



**David Coelho
Carrilho**

**Redes Híbridas de Acesso Fixo sem Fios: Análise
Tecno-Económica**



**David Coelho
Carrilho**

**Redes Híbridas de Acesso Fixo sem Fios: Análise
Tecno-Económica**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Electrónica e Telecomunicações, realizada sob a orientação científica do Dr. A. Manuel Oliveira Duarte, Professor Catedrático do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro

o júri

Presidente

Professor Doutor José Carlos da Silva Neves
Professor Catedrático da Universidade de Aveiro

**Vogal – Arguente
Principal**

Professor Doutor Carlos Alberto Henggeler de Carvalho Antunes
Professor Catedrático da Faculdade de Ciências e Tecnologia
da Universidade de Coimbra

Vogal – Orientador

Professor Doutor Aníbal Manuel de Oliveira Duarte
Professor Catedrático da Universidade de Aveiro

**Vogal – Arguente
Secundário**

Professor Doutor Paulo Miguel Nepomuceno Pereira Monteiro
Professor Associado da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Gostaria de agradecer ao Professor Manuel Oliveira Duarte, pela sua orientação, disponibilidade e por todos os incentivos. Sem ele este trabalho nunca poderia ter sido realizado.

Gostaria também de agradecer a todos os colegas do GSBL (e nem só) que me ajudaram ao longo deste ano.

Gostaria também de agradecer à minha família por todo o apoio prestado ao longo destes anos.

palavras-chave

Info-exclusão, banda larga, viabilidade económica, redes de acesso, redes de distribuição sem fios.

resumo

As tecnologias da informação e da comunicação estão cada vez mais presentes no quotidiano dos indivíduos e das organizações, actuando como elementos estruturantes em muitos sectores de actividades económica.

Neste trabalho estuda-se a problemática da viabilidade económica de diferentes tecnologias de telecomunicações em zonas financeiramente pouco atractivas (do ponto de vista dos operadores). Será dada especial atenção aos sistemas de comunicações sem fios, mais especificamente, à soluções envolvendo tecnologias como WiMAX e LTE.

Serão apresentados alguns pormenores sobre a implementação destas tecnologias em diferentes *habitats*, com diferentes tipos de clientes, assim como os resultados económicos destas soluções nesses mesmos *habitats*.

Será também analisada uma outra tecnologia, o FUTON, que se encontra actualmente em fase de testes.

Nos cenários estudados é considerada também a hipótese de alguns tipos de financiamentos externos (p.ex.: apoios estatais) que poderiam ter influência sobre a atractividade financeira destas regiões.

Uma preocupação presente nesta dissertação foi também contribuir para a disponibilização de materiais didácticos que possam ser de utilidade a quem pretenda adquirir uma melhor compreensão acerca das relações entre o projecto engenharia de redes de acesso e as suas implicações tecno-económicas.

keywords

Digital Divide, broadband, economic feasibility, access networks, wireless distribution networks.

Abstract

Information and communication technologies are increasingly present in everyday life of individuals and organizations, acting as structural elements in many sectors of economic activities.

This work attempts to ascertain the economic viability of different telecommunications technologies in areas financially unattractive (in terms of operators). Special attention will go to wireless communications systems, more specifically, the solutions involving technologies such as WiMAX and LTE.

Some details of the implementation of these technologies in different habitats with different types of customers, as well as economic outcomes these solutions in these habitats will be presented.

An emerging access technology, FUTON, will also be studied.

In some of the studied scenarios some types of external financing (eg: state aid) are also considered and proved to be indispensable to achieve economic feasibility.

Índice

Índice de Figuras.....	XIII
Índice de Tabelas	XIX
Lista de Siglas e Acrónimos.....	XXI
1. Introdução	1
1.1... Motivação	1
1.2... Objectivos	2
1.3... Estrutura do Trabalho	3
2. Estruturas de Redes de Telecomunicações.....	5
2.1... Rede Nuclear.....	5
2.2... Rede de Acesso	7
2.3... Rede do Cliente	8
2.4... Alternativas técnicas de fornecimento de serviços de Internet	8
2.4.1 Banda Estreita	10
2.4.2 Suporte em Fibra Óptica	11
2.4.2.1 FTTx	11
2.4.2.2 xDSL	13
2.4.2.3 HFC	14
2.4.3 Sem suporte Físico.....	15
2.4.3.1 GSM/GPRS	15
2.4.3.2 UMTS.....	17
2.4.3.3 HSPA.....	18
2.4.3.4 LTE	18
2.4.3.5 Wi-Fi	19
2.4.3.6 WiMAX.....	20
2.4.3.7 Satélite.....	20
3. Redes FWA.....	21

3.1... Topologias Genéricas de uma Solução FWA	21
3.2... Rede Primária.....	22
3.2.1 Radio Link.....	22
3.2.2 Fibra Óptica	23
3.3... Distribuição	24
3.3.1 Redes WiMAX	24
3.3.1.1 Capacidade de Distribuição da Tecnologia.....	27
3.3.1.2 Estações Base.....	28
3.3.1.3 CPE	30
3.3.1.4 Evolução da tecnologia	31
3.3.2 Redes UMTS	32
3.3.2.1 CDMA2000	33
3.3.2.2 WCDMA.....	34
3.3.3 Redes HSPA.....	36
3.3.3.1 Arquitectura	37
3.3.3.2 Camada Física.....	37
3.3.3.3 Portadoras	38
3.3.3.4 Próximas Evoluções	39
3.3.4 Redes LTE.....	39
3.3.4.1 Arquitectura	40
3.3.4.2 Camada Física.....	41
3.3.4.3 Portadoras	42
3.3.4.4 SON (Self Organizing Networks).....	43
3.3.4.5 Próximas Evoluções	44
3.3.5 FUTON	45
3.3.5.1 Conceitos.....	45
3.3.5.2 Arquitecturas de referência deste projecto.....	46
3.3.6 Planeamento Celular	47
3.3.6.1 Conceito de Célula	48
3.3.6.2 Clusters.....	49

3.3.6.3	Path Loss.....	49
3.3.6.4	Interferências.....	50
3.3.6.5	Sectorização.....	52
3.3.7	Modelos de Propagação.....	53
3.3.7.1	Modelo de Hata-Okumura	53
3.3.7.2	Modelo de Walfisch-Ikegami	56
3.4...	Antenas.....	59
3.4.1	Antenas Sectorizadas.....	60
3.4.2	Sistemas Avançados	61
3.4.2.1	Sistemas diversificativos	61
3.4.2.2	Sistemas Adaptativos	61
3.4.2.3	Sistemas MIMO	62
4.	Análise Tecno-Económica de Soluções de Rede	63
4.1...	Metodologia.....	63
4.1.1	Penetração no mercado	64
4.1.2	Definição da margem de segurança	65
4.1.3	Evolução dos preços dos equipamentos.....	67
4.2...	Análise de uma Solução Baseada em WiMAX.....	68
4.2.1	Definição do Mercado.....	69
4.2.2	Definições das Redes a Implementar	72
4.2.2.1	Zona SU	72
4.2.2.2	Zona R.....	73
4.2.2.3	Zona R_i	74
4.2.3	CAPEX	75
4.2.3.1	Zona SU	76
4.2.3.2	Zona R.....	77
4.2.3.3	Zona R_i	78
4.2.4	OPEX.....	80
4.2.4.1	Zona SU	80
4.2.4.2	Zona R.....	81

4.2.4.3	Zona R_i	82
4.2.5	Custos Relativos.....	83
4.2.6	Resultados.....	84
4.2.6.1	Zona SU.....	84
4.2.6.2	Zona R.....	85
4.2.6.3	Zona R_i	87
4.2.7	Análise de Sensibilidade.....	89
4.2.7.1	Zona SU.....	89
4.2.7.2	Zona R.....	90
4.2.7.3	Zona R_i	92
4.3...	Análise de uma Solução Baseada em LTE.....	92
4.3.1	Definição do Mercado.....	93
4.3.2	Definições das Redes a Implementar.....	94
4.3.2.1	Zona SU.....	94
4.3.2.2	Zona R.....	95
4.3.2.3	Zona R_i	96
4.3.3	CAPEX.....	98
4.3.3.1	Zona SU.....	98
4.3.3.2	Zona R.....	99
4.3.3.3	Zona R_i	100
4.3.4	OPEX.....	101
4.3.4.1	Zona SU.....	102
4.3.4.2	Zona R.....	103
4.3.4.3	Zona R_i	104
4.3.5	Custos Relativos.....	104
4.3.6	Resultados.....	106
4.3.6.1	Zona SU.....	106
4.3.6.2	Zona R.....	107
4.3.6.3	Zona R_i	109
4.3.7	Análise de Sensibilidade.....	110

4.3.7.1	Zona SU	111
4.3.7.2	Zona R	112
4.3.7.3	Zona R _i	113
4.4...	Análise de uma Solução Baseada em FUTON.....	114
4.4.1	Definição do Mercado.....	114
4.4.2	Implementação da Solução	117
4.4.3	CAPEX	119
4.4.4	OPEX.....	120
4.4.5	Resultados.....	120
5.	Considerações Finais.....	123
5.1...	Conclusões	123
5.2...	Trabalho Futuro	124
6.	Bibliografia	127

Índice de Figuras

Figura 1 - Relações entre a oferta e a procura no mercado das telecomunicações [15]	2
Figura 2 - Segmentos de Rede [15]	5
Figura 3 - Estrutura em anel duplo usada pelo SDH [15]	6
Figura 4 - Trama SDH [1]	6
Figura 5 - Rede de Acesso [2].....	9
Figura 6 - Redes de Acesso com Soluções Híbridas.....	10
Figura 7 – Acesso a Internet numa rede de cobre com <i>modem dial-up</i> [5].....	11
Figura 8 - FTTx [10].....	12
Figura 9 - Topologia de xDSL (1) [5].....	14
Figura 10 - Topologia de xDSL (2) [5].....	14
Figura 11 - Estrutura de uma rede HFC [15].....	15
Figura 12 - <i>Upgrade</i> de GSM para GPRS [27]	16
Figura 13 - Arquitectura de um sistema UMTS [27].....	17
Figura 14 - Comunicação entre Terra e Satélites [34]	20
Figura 15 - Topologias Genéricas de uma Rede FWA	22
Figura 16 - Arquitectura Base de um <i>Radio Link</i>	22
Figura 17 - Arquitectura P2P em fibra óptica	23
Figura 18 - Espectro de três subportadoras formando um sinal OFDM [3]	25
Figura 19 - Modulação adaptativa [3].....	27
Figura 20 - Arquitectura de uma Estação Base [36]	29
Figura 21 - Diferentes arquitecturas de distribuição	29
Figura 22 - Arquitectura de um CPE	30
Figura 23 - Evolução dos Padrões WiMAX [28].....	32
Figura 24 - Hierarquia de células em UMTS [9].....	34
Figura 25 - Arquitectura Base de Rede UMTS	35
Figura 26 - Evolução dos <i>releases</i> de 3GPP [6]	36

Figura 27 - <i>Dual Carrier</i> [6].....	38
Figura 28 - Arquitectura LTE (<i>data only</i>).....	40
Figura 29 - Camada Física da Tecnologia LTE [6]	42
Figura 30 - DBWS com processamento centralizado	45
Figura 31 - Arquitecturas de referência do projecto FUTON	46
Figura 32 - Topologia em estrela dupla.....	47
Figura 33 - Conceito Celular [21]	48
Figura 34 – <i>Clusters</i>	49
Figura 35 - Interferência co-canal	50
Figura 36 - Exemplo de atribuição de canais [21].....	51
Figura 37 - Interferência multi-percurso	52
Figura 38 - Células sectorizadas [28].....	52
Figura 39 - Hata-Okumura.....	55
Figura 40 - Parâmetros do modelo Walfisch-Ikegami [3].....	56
Figura 41 - Perdas de percurso em centro urbano com NLOS [3].....	58
Figura 42 - Perdas de percurso em centro urbano com LOS [3]	59
Figura 43 - Diagrama de Radiação de uma Antena Sectorizada [25]	60
Figura 44 - Estrutura da Ferramenta de Cálculo.....	63
Figura 45 - Penetração segundo curva em "S"	64
Figura 46 - Evolução da penetração	65
Figura 47 - Probabilidade de Aderência.....	66
Figura 48 – Evolução da probabilidade de aderência.....	66
Figura 49 - margens de segurança	67
Figura 50 - Evolução do preço dos equipamentos.....	68
Figura 51 - Arquitectura da Rede WiMAX	69
Figura 52 - Zona SU (Suburbana).....	70
Figura 53 - Zona R (Rural)	70
Figura 54 - Zona R _i (Rural Isolada)	71
Figura 55 - penetração no mercado da tecnologia actual.....	71

Figura 56 - penetração no mercado da nova tecnologia	72
Figura 57 - penetração no mercado da última tecnologia.....	72
Figura 58 - Evolução do Tráfego (WiMAX@SU).....	73
Figura 59 - Evolução do Número de BS (WiMAX@SU)	73
Figura 60 - Evolução do Tráfego (WiMAX@R)	74
Figura 61 - Evolução das BS (WiMAX@R).....	74
Figura 62 - Evolução do Tráfego (WiMAX@R _i)	75
Figura 63 - Evolução das BS (WiMAX@ R _i)	75
Figura 64 - Distribuição do CAPEX (WiMAX@SU).....	77
Figura 65 - Evolução do CAPEX (WiMAX@SU).....	77
Figura 66 - Distribuição do CAPEX (WiMAX@Zona B)	78
Figura 67 - Evolução do CAPEX (WiMAX@Zona B)	78
Figura 68 - Distribuição do CAPEX (WiMAX@R _i).....	79
Figura 69 - Evolução do CAPEX (WiMAX@R _i)(1)	79
Figura 70 - Evolução do CAPEX (WiMAX@R _i)(2)	80
Figura 71 - Distribuição do OPEX (WiMAX@SU)	81
Figura 72 - Evolução do OPEX (WiMAX@SU)	81
Figura 73 - Distribuição do OPEX (WiMAX@R)	81
Figura 74 - Evolução do OPEX (WiMAX@R)	82
Figura 75 - Distribuição do OPEX (WiMAX@R _i).....	82
Figura 76 - Evolução do OPEX (WiMAX@R _i).....	82
Figura 77 - Custo por Utilizador (WiMAX).....	83
Figura 78 - Custo por Km ² (WiMAX)	83
Figura 79 - Resultados Económicos (WiMAX@SU)	85
Figura 80 - Resultados Económicos (WiMAX@R)	85
Figura 81 - Resultados com financiamento tipo 1 (WiMAX@R)	86
Figura 82 - Resultados com financiamento tipo 2 (WiMAX@R)	87
Figura 83 - Balanços (WiMAX@R)	87
Figura 84 - Resultados Económicos (WiMAX@R _i).....	88

Figura 85 - Resultados com financiamento (WiMAX@Ri)	88
Figura 86 - Sensibilidade do VAL e da TIR (WiMAX@SU)	90
Figura 87 – Sensibilidade do VAL e da TIR (WiMAX@R)	91
Figura 88 - Sensibilidade dos Financiamentos (WiMAX@R).....	91
Figura 89 - Sensibilidade do VAL e do Financiamento (WiMAX@Ri)	92
Figura 90 - Arquitectura LTE (data only)	93
Figura 91 - Penetração no Mercado LTE (data only)	94
Figura 92 - Evolução do Tráfego (LTE@SU)	95
Figura 93 - Evolução dos <i>eNodeB</i> (LTE@SU).....	95
Figura 94 - Evolução do Tráfego (LTE@R)	96
Figura 95 - Evolução dos <i>eNodeB</i> (LTE@R)	96
Figura 96 - Evolução do Tráfego (LTE@Ri).....	97
Figura 97 - Evolução dos <i>eNodeB</i> (LTE@Ri)	97
Figura 98 - Distribuição do CAPEX (LTE@SU)	98
Figura 99 - Evolução do CAPEX (LTE@SU)	99
Figura 100 - Distribuição do CAPEX (LTE@R).....	99
Figura 101 - Evolução do CAPEX (LTE@R) (1)	100
Figura 102 - Evolução do CAPEX (LTE@R) (2)	100
Figura 103 - Distribuição do CAPEX (LTE@Ri)	100
Figura 104 - Evolução do CAPEX (LTE@Ri) (1)	101
Figura 105 - Evolução do CAPEX (LTE@Ri) (2)	101
Figura 106 - Distribuição do OPEX (LTE@SU)	102
Figura 107 - Evolução do OPEX (LTE@SU)	103
Figura 108 - Distribuição do OPEX (LTE@R)	103
Figura 109 - Evolução do OPEX (LTE@R)	103
Figura 110 - Distribuição do OPEX (LTE@Ri)	104
Figura 111 - Evolução do OPEX (LTE@Ri)	104
Figura 112 - Custo por Utilizador (LTE)	105
Figura 113 - Custo por Km ² (LTE).....	105

Figura 114 - Resultados Económicos (LTE@SU)	106
Figura 115 - Resultados Económicos (LTE@R)	107
Figura 116 - Resultados com Financiamento tipo 1 (LTE@R)	108
Figura 117 - Resultados com Financiamento tipo 2 (LTE@R)	108
Figura 118 - Balanços (LTE@R)	109
Figura 119 - Resultados Económicos (LTE@Ri)	109
Figura 120 - Resultados com Financiamento (LTE@Ri)	110
Figura 121 - Sensibilidade do VAL e da TIR (LTE@SU)	112
Figura 122 - Sensibilidade do VAL e da TIR (LTE@R)	112
Figura 123 - Sensibilidade dos Financiamentos (LTE@R)	113
Figura 124 - Sensibilidade do VAL e do Financiamento (LTE@Ri)	114
Figura 125 - Penetração no mercado (FUTON)	115
Figura 126 - Evolução da Largura de Banda (FUTON)	116
Figura 127 - Evolução do tráfego (FUTON@DU&U)	117
Figura 128 - Evolução do tráfego (FUTON@SU&R)	117
Figura 129 - Evolução do Número de Estações Base (FUTON@R)	118
Figura 130 - Evolução do Número de CU Necessários	118
Figura 131 - Evolução do Número de CU a Implementar	119
Figura 132 - Evolução do CAPEX (FUTON)	119
Figura 133 - Evolução do OPEX (FUTON)	120
Figura 134 - Resultados Económicos (FUTON)	121

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Características das tecnologias xDSL [adaptado de [10]]	13
Tabela 2 - Relação dos equipamentos da rede primária	24
Tabela 3 - Débito em função da modulação [3]	27
Tabela 4 - Escalas da Largura de Banda em LTE [6]	42
Tabela 5 - Análise de vários tamanhos de <i>clusters</i> para GSM [21][38]	49
Tabela 6 - Tipos de equipamentos e valores de K [7]	68
Tabela 7 - Classes de equipamentos [7]	68
Tabela 8 - penetração no mercado	71
Tabela 9 - Resultados Económicos (WiMAX)	84
Tabela 10 - Parâmetros comuns (WiMAX)	89
Tabela 11 - Parâmetros específicos (WiMAX@SU)	90
Tabela 12 - Parâmetros específicos (WiMAX@R)	90
Tabela 13 - Parâmetros específicos (WiMAX@Ri)	92
Tabela 14 - Resultados Económicos (LTE)	106
Tabela 15 - Parâmetros Comuns (LTE)	111
Tabela 16 - Parâmetros Específicos (LTE@SU)	111
Tabela 17 - Parâmetros Específicos (LTE@R)	112
Tabela 18 - Parâmetros Específicos (LTE@Ri)	114
Tabela 19 - Distribuição dos clientes (FUTON)	115
Tabela 20 - Largura de Banda no Ano 0 (FUTON)	116
Tabela 21 - Distribuição e L_b dos Clientes (FUTON)	116
Tabela 22 - Parâmetros das Estações Base (FUTON)	117
Tabela 23 - Resultados Económicos (FUTON)	120

Lista de Siglas e Acrónimos

3G	- 3 rd Generation
3GPP	- 3 rd Generation Partnership Project
ADSL	- Assymmetric Digital Subscriber Line
ARQ	- Automatic Repeat reQuest
ATM	- Asynchronous Transfer Mode
BPSK	- Binary phase-shift keying
BS	- Base Station
BSC	- Base Station Controller
BSS	- Base Station Subsystem
CAPEX	- Capital Expenditure
CATV	- Cable Television
CDMA	- Code Division Multiple Access
CL	- Central Local
CMTS	- Cable Modem Termination System
CO	- Central Office
COAX	- Coaxial Cable
CoMP	- Coordinated Multipoint transmission
CPE	- Customer Premise Equipment
CS	- Circuit Switching
CSN	- Cell Signaling Network
CS-SAP	- Convergence Sub-layer – Service Access Point
CU	- Central Unit
DBWS	- Distributed Broadband Wireless System
DECT	- Digital Enhanced Cordless Telecommunication
DL	- Downlink
DNS	- Domain Name Server

DOCSIS	- Data Over Cable Service Interface Specification
DSL	- Digital Subscriber Line
DSLAM	- Digital Subscriber Line Access Multiplexer
DTTV	- Digital Terrestrial Television
DVB-RCS	- Digital Video Broadcast – Return Channel System
EDGE	- Enhanced Data rates for GSM Evolution
eMBMS	- Multimedia Broadcast Multicast Service
ESTI	- European Telecommunications Standards Institute
FDD	- Frequency-Division Duplexing
FE	- Fast Ethernet
FR	- Frame Relay
FTTB	- Fiber to the Building
FTTC	- Fiber to the Curb
FTTCab	- Fiber to the Cabinet
FTTH	- Fiber to the Home
FTTN	- Fiber to the Node
FTTP	- Fiber to the Premises
FTTx	- Fiber to the x
FUTON	- Fiber Optic Networks for Distributed and Extendible Heterogeneous Radio Architectures and Service Provisioning
FWA	- Fixed Wireless Access
GE	- Gigabit Ethernet
GGSN	- Gateway GPRS Support Node
GoS	- Grade of Service
GPRS	- General Packet Radio Service
GSM	- Global System for Mobile communication
HFC	- Hybrid Fiber-Coaxial
HLR	- Home Location Register
HSDPA	- High Speed Downlink Packet Access

HSPA	- High Speed Packet Access
HSUPA	- High Speed Uplink Packet Access
IMT	- International Mobile Telecommunication
IP	- Internet Protocol
IPTV	- Internet Protocol Television
ISI	- Inter Symbol Interference
ITU	- International Telecommunication Union
JPU	- Join Process Units
LAN	- Local Area Network
LOS	- Line of Sight
LTE	- Long Term Evolution
MAC	- Media Access Control
MAP	- Mobile Application Part
MIMO	- Multiple Input Multiple Output
MME	- Mobility Management Entity
MSC	- Mobile Switch
NLOS	- No Line of Sight
OFDM	- Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
OFDMA	- Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OLT	- Optical Line Termination
ONT	- Optical Network Terminal
ONU	- Optical Network Unit
OPEX	- Operational Expenditure
P-2-MP	- Point-to-Multipoint
P-2-P	- Point-to-Point
PAPR	- Peak to Average Power Ratio
PC	- Personal Computer
PD	- Ponto de Distribuição
PHY	- Physical Layer

POTS	- Plain Old Telephone Service
PSTN	- Public Switched Telephone Network
QAM	- Quadrature Amplitude Modulation
QoS	- Quality of Service
QPSK	- Quadrature phase-shift keying
RAN	- Radio Access Network
RAU	- Remote Access Unit
RNC	- Radio Network Controller
RoF	- Radio over Fiber
RP	- Repartidor Principal
RRM	- Radio Resource Management
SC-FDMA	- Single Carrier Frequency Division Multiple Access
SDH	- Synchronous Digital Hierarchy
SDSL	- Symmetric Digital Subscriber Line
SDU	- Service Data Unit
SGSN	- Serving GPRS Support Node
S-GW	- Gateway Server
SHDSL	- Single-pair High-speed Digital Subscriber Line
SIM Card	- Subscriber Identifier Module Card
SMS	- Short Message Service
SNR	- Signal-to-Noise Ratio
SON	- Self Organizing Network
SR	- Sub-Repartidor
STM	- Synchronous Transport Module
TDD	- Time-Division Duplexing
TDMA	- Time Division Multiple Access
TIC	- Tecnologias de Informação e Comunicação
TIR	- Taxa Interna de Rentabilidade
TRX	- Transceiver

UL	- Uplink
UMTS	- Universal Mobile Telecommunication System
UPT-5	- Universal Personal Telecommunication
UTRA	- UMTS Terrestrial Radio Access
UTRAN	- UMTS Terrestrial Radio Access Network
VAL	- Valor Actual Líquido
VDSL2	- Very-high bitrate Digital Subscriber Line
VLR	- Visitor Location Register
VoIP	- Voice over IP
W-CDMA	- Wideband Code Division Multiple Access
Wi-Fi	- Wireless Fidelity
WiMAX	- World Wide Interoperability for Microwave Access
WMAN	- Wireless Metropolitan Area Network

1. Introdução

1.1 Motivação

Ao longo dos últimos anos tem-se assistido a uma revolução dos sistemas de informação. Tanto as pessoas como as organizações, desde as empresas às entidades de administração pública, recorrem às Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC) de uma forma crescente, incorporando-as nas suas formas de vida e trabalho, dando-lhes um carácter imprescindível para o desenvolvimento das sociedades modernas.

A capacidade de aceder e utilizar estes recursos é um factor de igualdade de oportunidades que, se não se verificar, pode criar situações de infoexclusão.

Ao nível pessoal as TIC permitiram novos processos de trabalho de trabalho:

- Trabalhar a partir de casa;
- Aceder a uma grande variedade de informação (jornais, enciclopédias, etc.) sem necessidade de se deslocar às fontes dessa informação;
- Executar tarefas de organização pessoal (compras, operações bancárias, etc.);
- Venda e compra de bens materiais;
- Publicação de trabalho pessoal (*sites*, *blogs*, etc.);

Ao nível empresarial as TIC impulsionaram novos modelos de negócio/organização:

- A generalidade das empresas/organizações possui uma página na Web;
- Os produtos/serviços podem ser consultados e/ou adquiridos via Web, assim como alguns negócios e transacções;
- Várias formas de trabalho cooperativo e em rede estão cada vez mais generalizadas.
- Etc.

Podemos assim considerar que a situação vivida há alguns anos está agora invertida, isto é, já não estamos perante situações em que a tecnologia está presente e a população não se sente confortável com a sua utilização, mas sim perante uma situação em que a Sociedade necessita de estes serviços e alguns grupos não podem desfrutar deles devido à sua inexistência, à incapacidade financeira para os adquirir ou à falta de conhecimento para deles tirar partido.

Estas dificuldades podem criar situações de infoexclusão, também conhecida como “*Digital Divide*”.

1.2 Objectivos

O principal inicial deste trabalho é a análise de soluções capazes de fornecer serviços de banda larga em zonas financeiramente pouco atractivas.

Uma solução só pode ser considerada viável se for encontrado o Equilíbrio do Mercado, ilustrado na Figura 1. Este equilíbrio só pode ser atingindo se a solução tecnológica adoptada permitir fornecer os serviços necessários ao mercado, a um preço acessível aos clientes, isto é, se os custos estiverem dentro dos limites de gastos que os utilizadores estão dispostos a acarretar pela prestação destes serviços.

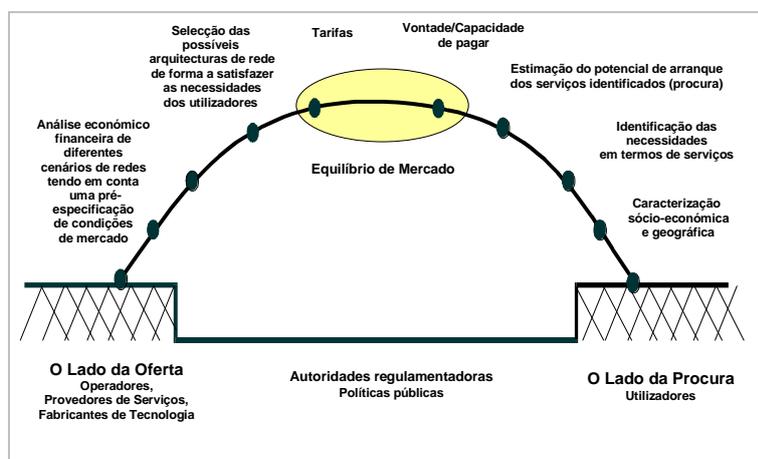


Figura 1 - Relações entre a oferta e a procura no mercado das telecomunicações [15]

Tratando-se de zonas tecnologicamente desfavorecidas, o investimento necessário para a prestação deste tipo de serviços frequentemente excede aquilo que é expectável em termos de retorno. Por esta razão pode ser necessário um financiamento adicional (subsídio, compensação, etc) por parte das entidades governamentais.

Caso este investimento seja suficiente para igualar as despesas de implementação, ainda assim será necessário verificar se as receitas provenientes serão suficientes para cobrir as despesas de operação e manutenção. Quando isto acontece podemos dizer estar perante uma solução sustentável.

Pode acontecer, como se irá verificar, que tal não aconteça, sendo necessário um financiamento constante que diminua o peso das despesas de operação e manutenção.

Para além destes objectivos, foi também estudada uma solução de rede de acesso, FUTON, que tendo inicialmente sido concebida para zonas urbanas com elevados padrões de consumo de largura de banda, se constatou poder ser também atractiva como solução e nova geração para zonas periféricas e rurais.

1.3 Estrutura do Trabalho

Esta dissertação é composta por 5 capítulos, estruturados da seguinte forma:

- **Capítulo 1 – Introdução.**
- **Capítulo 2 – Estruturas de Redes de Telecomunicações:** Neste capítulo são apresentados os principais segmentos que constituem as redes de Telecomunicações, assim como as diferentes tecnologias que permitem a sua implementação.
- **Capítulo 3 – Redes FWA:** Neste capítulo são apresentadas soluções de redes de acesso cuja distribuição é realizada por redes sem fios e são também analisados alguns conceitos de planeamento, de modo a tornar estas soluções mais efectivas.
- **Capítulo 4 – Análise Tecno-Económica de Soluções de Rede:** Neste capítulo é avaliada a viabilidade económica de algumas soluções FWA (*Fixed Wireless Access*) em ambientes menos competitivos.
- **Capítulo 5 – Considerações Finais.** Neste capítulo apresentam-se as conclusões do trabalho efectuado e algumas sugestões para trabalho futuro.

2. Estruturas de Redes de Telecomunicações

As redes de telecomunicações podem ser divididas, como ilustrado na **Figura 2**, em três segmentos principais:

- **Rede Nuclear** (ou de interligação) também conhecida pelo seu termo em inglês (*Core Network*) é o segmento da rede que efectua a interligação entre diferentes redes locais, assim como a interligação entre estas e o resto do mundo;
- **Rede de Acesso** é o segmento que liga a rede nuclear aos utilizadores; Como será explicado na **secção 2.2**, pode ser dividida em vários subsegmentos;
- **Rede do Cliente** é o segmento de rede que conecta todos os equipamentos existentes nas instalações do cliente a um único ponto da rede de acesso.

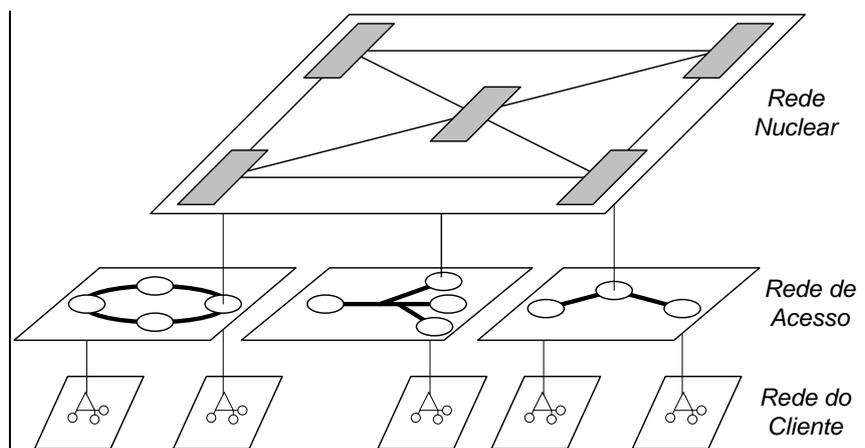


Figura 2 - Segmentos de Rede [15]

Estes segmentos serão analisados separadamente, com mais detalhe, nas secções seguintes.

2.1 Rede Nuclear

Este segmento de rede é responsável pela interligação de todas as redes de acesso. É este que permite aceder a serviços provenientes de outras redes, de outros países, de outros continentes.

Na actualidade a tecnologia de transporte dominante neste segmento é o SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*) que, através de do uso de redundância, permite ligações seguras e com débito elevado, rentabilizando ao máximo o meio físico (maioritariamente fibra óptica) no qual a informação é transportada.

Embora existam várias topologias possíveis para este segmento de rede, é comum utilizar uma topologia em anel pois torna a manutenção mais fácil e garante, ao usar dois anéis, redundância. Esta topologia é ilustrada na **Figura 3**.

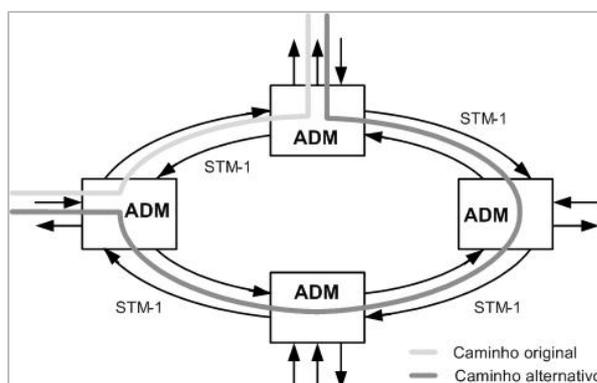


Figura 3 - Estrutura em anel duplo usada pelo SDH [15]

Este tipo de rede baseia-se em tramas com duração de 125 μ s que são a base para o transporte em modo síncrono (STM – *Synchronous Transport Module*). O STM é a estrutura básica de transporte podendo ser multiplexado a vários ritmos de transmissão, criando assim tramas de maior capacidade. O SDH, que apresenta uma estrutura hierárquica, funciona (no seu modo mais básico) a uma velocidade de transmissão de 155,52 Mbps, o equivalente a uma trama STM-1. Graças à multiplexagem de várias tramas STM-1 (múltiplas de quatro) podem ser obtidos novos ritmos de transmissão como, por exemplo, 622,08 Mbps (STM-4) ou 24488,32 Mbps (STM-16). O entrelaçamento byte a byte de N modos STM permite criar estruturas de maior capacidade, STM-N.

O conteúdo de uma trama SDH utilizando o sistema STM-N é ilustrado na **Figura 4**. Pode-se observar que o tamanho da trama é proporcional à quantidade de tramas STM-1 multiplexadas. Esta proporcionalidade permite que a evolução deste protocolo acompanhe a evolução das tecnologias de multiplexagem, isto é, quando o limite máximo de STM-N é alterado, o SDH possui características que lhe permitem adoptar este novo limite. [1]

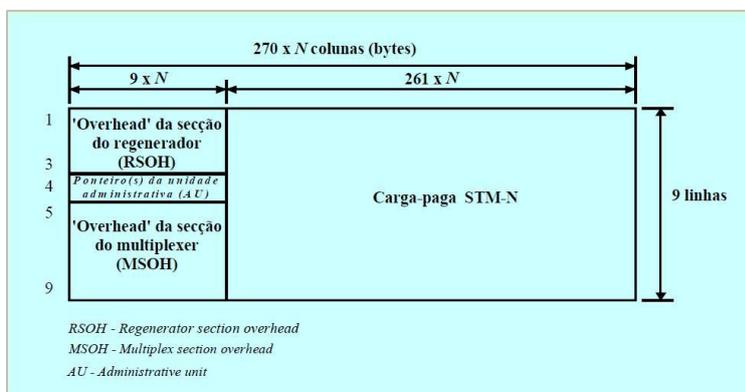


Figura 4 - Trama SDH [1]

Embora existam outras técnicas utilizadas neste segmento de rede, tais como ATM (*Asynchronous Transfer Mode*), FR (*Framde Relay*), X.25, o SDH é complementar a todas elas, isto é, utiliza cada uma destas técnicas para desempenhar determinadas funções.

2.2 Rede de Acesso

A Rede de Acesso é o segmento de rede que faz a interligação entre as centrais locais (CO – *Central Office*) e os equipamentos do cliente.

Este segmento pode ser composto por diferentes tipos de tecnologias que, por sua vez, possuem diferentes meios de transmissão. Estas tecnologias podem utilizar cablagem ou serem *wireless*.

Estas redes, inicialmente desenvolvidas para tráfego de voz, foram evoluindo para tráfego de dados devido à necessidade de se adaptar ao mercado. Esta evolução é progressiva pelo que obriga a existência de ambos os sistemas simultaneamente. Um grande avanço tecnológico para conseguir o equilíbrio necessário entre transmissão e comutação foi o processo de digitalização da rede de acesso, que era completamente analógica até há cerca de 20 anos.

As primeiras tecnologias de transmissão de dados na rede de acesso eram tecnologias que não permitiam ao utilizador usufruir de ambos os serviços simultaneamente, isto é, o utilizador não podia utilizar o serviço de telefonia e o serviço de dados ao mesmo tempo. Ficaram conhecidas como soluções *Dial-Up*.

Estes sistemas de transmissão tornaram-se obsoletos com o surgimento das xDSL (*Digital Subscriber Line*). Estas tecnologias permitem a existência simultânea de vários tipos de tráfego.

Outra tecnologia de rede de acesso muito popular é a HFC (*Hybrid Fiber-Coaxial*). Embora tenha surgido com o objectivo de difusão televisiva por cabo, rapidamente se tornou uma alternativa às xDSL baseadas na rentabilização do cobre “herdado” da rede POTS (*Plain Old Telephone Network*). Actualmente a tecnologia HFC permite, para além da difusão de canais televisivos, tráfego de voz e de dados (Internet).

Recentemente, com o objectivo de aumentar a largura de banda disponibilizada aos clientes, tem-se assistido a um esforço de aproximar a fibra óptica do cliente. Este esforço deu origem às tecnologias FTTx (*Fiber To The x*) que, podendo ser activas ou passivas, dependendo da necessidade de alimentação eléctrica entre os extremos da rede, permitem uma grande variedade de serviços com uma qualidade inatingível pelo cobre.

Os investimentos necessários para implementar tecnologias que necessitem de cablagem são muito elevados, pelo que não são apelativas em mercados menos competitivos ou com baixa densidade populacional. Tem-se assistido, na última década, a uma aumento da capacidade das tecnologias FWA, aumento esse que permite a essa tecnologia competir directamente com as

xDSL ou as HFC. O facto de esta tecnologia utilizar comunicação por rádio diminui os custos de implementação, pelo que rentabiliza redes de banda larga nos ambientes anteriormente referidos.

As tecnologias referidas possuem características distintas. Torna-se necessário avaliar não só qual a tecnologia que melhor servirá o cliente, como também a rentabilidade da solução escolhida. Seguem-se alguns factores necessários para realizar a escolha da tecnologia adequada:

- Quanto maior for o número de utilizador de uma rede de acesso menor será a largura de banda média que cada um terá;
- Quanto maior for a distância percorrida pela informação entre o cliente e o CO, maior serão os fenómenos de distorção, ruído, ...
- Nas redes *fixed wireless acces* (FWA) a largura de espectro influencia directamente a largura de banda disponível, sendo que as frequências mais baixas possuem maior alcance, mas são as frequências mais altas que possuem a melhor relação bit/Hertz.

2.3 Rede do Cliente

A rede do Cliente é o segmento de rede que faz a interligação entre os equipamentos do cliente e a rede de acesso.

A escolha da tecnologia utilizada neste segmento de rede é da responsabilidade do cliente. Poderá basear a sua escolha em factores como a distância ao seu ponto de acesso, número de utilizadores existentes na rede (doméstica, empresarial), infra-estruturas existentes, etc. Também deverá ter em conta quais as tecnologias presentes na rede de acesso que o serve, isto é, as redes dos clientes têm necessariamente de ser compatíveis com as tecnologias utilizadas pelo operador. Esta compatibilidade é indispensável pois a rede do cliente terá de transmitir, comutar e/ou encaminhar os vários serviços prestados pelo operador.

2.4 Alternativas técnicas de fornecimento de serviços de Internet

É necessário encontrar soluções que proporcionem às pessoas e às organizações meios de acesso aos instrumentos da Sociedade da Informação.

Neste contexto, as redes de telecomunicações desempenham um papel fundamental.

Tal como anteriormente indicado, o objectivo central deste trabalho foca-se no segmento de rede analisado na **secção 2.2**: as redes de acesso, mais especificamente na caracterização de soluções tecnológicas que facilitem o desafio de levar Banda Larga às zonas rurais e periféricas.

Existem várias tecnologias candidatas a levar Banda Larga às zonas rurais e periféricas. O que se segue é um estudo detalhado daquelas que se consideram mais adequadas, tanto a nível de capacidade como a nível económico.

De modo a identificar qual a melhor tecnologia, ou combinação de tecnologias, a utilizar para reforçar as infra-estruturas de telecomunicações já existentes, ou para criá-las caso não existam, é considerada uma boa prática não descartar nenhuma tecnologia *a priori*. Esta “neutralidade tecnológica” só deverá descartar certas tecnologias após estas serem devidamente avaliadas.

Antes de iniciar um estudo detalhado das possíveis soluções relativas à rede de acesso, é primordial perceber como pode ser dividido este segmento da rede, de modo a conseguir um planeamento mais eficiente da mesma. A **Figura 5** representa a rede de acesso, dividida em troços diferentes, segundo pontos estratégicos de distribuição. Até há poucos anos todos estes troços, desde da central até casa do cliente, eram constituídos apenas por cobre.

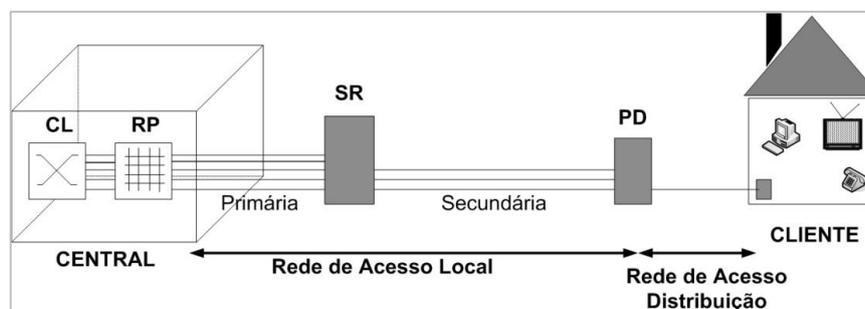


Figura 5 - Rede de Acesso [2]

Com o desenvolvimento de novas tecnologias, e o aumento da procura dos serviços de informação, estas redes foram progressivamente actualizadas. Podem agora co-existir tecnologias diferentes na mesma rede de acesso. As tecnologias utilizadas actualmente podem possuir vários suportes físicos, desde cobre, fibra, ar, etc. Existe a possibilidade de ter uma rede primária com uma determinada tecnologia, uma rede secundária com outra, e ainda uma terceira tecnologia para a rede de distribuição.

Devido à grande variedade de sistemas de telecomunicações nem sempre é tarefa simples garantir a sua inter-compatibilidade, isto é, existem sistemas de comunicações cuja interligação com outro tipo de tecnologia possui um custo acrescido, o que pode tornar estas soluções pouco atractivas. Pode também ocorrer que a passagem de uma tecnologia para outra não seja vantajosa do ponto de vista de engenharia, isto é, quanto mais um troço se aproxima do cliente final, menor será a sua necessidade de Largura de Banda, pelo que não é considerada uma boa prática uma mudança de tecnologia que ofereça maior Largura de Banda do lado do cliente, excepto se for o caso de tecnologias já presentes no local e que serão reaproveitadas, ou se as características geográficas e/ou demográficas da região se mostrem atractivas para determinados sistemas (normalmente sistemas de comunicações sem fios).

A **Figura 6** ilustra algumas das combinações de sistemas de telecomunicações utilizados pelos operadores para fazerem chegar os seus serviços aos clientes finais e proporciona uma perspectiva geral dos assuntos que irão ser discutidos neste trabalho.

