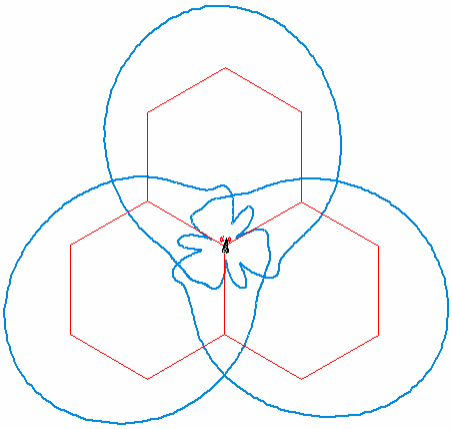
UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA

INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO



COMPARAÇÃO DE ESTRUTURAS CELULARES EM UMTS

Filipe Faustino, nº 46528, Ramo de Telecomunicações e Electrónica
Helder Dias, nº 46541, Ramo de Telecomunicações e Electrónica

LICENCIATURA EM ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA E DE COMPUTADORES
Relatório de Trabalho Final de Curso
048/2002/L

Prof. Orientador: Luís M. Correia

Novembro de 2003

"*O único homem que não erra*
é aquele que nunca faz nada"

Roosevelt

Agradecimentos

Em primeiro, ao Prof. Doutor Luís M. Correia, por nos ter proporcionado uma oportunidade única, pelo apoio e orientação prestados, pela sua capacidade de motivação, e acima de tudo, pela partilha do seu conhecimento.

À Vodafone, pela oportunidade de colaboração e pelos dados que nos foram cedidos; aos Engenheiros Carlos Caseiro e Pedro Lourenço pelas suas ideias e sugestões que nos foram muito úteis.

A todos os membros do GROW, pelos conhecimentos partilhados, além de todas as críticas, sugestões e comentários que nos ajudaram na melhoria do projecto.

Ao pessoal do RF2, onde além de parceiros e colegas, foram amigos e nos deram o alento necessária para a conclusão deste projecto, nas muitas horas passadas juntos: Alex, Angelino, João, Paulo e Samuel.

Aos nossos amigos, Caiado, Crispim, Félix, Mangas, Mário, Radek, Jurek e ao pessoal do 4º, 10º e 11º pisos que sempre nos deram apoio.

À nossa família, pais e irmãos, pelo encorajamento, força, paciência e confiança que sempre depositaram em nós.

E a todos aqueles que, não constando nesta lista por lapso momentâneo, também contribuíram para a realização deste projecto.

Resumo

Este trabalho aborda o planeamento e eficiência de redes celulares hierárquicas em UMTS. É considerada uma rede não uniforme, fornecida pela Vodafone, para a cidade de Lisboa.

Faz-se uma breve introdução de conceitos básicos do sistema, tais como WCDMA, *handover*, serviços, tráfego, interferência e capacidade. É descrito o conceito de rede celular hierárquica e são traçadas considerações sobre planeamento, destacando-se os balanços de potência. São ainda definidos parâmetros sobre os quais recai a análise de eficiência das redes celulares, como por exemplo, a percentagem de utilizadores sem serviço, o raio das células, número de portadoras e percentagens de carga em *soft* e *softer handover*.

Para a caracterização da eficiência de redes hierárquicas, foi desenvolvida uma ferramenta de planeamento, *Our Box*, que simula e analisa redes celulares com base numa outra ferramenta, *Map UMTS*, desenvolvida num projecto anterior. A ferramenta *Our Box*, realiza a optimização da rede, disponibilizando portadoras às células onde exista carência de capacidade. Para alem desta optimização também se implementam estratégias gestão de recursos rádio através do modo como é escolhida a portadora a que cada utilizador da rede se liga. Existe a possibilidade de se atribuírem frequências a ligações de modo a que a carga seja uniforme em todas as portadoras da célula ou através da distância a que os utilizadores se encontram da estação base.

Os resultados foram obtidos tendo em conta a evolução da percentagem de utilizadores não servidos em função do número de utilizadores e do número de portadoras disponíveis. As características desta evolução são bem aproximadas por polinómios de grau 3. Compararam-se os resultados considerando as duas estratégias de divisão dos utilizadores pelas frequências, e verificou-se que em geral a estratégia baseada na distância apresenta melhores resultados em termos de cobertura. Quanto ao serviço de referência confirmou-se a sua influência na degradação dos serviços de maior ritmo. Para o serviço de referência 144 kbps (PS) e divisão dos utilizadores pelas frequências baseada na carga obteve-se uma percentagem de utilizadores sem serviço alvo de 2% para aproximadamente 800 utilizadores quando se disponibiliza uma frequência; 2200 para duas frequências; 3500 para três frequências e 5000 para quatro frequências. Para a estratégia baseada na distância obteve-se aproximadamente 2500 utilizadores para duas frequências; 3700 para três frequências e 4500 para quatro frequências.

Palavras-Chaves

UMTS, Planeamento celular, Gestão de recursos rádio, Optimização, Simulação.

Índice geral

Agradecimentos ..... **iii**

Resumo ..... **v**

Palavras-Chaves ..... **v**

Índice geral ..... **vii**

Lista de Figuras ..... **ix**

Lista de Tabelas ..... **xiii**

Lista de Siglas ..... **xxv**

Lista de Símbolos ..... **xxvii**

1 Introdução **1**

2 Uma Breve Perspectiva sobre o UMTS **5**

2.1 A Rede UTRAN 5
2.2 Aplicações e Serviços em UMTS 6
2.3 WCDMA 9
2.4 Interferência e capacidade 12

3 Estrutura Celular **17**

3.1 Tipos de células 17
3.2 Estruturas celulares de camadas hierárquicas 18
3.3 Balanço de potência em WCDMA 21
3.4 Parâmetros de eficiência 21

4 Simulador de redes UMTS **23**

4.1 A ferramenta de *software Map UMTS* 23
4.2 As ferramentas *Map UMTS* V1.5 e *Our Box* 26
4.2.1 Estrutura 26
4.2.2 Parâmetros de entrada 27
4.2.3 Algoritmo de simulação e optimização 29
4.2.4 Parâmetros de saída 34

5 Análise de Resultados **37**

5.1 Dados de Entrada 37
5.2 Estratégia de Carga Igual 38
5.3 Estratégia da Distância ao *Node B* 41
5.4 Planeamento de Rede 43
5.4.1 Serviços de referência 43
5.4.2 Análise com base no mapa de cobertura 45
5.4.3 Análise para várias distribuições de tráfego 46
5.4.4 Limiares de decisão 47

