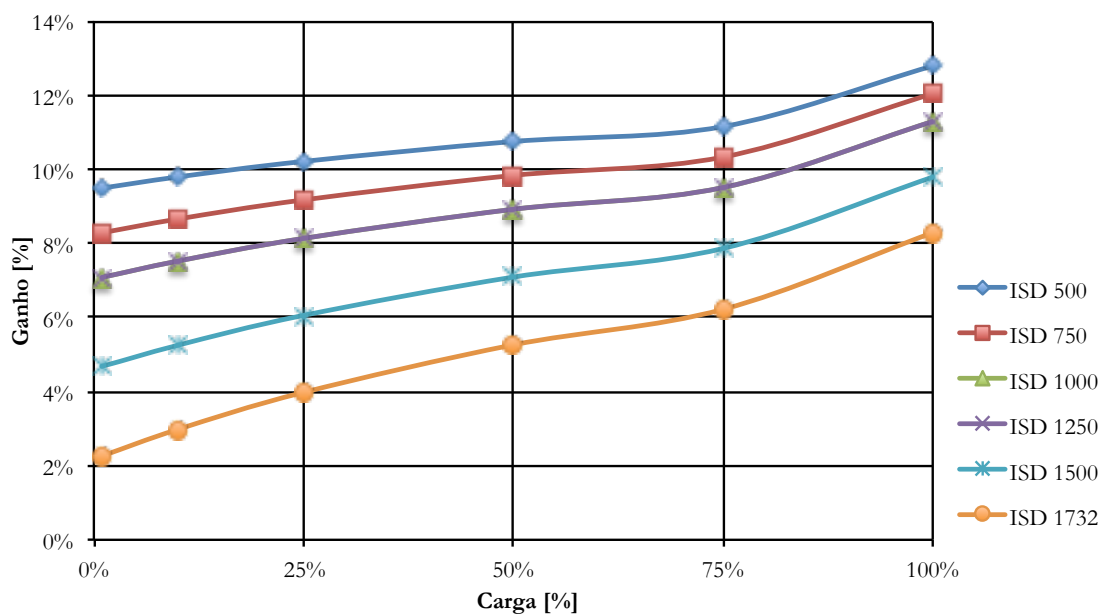


Figura 4.16 – Ganho efectivo quando aplicado o modelo 3GPP.

Para melhor entender a relevância do ganho efectivo demonstrado nas 3 Figuras anteriores (4.14, 4.15 e 4.16), são apresentadas 3 Figuras referentes ao custo anual relativo aos consumos energéticos obtidos das estimativas proporcionadas pelos modelos de propagação. Os valores das Figuras foram calculados para 365 dias e partem do pressuposto da divisão de carga diária ilustrada na Tabela 4.2, valores pifiamente retirados do modelo de trafego do projecto EARTH [20] mas elucidativos para obtenção de uma ordem de grandeza monetária. Acrescenta-se que foi utilizado o valor de 0,15 € por cada kWh.

Tabela 4.2 – Distribuição da carga pelo dia.

Qt. Horas	Carga
1	1%
4	10%
3	25%
5	50%
10	75%
1	100%

Na Figura 4.17 é ilustrado o custo energético anual referente a energia consumida pelo cenário de referência e pelo cenário alternativo relativamente as estimativas fornecidas pelo modelo de propagação COST 231 HATA.