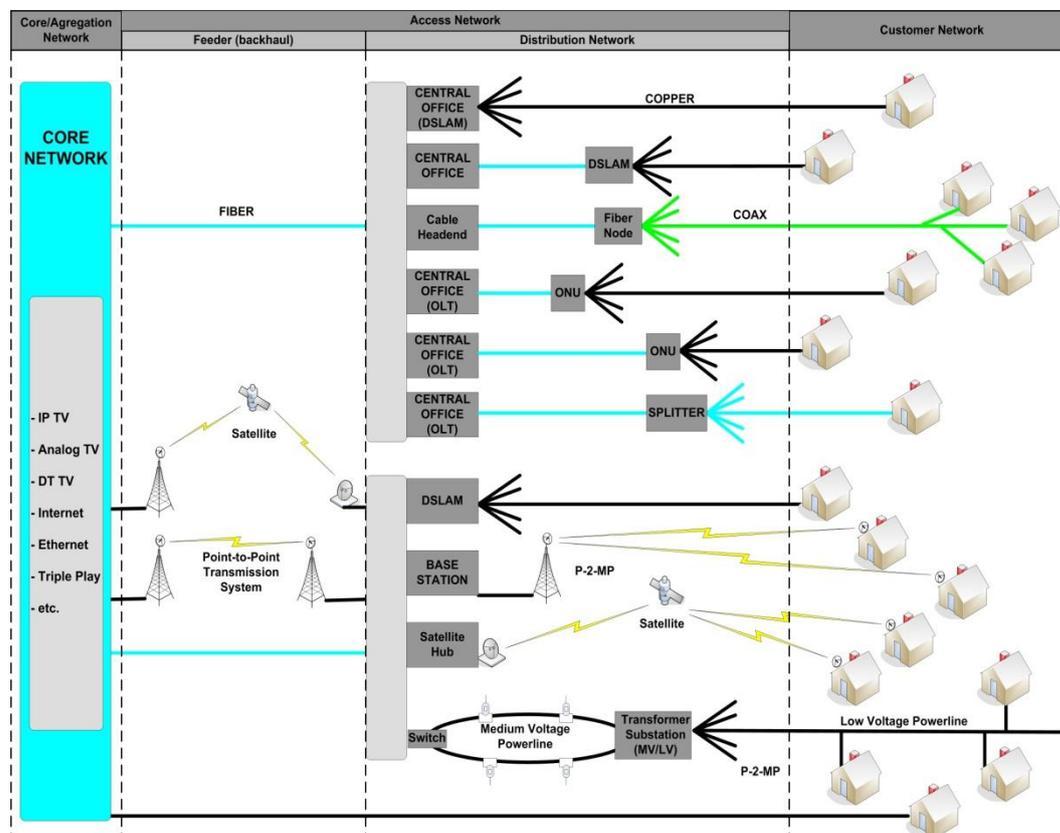


Figura 6 - Redes de Acesso com Soluções Híbridas

É necessária uma percepção de todas estas tecnologias de modo a poder fazer um planeamento eficiente de uma rede de acesso. Um dos aspectos primordiais é de identificar as infra-estruturas existentes, isto é, se existe cobre na rede de acesso, qual a distância à rede nuclear, etc. Verificar a capacidade destas infra-estruturas é imprescindível pois podem não possuir capacidade suficiente, necessitando assim de uma actualização.

2.4.1 Banda Estreita

Quando já existe uma rede de telefonia na região em causa, uma ligação de banda estreita é possível, sendo para isso necessário recorrer a um modem analógico.

Embora pareça uma solução do passado ainda hoje muitas regiões europeias só possuem esse tipo de ligação à Internet (segundo [36] algumas regiões da Europa encontram-se desprovidas de linhas telefónicas pelo que esta solução nunca pode ser implementada, tornando estas regiões cada vez mais excluídas).

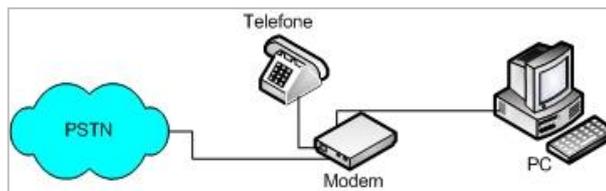


Figura 7 – Acesso a Internet numa rede de cobre com *modem dial-up* [5]

2.4.2 Suporte em Fibra Óptica

Os operadores de telecomunicações têm vindo a desenvolver, a partir da década de 80, redes nucleares em fibra óptica. Este facto deve-se ao crescimento do volume de tráfego nas redes de telecomunicações. Embora inicialmente só tenha sido instalada para efectuar ligações de longa distância, a fibra óptica tem demonstrado grande eficiência na rede de acesso, levando os operadores a investir cada vez mais em redes que utilizem este meio de transmissão, substituindo gradualmente as redes de cobre.

2.4.2.1 FTTx

FTTx é a denominação utilizada para *Fiber To The x*, isto é, sabemos a partir do acrónimo até onde chega a fibra óptica e onde começa a rede em cobre. Cada uma delas possui uma arquitectura diferente, com pontos de terminação, alcances e capacidades diferentes.

Existem várias arquitecturas sendo as mais importantes: FTTN (Fiber To The Node), FTTCab (Fiber To The Cabinet), FTTC (Fiber To The Curb), FTTP (Fiber To The Premises), FTTB (Fiber To The Building) e FTTH (Fiber To The Home).

Segue-se agora uma análise mais detalhada das tipologias acima referidas. Nas arquitecturas FTTN/FTTCab a fibra óptica é “levada” até um armário de rua, sendo que esta pode servir áreas até 1500 metros de raio, desde que possuam uma densidade populacional relativamente reduzida. Esta arquitectura permite o fornecimento dos interfaces POTS (*Plain Old Telephone Service*), ADSL2+, VDSL2 e SHDSL através do ONU (*Optical Network Unit*). Caso se pretenda efectuar a ligação entre o ONU e o utilizador final através de par entrançado de cobre, podem ser utilizadas tecnologias xDSL. Caso essa ligação seja efectuada através de cabo coaxial, é utilizado o protocolo DOCSIS (*Data Over Cable Service Interface Specification*).

Na arquitectura FTTC a fibra óptica é “levada” até um armário de rua (mais próximo dos utilizadores finais), sendo que esta pode servir áreas até 300 metros de raio, desde que possuam uma densidade populacional relativamente reduzida. Esta arquitectura permite o fornecimento dos interfaces POTS e VDSL2 através do ONU. Caso se pretenda efectuar a ligação entre o ONU e o utilizador final através de par entrançado de cobre, podem ser utilizadas tecnologias xDSL. Caso

essa ligação seja efectuada através de cabo coaxial, é utilizado o protocolo DOCSIS. Esta arquitectura difere da anterior no alcance da fibra óptica pois esta permite aproveitar as infra-estruturas de cobre já existentes.

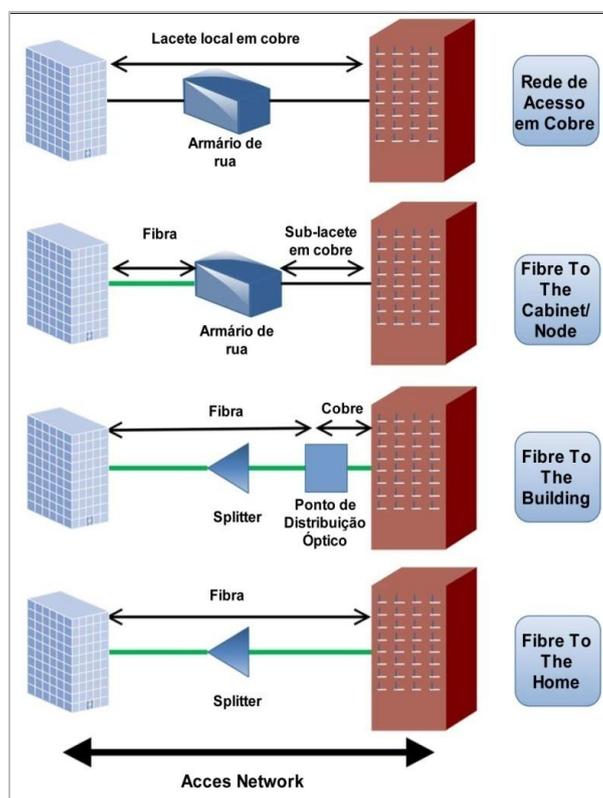


Figura 8 - FTTx [10]

Na arquitectura FTTB a fibra óptica é “levada” até ao edifício. A ligação ao utilizador final é efectuada utilizando cobre ou cabo coaxial, isto é, o sinal óptico é convertido em sinal eléctrico quando chega ao edifício em questão. Esta solução é vantajosa pois permite também o uso de cabos UPT-5 para ligar os utilizadores ao ONU, criando-se uma arquitectura FTTB+LAN, a qual possui custos mais reduzidos na construção. Esta arquitectura é adequada para áreas urbanas com elevada densidade populacional.

Na arquitectura FTTH a fibra chega directamente ao utilizador final, sendo que cada cliente é servido por uma fibra óptica exclusiva. O sinal óptico é convertido em sinal eléctrico quando chega à residência, visto ainda não ser possível o processamento óptico nos equipamentos de uso doméstico. Nesta solução é instalado um ONT (*Optical Network Terminal*) na residência do utilizador final sendo que este pode fornecer serviços de dados, voz e vídeo. O ONT fornece uma interface para POTS, GE (*Gigabit Ethernet*) e FE (*Fast Ethernet*). Oferece uma enorme largura de banda mas os custos de construção associados exigem uma grande densidade populacional, em regiões com muito tráfego de informação.

Existem andares de *splitting* em todas as aquitecturas acima mencionadas, isto é, uma fibra óptica proveniente do CO “alimenta” várias fibras pertencentes a andares seguintes da rede

de acesso. Este processo permite uma hierarquia em estrela, embora seja possível também uma hierarquia ponto a ponto, sendo que esta última é financeiramente menos atractiva.

2.4.2.2 xDSL

As tecnologias DSL (*Digital Subscriber Line*) surgiram no mercado no final da década de 90, tendo sido desenvolvidas em 1989 nos laboratórios Bell. Estas tecnologias usam a rede de cobre da rede PSTN (*Public Switched Telephone Network*) para fornecer serviços de banda larga. Os equipamentos desta tecnologia dividem os dados e a voz em diferentes bandas de frequência, usando para tal técnicas de modulação.

São várias as tecnologias DSL, sendo as mais relevantes:

- ADSL (*Asymmetric DSL*);
- VDSL (*Very-high-bit-rate DSL*);
- SDSL (*Symmetric DSL*);

Cada uma destas tecnologias possui taxas de débito diferentes assim como distâncias máximas ao DSLAM (*Digital Subscriber Line Access Multiplexer*).

Tabela 1 - Características das tecnologias xDSL [adaptado de [10]]

Tecnologia	Capacidade Máxima de Upstream	Capacidade Máxima de Downstream	Distância Máxima ao DSLAM	Capacidade de Downstream @ Distância Máxima	Largura Espectral
ADSL	640 Kbps	12 Mbps	5.4 Km	1.5 Mbps	1.1 MHz
SDSL	3 Mbps	3 Mbps	2.7 Km	2 Mbps	1.1 MHz
ADSL 2+	1 Mbps	26 Mbps	3.6 Km	4 Mbps	2.2 MHz
VDSL	16 Mbps	52 Mbps	1.3 Km	13 Mbps	12 MHz

Todas estas tecnologias seguem podem possuir duas topologias diferentes:

- Quando os utilizadores finais se encontram suficientemente próximos de um *Central Office*;
- Quando os utilizadores finais se encontram demasiado afastados de um *Central Office*;

A **Figura 9** ilustra o primeiro caso, sendo que a distância máxima varia segundo factores como a tecnologia desejada, a qualidade do cobre existente, *etc.*

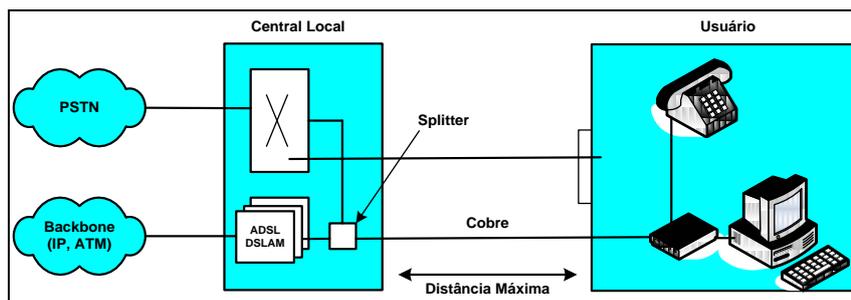


Figura 9 - Topologia de xDSL (1) [5]

Quando os utilizadores finais se encontram demasiado afastados do *Central Office* pode ser utilizada uma outra tipologia de rede em que o DSLAM é instalado num local estratégico (num nó ou num armário de rua) dando origem a segunda topologia.

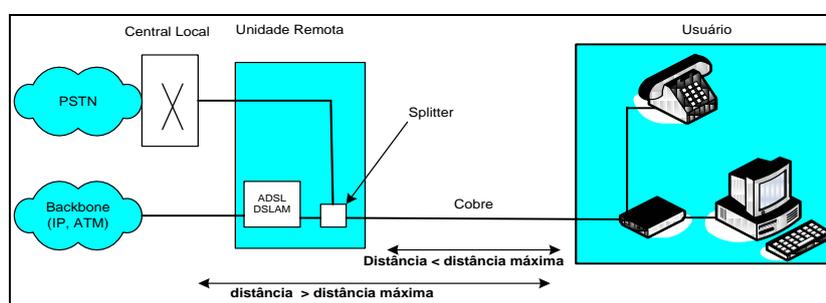


Figura 10 - Topologia de xDSL (2) [5]

2.4.2.3 HFC

Estas redes surgiram como evolução das redes CATV (*Community Antenna Television*), que utilizam cabos coaxiais para transmissão de sinais de vídeo. Embora tenham sido dimensionadas para comunicações descendentes (o sinal era enviado para todos os utilizadores independentemente do seu estado) a necessidade de transmissão de dados obrigou os operadores a possibilitarem comunicações em ambos os sentidos, permitindo assim a diferenciação dos diversos utilizadores.

Esta solução é cada vez mais utilizada pelos operadores que, devido ao desejo de entrar no mercado dos serviços de telecomunicações avançados, necessitam aumentar a largura de banda da sua rede. Trata-se de uma topologia em que se reutiliza a rede de televisão digital, que é suportada por cabos coaxiais e fibra óptica, na maioria dos casos para fornecer serviços de “*triple-play*”.

A **Figura 11** exemplifica a estrutura física base de uma rede HFC, ilustrando os componentes pertencentes às redes transporte e de distribuição, sendo que a rede geral é composta por: cabeça de rede, receptores/emissores ópticos e amplificadores de tronca e de linha.

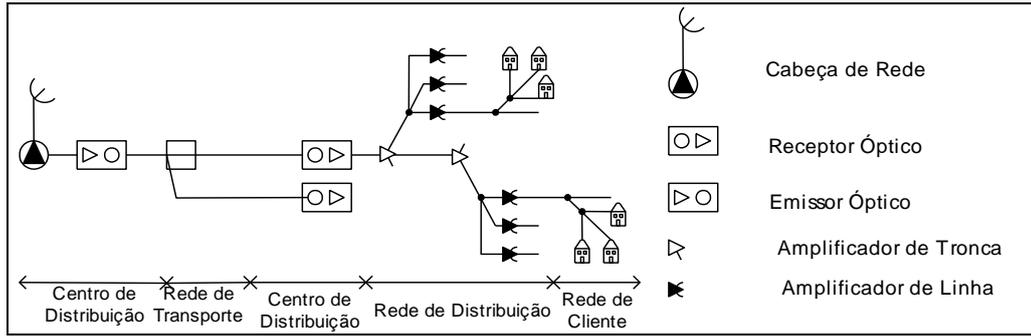


Figura 11 - Estrutura de uma rede HFC [15]

Utilizando DOCSIS 1.1 esta tecnologia é capaz de fornecer ritmos de transmissão na ordem do 30 Mbps num canal de 8 MHz. É para isso necessário recorrer a um *modem* na rede do cliente e a um CMTS (*Cable Modem Termination System*) na cabeça da rede. [15]

2.4.3 Sem suporte Físico

Até agora este documento apenas considerou tecnologias onde já existia uma rede de distribuição com suporte físico, fosse ele de fibra óptica, de cabo coaxial, ou de par de cobre entrançado.

Em muitos casos tal não é verdade: não se pode garantir uma linha telefónica em todas as regiões e a rede nuclear pode estar demasiada afastada para que uma conexão física seja economicamente viável. Irão agora ser apresentadas algumas soluções tecnológicas que não necessitam de ligações fixas, apenas existe a necessidade de um planeamento celular que possa gerir de forma eficiente o espectro de frequências e que possa servir as áreas desejadas.

2.4.3.1 GSM/GPRS

O GSM (*Global System for Mobile communications*) é a tecnologia de telefónica móvel mais utilizada na Europa. É um sistema de telecomunicações que possui capacidade para transmissão de dados, voz, e alguns serviços complementares muito comuns em sistemas de comunicações móveis (SMS, reencaminhamento de chamadas, *etc.*). Embora só permita taxas de transmissão de dados na ordem dos 14.4 Kbps, esta tecnologia conseguiu ultrapassar barreiras trazendo grandes melhorias em relação à tecnologia analógica.

O GPRS (*General Packet Radio Services*) veio rectificar algumas desvantagens do seu antecessor (GSM) introduzindo transmissão de pacotes. Esta inovação só foi possível graças à rede GSM já existente pois estes dois sistemas de telecomunicações existem em paralelo, sendo a rede de GSM responsável pelo tráfego de voz (comutação de circuitos) e a rede GPRS responsável pelo tráfego de dados (comutação de pacotes). Este sistema permite, graças a este

paralelismo de redes, obter taxas de transmissão até 171 Kbps. O paralelismo anteriormente referido é agora analisado com mais detalhe. Uma rede GPRS utiliza os seguintes componentes da rede GSM (sendo necessário efectuar um *update* aos mesmos): BSC (*Base Station Controllers*), MSC (*Mobile Switches*), HLR e VLR (*Home and Visitor Location Register*), assim como os *links* de transmissão da BS para a BSC e da BSC para a MSC. Existem, como é óbvio, componentes adicionais que são necessários instalar na BS: TRX (transmissores) e *packet subsystems*.

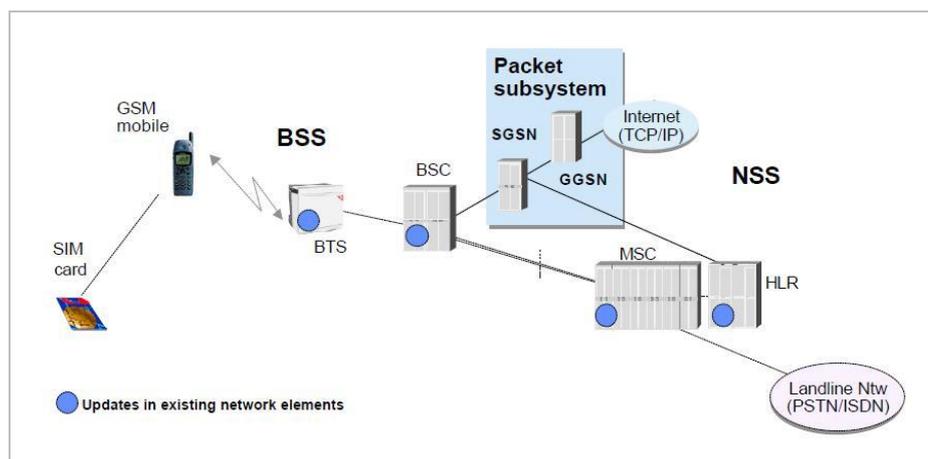


Figura 12 - Upgrade de GSM para GPRS [29]

O *packet subsystem* é composto por equipamento que fornece funcionalidades necessárias para o tráfego orientado por pacotes. São necessários acrescentar componentes como:

- SGSN (*Serving GPRS Support Node*) – ligado a um BSC, ou mais, responsável pela gestão das chamadas de dados, do tráfego e da informação de facturação (um por cada 100 000 clientes);
- GGSN (*Gateway GPRS Support Node*) – responsável pela interconexão entre redes de outro tipo (IP, X25, ...), pelas *firewall*, facturação e funções de informação de encaminhamento (um por cada 10 000 clientes);
- DNS (*Domain Name Server*) – sistema que gere uma base de dados e que atribui endereços IP (um por cada SGSN);
- HLR (*Home Location Register*) – sistema que recebe e processa directamente transacções e mensagens MAP (*Mobile Application Part*) (um por cada 1 000 000 clientes).

2.4.3.2 UMTS

O sistema UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*) é uma das tecnologias de terceira geração das comunicações móveis. O seu principal objectivo é obter um padrão universal para todas as comunicações móveis. Este tipo de sistema consegue taxas de transmissão na ordem dos 2 Mbps utilizando para isso uma modulação W-CDMA (*Wide-Band Code-Division Multiple Access*) ou CDMA2000 (*Code Division Multiple Access*). Esta tecnologia permite uma fácil interligação com outros sistemas de telecomunicações, tais como a PSTN ou uma rede de dados, tornando-se assim possível um utilizador movimentar-se para ambientes diferentes.

Tal como acontece com um sistema GPRS, um sistema UMTS pode ter por base um sistema de comunicações móveis já existente. Quando tal acontece ter-se-á equipamento de rádio capaz de acomodar sistemas como GSM, GPRS, EDGE (*Enhanced Data rates for GSM Evolution*) e UMTS ao mesmo tempo, de modo a facilitar a passagem de GSM para UMTS. Um sistema deste género pode ser representado pela **Figura 13** sendo que, se fosse considerado um sistema UMTS simples (sem os componentes das outras tecnologias), as BTS e BSC de GSM não estariam presentes.

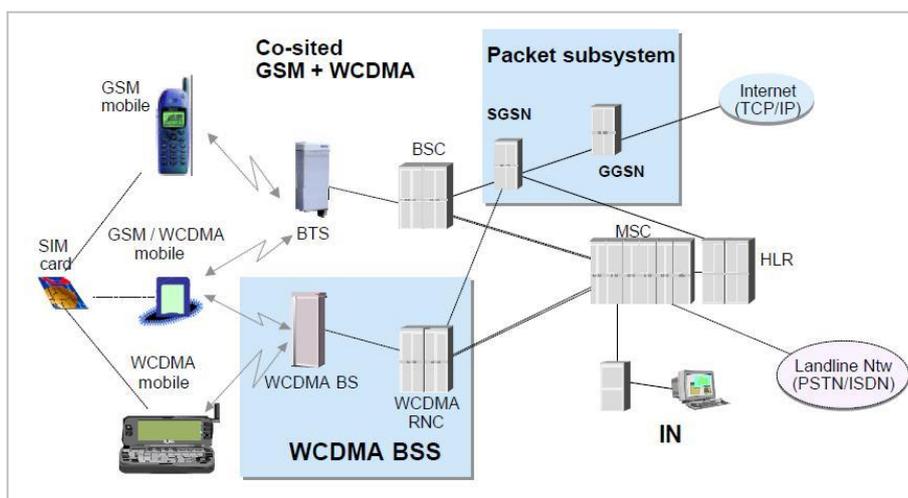


Figura 13 - Arquitectura de um sistema UMTS [29]

Os elementos imprescindíveis para um sistema UMTS são:

- BSS (*Base Station Subsystem*) – cada estação base possui vários sectores com 5 MHz a 15 MHz cada (um BSS por cada estação base);
- RNC (*Radio Network Controllers*) – fornece apoio à gestão das chamadas de dados, do tráfego e da informação de facturação (um por cada 256 estações base).

O dimensionamento de sistemas deste género é feito calculando o alcance máximo da estação base e o alcance máximo de modo a garantir a conexão dos utilizadores segundo uma determinada taxa de transmissão, sendo que se utiliza o menor destes dois valores. De modo a

garantir cobertura é necessário proceder ao cálculo do raio da célula através de um *link budget* representativo do *uplink*, visto que os equipamentos móveis possuem mais limitações de potência que as estações base. Este raio irá ser diferente consoante a morfologia da zona em que nos encontramos, isto é, depende da densidade populacional e do tipo de obstáculos existentes (árvores, edifícios, etc.).

2.4.3.3 HSPA

Desde a sua introdução no mercado que as tecnologias de terceira geração de comunicações móveis têm sido anunciadas como soluções tecnológicas com grandes capacidades, tanto à nível da quantidade de canais de voz possíveis como pela elevada largura de banda dos canais utilizados para transmissão de dados. Embora estas tecnologias fossem muito prometedoras, graças a alta qualidade de voz e capacidade de *streaming*, os operadores cedo descobriram que apenas se tratava de um ajuste com capacidade de transportar tráfego de dados sobre a rede móvel existente e que não seria uma solução viável para tráfego de banda larga.

A tecnologia HSPA (*High Speed Packet Access*) foi desenvolvida para preencher esta falha, isto é, faz a ligação entre a rede móvel (3G- 3rd Generation) e os serviços de internet, permitindo sobrepor os vários protocolos que possibilitam uma comunicação por dados à alta velocidade, para vários utilizadores servidos pela mesma célula. Embora esta tecnologia permita larguras de banda na ordem dos 14 Mbps (21 Mbps para HSPA+) os utilizadores raramente obtêm as larguras de banda esperadas (desde de 1Mbps até 21,6 Mbps) devido ao elevado factor de concentração necessário para esta tecnologia seja rentável¹.

2.4.3.4 LTE

A tecnologia LTE (*Long Term Evolution*), normalizada pela versão 8 de 3GPP (3rd Generation Partnership Project), foi desenvolvida pelas seguintes motivações:

- Necessidade de assegurar a continuidade competitiva dos sistemas 3G;
- Exigência dos utilizadores para maiores velocidades de transmissão e maior qualidade de serviço;
- Sistema otimizado para comutação de pacotes;

¹ Esta tecnologia será abordada com mais detalhe nos capítulos seguintes.

- Reduções no CAPEX (*Capital Expenditure*) e no OPEX (*Operational Expenditure*);
- Baixa complexidade;
- Evitar a fragmentação desnecessária de sistemas emparelhados (e não emparelhados) com a mesma frequência de operação.

As principais características desta tecnologia são:

- Grande eficiência spectral;
- Latência muito baixa;
- Suportar várias larguras de banda;
- Arquitectura composta por protocolos simples;
- Compatibilidade e capacidade de funcionar conjuntamente com versões anteriores de 3GPP;
- FDD (*Frequency-Division Duplexing*) e TDD (*Time-Division Duplexing*) com uma única tecnologia de acesso por rádio;
- Eficiência de transmissão directa e multiplexada (através de OFDM);
- Suportar operações SON.

2.4.3.5 Wi-Fi

A tecnologia Wi-Fi (*Wireless Fidelity* ou IEEE 802.11) foi desenvolvida com objectivo de proporcionar redes de cliente sem fios. Podendo atingir velocidades até 108 Mbps, esta tecnologia não é utilizada na rede de acesso devido à sua limitação de potência de transmissão (imposta devido ao facto de esta funcionar em frequências não licenciadas).

Visto o principal mercado desta tecnologia ser a rede do cliente os fabricantes não sentem necessidade de fornecer muita largura de banda pelo que os equipamentos não possuem capacidade de atribuição de canais, isto é, apenas funcionam com um canal, dividindo-o pelos utilizadores através de TDD.

Esta mentalidade poderá mudar nos próximos anos devido ao aumento de largura de banda da rede de acesso, isto é, poder-se-á atribuir um canal a cada utilizador, agregando o tráfego destes para um único terminal de ligação à rede de acesso.

2.4.3.6 WiMAX

A tecnologia WiMAX (*World Wide Interoperability for Microwave Access*), também conhecida como IEEE 802.16, é um sistema de comunicação digital sem fios, cujo objectivo é possibilitar a criação de WMAN. Esta tecnologia possui um alcance muito superior ao Wi-Fi pois funciona em frequências licenciadas, o que permite a utilização de potências de transmissão mais elevadas.

O WiMAX possui a capacidade de transmitir informação em várias modulações, consoante o *bit error rate* máximo tolerado, permitindo aos utilizadores aceder a serviços de internet, com uma largura de banda comparável às tecnologias xDSL. O protocolo que serve de base a esta tecnologia permite um uso mais eficiente dos canais, diminui as interferências, e permite transportar tráfego de elevado débito através de longas distâncias.

2.4.3.7 Satélite

A tecnologia que permite transmissão de dados por satélite mais utilizada actualmente é normalizada pelo padrão DVB-RCS (*Digital Video Broadcast Return Channel System*). Com o padrão DVB a ser utilizado para difusão de televisão em muitas regiões do mundo, surge a oportunidade de utilizar o novo padrão, que possui a capacidade de gerar canais de retorno, para transmitir tráfego de banda larga em áreas desprovidas de qualquer sistema de telecomunicações.

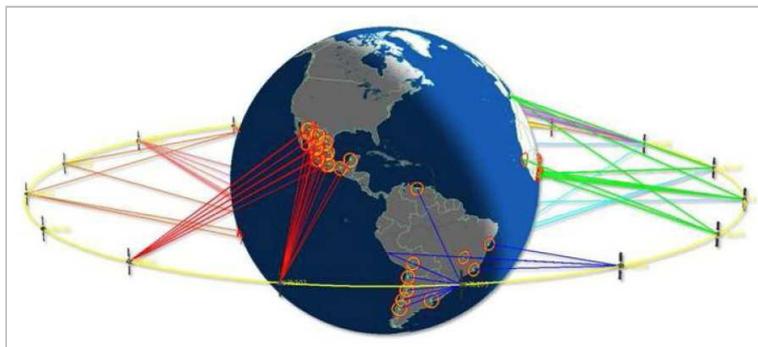


Figura 14 - Comunicação entre Terra e Satélites [36]

Dependendo do *link budget* entre o equipamento presente na Terra e o satélite, assim como outros parâmetros, Este sistema permite fornecer até 20 Mbits/s para cada terminal (*Downlink*) e receber 5 Mbit/s destes (*Uplink*).

3. Redes FWA

As soluções tecnológicas apresentadas na secção 2.4.3 são de grande interesse pois tratam-se de tecnologias que requerem custos reduzidos na implementação da rede de distribuição. São, no entanto, soluções que necessitam de uma abordagem cuidadosa devido ao facto do seu meio de distribuição poder ser partilhado por vários operadores simultaneamente e o espectro de frequências ser limitado.

Ao dimensionar redes de acesso através de soluções FWA é necessário ter em conta certas considerações tais como a capacidade de cada célula, o alcance das antenas, o posicionamento das estações bases, a gestão dos clientes, o crescimento da procura...

Segue-se agora uma descrição de alguns componentes necessários para implementar soluções deste tipo, assim como algumas considerações necessárias para garantir redes estáveis, do ponto de vista das interferências.

3.1 Topologias Genéricas de uma Solução FWA

Antes de analisar os componentes de uma solução FWA (*Fixed Wireless Access*) é necessário conhecer as diferentes topologias que estas tecnologias podem tomar. Como qualquer rede de acesso elas são compostas por:

- Rede Primária (*feeder network*) – é o segmento que efectua a ligação entre a central local e a rede de distribuição. Pode ser implementada a partir das mais diversas tecnologias, sendo que as mais comuns são as soluções de fibra óptica (com elementos passivos e/ou activos), *Radio Link* (quando a comunicação é feita através de duas antenas direccionais) e transmissão por satélite (muito útil para chegar a zonas remotas e isoladas);
- Rede de Distribuição – é o segmento que efectua a ligação entre o utilizador final e o resto da rede. Tratando-se de soluções FWA este segmento será constituído por soluções que não requerem suporte físico para transportar a informação (os sinais propagam-se pelo ar). Neste trabalho será dado ênfase às redes de distribuição que utilizam as tecnologias WiMAX (*World Wide Interoperability for Microwave Access*) e LTE (*Long Term Evolution*).

A **Figura 15** ilustra as topologias possíveis destas soluções, acima descritas.

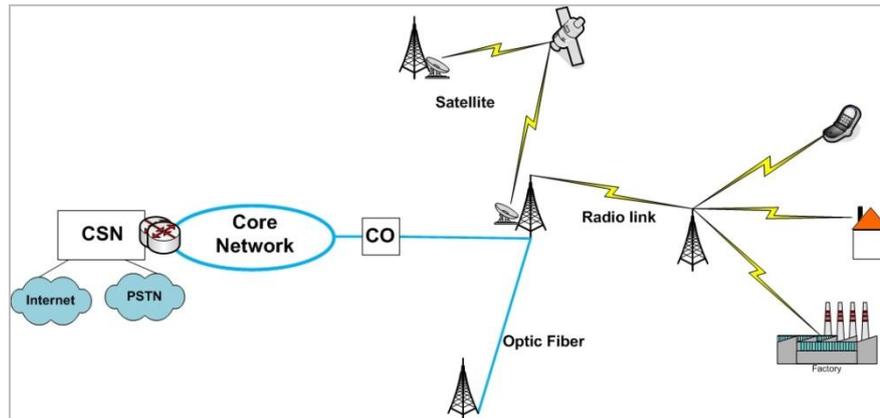


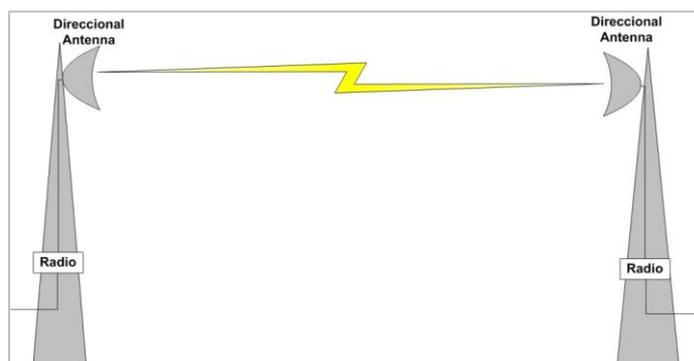
Figura 15 - Topologias Genéricas de uma Rede FWA

3.2 Rede Primária

Como já foi referido anteriormente, existem várias hipóteses para implementar a rede primária de uma solução FWA. Serão agora analisadas as duas opções mais viáveis, sendo que se descarta a hipótese de uma rede primária por satélite devido aos custos excessivos do aluguer dos canais.

3.2.1 Radio Link

Um *Radio Link* é uma topologia de rede primária que, utilizando duas antenas direccionais, permite estabelecer uma ligação entre dois pontos afastados por alguns quilómetros, desde que estes possuam linha de vista entre eles. Este tipo de transmissões são muito utilizados em zonas onde não existe rede nuclear e servem, na maioria dos casos, para ligar os diferentes pontos da rede de distribuição a um único ponto de agregação podendo, para esse efeito, utilizar as mais diversas técnicas, desde ponto-a-ponto, *mesh*, *grid*, etc. A **Figura 16** ilustra a arquitectura deste tipo de tecnologia.

Figura 16 - Arquitectura Base de um *Radio Link*

Os principais componentes desta tecnologia são as antenas direccionais (que possuem um ângulo de feixe muito apertado) e os *radio transceivers*. A utilidade destes equipamentos é:

- Antena: Efectuar a ligação entre os dois pontos desejados, com sinais cuja frequência de operação está entre os 15 e os 38 GHz;
- Radio Transceivers: São equipamentos que modulam os sinais de modo a operarem segundo os protocolos desejados, isto é, altera os sinais consoante o protocolo do próximo sistema de telecomunicações que os irá utilizar.

Com o aparecimento de tecnologias de distribuição sem fios de alto débito, esta topologia de rede primária tornou-se obsoleta. Embora permita efectuar ligações entre distâncias consideráveis (dezenas de km), a sua capacidade, para além de estar limitada a algumas centenas de Mbps, é fortemente atenuada pela distância e pelas condições atmosféricas, isto é, um sistema deste tipo verá a sua capacidade de tráfego cair subitamente se existirem condições climatéricas adversas.

3.2.2 Fibra Óptica

Este tipo de ligações consegue débitos na ordem dos Gigabits por segundo. Actualmente esta é a única solução com capacidade para transportar o tráfego das estações base de/para um ponto de agregação, visto as novas tecnologias de FWA conseguirem, consoante a tecnologia e arquitectura de distribuição, sistemas de telecomunicações com tráfego de dados na ordem das centenas de Megabits por segundo.

A arquitectura de rede primária em fibra óptica que se irá analisar ao longo deste trabalho apresenta uma topologia ponto-a-ponto, isto é, uma fibra dedicada liga um OLT (*Optical Line Terminal*), que se encontra no Central Office, a um ONT (*Optical Network Terminal*). Tanto o OLT como os ONU são equipamentos activos (necessitam de energia eléctrica) e estão equipados com um laser óptico. A **Figura 17** ilustra este tipo de rede primária.

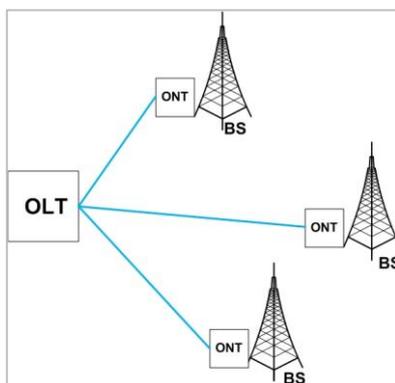


Figura 17 - Arquitectura P2P em fibra óptica

De um modo genérico, implementando uma solução ponto-a-ponto sem partilha de fibra, os equipamentos necessários serão:

Tabela 2 - Relação dos equipamentos da rede primária

Equipamento Necessário	Capacidade de Servir
1 ONT	1 Célula
1 fibra dedicada	1 Célula
1 carta OLT (com 4 portos)	4 Células
1 OLT (16 slots para cartas)	64 Células

3.3 Distribuição

Como já foi acima referido, este trabalho irá dar mais atenção as soluções tecnológicas nas quais a rede de distribuição não necessita de cablagem. Segue-se agora uma descrição mais detalhada das tecnologias que irão ser analisadas.

3.3.1 Redes WiMAX

Durante os últimos anos, o “WiMAX Fórum” tentou fazer desta tecnologia a solução completa para todos os mercados de banda larga. Apesar do seu potencial, a aceitação do mercado nunca se aproximou do esperado. O WiMAX aparece agora como uma solução interessante para mercados inexplorados e sem quaisquer infra-estruturas, pois é considerada como uma solução de distribuição menos dispendiosa.

Esta tecnologia pode ser dividida em duas camadas principais:

- A camada física (“WiMAX PHY”);
- A camada MAC (“IEEE 802.16 MAC”);

Torna-se necessário analisar estas duas camadas pois são elas que diferenciam esta tecnologia das outras tecnologias de distribuição sem fios.

Camada Física:

Similarmente ao Wi-Fi, o WiMAX baseia-se nos princípios de OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), uma boa técnica de modulação/acesso quando estamos perante situações NLOS (sem linha de vista). É também a técnica utilizada para transmissão de vídeo, multimédia e transmissão de dados na maior parte dos sistemas de banda larga.

O OFDM é apenas uma parte dos esquemas de transmissão por modulação multicanal, que são baseados na ideia de dividir um sinal de alto débito em vários sinais de débito mais baixo

paralelos, e modular estes novos em canais diferentes, chamados subcanais. Estes esquemas diminuem as interferências entre símbolos (ISI – *Inter Symbol Intererence*) ao prolongarem a duração do sinal de modo a que os atrasos introduzidos pelo canal representem uma menor fracção de tempo em relação à duração do símbolo.

Isto significa que, em sistemas de alto débito em que a duração dos símbolos é muito curta, visto esta ser inversamente proporcional à taxa de dados, dividir o fluxo de dados em vários fluxos paralelos aumenta a duração dos símbolos de modo a que a os atrasos de propagação apenas representam uma pequena fracção deste tempo.

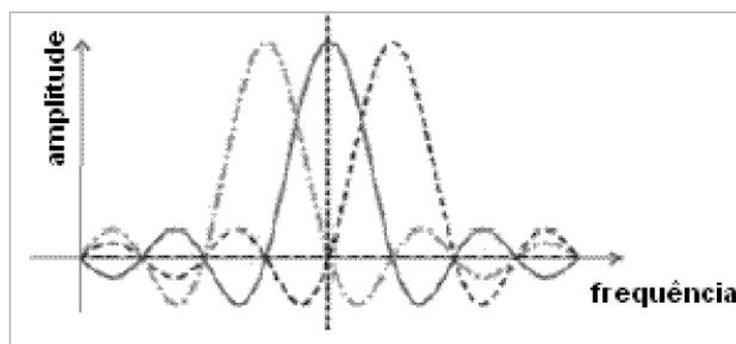


Figura 18 - Espectro de três subportadoras formando um sinal OFDM [3]

O OFDM é uma versão bastante mais eficiente de modulação multicanal, visto os subcanais serem escolhidos por serem ortogonais entre eles durante a duração do símbolo, sendo assim desnecessário a utilização de subcanais que não se sobreponham (se os subcanais não fossem ortogonais entre si durante a duração do símbolo, teriam de ser escolhidos subcanais que não se sobrepussem, de modo a não haver interferências entre eles). De modo a garantir que todos os subcanais são ortogonais entre eles durante a duração do símbolo é necessário escolher um primeiro subcanal cuja frequência garanta um número inteiro de ciclos na duração de um símbolo, e definir o espaçamento entre subcanais adjacentes como sendo:

$$BSC = \frac{\text{Largura de Banda Nominal}}{n^{\circ} \text{ de subcanais}}$$

Esta expressão garante que todos os subcanais são ortogonais entre si durante a duração de um símbolo.

Camada MAC (*Media Access Control*):

A camada MAC do WiMAX possui uma arquitectura de rede ponto-a-multiponto, suportando também arquitecturas *mesh*. Ao nível da rede primária a camada MAC do WiMAX pode seguir os protocolos ATM (*Asynchronous Transfer Mode*) ou IP (*Internet Protocol*).

Esta camada pode ser dividida em 3 subcamadas:

- Service Specific Convergence Sub-Layer – fornece o mapeamento dos dados externos através de um CS-SAP (*Convergence Sub-layer- Service Access Point*);
- MAC Common Part Sub-Layer – responsável pela classificação dos SDU (*Service Data Unit*) da rede externa, da sua associação ao fluxo de serviço MAC adequado, e da atribuição de um identificador de conexão;
- Privacy (and Security) Sub-Layer – responsável pela autenticação, troca de chaves de segurança e encriptação.

A camada MAC do padrão 802.16 é diferente das versões de MAC anteriores. Esta é orientada à conexão e utiliza uma abordagem similar ao TDMA (*Time-Division Multiple Access*). Quando um utilizador se liga à rede, são criadas uma ou mais conexões de modo a comunicar com a estação base, e o equipamento do utilizador também utilizará funções ARQ (*Automatic Repeat reQuest*) para garantir uma menor taxa de erros de transmissão. Esta camada também possui um melhor suporte para serviços de multimédia, proporcionando uma diferenciação de QoS (*Quality of Service*) para os diferentes tipos de serviços. De modo a permitir que a camada física suporte OFDMA (*Orthogonal Frequency-Division Multiple Access*), a camada MAC atribui *frames* nas zonas desejadas para todos os utilizadores, distribuindo a capacidade do sistema por todos os clientes ligados.

Esta camada também é responsável pelos procedimentos de *handover*, sendo que não é delineado nenhum procedimento específico. O *handover* pode ocorrer quando o utilizador está em deslocação e necessita de mudar de estação base, devido à falta de potência dos sinais, ou quando a QoS de uma estação base vizinha apresenta ser melhor que aquela que se encontra a servir o cliente num dado instante.

Uma realizado o *handover*, a aquisição da topologia da rede é feito em três etapas:

1. Network Topology Advertisement – uma estação base transmite a informação acerca da topologia da rede, informação esta que pode ser obtida através da rede primária;
2. Equipamento do utilizador explora as estações base vizinhas – o equipamento do utilizador explora as estações base vizinhas verificando a sua viabilidade como candidatas para *handover*. A estação base pode alocar intervalos de tempo onde o equipamento do utilizador se sincroniza ao *downlink* e calcula a qualidade física do canal.
3. Associação – O objectivo deste procedimento de agrupamento opcional é de permitir que o equipamento do utilizador adquira e registe parâmetros de agrupamento e informação sobre a disponibilidade dos serviços, de modo a auxiliar uma *handover* apropriado.

3.3.1.1 Capacidade de Distribuição da Tecnologia

O objectivo de planear a capacidade da rede é de calcular o número de estações bases e sectores de FWA para cumprir as exigências de capacidade de tráfego para todos os subscritores de uma dada área. Quando se dimensiona uma rede de distribuição sem fios a capacidade do sistema depende directamente do tipo de modulação utilizada pois diferentes tipos de modulação necessitam de quantidades diferentes de bits por cada símbolo, assim como diferentes eficiências espectrais.

Tabela 3 - Débito em função da modulação [3]

LB(MHz)	BPSK $1/2$	QPSK $1/2$	QPSK $3/4$	16-QAM $1/2$	16-QAM $3/4$	64-QAM $2/3$	64-QAM $3/4$
1,75	0,73	1,04	2,18	2,91	4,36	5,94	6,55
3,5	1,46	2,91	4,37	5,82	8,73	11,65	13,09
5	2,08	4,16	6,23	8,31	12,47	16,62	18,70
7	2,91	5,82	8,73	11,64	17,45	23,75	26,18
10	4,16	8,31	12,47	16,63	24,94	33,25	37,40
20	8,32	16,62	24,94	33,25	49,87	66,49	74,81

Se for considerada uma rede de distribuição com base no padrão 802.16e poderá ser utilizada uma modulação adaptativa, isto é, ter-se-ão vários tipos de modulação em áreas cobertas pelas mesmas células, sendo que o tipo de modulação será determinado em função do SNR (*Signal-to-Noise Ratio*) (E_b/N_0). Como se pode verificar pela tabela acima as taxas de débito variam significativamente com o tipo de modulação utilizado. O uso de diferentes modulações na mesma célula poderá parecer prejudicial a nível de taxa de débito mas, na realidade, é bastante benéfico pois permite aumentar o tamanho das células consideravelmente utilizando modulações de mais alto débito (e maior SNR) para clientes mais próximos da estação base e modulações com menor débito (e menor SNR) para os clientes que se encontram mais afastados, mantendo a preocupação de não utilizar modulações que não permitam atingir o débito desejado pelos clientes. Essa situação é ilustrada na **Figura 19**.