6 Conclusões **49**

Anexo A UTRA TDD A.1

Anexo B Cálculo de balanços de potência B.1

Anexo C Modelo de propagação COST 231 – Walfisch-Ikegami C.1

Anexo D Diagrama de radiação da antena D.1

Anexo E Fluxogramas E.1

Anexo F Serviços requeridos F.1

Anexo G Percentagem de Utilizadores Sem Serviço G.1

Anexo H Raio Normalizado H.1

Anexo I Factores de Carga I.1

Anexo J Percentagem de Carga em *Soft Handover* J.1

Anexo K Percentagem de Carga em *Softer Handover* K.1

Anexo L Capacidade L.1

Anexo M Potência M.1

Anexo N Ritmo Efectivo Relativo Médio N.1

Anexo O Ritmo Efectivo Relativo dos Atrasados O.1

Anexo P Percentagem de Atrasados P.1

Anexo Q Raio Normalizado Q.1

Anexo R Percentagem de utilização de frequências R.1

Anexo S Cálculo de R^2 ..... S.1

Anexo T Características da P_{ss} T.1

Anexo U Mapas U.1

Referências Ref.1

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Espectro disponível para o UMTS (extraído de [UMTS98a]). 2
Figura 2.1 – Estrutura da rede UTRAN (extraído de [3GPP00]). 5
Figura 2.2 – Atribuição de frequências para os modos FDD e TDD na Europa (extraído de [VaCa02]). 9
Figura 2.3 – Relação entre *Channelisation* e *Scrambling* (extraído de [HoTo00]). 10
Figura 3.1 – Comparação entre tipos de células (extraído de [Serr02]). 17
Figura 3.2 – Estrutura celular de camadas hierárquicas (extraído de [UMTS98b]). 19
Figura 4.1 – Diagrama de blocos representativo da aplicação *Map UMTS* (extraído de [VaCa02]). 23
Figura 4.2 – Diagrama de blocos representando a interacção entre as aplicações *Map UMTS* V1.5, *Our Box* e utilizador. 27
Figura 4.3 – Representação do processo de cálculo do raio de um sector. 28
Figura 4.4 – *Node Bs* com três sectores. 29
Figura 4.5 – Formação dos hexágonos. 30
Figura 4.6 – Fluxograma do algoritmo de simulação e optimização. 31
Figura 5.1 – Rede não uniforme, mapa de localização dos *Node B*s. 37
Figura 5.2 – Distribuição espacial da população e dos respectivos serviços. 38
Figura 5.3 – P_{ss} média em função do número de utilizadores e do número de frequências para o serviço de referência 144 kbps (PS) e estratégia de carga igual. 40
Figura 5.4 – Percentagem de utilização de frequências, média; 144 kbps (PS), carga igual, 4 frequências. 41
Figura 5.5 – Comparação do raio normalizado entre 144 kbps (PS) e 64 kbps (PS) como serviço de referência, com 1 frequência, 699 utilizadores. 43
Figura 5.6 – Cobertura para as quatro frequências, com 5235 utilizadores, serviço de referência de 144 kbps (PS), carga igual. 45
Figura B.1 – Percentagem de zonas cobertas em função da margem de desvanecimento, para o modelo de Walfisch-Ikegami (extraído de [VaCa02]). B.4
Figura D.1 – Diagrama de radiação D.1
Figura E.1 – Fluxograma representativo da interacção entre as aplicações Map UMTS e *Our Box*. E.1
Figura E.2 – Fluxograma representativo do teste aos limites de cargas e potência e redução do raio. E.2

Figura E.3 – Fluxograma representativo do algoritmo de selecção de frequência. E.3
Figura F.1 – Percentagem de ligações para a distribuição utilizada por omissão. F.13
Figura F.2 – Percentagens de ligações para a distribuição de serviços com mais voz.....F.13
Figura F.3 – Percentagem de ligações para a distribuição de serviços com menos voz. F.13
Figura Q.1 – Raio normalizado ordenado; 64 kbps (PS), Carga Igual, 1 frequência..... Q.1
Figura Q.2 – Raio normalizado ordenado; 64kbps (PS), Carga Igual, 2 frequências Q.1
Figura Q.3 – Raio normalizado ordenado; 64kbps (PS), Carga Igual, 3 frequências Q.2
Figura Q.4 – Raio normalizado ordenado; 64kbps (PS), Carga Igual, 4 frequências Q.2
Figura Q.5 – Raio normalizado ordenado; 64kbps (PS), Distância, 2 frequências..... Q.3
Figura Q.6 – Raio normalizado ordenado; 64kbps (PS), Distância, 3 frequências..... Q.3
Figura Q.7 – Raio normalizado ordenado; 64kbps (PS), Distância, 4 frequências..... Q.4
Figura Q.8 – Raio normalizado ordenado; 144kbps (PS), Carga Igual, 1 frequências Q.4
Figura Q.9 – Raio normalizado ordenado; 144kbps (PS), Carga Igual, 2 frequências Q.5
Figura Q.10 – Raio normalizado ordenado; 144kbps (PS), Carga Igual, 3 frequências Q.5
Figura Q.11 – Raio normalizado ordenado; 144kbps (PS), Carga Igual, 4 frequências Q.6
Figura Q.12 – Raio normalizado ordenado; 144kbps (PS), Distância, 2 frequências..... Q.6
Figura Q.13 – Raio normalizado ordenado; 144kbps (PS), Distância, 3 frequências..... Q.7
Figura Q.14 – Raio normalizado ordenado; 144kbps (PS), Distância, 4 frequências..... Q.7
Figura R.1 – Percentagem de utilização de frequências, média; 144 kbps (PS), carga igual, 2 frequências..... R.1
Figura R.2 – Percentagem de utilização de frequências, máximo; 144 kbps (PS), carga igual, 2 frequências..... R.1
Figura R.3 – Percentagem de utilização de frequências, média; 144 kbps (PS), carga igual, 3 frequências..... R.2
Figura R.4 – Percentagem de utilização de frequências, máximo; 144 kbps (PS), carga igual, 3 frequências..... R.2
Figura R.5 – Percentagem de utilização de frequências, média; 144 kbps (PS), carga igual, 4 frequências..... R.2
Figura R.6 – Percentagem de utilização de frequências, máximo; 144 kbps (PS), carga igual, 4 frequências..... R.3
Figura R.7 – Percentagem de utilização de frequências, média; 144 kbps (PS), distância, 2 frequências..... R.3
Figura R.8 – Percentagem de utilização de frequências, máximo; 144 kbps (PS), distância, 2 frequências..... R.3

Figura R.9 – Percentagem de utilização de frequências, média; 144 kbps (PS), distância, 3 frequências..... R.4
Figura R.10 – Percentagem de utilização de frequências, máximo; 144 kbps (PS), distância, 3 frequências..... R.4
Figura R.11 – Percentagem de utilização de frequências, média; 144 kbps (PS), distância, 4 frequências..... R.4
Figura R.12 – Percentagem de utilização de frequências, máximo; 144 kbps (PS), distância, 4 frequências..... R.5
Figura R.13 – Percentagem de utilização de frequências, média; 64 kbps (PS), carga igual, 2 frequências..... R.5
Figura R.14 – Percentagem de utilização de frequências, máximo; 64 kbps (PS), carga igual, 2 frequências..... R.5
Figura R.15 –Percentagem de utilização de frequências, média; 64 kbps (PS), carga igual, 3 frequências..... R.6
Figura R.16 – Percentagem de utilização de frequências, máximo; 64 kbps (PS), carga igual, 3 frequências..... R.6
Figura R.17 – Percentagem de utilização de frequências, média; 64 kbps (PS), carga igual, 4 frequências..... R.6
Figura R.18 – Percentagem de utilização de frequências, máximo; 64 kbps (PS), carga igual, 4 frequências..... R.7
Figura R.19 – Percentagem de utilização de frequências, média; 64 kbps (PS), distância, 2 frequências..... R.7
Figura R.20 – Percentagem de utilização de frequências, máximo; 64 kbps (PS), distância, 2 frequências..... R.7
Figura R.21 – Percentagem de utilização de frequências, média; 64 kbps (PS), distância, 3 frequências..... R.8
Figura R.22 – Percentagem de utilização de frequências, máximo; 64 kbps (PS), distância, 3 frequências..... R.8
Figura R.23 – Percentagem de utilização de frequências, média; 64 kbps (PS), distância, 4 frequências..... R.8
Figura R.24 – Percentagem de utilização de frequências, máximo; 64 kbps (PS), distância, 4 frequências..... R.9

Figura T.1 – P_{ss} média em função do número de utilizadores e do número de frequências para o serviço de referência 144 kbps (PS) e estratégia de carga igual. T.1

Figura T.2 – Evolução da P_{ss} com o número de utilizadores e o número de frequências, 144 kbps (PS), estratégia baseada na distância. T.2