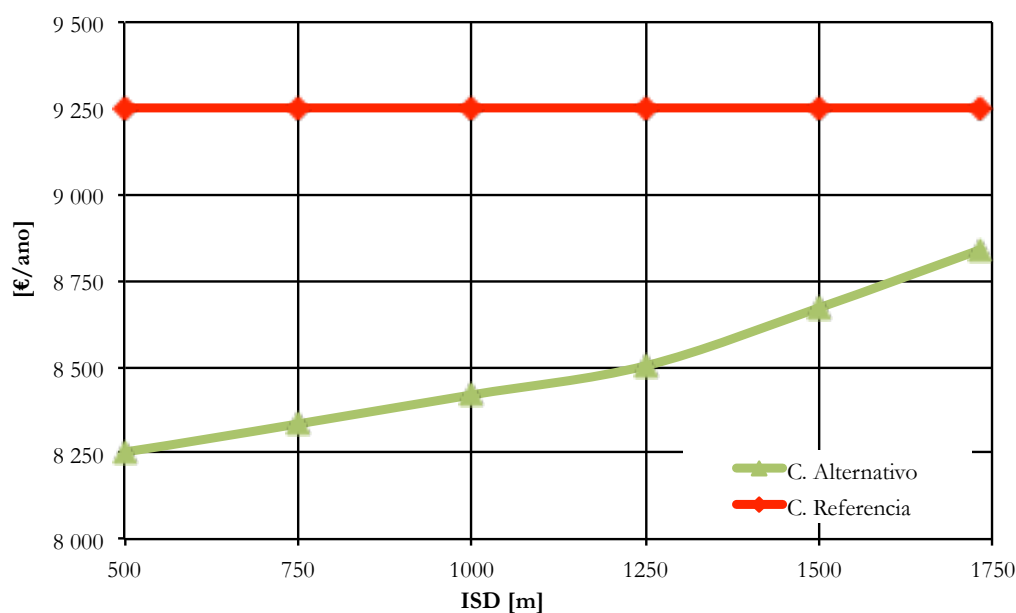


Figura 4.17 – Custo anual por ISD para a estimativa COST 231 HATA.

A projecção relativa ao cenário de referência na Figura 4.17 é constante porque é apenas necessário uma eNB para todas as ISDs. Na projecção relativa ao cenário alternativo é visível o aumento do custo energético com o aumento da ISD, pois como já referido á um aumento de RNs com o aumento da ISD mas não é proporcional.

Na Figura 4.18, constata-se mais um vez a discrepância dos valores fornecidos pelo modelo de propagação COST 321 WI em relação aos outros modelos usados. Esta discrepância é sobretudo relevante na transmissão RN-UE, devido a altura do RN em relação aos obstáculos envolventes.

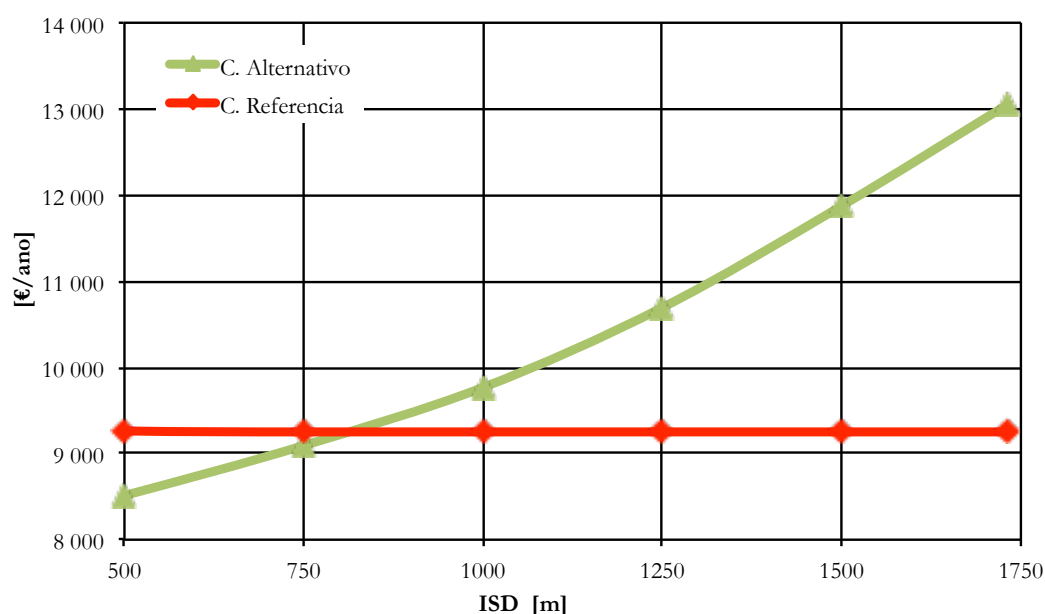


Figura 4.18 – Custo anual por ISD para a estimativa COST 231 WI.

A Figura 4.19, reflecte o custo energético anual calculado com base no modelo de propagação 3GPP para as ISDs em análise. As estimativas fornecidas por este modelo proporcionam custos inferiores aos observados no modelo de propagação COST 231 HATA porque necessita de menos RNs para substituir uma eNB.