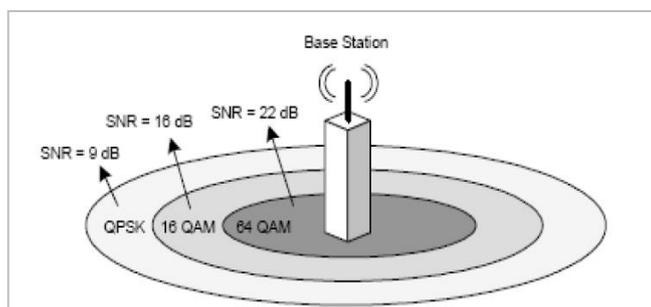


Figura 19 - Modulação adaptativa [3]

Segundo [3] a utilização dos métodos acima descritos permite a realização de células com vários sectores, sendo que cada sector terá, em média, 25 Mbps de capacidade e poderá alojar até 200 utilizadores.

A relação número de utilizadores / capacidade do sector não é linear, isto é, existem vários factores a ter em consideração para se obter o número máximo de assinantes por sector. Este valor pode ser obtido através da seguinte fórmula:

$$N = \frac{C_{total}}{\sum \%n_i * \frac{T_i}{F_{cont}}}$$

Na qual:

- **N** é o número máximo de utilizadores do sector;
- **C_{total}** é a capacidade total do sector;
- **%n_i** é a percentagem de utilizadores do tipo i;
- **T_i** é a largura de banda desejada para os utilizadores do tipo i;
- **F_{cont}** é o factor de contenção.

De todas as variáveis acima citadas, o factor de contenção é a que requer mais explicações. Quando se dimensiona uma rede de acesso com tecnologias sem fios é necessário ter em conta que os utilizadores não estarão sempre a usufruir do serviço prestado, podendo assim serem divididos em grupos com prioridades diferentes. O uso deste factor tornou-se muito popular em todo o tipo de redes de telecomunicações pois permite servir mais clientes com o mesmo investimento, diferenciar vários tipos de clientes atribuindo-lhes factores de contenção diferentes, variando assim a sua prioridade de acesso.

3.3.1.2 Estações Base

Um dos pontos de agregação de tráfego mais importante numa rede FWA é a estação base. Esta é o centro da rede de distribuição, fazendo a interligação entre a rede primária (ou *feeder*) e os equipamentos dos clientes.

De modo genérico uma estação base é constituída, como se pode observa na **Figura 20**, por um *router*, um *switch*, um *modem*, um *radio transceiver* (por sector) e uma (ou mais) antena(s) (por sector)².

² Neste contexto uma antena é constituída por um *array* de dipólos.

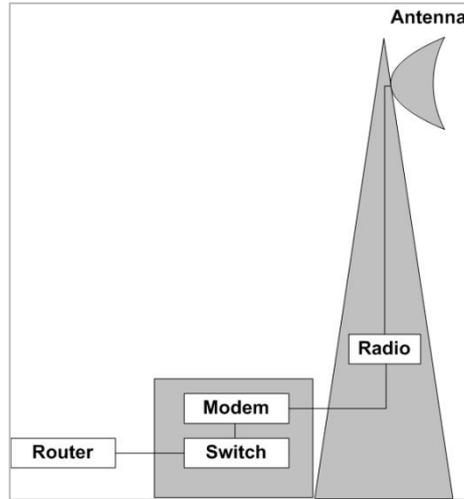


Figura 20 - Arquitectura de uma Estação Base [38]

A antena é o equipamento destinado a transmitir ou receber ondas electromagnéticas. A escolha do tipo de antena é baseada em factores como a eficiência às frequências desejadas, largura de banda e características de directividade.

O *radio transceiver* é um equipamento que transmite o sinal de/para a antena. Determina a potência necessária relativamente ao *link budget* desejado.

O *modem* é um equipamento que modula o sinal das portadoras analógicas de modo a codificar a informação de analógico para digital, e *vice-versa*. O seu principal objectivo é de gerar sinais que possam ser facilmente transmitidos e decodificados.

O *switch* é um equipamento destinado a juntar/dividir a informação proveniente/destinada de cada sector, isto é, trata-se de um equipamento que, de um modo simplista, faz a passagem entre as redes correspondentes a cada sector e ao exterior.

O *router* destina-se a efectuar a conexão entre a rede de transporte (*feeder network*) e a rede de distribuição.

Embora todas as soluções baseadas neste tipo de tecnologia possuam os mesmos componentes básicos, podem-se obter várias arquitecturas diferentes através da utilização de diferentes tipos de antenas. Existem antenas com variados ângulos de feixe, sendo as mais comuns são antenas com ângulos de feixe de 30°, 45°, 60°, 90° e 120°.

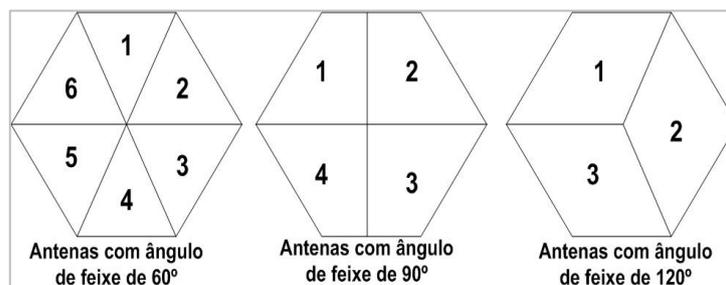


Figura 21 - Diferentes arquitecturas de distribuição

Como se pode observar de **Figura 21**, antenas com diferentes ângulos de feixe geram células com quantidades diferentes de sectores. Como foi referido na secção anterior a capacidade média de um sector é fixa.

O alcance máximo de uma célula é definido pelo *habitat* em que esta se encontra. Significa isto que o uso de antenas com ângulo de feixe mais apertado apenas irá aumentar a capacidade total da mesma, aumentando o número de sectores.

Foram desenvolvidos, ao longo dos anos, vários modelos de propagação que permitem determinar, consoante o ambiente em que o sistema irá ser instalado, o alcance das estações bases para o qual o sinal possui uma relação sinal/ruído suficientemente elevada para garantir comunicação entre o equipamento do cliente e a estação base.

3.3.1.3 CPE

Nesta solução o CPE (*Customer Premise Equipment*) é o equipamento que irá servir de base para a rede do cliente, isto é, o CPE interliga todos os equipamentos do cliente (PC, telefone, televisão, ...) à rede de acesso.

Para efectuar tal interligação o CPE necessita, de um modo genérico, de uma antena e de um *modem* (ou *router*).

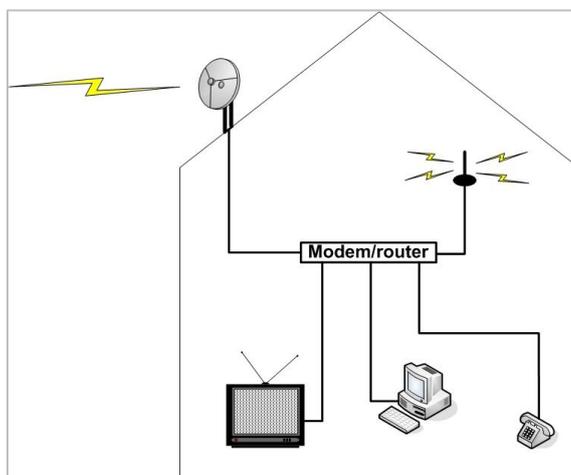


Figura 22 - Arquitectura de um CPE

Como referido acima a antena é o equipamento destinado a transmitir ou receber ondas electromagnéticas. A escolha do tipo de antena é baseada em factores como a eficiência às frequências desejadas, largura de banda e características de directividade. Para o caso específico de um CPE existem dois tipos de antenas de interesse:

- Antenas indoor: antenas omnidireccionais com ganho reduzido (úteis para clientes cuja localização garante uma grande qualidade de sinal). Estas antenas possuem custos reduzidos e não requerem instalação especializada.

- Antenas outdoor: antenas omnidireccionais com ganho reduzido (úteis para clientes cuja localização não garante uma grande qualidade de sinal). Estas antenas possuem custos mais elevados e requerem instalação especializada.

O *modem* (ou *router*) é o equipamento que efectua a ligação entre os sinais adquiridos pela antena e os equipamentos do cliente.

3.3.1.4 Evolução da tecnologia

Esta tecnologia tem origem nos padrões 802.16 de IEEE. Estes padrões foram definidos para lidar com as camadas físicas e MAC das redes locais e metropolitanas. Mais especificamente, o padrão 802.16 é uma solução para WMAN (*Wireless Metropolitan Area Network*). Embora já existissem soluções sem fios para redes locais (802.11), a aplicação deste tipo de soluções para redes metropolitanas é bastante recente. Estes padrões foram inicialmente desenvolvidos para fornecer o acesso à banda larga de uma forma fixa e sem fios, competindo directamente com soluções por cabo (como as DSL ou as HFC). A grande vantagem de utilizar tecnologias sem fios é a redução dos custos de implementação (quando comparado com soluções por cabo), a possibilidade de fornecer serviços em áreas de difícil acesso onde as soluções por cabo não eram realizáveis, e a diferença de tempo de implementação entre estas duas soluções (sendo que as soluções sem fios podem ser instaladas a uma velocidade muito superior).

A primeira versão deste padrão foi aprovada em Dezembro de 2001. Uma adenda deste padrão, orientada para LOS com frequências de operação entre 10-66GHz, foi publicada em Abril de 2002. Só em Janeiro de 2003 é que foram utilizadas frequências entre os 2-11 GHz para cenários de distribuição onde não existia linha de vista, foi chamado a este padrão o 802.16a. Estas soluções possuíam os seguintes objectivos:

- Fornecer banda larga sem fios;
- Alcançar zonas de difícil acesso;
- Servir de rede primária a outras tecnologias (tais como redes de comunicações celulares).

Em Setembro de 2004 foi realizada uma revisão a partir da qual resultou a versão que ainda hoje é conhecida como a solução fixa de WiMAX, nasceu o padrão 802.16d. Foi necessário esperar até Dezembro de 2005 para que, através de uma adenda, fosse possível adicionar ao sistema a capacidade de servir clientes móveis, isto é, clientes que se deslocam a velocidades até 120 km/h.

O “WiMAX Mobile”, geralmente conhecido como a versão 802.16e-2005, adopta OFDMA na camada física. Suporta tanto FDD como TDD, embora as versões iniciais apenas utilizassem

TDD, visto que este permite DL/UL não simétricos (bastante útil para fornecer serviços de Internet). O uso do mesmo canal permite também um melhor suporte para a adaptação da ligação, técnicas MIMO (*Multiple Input Multiple Output*), e a facilidade de alocação do espectro de frequência ao utilizar uma única frequência para DL/UL.

A **Figura 23** ilustra a evolução temporal dos padrões acima descritos. Esta evolução não se encontra estagnada, isto é, esta tecnologia continua a evoluir, estando novos padrões na fase de testes e cujo objectivo é de aumentar a largura de banda e o alcance da tecnologia, através de novos tipos de modulações. Esta evolução é necessária devido ao aparecimento de uma nova tecnologia (LTE) que ameaça a sobrevivência das técnicas acima analisadas.

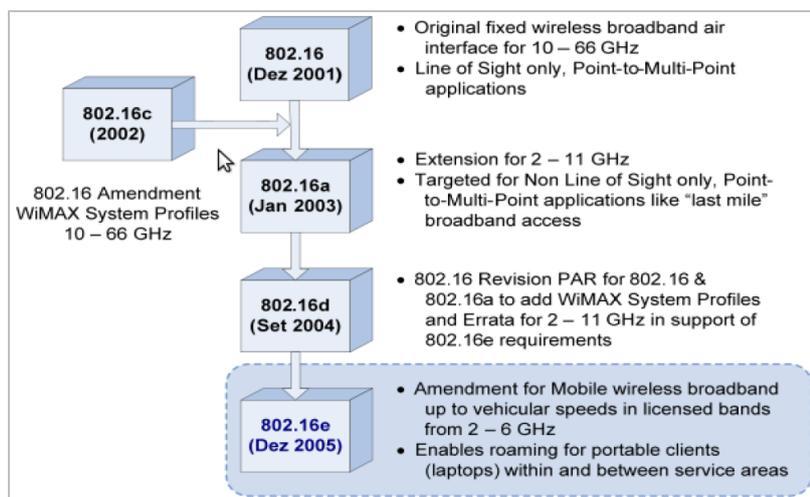


Figura 23 - Evolução dos Padrões WiMAX [30]

3.3.2 Redes UMTS

O grande sucesso das comunicações móveis é provavelmente um dos eventos mais celebrados pela indústria das telecomunicações nos últimos 100 anos. A comodidade da telefonia móvel veio tornar o sonho de estar sempre disponível e contactável em qualquer lugar do mundo.

Rapidamente os operadores chegaram à conclusão que poderiam explorar um novo mercado: os serviços de Internet. Era agora necessário adaptar os seus sistemas ao tráfego de dados. Após algumas tentativas menos frutíferas (GPRS, EDGE, etc) foram desenvolvidos os equipamentos de terceira geração.

“A *terceira geração de redes sem fios* é um termo utilizado para descrever serviços de comunicações móveis de próxima geração, que fornecem melhor qualidade de voz e Internet e serviços de multimédia de alta velocidade. Em contraste, os sistemas 2G (tais como IS-95, GSM, etc) eram basicamente orientadas para aplicações focadas na transmissão de voz. Embora existam várias interpretações sobre o que representa 3G, a única definição universal é a que foi publicada pelo ITU (*International Telecommunication Union*), que define e aprova requisitos

técnicos e padrões, assim como a alocação do espectro de frequências para sistemas 3G sob o programa IMT-2000 (*International Mobile Telecommunication*). O ITU exige que as redes IMT-2000, entre outras capacidades, fornecer capacidades do sistema e eficiência espectral melhoradas, em relação aos sistemas 2G, e suportar serviços de dados com uma taxa de transmissão mínima de 144Kbps para clientes móveis (*outdoor*) e 2Mbps para clientes fixos (*indoor*).” [9]

Após ter definido os padrões para a tecnologia 3G, o ITU aprovou 5 interfaces de comunicações sem fios:

- CDMA *Direct Spread* (WCDMA-UMTS);
- CDMA *Multi-carrier* (CDMA2000);
- CDMA TDD (UTRA-TDD);
- TDMA *Single Carrier* (UWC-136/EDGE);
- FDMA/TDMA (DECT – *Digital Enhanced Cordless Telecommunication*).

Embora todos estes padrões tenham tido a sua importância em diferentes regiões do mundo, apenas se irão analisar em detalhe as duas primeiras, visto serem as que foram adoptadas na Europa e nos Estados Unidos.

3.3.2.1 CDMA2000

O primeiro sistema comercial CDMA2000 foi desenvolvido por SK Telecom (Coreia), em Outubro de 2000. Desde então esta tecnologia foi implementada na Ásia, América do Norte, América do Sul e na Europa.

Suportando tráfego de voz e de dados simultaneamente este padrão foi planeado e testado para/em várias bandas do espectro de frequências, incluindo aquelas que foram alocadas pelo IMT-2000. As suas características únicas, benefícios, e o seu desempenho fizeram do CDMA2000 uma tecnologia madura com grande capacidade de tráfego de voz e tráfego de dados a alta velocidade. A capacidade desta tecnologia em suportar estes dois tipos de tráfegos simultaneamente, e sobre as mesmas portadoras, fizeram dela uma solução economicamente atractiva para os operadores. Graças à sua optimização a nível de transmissão por rádio, o CDMA2000 permite aos operadores servir grandes áreas com elevado número de utilizadores utilizando um número reduzido de células.

O CDMA2000 utiliza 35 canais por sector para tráfego de voz (26 Erlangs por sector). O aumento desta capacidade deve a um controlo mais rápido de potência, menores *code rates*, e diversidade de transmissão.

Ao nível do tráfego de dados esta tecnologia possui uma capacidade de 3,09Mbps, capacidade actualmente insuficiente cumprir os requisitos dos utilizadores. O tráfego de dados é efectuado através de uma estrutura THN e de tramas cujo formato é muito flexível. De modo a limitar as cargas de sinalização associadas aos parâmetros de negociação de uma trama de formato completo, o CDMA2000 especifica um conjunto de canais de controlo. Define ainda uma taxa de difusão e um conjunto de tramas associadas a cada configuração.

O CDMA2000 é também um padrão constituído por camadas. As 4 camadas mais significativas, e presentes na maioria dos sistemas de telecomunicações baseados neste padrão são:

- Camada física;
- Camada MAC;
- Camada de controlo (controla o acesso aos *links*);
- Camada superior (para sinalização da arquitectura).

3.3.2.2 WCDMA

O sistema WCDMA, que serve de base aos sistemas UMTS, é um padrão para redes móveis 3G proposto pelo ESTI (*European Telecommunication Standards Institute*). Este padrão foi a realização de uma nova geração de tecnologias de telecomunicações móveis de multimédia de banda larga. A cobertura deste tipo de sistemas é garantida através de uma combinação de células de diferentes tamanhos, desde pico-células *indoor* até células *worldwide* servidas por satélite (o que permite servir regiões completamente isoladas).

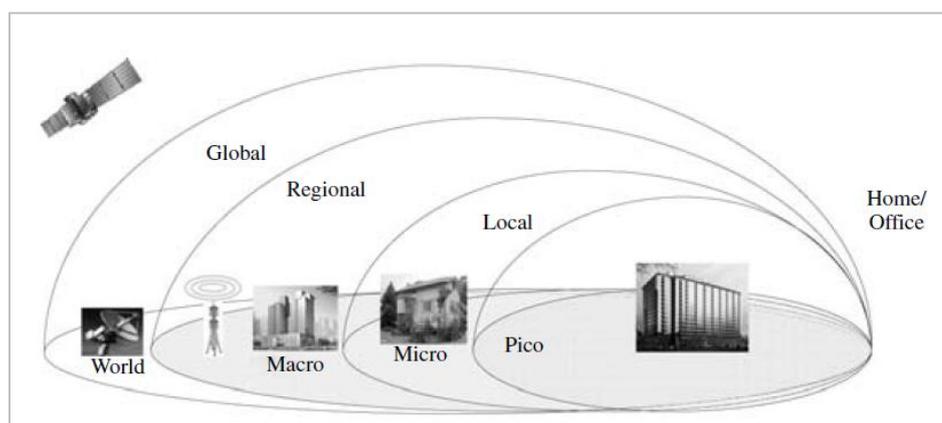


Figura 24 - Hierarquia de células em UMTS [9]

Os sistemas WCDMA possuem uma largura de banda de 5 MHz (tanto para os canais de *Uplink* como para os canais de *Downlink*), isto é, possuem a capacidade de trabalhar com duas bandas de 5 MHz simultaneamente.

Aversão terrestre deste padrão (UTRA - *UMTS Terrestrial Radio Access*) permite dois modos distintos de funcionamento:

- **FDD** – fornece canais de transmissão para os utilizadores e para as estações base simultaneamente. São utilizadas, nas estações base, duas antenas diferentes para receber e enviar informação, acomodando assim os canais de *Uplink* e de *Downlink* em antenas distintas. No equipamento do cliente é utilizada apenas uma antena para recepção e transmissão, sendo necessário recorrer a um *duplexer*. Torna-se assim necessário separar as frequências de recepção e de transmissão de modo a permitir o uso de *duplexers* menos dispendiosos.
- **TDD** – partilha um único canal, sendo que apenas é utilizada parte do tempo para transmitir da estação base para o equipamento do cliente, utilizando o resto do tempo para transmitir os sinais no sentido contrário. Caso o ritmo de transmissão de dados seja muito superior ao tolerado pelo equipamento do utilizador, é possível guardar esta informação e fornecer um serviço que aparente ser, do ponto de vista do utilizador, *full-duplex*, embora as transmissões continuem em ambos os sentidos em intervalos de tempo distintos.

Uma rede UMTS é constituída por três segmentos principais: o *Core Network*, UTRAN (*UMTS Terrestrial Radio Access Network*), e o equipamento dos utilizadores. A função principal do *Core Network* é de fornecer a capacidade de comutação para o tráfego gerado pelos utilizadores. Contem também todas as bases de dados, assim como funções de manutenção da rede. A arquitectura base deste segmento, numa rede UMTS, é baseada nas redes GSM (com GPRS). Todo o equipamento tem de ser substituído ou actualizado de modo a fornecer serviços e operações de UMTS. O segmento UTRAN fornece a *interface* de acesso para os equipamentos dos clientes. As estações base passam a ser chamadas *NodeB* e o equipamento que os controla é chamado RNC (*Radio Network Controller*). A **Figura 25** ilustra este tipo de arquitectura.

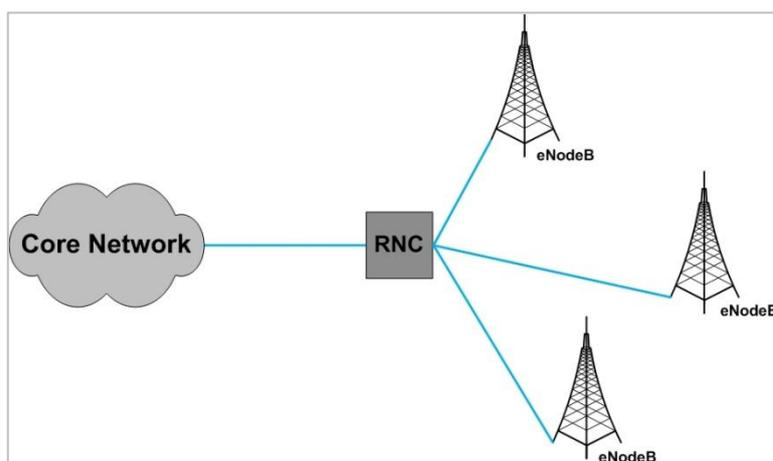


Figura 25 - Arquitectura Base de Rede UMTS

Estes sistemas, que utilizam apenas modulações do tipo BPSK e QPSK, apenas possuem uma capacidade de 2 Mbps, tornando-as obsoletas em relação às exigências dos clientes das tecnologias de telecomunicações de banda larga.

3.3.3 Redes HSPA

O HSPA (*High Speed Packet Access*) é um conjunto de padrões que pode ser adicionado às tecnologias 3G/UMTS com o objectivo de fornecer serviços de banda larga de forma mais eficiente.

As características desejadas, para as tecnologias de distribuição de serviços de banda larga, são uma capacidade de tráfego de dados elevada e uma latência muito baixa e, embora as tecnologias 3G/UMTS tenham sido comercializadas como tal, os seus resultados ficaram muito aquém do desejado tanto pelos operadores, como pelos clientes. Só foi possível considerar as redes 3G/UMTS como sendo soluções tecnológicas de banda larga sem fios através do desenvolvimento dos padrões HSPA.

Estes padrões, introduzidos pelo 3GPP, são compostos pelos seguintes *release*:

- **HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*)** – correspondente ao *release5*, veio introduzir mais capacidade aos canais de *Downlink* através da introdução de uma modulação com maior capacidade (bits/símbolo), a modulação 16QAM;
- **HSUPA (*High Speed Uplink Packet Access*)** – correspondente ao *release6* veio introduzir a mesma lógica que o seu antecessor aos canais de *Uplink*;
- **HSPA+ (ou *HSPA Evolution*)** – foi a evolução da tecnologia HSPA que, através da modulação 64QAM e de um suporte para sistemas MIMO, veio aumentar não só a largura de banda desta tecnologia, como numerosas melhorias nos protocolos existentes.



Figura 26 - Evolução dos *releases* de 3GPP [6]

Todos estes *releases* têm sido implementados à medida que são desenvolvidos, desde que venham melhorar as características dos sistemas, sejam elas a capacidade (voz e dados), QoS, estabilidade, latência, etc.

3.3.3.1 Arquitectura

Embora a arquitectura geral destas redes possa parecer idêntica à arquitectura de uma rede UMTS, existem diferenças nas funções exercidas por cada elemento.

De modo a diminuir a latência, e a oferecer uma melhor adaptação as constantes alterações do meio, algumas funcionalidades do RNC têm de ser transferidas para o *NodeB*. A função mais significativa a ser transferida é o RRM (*Radio Resource Management*), isto é, os protocolos de admissão e a escalonagem dos dados passam a ser da responsabilidade do *NodeB*. As vantagens de passar estas funcionalidades para um elemento da rede mais próximo dos utilizadores finais são, para estas duas funções:

- **Protocolos de admissão** – um novo utilizador negocia a atribuição de uma portadora directamente com o *NodeB*, conseguindo mais rapidamente efectuar uma ligação;
- **Escalonagem de dados** – caso ocorra uma falha na transmissão de pacotes (corrompendo os dados) o *NodeB* efectua automaticamente a retransmissão dos mesmos, diminuindo a latência (visto já não ser necessário efectuar este pedido ao RNC).

Através desta transferência de funcionalidades consegue-se diminuir significativamente a latência. A duração de transmissão de um pacote pode passar de 80ms (nas redes 3G originais) para 2ms (nos sistemas HSPA+).

3.3.3.2 Camada Física

A camada física da tecnologia HSPA, tal como acontece com o UMTS, é baseada em WCDMA. Esta técnica é utilizada em ambos os sentidos das transmissões (*Uplink* e *Downlink*).

Cada sinal que tenha de ser transmitido para um utilizador irá ser espalhado pela largura de banda total disponível (5 MHz), sendo modulado com um código de atribuição de canal para o utilizador (de modo a este poder identificar quais os sinais que lhe estão destinados). O facto do sinal ser alargado pela totalidade da largura do canal torna-o mais robusto, isto é, a transmissão torna-se menos sensível às interferências co-canal³. A modulação dos códigos de atribuição de canal de cada utilizador é baseada em OVSF (*Orthogonal Variable Spreading Factor*), isto é, forma-se uma árvore hierárquica em que cada nível corresponde a um tipo de cliente ou serviço, consoante a largura de banda desejada (clientes ou serviços que necessitem de uma maior largura de banda encontram-se em níveis hierárquicos superiores, tendo os utilizadores e serviços

³ Serão dadas mais informações sobre as interferências na [secção 3.3.6.4](#).

de níveis hierárquicos mais baixos menor capacidade e menor prioridade). Teoricamente este tipo de modulação deveria garantir que todos os códigos são ortogonais entre si mas, na realidade, tal pode não acontecer, gerando interferências na própria célula.

A modulação 16QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) foi introduzida nos canais de *Downlink*, como já foi referido, no *release5*, juntando-se à modulação anteriormente utilizada (QPSK), isto é, o sistema passou a possuir a capacidade de utilizar estes dois tipos de modulações simultaneamente nos canais de *Downlink*, conforme a SNR o permitir. Com a tecnologia HSPA+ passa a ser possível adicionar a modulação 64QAM às anteriores, o que alterou a capacidade máxima dos sistemas de 14,4 para 21 Mbps. Põem-se agora duas limitações (ainda por resolver): a SNR tem de ser muito boa para permitir 64QAM e os canais de *Uplink* continuam a só permitir o uso das modulações 16QAM e QPSK.

A introdução de técnicas MIMO em HSPA não foi linear, aliás, foram sugeridas 11 soluções tecnológicas diferentes durante a fase de normalização, sendo que no final foi escolhida uma solução “*Dual-codeword MIMO*” baseada em *Dual Stream TxAA* (esta solução veio introduzir, no *release7*, multiplexagem espacial). Outra diferença entre as redes UMTS e HSPA é o aumento da capacidade através de *Dual Carrier* (um utilizador liga-se a várias estações base simultaneamente), isto é, em ambas as tecnologias é possível conectar-se a dois *NodeB* ao mesmo tempo, no entanto, nas redes UMTS o utilizador continua limitado aos 5 MHz de largura de banda, algo que não acontece em HSPA (teoricamente a capacidade de tráfego duplicaria quando ligado a dois *NodeB* simultaneamente). Esta situação, ilustrada na , foi regulamentada pelo *release8*.

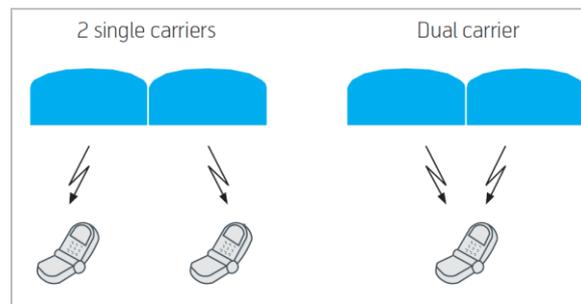


Figura 27 - Dual Carrier [6]

3.3.3.3 Portadoras

O tráfego dos utilizadores é transportado através da camada física utilizando portadoras. Estas podem ocupar um (ou mais) código(s) de atribuição de canais.

A tecnologia HSPA oferece a possibilidade de ser efectuada comutação de pacotes no tráfego de dados, algo que já era possível nas redes UMTS (embora esta tecnologia exigisse portadoras dedicadas, ou seja, era atribuído um código de atribuição de canais dedicado, com

capacidade de 64, 18 ou 384 Kbps). Nos sistemas HSPA vários utilizadores podem partilhar a mesma portadora, sendo a atribuição de recursos individuais baseada em escalonagem oportunista, de modo a fazer um uso mais eficiente das capacidades da camada física.

Relativamente ao tráfego de voz, existem três possibilidades:

- **VoIP (Voice over IP)** – o tráfego de voz é convertido num sinal digital que seguirá através de uma ligação de dados segundo *Internet Protocol*;
- **CS (Circuit Switching) over HSPA** – o tráfego de voz é alocado num sistema de comutação de circuitos. Este sistema é por sua vez empacotado em tramas IP.
- **CS** – o tráfego de voz é alocado num sistema de comutação de circuitos e é transmitido para o RNC (este sistema requer uma portadora dedicada).

3.3.3.4 Próximas Evoluções

Mesmo depois de todas as evoluções acima descritas, esta tecnologia ainda necessita de muitas melhorias, o que exige, como é óbvio, toda uma série de normalizações a serem aprovadas pelo 3GPP.

O *release9*, normalizado em Dezembro de 2009, veio finalizar alguns aspectos das RAN (*Radio Access Networks*). Estes aspectos vieram permitir o uso de suas portadoras em simultâneo para os cabais de *Uplink*, e o uso de duas portadoras em bandas de frequências diferentes para os canais de *Downlink*. Passou também a ser possível a utilização de duas portadoras em conjunto com operações MIMO.

Está planeada, com o *release10*, a possibilidade de utilizar quatro portadoras simultaneamente. Será assim possível permitir aos terminais obter uma largura de banda de 20 MHz, tal como acontece com a tecnologia LTE. Outra preocupação do *release10* será o consumo de energia, não só por parte dos equipamentos dos clientes (nos quais uma redução na potência de transmissão permite aumentar a durabilidade das baterias), como também por parte dos equipamentos de distribuição (de modo a reduzir os custos de operação).

3.3.4 Redes LTE

A tecnologia LTE (*Long Term Evolution*) tem sido desenvolvida de modo a satisfazer a crescente procura de serviços de banda larga nas redes de comunicações móveis. Existem dois tipos de implementações possíveis para esta tecnologia:

- **LTE puro** – é implementada uma rede cuja única função é transportar tráfego de dados, isto é, para efectuar ligações de voz torna-se necessária a utilização de técnicas como

VoIP. Esta solução necessita de uma infra-estrutura bastante simples, não sendo necessária a presença de RNC, ligando directamente os *NodeB* à rede nuclear.

- **LTE over GSM** – é implementada uma rede LTE sobre uma rede GSM já existente, o que traz duas vantagens significativas. A infra-estrutura da rede GSM é completamente aproveitada sendo necessário, como é óbvio, actualizar alguns componentes. A rede GSM mantém-se activa, podendo ser utilizada para encaminhar o tráfego de voz.

A **Figura 28** ilustra a topologia da rede descrita na primeira solução. A topologia da segunda solução é idêntica a uma rede UMTS, pelo que pode ser observada na **Figura 25**.

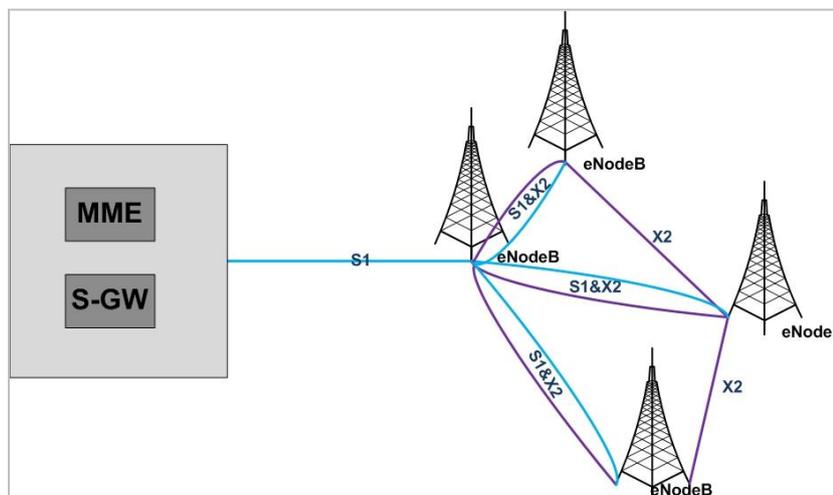


Figura 28 - Arquitectura LTE (data only)

3.3.4.1 Arquitectura

Embora tenham sido referidas duas implementações possíveis, a solução em que se aproveitam as infra-estruturas de uma rede já existente não requer mais desenvolvimentos pois a única diferença, a nível da arquitectura, entre estas redes e as redes HSPA é o facto dos *NodeB* passarem a ser denominados de *eNodeB*. Todos os outros componentes se mantêm, sendo necessário efectuar *upgrades* em todos eles.

A arquitectura de uma rede LTE (sem nenhum outro tipo de sistemas) é, como se pode observar pela **Figura 28**, bastante simplificada. As principais diferenças com a tecnologia anteriormente analisada são que os RNC desaparecem e que existem agora ligações entre *eNodeB* vizinhos, ligações cuja utilidade será analisada mais à frente, e que utilizam uma *interface* denominada de ligações X2. As ligações entre os *eNodeB* e a rede nuclear, onde se encontra o *Packet Core*, é efectuada através de uma *interface* do tipo S1. Ambas as *interfaces* são baseadas no protocolo IP.

As ligações entre *eNodeB* vizinhos (pela *interface X2*) são bastante úteis pois permitem a passagem de todas as funções de RRM (*Radio Resource Management*) para os *eNodeB*, daí já não ser necessária a utilização dos RNC. Uma das funções mais significativas é o *handover*, isto é, a *interface X2* permite que dois *eNodeB* possam decidir quando comutar um cliente entre eles, sem existir necessidade de negociar essa “passagem de testemunho” com qualquer outro equipamento da rede. A rede nuclear apenas recebe uma mensagem a informar que o cliente mudou de *eNodeB*, de modo a poder reencaminhar o tráfego deste para o novo destino, sendo que os pacotes que já tiverem sido enviados para o *eNodeB* anterior são reencaminhados pela *interface X2* (não existindo assim um *overload* do *Packet Core*).

Mecanismos semelhantes podem ser aplicados em funções como gestão de tráfego ou controlo de interferências entre *eNodeB* vizinhos.

3.3.4.2 Camada Física

A camada física desta tecnologia utiliza técnicas de modulação diferentes consoante o sentido das transmissões, isto é, as transmissões de *Uplink* utilizam uma técnica de modulação (SC-FDMA – *Single Carrier Frequency Division Multiple Access*) enquanto que as transmissões de *Downlink* utilizam outra (OFDMA - *Frequency Division Multiple Access*).

Em relação aos canais de *Downlink*, a técnica de modulação OFDMA permite que os dados sejam transmitidos sobre sub-portadoras próximas umas das outras, mas ortogonais entre si no domínio da frequência. De modo a fornecer acesso a vários utilizadores diferentes, são-lhes atribuídos subconjuntos (não necessariamente adjacentes) dos símbolos OFDM. Esta situação é ilustrada na **Figura 29**. A menor quantidade de recursos que se pode atribuir a um utilizador, um *Resource Block*, possui um tamanho de 180 KHz (no domínio da frequência) ou de 1 ms (no domínio do tempo). *Resource Blocks* individuais podem possuir codificações e modulações diferentes (mesmo se pertencerem ao mesmo utilizador), o que permite a esta tecnologia adaptar as frequências seleccionadas para os *links*, podendo assim otimizar as codificações e modulações (consoante a resposta em frequência dos canais).

Como já foi referido anteriormente as transmissões de *Uplink* utilizam outra técnica de modulação, o SC-FDMA. A principal diferença com o OFDMA é que esta técnica possui um perfil contínuo no domínio da frequência. O principal objectivo de utilizar estas técnicas nas transmissões de *Uplink* é reduzir os custos dos amplificadores dos equipamentos terminais, visto esta técnica possuir uma PAPR (*Peak to Average Power Ratio*) mais baixa que a técnica de modulação utilizada no *Downlink*.

Estas duas técnicas de modulação têm, no entanto, muitas semelhanças no processamento dos sinais, o que permite harmonizar ao máximo as propriedades de cada sinal enviado/recebido.

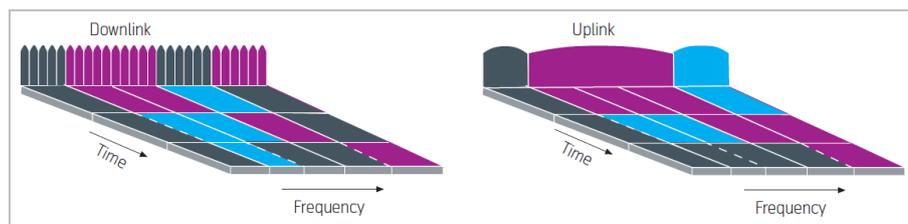


Figura 29 - Camada Física da Tecnologia LTE [6]

Uma propriedade muito importante da tecnologia LTE é o conceito de largura de banda flexível. Este conceito, proveniente das técnicas OFDM, permite alterar a largura de banda do sistema através da diminuição (ou do aumento) do número de sub-portadoras. Existem seis escalas possíveis, desde 1,4 até 20 MHz, com números de sub-portadoras diferentes, tal como pode ser observado pela **Tabela 4**.

Tabela 4 - Escalas da Largura de Banda em LTE [6]

Largura de Banda (MHz)	1,4	3	5	10	15	20
Número de sub-portadoras	6	15	25	50	75	100

Como era de esperar, a capacidade do sistema depende directamente do número de sub-portadoras à sua disposição. Esta flexibilidade permite também que esta tecnologia se possa adaptar a diferentes bandas do espectro de frequências, isto é, graças a esta propriedade a tecnologia LTE pode ser introduzida gradualmente em bandas que pertencem actualmente a outras tecnologias (GSM, UMTS, televisão analógica, etc.).

A introdução de técnicas MIMO é, contrariamente ao que aconteceu com a tecnologia HSPA, parte integrante do primeiro *release* do padrão aceite para a tecnologia LTE. Este facto implica que todos os equipamentos terminais possuam a capacidade de integrar sistemas MIMO (embora não seja exigido que estes suportem técnicas de multiplexagem no espaço). Outra diferença entre as técnicas MIMO utilizadas em LTE e em HSPA é que, nesta tecnologia, é possível utilizar quatro antenas tanto nos transmissores, como nos receptores.

3.3.4.3 Portadoras

Os canais e as portadoras utilizados na tecnologia LTE são baseados nos mesmos princípios que os da sua antecessora (a tecnologia HSPA). Isto deve-se ao facto de ter sido provado que existem vantagens em combinar a partilha dos canais com um escalonamento oportunista. A camada física da tecnologia LTE consiste, de modo simplista, em canais partilhados para reencaminhamento de dados (exceptuando os canais reservados para controlo), sendo que os canais reservados para dados e para voz, comuns nas redes 3G, são agora desnecessários.

Um utilizador pode transmitir dados através de várias portadoras simultaneamente, sendo que cada portadora deve possuir um perfil de QoS específico onde são especificados os seguintes parâmetros:

- Taxa de débito;
- Atrasos;
- Taxa de perdas de pacotes;
- Prioridade relativamente a outros utilizadores.

De modo a garantir que as necessidades de QoS são satisfeitas o *eNodeB* assume a responsabilidade de atribuir os recursos aos diversos utilizadores. Caso este não possa garantir que os requisitos de QoS serão cumpridos, o *eNodeB* tenta efectuar o *handover* para uma célula vizinha que possua recursos disponíveis. Caso o *handover* não possa ser efectuado, a portadora é abandonada.

3.3.4.4 SON (Self Organizing Networks)

Um dos objectivos (por parte dos operadores) do desenvolvimento da tecnologia LTE é a diminuição dos custos de operação da rede, utilizando para isso funções padrão. Existe actualmente um grande esforço na configuração e na optimização das redes 2G e 3G existentes. Existe também um maior grau de complexidade pois os operadores desejam manter todas (ou pelo menos algumas de) estas tecnologias em funcionamento simultaneamente. Devido a este desejo foi desenvolvido o conceito de redes SON (*Self Organising Networks*) cujo objectivo é de automatizar algumas tarefas que, hoje em dia, são realizadas manualmente pelos operadores, permitindo à rede ajustar os seus parâmetros de operação dinamicamente.

Estas redes possuem dois tipos principais de processos:

- **Self configuration** – são processos de configuração automática. Quando um novo *eNodeB* é instalado, a sua configuração é feita automaticamente através de um procedimento de instalação que irá introduzir as configurações básicas necessárias para o funcionamento do sistema.
- **Self optimization** – são processos de optimização que ajustam automaticamente (e continuamente) os parâmetros de operação de modo a maximizar o desempenho do sistema.

É de notar que o 3GPP não define nenhuma implementação padrão das funcionalidades das redes SON, apenas define algumas medidas nos equipamentos terminais, assim como o

comportamento da *interface X2*, considerados necessários para cumprir alguns casos prático. Segue-se agora a listagem de alguns destes casos práticos:

- Optimização da listagem das células vizinhas;
- Coordenação das interferências;
- Optimização da cobertura e da capacidade;
- Optimização da robustez da mobilidade.

3.3.4.5 Próximas Evoluções

A tecnologia LTE foi introduzida pelo 3GPP através das especificações do *Release8*. O *Release9*, de Dezembro de 2009, pode ser considerado como uma actualização de operação visto este não ter introduzido novas funcionalidades na rede de acesso por rádio (excepto as funcionalidades SON e eMBMS – *Multimedia Broadcast Multicast Service*).

São esperados grandes desenvolvimentos nesta tecnologia através do *Release10* (ainda em desenvolvimento pelo 3GPP). O principal objectivo, ao introduzir novas alterações, é ir ao encontro das especificações que o ITU exige para o IMT-*Advanced*, sendo as especificações mais significativas as taxas de débito elevadíssimas (1 Gbps para os canais de *Downlink* e 500 Mbps para os canais de *Uplink*). Espera-se que este *Release* introduza as seguintes alterações:

- Larguras de banda mais elevadas;
- CoMP (*Coordinated Multipoint transmission*) – transmissões multiponto coordenadas;
- Sistemas MIMO de ordem superior (4x4 para o *Uplink*; 8x8 para o *Downlink*);
- Afinações de cobertura.

É necessário uma largura de banda superior aos 20 MHz (limitação do *Release8*) para se conseguir atingir as taxas de débito desejadas. A agregação de várias portadoras (segundo a definição de portadora do *Release8*) pode, teoricamente, levar a uma largura de banda máxima de 100 MHz. As portadoras não necessitarão de ser contínuas para serem agregadas aliás, nem será necessário pertencerem às mesmas bandas.

As transmissões multiponto coordenadas possuem a vantagem de serem as próprias células vizinhas a coordenarem entre si todas as transmissões. Esta nova alteração tem como principal objectivo melhorar as ligações para os utilizadores que se encontram perto das fronteiras entre células (visto serem estes os utilizadores mais prejudicados pelas interferências presentes nestes sistemas).

3.3.5 FUTON

O projecto FUTON (*Fiber Optic Networks for Distributed and Extendible Heterogeneous Radio Architectures and Service Provisioning*) é uma iniciativa de investigação e desenvolvimento apoiada pela União Europeia através do FP7. O seu objectivo é o desenvolvimento de uma solução de rede de acesso baseada no conceito *radio over fibre* (RoF).