Figura T.3 – Evolução de P_{ss} com o número de utilizadores e número de frequências, 64 kbps (PS) e estratégia de carga igual. T.3

Figura T.4 - Evolução da P_{ss} em função do número de utilizadores e do número de utilizadores, 64 kbps (PS), distância. T.4

Figura U.1 – Mapa da cobertura para a 1ª frequência. U.1

Figura U.2 – Mapa da cobertura para a 2ª frequência. U.2

Figura U.3 – Mapa da cobertura para a 3ª frequência. U.3

Figura U.4 – Mapa da cobertura para a 4ª frequência. U.4

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Características dos serviços segundo o 3GPP (extraído de [3GPP00a]). 7

Tabela 2.2 – Características dos serviços segundo o UMTS Forum (extraído de [UMTS98a]). 8

Tabela 2.3 – Funcionalidade dos *Channelisation Codes e Scrambling Codes* (extraído de [HoTo00]). 11

Tabela 2.4 – Factores de espalhamento e débitos binários (FDD) (adaptado de [HoTo00]). .. 12

Tabela 2.5 – Exemplos de resultados de capacidade com *soft blocking* (extraído de [HoTa00]). 15

Tabela 3.1 - Propriedades dos diferentes tipos de células (extraído de [UMTS98b]). 18

Tabela 3.2 – Relação entre espectro reservado e estrutura de camadas hierárquicas (extraído de [UMTS98b]). 20

Tabela 3.3 – Requisitos de atenuação entre portadoras (extraído de [HoTo00]). 20

Tabela 4.1 – Serviços disponíveis 24

Tabela 4.2 – Razão de utilização de serviços por freguesia (adaptado de [VaCa02]). 25

Tabela 4.3 – Correspondência entre número médio de utilizadores e taxas de penetração e utilização. 25

Tabela 4.4 – Ângulos de orientação dos sectores 30

Tabela 5.1 – Frequência das portadoras em função da hierarquia 38

Tabela 5.2 – P_{ss}, com serviço de referência 144 kbps (PS), 4 frequências, Carga Igual. 39

Tabela 5.3 – R_{norm} para diferentes estratégias, 2 frequências e 144 kbps (PS) como serviço de referência. 42

Tabela 5.4 – Percentagem de ligações atrasadas para 4 frequências, carga igual. 44

Tabela 5.5 – Factores de Carga em *soft e softer handover*, com serviço de referência 144 kbps (PS), 4 frequências, Carga Igual. 46

Tabela 5.6 – Análise da influência da distribuição de tráfego na rede 47

Tabela 5.7 – Comparação da P_{ss} e do raio normalizado quando se reduz o raio de 10 e 20%, para 144 kbps como serviço de referência, 4 frequências, Carga Igual. 48

Tabela 5.8 – Percentagem de carga em *soft* e *softer handover* para redução de 10% e 20%. . 48

Tabela A.1 – Análise de perdas de acoplamento entre *Node Bs* TDD e FDD em frequências adjacentes a 1 920 MHz (extraído de [HoTo00]). A.2

Tabela B.1 – Valores típicos de alguns parâmetros (adaptado de [VaCa02]). B.2

Tabela B.2 - Valores de E_b / N_0 para diferentes serviços (adaptado de [MOME03]). B.3

Tabela B.3 – Valores típicos de alguns parâmetros (extraído de [VaCa02]). B.4

Tabela B.4 – Sensibilidade, margem de segurança, atenuação de propagação máxima e distância máxima para os vários serviços disponibilizados (adaptado de [VaCa02]). B.5

Tabela C.1 – Intervalos de aplicabilidade do modelo COST 231 Walfisch-Ikegami (adaptado de [DaCo99]). C.2

Tabela F.1 – Mapeamento de serviços em ritmos binários e tipo de comutação. F.1

Tabela F.2 – Percentagem de utilização de serviços do UMTS, segundo a idade. F.2

Tabela F.3 – Percentagem de utilização dos serviços considerados no simulador segundo a idade. F.2

Tabela F.4 – Percentagem de utilização de serviços do UMTS, segundo a escolaridade..... F.3

Tabela F.5 – Percentagem de utilização dos serviços considerados no simulador segundo a escolaridade. F.3

Tabela F.6 – Percentagem de utilização de serviços do UMTS, segundo o rendimento. F.4

Tabela F.7 – Percentagem de utilização dos serviços considerados no simulador segundo o rendimento. F.4

Tabela F.8 – Percentagem de utilização de serviços do UMTS, segundo a idade, dando mais ênfase ao serviço de voz. F.5

Tabela F.9 – Percentagem de utilização dos serviços considerados no simulador segundo a idade, dando mais ênfase ao serviço de voz. F.5

Tabela F.10 – Percentagem de utilização de serviços do UMTS, segundo a escolaridade, dando mais ênfase ao serviço de voz..... F.6

Tabela F.11 – Percentagem de utilização dos serviços considerados no simulador segundo a escolaridade, dando mais ênfase ao serviço de voz..... F.6

Tabela F.12 – Percentagem de utilização de serviços do UMTS, segundo o rendimento, dando mais ênfase ao serviço de voz. F.7

Tabela F.13 – Percentagem de utilização dos serviços considerados no simulador segundo o rendimento, dando mais ênfase ao serviço de voz. F.7

Tabela F.14 – Parâmetros referentes a 144 kbps como serviço de referência, 1 frequência, com distribuição de serviços com mais voz. F.8

Tabela F.15 – Parâmetros referentes a 144 kbps como serviço de referência, 2 frequências, com distribuição de serviços com mais voz. F.8

Tabela F.16 – Parâmetros referentes a 144 kbps como serviço de referência, 3 frequências, com distribuição de serviços com mais voz. F.8
Tabela F.17 – Parâmetros referentes a 144 kbps como serviço de referência, 4 frequências, com distribuição de serviços com mais voz. F.8
Tabela F.18 – Percentagem de utilização de serviços do UMTS, segundo a idade, dando menos ênfase ao serviço de voz. F.9
Tabela F.19 – Percentagem de utilização dos serviços considerados no simulador segundo a idade, dando menos ênfase ao serviço de voz. F.9
Tabela F.20 – Percentagem de utilização de serviços do UMTS, segundo a escolaridade, dando menos ênfase ao serviço de voz. F.10
Tabela F.21 – Percentagem de utilização dos serviços considerados no simulador segundo a escolaridade, dando menos ênfase ao serviço de voz. F.10
Tabela F.22 – Percentagem de utilização de serviços do UMTS, segundo o rendimento, dando menos ênfase ao serviço de voz. F.11
Tabela F.23 – Percentagem de utilização dos serviços considerados no simulador segundo o rendimento, dando menos ênfase ao serviço de voz. F.11
Tabela F.24 – Parâmetros referentes a 144 kbps como serviço de referência, 1 frequência, com distribuição de serviços com menos voz. F.12
Tabela F.25 – Parâmetros referentes a 144 kbps como serviço de referência, 2 frequências, com distribuição de serviços com menos voz. F.12
Tabela F.26 – Parâmetros referentes a 144 kbps como serviço de referência, 3 frequências, com distribuição de serviços com menos voz. F.12
Tabela F.27 – Parâmetros referentes a 144 kbps como serviço de referência, 4 frequências, com distribuição de serviços com menos voz. F.12
Tabela G.1 – P_{ss}, com serviço de referência 64 kbps (PS), 1 frequência, Carga Igual. G.1
Tabela G.2 – P_{ss}, com serviço de referência 64 kbps (PS), 2 frequência, Carga Igual. G.1
Tabela G.3 – P_{ss}, com serviço de referência 64 kbps (PS), 3 frequência, Carga Igual. G.1
Tabela G.4 – P_{ss}, com serviço de referência 64 kbps (PS), 4 frequência, Carga Igual. G.1
Tabela G.5 – P_{ss}, com serviço de referência 64 kbps (PS), 2 frequências, Distância. G.2
Tabela G.6 – P_{ss}, com serviço de referência 64 kbps (PS), 3 frequências, Distância. G.2
Tabela G.7 – P_{ss}, com serviço de referência 64 kbps (PS), 4 frequências, Distância. G.2
Tabela G.8 – P_{ss}, com serviço de referência 144 kbps (PS), 1 frequência, Carga Igual. G.2