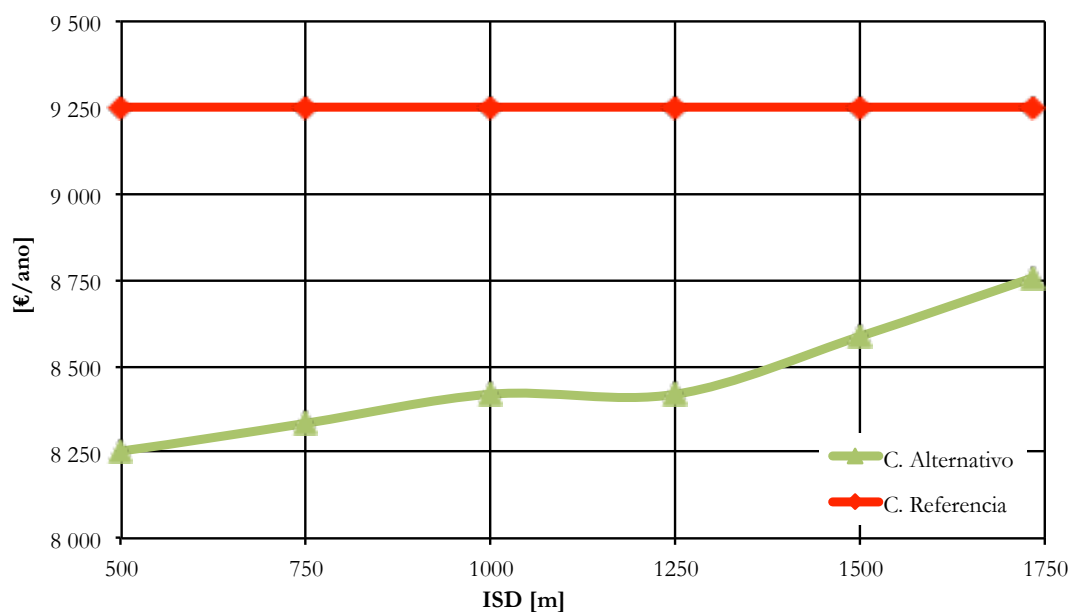


Figura 4.19 – Custo anual por ISD para a estimativa 3GPP.

Pelo o exposto pode-se afirmar que a substituição de uma eNB por um determinado número de RNs é viável do ponto de vista do consumo energético. Pois como demonstrado existe um ganho que se aproxima de 13% (dependendo das circunstâncias) no consumo energético.

Salienta-se que a utilização de RNs não deve ser considerada apenas pelo seu consumo energético, mas também pelo custo relacionado com a sua instalação (CAPEX) e exploração (OPEX).

#### 4.6 Custo Unitário da eNB e dos RNs

Nas secções anteriores foi demonstrado a vantagem energética resultante da substituição de uma eNB por um determinado número de RNs, considerando que a eNB está rodeada por outras eNB idênticas e que os repetidores são do tipo 1. A demonstração foi elaborada considerando um sistema de 7 eNBs ou 6 eNBs mais o número de RNs necessários a substituição da eNB central dependente do modelo de propagação usado na estimativa de cobertura e capacidade. Foi ainda apresentado um comparativo do custo anual dos cenários em apreciação.

É relevante referir a discrepância no custo energético diário quando comparamos o custo energético de uma eNB com o custo energético dos RNs necessários a substituição dessa mesma eNB.

Na Tabela 4.3 é exposto o custo energético diário referente aos modelos de propagação utilizados por cada ISD, considerando a distribuição de carga diária apresentada na Tabela 4.2

Tabela 4.3 – Custo energético diário para a eNB e os RNs.

ISD [m]	COST 231 HATA		COST 231 WI		3GPP	
	€/dia RNs	€/dia eNB	€/dia RNs	€/dia eNB	€/dia RNs	€/dia eNB
500	0,46		1,16		0,46	
750	0,69		2,77		0,69	
1000	0,92	3,62	4,62	3,62	0,92	3,62
1250	1,16		7,16		0,92	
1500	1,62		10,40		1,39	
1732	2,08		13,63		1,85	

Na Tabela observamos o aumento do custo energético diário em função da ISD, derivado ao aumento do número de RNs que também aumenta com a ISD. Salienta-se o custo energético diário da eNB, igual para todas as ISDs e para todos os modelos de propagação, porque é apenas necessário uma eNB para satisfazer a cobertura de qualquer ISD.

Analisando os valores da Tabela 4.3, verifica-se que as estimativas produzidas pelo modelo 3GPP proporcionam um rácio de aproximadamente 2 entre o custo energético diário da eNB e o custo energético diário dos RNs, para a maior das ISDs (1732 m). Este rácio aumenta com a diminuição da ISD atingindo o valor de 7,5 para a menor das ISDs (500 m).

Relativamente ao modelo COST 231 HATA, os valores são iguais aos valores proporcionados pelo modelo 3GPP até 1000 m, depois, os valores divergem porque são necessários mais RNs relativamente ao número de RNs necessários proporcionados pela estimativa do 3GPP, Tabelas 3.23 e 3.25.