3.3.5.1 Conceitos

A solução de rede do projecto FUTON é do tipo DBWS (*Distributed Broadband Wireless System*) com antenas distribuídas e com processamento centralizado. Esta abordagem é ilustrada na **Figura 30**, onde antenas distribuídas estão localizadas nos RAU. Devido à abordagem centralizada, os RAU apenas necessitam de capacidade de processamento para que os sinais possam ser transportados de forma transparente de/para um local central onde o processamento conjunto é efectuado. Este local central é denominado CU (*Central Unit*) e dentro dele estão vários JPU (*Joint Processing Units*), unidades de processamento conjunto, que processam os sinais de vários RAU cada. Se fosse desejada uma arquitectura com processamento distribuído necessitar-se-ia de RAU mais complexos com uma alguma “inteligência” incluída.

O sistema DBWS do projecto FUTON pode ser definido como um sistema sem fios com uma estrutura de antenas distribuída cujo objectivo é de atingir capacidades de largura de banda através do conceito de sistemas MIMO com antenas distribuídas e gestão de interferências. Os principais motivos para escolher uma arquitectura DBWS com processamento centralizado podem ser facilmente enunciados:

- Necessidade de simplificar as estações base;
- Custos de manutenção mais baixos;
- Fácil reconfiguração;
- Fácil capacidade de “upgrade”.

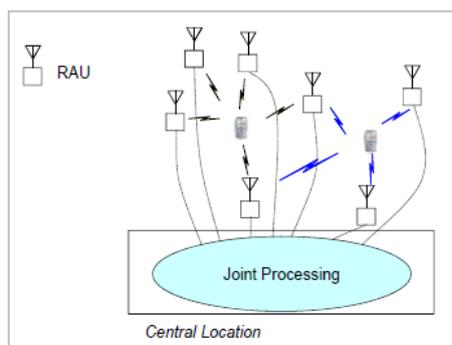


Figura 30 - DBWS com processamento centralizado

3.3.5.2 Arquitecturas de referência deste projecto

A arquitectura de referência da rede em desenvolvimento pelo projecto FUTON que foi considerada neste documento está representada em **Figura 31**.

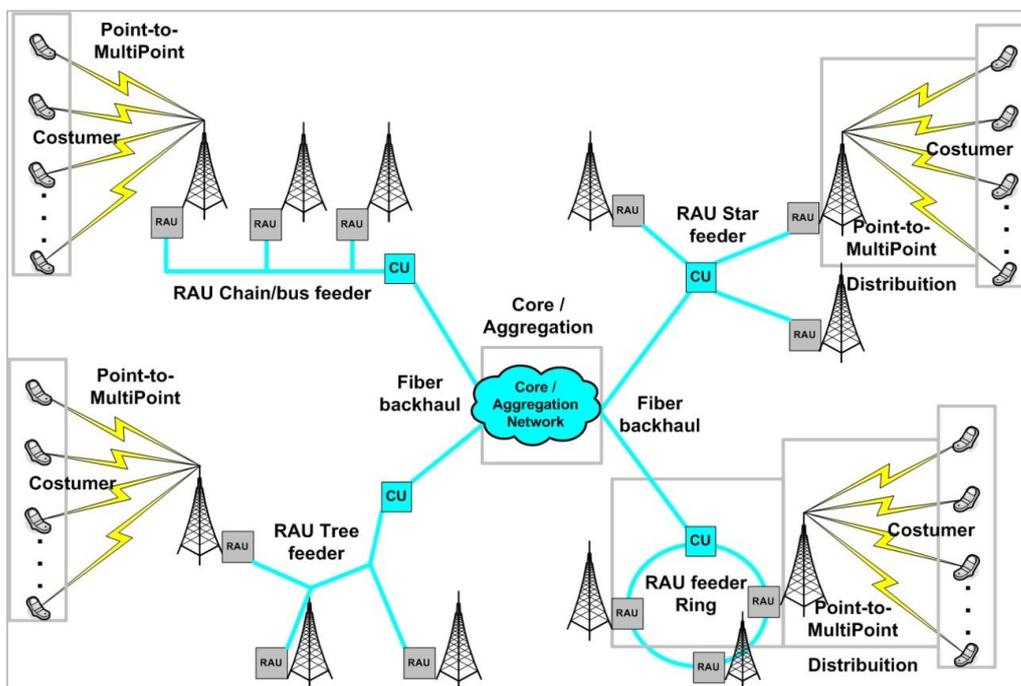


Figura 31 - Arquitecturas de referência do projecto FUTON

Analisando a **Figura 31** pode-se verificar que existem 4 topologias possíveis para realizar o “RAU feeder”, sendo elas a topologia em cadeia (“chain”), em estrela (“star”), em árvore (“tree”) ou em anel (“ring”).

A selecção da topologia dos segmentos de *feeder* é feita tendo em conta vários aspectos (tais como o número de RAU necessário para cobrir a área geográfica em consideração, o possível crescimento das infra-estruturas da rede devido ao aumento de tráfego e/ou de clientes, a distribuição demográfica da população, etc), sempre com o objectivo de minimizar os custos globais da rede (investimentos de capital – CAPEX, custos de operação – OPEX, etc) visto esta infra-estrutura representar uma parte muito significativa dos custos gerais, tendo portanto uma grande influência na análise económica global.

Embora este projecto contemple várias topologias possíveis, existe a necessidade de definir uma topologia genérica de referência, que possa ser utilizada em vários cenários, permitindo a sua comparação. A topologia escolhida está ilustrada na **Figura 32**. Trata-se de uma topologia em estrela dupla (ou *tree-and-branch*), isto é, as ligações ao CU são realizadas em estrela, podendo depois ser ramificadas em árvore. Esta topologia permite a colocação

incremental de novos CU, geralmente nos nós da rede em árvore, permitindo a rentabilização da rede de fibra já existente, como a **Figura 32** também ilustra.

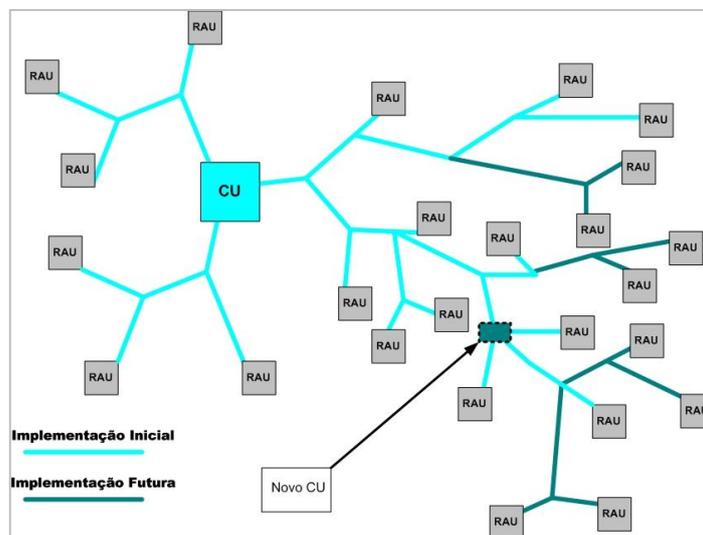


Figura 32 - Topologia em estrela dupla

As topologias acima apresentadas tanto podem representar redes ópticas activas como passivas. Se a rede óptica for activa necessitará de equipamentos dispendiosos tais como *switches*, *routers* e *add/drop multiplexers* colocados ao longo da rede de distribuição em fibra (denominada de “RAU feeder” na **Figura 31**). Se a rede óptica for passiva necessitará de equipamentos (como *splitters/combiners*, “routers” de comprimento de onda passivos, etc) que não requerem alimentação eléctrica e cuja manutenção é reduzida, embora não possuam a mesma flexibilidade de reconfiguração que os equipamentos activos.

3.3.6 Planeamento Celular

De modo a optimizar o uso dos canais, os sistemas são configurados para reutilizá-los em células suficientemente distantes, de forma a não produzir interferências. A menor distância à qual um canal pode ser reutilizado é chamada de distância de reutilização co-canal.

A redução do tamanho das células, assim como a colocação de antenas em novas posições, tornaram obsoletos os modelos teóricos de propagação, pois fenómenos como *shadowing*, as interferências entre células e o *fast fading* são agora mais significativos: as perdas que eles introduzem são aquelas que limitam as células em termos de SNR.

Durante a fase de análise do processo de desenvolvimento de um sistema de telecomunicações móveis, a previsão da propagação dos sinais é essencial para conseguir uma cobertura adequada numa determinada área, sem que esta contenha zonas onde não seja possível efectuar ligações com a estação base. A planificação de um sistema deste tipo não se pode preocupar somente com a área de cobertura e com a probabilidade de ligação, é necessário

realizar um projecto economicamente viável, isto é, obter a melhor relação possível entre os custos da rede, a sua esperança de vida e a qualidade do serviço. Os modelos de previsão existentes diferem no facto de os seus modelos de propagação poderem ser utilizados em diferentes ambientes ou não.

O desenvolvimento de algoritmos de previsão de propagação que retratam bases de dados ambientais, assim como a incorporação parâmetros ajustáveis consoante a localização, aumentaram a exactidão dos modelos de propagação.

3.3.6.1 Conceito de Célula

O principal objectivo das comunicações móveis é fornecer cobertura celular, a um maior número de clientes possíveis, numa área de grandes dimensões. Infelizmente o espectro de frequências limita essa cobertura tanto ao nível do número de utilizadores como ao nível de tamanho da área servida.

As primeiras tentativas de planeamento celular baseavam-se no uso de antenas com grande alcance, colocadas em locais de grande altitude, oferecendo cobertura em grandes áreas, na maioria dos casos esta cobertura abrangia cidades inteiras. Embora o tamanho da célula fosse grande, o número de utilizadores que esta podia acolher era reduzido, acrescentando a isso o facto de não existir, na altura, qualquer mecanismo de reutilização de frequência, a expansão das tecnologias de telecomunicações móveis esteve limitada durante longos anos.

Foi necessário esperar até 1971 para surgirem os primeiros conceitos de planeamento celular de comunicações móveis. Estes conceitos foram propostos pela “Bel Labs” e vieram revolucionar o mundo das telecomunicações para sempre ao incluírem mecanismos de reutilização de frequências e divisão por células. Nascia assim o primeiro *cluster* de células.

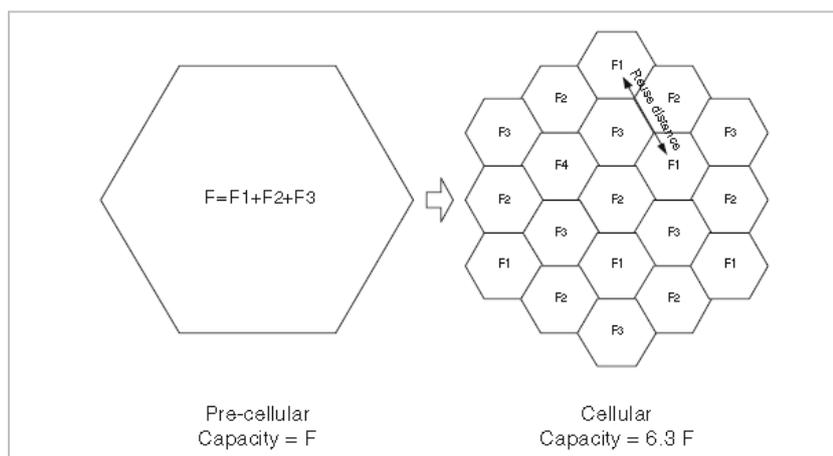


Figura 33 - Conceito Celular [23]

3.3.6.2 Clusters

Os conceitos anteriormente referidos originaram células cada vez mais pequenas que funcionavam por canais, isto é, cada célula utilizava parte do espectro de frequências disponível. De modo a atingir uma maior cobertura, garantindo um número elevado de clientes, foi-se aumentando o número de estações base, sendo que não é aconselhável o uso das mesmas frequências em células adjacentes. Estes canais poderão ser reutilizados por células mais afastadas desde que exista pelo menos uma célula com canais diferentes entre elas. Pode-se assim referir à reutilização de frequência em planeamento celular como *clusters* de células, ver **Figura 34**.

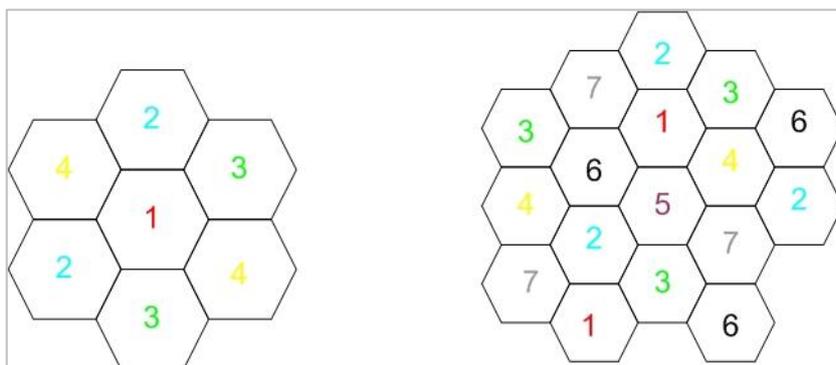


Figura 34 – Clusters

O factor de reutilização, isto é, o número de células que compõem um *cluster*, afecta directamente a capacidade e a interferência da própria célula. Um *cluster* pode ser composto por “n” células sendo que os factores de reutilização mais utilizados são 4 e 7.

Quanto maior for o número de células que compõe o *cluster* menor será o número de assinantes por cada célula. Isto deve-se aos seguintes factores, tendo em conta um sistema GSM (*Global System for Mobile Communications*), Gos (Grau de Serviço) de 1% e 30 mErl por assinante.

Tabela 5 - Análise de vários tamanhos de *clusters* para GSM [23][40]

Cluster	Reuso (D/R)	Canais/Célula	C/I	Traf.	Assinantes	Ass/Canal
3	3	93	11	77,2	2573	28
4	3,5	69	14	55,2	1840	27
7	4,6	39	18	28,1	937	24
9	5,2	31	21	21,2	707	23
12	6	23	23	14,5	483	21

3.3.6.3 Path Loss

O *path loss* é, por definição, a redução da densidade da potência de uma onda electromagnética durante a sua propagação pelo espaço. É um dos factores mais importantes na análise e planeamento do *link budget* de um sistema de telecomunicações.

As suas principais causas incluem as perdas por propagação causadas pela expansão natural da onda, as perdas por absorção causadas pela passagem do sinal por obstáculos e perdas por difracção causadas pela passagem do sinal por obstáculos que alteram a sua trajectória.

Visto que maioria das causas deste fenómeno estão presentes devido à topografia do terreno, é usual utilizarem-se modelos de propagação (empíricos ou determinísticos) de modo a obter um valor inicial para diversos factores: tamanho da célula, *path loss* aceitável, interferências...

3.3.6.4 Interferências

3.3.6.4.1 Interferência co-canal

A reutilização de frequências trouxe alguns problemas relativamente às interferências existentes nas células. Enquanto no primórdio das comunicações móveis a estação base raramente era afectada por interferências (era a única fonte de sinais naquela gama de frequências), com o aparecimento de *clusters* a estação base depara-se com a situação em que existe, num local relativamente próximo, outra estação que gera sinais com as mesmas frequências, a qual origina interferência co-canal.

A distribuição deste tipo de interferências é caracterizável por se apresentar em camadas de células que, usando os mesmos canais, se encontram à mesma distância da estação base. Esta interferência é proporcional à distância entre a camada causadora e a estação base, isto é, quanto mais afastada estiver uma camada de células com os mesmos canais, menor será a interferência causada por esta.

A **Figura 35** exemplifica este fenómeno quando se considera um cluster de 7 células. Nela pode-se observar as duas primeiras camadas de interferências co-canal.

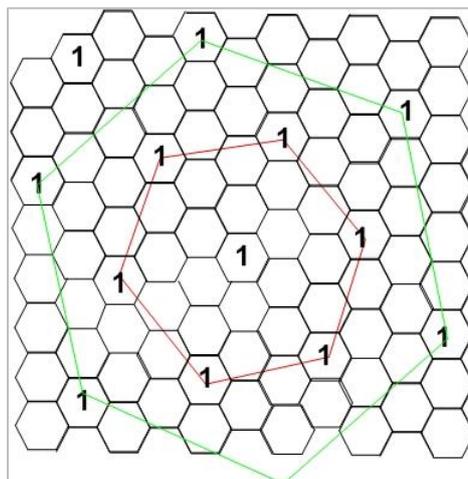


Figura 35 - Interferência co-canal

A relação interferência portadora é inversamente proporcional ao raio da célula e proporcional à distância entre as células que utilizam os mesmos canais, como se pode ver na seguinte equação.

$$\frac{C}{I} = \frac{C}{\sum_i I_i}, \quad C \propto R^{-4} \text{ e } I \propto D^{-4}$$

3.3.6.4.2 Interferência canal adjacente

A estação base depara-se também com interferências provenientes das células vizinhas (que utilizam frequências adjacentes à sua frequência), denominadas de interferência canal adjacente.

As principais causas da interferência canal adjacente são:

- Atribuição de canais adjacentes na mesma célula;
- Imperfeições nos filtros de recepção;
- Efeito “perto-longe”;
- Não linearidades da reutilização do espectro.

Existem vários métodos para diminuir a importância deste tipo de interferência, sendo que nenhum deles pode garantir a sua eliminação. Os principais métodos de combate são: atribuir cuidadosamente os canais da célula (tendo em atenção os canais utilizados pelas células vizinhas), utilizar filtros de recepção com maior factor de qualidade Q, controlar dinamicamente a potência da estação base, *etc.*

São de seguida apresentados dois exemplos de atribuição de canais em células adjacentes, sendo o primeiro caso um exemplo de uma má gestão dos canais e o segundo um caso em que a distribuição de canais foi mais cuidadosa.

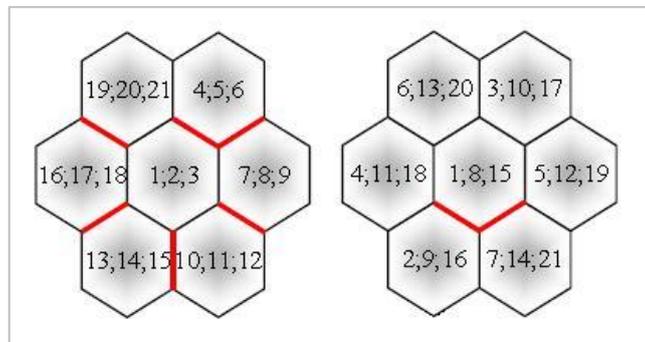


Figura 36 - Exemplo de atribuição de canais [23]

3.3.6.4.3 Outras Interferências

Para além dos tipos de interferências acima mencionados, existem ainda dois tipos de interferências internas que merecem ser mencionadas. Sendo estas as interferências multi-percurso e as interferências de múltiplo acesso.

Esta última acontece em sistemas cuja modulação tem por base CDMA (*Code Division Multiple Access*), um bom exemplo disso é o UMTS (*Universal Mobile Transmition System*) pois neste tipo de sistemas a célula recebe uma potência que cresce consoante o número de utilizadores ligados.

A interferência multi-percurso está presente em todos os sistemas de comunicações próximos da superfície. Trata-se da interferência causada pelas reflexões do sinal transmitido visto que, se os sinais reflectidos percorrerem distâncias diferentes poderão chegar ao destino com fase e amplitude diferentes. Este fenómeno pode ser observado em **Figura 37**.

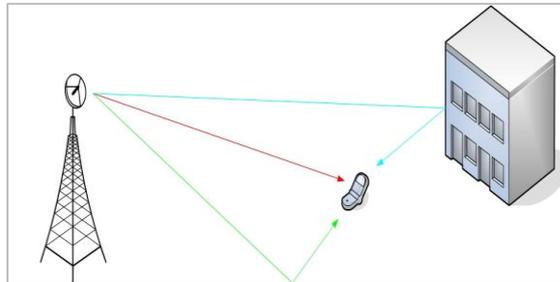


Figura 37 - Interferência multi-percurso

3.3.6.5 Sectorização

Uma técnica muito utilizada para diminuir os efeitos das interferências é a sectorização das células. Esta técnica utiliza antenas direccionais para “dividir” as células em várias partes (3 e 6 são os valores mais utilizados), todas elas com a mesma estação base, situada num vértice da área servida por cada antena.

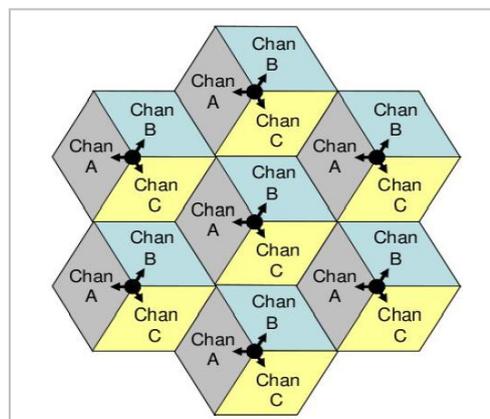


Figura 38 - Células sectorizadas [30]

A **Figura 38** ilustra um caso em que é utilizada sectorização, neste caso cada célula é dividida em 3 sectores com igual área de cobertura. Para realizar este tipo de sectorização são necessárias antenas com largura de feixe horizontal de aproximadamente 120° , isto é, a antena radia mais potência segundo um ângulo de 120° . É também recomendada a inclinação das antenas (2° a 5°) de modo a limitar as células de forma que o sinal seja propagado em direcção ao solo, limitando assim as células e diminuindo a interferência entre elas.

A reutilização de frequências tem de ser reconfigurada pois não existem antenas que somente radiem para uma direcção, isto é, o caso ilustrado na **Figura 38** é meramente representativo pois, na realidade, cada antena irá radiar uma porção da sua potência para os *clusters* da mesma célula. Este facto obriga à uma nova divisão de canais, sendo que *clusters* adjacentes não deverão possuir os mesmos canais (nem canais adjacentes) de modo a não ocorrem os fenómenos acima mencionados.

3.3.7 Modelos de Propagação

Existe a necessidade de utilizar modelos de propagação que se adaptem à morfologia do terreno, isto é, a grande quantidade de factores que variam segundo a topografia da região torna imprescindível a utilização de modelos que se adaptem ao nosso terreno (já estão contemplados nos parâmetros dos modelos características como *shadowing*).

Ao longo dos anos foram desenvolvidos vários modelos de propagação sendo que estes podem ser divididos em dois tipos:

- Empíricos – resultam de processos experimentais, isto é, são o resultado de medições exaustivas de uma determinada região, seguidos de uma aproximação do tipo “best fitting”;
- Determinísticos – resultam do traçado de raios, seja ele por imagens ou por lançamento de raios.

Serão agora analisados em detalhe dois modelos de propagação, o modelo de Hata-Okumura e o modelo de Walfisch-Ikegami.

3.3.7.1 Modelo de Hata-Okumura

Embora este modelo de propagação não possua utilidade para as tecnologias analisadas neste capítulo, devido às frequências de operação destes serem demasiado elevadas, é comum apresentá-lo pois trata-se do primeiro modelo de propagação aceite pela comunidade científica, em 1968.

Trata-se de um modelo empírico resultante de medições realizadas na cidade de Tóquio. Este modelo foi muito apreciado para planeamento celular urbano pois esta cidade era composta, na altura das medições, por uma grande quantidade de estruturas urbanas mas não continha edifícios altos que bloqueassem o sinal.

Este modelo possui gamas de validade bastante abrangentes:

- Frequência: 200 MHz até 1900MHz;
- Altura da estação base: 30 metros até 200 metros;
- Altura do receptor: 1 metro até 10 metros.

Embora se dê mais atenção ao modo urbano, este modelo prevê três situações, consoante o ambiente em que nos encontramos, sendo elas urbano, suburbano e rural.

Este modelo tem grande aceitação pois a sua implementação computacional é de reduzida complexidade, é encontrado em muitas ferramentas de simulação e é muito usado como termo de comparação com novos modelos que foram surgindo.

Matematicamente este modelo é simplificado, se as células forem consideradas circulares, pelas seguintes equações:

$$L_{dB} = \begin{cases} A + B \cdot \log R - E & (\text{Urbano}) \\ A + B \cdot \log R - C & (\text{Suburbano}) \\ A + B \cdot \log R - D & (\text{Rural}) \end{cases}$$

Sendo que os parâmetros A, B, C, D e E podem ser calculados das seguintes formas:

$$A = 69,55 + 26,16 \cdot \log(f_c) - 13,82 \cdot \log(h_b)$$

$$B = 44,9 - 6,55 \cdot \log(h_b)$$

$$C = 2 \cdot \log^2(f_c/28) + 5,4$$

$$D = 4,78 \cdot \log^2(f_c) - 18,33 \cdot \log(f_c) + 40,94$$

$$E = \begin{cases} 3,2 \cdot \log^2(11,75h_m) - 4,97 & (\text{grandes cidades}) \\ (1,1 \cdot \log(f_c) - 0,7) \cdot h_m - (1,56 \cdot \log(f_c) - 0,8) & (\text{pequenas cidades}) \end{cases}$$

Uma análise destas equações pode ser relativamente fácil, no entanto torna-se mais fácil a percepção deste modelo através de uma análise gráfica. A **Figura 39** ilustra os diferentes *path loss* deste modelo, relativamente às diferentes categorias, considerando os seguintes parâmetros de entrada:

- $f = 900 \text{ MHz}$;
- Altura da estação base = 50 metros;
- Altura da estação móvel = 1,5 metros;

É considerada nesta figura um *path loss* máximo, tentando assim obter o raio máximo que a célula pode tomar, consoante o ambiente em que esta se encontra.

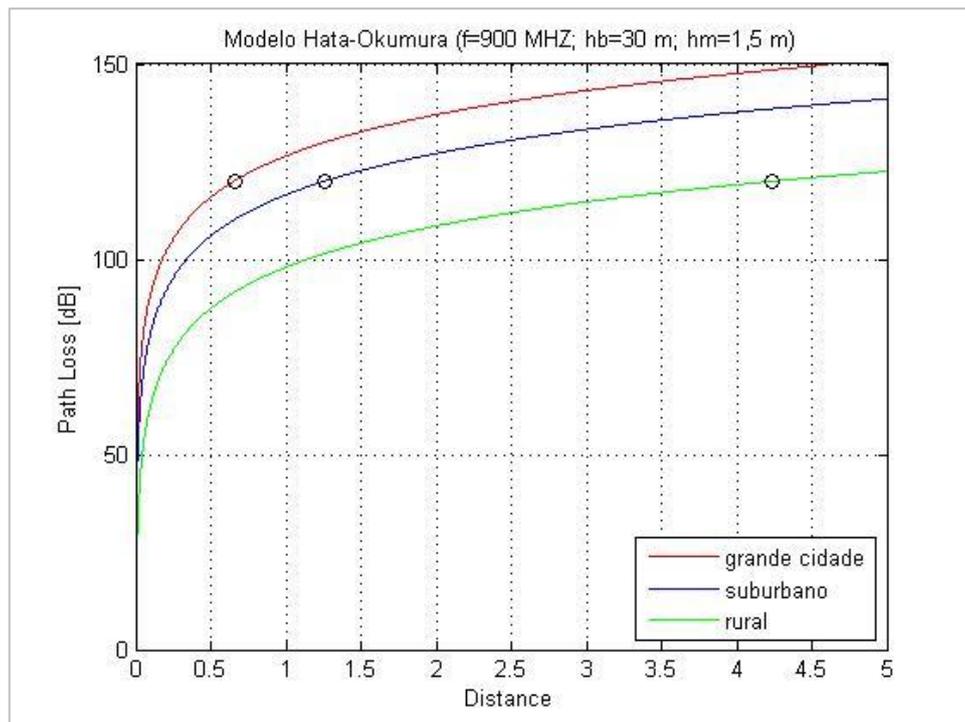


Figura 39 - Hata-Okumura

Este modelo apenas apresenta valores médios, isto é, apenas fornece uma estimativa dos possíveis *path loss* sendo que os valores obtidos na prática em outras localidades poderão ser diferentes.

3.3.7.2 Modelo de Walfisch-Ikegami

Este modelo, desenvolvido no âmbito do projecto COST 231, é uma combinação dos modelos desenvolvidos por Walfisch e por Ikegami.

Trata-se de um modelo óptimo para zonas urbanas, visto que são tidas em consideração todas as elevações verticais (edifícios) entre a estação base e o equipamento terminal do utilizador. Este modelo tem ainda em consideração as múltiplas difracções existentes neste tipo de ambientes.

Este modelo utiliza os seguintes parâmetros:

- Frequência - $f \in [800; 3000] \text{MHz}$
- Altura do transmissor - $h_{Base} \in [4; 50] \text{metros}$
- Altura do receptor - $h_{Mobile} \in [1; 3] \text{metros}$
- Distância entre o transmissor e o receptor - $d \in [20; 5000] \text{metros}$
- Altura média dos edifícios - h_{Roof}
- Comprimento médio das ruas - w
- Espaçamento médio entre os edifícios - b

Alguns destes valores podem não parecer óbvios pelo que segue-se, na **Figura 40**, uma ilustração onde se pode verificar o seu significado.

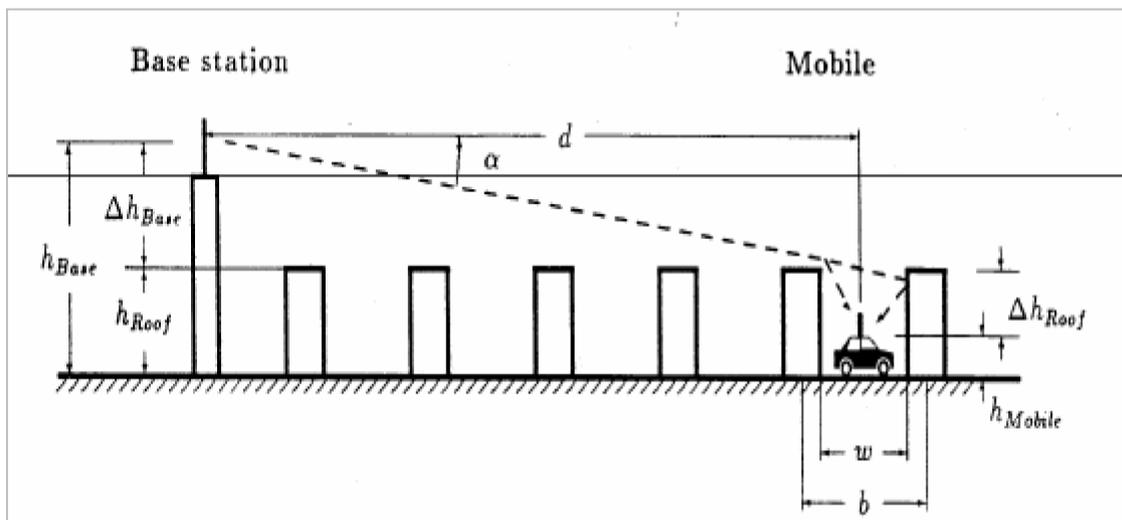


Figura 40 - Parâmetros do modelo Walfisch-Ikegami [3]

Matematicamente este modelo é simplificado, se as células forem consideradas circulares, pelas seguintes equações:

Com LOS:

$$L_b = 42.6 + 26 \cdot \log(d/km) + 20 \cdot \log(f/MHz)$$

Sem LOS:

$$L_b = \begin{cases} L_0 + L_{rts} + L_{msd}, & \text{com } L_{rts} + L_{msd} > 0 \\ L_0 & , \text{ com } L_{rts} + L_{msd} \leq 0 \end{cases}$$

$$L_0 = 32.4 + 20 \cdot \log(d/km) + 20 \cdot \log(f/MHz)$$

Onde,

$$L_{rts} = -16.9 + 10 \cdot \log(w/m) + 10 \cdot \log(f/MHz) + 10 \cdot \log(\Delta h_{mobile}/m) + L_{ori}$$

$$L_{ori} = \begin{cases} -10 + 0.354 \cdot \varphi, & 0 \leq \varphi \leq 35^\circ \\ 2.5 + 0.075 \cdot (\varphi - 35), & 35 \leq \varphi \leq 55^\circ \\ 4 - 0.114 \cdot (\varphi - 55), & 55 \leq \varphi \leq 90^\circ \end{cases}$$

$$\Delta h_{mobile} = h_{Roof} - h_{Mobile}$$

$$\Delta h_{Base} = h_{Base} - h_{Roof}$$

$$L_{msd} = L_{bsh} + k_a + k_d \cdot \log(d/Km) + k_f \cdot \log(f/MHz) - 9 \cdot \log(b/m)$$

$$L_{bsh} = \begin{cases} -18 \cdot \log \left(1 + \frac{\Delta h_{Base}}{m} \right), & h_{Base} > h_{Roof} \\ 0, & h_{Base} \leq h_{Roof} \end{cases}$$

$$k_d = \begin{cases} 18, & h_{Base} > h_{Roof} \\ 18 - 15 \cdot \frac{\Delta h_{Base}}{h_{Roof}}, & h_{Base} \leq h_{Roof} \end{cases}$$

$$k_a = \begin{cases} 54, & h_{Base} > h_{Roof} \\ 54 - 0.8 \cdot \frac{\Delta h_{Base}}{m}, & d \geq 0.5 \text{ Km e } h_{Base} \leq h_{Roof} \\ 54 - 0.8 \cdot \frac{d_{[Km]}}{0.5}, & d < 0.5 \text{ Km e } h_{Base} \leq h_{Roof} \end{cases}$$

$$k_f = -4 + \begin{cases} 0.7 \cdot \left(\frac{f_{[MHz]}}{925} - 1 \right), & \text{para cidades médias e centros suburbanos} \\ 1.5 \cdot \left(\frac{f_{[MHz]}}{925} - 1 \right), & \text{para centros urbanos} \end{cases}$$

As figuras seguintes ilustram as perdas em função do percurso para os casos do ambiente ser um centro urbano com e sem LOS.

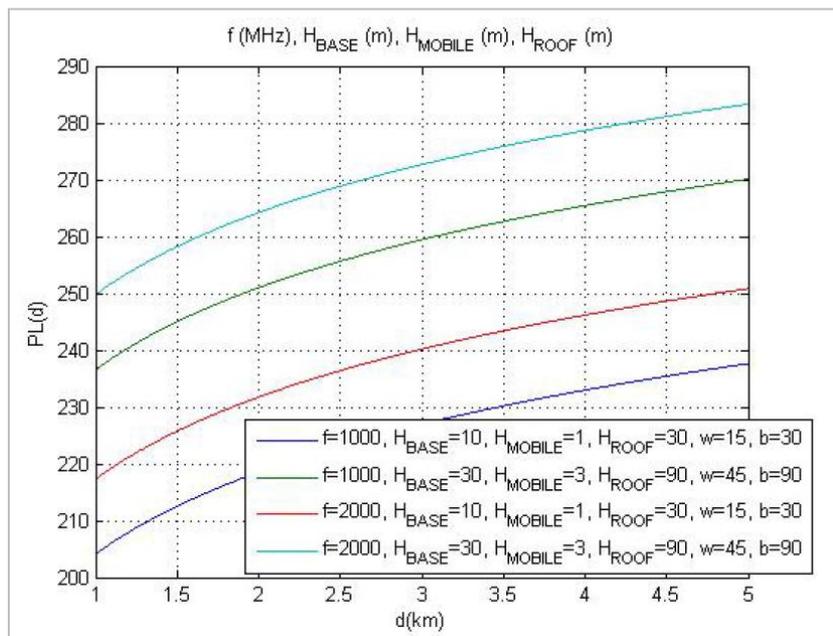


Figura 41 - Perdas de percurso em centro urbano com NLOS [3]

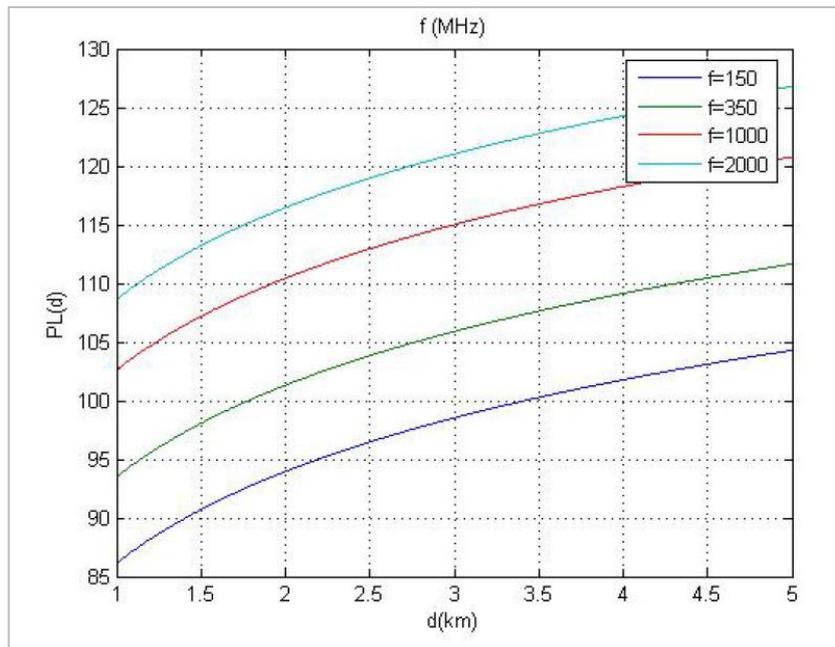


Figura 42 - Perdas de percurso em centro urbano com LOS [3]

3.4 Antenas

A escolha de antenas adequadas tem um grande impacto na capacidade e no alcance dos sistemas de distribuição sem fios analisados neste capítulo. Esta escolha tem de ser efectuada segundo uma série de parâmetros:

- **Frequência de operação** – todas as antenas são desenhadas para funcionar a uma certa frequência. A frequência de operação irá ditar o tamanho da antena, sendo que será para esta frequência que ela irá possuir o melhor comportamento. Este parâmetro não implica que as antenas só possam ser funcionar à frequência de operação, apenas indica qual o valor para o qual a antena irá possuir um maior rendimento.
- **Directividade** – este parâmetro é utilizado para determinar a capacidade da antena em transmitir os sinais numa dada direcção, ou de rejeitar os sinais provenientes de outra. É também chamado de ângulo de feixe, isto é, apenas radia segundo um determinado ângulo, desprezando todo o espaço restante.
- **Ganho** – este parâmetro é o mais usado pelos fabricantes pois permite aos clientes saberem a quantidade de potência que irá ser radiada numa dada direcção (desde que a potência nos terminais de entrada da antena seja conhecida). Este parâmetro é normalmente apresentado em dBi, isto é, apresenta-se a comparação entre a antena e uma antena isotrópica.

- **Largura de Banda** – banda do espectro de frequências, centrada na frequência de operação, onde a potência radiada (na direcção correcta) se encontra a menos de 3 dB da potência radiada na mesma direcção, à frequência de operação.
- **Polarização** – este parâmetro é definido pela orientação do campo eléctrico das ondas electromagnéticas. Estas podem possuir uma polarização linear (vertical ou horizontal), circular, ou elíptica, sendo que cada tipo de polarização existente possui características de radiação específicas.

3.4.1 Antenas Sectorizadas

As estações base das tecnologias analisadas neste capítulo possuem todas a capacidade de dividir as suas células em sectores. Esta sectorização só é possível graças ao uso de antenas sectorizadas, cujas características são apresentadas de seguida.

Um das características deste tipo de antenas é a sua directividade. São fabricadas antenas sectorizadas com ângulos de feixe desde os 15°, até aos 360° (antenas omnidireccionais). Como já foi referido anteriormente, quanto mais apertado for este ângulo, mais sector se irão ter por célula.

A configuração deste tipo de antenas depende directamente da frequência de operação do sistema. Nos casos estudados neste trabalho, as frequências são inferiores a 10 GHz, pelo que as antenas serão constituídas por *arrays* de dipólos, em configuração linear ou planar. Estes *arrays* de dipólos possuem, normalmente, a forma de um painel pelo que são vulgarmente chamadas de antenas painéis. Estas antenas têm de lidar com níveis de potência e larguras de banda bastante elevadas, pelo que não são recomendadas antenas realizadas em *microstrip*.

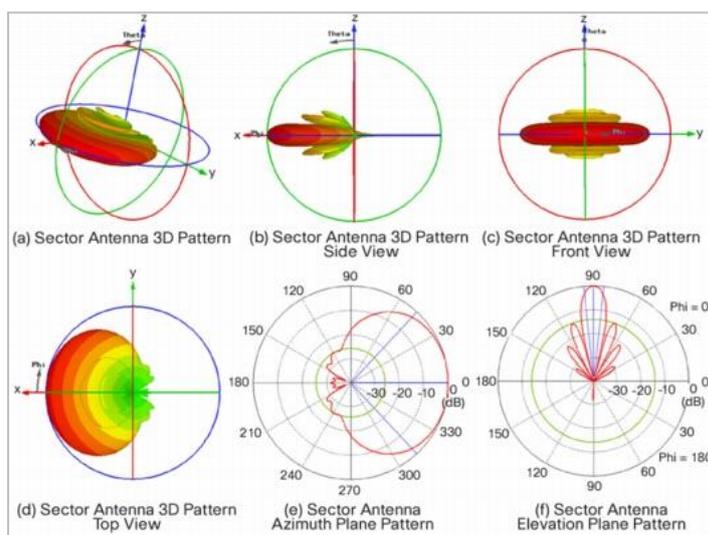


Figura 43 - Diagrama de Radiação de uma Antena Sectorizada [27]

De modo a combater efeitos adversos, como o *fast fading*, é comum utilizarem-se vários *arrays* por sector.

3.4.2 Sistemas Avançados

O desempenho e a capacidade desejados nos sistemas de comunicações sem fios estão limitados por três factores primordiais:

- **Fading** – enfraquecimento dos sinais devido à distância, aos obstáculos e ao *multipath*;
- **Propagação de atrasos** – qualquer sistema de comunicação possui atrasos e, quando se trata de sistemas de comunicações sem fios, estes propagam-se com o aumento da distância;
- **Interferências** – como já foi explicado anteriormente, os sistemas de comunicações sem fios não estão livres de vários tipos de interferências.

Existem alguns sistemas com a capacidade de diminuir os efeitos nocivos destes três factores. Serão agora analisados três destes sistemas.

3.4.2.1 Sistemas diversificativos

Estes sistemas de antenas foram desenvolvidos com o intuito de combater os efeitos de *fast fading*. Este fenómeno deve-se às interferências multi-caminho, isto é, o equipamento terminal recebe a mesma informação através de várias ondas (na sua maioria reflectidas) que percorreram distâncias diferentes, pelo que as suas fases poderão não estar sincronizadas. O princípio destes sistemas é que o uso de várias antenas planares irá aumentar a diversidade espacial. A ideia é que os sinais recebidos pelas várias antenas tenham *fading* independente, de modo a poderem ser combinados pelo receptor através de comutação (comutando para os sinais provenientes do transmissor que apresente menor *fading*), ganho equivalente (combina os sinais provenientes dos vários transmissores de modo a obter sempre um sinal com a mesma amplitude) ou combinação de taxa máxima (combina os sinais de modo a obter sempre a máxima amplitude).

3.4.2.2 Sistemas Adaptativos

Os sistemas de antenas adaptativos, também chamados antenas inteligentes, são utilizados para combater o efeito das interferências co-canal. Utilizando processos de adaptação dos *arrays* estes sistemas conseguem moldar a radiação destes, aumentando a amplitude do sinal desejado, desprezando aqueles que estavam a interferir com a comunicação. Este processo é

conhecido como combinação óptima, exigindo uma sequência de treino com dados conhecidos que irá ser transmitida conjuntamente com os dados a transmitir. Esta sequência é comparada na recepção, sendo depois ajustadas as antenas consoante a quantidade de erros presentes na sequência de treino. Obtém-se assim uma recepção de dados otimizada, minimizando a interferência co-canal.

3.4.2.3 Sistemas MIMO

Os sistemas de antenas MIMO utilizam várias antenas tanto no emissor como no receptor. O princípio de funcionamento de funcionamento destes sistemas baseia-se na suposição que o canal responderá melhor entre os diversos canais se estes forem transmitidos por antenas não relacionadas entre si, podendo ser utilizadas técnicas de processamento de sinal para diferenciar os múltiplos canais entre o receptor e o emissor (desde que estes canais não interfiram entre si).