Tabela G.9 – P_{ss}, com serviço de referência 144 kbps (PS), 2 frequências, Carga Igual..... G.3

Tabela G.10 – P_{ss}, com serviço de referência 144 kbps (PS), 3 frequências, Carga Igual.... G.3

Tabela G.11 – P_{ss}, com serviço de referência 144 kbps (PS), 4 frequências, Carga Igual.... G.3

Tabela G.12 – P_{ss}, com serviço de referência 144 kbps (PS), 2 frequências, Distância. G.3

Tabela G.13 – P_{ss}, com serviço de referência 144 kbps (PS), 3 frequências, Distância. G.4

Tabela G.14 – P_{ss}, com serviço de referência 144 kbps (PS), 4 frequências, Distância. G.4

Tabela H.1 – Raio Normalizado, com serviço de referência 64 kbps (PS), 1 frequência, Carga Igual. H.1

Tabela H.2 – Raio Normalizado, com serviço de referência 64 kbps (PS), 2 frequências, Carga Igual. H.1

Tabela H.3 – Raio Normalizado, com serviço de referência 64 kbps (PS), 3 frequências, Carga Igual. H.1

Tabela H.4 – Raio Normalizado, com serviço de referência 64 kbps (PS), 4 frequências, Carga Igual. H.1

Tabela H.5 – Raio Normalizado, com serviço de referência 64 kbps (PS), 2 frequências, Distância. H.2

Tabela H.6 – Raio Normalizado, com serviço de referência 64 kbps (PS), 3 frequências, Distância. H.2

Tabela H.7 – Raio Normalizado, com serviço de referência 64 kbps (PS), 4 frequências, Distância. H.2

Tabela H.8 – Raio Normalizado, com serviço de referência 144 kbps (PS), 1 frequência, Carga Igual. H.2

Tabela H.9 – Raio Normalizado, com serviço de referência 144 kbps (PS), 2 frequências, Carga Igual. H.3

Tabela H.10 – Raio Normalizado, com serviço de referência 144 kbps (PS), 3 frequências, Carga Igual. H.3

Tabela H.11 – Raio Normalizado, com serviço de referência 144 kbps (PS), 4 frequências, Carga Igual. H.3

Tabela H.12 - Raio Normalizado, com serviço de referência 144 kbps (PS), 2 frequências, Distância. H.3

Tabela H.13 – Raio Normalizado, com serviço de referência 144 kbps (PS), 3 frequência, Distância. H.4

Tabela H.14 – Raio Normalizado, com serviço de referência 144 kbps (PS), 4 frequências, Distância. H.4
Tabela I.1 – Factores de Carga, com serviço de referência 64 kbps (PS), 1 frequência, Carga Igual. I.1
Tabela I.2 – Factores de Carga, com serviço de referência 64 kbps (PS), 2 frequências, Carga Igual. I.1
Tabela I.3 – Factores de Carga, com serviço de referência 64 kbps (PS), 3 frequências, Carga Igual. I.1
Tabela I.4 – Factores de Carga, com serviço de referência 64 kbps (PS), 4 frequências, Carga Igual. I.1
Tabela I.5 – Factores de Carga, com serviço de referência 64 kbps (PS), 2 frequências, Distância. I.2
Tabela I.6 – Factores de Carga, com serviço de referência 64 kbps (PS), 3 frequências, Distância. I.2
Tabela I.7 – Factores de Carga, com serviço de referência 64 kbps (PS), 4 frequência, Distância. I.2
Tabela I.8 – Factores de Carga, com serviço de referência 144 kbps (PS), 1 frequência, Carga Igual. I.2
Tabela I.9 – Factores de Carga, com serviço de referência 144 kbps (PS), 2 frequências, Carga Igual. I.3
Tabela I.10 – Factores de Carga, com serviço de referência 144 kbps (PS), 3 frequências, Carga Igual. I.3
Tabela I.11 – Factores de Carga, com serviço de referência 144 kbps (PS), 4 frequências, Carga Igual. I.3
Tabela I.12 – Factores de Carga, com serviço de referência 144 kbps (PS), 2 frequências, Distância. I.3
Tabela I.13 – Factores de Carga, com serviço de referência 144 kbps (PS), 3 frequências, Distância. I.4
Tabela I.14 - Factores de Carga, com serviço de referência 144 kbps (PS), 4 frequências, Distância. I.4
Tabela J.1 – Percentagem de Carga em *Soft Handover*, com serviço de referência 64 kbps (PS), 1 frequência, Carga Igual. J.1

Tabela J.2 – Percentagem de Carga em *Soft Handover*, com serviço de referência 64 kbps (PS), 2 frequências, Carga Igual.....J.1
Tabela J.3 – Percentagem de Carga em *Soft Handover*, com serviço de referência 64 kbps (PS), 3 frequências, Carga Igual.....J.1
Tabela J.4 – Percentagem de Carga em *Soft Handover*, com serviço de referência 64 kbps (PS), 4 frequências, Carga Igual.....J.1
Tabela J.5 - Percentagem de Carga em *Soft Handover*, com serviço de referência 64 kbps (PS), 2 frequências, Distância. J.2
Tabela J.6 – Percentagem de Carga em *Soft Handover*, com serviço de referência 64 kbps (PS), 3 frequências, Distância. J.2
Tabela J.7 – Percentagem de Carga em *Soft Handover*, com serviço de referência 64 kbps (PS), 4 frequências, Distância. J.2
Tabela J.8 – Percentagem de Carga em *Soft Handover*, com serviço de referência 144 kbps (PS), 1 frequência, Carga Igual. J.2
Tabela J.9 – Percentagem de Carga em *Soft Handover*, com serviço de referência 144 kbps (PS), 2 frequências, Carga Igual.....J.3
Tabela J.10 – Percentagem de Carga em *Soft Handover*, com serviço de referência 144 kbps (PS), 3 frequências, Carga Igual.....J.3
Tabela J.11 – Percentagem de Carga em *Soft Handover*, com serviço de referência 144 kbps (PS), 4 frequências, Carga Igual.....J.3
Tabela J.12 – Percentagem de Carga em *Soft Handover*, com serviço de referência 144 kbps (PS), 2 frequências, Distância. J.3
Tabela J.13 – Percentagem de Carga em *Soft Handover*, com serviço de referência 144 kbps (PS), 3 frequências, Distância. J.4
Tabela J.14 – Percentagem de Carga em *Soft Handover*, com serviço de referência 144 kbps (PS), 4 frequências, Distância. J.4
Tabela K.1 – Percentagem de Carga em *Softer Handover*, com serviço de referência 64 kbps (PS), 1 frequência, Carga Igual. K.1
Tabela K.2 – Percentagem de Carga em *Softer Handover*, com serviço de referência 64 kbps (PS), 2 frequências, Carga Igual..... K.1
Tabela K.3 – Percentagem de Carga em *Softer Handover*, com serviço de referência 64 kbps (PS), 3 frequências, Carga Igual..... K.1
Tabela K.4 – Percentagem de Carga em *Softer Handover*, com serviço de referência 64 kbps (PS), 4 frequências, Carga Igual..... K.1