Como observado em comparativos anteriores, o modelo COST 231 WI não aporta alterações neste comparativo. O modelo pode ser considerado até ISD de 750 m onde o rácio entre o consumo da eNB e o consumo dos RN ainda é maior que a unidade. No entanto, para ISDs maiores que 750 m não há qualquer vantagem na substituição da eNB por RNs.



## 5 Conclusões

A contínua procura e a necessidade em fornecer cada vez mais altos débitos binários provoca um contínuo aumento no consumo de energia. A energia é cada vez mais onerosa não só pela quantidade necessária mas também pelo impacto causado na natureza, sendo também um recuso limitado.

Esta dissertação abordou a possibilidade de substituir uma estação-base por um determinado número de repetidores LTE obtendo-se uma economia de energia no sistema. Os dados foram corroborados pela execução de um planeamento de cobertura e capacidade aplicado a 2 cenários usando 3 modelos de propagação.

### 5.1 Deduções Principais

Os resultados alcançados nesta dissertação foram obtidos teoricamente e corroborados por comparação entre 3 modelos de propagação: COST 231 HATA, COST 231 Walfish Ikegami e 3GPP (modelos amplamente utilizados na literatura). No entanto, o modelo de propagação COST 231 Walfish Ikegami revelou-se desajustado devido a discrepâncias expressivas em relação aos outros modelos. Este facto deveu-se a diferença entre a altura da antena emissora e a altura dos obstáculos circundantes, que penaliza de forma acentuada a estimativa produzida por este modelo de propagação, principalmente na transmissão RN-UE onde a antena emissora está a 5 m e os obstáculos circundantes têm 27 m de altura.

Concluiu-se que o número de eNBs necessários para efectuar a cobertura das áreas definidas pelas ISD apresentadas é de 1 eNB em todos os modelos de propagação. No entanto, o débito binário médio baixa com o aumento da ISD. Esta evidencia é particularmente acentuada no

calculado efectuado pelo modelo de propagação COST 231 WI, onde o débito binário decresce mais rapidamente com o aumento da ISD, quando comparado com os outros modelos de propagação.

Obteve-se o número de RNs necessários (entre 2 e 9) para substituir uma eNB, sem perder QoS, em cobertura e capacidade para todas as ISDs e modelos de propagação. Verificou-se ainda a proximidade nas estimativas dos modelos de propagação COST 231 HATA e 3GPP em praticamente todos os casos estudados. O modelo de propagação COST 231 WI forneceu uma estimativa com um elevado número de RN resultante do facto de este modelo não se adequar a estimativas cuja antena de transmissão está abaixo dos obstáculos circundantes.

Demonstrou-se que é vantajosa a substituição de uma eNB, rodeada por outras eNBs, por um determinado número de RNs do tipo 1. Esta observação resulta da demonstração efectuada no Capítulo 4 onde se verifica nos diversos cenários uma vantagem energética e uma vantagem no débito binário médio, resultante da substituição da eNB por um determinado número de RNs calculado em função da distância intercelular (ISD) e do débito binário necessário.

Os resultados obtidos permitem verificar que se pode poupar até 1 000,00 € anuais, considerado 0,15 € o kWh, e 20 kWh diários com a substituição de uma estação-base, completamente rodeada por outras estações, por um número de repetidores compreendido entre 1 e 9 dependendo da ISD (até 1732 m). Verifica-se ainda um ganho de eficiência energética até 13% ao nível do sistema.

O comparativo económico relativo ao consumo de energia, reiterou a vantagem observada na poupança de energia, foi verificado que o cenário de referência tem um custo energético anual aproximado de 9 250,00 € considerando a distribuição de tráfego diário descrito na Tabela 4.2. Para os cenários alternativos caracterizados pelos modelos COST 231 HATA e 3GPP, dependendo da ISD, obteve-se um custo energético anual compreendido entre 8 250,00 € e 8 840,00 €. O cenário alternativo referente ao modelo de propagação COST 231 WI, proporcionou um custo compreendido entre 8 500,00 € e 13 050,00 €, só aceitável para as ISDs inferiores a 750 m, depois, desta distância o modelo não verifica qualquer vantagem em relação ao cenário de referência.

A comparação individual do custo energético entre a eNB substituída e o número de RNs, aplicados demonstrou ainda uma diferença significativa. O custo energético diário de uma eNB (considerando a distribuição diária de tráfego referida na Tabela 4.2) é de 3,62 €/dia enquanto

que o custo diário dos RNs alternativos oscila entre 0,46 €/dia e 2,08 €/dia dependendo da ISD e do modelo de propagação considerado (COST 31 HATA ou 3GPP). O modelo de propagação COST 231 WI forneceu um custo diário compreendido entre 1,16 € e 13,63 € dependendo da ISD.