4. Análise Tecno-Económica de Soluções de Rede

4.1 Metodologia

A análise efectuada às várias soluções consideradas recorreu a uma ferramenta de cálculo com a estrutura representada na seguinte figura:

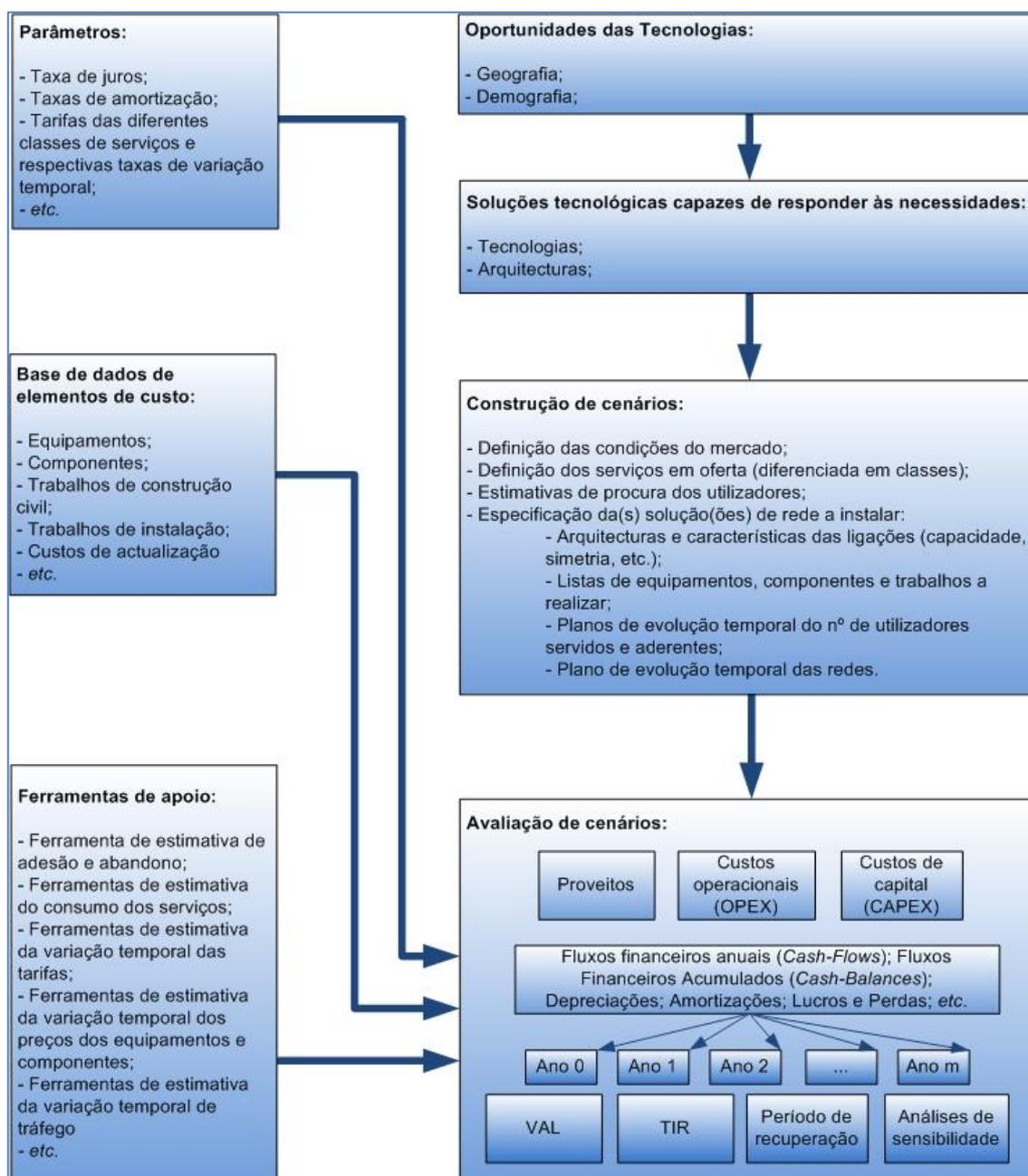


Figura 44 - Estrutura da Ferramenta de Cálculo

4.1.1 Penetração no mercado

A penetração no mercado tem sido alvo de discussão pois existem vários modelos de curvas logísticas que permitem traduzir a evolução do número de clientes de uma nova tecnologia de telecomunicações.

Parece óbvio que uma simples curva em “S” permite obter uma ideia geral (e também algum controlo) sobre a velocidade de penetração, assim como sobre a quantidade final, ou taxa de saturação, de clientes. Um exemplo deste tipo de curvas é ilustrado na Figura 45.

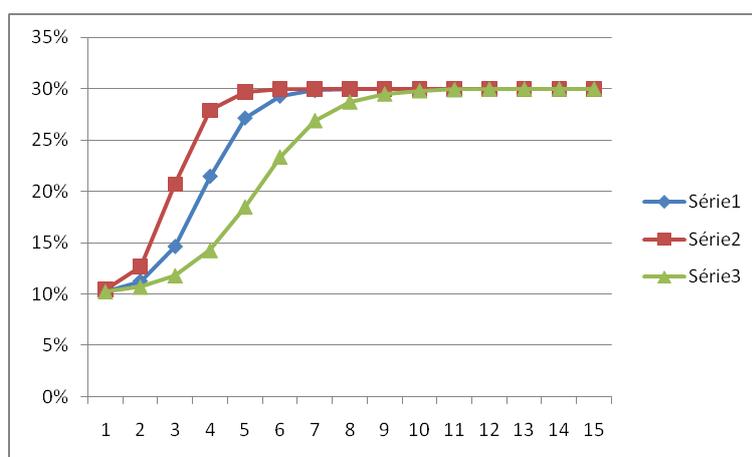


Figura 45 - Penetração segundo curva em "S"

Como se pode observar estas curvas permitem controlar o instante inicial e a velocidade de penetração. Este controlo é efectuado através da alteração de alguns parâmetros (α e β) do modelo matemático que as define.

$$P_t = P_i + \frac{(P_f - P_i)}{1 + \alpha e^{\beta t}}$$

A evolução das tecnologias de telecomunicações põe em questão a validade deste tipo de evolução, isto é, o aparecimento de novas soluções tecnológicas, com maior capacidade, irá levar os clientes a abandonar a solução tecnológica em questão, fugindo para a uma nova solução que vá ao encontro das suas necessidades. Este abandono força os operadores a actualizarem-se, o que torna a previsão da evolução do mercado algo mais complexa. A **Figura 46** ilustra uma tentativa de prever esta situação.

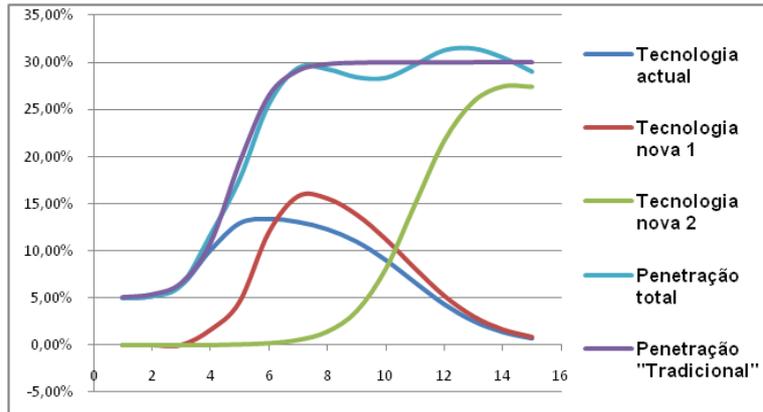


Figura 46 - Evolução da penetração

Verifica-se que o mercado continua a crescer de forma aproximadamente idêntica, isto é, o número total de clientes mantém o ritmo de adesão definido anteriormente. No entanto, se for analisada a penetração de uma tecnologia, observar-se-á uma curva logística em “sino”, cuja expressão matemática é a seguinte:

$$P_t = \frac{\left(P_i + \frac{(P_f - P_i)}{1 + \alpha e^{\beta t}} \right)}{(1 + \alpha e^{\beta t})}$$

Esta expressão permite o controlo da velocidade de abandono da tecnologia, através dos parâmetros a e b .

4.1.2 Definição da margem de segurança

A definição de uma margem de segurança permite que a implementação de uma solução seja flexível em relação à largura de banda que os utilizadores necessitam. É normalmente implementada de forma muito simples, considerando apenas que a rede tem de ser planeada para um tráfego superior em relação ao que se prevê ser necessário.

Outra implementação possível é de calcular a probabilidade de adesão do mercado na área servida por um sector, tendo em conta a adesão total do mercado. Nesta implementação são calculadas as probabilidades de aderência de todas as combinações de clientes possíveis por sector, tendo como base a aderência actual do mercado. Este cálculo, ilustrado na **Figura 47**, pode ser efectuado através da seguinte análise combinatória:

$$P_{aderência} = C_n^N p^n (1 - p)^{N-n}$$

Em que:

- N é o número máximo de clientes por sector;

- n é o número de clientes da combinação actual;
- p é a taxa de penetração actual.

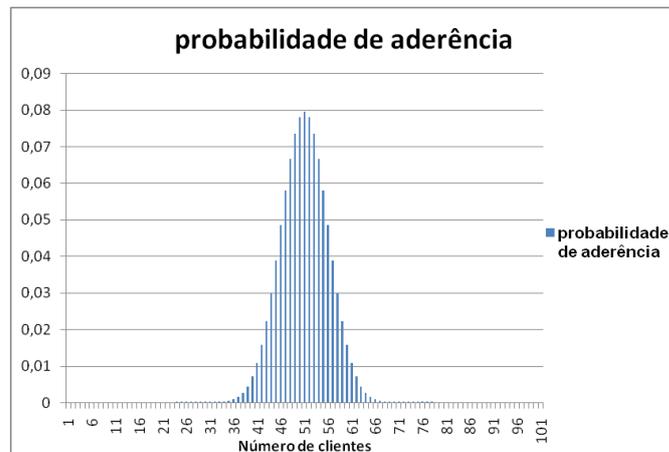


Figura 47 - Probabilidade de Aderência

Como se pode observar pela **Figura 47**, cuja taxa de penetração foi de 50%, é possível aumentar a probabilidade de servir os clientes que desejem aderir ao serviço, sem aumentar demasiado os custos de implementação, isto é, se for calculado a quantos clientes correspondem 90% da área do gráfico, iremos obter o 55 (num universo de 100 habitantes). Isto pode ser traduzido da seguinte forma: para poder servir todos os utilizadores que aderirem ao serviço com uma probabilidade de 90%, a rede terá de ser planeada para 55 utilizadores, e não para 50.

Visto o caso em que a taxa de penetração é de 50%, interessa agora ilustrar como evolui a probabilidade de aderência num mercado dinâmico. Este caso é ilustrado na **Figura 48**.

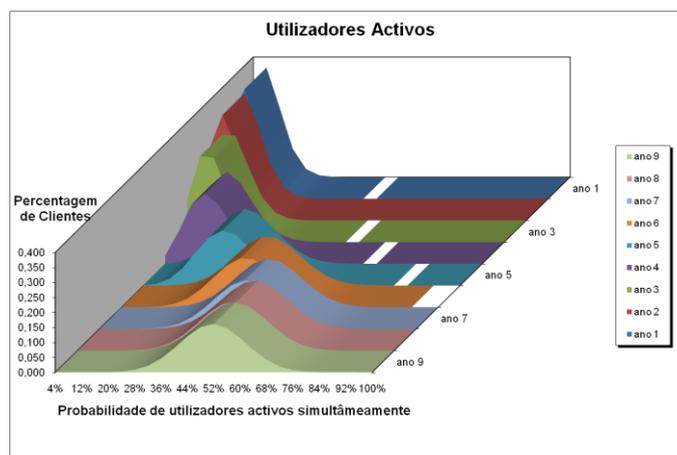


Figura 48 – Evolução da probabilidade de aderência

A partir destas séries de valores pode ser encontrado o número de clientes que é necessário considerar de modo a obter uma margem de segurança adequada. A **Figura 49** ilustra o caso de um mercado cuja penetração total é definida por uma curva de aderência e abandono (curva em “sino”) em que foi implementada uma margem de segurança variável.

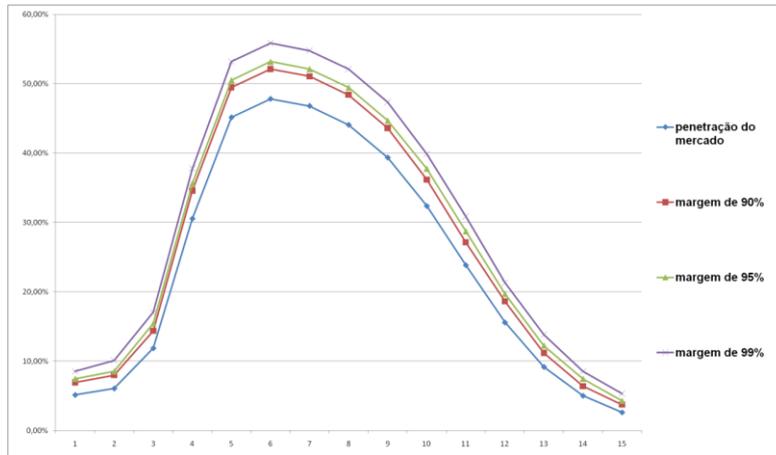


Figura 49 - margens de segurança

4.1.3 Evolução dos preços dos equipamentos

O preço dos equipamentos é um factor que, numa análise económica, varia ao longo dos anos. É comum utilizar uma taxa de erosão da qual resultará, de forma idêntica para todas as tecnologias, uma depreciação cuja forma será o inverso de uma função exponencial. Com este método, muito simplista, apenas se consegue controlar um parâmetro, a partir do qual irão evoluir a velocidade de depreciação e o valor final para o qual o equipamento irá tender.

Será agora apresentado um método que, a partir de definições de classes de amadurecimento, permite calcular uma previsão da depreciação em que variam os dois parâmetros que, anteriormente, apenas eram controlados pela definição de uma taxa. Este novo método rege-se pela seguinte fórmula matemática:

$$P(t) = P(0) \left[n_{r(0)} \left(1 + e^{\left\{ \ln \left[\frac{1-n_{r(0)}}{n_{r(0)}} \right] - \left[\frac{2 \ln(9)}{\Delta T} \right] t \right\}} \right) \right]^{-\ln(K) / \ln(2)}$$

Através da alteração dos parâmetros $n_{r(0)}$ e ΔT podem ser definidas classes de maturidade dos equipamentos, isto é, ao atribuir valores tabelados para esta variáveis, a velocidade de depreciação de um determinado equipamento irá evoluir segundo uma curva já conhecida. Outro parâmetro que pode ser controlado é K . Este parâmetro identifica qual o tipo de equipamento a tratar (equipamento electrónico, equipamento de construção civil, equipamento de telecomunicações, etc.). Segue-se agora duas tabelas a partir das quais se podem observar os valores que estas variáveis podem tomar.

Tabela 6 - Tipos de equipamentos e valores de K [7]

Learning Curve Class	K value
Civi Works	1
Copper Cable	1
Electronics	0,8
Fiber Cable	0,9
Advanced Optical Components	0,7
Passive Optical Components	0,8

Tabela 7 - Classes de equipamentos [7]

Volume Class	$n_{r(0)}$	ΔT
Old, very slow	0,5	40
Old, slow	0,5	20
Old, médium	0,5	10
Old, fast	0,5	5
Mature, medium	0,1	10
Mature, fast	0,1	5
New, very slow	0,01	40
New, slow	0,01	20
New, médium	0,01	10
New, fast	0,01	5
Emerging, very slow	0,001	40
Emerging, slow	0,001	20
Emerging, medium	0,001	10
Emerging, fast	0,001	5

Pode-se observar, na **Figura 50**, a evolução do preço de um equipamento consoante a classe a que pertence.

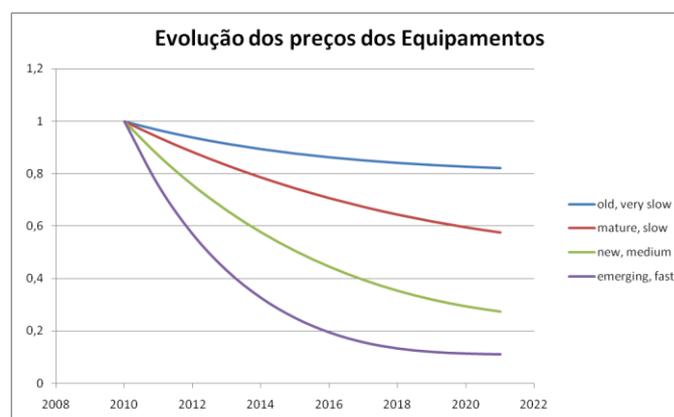


Figura 50 - Evolução do preço dos equipamentos

4.2 Análise de uma Solução Baseada em WiMAX

Segue-se agora a análise tecno-económica de uma rede de acesso na qual a rede de distribuição tem por base a tecnologia IEEE 802.16e. A rede evoluirá ao longo dos anos de modo a manter-se tecnologicamente actualizada.

A **Figura 51** ilustra a arquitectura de rede para a solução baseada em WiMAX. Este trabalho apenas se irá centrar nos segmentos incluídos no rectângulo colorido, isto é, nas redes primária, de distribuição e de clientes. Será também tido em conta os custos de servidor de *Gateway*, cuja função é fazer o encaminhamento do tráfego entre as estações base e a rede nuclear, possibilitando o encaminhamento de dados entre estações base sem necessitar de sobrecarregar a rede nuclear⁴.

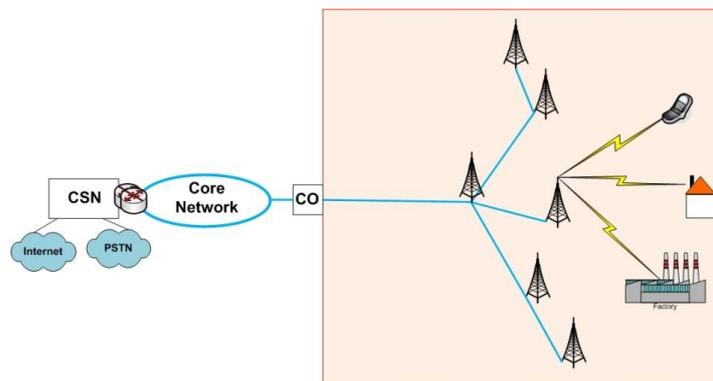


Figura 51 - Arquitectura da Rede WiMAX

Será também considerado que não existe nenhuma central local nas zonas onde se irá implementar esta solução, sendo necessária uma ligação em fibra óptica desde o *gateway* (colocado numa central vizinha) e a primeira estação base. Para esse efeito foi considerada uma distância média de 20 km entre estes dois elementos, tendo a preocupação de colocar fibra “escura” na conduta, de modo a simplesmente ser necessário efectuar a ligação dos equipamentos quando forem implementadas novas estações base.

4.2.1 Definição do Mercado

Nesta fase do trabalho são tidas em conta três zonas habitacionais distintas: uma zona suburbana e duas zonas rurais. Para cada situação são considerados dois tipos de clientes, com larguras de bandas diferentes. Em cada uma das zonas habitacionais os dois tipos de clientes são:

- **Cliente tipo1:** 4 Mbps com um factor de concentração de 30. Evoluindo com a nova tecnologia para 12 Mbps e, anos depois, para 25 Mbps.

⁴ Caso exista tráfego proveniente de uma das estações base cujo destino seja um utilizador de uma estação base vizinha, o servidor de *Gateway* irá reencaminhar directamente este tráfego, sem recorrer à rede nuclear.

- **Cliente tipo2:** 10 Mbps com um factor de concentração de 15. Evoluindo com a nova tecnologia para 25 Mbps e, anos depois, para 50 Mbps.

Segue-se agora uma breve descrição das zonas habitacionais para as quais foi realizado este estudo.

Zona SU (Suburbana):

Trata-se de uma zona suburbana não convencional, isto é, não se trata de uma zona circunscrita à uma área urbana. Constituída por cerca de 10000 Unidades de Alojamento, distribuídas por área de 10 km², pode ser caracterizada por ser uma zona mista, isto é, não pode ser considerada como uma zona residencial, nem como uma zona industrial pois possui características comuns a ambas (habitações, empresas e armazéns industriais). Este tipo de localidades pode ilustrado pela **Figura 52**.

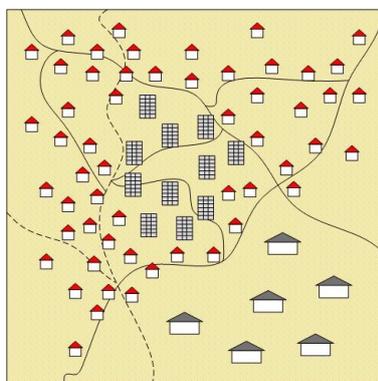


Figura 52 - Zona SU (Suburbana)

Zona R (Rural):

Trata-se de uma zona rural convencional, isto é, composto por vários aglomerados de residências, próximos uns dos outros. Constituída por cerca de 4500 Unidades de Alojamento, distribuídas por área de 120 km², pode ser caracterizada por ser uma zona puramente habitacional, isto é, não existe qualquer tipo de indústria. Este tipo de localidades pode ilustrado pela **Figura 53**.

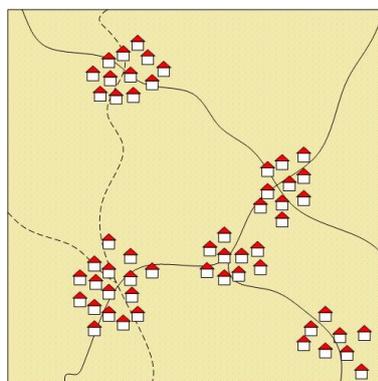


Figura 53 - Zona R (Rural)

Zona R_i (Rural Isolada):

Trata-se de uma zona rural não convencional, isto é, esta zona é composta por uma única localidade, afastada do resto da civilização, sem possibilidade de aglomerar o seu tráfego de informação a localidades vizinhas. É composta por 500 unidades de alojamento (sem indústria) distribuídas por uma área de 10km². Este tipo de localidades pode ilustrado pela **Figura 54**.

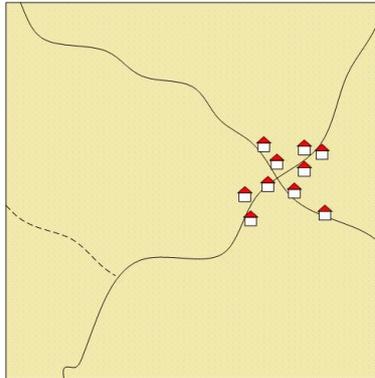


Figura 54 - Zona R_i (Rural Isolada)

A **Tabela 8** ilustra os parâmetros utilizados para definir as velocidades de aderência total do mercado, isto é, como se irá comportar o mercado total, sem se considerar qual a tecnologia aplicada.

Tabela 8 - penetração no mercado

	Zona SU		Zona R		Zona R _i	
	Cientes 1	Cientes 2	Cientes 1	Cientes 2	Cientes 1	Cientes 2
P _i	5%	1,5%	5%	1,5%	5%	1,5%
P _f	30%	9%	30%	9%	30%	9%
A	300		300		300	
B	-1,5		-1,5		-1,5	

A penetração “real” no mercado, tendo em conta as diferentes tecnologias, é ilustrada nas figuras seguintes.

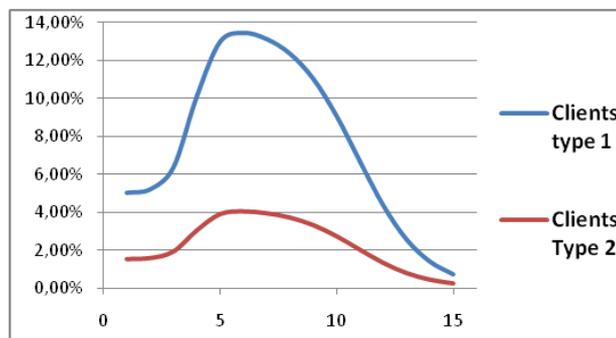


Figura 55 - penetração no mercado da tecnologia actual

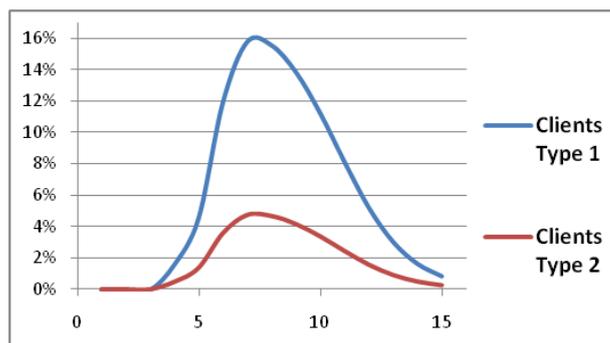


Figura 56 - penetração no mercado da nova tecnologia

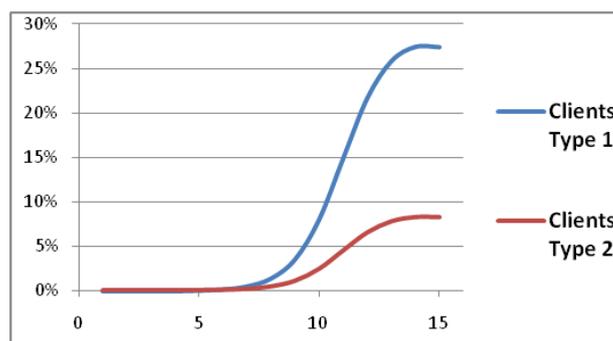


Figura 57 - penetração no mercado da última tecnologia

4.2.2 Definições das Redes a Implementar

Segue-se agora uma análise do planeamento necessário para implementar as redes necessárias em cada zona habitacional estudada.

4.2.2.1 Zona SU

Visto se tratar de uma zona suburbana o alcance das antenas presentes nas estações base não terão um alcance superior 1,2 km. Tratando-se de uma área com 10 km² necessitaremos de pelo menos 3 células para poder garantir a cobertura da zona em questão.

Sabe-se que, no presente, esta tecnologia possui uma capacidade média de 20 Mbps por sector (reservam-se alguns canais para funções de controlo). Pode ser observado, na **Figura 58**, a evolução do tráfego gerado pelos clientes da primeira tecnologia implementada, assim como a capacidade do sistema quando, utilizando o número mínimo de células para servir toda a área em questão, se variam o número de sectores por estação base.

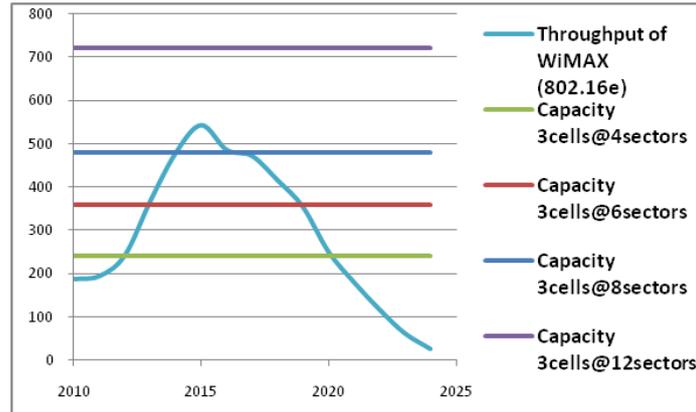


Figura 58 - Evolução do Tráfego (WiMAX@SU)

Pode-se concluir, após observar a figura anterior, que a solução com a melhor relação entre capacidade e tráfego gerado ao longo dos anos é a configuração com 8 sectores por estação base. De modo a acompanhar o crescimento do tráfego será necessário, enquanto for possível, colocar novas estações base. Esta evolução é feita através de um *cell splitting*.

Com o passar dos anos será necessário actualizar a tecnologia, de modo a poder oferecer uma maior largura de banda aos clientes mais exigentes. Também esta evolução é feita gradualmente, tal como pode ser observado na **Figura 59**.

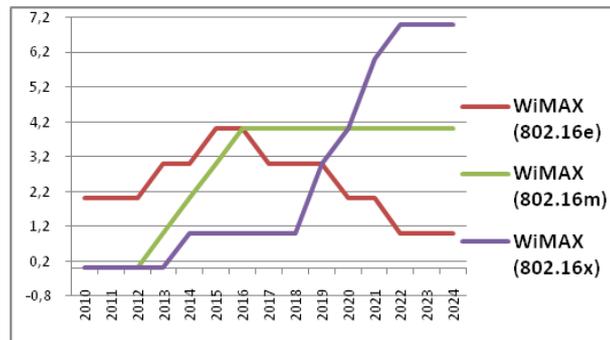


Figura 59 - Evolução do Número de BS (WiMAX@SU)

Como se pode observar será necessário implementar novas estações base ao longo dos anos, isto é, o aumento de capacidade por parte das novas tecnologias não é suficiente para acompanhar o crescimento do tráfego gerado pelos clientes.

4.2.2.2 Zona R

Visto se tratar de uma zona rural o alcance das antenas presentes nas estações base não terão um alcance superior 5,5 km. Tratando-se de uma área com 120 km² necessitaremos de pelo menos 2 células para poder garantir a cobertura da zona em questão.

Sabe-se que, no presente, esta tecnologia possui uma capacidade de 20 Mbps por sector. Pode ser observado, na **Figura 60**, a evolução do tráfego gerado pelo clientes da primeira

tecnologia implementada, assim como a capacidade do sistema quando, utilizando o número mínimo de células para servir toda a área em questão, se varia o número de sectores por estação base.

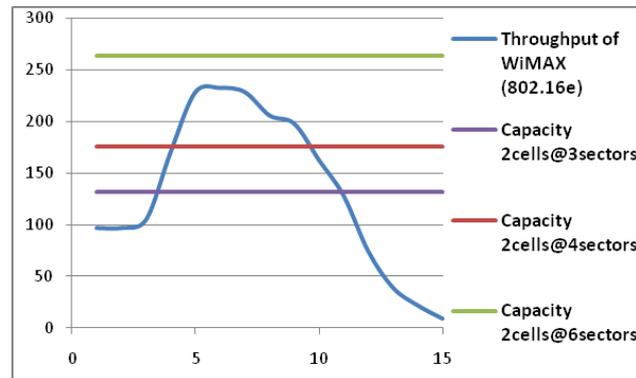


Figura 60 - Evolução do Tráfego (WiMAX@R)

Pode-se concluir, após observara figura anterior, que a solução com a melhor relação entre capacidade e tráfego gerado ao longo dos anos é a configuração com 4 sectores por estação base. De modo a acompanhar o crescimento do tráfego será necessário, enquanto for possível, colocar novas estações base. Esta evolução é feita através de um *cell splitting*.

Com o passar dos anos será necessário actualizar a tecnologia, de modo a poder oferecer uma maior largura de banda aos clientes mais exigentes. Também esta evolução é feita gradualmente, tal como pode ser observado na **Figura 61**.

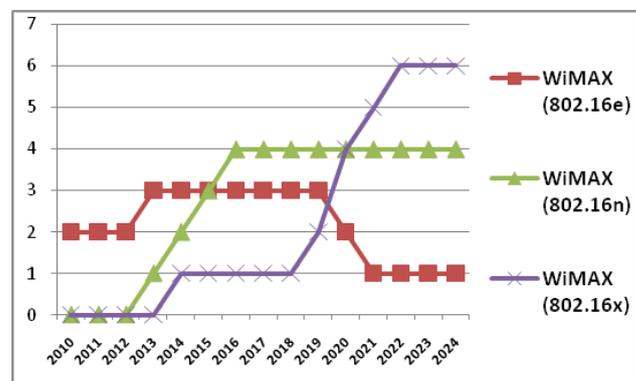


Figura 61 - Evolução das BS (WiMAX@R)

Como se pode observar será necessário implementar novas estações base ao longo dos anos, isto é, o aumento de capacidade por parte das novas tecnologias não é suficiente para acompanhar o crescimento do tráfego gerado pelos clientes.

4.2.2.3 Zona R_i

Visto se tratar de uma zona rural o alcance das antenas presentes nas estações base não terão um alcance superior 5,5 km. Tratando-se de uma área com 10 km² necessitaremos de

somente 1 célula para poder garantir a cobertura da zona em questão e, de modo a conseguir maior largura de banda por sector (utilizando apenas técnicas de modulação que permitam um débito mais elevado), irá reduzir-se o alcance para 4km.

Sabe-se que, no presente, esta tecnologia possui uma capacidade de 30 Mbps por sector (devido ao facto de só utilizar técnicas de modulação mais avançadas). Tal facto implica que uma estação base com uma única antena omnidireccional será suficiente para servir todo o tráfego gerado, tal como ilustrado na **Figura 62**.

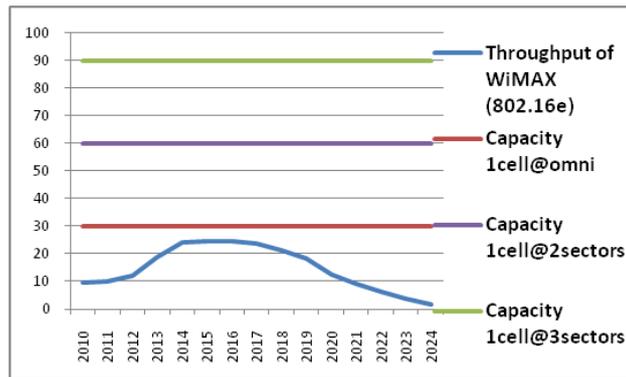


Figura 62 - Evolução do Tráfego (WiMAX@R_i)

Com o passar dos anos será necessário actualizar a tecnologia, de modo a poder oferecer uma maior largura de banda aos clientes mais exigentes. Também esta evolução é feita gradualmente, tal como pode ser observado na **Figura 63**.

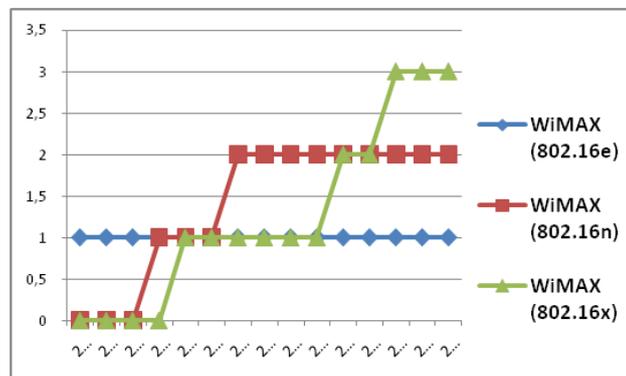


Figura 63 - Evolução das BS (WiMAX@ R_i)

Como se pode observar será necessário implementar novas estações base ao longo dos anos, isto é, o aumento de capacidade por parte das novas tecnologias não é suficiente para acompanhar o crescimento do tráfego gerado pelos clientes.

4.2.3 CAPEX

O CAPEX representa os custos de investimento, isto é, o investimento necessário para implementar a solução desejada.

Para esta solução o CAPEX será constituído pelos custos relativos a 3 componentes:

- Estações Base (implementação e actualizações);
- Rede *Feeder* (implementação e actualizações);
- CPE (implementação e actualizações).

O número de estações base já foi calculado anteriormente, assim como a sua evolução. De modo a calcular o CAPEX é agora necessário verificar os custos relativos aos CPE e à rede *feeder*.

A implementação dos CPE é gradual sendo que cada metade dos clientes necessitará de obter um equipamento fixo, isto é, um CPE instalado dentro da habitação. Será considerado, para este trabalho, que 50% destes clientes se encontram em locais cuja recepção/emissão dos sinais provenientes/destinados de/para a estação base necessita de um CPE com antena exterior. Considera-se que os restantes destes clientes podem ser servidos com um equipamento cuja antena é interna. Os restantes 50% dos clientes utilizarão equipamento móvel para aceder aos serviços (*modem usb, telemóvel, etc.*).

A implementação da rede primária (*feeder*) poderia ser realizada através de duas tecnologias, não fossem as tecnologias futuras gerar tráfego superior à capacidade da primeira solução apresentada:

- *Radio link* – duas antenas direccionais transmitem os sinais de uma estação base para um ponto de agregação;
- *Fibra óptica* – através de uma de uma rede óptica passiva com topologia em estrela dupla (*star and tree*).

Visto que as tecnologias actualizadas geram tráfego que poderá chegar à ordem das várias centenas de Megabits por célula, a opção de implementar uma rede primária através de *Radio Link* torna-se inviável.

São de seguida apresentados os CAPEX resultantes da implementação desta solução utilizando uma rede primária constituída por fibra óptica, segundo uma topologia de estrela dupla (*tree and branch*).

4.2.3.1 Zona SU

Os custos de implementação desta solução na Zona SU serão agora analisados. As figuras seguintes ilustram a distribuição e a evolução destes investimentos.

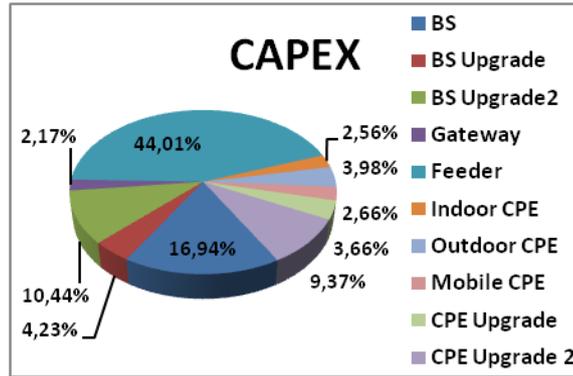


Figura 64 - Distribuição do CAPEX (WiMAX@SU)

Como se pode observar pela **Figura 64** o investimento mais significativo, com cerca de 44%, é a implementação da rede primária. Este valor não será, como se pode observar pela **Figura 65**, o investimento anual mais significativo em todos os anos, tal como se pode observar no caso anterior, isto é, existem componentes da rede que requerem um investimento significativo no primeiro ano, mas que não irão necessitar de grandes melhoramentos ao longo do projecto.

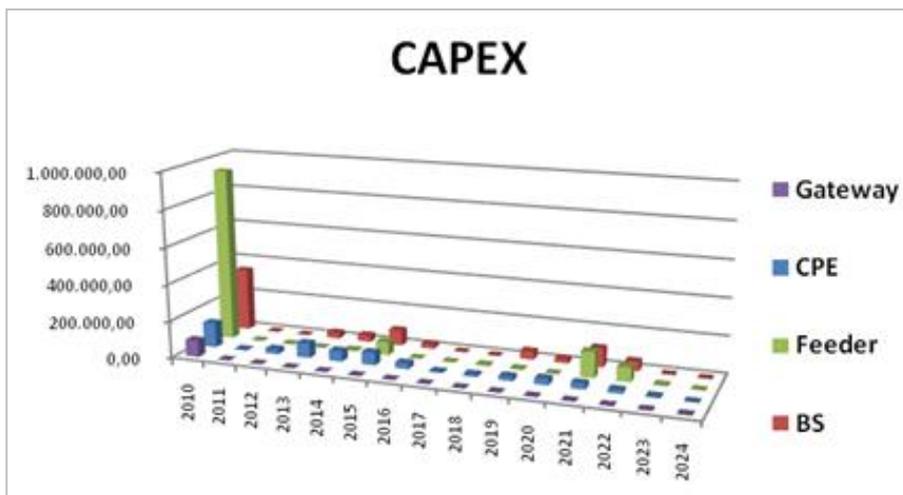


Figura 65 - Evolução do CAPEX (WiMAX@SU)

Como se pode verificar cada um dos componentes de custo possui um comportamento diferente ao longo dos anos.

4.2.3.2 Zona R

Os custos de implementação desta solução na Zona R serão agora analisados. As figuras seguintes ilustram a distribuição e a evolução destes investimentos.

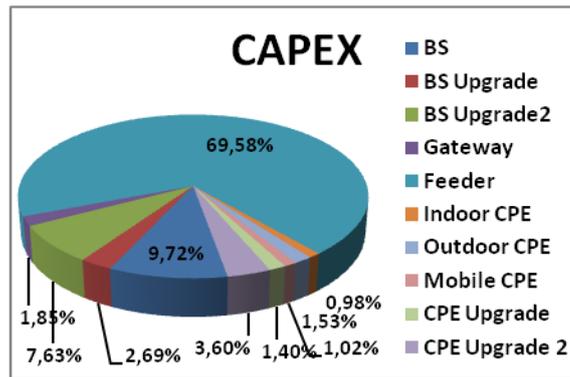


Figura 66 - Distribuição do CAPEX (WiMAX@Zona B)

Como se pode observar pela **Figura 66** o investimento mais significativo, com cerca de 70%, é a implementação da rede primária. Este valor não será, como se pode observar pela **Figura 67**, o investimento anual mais significativo em todos os anos, isto é, haverá anos do projecto em que os não serão necessários realizar investimentos neste segmento da rede.

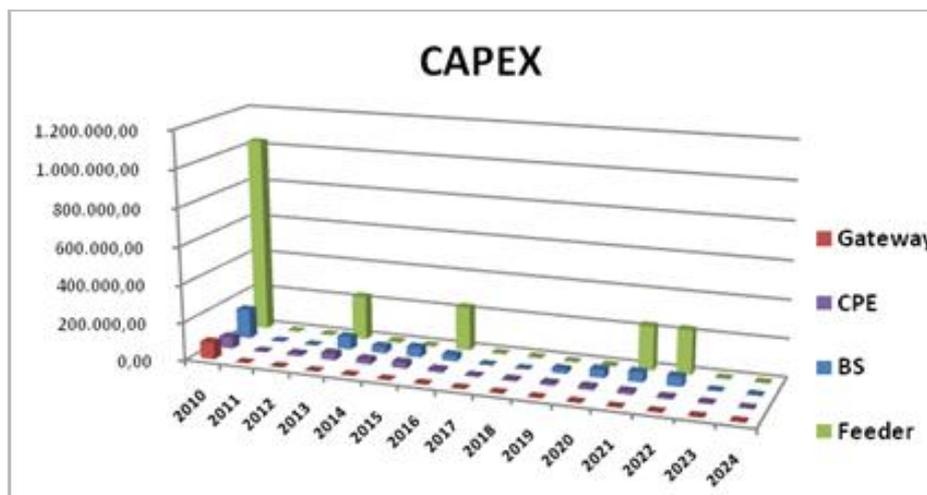


Figura 67 - Evolução do CAPEX (WiMAX@Zona B)

Como se pode verificar cada um dos componentes de custo possui um comportamento diferente ao longo dos anos.

4.2.3.3 Zona R_i

Os custos de implementação desta solução na Zona R_i serão agora analisados. As figuras seguintes ilustram a distribuição e a evolução destes investimentos.

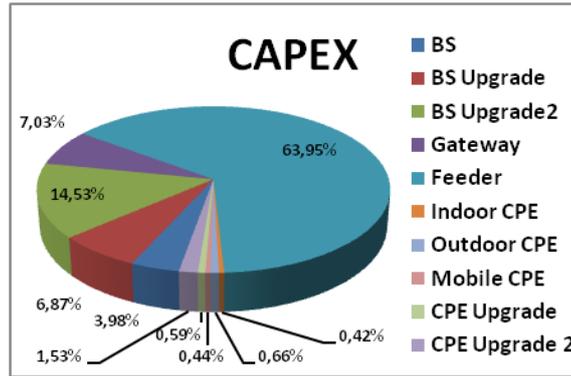


Figura 68 - Distribuição do CAPEX (WiMAX@Ri)

Como se pode observar pela **Figura 68** o investimento mais significativo, com cerca de 72%, é a implementação da rede primária. Este valor não será o investimento anual mais significativo em todos os anos, isto é, o comprimento de fibra óptica necessária não irá crescer de forma tão significativa como os outros equipamentos (na realidade só será necessária proceder à instalação de fibra no primeiro ano do projecto). Pode-se observar, na **Figura 69**, a evolução do CAPEX em relação aos outros equipamentos.

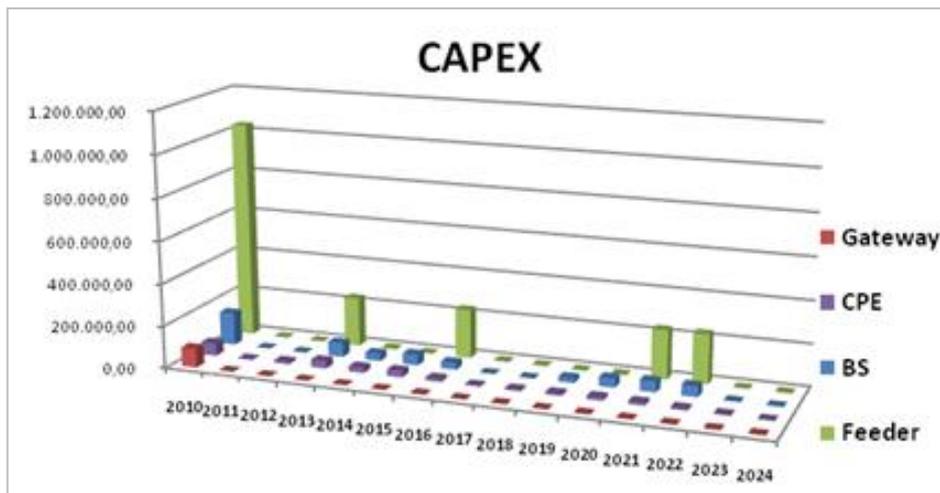


Figura 69 - Evolução do CAPEX (WiMAX@Ri)(1)

A **Figura 69** não permite uma análise da evolução dos custos devido à presença dos investimentos necessários para a implementação da rede primária (bastante mais elevados que qualquer outro investimento no ano 0). Segue-se agora, na **Figura 70**, a ilustração dos custos de capitais sem a rede primária, de modo a poder analisar a evolução dos investimentos nos restantes equipamentos.