Tabela K.5 – Percentagem de Carga em *Softer Handover*, com serviço de referência 64 kbps (PS), 2 frequências, Distância. K.2
Tabela K.6 – Percentagem de Carga em *Softer Handover*, com serviço de referência 64 kbps (PS), 3 frequências, Distância. K.2
Tabela K.7 – Percentagem de Carga em *Softer Handover*, com serviço de referência 64 kbps (PS), 4 frequências, Distância. K.2
Tabela K.8 – Percentagem de Carga em *Softer Handover*, com serviço de referência 144 kbps (PS), 1 frequência, Carga Igual. K.2
Tabela K.9 – Percentagem de Carga em *Softer Handover*, com serviço de referência 144 kbps (PS), 2 frequências, Carga Igual..... K.3
Tabela K.10 – Percentagem de Carga em *Softer Handover*, com serviço de referência 144 kbps (PS), 3 frequências, Carga Igual. K.3
Tabela K.11 – Percentagem de Carga em *Softer Handover*, com serviço de referência 144 kbps (PS), 4 frequências, Carga Igual. K.3
Tabela K.12 – Percentagem de Carga em *Softer Handover*, com serviço de referência 144 kbps (PS), 2 frequências, Distância..... K.3
Tabela K.13 – Percentagem de Carga em *Softer Handover*, com serviço de referência 144 kbps (PS), 3 frequências, Distância..... K.4
Tabela K.14 – Percentagem de Carga em *Softer Handover*, com serviço de referência 144 kbps (PS), 4 frequências, Carga Igual. K.4
Tabela L.1 – Capacidade, com serviço de referência 64 kbps (PS), 1 frequência, Carga Igual. L.1
Tabela L.2 – Capacidade, com serviço de referência 64 kbps (PS), 2 frequências, Carga Igual. L.1
Tabela L.3 – Capacidade, com serviço de referência 64 kbps (PS), 3 frequências, Carga Igual. L.1
Tabela L.4 – Capacidade, com serviço de referência 64 kbps (PS), 4 frequências, Carga Igual. L.1
Tabela L.5 – Capacidade, com serviço de referência 64 kbps (PS), 2 frequências, Distância. L.1
Tabela L.6 – Capacidade, com serviço de referência 64 kbps (PS), 3 frequências, Distância. L.2

Tabela L.7 – Capacidade, com serviço de referência 64 kbps (PS), 4 frequências, Distância. L.2
Tabela L.8 – Capacidade, com serviço de referência 144 kbps (PS), 1 frequência, Carga Igual. L.2
Tabela L.9 – Capacidade, com serviço de referência 144 kbps (PS), 2 frequências, Carga Igual. L.2
Tabela L.10 – Capacidade, com serviço de referência 144 kbps (PS), 3 frequências, Carga Igual. L.2
Tabela L.11 – Capacidade, com serviço de referência 144 kbps (PS), 4 frequências, Carga Igual. L.3
Tabela L.12 – Capacidade, com serviço de referência 144 kbps (PS), 2 frequências, Distância. L.3
Tabela L.13 – Capacidade, com serviço de referência 144 kbps (PS), 3 frequências, Distância. L.3
Tabela L.14 – Capacidade, com serviço de referência 144 kbps (PS), 4 frequências, Distância. L.3
Tabela M.1 – Potência, com serviço de referência 64 kbps (PS), 1 frequência, Carga Igual. M.1
Tabela M.2 – Potência, com serviço de referência 64 kbps (PS), 2 frequências, Carga Igual. M.1
Tabela M.3 – Potência, com serviço de referência 64 kbps (PS), 3 frequências, Carga Igual. M.1
Tabela M.4 – Potência, com serviço de referência 64 kbps (PS), 4 frequências, Carga Igual. M.1
Tabela M.5 – Potência, com serviço de referência 64 kbps (PS), 2 frequências, Distância. .M.1
Tabela M.6 – Potência, com serviço de referência 64 kbps (PS), 3 frequências, Distância. .M.2
Tabela M.7 – Potência, com serviço de referência 64 kbps (PS), 4 frequências, Distância. .M.2
Tabela M.8 – Potência, com serviço de referência 144 kbps (PS), 1 frequências, Carga Igual. M.2
Tabela M.9 - Potência, com serviço de referência 144 kbps (PS), 2 frequências, Carga Igual. M.2
Tabela M.10 – Potência, com serviço de referência 144 kbps (PS), 3 frequências, Carga Igual. M.2

Tabela M.11 – Potência, com serviço de referência 144 kbps (PS), 4 frequências, Carga Igual. M.3
Tabela M.12 – Potência, com serviço de referência 144 kbps (PS), 2 frequências, Distância. M.3
Tabela M.13 – Potência, com serviço de referência 144 kbps (PS), 3 frequências, Distância. M.3
Tabela M.14 – Potência, com serviço de referência 144 kbps (PS), 4 frequências, Distância. M.3
Tabela N.1 – Ritmo Efectivo Relativo Médio, com serviço de referência 64 kbps (PS), 1 frequência, Carga Igual. N.1
Tabela N.2 – Ritmo Efectivo Relativo Médio, com serviço de referência 64 kbps (PS), 2 frequências, Carga Igual. N.1
Tabela N.3 – Ritmo Efectivo Relativo Médio, com serviço de referência 64 kbps (PS), 3 frequências, Carga Igual. N.2
Tabela N.4 – Ritmo Efectivo Relativo Médio, com serviço de referência 64 kbps (PS), 4 frequências, Carga Igual. N.2
Tabela N.5 – Ritmo Efectivo Relativo Médio, com serviço de referência 64 kbps (PS), 2 frequências, Distância. N.3
Tabela N.6 – Ritmo Efectivo Relativo Médio, com serviço de referência 64 kbps (PS), 3 frequências, Distância. N.3
Tabela N.7 – Ritmo Efectivo Relativo Médio, com serviço de referência 64 kbps (PS), 4 frequências, Distância. N.4
Tabela N.8 – Ritmo Efectivo Relativo Médio, com serviço de referência 144 kbps (PS), 1 frequência, Carga Igual, com serviço 384 kbps PS. N.4
Tabela N.9 – Ritmo Efectivo Relativo Médio, com serviço de referência 144 kbps (PS), 2 frequências, Carga Igual, com serviço 384 kbps PS. N.4
Tabela N.10 – Ritmo Efectivo Relativo Médio, com serviço de referência 144 kbps (PS), 3 frequências, Carga Igual, com serviço 384 kbps PS. N.5
Tabela N.11 – Ritmo Efectivo Relativo Médio, com serviço de referência 144 kbps (PS), 4 frequências, Carga Igual, com serviço 384 kbps PS. N.5
Tabela N.12 – Ritmo Efectivo Relativo Médio, com serviço de referência 144 kbps (PS), 2 frequências, Distância, com serviço 384 kbps PS. N.5