Os modelos de propagação COST 231 HATA e 3GPP forneceram estimativas verosímeis e muito próximas que reforçam a conclusão de que a substituição de uma eNB por um conjunto de repetidores é energeticamente compensador.

Salienta-se que a implementação de RNs além de permitir uma economia de energia são menos onerosos que uma eNB, não considerando o custo da instalação ou montagem.

## 5.2 Trabalho Futuro

Será relevante no futuro obter um modelo energético mais detalhado para os repetidores e efectuar uma análise idêntica, não só relativamente ao modelo energético como também relativamente ao tipo de repetidor, 1, 1a e 1b.

Importante será considerar RNs com função de auto-gestão e verificar a economia de energia que daí advém. Será relevante obter uma avaliação dos custos de implementação dos RNs para permitir comparativos com as redes normais compostas apenas por estações-base.

Será relevante verificar o ganho energético obtido da combinação de RNs do Tipo 1 com RNs do Tipo 2 num ambiente idêntico ao estudado nesta dissertação.



## Referencias

- [1] EC press release, Climate change: Commission welcomes final adoption of Europe's climate and energy package. Dezembro 2008.
- [2] Sibel Tombaz, Anders Vastberg, Jens Zander, Energy and cost-efficient Ultra-High-Capacity wireless access, IEEE Wireless Communications. Outubro 2011.
- [3] Tripathi, Kulkarni & Kumar, LTE E-UTRAN and its Access Side Protocols, Articles & Papers, LTE/ 4G. Junho 2010.
- [4] BreakPoint systems, LTE Testing - Use real-world mobile data to harden and optimize LTE/4G networks for city-scale load and attack. Março 2012, ([www.breakingpointsystems.com](http://www.breakingpointsystems.com))
- [5] LTE Resource Guide, ANRITSU 2009.
- [6] Understanding LTE, ANRITSU. Fevereiro 2012
- [7] Long Term Evolution (LTE): an introduction, Ericsson white paper. Outubro 2007.
- [8] An Introduction To SC-FDMA Used By LTE In Uplink Direction, 2007, ([http://mobilesociety.typepad.com/mobile\\_life/2007/05/an\\_introduction.html](http://mobilesociety.typepad.com/mobile_life/2007/05/an_introduction.html))
- [9] Christina Gesser, Andreas Roessler, LTE technology and LTE test; a deskside chat, RHODE & SCHWARTZ Abril 2009.
- [10] Moray Rumney, 3GPP LTE: Introducing Single-Carrier FDMA, Agilent Technologies. Janeiro 2008.
- [11] Ulrich BARTH, 3GPP Long Term Evolution/ System Architecture Evolution Overview. Setembro 2006.

- [12] Silva Shankar, Relay Node for LTE-Advanced. Junho 2010 ([www.sivashankar-sss.blogspot.pt/2010/06/relay-node-for-lte-advanced.html](http://www.sivashankar-sss.blogspot.pt/2010/06/relay-node-for-lte-advanced.html)).
- [13] LTE Advanced; (<http://www.sharetechnote.com>)
- [14] Artist4g, Advanced Radio InTerface TechnologIes for 4G SysTems, WP3, D3.2 Advanced Relay Technical Proposals, Artist4g Fevereiro 2011.
- [15] Harri Holma and Antti TosKala, LTE for UMTS - OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access. WILEY 2009
- [16] 3GPP TR 36.213 v10.4.0. Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA), Physical layer procedures. Dezembro 2011
- [17] 3GPP TR 36.306 v10.3.0, Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA), User Equipment (UE) radio access capabilities. Outubro 2011
- [18] Eraldo Damosso and Luis M. Correia, Digital Mobile Radio Towards Future Generation Systems. COST 231 Final Report, COST Office, Brussels, Belgium 1999 (<http://www.lx.it.pt/cost231>).
- [19] 3GPP TR 36.814 V9.0.0 (2010-03), Technical Specication - Group Radio Access Network. Further advancements for E-UTRA Physical Layer Aspects. Março 2010
- [20] EARTH project deliverable, D2.3, “Energy Efficiency Analysis, Metrics and Targets”. Dezembro 2010
- [21] Santosh Kumar Dornal, LTE Whitepaper; Outubro 2009. ([www.wired-n-wireless.blogspot.com](http://www.wired-n-wireless.blogspot.com))
- [22] Martin Döttling, Werner Mohr, A Osseiran, Radio Technologies and Concepts for IMT-Advanced. WILEY 2009.