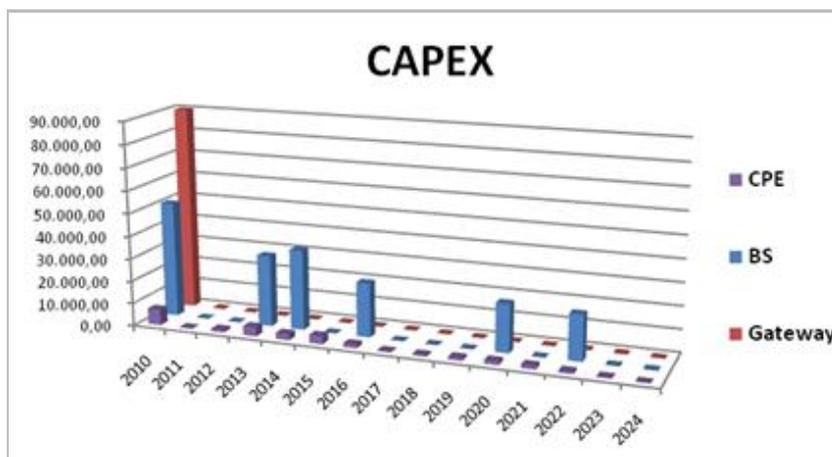


Figura 70 - Evolução do CAPEX (WiMAX@R_i)(2)

4.2.4 OPEX

O OPEX representa os custos de operação e manutenção, isto é, os custos envolvidos para manter a solução funcional.

Para esta solução o OPEX será constituído pelos custos relativos a 3 factores:

- Manutenção (das estações base e da rede primária);
- Alimentação eléctrica (das estações base e dos elementos activos da rede primária);
- Substituição de CPE.

Os custos de manutenção e de alimentação eléctrica dependem directamente da quantidade de estações base existentes e do comprimento da rede primária. Para o caso das estações base serão considerados valores fixos, tanto para a alimentação eléctrica como para a manutenção, que serão depois multiplicados pelo número de estações base existentes. Em relação à rede primária os custos de manutenção serão linearmente proporcionais ao comprimento desta, enquanto os custos de alimentação eléctrica serão relativos ao número de equipamentos activos, isto é, aos equipamentos existentes nos extremos de cada ligação.

São de seguida apresentados os valores relativo à distribuição e à evolução do OPEX resultantes da implementação desta solução.

4.2.4.1 Zona SU

Os custos de operação e manutenção desta solução na Zona SU serão agora analisados. As figuras seguintes ilustram a distribuição e a evolução destes investimentos.

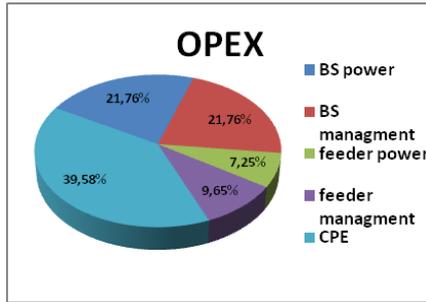


Figura 71 - Distribuição do OPEX (WiMAX@SU)

Como se pode observar pela **Figura 71** o investimento mais significativo, com cerca de 40%, é a substituição dos equipamentos dos clientes. Este valor não será, como se pode observar pela **Figura 72**, o investimento anual mais significativo em todos os anos, na realidade este é o único factor de custo que não possui uma evolução estável.

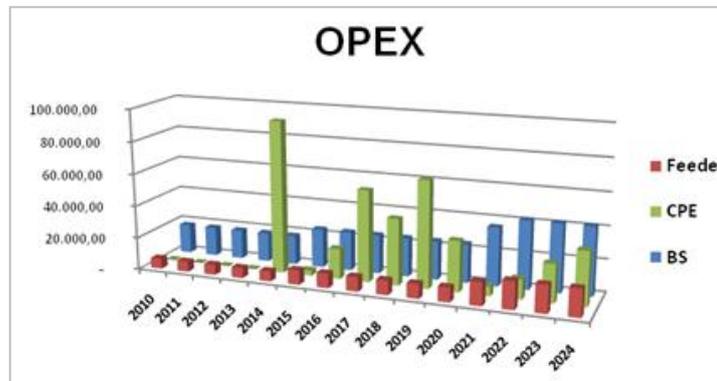


Figura 72 - Evolução do OPEX (WiMAX@SU)

4.2.4.2 Zona R

Os custos de operação e manutenção desta solução na Zona R serão agora analisados. As figuras seguintes ilustram a distribuição e a evolução destes investimentos.

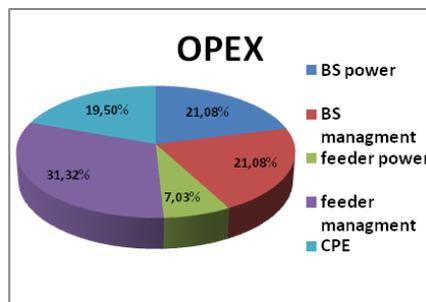


Figura 73 - Distribuição do OPEX (WiMAX@R)

Como se pode observar pela **Figura 73** o investimento mais significativo, com cerca de 30%, é o custo de manutenção da rede primária. Este valor não será, como se pode observar pela **Figura 74**, o investimento anual mais significativo em todos os anos.

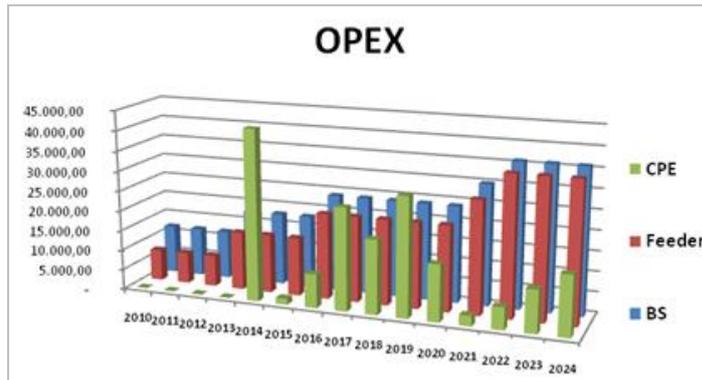


Figura 74 - Evolução do OPEX (WiMAX@R)

4.2.4.3 Zona R_i

Os custos de operação e manutenção desta solução na Zona R_i serão agora analisados. As figuras seguintes ilustram a distribuição e a evolução destes investimentos.

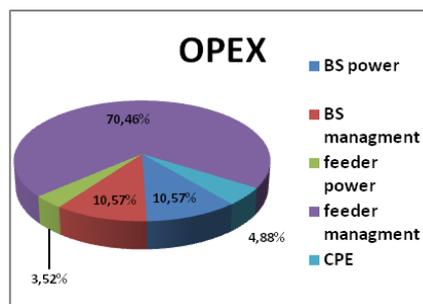


Figura 75 - Distribuição do OPEX (WiMAX@R_i)

Como se pode observar pela **Figura 75** o investimento mais significativo, com cerca de 70% cada, é relativo à manutenção da rede primária. Este valor será, como se pode observar pela **Figura 76** o investimento anual mais significativo em todos os anos.

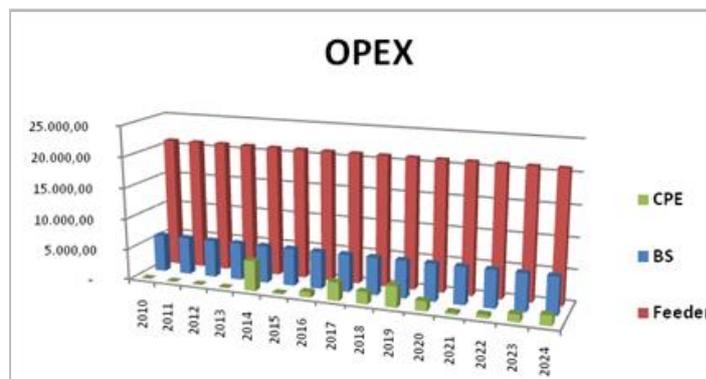


Figura 76 - Evolução do OPEX (WiMAX@R_i)

4.2.5 Custos Relativos

Outro parâmetro bastante útil na apreciação deste tipo de análises são os custos relativos, isto é, os custos que a solução possui, em relação a outro parâmetro. Serão apresentados, nas figuras seguintes, os custos relativos por utilizador servido assim como os custos relativos a cada Km² coberto.

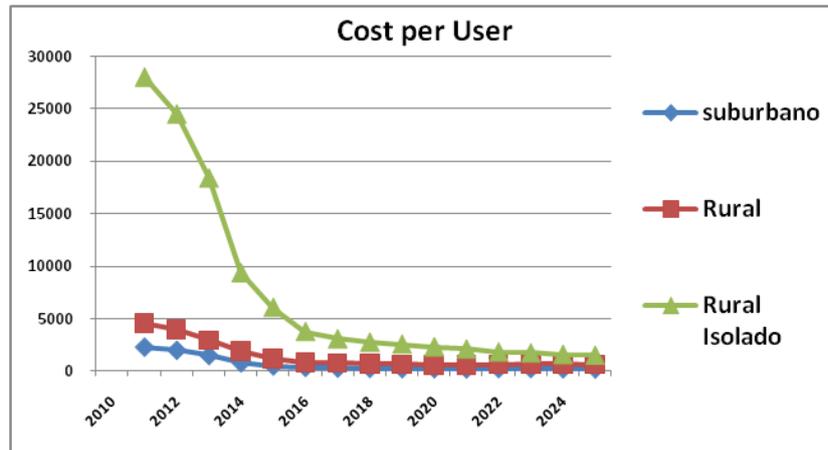


Figura 77 - Custo por Utilizador (WiMAX)

Pode-se observar pela **Figura 77** que os custos por utilizador têm tendência a baixar. Tal facto é devido aos investimentos necessários serem mais significativos nos primeiros anos, e ao número de utilizadores aumentar ao longo dos anos. Verifica-se também que as zonas financeiramente menos atractivas possuem um custo por utilizador mais elevado, devido ao número de utilizadores ser menor e ao investimento mais significativo (a instalação da rede primária em fibra óptica) estar presente nos três casos.

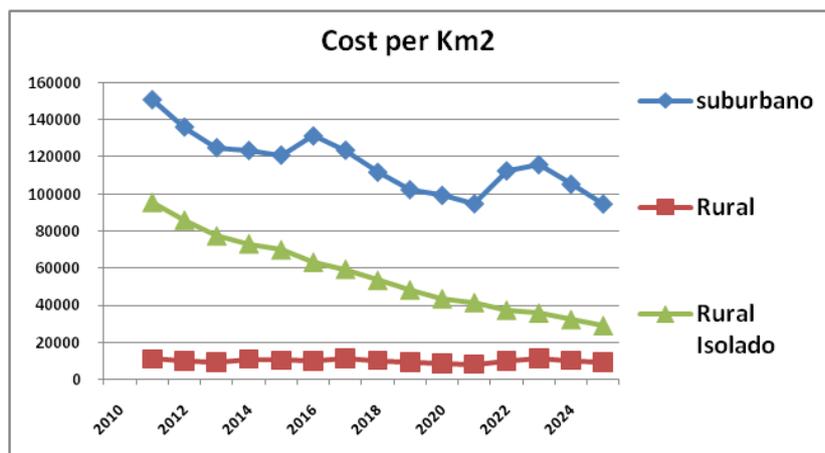


Figura 78 - Custo por Km² (WiMAX)

Pode-se observar pela **Figura 78** que os custos por Km² têm tendência a baixar. Tal facto é devido aos investimentos necessários serem mais significativos nos primeiros anos, diminuindo nos anos seguintes, mantendo-se a área servida ao longo dos anos. De notar que a zona habitacional que apresenta o menor custo por área servida é a zona rural, devido ao alcance

elevado das estações base. Na zona rural isolada este valor é superior devido ao desta área ser inferior à área máxima que é possível servir com uma única estação base. No caso da zona suburbano existem duas observações. A primeira é que o custo por Km² é o mais elevado, devido ao alcance reduzido das estações base, e ao seu número mais elevado de sectores. A segunda é o efeito das actualizações tecnológicas, que fazem subir este custo de forma significativa (devido ao número total de estações base ser mais elevado).

4.2.6 Resultados

Existem vários parâmetros que permitem identificar a viabilidade económica de um projecto. Entre eles destacam-se os seguintes:

- **VAL(Valor Actual Líquido):** valor actual de todos os *cash flow*.
- **TIR (Taxa Interna de Rentabilidade):** representa uma taxa de juro tal, que se o capital investido tivesse sido colocada a essa taxa, obteríamos exactamente a mesma taxa de rentabilidade final.
- **Tempo de Recuperação:** periodo necessário para o balance se torne positivo.
- **ARPU (Average Revenue Per User):** receitas médias geradas por utilizador.
- **AMPU (Average Margin Per User):** margem de lucro por utilizador, isto é, diferença entre as receitas e os custos médios por utilizador. Quando este valor se torna negativo os resultados económicos tendem a ser prejudicados, tomando valores menos atractivos.

Seguem-se agora os resultados económicos mais relevantes relativamente a esta solução tecnológica (VAL, TIR e Tempo de Recuperação), quando implementada nos vários ambientes habitacionais. Obter-se-ão mais conclusões nas secções seguintes, quando forem apresentados os resultados sob a forma de gráficos.

Tabela 9 - Resultados Económicos (WiMAX)

	Zona SU	Zona R	Zona R _i
VAL	3.378.043,31€	-291.449,23€	-1.100.811,76€
TIR	22,82%	-1,21%	Indefinido
Tempo de Recuperação	5 anos	Indefinido	Indefinido

4.2.6.1 Zona SU

Segue-se uma análise mais pormenorizada dos resultados obtidos quando se implementada uma solução deste tipo na zona SU.

Uma forma de apresentar os resultados económicos de modo a que estes sejam perceptíveis e que permitam uma análise pormenorizada é através de gráficos que, segundo uma

evolução temporal, ilustram a evolução dos investimentos (CAPEX e OPEX), das receitas, dos fluxos e dos balanços. A **Figura 79** ilustra os resultados desta solução na zona SU segundo as características anteriormente referidas.

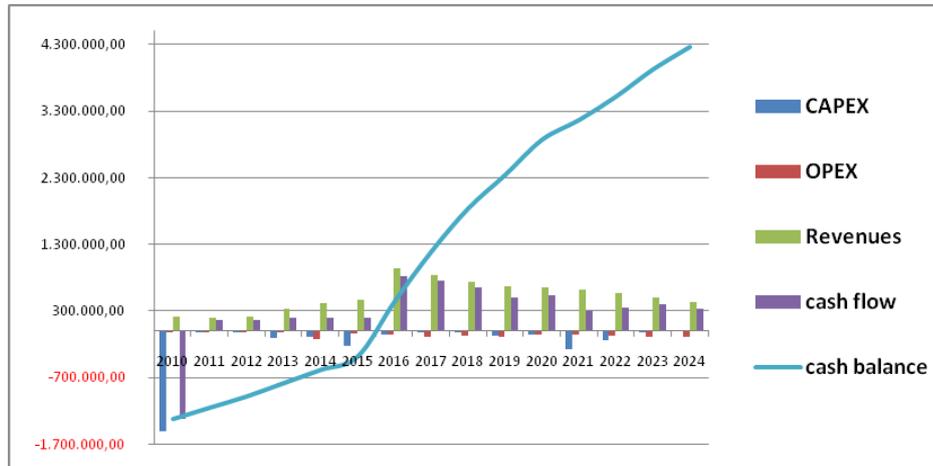


Figura 79 - Resultados Económicos (WiMAX@SU)

Através deste gráfico podem ser retiradas várias conclusões. Verifica-se que o tempo de recuperação estará situado entre 2015 e 2016 pois este parâmetro representa o ano em que o balanço se torna positivo. Verifica-se também que os maiores investimentos são realizados no ano 0. Outra observação é a diminuição das receitas nos últimos anos, devido à erosão que as receitas sofrem.

4.2.6.2 Zona R

Segue-se uma análise mais pormenorizada dos resultados obtidos quando se implementada uma solução deste tipo na zona R. A **Figura 80** ilustra os resultados desta solução na zona R segundo as características anteriormente referidas.

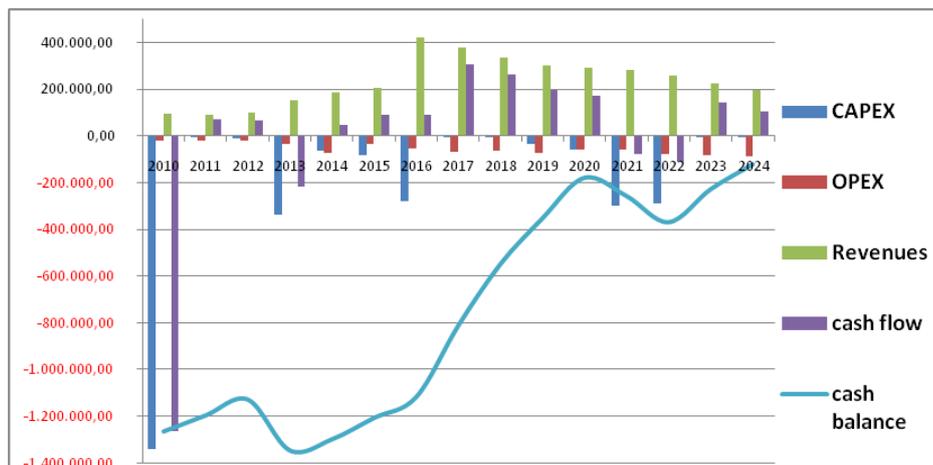


Figura 80 - Resultados Económicos (WiMAX@R)

Através deste gráfico podem ser retiradas várias conclusões. Verifica-se que os investimentos não serão compensados pelas receitas. Outra observação é a diminuição das receitas nos últimos anos, devido à erosão que as receitas sofrem. Pode ainda observar-se quedas brutas no balanço nos anos em que se investe na actualização das tecnologias, assim como nos anos em que os componentes activos da rede primária serão substituídos.

O balanço tem tendência a crescer pelo que pode levar a pensar que um investimento externo poderia tornar esta solução atractiva para os operadores. Serão agora analisados os resultados desta solução na zona R quando apoiada por dois tipos de investimentos diferentes.

No primeiro tipo de investimento é considerado que este projecto recebe um apoio através de dez prestações anuais idênticas, cujo objectivo é de aumentar a TIR de modo a esta atingir o valor de 10 %. O valor total necessário segundo este tipo de investimento é de **1.089.112,60€**. A **Figura 81** ilustra os resultados desta solução, com este tipo de financiamento.

No segundo tipo de investimento é considerado que este projecto recebe um apoio através de seis prestações, de dois valores distintos, em anos alternados, cujo objectivo é de aumentar a TIR de modo a esta atingir o valor de 10 %. Os dois valores que as prestações tomam são, para o primeiro ano, 50 % do investimento total e, para as restantes 5 prestações, 10 %. O valor total necessário segundo este tipo de investimento é de **928.760,15€**.

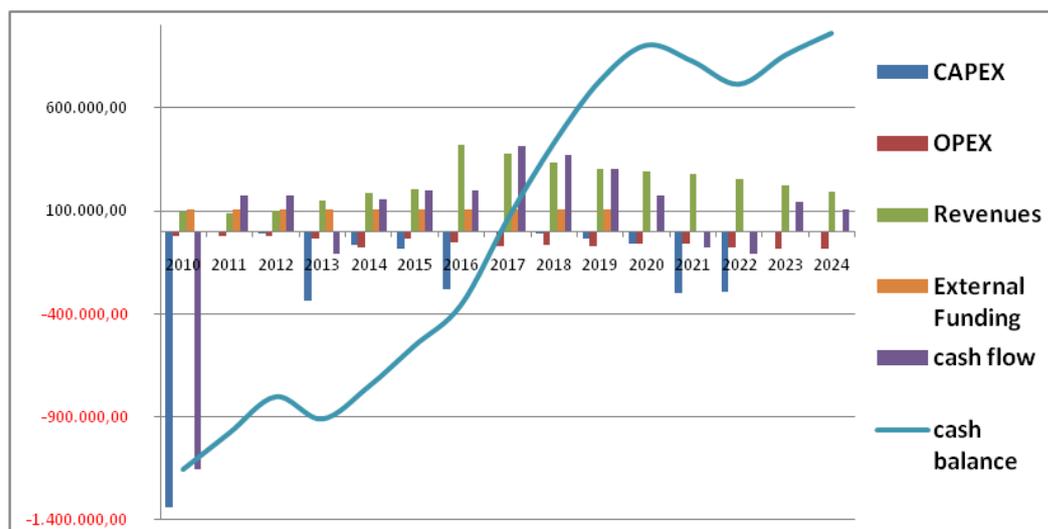


Figura 81 - Resultados com financiamento tipo 1 (WiMAX@R)

Pode-se observar que o balanço apresenta um comportamento semelhante ao caso anterior, notando-se uma diferença: o crescimento é mais acentuado pelo que lhe permite atingir valores positivos no intervalo de tempo considerado.

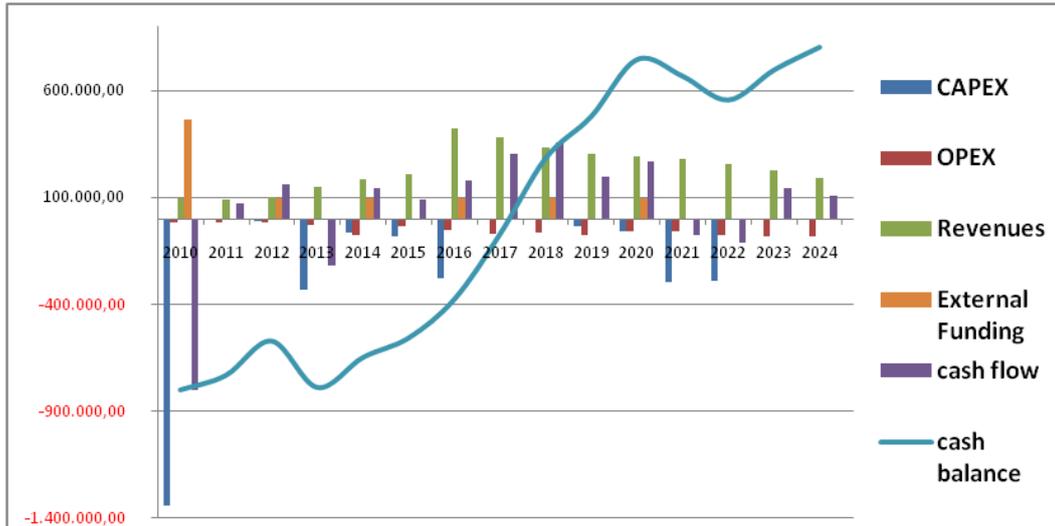


Figura 82 - Resultados com financiamento tipo 2 (WiMAX@R)

Pode-se observar mais uma vez que o balanço segue uma evolução bastante semelhante à inicial. De modo a efectuar uma comparação mais eficiente, a **Figura 83** ilustra o balanço gerado no três casos anteriormente analisados.

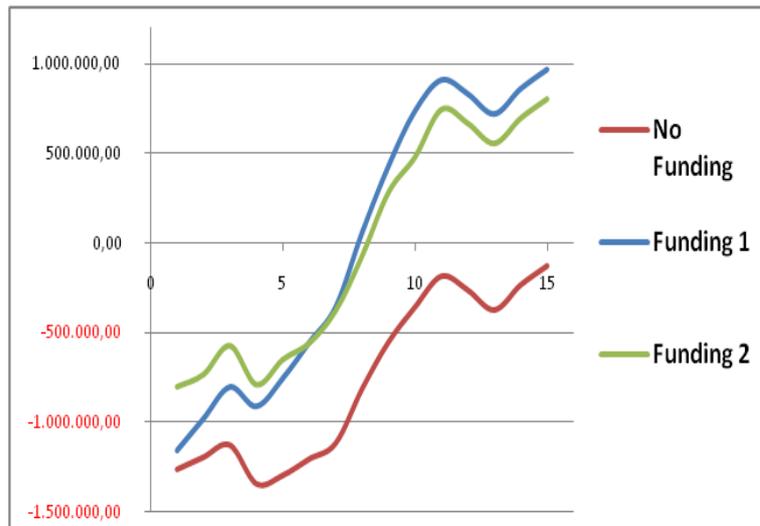


Figura 83 - Balanços (WiMAX@R)

4.2.6.3 Zona R_i

Segue-se uma análise mais pormenorizada dos resultados obtidos quando se implementada uma solução deste tipo na zona R_i . A **Figura 84** ilustra os resultados desta solução na zona R_i segundo as características anteriormente referidas.

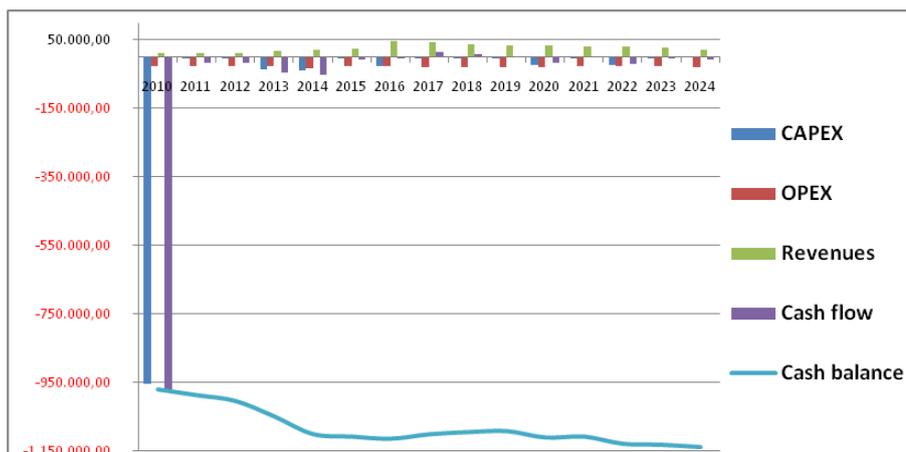


Figura 84 - Resultados Económicos (WiMAX@Ri)

Através deste gráfico podem ser retiradas várias conclusões. Verifica-se que os investimentos não serão compensados pelas receitas. Outra observação é a diminuição das receitas nos últimos anos, devido à erosão que as receitas sofrem. Outra observação que se pode fazer, e talvez a mais relevante, é que o balanço tem sempre tendência a baixar. Tal facto leva à conclusão que as receitas não serão suficientes para cobrir os custos de operação e manutenção. Visto isto pode-se concluir que os dois tipos de investimentos acima analisados não serão adequados para este caso.

Serão considerados dois financiamentos simultâneos. Um primeiro financiamento igualará, numa única prestação, os custos de implementação da solução no ano 0 (CAPEX relativo ao ano 0). Um segundo financiamento será composto por prestações anuais, de igual valor entre elas, cujo objectivo será atingir uma TIR de 10 %, compensando assim os custos de operação e manutenção. A soma dos valores totais destes investimentos será de **1.181.909,50€** e a sua implementação encontra-se ilustrada na **Figura 85**.

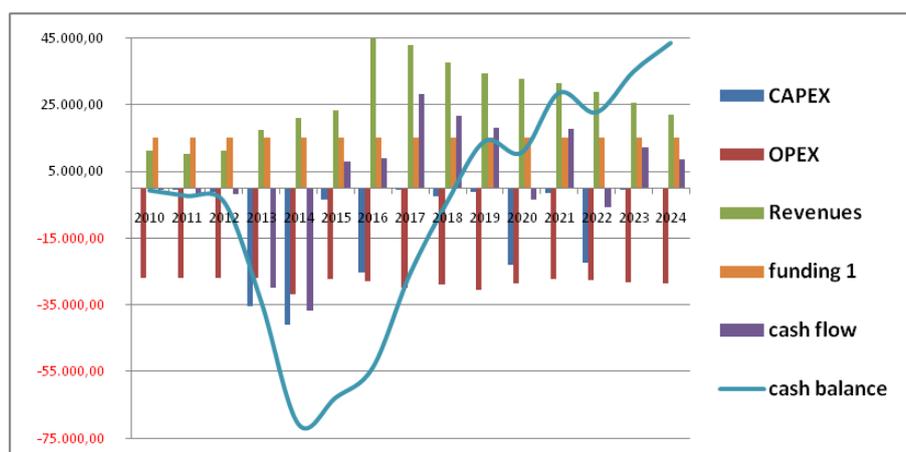


Figura 85 - Resultados com financiamento (WiMAX@Ri)

Foram retirados os investimentos de capitais do ano 0, assim como o seu financiamento, de modo a que este gráfico fosse mais legível.

4.2.7 Análise de Sensibilidade

Tratando-se de análises compostas por suposições, torna-se necessário verificar qual a sensibilidade do projecto às variáveis de entrada, isto é, verificar-se-á, de seguida, como variam os resultados mais significativos (TIR, VAL, financiamentos) quando se variam alguns parâmetros. A **Tabela 10** apresenta os valores que alguns parâmetros, comuns a todas as zonas analisadas, devem tomar para realizar a análise de sensibilidade.

Tabela 10 - Parâmetros comuns (WiMAX)

		-10%	$\Delta(-10\%)$	0%	$\Delta(+10\%)$	+10%
Parâmetros a avaliar	Start Level					
	Clients 1	4,5%	-0,5%	5%	0,5%	5,5%
	Clients 2	1,35%	-0,15%	1,5%	-0,15%	1,65%
	Saturation Level					
	Clients 1	27%	-3%	30%	3%	33%
	Clients 2	9%	-1%	10%	1%	11%
	Traffic Concentration					
	Clients 1	27	-3	30	3	33
	Clients 2	13,5	-1,5	15	1,5	16,5
	Safety Margin					
		81%	-9%	90%	9%	99%
	Brandwith					
	LB1 1	3,6	-0,4	4	0,4	4,4
	LB1 2	7,2	-0,8	8	0,8	8,8
	LB2 1	10,8	-1,2	12	1,2	13,2
	LB2 2	22,5	-2,5	25	2,5	27,5
	LB3 1	22,5	-2,5	25	2,5	27,5
	LB3 2	45	-5	50	5	55
	Tarrif					
	Clients 1	22,5	-2,5	25	2,5	27,5
	Clients 2	31,5	-3,5	35	3,5	38,5

Serão apresentados, nas devidas secções, os valores dos restantes parâmetros de entrada.

4.2.7.1 Zona SU

Seguem-se agora os valores dos parâmetros que ainda não foram definidos, de modo a se prosseguir à análise de sensibilidade desta solução na zona SU.

Tabela 11 - Parâmetros específicos (WiMAX@SU)

Parâmetros a avaliar		-10%	$\Delta(-10\%)$	0%	$\Delta(+10\%)$	+10%
	Houses					
		9000	-1000	10000	1000	11000
Area						
		9	-1	10	1	11

Os parâmetros de saída a analisar neste caso são as variações do VAL e da TIR. Encontram-se ilustradas essas variações na **Figura 86**.

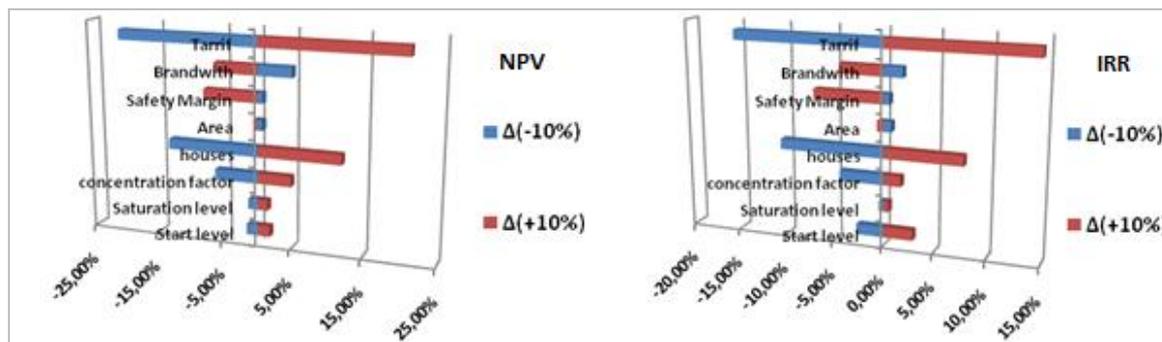


Figura 86 - Sensibilidade do VAL e da TIR (WiMAX@SU)

Como se pode verificar através das figuras anteriores os parâmetros analisados não afectam o VAL e a TIR do mesmo modo, isto é, existem parâmetros que, quando incrementados de 10 %, afectam o VAL de forma mais significativa, em relação à sua influência na TIR. Pode-se concluir que este projecto possui uma grande sensibilidade à variação das tarifas praticadas.

4.2.7.2 Zona R

Seguem-se agora os valores dos parâmetros que ainda não foram definidos, de modo a se prosseguir à análise de sensibilidade desta solução na zona R.

Tabela 12 - Parâmetros específicos (WiMAX@R)

Parâmetros a avaliar		-10%	$\Delta(-10\%)$	0%	$\Delta(+10\%)$	+10%
	Houses					
		4050	-450	4500	450	4950
Area						
		108	-12	120	12	132

Os parâmetros de saída a analisar neste caso são as variações do VAL, da TIR e dos dois tipos de financiamento analisados. Encontram-se ilustradas essas variações nas seguintes figuras.

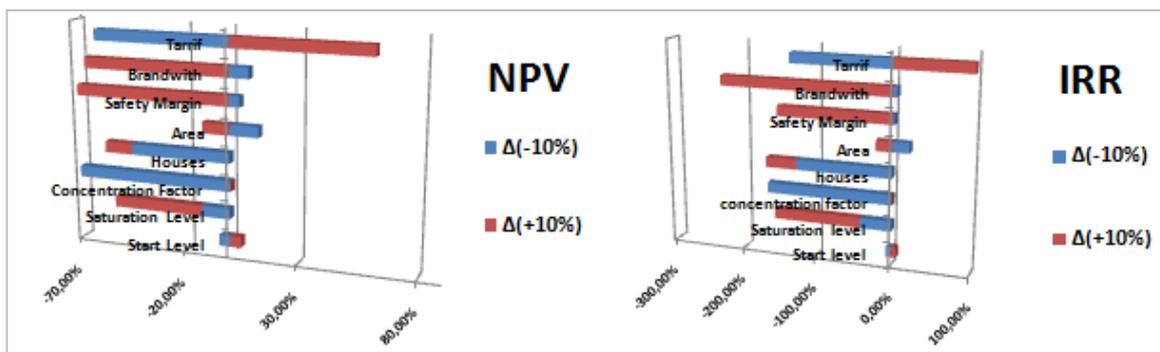


Figura 87 – Sensibilidade do VAL e da TIR (WiMAX@R)

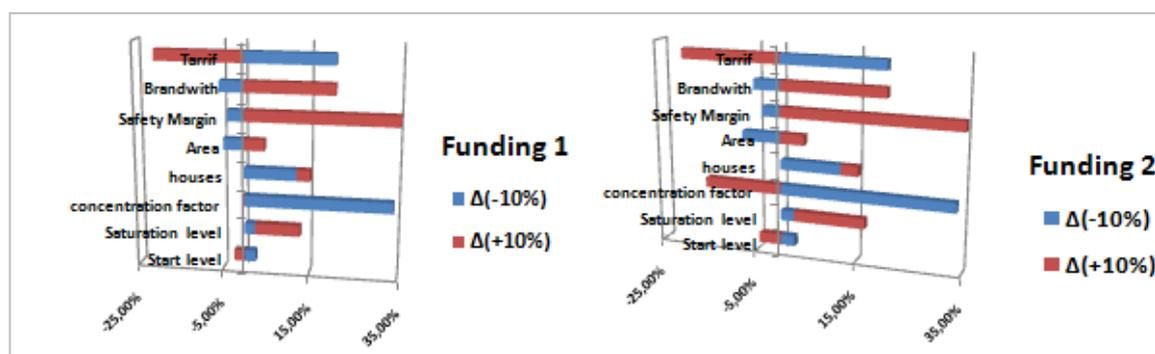


Figura 88 - Sensibilidade dos Financiamentos (WiMAX@R)

Os gráficos anteriores apresentam alguns valores interessantes. Quando se analisa o efeito da variação de alguns parâmetros, chega-se à conclusão que qualquer que seja o “sentido” da variação, os resultados irão ser prejudicados.

Dois destes casos, e os mais facilmente explicáveis, são o nível de saturação e o número de habitações presentes (ambos provocam um decréscimo no VAL, independentemente do “sentido” da variação). Este facto pode ser explicado pela utilização das estações base, isto é, uma diminuição de 10% em cada um destes factores não possibilita a implementação de menos uma estação base (mantendo assim os custos mas diminuindo as receitas) e, no entanto, um aumento de 10% destes implica a instalação de mais uma estação base que não terá um número suficiente de clientes para a tornar rentável (o aumento de receitas não compensa o aumento de investimentos).

Outros parâmetros interessantes são o factor de concentração, a margem de segurança e a largura de banda fornecida. Em todos estes parâmetros existe uma variação que prejudica o projecto de forma muito mais significativa que a variação contrária. Isto deve-se ao facto de um aumento de 10% no factor de concentração (ou uma diminuição de 10% na margem de segurança ou na largura de banda) não implicar uma diminuição do número de estações base, enquanto que uma variação no “sentido” contrário obriga a instalação de novos equipamentos, sem aumentar as receitas.

4.2.7.3 Zona R_i

Seguem-se agora os valores dos parâmetros que ainda não foram definidos, de modo a se prosseguir à análise de sensibilidade desta solução na zona R_i.

Tabela 13 - Parâmetros específicos (WiMAX@R_i)

Parâmetros a avaliar		-10%	Δ(-10%)	0%	Δ(+10%)	+10%
	Houses					
		450	-50	500	50	550
Area						
		9	-1	10	1	11

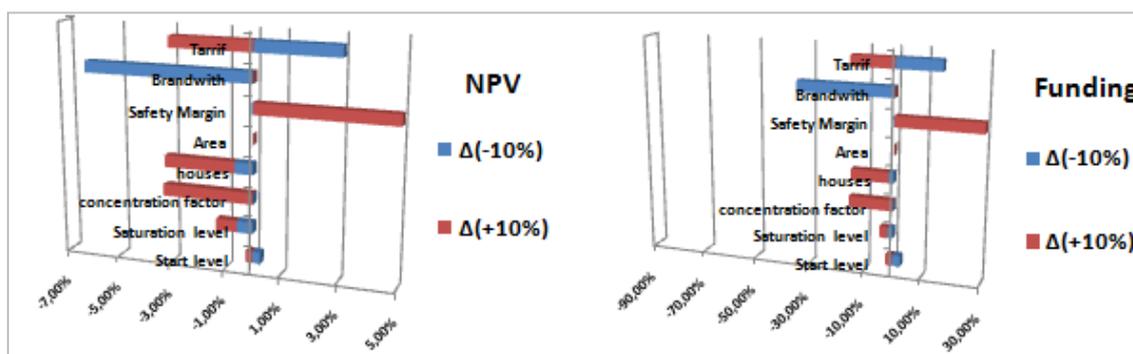


Figura 89 - Sensibilidade do VAL e do Financiamento (WiMAX@R_i)

Os gráficos anteriores apresentam alguns valores interessantes. Quando se analisa o efeito da variação de alguns parâmetros, chega-se à conclusão que qualquer que seja o “sentido” da variação, os resultados ser prejudicados.

Os dois casos em que tal acontece são o nível de saturação e o número de habitações presentes (ambos provocam um decréscimo no VAL, independentemente do “sentido” da variação). Este facto pode ser explicado pela utilização das estações base, isto é, uma diminuição de 10% em cada um destes factores não possibilita a implementação de menos uma estação base (mantendo assim os custos mas diminuindo as receitas) e, no entanto, um aumento de 10 % destes implica a instalação de mais uma estação base que não terá um número suficiente de clientes para a tornar rentável (o aumento de receitas não compensa o aumento de investimentos).

4.3 Análise de uma Solução Baseada em LTE

Segue-se agora a análise tecno-económica de uma rede de acesso na qual a rede de distribuição tem por base a tecnologia LTE. A rede evoluirá ao longo dos anos de modo a manter-se tecnologicamente actualizada.

Relembra-se agora, através da **Figura 90**, a **Figura 28** que ilustra a arquitectura de rede para a solução baseada em LTE na qual não será implementado nenhum sistema de voz, isto é,

apenas se considerará o tráfego de dados. Serão tidos em conta os custos de toda a rede primária e de distribuição, assim como será considerada uma percentagem dos custos de implementação do *packet core* (composto pelos servidores MME e S-GW), consoante o número de *eNodeB* considerados.

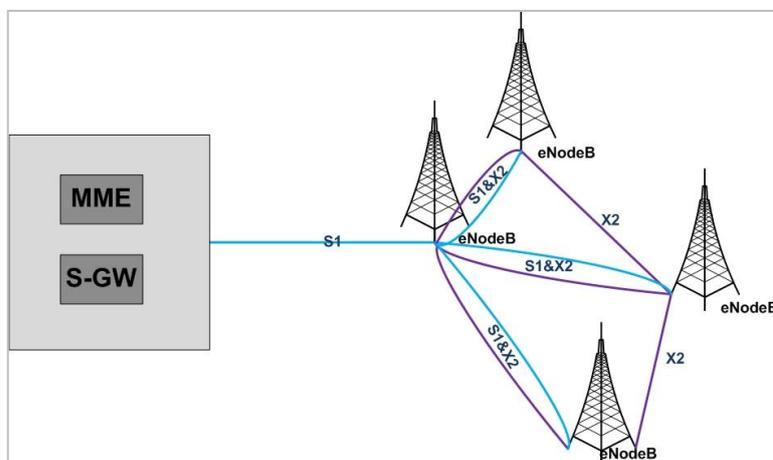


Figura 90 - Arquitectura LTE (data only)

Será também considerado que não existe nenhuma central local nas zonas onde se irá implementar esta solução, sendo necessária uma ligação em fibra óptica desde da rede de interligação e a primeira estação base. Para esse efeito foi considerada uma distância média de 20 km entre estes dois elementos, tendo a preocupação de colocar fibra “escura” na conduta, de modo simplesmente ter de efectuar a ligação dos equipamentos quando forem implementados novos *eNodeB*.

4.3.1 Definição do Mercado

Nesta fase do trabalho são tidas em conta três zonas habitacionais distintas: uma zona suburbana e duas zonas rurais. Para cada situação são considerados dois tipos de clientes, com larguras de bandas diferentes. Em cada uma das zonas habitacionais são os dois tipos de clientes são:

- **Cliente tipo1:** 10 Mbps com um factor de concentração de 30, evoluindo com a nova tecnologia para 20 Mbps.
- **Cliente tipo2:** 25 Mbps com um factor de concentração de 15, evoluindo com a nova tecnologia para 50 Mbps.

As zonas habitacionais consideradas serão idênticas às definidas na **secção 4.2.1**, isto é, serão consideradas zonas com as seguintes características:

- Zona SU (Suburbana): constituída por 10.000 Unidades de Alojamento, distribuídas por uma área de 10 km².
- Zona R (Rural): constituída por 4.500 Unidades de Alojamento, distribuídas por uma área de 120 km².
- Zona R_i (Rural isolada): constituída por 500 Unidades de Alojamento, distribuídas por uma área de 10 km².

A penetração no mercado será diferente da solução anterior, visto esta só prever uma actualização da tecnologia. A **Figura 91** ilustra a evolução da penetração desta tecnologia no mercado.

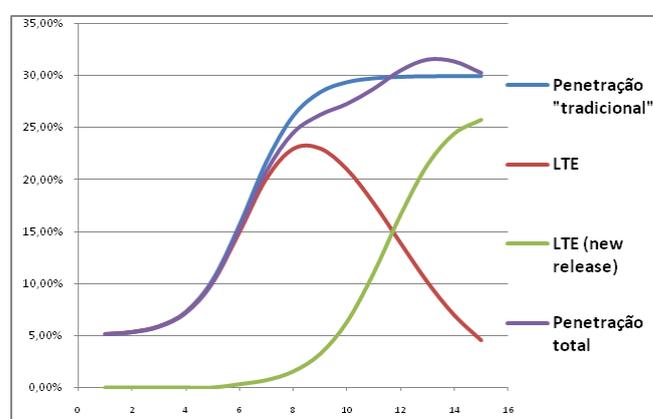


Figura 91 - Penetração no Mercado LTE (data only)

4.3.2 Definições das Redes a Implementar

Segue-se agora uma análise do planeamento necessário para implementar as redes necessárias em cada zona habitacional estudada.

4.3.2.1 Zona SU

Visto se tratar de uma zona suburbana o alcance das antenas presentes nas estações base não terão um alcance superior 1,2 km. Tratando-se de uma área com 10 km² necessitaremos de pelo menos 3 células para poder garantir a cobertura da zona em questão.

Sabe-se que, no presente, esta tecnologia possui uma capacidade média de 100 Mbps por sector. Pode ser observado, na **Figura 92**, a evolução do tráfego gerado pelos clientes da primeira tecnologia implementada, assim como a capacidade do sistema quando, utilizando o número mínimo de células para servir toda a área em questão, se variam o número de sectores por *eNodeB*.