Tabela N.13 – Ritmo Efectivo Relativo Médio, com serviço de referência 144 kbps (PS), 3 frequências, Distância, com serviço 384 kbps PS. N.5
Tabela N.14 – Ritmo Efectivo Relativo Médio, com serviço de referência 144 kbps (PS), 4 frequências, Distância, com serviço 384 kbps PS. N.6
Tabela O.1 – Ritmo Efectivo Relativo dos Atrasados, com serviço de referência 64 kbps (PS), 1 frequência, Carga Igual, com serviço 384 kbps PS. O.1
Tabela O.2 – Ritmo Efectivo Relativo dos Atrasados, com serviço de referência 64 kbps (PS), 2 frequências, Carga Igual, com serviço 384 kbps PS. O.1
Tabela O.3 – Ritmo Efectivo Relativo dos Atrasados, com serviço de referência 64 kbps (PS), 3 frequências, Carga Igual, com serviço 384 kbps PS. O.1
Tabela O.4 – Ritmo Efectivo Relativo dos Atrasados, com serviço de referência 64 kbps (PS), 4 frequências, Carga Igual, com serviço 384 kbps PS. O.1
Tabela O.5 – Ritmo Efectivo Relativo dos Atrasados, com serviço de referência 64 kbps (PS), 2 frequências, Distância, com serviço 384 kbps PS. O.2
Tabela O.6 – Ritmo Efectivo Relativo dos Atrasados, com serviço de referência 64 kbps (PS), 3 frequências, Distância, com serviço 384 kbps PS. O.2
Tabela O.7 – Ritmo Efectivo Relativo dos Atrasados, com serviço de referência 64 kbps (PS), 4 frequências, Distância, com serviço 384 kbps PS. O.2
Tabela P.1 – Percentagem de Atrasados, com serviço de referência 64 kbps (PS), 1 frequência, Carga Igual. P.1
Tabela P.2 – Percentagem de Atrasados, com serviço de referência 64 kbps (PS), 2 frequências, Carga Igual. P.1
Tabela P.3 – Percentagem de Atrasados, com serviço de referência 64 kbps (PS), 3 frequências, Carga Igual. P.2
Tabela P.4 – Percentagem de Atrasados, com serviço de referência 64 kbps (PS), 4 frequências, Carga Igual. P.2
Tabela P.5 – Percentagem de Atrasados, com serviço de referência 64 kbps (PS), 2 frequências, Distância. P.3
Tabela P.6 – Percentagem de Atrasados, com serviço de referência 64 kbps (PS), 3 frequências, Distância. P.3
Tabela P.7 - Percentagem de Atrasados, com serviço de referência 64 kbps (PS), 4 frequências, Distância. P.4
Tabela P.8 – Percentagem de Atrasados, com serviço de referência 144 kbps (PS), 1 frequências, Carga Igual. P.4

Tabela P.9 – Percentagem de Atrasados, com serviço de referência 144 kbps (PS), 2 frequências, Carga Igual. P.4
Tabela P.10 – Percentagem de Atrasados, com serviço de referência 144 kbps (PS), 3 frequências, Carga Igual. P.4
Tabela P.11 – Percentagem de Atrasados, com serviço de referência 144 kbps (PS), 4 frequências, Carga Igual. P.5
Tabela P.12 – Percentagem de Atrasados, com serviço de referência 144 kbps (PS), 2 frequências, Distância. P.5
Tabela P.13 – Percentagem de Atrasados, com serviço de referência 144 kbps (PS), 3 frequências, Distância. P.5
Tabela P.14 – Percentagem de Atrasados, com serviço de referência 144 kbps (PS), 4 frequências, Distância. P.5

Lista de Siglas

3GPP	Third Generation Protocol Partnership
CN	Core Network
CS	Circuit Switching
DL	Downlink
DS-CDMA	Direct Sequence-Code Division Multiple Access
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FDD	Frequency Division Duplex
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FTP	File Transfer Protocol
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communications
HIMM	High Interactive Multimedia
HMM	High Multimedia
IMT	International Mobile Telephony
IP	Internet Protocol
ITU-T	International Telecommunication Union Standartisation
LoS	Line of Sight
MMM	Medium Multimedia
MMS	Multimedia Messaging Service
NLoS	Non Line of Sight
OVSC	Orthogonal Variable Spreading Code
PS	Packet Switching
QoS	Quality of Service
RNC	Radio Network Controller
RNS	Radio Network Subsystem
RRM	Radio Resource Management
SC	Site Controller
SD	Switched Data
SF	Spreading Factor
SM	Short Messaging
SMS	Short Message Service
TDD	Time Division Duplex
TD-CDMA	Time Division-Code Division Multiple Access
TDMA	Time Division Multiple Access
UE	User Equipment
UL	Uplink
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UTRA	UMTS Terrestrial Radio Access
UTRAN	UMTS Terrestrial Radio Access Network
S	Speech
W-CDMA	Wideband-Code Division Multiple Access
WWW	World Wide Web

Lista de Símbolos

α	Factor de ortogonalidade dos códigos em DL
α_r	Margem para cálculo do raio do sector
Δf	Largura de banda do sinal
η_{DL}	Factor de carga em DL
η_{UL}	Factor de carga em UL
η_{SH}	Percentagem de carga em *soft handover*
η_{STH}	Percentagem de carga em *softer handover*
υ	Factor de actividade
ψ	Ângulo entre o eixo da rua e a direcção de propagação
b	Distância entre os centros dos edifícios
$dist$	Distância entre o emissor e o receptor
$\mathbf{D}$	Vector relativo à distribuição de serviços na freguesia
E_b / N_0	Quociente entre a energia de bit e a densidade espectral de ruído
f	Frequência da portadora
F	Factor de ruído do receptor
G_p	Ganho de processamento
G_E	Ganho de uma antena de emissão
G_R	Ganho de uma antena de receptor
G_{SH}	Ganho de *soft handover*
h_{Edif}	Altura dos edifício
$h_{Node\ B}$	Altura do *Node B*
h_{UE}	Altura do UE
i	Cociente entre a interferência proveniente de outras células e a interferência da célula
k	Pesos relativos das classificações segundo idade, escolaridade e rendimento
k_a	Factor relativo ao aumento das perdas devido ao *Node B* estar abaixo do telhado
k_d	Factor relativo à dependência das perdas de difracção multilâmina com a distância
k_f	Factor relativo à dependência das perdas de difracção multilâmina com a frequência
L	Atenuação de propagação
L_0	Atenuação em espaço livre
L_c	Atenuação do cabo entre a antena e o emissor/receptor
L_{int}	Atenuação de penetração em interiores
L_{ori}	Atenuação devido à mudança da orientação do raio
$L_{p\ máx}$	Atenuação de propagação máxima
L_{tm}	Atenuação devido a difracções entre os telhados e a rua
L_{tt}	Atenuação devido às multilâminas
L_u	Atenuação devido à proximidade do utilizador
M_I	Margem de interferência

$M_{F\,FF}$	Margem de desvanecimento rápido
$M_{F\,SF}$	Margem de desvanecimento lento
N	Potência de ruído total
N_0	Potência média de ruído térmico
N_{rf}	Densidade espectral de ruído aos terminais do receptor móvel.
N_{ut}	Número de utilizadores
N_{ut384}	Número de utilizadores de serviços de 384 kbps (PS)
N_{ut144}	Número de utilizadores de serviços de 144 kbps (PS/CS)
$N_{ut384-144}$	Número de utilizadores de serviços de 384 kbps reduzidos para 144 kbps
$N_{ut384-64}$	Número de utilizadores de serviços de 384 kbps reduzidos para 64 kbps
$N_{ut144-64}$	Número de utilizadores de serviços de 144 kbps reduzidos para 64 kbps
N_{cob}	Número de utilizadores dentro da área de cobertura máxima
N_{serv}	Número de utilizadores servidos pela rede.
p	Probabilidade da população pertencer a uma classe
P_{Rx}	Potência aos terminais do receptor
$P_{Rx\,\min}$	Sensibilidade do receptor
P_{ss}	Percentagem de utilizadores sem serviço
$P_{Tx}^{Node\ B}$	Potência de emissão do *Node B*
R	Raio do sector
R^2	Valor de raiz quadrada
R_b	Débito do sinal do utilizador
R_c	Débito de *chip*
R_{norm}	Raio do sector normalizado
RER	Ritmo efectivo relativo
$RERA$	Ritmo efectivo relativo dos atrasados
$\mathbf{v}$	relação de utilização de serviços relativos às classes
w	Largura das ruas

1 Introdução

O futuro próximo das telecomunicações passará, sem dúvida, pela tecnologia de terceira geração móvel (3G) – o UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*), ou como é globalmente conhecido - IMT-2000 (*International Mobile Telephony 2000*), representando uma oportunidade única para o desenvolvimento da sociedade da informação. O UMTS além de trazer profundas alterações no mercado das telecomunicações, marcará ainda outras áreas tais como a educação, a saúde e a justiça.