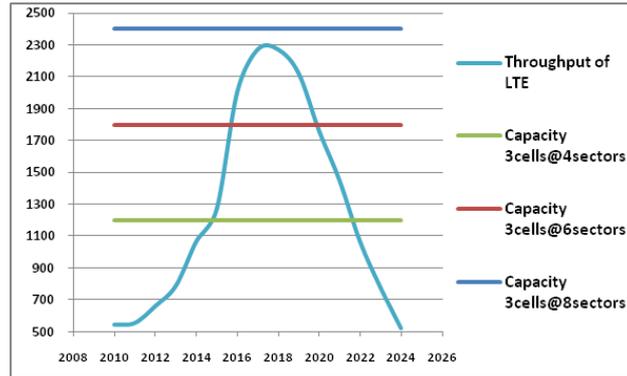


Figura 92 - Evolução do Tráfego (LTE@SU)

Pode-se concluir, após observar a figura anterior, que a solução com a melhor relação entre capacidade e tráfego gerado ao longo dos anos é a configuração com 6 sectores por *eNodeB*. De modo a acompanhar o crescimento do tráfego será necessário, enquanto for possível, colocar novas estações base. Esta evolução é feita através de um *cell splitting*.

Com o passar dos anos será necessário actualizar a tecnologia, de modo a poder oferecer uma maior largura de banda aos clientes mais exigentes. Também esta evolução é feita gradualmente, tal como pode ser observado na **Figura 93**.

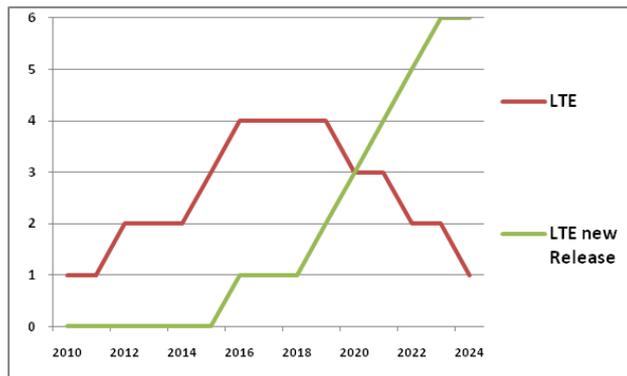


Figura 93 - Evolução dos eNodeB (LTE@SU)

Como se pode observar será necessário implementar novos *eNodeB* ao longo dos anos, isto é, o aumento de capacidade por parte das novas tecnologias não é suficiente para acompanhar o crescimento do tráfego gerado pelos clientes.

4.3.2.2 Zona R

Visto se tratar de uma zona rural o alcance das antenas presentes nas estações base não terão um alcance superior 5,5 km. Tratando-se de uma área com 120 km² necessitaremos de pelo menos 2 células para poder garantir a cobertura da zona em questão.

Sabe-se que, no presente, esta tecnologia possui uma capacidade de 100 Mbps por sector. Pode ser observado, na **Figura 94**, a evolução do tráfego gerado pelo clientes da primeira

tecnologia implementada, assim como a capacidade do sistema quando, utilizando o número mínimo de células para servir toda a área em questão, se varia o número de sectores por *eNodeB*.

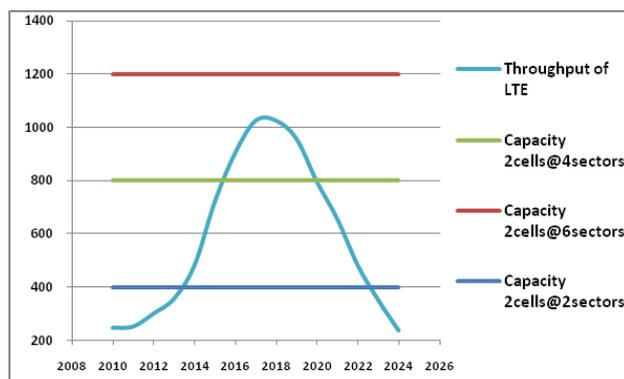


Figura 94 - Evolução do Tráfego (LTE@R)

Pode-se concluir, após observara figura anterior, que a solução com a melhor relação entre capacidade e tráfego gerado ao longo dos anos é a configuração com 4 sectores por *eNodeB*. De modo a acompanhar o crescimento do tráfego será necessário, enquanto for possível, colocar novos *eNodeB*. Esta evolução é feita através de um *cell splitting*.

Com o passar dos anos será necessário actualizar a tecnologia, de modo a poder oferecer uma maior largura de banda aos clientes mais exigentes. Também esta evolução é feita gradualmente, tal como pode ser observado na **Figura 95**.

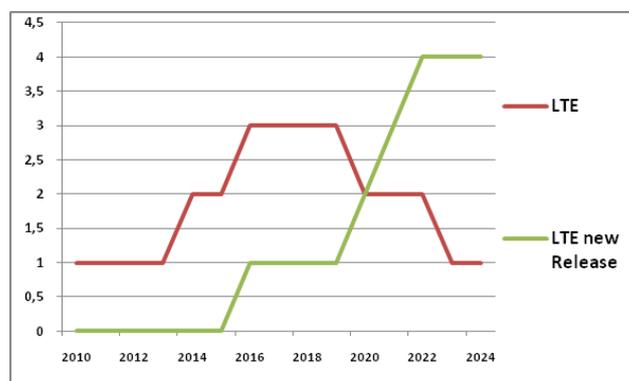


Figura 95 - Evolução dos *eNodeB* (LTE@R)

Como se pode observar será necessário implementar novos *eNodeB* ao longo dos anos, isto é, o aumento de capacidade por parte das novas tecnologias não é suficiente para acompanhar o crescimento do tráfego gerado pelos clientes.

4.3.2.3 Zona R_i

Visto se tratar de uma zona rural o alcance das antenas presentes nas estações base não terão um alcance superior 5,5 km. Tratando-se de uma área com 10 km² necessitaremos de pelo menos 1 célula para poder garantir a cobertura da zona em questão.

Sabe-se que, no presente, esta tecnologia possui uma capacidade de 100 Mbps por sector. Pode ser observado, na **Figura 96**, a evolução do tráfego gerado pelo clientes da primeira tecnologia implementada, assim como a capacidade do sistema quando, utilizando o número mínimo de células para servir toda a área em questão, se varia o número de sectores por *eNodeB*.

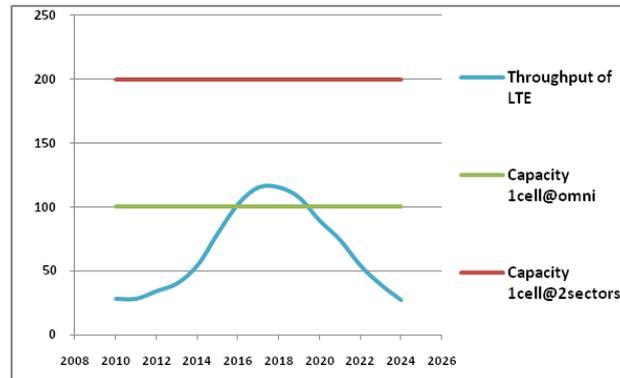


Figura 96 - Evolução do Tráfego (LTE@Ri)

Pode-se concluir, após observara figura anterior, que a solução com a melhor relação entre capacidade e tráfego gerado ao longo dos anos é a configuração com 1 sector por *eNodeB*. De modo a acompanhar o crescimento do tráfego será necessário, enquanto for possível, colocar novos *eNodeB*. Esta evolução é feita através de um *cell splitting*.

Com o passar dos anos será necessário actualizar a tecnologia, de modo a poder oferecer uma maior largura de banda aos clientes mais exigentes. Também esta evolução é feita gradualmente, tal como pode ser observado na **Figura 97**.

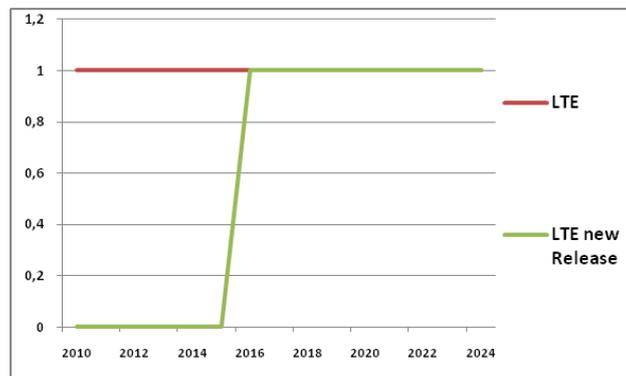


Figura 97 - Evolução dos *eNodeB* (LTE@Ri)

Como se pode observar não será necessário implementar novos *eNodeB* ao longo dos anos, isto é, o aumento de capacidade por parte das novas tecnologias é suficiente para acompanhar o crescimento do tráfego gerado pelos clientes.

4.3.3 CAPEX

O CAPEX representa os custos de investimento, isto é, o investimento necessário para implementar a solução desejada.

Para esta solução o CAPEX será constituído pelos custos relativos a 4 componentes:

- *eNodeB* (implementação e actualizações);
- *Packet Core* (*upgrades*);
- Rede *Feeder* (implementação e actualizações);
- CPE.

O número de *eNodeB* já foi calculado anteriormente, assim como a sua evolução. De modo a calcular o CAPEX é agora necessário verificar os custos relativos aos CPE e à rede *feeder*.

A implementação dos CPE é gradual sendo que cada cliente necessitará de obter um equipamento destes, isto é, considera-se que apenas serão utilizados equipamentos móveis para aceder aos serviços (*modem usb*, telemóvel, etc.).

A implementação da rede primária (*feeder*) será baseada em fibra óptica, mais especificamente através de uma rede óptica passiva com topologia em estrela dupla (*star and tree*).

São de seguida apresentados os CAPEX resultantes da implementação desta solução nos diversos *habitats* analisados.

4.3.3.1 Zona SU

Os custos de implementação desta solução na Zona SU serão agora analisados. As figuras seguintes ilustram a distribuição e a evolução destes investimentos.

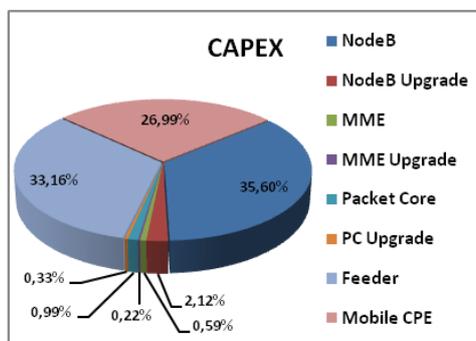


Figura 98 - Distribuição do CAPEX (LTE@SU)

Como se pode observar pela **Figura 98** o investimento mais significativo, com cerca de 35%, é a implementação dos *eNodeB*. Este valor não será, como se pode observar pela **Figura 99**, o investimento anual mais significativo em todos os anos, tal como se pode observar no caso anterior, isto é, existem componentes da rede que requerem um investimento significativo no primeiro ano, mas que não irão necessitar de grandes melhoramentos ao longo do projecto.

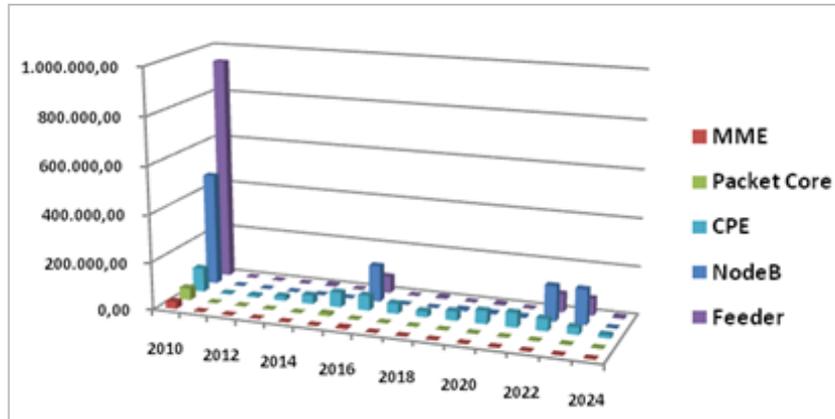


Figura 99 - Evolução do CAPEX (LTE@SU)

Como se pode verificar cada um dos componentes de custo possui um comportamento diferente ao longo dos anos.

4.3.3.2 Zona R

Os custos de implementação desta solução na Zona R serão agora analisados. As figuras seguintes ilustram a distribuição e a evolução destes investimentos.

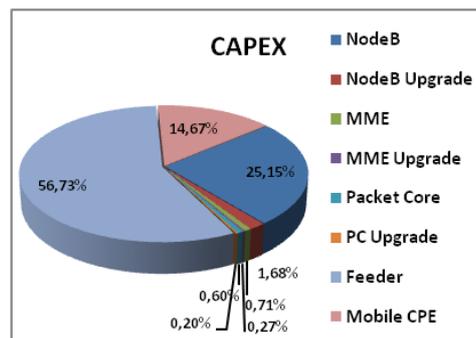


Figura 100 - Distribuição do CAPEX (LTE@R)

Como se pode observar pela **Figura 100** o investimento mais significativo, com cerca de 57%, é a implementação da rede primária. Este valor não será, como se pode observar pela **Figura 101**, o investimento anual mais significativo em todos os anos, tal como se pode observar no caso anterior, isto é, existem componentes da rede que requerem um investimento significativo no primeiro ano, mas que não irão necessitar de grandes melhoramentos ao longo do projecto.

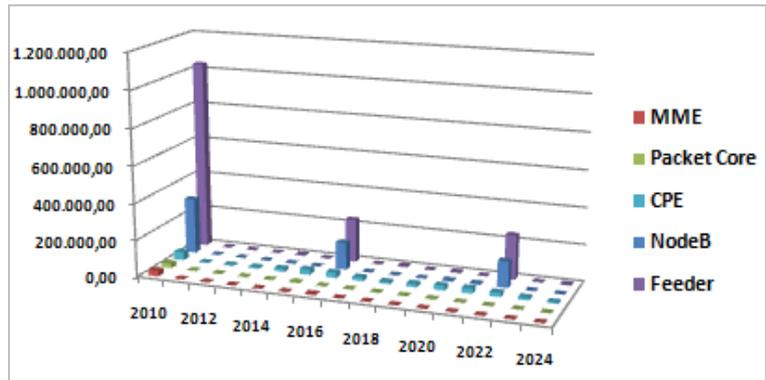


Figura 101 - Evolução do CAPEX (LTE@R) (1)

Como se pode verificar cada um dos componentes de custo possui um comportamento diferente ao longo dos anos. A **Figura 101** não permite uma análise da evolução dos custos devido à presença dos investimentos necessários para a implementação da rede primária e dos *eNodeB* (bastante mais elevados que qualquer outro investimento). Segue-se agora, na **Figura 102**, a ilustração dos custos de capitais sem estes elementos, de modo a poder analisar a evolução dos investimentos nos restantes equipamentos.

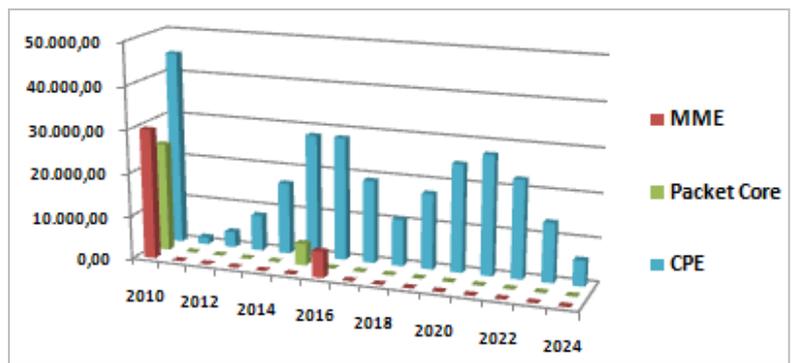


Figura 102 - Evolução do CAPEX (LTE@R) (2)

4.3.3.3 Zona R_i

Os custos de implementação desta solução na Zona R_i serão agora analisados. As figuras seguintes ilustram a distribuição e a evolução destes investimentos.

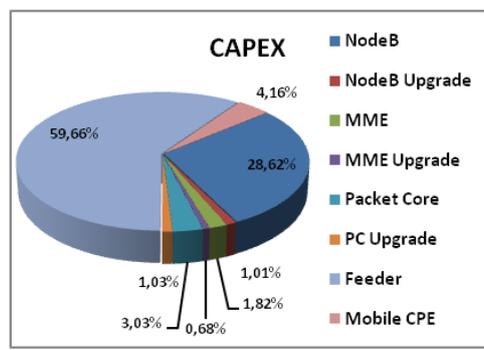


Figura 103 - Distribuição do CAPEX (LTE@R_i)

Como se pode observar pela **Figura 103** o investimento mais significativo, com cerca de 60%, é a implementação da rede primária. Este valor não será, como se pode observar pela **Figura 104**, o investimento anual mais significativo em todos os anos, tal como se pode observar no caso anterior, isto é, existem componentes da rede que requerem um investimento significativo no primeiro ano, mas que não irão necessitar de grandes melhoramentos ao longo do projecto.

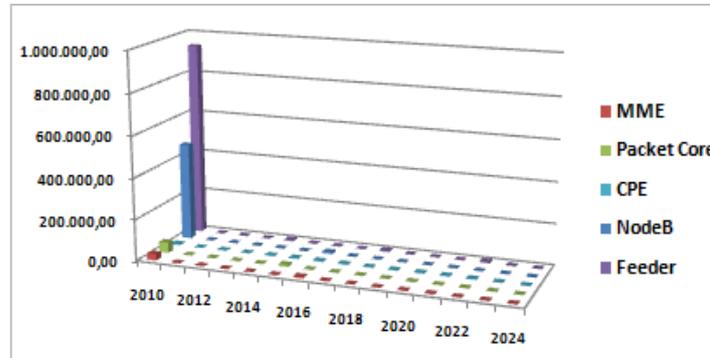


Figura 104 - Evolução do CAPEX (LTE@Ri) (1)

Como se pode verificar cada um dos componentes de custo possui um comportamento diferente ao longo dos anos. A **Figura 104** não permite uma análise da evolução dos custos devido à presença dos investimentos necessários para a implementação da rede primária e dos *eNodeB* (bastante mais elevados que qualquer outro investimento). Segue-se agora, na **Figura 105**, a ilustração dos custos de capitais sem estes elementos, de modo a poder analisar a evolução dos investimentos nos restantes equipamentos.

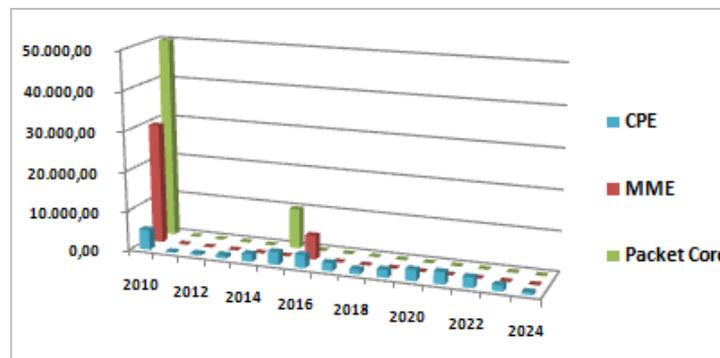


Figura 105 - Evolução do CAPEX (LTE@Ri) (2)

4.3.4 OPEX

O OPEX representa os custos de operação e manutenção, isto é, os custos envolvidos para manter a solução funcional.

Para esta solução o OPEX será constituído pelos custos relativos a 3 factores:

- Manutenção (dos *eNodeB* e da rede primária);

- Alimentação eléctrica (dos *eNodeB* e da rede primária);
- Substituição de CPE.

Os custos de manutenção e de alimentação eléctrica dependem directamente da quantidade de células existentes e do comprimento da rede primária. Para o caso dos *eNodeB* serão considerados valores fixos, tanto para a alimentação eléctrica como para a manutenção, que serão depois multiplicados pelo número de células existentes. Em relação à rede primária os custos de manutenção serão linearmente proporcionais ao comprimento desta, enquanto os custos de alimentação eléctrica serão relativos ao número de equipamentos activos, isto é, aos equipamentos existentes nos extremos de cada ligação.

São de seguida apresentados os valores relativo à distribuição e à evolução do OPEX resultantes da implementação desta solução.

4.3.4.1 Zona SU

Os custos de operação e manutenção desta solução na Zona SU serão agora analisados. As figuras seguintes ilustram a distribuição e a evolução destes investimentos.

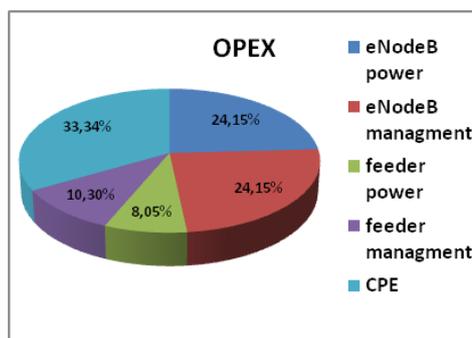


Figura 106 - Distribuição do OPEX (LTE@SU)

Como se pode observar pela **Figura 106** o investimento mais significativo, com cerca de 33%, é a substituição dos equipamentos dos clientes. Este valor não será, como se pode observar pela **Figura 107**, o investimento anual mais significativo em todos os anos, na realidade este é o único factor de custo que não possui uma evolução estável.

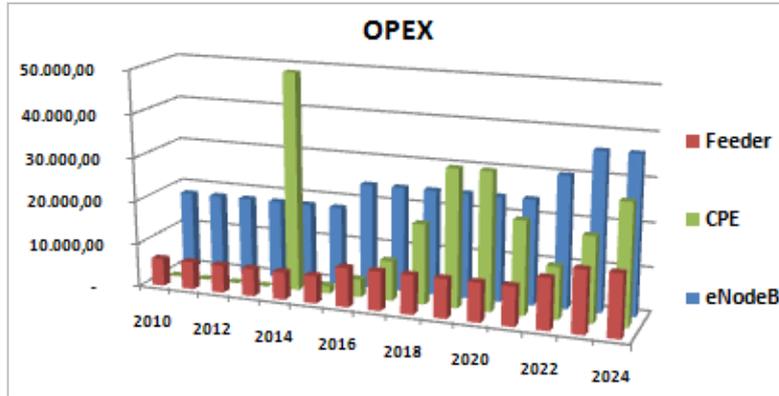


Figura 107 - Evolução do OPEX (LTE@SU)

4.3.4.2 Zona R

Os custos de operação e manutenção desta solução na Zona R serão agora analisados. As figuras seguintes ilustram a distribuição e a evolução destes investimentos.

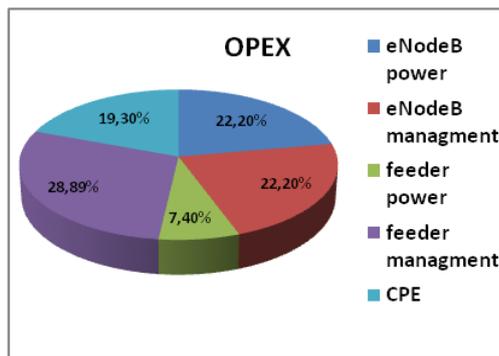


Figura 108 - Distribuição do OPEX (LTE@R)

Como se pode observar pela **Figura 108** o investimento mais significativo, com cerca de 30%, é o custo de manutenção da rede primária. Este valor não será, como se pode observar pela **Figura 109**, o investimento anual mais significativo em todos os anos.

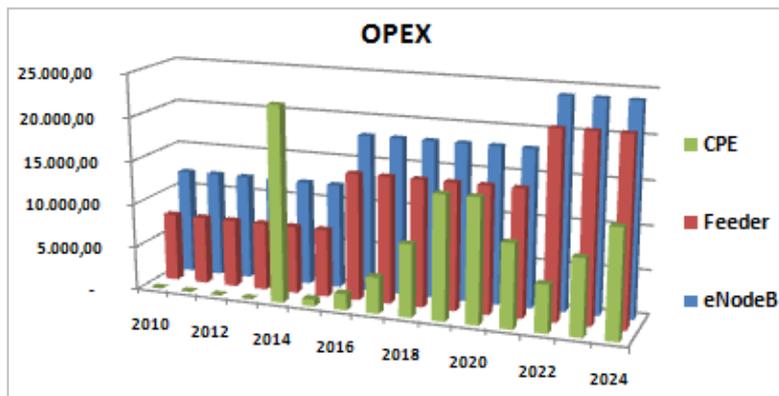


Figura 109 - Evolução do OPEX (LTE@R)

4.3.4.3 Zona R_i

Os custos de operação e manutenção desta solução na Zona R_i serão agora analisados. As figuras seguintes ilustram a distribuição e a evolução destes investimentos.

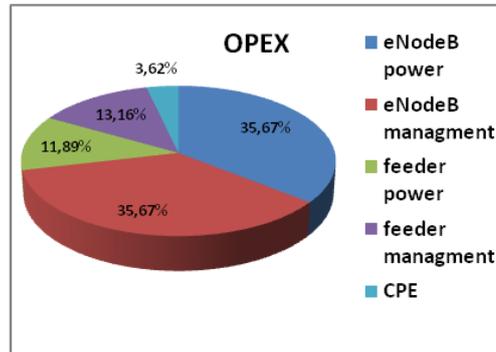


Figura 110 - Distribuição do OPEX (LTE@Ri)

Como se pode observar pela **Figura 110** o investimento mais significativo, com cerca de 70%, é relativo à manutenção e alimentação eléctrica dos *eNodeB*. Este valor será, como se pode observar pela **Figura 111** o investimento anual mais significativo em todos os anos.

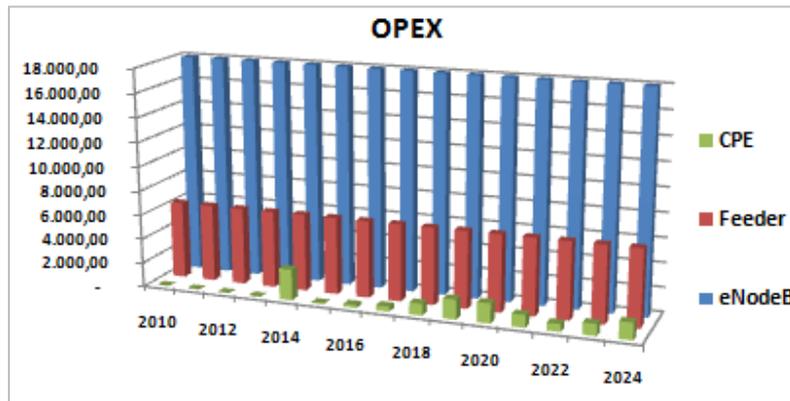


Figura 111 - Evolução do OPEX (LTE@Ri)

4.3.5 Custos Relativos

Outro parâmetro bastante útil na apreciação deste tipo de análises são os custos relativos, isto é. os custos que a solução possui, em relação a outro parâmetro. Serão apresentados, nas figuras seguintes, os custos relativos por utilizador servido assim como os custos relativos a cada Km² coberto.

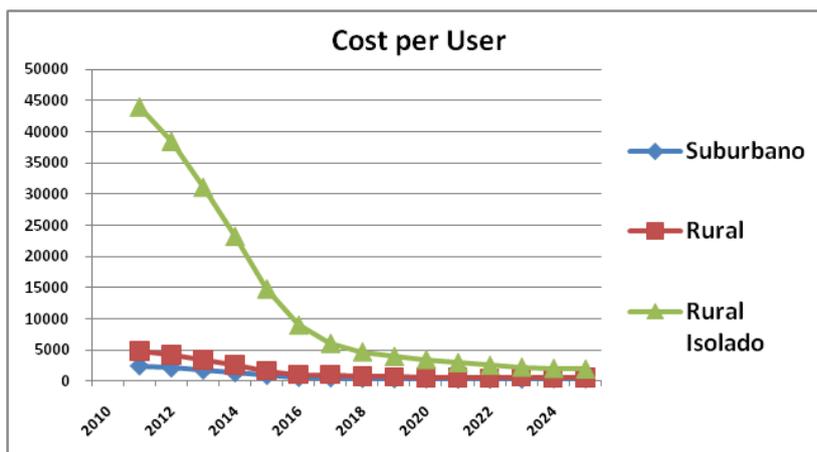
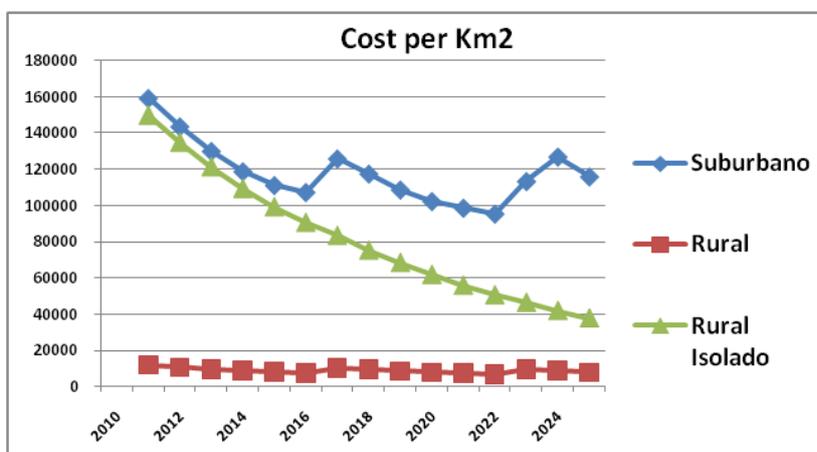


Figura 112 - Custo por Utilizador (LTE)

Pode-se observar pela **Figura 112** que os custos por utilizador têm tendência a baixar. Tal facto é devido aos investimentos necessários serem mais significativos nos primeiros anos, e ao número de utilizadores aumentar ao longo dos anos. Verifica-se também que as zonas financeiramente menos atractivas possuem um custo por utilizador mais elevado, devido ao número de utilizadores ser menor e ao investimento mais significativo (a instalação da rede primária em fibra óptica) estar presente nos três casos.

Figura 113 - Custo por Km² (LTE)

Pode-se observar pela **Figura 113** que os custos por Km² têm tendência a baixar. Tal facto é devido aos investimentos necessários serem mais significativos nos primeiros anos, diminuindo nos anos seguintes, mantendo-se a área servida ao longo dos anos. De notar que a zona habitacional que apresenta o menor custo por área servida é a zona rural, devido ao alcance elevado das estações base. Na zona rural isolada este valor é superior devido ao facto desta área ser inferior à área máxima que é possível servir com uma única estação base. No caso da zona suburbano existem duas observações. A primeira é que o custo por Km² é o mais elevado, devido ao alcance reduzido das estações base, e ao seu número mais elevado de sectores. A segunda é o efeito das actualizações tecnológicas, que provocam um aumento significativo a este custo, devido ao número total de estações base ser mais elevado.

4.3.6 Resultados

Tal como foi visto na **secção** 4.2.5 existem vários parâmetros que permitem identificar a viabilidade económica de um projecto.

Seguem-se agora os resultados económicos mais relevantes relativamente a esta solução tecnológica (VAL, TIR e Tempo de Recuperação), quando implementada nos vários ambientes habitacionais. Obter-se-ão mais conclusões nas secções seguintes, quando forem apresentados os resultados sob a forma de gráficos.

Tabela 14 - Resultados Económicos (LTE)

	Zona SU	Zona R	Zona R _i
VAL	2.038.920,28€	-387.473,18€	-1.583.996,60€
TIR	15,75%	-2,13%	Indefinido
Tempo de Recuperação	6 anos	Indefinido	Indefinido

4.3.6.1 Zona SU

Segue-se uma análise mais pormenorizada dos resultados obtidos quando se implementada uma solução deste tipo na zona SU.

Uma forma de apresentar os resultados económicos de modo a que estes sejam perceptíveis e que permitam uma análise pormenorizada é através de gráficos que, segundo uma evolução temporal, ilustram a evolução dos investimentos (CAPEX e OPEX), das receitas, dos fluxos e dos balanços. A **Figura 114** ilustra os resultados desta solução na zona SU segundo as características anteriormente referidas.

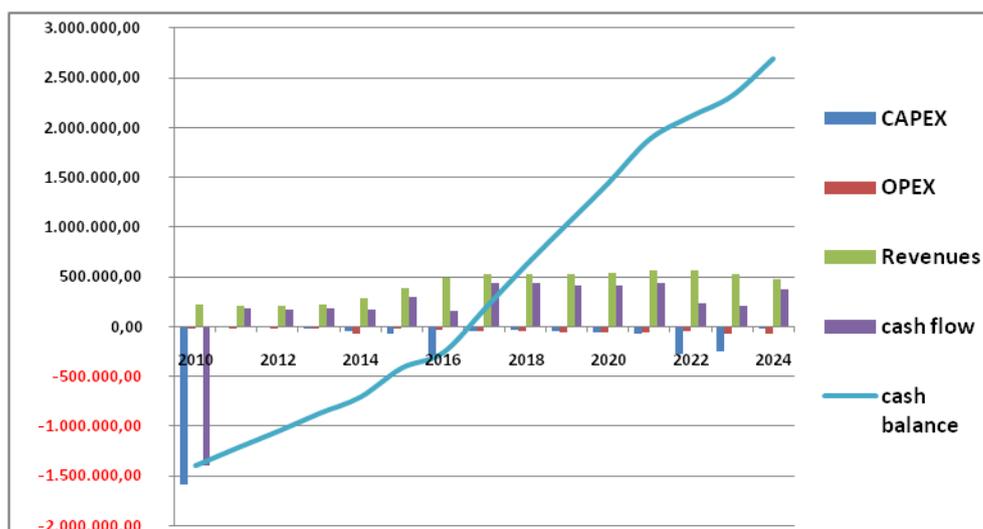


Figura 114 - Resultados Económicos (LTE@SU)

Através deste gráfico podem ser retiradas várias conclusões. Verifica-se que o tempo de recuperação estará situado entre 2016 e 2017 pois este parâmetro representa o ano em que o

balanço se torna positivo. Verifica-se também que os maiores investimentos são realizados no ano 0. Outra observação é a diminuição das receitas nos últimos anos, devido à erosão que as receitas sofrem.

4.3.6.2 Zona R

Segue-se uma análise mais pormenorizada dos resultados obtidos quando se implementada uma solução deste tipo na zona R. A **Figura 115** ilustra os resultados desta solução na zona R segundo as características anteriormente referidas.

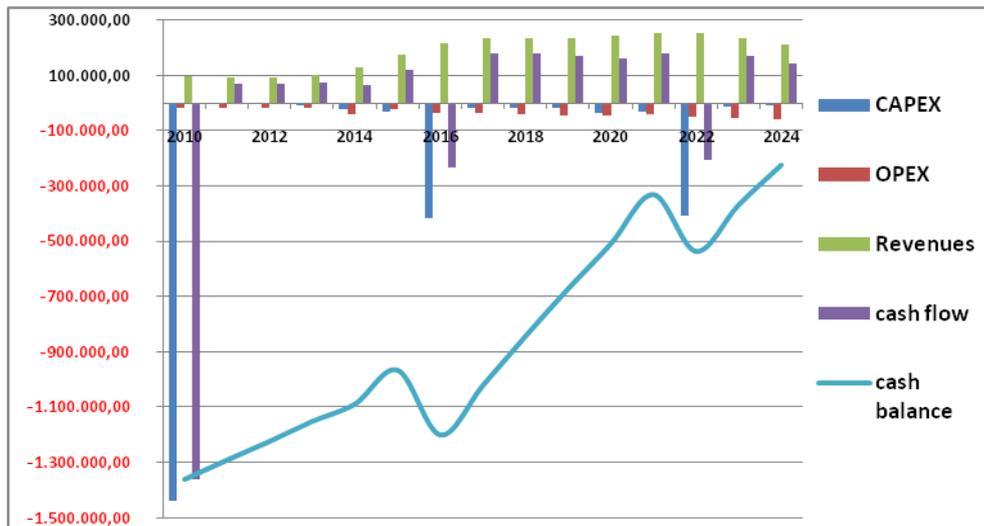


Figura 115 - Resultados Económicos (LTE@R)

Através deste gráfico podem ser retiradas várias conclusões. Verifica-se que os investimentos não serão compensados pelas receitas. Outra observação é a diminuição das receitas nos últimos anos, devido à erosão que as receitas sofrem. Pode ainda observar-se quedas brutas no balanço nos anos em que se investe na actualização das tecnologias, assim como nos anos em que os componentes activos da rede primária serão substituídos. O balanço tem tendência a crescer pelo que pode levar a pensar que um investimento externo poderia tornar esta solução atractiva para os operadores. Serão agora analisados os resultados desta solução na zona R quando apoiada por dois tipos de investimentos diferentes.

No primeiro tipo de investimento é considerado que este projecto recebe um apoio através de dez prestações anuais idênticas, cujo objectivo é de aumentar a TIR de modo a esta atingir o valor de 10 %. O valor total necessário segundo este tipo de investimento é de **1.401.519,20€**. A **Figura 116** ilustra os resultados desta solução, com este tipo de financiamento.

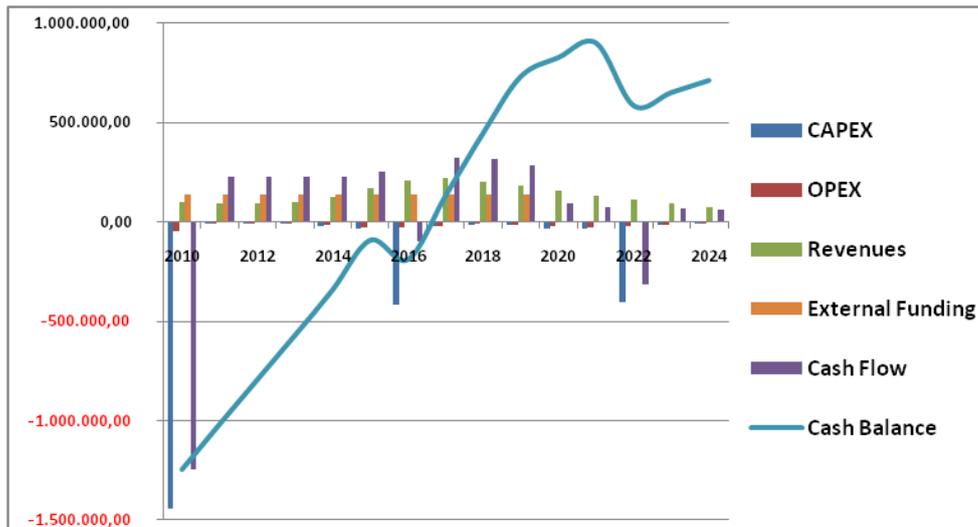


Figura 116 - Resultados com Financiamento tipo 1 (LTE@R)

No segundo tipo de investimento é considerado que este projecto recebe um apoio através de seis prestações, de dois valores distintos, em anos alternados, cujo objectivo é de aumentar a TIR de modo a esta atingir o valor de 10 %. Os dois valores que as prestações tomam são, para o primeiro ano, 50 % do investimento total e, para as restantes 5 prestações, 10 %. O valor total necessário segundo este tipo de investimento é de **1.195.170,38€**. A **Figura 117** ilustra os resultados desta solução, com este tipo de financiamento.

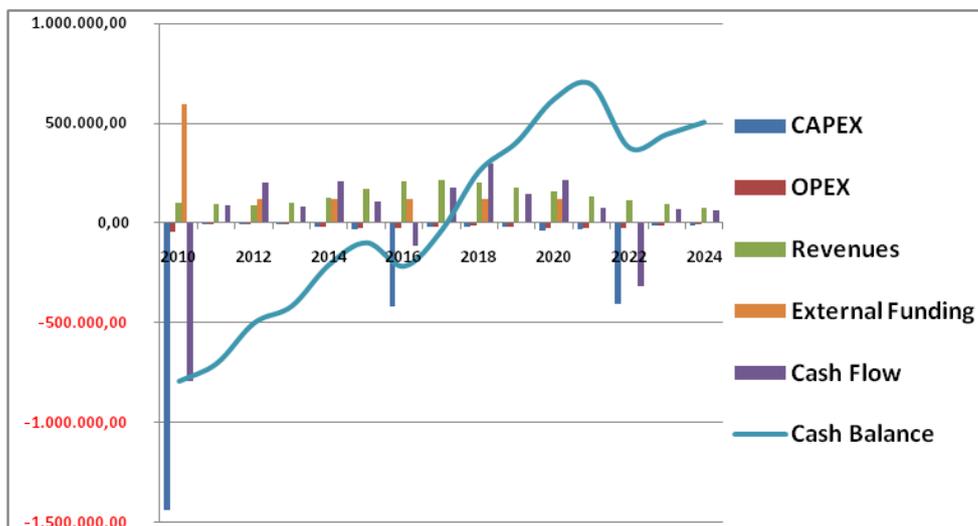


Figura 117 - Resultados com Financiamento tipo 2 (LTE@R)

Pode-se observar que o balanço apresenta um comportamento semelhante ao caso anterior, notando-se uma diferença: o crescimento é mais acentuado pelo que lhe permite atingir valores positivos no intervalo de tempo considerado.

Pode-se observar mais uma vez que o balanço segue uma evolução bastante semelhante à inicial. De modo a efectuar uma comparação mais eficiente, a ilustra o balanço gerado no três casos anteriormente analisados.

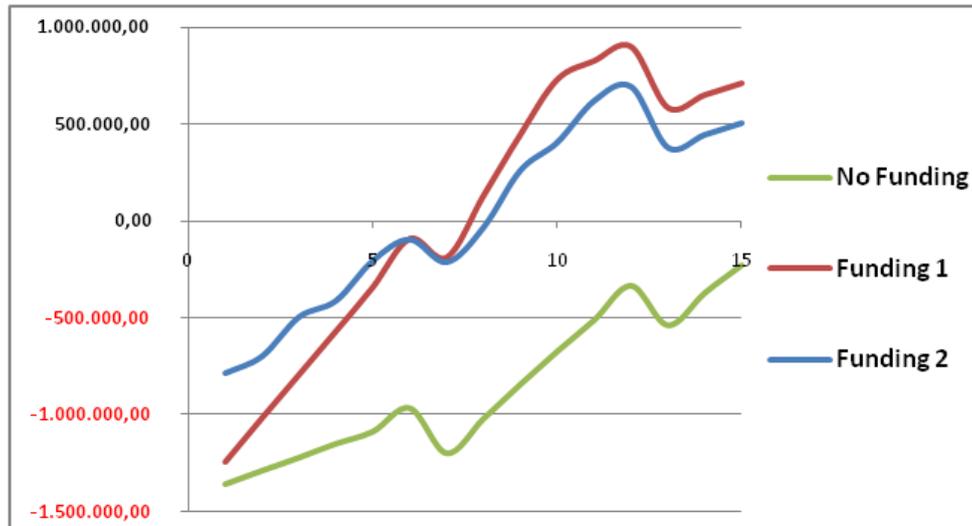


Figura 118 - Balanços (LTE@R)

4.3.6.3 Zona R_i

Segue-se uma análise mais pormenorizada dos resultados obtidos quando se implementada uma solução deste tipo na zona R_i . A **Figura 119** ilustra os resultados desta solução na zona R_i segundo as características anteriormente referidas.

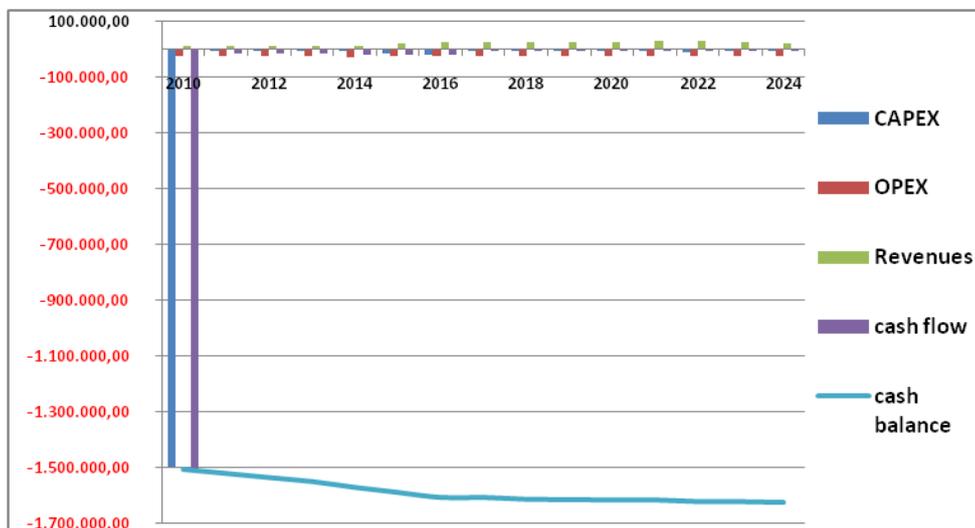


Figura 119 - Resultados Económicos (LTE@Ri)

Através deste gráfico podem ser retiradas várias conclusões. Verifica-se que os investimentos não serão compensados pelas receitas. Outra observação é a diminuição das receitas nos últimos anos, devido à erosão que as receitas sofrem. Outra observação que se pode fazer, e talvez a mais relevante, é que o balanço tem sempre tendência a baixar. Tal facto leva à conclusão que as receitas não serão suficientes para cobrir os custos de operação e manutenção.