O UMTS será um negócio de investimento a longo prazo e os lucros não serão imediatos. Para além dos volumosos investimentos associados à implementação, é fundamental que haja um número suficiente de consumidores que torne o investimento viável. À partida, Portugal tem a vantagem de aderir facilmente às novas tecnologias, basta observar a elevada taxa de penetração de telemóveis ou a forma massiva como os portugueses utilizam as caixas de multibanco. Pode-se partir do pressuposto que a adesão será positiva se a tecnologia for acessível e os serviços interessarem aos consumidores.

O GSM (*Global System for Mobile Communications*) é entre os sistemas de telefonia móvel de segunda geração, o mais utilizado, sobretudo na Europa. Este sistema caracteriza-se essencialmente pela prestação de serviços de voz e alguns serviços de dados simples, entre os quais o SMS (*Short Message Service*), mas que oferece algumas limitações na capacidade de suportar serviços de dados mais avançados. Este factor conduziu ao lançamento de uma nova geração designada por geração 2.5. Como inovação ao sistema de voz do GSM surgiu o GPRS (*General Packet Radio Service*) possibilitando a transmissão de dados a alta velocidade usando tecnologia de comutação de pacotes. A transição para a geração 2.5 torna-se fundamental, porque vai permitir o lançamento de um conjunto muito alargado de serviços de voz e dados que vão constituir um esboço das primeiras aplicações que vão funcionar em UMTS.

A 3G tem como principal novidade em relação ao GSM a grande flexibilidade de operação, a variedade e novidade de serviços e aplicações disponíveis ao utilizador, sendo estes caracterizados por diferentes débitos e modos de comutação, havendo uma maior optimização dos recursos da rede.

A WARC (*World Administrative Radio Conference*) da ITU (*International Telecommunications Union)*, após a conferência de 1992 anunciou que as frequências do UMTS seriam cerca dos 2 GHz, tanto via terrestre como via satélite. Mas devido à impossibilidade de uniformização de espectro electromagnético em todo o mundo, o UMTS não se encontra globalizado. Os espectros disponibilizados na Europa e China são praticamente coincidentes, no Japão não diferem muito, mas é nos Estados Unidos que se verifica a maior discrepância, como mostra a Figura 1.1. Isto deve-se ao facto de na América do Norte o espectro já se encontrar ocupado com a segunda geração, não havendo espectro disponível para o IMT-2000.

O UMTS disponibilizará novas aplicações, das quais se destacam vídeo-conferência, correio e jornal electrónico, FTP (*File Transfer Mode*), *áudio* e *video-on-demand*, *download* de ficheiros e aplicações baseadas em localização e informação geográfica.

A rede de acesso terrestre do UMTS é a UTRAN (*UMTS Terrestrial Radio Access Network*) utilizando como tecnologia um sistema em banda larga de acesso múltiplo com divisão de código de sequência directa o WCDMA (*Wideband-Code Division Multiple Access)*.

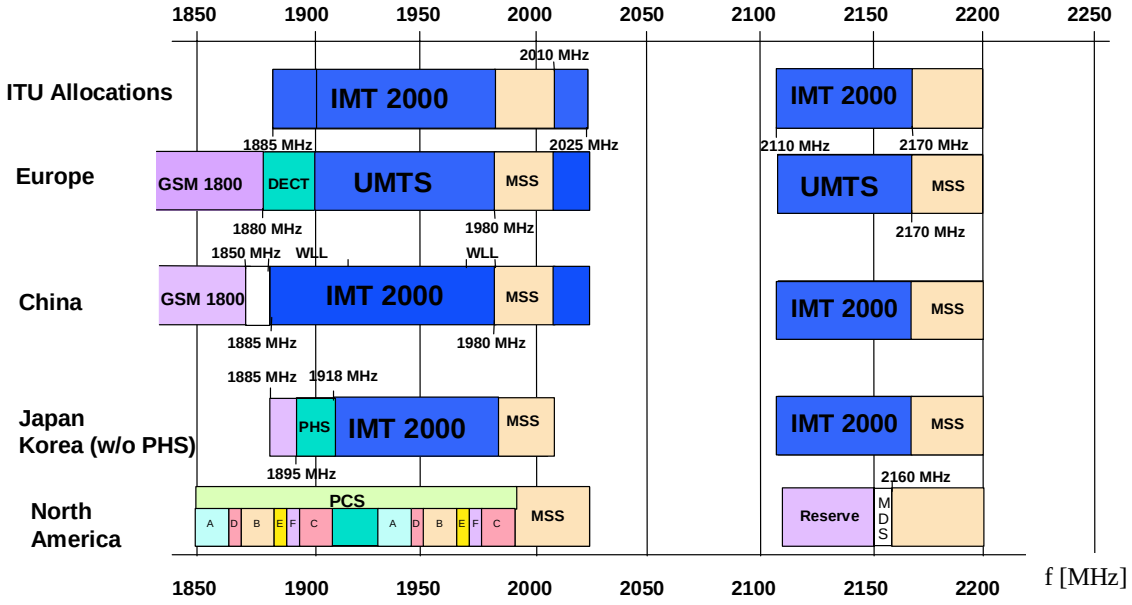


Figura 1.1 – Espectro disponível para o UMTS (extraído de [UMTS98a]).

Este trabalho tem como motivação o estudo do comportamento de uma rede UMTS. Pretende-se que este seja o mais realístico possível, dando resposta aos problemas de capacidade e cobertura, mas dado que ainda não é possível obter dados reais de tráfego, recorreu-se ao simulador *Map UMTS* [VaCa02] de forma a poder estimá-lo, através de um modelo que tem como parâmetros de entrada a caracterização da população e o tipo de ocupação do terreno. Este simulador servirá de base para o simulador que irá ser desenvolvido neste projecto. Apesar da geração de utilizadores ser aleatória, o estudo que se vai realizar será estático, não tendo em conta com a mobilidade dos utilizadores e a duração do serviço. O estudo incidirá essencialmente na necessidade de disponibilização de várias portadoras e/ou de *Node Bs* na rede pré-definida, de modo a optimizá-la. Com esta optimização pretende-se satisfazer o maior número de utilizadores da forma mais eficiente, minimizando assim os recursos de implementação da rede UMTS.

No capítulo 2 faz-se uma breve introdução de conceitos básicos relacionados com o UMTS necessários para uma melhor compreensão do problema em estudo. Apresenta-se a rede UTRAN e toda a sua arquitectura, realça-se a importância dos serviços para o UMTS, explica-se o modo de funcionamento do WCDMA, e finalmente explica-se o efeito da interferência na capacidade. No capítulo 3 aborda-se o conceito de estrutura celular, referindo-se os diferentes tipos de células que podem existir e o funcionamento de uma camada hierárquica. Também neste capítulo se analisará o balanço de potência, um dos aspectos mais importantes no dimensionamento de uma rede. Com o objectivo de perceber o desempenho da rede, definiram-se também parâmetros de eficiência como avaliadores desse mesmo desempenho. No capítulo 4 faz-se uma descrição detalhada do simulador desenvolvido, começando por analisar o já existente, *Map UMTS*, passando depois à ferramenta desenvolvida neste projecto, *Our Box*. Para melhor compreensão apresentam-se fluxogramas do algoritmo criado. No capítulo 5 fazem-se as análises dos resultados obtidos através dos parâmetros de eficiência referidos no capítulo 3. Comparam-se as duas estratégias

de separação de utilizadores pelas frequências e a influência dos diferentes serviços de referência. Por fim, conclui-se acerca do desempenho da rede criada.