Visto isto pode-se concluir que os dois tipos de investimentos acima analisados não serão adequados para este caso.

Serão considerados dois financiamentos simultâneos. Um primeiro financiamento igualará, numa única prestação, os custos de implementação da solução no ano 0 (CAPEX relativo ao ano 0). Um segundo financiamento será composto por prestações anuais, de igual valor entre elas, cujo objectivo será atingir uma TIR de 10 %, compensando assim os custos de operação e manutenção. A soma dos valores totais destes investimentos será de **1.658.083,84€** e a sua implementação encontra-se ilustrada na **Figura 120**.

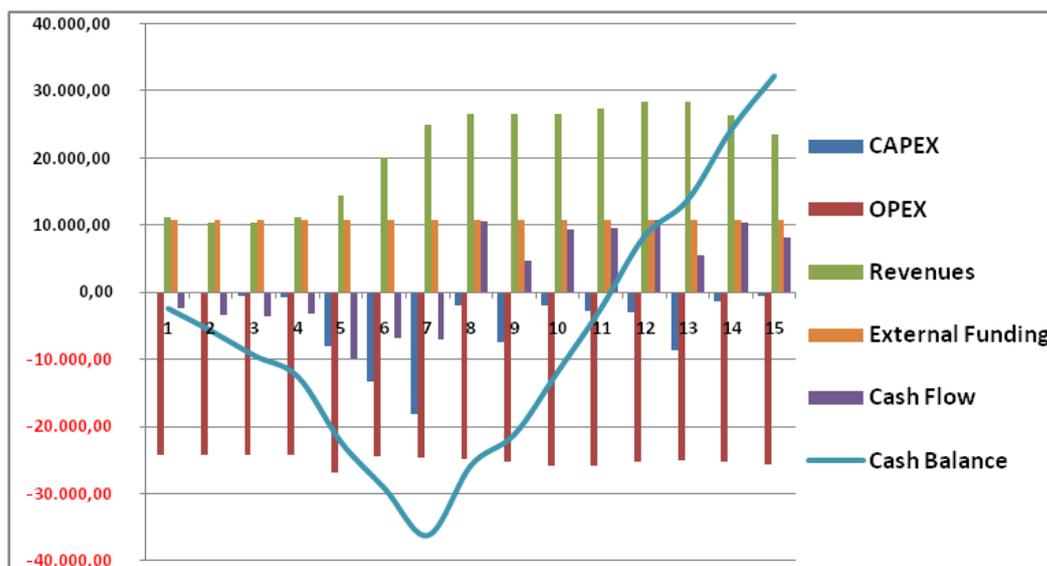


Figura 120 - Resultados com Financiamento (LTE@Ri)

Foram retirados os investimentos de capitais do ano 0, assim como o seu financiamento, de modo a que este gráfico fosse mais legível.

4.3.7 Análise de Sensibilidade

Tratando-se de análises compostas por suposições, torna-se necessário verificar qual a sensibilidade do projecto às variáveis de entrada, isto é, verificar-se-á, de seguida, como variam os resultados mais significativos (TIR, VAL, financiamentos) quando se variam alguns parâmetros. A **Tabela 15** apresenta os valores que alguns parâmetros, comuns a todas as zonas analisadas, devem tomar para realizar a análise de sensibilidade.

Serão apresentados, nas devidas secções, os valores dos restantes parâmetros de entrada.

Tabela 15 - Parâmetros Comuns (LTE)

Parâmetros a avaliar		-10%	$\Delta(-10\%)$	0%	$\Delta(+10\%)$	+10%
	Start Level					
	Clients 1	4,5%	-0,5%	5%	0,5%	5,5%
	Clients 2	1,35%	-0,15%	1,5%	-0,15%	1,65%
	Saturation Level					
	Clients 1	27%	-3%	30%	3%	33%
	Clients 2	9%	-1%	10%	1%	11%
	Traffic Concentration					
	Clients 1	27	-3	30	3	33
	Clients 2	13,5	-1,5	15	1,5	16,5
	Safety Margin					
		81%	-9%	90%	9%	99%
	Brandwith					
	LB1 1	9	-1	10	1	11
	LB1 2	22,5	-2,5	25	2,5	27,5
	LB2 1	18	-2	20	2	22
	LB2 2	45	-5	50	5	55
	Tarrif					
	Clients 1	22,5	-2,5	25	2,5	27,5
	Clients 2	31,5	-3,5	35	3,5	38,5

4.3.7.1 Zona SU

Seguem-se agora os valores dos parâmetros que ainda não foram definidos, de modo a se prosseguir à análise de sensibilidade desta solução na zona SU.

Tabela 16 - Parâmetros Específicos (LTE@SU)

Parâmetros a avaliar		-10%	$\Delta(-10\%)$	0%	$\Delta(+10\%)$	+10%
	Houses					
	9000	-1000	10000	1000	11000	
Area						
	9	-1	10	1	11	

Os parâmetros de saída a analisar neste caso são as variações do VAL e da TIR. Encontram-se ilustradas essas variações na **Figura 121**.

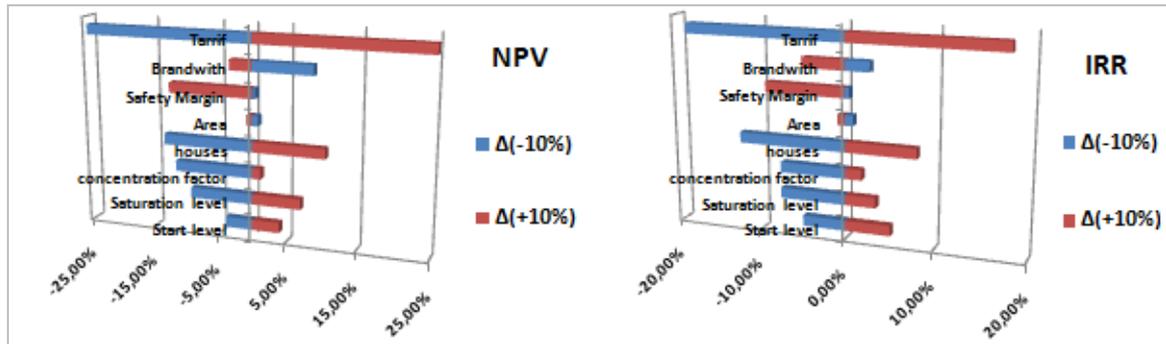


Figura 121 - Sensibilidade do VAL e da TIR (LTE@SU)

Como se pode verificar através das figuras anteriores os parâmetros analisados não afectam o VAL e a TIR do mesmo modo, isto é, existem parâmetros que, quando incrementados de 10 %, afectam o VAL de forma mais significativa, em relação à sua influência na TIR. Pode-se concluir que este projecto possui uma grande sensibilidade à variação das tarifas praticadas.

4.3.7.2 Zona R

Seguem-se agora os valores dos parâmetros que ainda não foram definidos, de modo a se prosseguir à análise de sensibilidade desta solução na zona R.

Tabela 17 - Parâmetros Específicos (LTE@R)

Parâmetros a avaliar	-10%	$\Delta(-10\%)$	0%	$\Delta(+10\%)$	+10%
	Houses	4050	-450	4500	450
Area	108	-12	120	12	132

Os parâmetros de saída a analisar neste caso são as variações do VAL, da TIR e dos dois tipos de financiamento anteriormente analisados. Encontram-se ilustradas essas variações nas seguintes figuras.

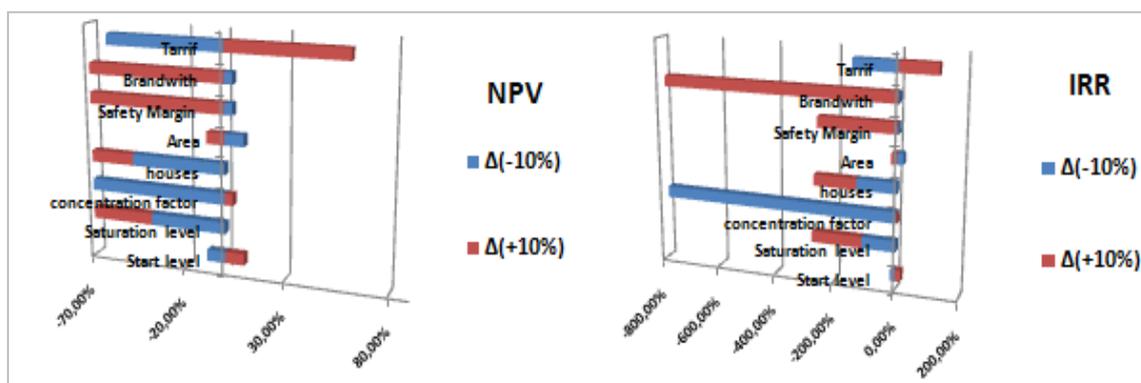


Figura 122 - Sensibilidade do VAL e da TIR (LTE@R)

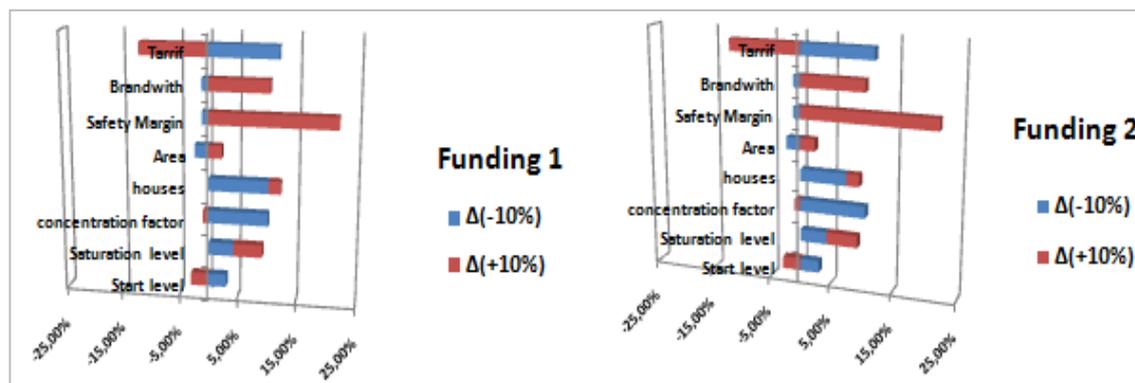


Figura 123 - Sensibilidade dos Financiamentos (LTE@R)

Os gráficos anteriores apresentam alguns valores interessantes. Quando se analisa o efeito da variação de alguns parâmetros, chega-se à conclusão que qualquer que seja o “sentido” da variação, os resultados (VAL e TIR) irão ser prejudicados.

Dois destes casos, e os mais facilmente explicáveis, são o nível de saturação e o número de habitações presentes (ambos provocam um decréscimo no VAL, independentemente do “sentido” da variação). Este facto pode ser explicado pela utilização das células, isto é, uma diminuição de 10% em cada um destes factores não possibilita a implementação de menos um *eNodeB* (mantendo assim os custos mas diminuindo as receitas) e, no entanto, um aumento de 10% destes implica a instalação de mais um *eNodeB* que não terá um número suficiente de clientes para o tornar rentável (o aumento de receitas não compensa o aumento de investimentos.).

Outros parâmetros interessantes são o factor de concentração, a margem de segurança e a largura de banda fornecida. Em todos estes parâmetros existe uma variação que prejudica o projecto de forma muito mais significativa que a variação contrária. Isto deve-se ao facto de um aumento de 10% no factor de concentração (ou uma diminuição de 10% na margem de segurança ou na largura de banda) não implicar uma diminuição do número de *eNodeB*, enquanto que uma variação no “sentido” contrário obriga a instalação de novos equipamentos, sem aumentar as receitas.

Verifica-se também que a TIR apresenta ser mais sensível que o VAL às variações de alguns parâmetros mas, no entanto, aparenta ter a mesma sensibilidade às variações das tarifas (parâmetro que mais afecta o VAL).

4.3.7.3 Zona R_i

Seguem-se agora os valores dos parâmetros que ainda não foram definidos, de modo a se prosseguir à análise de sensibilidade desta solução na zona R_i.

Tabela 18 - Parâmetros Específicos (LTE@Ri)

Parâmetros a avaliar		-10%	$\Delta(-10\%)$	0%	$\Delta(+10\%)$	+10%
	Houses		450	-50	500	50
Area		9	-1	10	1	11

Os parâmetros de saída a analisar neste caso são as variações do VAL e do financiamento ao longo dos anos, visto a TIR não estar definida. Encontram-se ilustradas essas variações nas seguintes figuras.

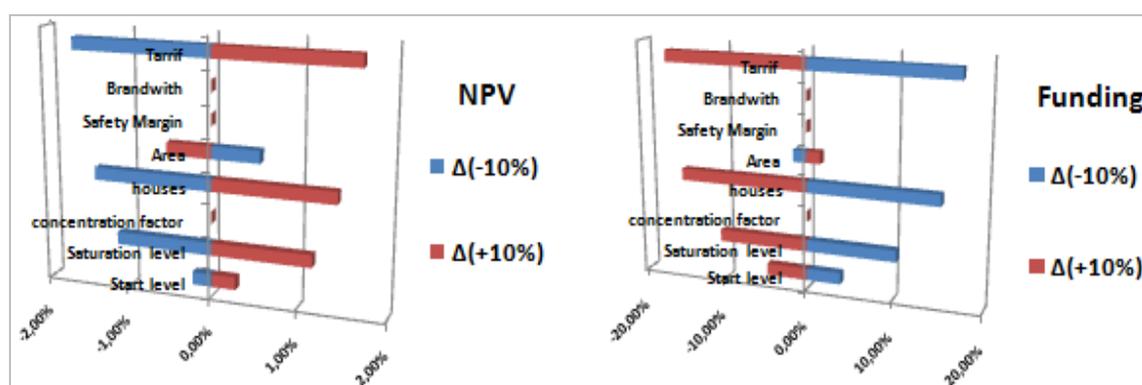


Figura 124 - Sensibilidade do VAL e do Financiamento (LTE@Ri)

Os gráficos anteriores apresentam alguns valores interessantes. A largura de banda oferecida, a margem de segurança e o factor de contenção não influenciam os resultados quando sofrem variações de 10%. Isto deve-se ao facto de estas variações não serem suficientes para implicarem novos equipamentos, nem alteraram o número total de clientes.

4.4 Análise de uma Solução Baseada em FUTON

Segue agora uma análise tecno-económica de uma solução baseada em FUTON.

4.4.1 Definição do Mercado

Esta tecnologia foi desenvolvida para servir grandes centros urbanos, com grande número de habitantes. Nesta análise será considerada uma cidade com 1.500.000 habitantes, distribuídos segundo diferentes *habitats*, isto é, considera-se que se trata de uma cidade com várias zonas habitacionais e industriais distintas.

Esta zona será constituída por uma zona densamente urbana (DU), uma zona urbana (U), uma zona suburbana (SU) e uma zona rural (R), cujas áreas e população se encontram na **Tabela 19**.

Tabela 19 - Distribuição dos clientes (FUTON)

	Área (Km ²)	População
DU	35	240.000
U	350	1.095.000
SU	120	120.000
R	30	45.000

Será considerado o mercado como sendo global, isto é, não se irão diferenciar os diferentes *habitats* desta cidade para definir a penetração no mercado. Esta penetração seguirá um curva em 'S' (definida na primeira secção deste capítulo) cujos valores dos parâmetros são:

- Penetração inicial – 10%;
- Saturação – 30%;
- Alfa – 400;
- Beta - -4;

Através destes parâmetros e, aplicando a expressão das curvas logísticas em 'S' anteriormente definida, obtém-se a penetração no mercado ilustrada na **Figura 125**.

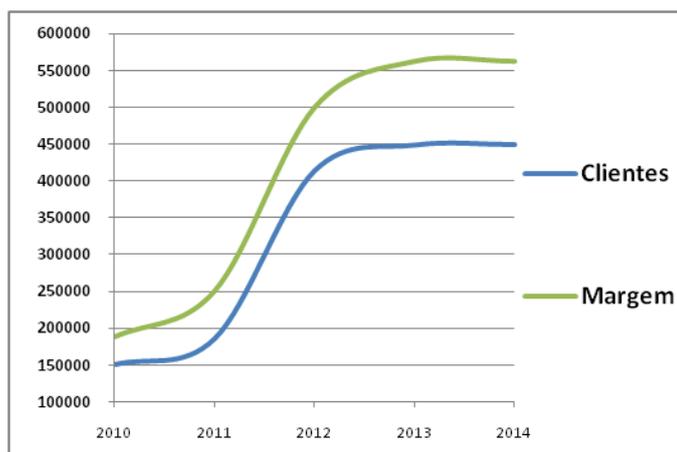


Figura 125 - Penetração no mercado (FUTON)

A margem de segurança presente na figura anterior foi calculada segundo as expressões matemáticas aplicados anteriormente, representando assim uma margem de 90%.

Nesta tecnologia será considerado que a largura de banda de cada cliente poderá ir até aos 100 Mbps. Serão, no entanto, calculados uma série de valores que, variando ao longo dos anos, irão tentar prever a largura de banda necessária para cada cliente. Para efectuar tal cálculo é necessário ter um valor de partida, isto é, deseja-se saber que largura de banda necessária para cliente actualmente. Este valor encontra-se discriminado na **Tabela 20**.

Tabela 20 - Largura de Banda no Ano 0 (FUTON)

Débito /serviço	Serviços de Banda Larga	VoIP	Video-chamada	Total
Distribuição temporal	60%	35%	5%	100%
Débito (Mbps) no Ano 0	15,0	0,03	0,128	9,02

A evolução da largura de banda necessária por cliente considerada na abordagem alternativa desenvolvida é definida pelo seguinte modelo matemático:

$$LB = LB_0 \times \left(\frac{lc}{1 + e^{-2 \cdot af \cdot t}} + 0,04 \cdot t \right) \times \sqrt{t/2}$$

Em que lc é uma constante logística e af é o factor de aceleração. Usando $lc=1,6$ e $af = 1$ obtém-se a evolução representada na **Figura 126**.

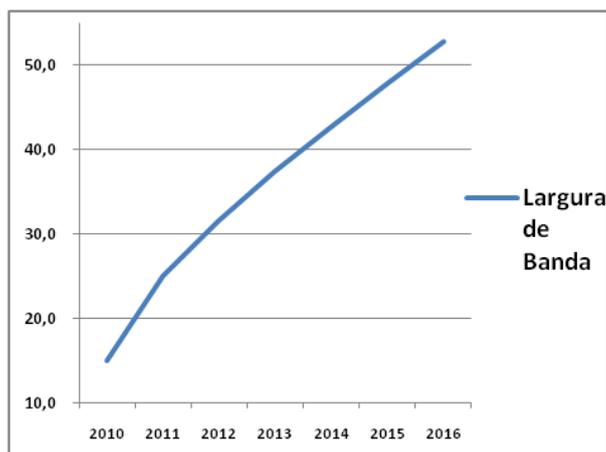


Figura 126 - Evolução da Largura de Banda (FUTON)

Serão considerados 3 tipos de clientes, com larguras de banda diferentes, cuja distribuição varia consoante o *habitat*, em que as larguras da banda são definidas na **Tabela 21**.

Tabela 21 - Distribuição e Lb dos Clientes (FUTON)

Distribuição	DU	U	SU	R	Débito relativo
Normal	80%	80%	85%	90%	1
Pesado	10%	10%	10%	10%	10
Empresarial	10%	10%	5%	0%	15

Através das definições dos parâmetros descritos nesta secção obtém-se o valor de tráfego gerado ao longo do tempo, para todos os *habitats* considerados. Estes valores encontram-se ilustrados nas figuras seguintes.

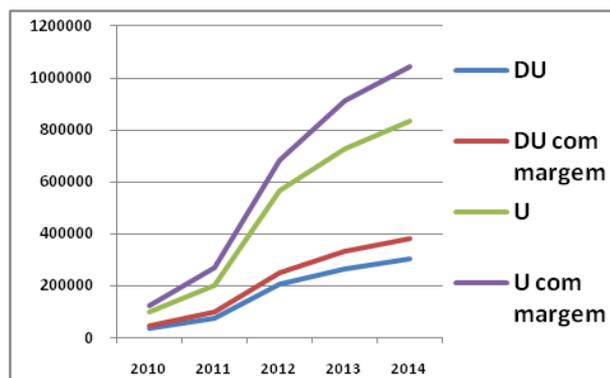


Figura 127 - Evolução do tráfego (FUTON@DU&U)

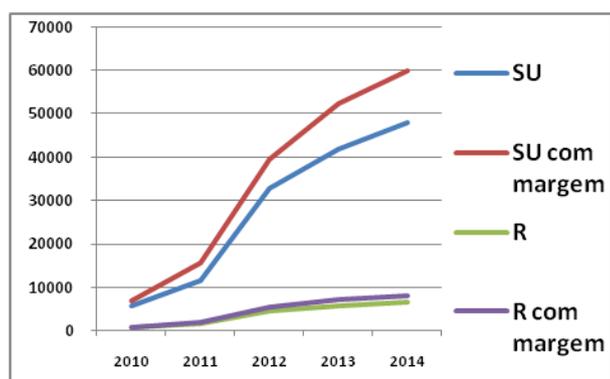


Figura 128 - Evolução do tráfego (FUTON@SU&R)

4.4.2 Implementação da Solução

Segue-se agora a análise de uma possível implementação desta solução, isto é, serão definidos o número de sectores por célula segundo o *habitat*, será calculado o número de células necessárias, o comprimento da rede primária, o número de *Central Units*, etc.

Nestas tecnologias as estações são servidas por RAU. Este equipamento pode servir 2 ou 4 sectores simultaneamente, sendo que cada sector possui uma capacidade de 400 Mbps. O número de sectores por estação base varia consoante a quantidade de tráfego que a célula tem de suportar, assim como do alcance das mesmas. Estes valores encontram-se definidos na **Tabela 22**.

Tabela 22 - Parâmetros das Estações Base (FUTON)

<i>Habitat</i>	Número de sectores	Número de RAU	Alcance (Km)
DU	12	3	0,3
U	8	2	0,5
SU	6	2	1,2
R	4	1	5,5

A nível da evolução do número de células esta solução, quando implementada segundo as definições anteriores, irá ser completamente estática nos *habitats* DU (150), U (544) e SU (34),

isto é, o número de células necessário para servir as áreas em questão são suficientes para suportar o tráfego gerado, não havendo necessidade de efectuar nenhum *cell spiting*. No caso do *habitat* restante (zona rural), visto as células possuírem um alcance muito superior, será necessário instalar mais estações base ao longo dos anos, como é ilustrado na **Figura 129**.

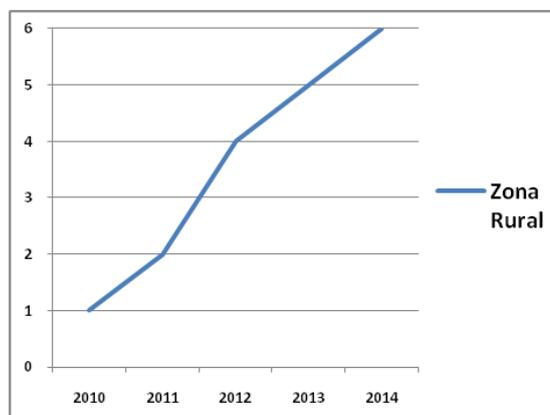


Figura 129 - Evolução do Número de Estações Base (FUTON@R)

Tendo o número de células necessárias ao longo dos anos, segundo as diferentes zonas habitacionais, obtém-se facilmente o número de RAU necessários ao longo dos anos (ver **Tabela 22** para mais informações).

Torna-se agora necessário calcular o número de *central Units* que irão ser necessários. Sabe-se que existem 3 tipos de CU:

- CU Type 3 – com capacidade para servir 400 RAU (ou 400 Gbps de informação);
- CU Type 2 – com capacidade para servir 200 RAU (ou 200 Gbps de informação);
- CU Type 1 – com capacidade para servir 50 RAU (ou 50 Gbps de informação).

A **Figura 130** ilustra a evolução do número de CU necessários ao longo dos anos.

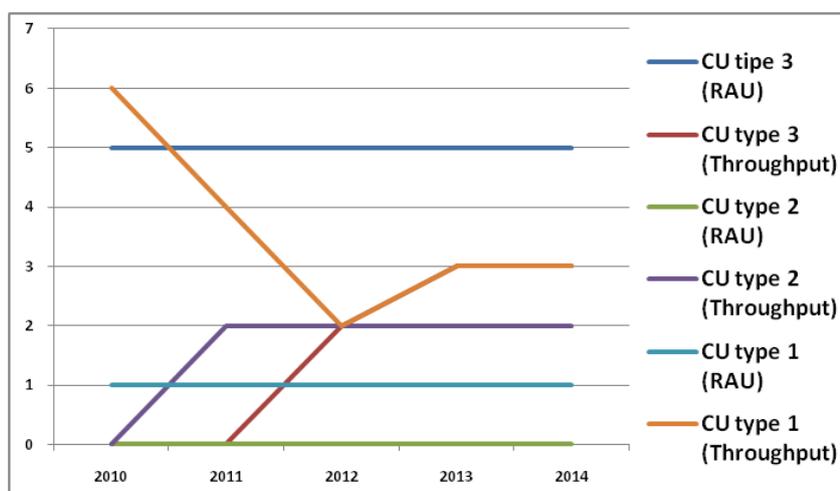


Figura 130 - Evolução do Número de CU Necessários

De notar que a diminuição do número de CU *type 1* é devida à introdução de CU com maior capacidade. Na realidade o número de CU que terão de ser implementados não é linear, isto é, uma análise mais cuidadosa é requerida, verificando se existem CU de nível mais elevado que possam servir os RAU que seriam servidos por CU de nível mais baixo. Esta situação encontra-se ilustrada na.

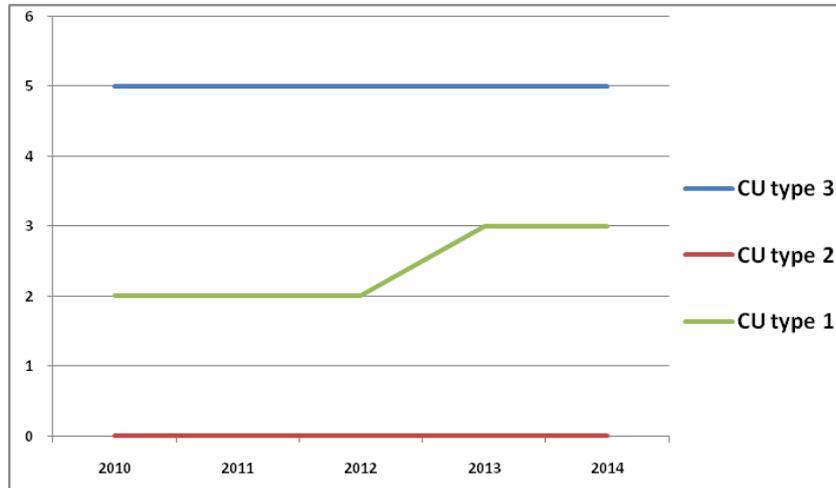


Figura 131 - Evolução do Número de CU a Implementar

4.4.3 CAPEX

Segue-se agora uma breve análise dos custos de implementação desta tecnologia no ambiente referido.

Os principais investimentos de capital a ter em consideração serão os custos relativos à aquisição de CU e de RAU, da instalação da rede primária e à construção de *sites* para alojar os equipamentos. A evolução deste investimentos encontra-se ilustrada na **Figura 132**.

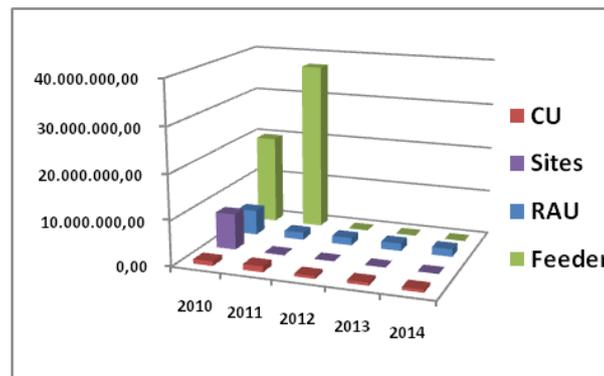


Figura 132 - Evolução do CAPEX (FUTON)

Pode-se verificar que, tal como acontecia com as tecnologias anteriormente analisadas, a implementação da rede primária é um investimento muito significativo.

4.4.4 OPEX

Segue-se agora uma breve análise dos custos de operação e manutenção desta tecnologia no ambiente referido.

Os principais investimentos de custos a ter em consideração, ilustrados na **Figura 133**, serão os custos relativos à:

- Manutenção, alimentação eléctrica e *upgrade* dos RAU;
- Manutenção e alimentação eléctrica dos CU;
- Manutenção e alimentação eléctrica da rede primária;
- Manutenção dos *sites*;
- Substituição dos CPE.

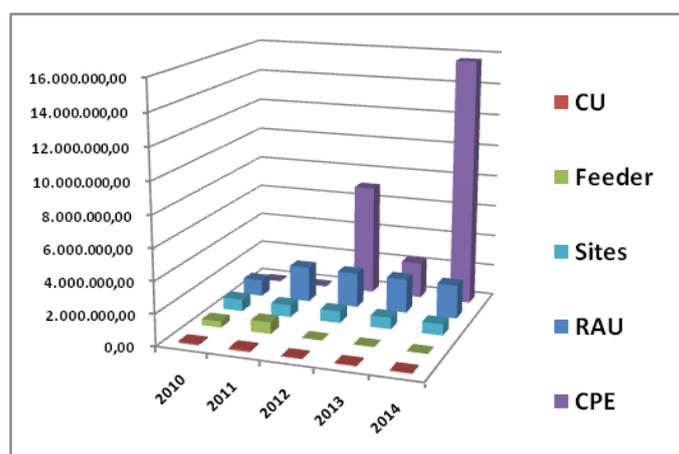


Figura 133 - Evolução do OPEX (FUTON)

4.4.5 Resultados

Segue-se agora a análise dos resultados desta solução. Os parâmetros mais significativos encontram-se representados na **Tabela 23**, sendo que é possível uma análise mais pormenorizada através da **Figura 134**.

Tabela 23 - Resultados Económicos (FUTON)

VAL	26.984.566,68€
TIR	27,79%
Tempo de Recuperação	2 anos

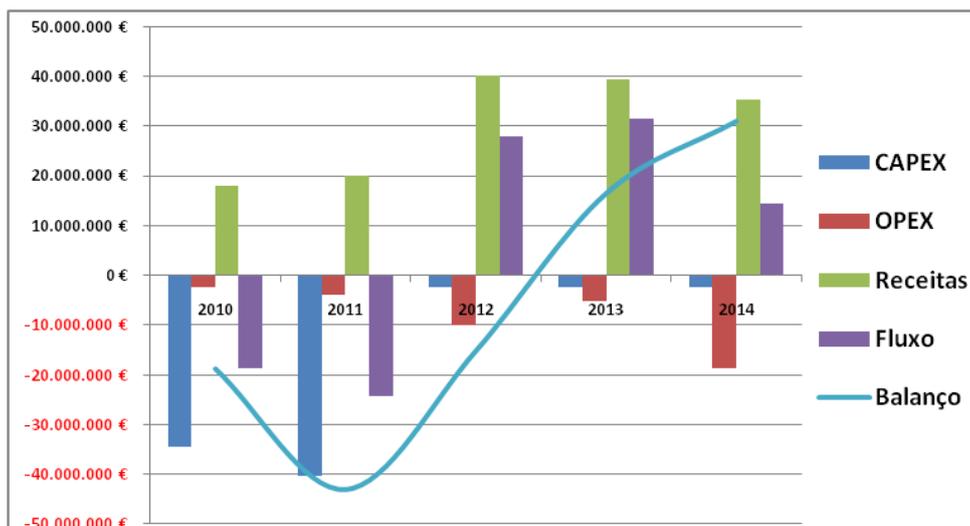


Figura 134 - Resultados Económicos (FUTON)

Pode-se concluir que, para grandes cidades, esta tecnologia aparenta ser uma solução financeiramente viável. De notar que esta análise tecno-económica foi realizada considerando um período de 5 anos (um terço do período considerado nas tecnologias anteriormente analisadas).

5. Considerações Finais

Seguem-se agora algumas conclusões relativas ao trabalho efectuado, e algumas propostas de trabalho futuro.

5.1 Conclusões

As TIC tornaram-se, nos últimos anos, um bem essencial para o desenvolvimento socioeconómico. Nenhuma zona habitacional pode ser considerada desenvolvida se os seus habitantes e as suas empresas não tiverem acesso aos serviços de Internet. Os operadores não se sentem financeiramente atraídos por estas zonas, pois consideram que factores como a fraca densidade populacional, o nível de formação tecnológica dos habitantes (etc.) tornam um investimento em infra-estruturas de telecomunicações nestas regiões demasiado arriscado.

Este trabalho veio demonstrar que as novas tecnologias, que servem de base para redes de distribuição sem fios, podem tornar estes investimentos rentáveis. Embora não se consigam lucros muito elevados (como é o caso de zonas densamente urbanas) este trabalho prova que, pelo menos, estas soluções poderão ser sustentáveis, isto é, na maioria das zonas rurais as receitas são claramente suficientes para cobrir os gastos de operação. Não nos podemos esquecer que a contribuição das tecnologias de telecomunicações para o desenvolvimento de certas zonas habitacionais pode ser comparada com o impacto provocado por outras infra-estruturas chaves, tais como estradas, caminhos de ferro...

É por isso que se considera, neste trabalho, alguns financiamentos externos, sendo que, na prática, estes investimentos provêm de entidades governamentais. É também de notar que, nos últimos anos, se tem presenciado este tipo de financiamentos por parte do governo português, tendo sido instaladas muitas infra-estruturas de fibra óptica o que, como foi verificado ao longo desta dissertação, é sempre um investimento muito significativo.

É também considerado neste trabalho uma nova definição de margem de segurança. Esta permite planear redes de telecomunicações que, com um pequeno acréscimo de CAPEX, poderá dar ao operador mais confiança, ao permitir definir qual a probabilidade de se conseguir servir um cliente novo, sem isso implicar um novo investimento.

Conclui-se também que é possível analisar o impacto do abandono progressivo de uma tecnologia (por parte dos clientes) quando surge uma nova. Podendo assim obter dados mais próximos da realidade, isto é, visto as tecnologias evoluírem a grande velocidade (devido ao crescimento da procura) um modelo em que apenas se considera uma implementação, sem actualizações, onde se atinge uma saturação do mercado não parece ser a mais correcta.

Outra conclusão interessante que pode ser retirada deste trabalho é uma comparação económica entre as tecnologias LTE e WiMAX. Embora tenha sido demonstrado que ambas as tecnologias apresentam soluções financeiramente viáveis, poder-se-á chegar à conclusão que a tecnologia LTE é mais atractiva para um operador que já possua infra-estruturas de GSM ou de UMTS. Se não existir nenhum tipo de infra-estrutura de telecomunicações, terá de ser realizado um estudo mais aprofundado não podendo, à partida, descartar nenhuma destas tecnologias.

Pode também concluir-se que as soluções recorrentes a cablagem não serão possíveis pois, se a utilização de fibra óptica na rede primária introduz custos muito elevados, o seu uso na rede de distribuição possui custos que não podem ser suportados pelos clientes das zonas desfavorecidas.

“Banda Larga para todos” deixa assim de ser um mito. Torna-se possível, recorrendo as FWA, fornecer tráfego de voz e de dados para toda a população. O objectivo destas soluções é a sustentabilidade, que poderá trazer rentabilidade. De modo a implementar soluções de telecomunicações viáveis, será muitas vezes necessário existirem parcerias entre os operadores e as entidades governamentais.

Uma preocupação adicional presente nesta dissertação foi contribuir para a disponibilização de materiais didácticos que possam ser de utilidade a quem pretenda adquirir uma melhor compreensão acerca das relações entre o projecto engenharia de redes de acesso FWA e as suas implicações tecno-económicas. Neste sentido colocou-se um cuidado especial em garantir que os desenvolvimentos efectuados e os estudos de caso considerados pudessem ser utilizados não só por profissionais de engenharia como por estudantes de graduação e pós-graduação. Este esforço foi inicialmente reconhecido pela atribuição do prémio “HP Innovation on Education” à Universidade de Aveiro (<http://uaonline.ua.pt/detail.asp?lg=pt&c=14988>) e posteriormente pela atribuição do prémio de “*Best Project*” no 2010 *HP Innovations in Education Conference*, que teve lugar entre 21 a 23 de Fevereiro de 2010, em São Francisco, Califórnia (http://www.universia.pt/servicos_net/informacao/noticia.jsp?noticia=58144), Reconhecimento adicional foi também conseguido através de algumas publicações em conferências e revistas internacionais com júri de avaliação [19], [20].

5.2 Trabalho Futuro

Visto as tecnologias tratadas neste trabalho serem relativamente recentes, não se pode afirmar que este trabalho esteja concluído. Assim sendo, surge a necessidade de definir algumas metas para que este trabalho possa ter continuidade.

Pensa-se que seria vantajoso efectuar um estudo mais aprofundado dos componentes e módulos necessários à implementação das redes consideradas, isto é, analisar o conteúdo dos

componentes principais utilizados neste trabalho e dividi-los, se possível, em blocos mais pequenos que permitissem analisar com mais detalhe, entre outros aspectos, a diferente evolução temporal dos preços de diferentes componentes.

Seria também interessante estudar cenários em que a rede primária apresenta desafios mais complexos, isto é, zonas muito afastadas de qualquer ponto de agregação da rede nuclear.

Do ponto de vista de ferramentas de análise pensa-se que o uso de ferramentas de cálculo mais potentes do que as utilizadas poderá trazer alguns benefícios a este trabalho, visto os motores de cálculo terem sido todos implementados através do Excel. Por estas razões, a hipótese de recorrer a uma outra plataforma computacional que não o Excel deveria ser equacionada.

6. Bibliografia

- [1]. Agrawal, Govin P., "*Lightwave Technology: Components and Devices*", Wiley, 2004
- [2]. ANACOM (2008), "Estudo sobre o impacto das Redes de Próxima Geração no mercado"
- [3]. Araújo, Marco, "Planeamento e Dimensionamento de Redes WiMAX", LULU, 2009
- [4]. B.T. Olsen, A. Zaganiaris, K. Stordahl, L.Aa. Ims, D. Myhre, T. Øverli, M. Tahkokorpi, I. Welling, M. Drieskens, J. Kraushaar, J. Mononen, M. Lähteenoja, S. Markatos, M. De Bortoli, U. Ferrero, M. Ravera, S. Balzaretto, F. Fleuren, N. Gieschen, M. De Oliveira Duarte, E. de Castro, "*Techno-economic evaluation of narrowband and broadband access network alternatives and evolution scenario assessment*", IEEE Journal of Selected Areas in Communications, 14 (6), 1996, 1184-1203.
- [5]. Banda Larga para as Zonas Periféricas e Rurais (CYBERAL), Relatório Final do Projecto, 2003
- [6]. Bohagen, Frode and Binningsbo, Jorgen, "*Future proof Mobile Broadband Solutions*", Telektronikk1, 2010
- [7]. BROADWAN Deliverable D21
- [8]. Carrilho, D, "Implementação em MatLab do modelo de Hata-Okumura", Universidade de Aveiro, Relatório Interno, 2010
- [9]. Chen, Hsiao-Hwa and Guizani, Moshsen, "*Next Generation Wireless Systems and Networks*", Wiley, 2006
- [10]. Coelho, Sara Catarina Rasteiro, "Fibra Óptica na Rede de Acesso: Tecnologias e Soluções", Universidade de Aveiro, 2009
- [11]. D2.1 FUTON "*Reference Scenarios and Architecture*", 2010
- [12]. D2.2 FUTON "*Business Evaluation*", 2010
- [13]. D8.1 FUTON "*Dissemination Report*", 2010
- [14]. DUARTE, A. Manuel de Oliveira, "Análise Tecno-Económica de Redes de Telecomunicações", notas de estudo, Universidade de Aveiro, 2009
- [15]. DUARTE, A. Manuel de Oliveira, "Rede e Serviços de Telecomunicações: Conceitos, Modelos e Estruturas Fundamentais das Redes de Telecomunicações", notas de estudo, Universidade de Aveiro, 2009

- [16]. Duarte, A. Manuel de Oliveira, “*Telecommunications Networks and Services: Organisation, Technologies, Markets and Business Models*”, lecture notes, Universidade de Aveiro, 2008 (V.3)
- [17]. Duarte, A.M. O., “Elementos de Análise Tecno-Económica”, Universidade de Aveiro, Série Notas de Estudo em Tems de Telecomunicações, 2009.
- [18]. Duarte, A.M.O, Pereira, A.S., Direito, I., Félix, H.S., Carrilho, D.C., Alves, A.M.C. “Active Classrooms: role-playing experience in telecommunications engineering education”, *International Journal of Engineering Education (IJEE)*, 2010
- [19]. Duarte, A.M.O, Pereira, A.S., Direito, I., Félix, H.S., Carrilho, D.C., Alves, A.M.C. “Active Classrooms: role-playing experience in telecommunications engineering education”, aceite para publicação no *International Journal of Engineering Education (IJEE)*, ISSN: 0742-0269.
- [20]. Duarte, A.M.O., Direito, I., Oliveira, I.C., Félix, H.S. “Entrepreneurship Training: a Case Study in Engineering Students”, *International Conference on Engineering Education – ICEE2010*, Gliwice, Poland, 18-22 July 2010.
- [21]. Edwards, George and Sankar, Ravi, “*Microcellular Handoff using fuzzy techniques*”, *Wireless Networks* 4 (1998) 401-409
- [22]. Ergen, Mustafa, “*Mobile Broadband Including WiMAX and LTE*”, Springer, 2009.
- [23]. F. Pérez Fontán and P. Mariño Espiñeira, “*Modeling the Wireless Propagation Channel: A Simulation Approach with MATLAB®*”, Wiley, 2008, capítulo 8
- [24]. Gatarayiha, François-Regis, “*Improved Radio Propagation Modeling for Cellular Networks in a Rolling Hill-Environment*”, Universidade de Pretoria, 2006
- [25]. Hagerman, Bo, “*Downlink Relative Co-Channel Interference Powers in Cellular Radio Systems*”
- [26]. <http://www.3gpp.org/LTE> (acedido em 07-06-2010)
- [27]. http://www.cisco.com/en/US/prod/collateral/wireless/ps7183/ps469/images/0900aecd806a1a3e_null_null_null_08_07_07-12.jpg (acedido em 16-07-2010)
- [28]. <http://www.mobilehandsetdesignline.com/howto/170703686;jsessionid=T51ZCBIX0G2EPQE1GHRKH4ATMY32JVN> (acedido em 03-06-2010)
- [29]. Katsianis, Dimitri, Welling, Ilari, Ylönen, Maria, Varoutas, Dimitris, Sphicopoulos, Thomas, Elnegaard, Nils Kristian, Olsen, Borgar T., Budry, Lucien, “*The economic perspective of the mobile networks in Europe*”.
- [30]. Lopes, Bruno, “*Technoeconomic study for a Mobile WiMAX solution in Luanda*”, 2008

- [31]. Man Hung Ng, Shen-De Lin, Jimmy Li and Said Tatesh, “*Coexistence Studies for 3GPP LTE with Other Mobile Systems*”, IEEE Communications Magazine, 2009
- [32]. Martin V. Clark, Vinko Erceg and Larry J. Greenstein, “*Reuse Efficiency in Urban Microcellular Networks*”, IEEE Transactions on vehicular technology, Vol. 46, NO. 2, 1997
- [33]. O’Mahony, Donald, “*UMTS: The Fusion of Fixed Mobile Networking*”, IEEE Internet Computing, 1998
- [34]. Pereira, João Paulo Ribeiro, “*A Cost Model for Broadband Access Networks: FTTx versus WiMAX*”, 2007
- [35]. Sanjay Kaul, Fuaad Ali, Subramaniam Janakiram and Bengt Wttenström, “*Business Models for Sustainable Telecoms Growth in Developing Economies*”, Wiley, 2008
- [36]. SFERA (*Structural Funds for European Regional Advancement*) , “*WP3 - Analysis of use cases: The rural broadband extension*”
- [37]. Shapira, Joseph, “*Microcell Engineering in CDMA Cellular Networks*”, IEEE Transactions on vehicular technology, Vol. 43, NO. 4, 1994
- [38]. Smura, Timo, “*Techno-economic Analysis of IEEE 802.16a-Based Fixed Wireless Access Networks*”, Abril de 2004, Universidade de tecnologia de Helsínquia.
- [39]. So-In, Chakchai, Jain, Raj and Karim, Abel, “*Capacity Evaluation for IEEE 802.16e Mobile WiMAX*”
- [40]. Turma 09/10, “*Planeamento de Comunicações Móveis*”, 2010
- [41]. Vikram Chandrasekhar, “*Coexistence in Femtocell-aided Cellular Architectures*”, PhD Dissertation, May 2009