De notar que este projecto visa o estudo da rede em Lisboa, com dados concretos das localizações dos *Node B*s, fornecidos pela Vodafone, assim como todos os dados geográficos referentes à cidade em questão. Mas como já foi referido, existe um dado que por ser estimado, não é concreto, e pode influenciar de certa forma esta análise: o tráfego. Contudo, trata-se de uma boa aproximação, tornando este simulador uma boa ferramenta de planeamento.

2 Uma Breve Perspectiva sobre o UMTS

Neste capítulo são introduzidos alguns aspectos teóricos relacionados com o UMTS relevantes para o estudo a realizar. O capítulo começa por fazer uma abordagem mais geral do UMTS, tais como a rede UTRAN, os principais serviços oferecidos pelo sistema, o WCDMA, e a relação entre interferência e capacidade. Posteriormente é feita uma análise mais pormenorizada dos aspectos técnicos de maior interesse para o desenvolvimento do sistema.

2.1 A Rede UTRAN

A arquitectura UTRAN [3GPP00a] é o elemento interligante entre a CN (*Core Network*) e o UE (*User Equipment*) no âmbito do UMTS. Consiste num conjunto de subsistemas de rede rádio ligados aos elementos atrás referidos através de interfaces: a Iu, interface de ligação entre a UTRAN e a CN, divide o sistema entre a parte rádio, específica da UTRAN, e a parte de comutação e encaminhamento da CN; e a Uu, interface entre a UTRAN e o UE, sendo a interface rádio WCDMA que permite que o UE contacte com a parte fixa do sistema. Estas interfaces utilizam protocolos destinados aos planos de controlo (por exemplo requerer um serviço ou *handover*) e de utilizador (transferir informação de voz ou dados).

A UTRAN é constituída por um ou vários RNS (*Radio Network Subsystem*), cada um dos quais contendo um RNC (*Radio Network Controller)* e um ou vários *Node B* (também pode ser referido por um termo mais comum, a Estação Base). Esta arquitectura é apresentada mais detalhadamente na Figura 2.1. Aos RNCs, cabe gerir os recursos rádio (controlar o uso e a integridade) do seu conjunto de células, por exemplo gerir os *handovers* que requerem sinalização ao UE, estando ligados à CN através da interface Iu e aos *Node B* através da interface Iub. Existe ainda uma interface destinada para a ligação entre dois RNCs, a Iur, que permite a distribuição do controlo das células por parte da rede (torna-se especialmente importante quando o número de células é grande) e a reatribuição do RNS que serve um utilizador, SRNS (*Serving RNS*). Esta reatribuição acontece aquando da saída por parte do utilizador da área gerida por um RNS e entrada numa área gerida por outro. Os *Node Bs* são unidades lógicas responsáveis pela ligação rádio com o UE, podem funcionar em modo FDD (*Frequency Division Duplex*) ou TDD (*Time Division Duplex*).

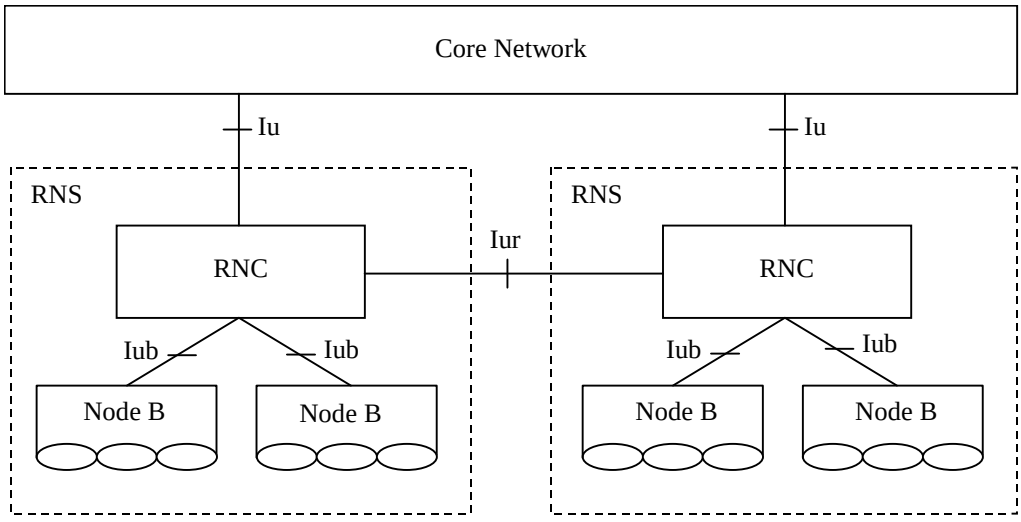


Figura 2.1 – Estrutura da rede UTRAN (extraído de [3GPP00]).

A UTRAN executa vários tipos de funções, mas todas referentes a controlo com excepção de algumas referentes a distribuição de informação para vários utilizadores, tais como: funções referentes ao controlo de acesso ao sistema, controlo de admissão, controlo de congestionamento, difusão de informação do sistema; cifra; funções relacionadas com a mobilidade, *handover*, transferência entre RNSs; funções relacionadas com o controlo e gestão dos recursos rádio, configuração dos recursos rádio e modo de operação, monitorização dos recursos rádio, controlo de junção/divisão, controlo de transporte de rádio (*radio bearer control*), estabelecimento e finalização de ligação rádio; funções de protocolos de rádio, controlo de potência RF (Rádio Frequência), codificação/descodificação do canal rádio, controlo de codificação de canal, detecção e manuseamento de acesso inicial; função de distribuição de mensagens NAS (*Non Access Stratum*) através da CN; funções relacionadas com serviços *Broadcast* e *Multicast*, distribuição de informação de *Broadcast/Multicast*, controlo de fluxo em *Broadcast* e *Multicast*, relatório de estado de CBS (*Cell Broadcast Service*).

2.2 Aplicações e Serviços em UMTS

O UMTS caracteriza-se por fornecer serviços ao utilizador para além da voz e simples transmissão de dados característicos do GSM, utilizando débitos binários altos [HoTo00]: 384 kbps para ligações por comutação de circuitos (CS) e 2 Mbps para ligações por comutação de pacotes (PS). A possibilidade de utilização de débitos binários elevados imprime uma maior flexibilidade ao sistema, apresentando assim novos tipos de aplicações e serviços com maior exigência de qualidade de serviço (QoS – *Quality of Service*), não sendo possíveis nos sistemas de gerações anteriores.

Em sistemas com comutação de circuitos (CS – *Circuit Switching*) é estabelecido um caminho dedicado entre os dois terminais em questão, durante a totalidade da comunicação. As redes telefónicas públicas actuais utilizam este tipo de comutação para a transmissão de tráfego de voz e de dados, sob a forma digital. Mas este sistema não é muito eficiente dado que, mesmo que não haja transmissão de informação (caso da voz, que só tem cerca de 50% de utilização de canal), os recursos da rede continuam dedicados impossibilitando a utilização por parte de outros utilizadores. Após o estabelecimento da comunicação, os dados são transmitidos a um débito fixo, sem atrasos (à excepção dos tempos de propagação entre terminais) num sistema transparente ao utilizador [Stal00].

Em sistemas com comutação de pacotes (PS – *Packet Switching*) fragmenta-se a mensagem que se pretende transmitir em pacotes com informação do utilizador à qual se junta informação de controlo. Em cada nó da rede que o pacote atravessa, este é recebido, guardado alguns instantes e enviado para o nó seguinte que esteja desimpedido, sendo este o mais próximo de modo a tornar o caminho mais curto possível (tempo de entrega menor). Este tipo de comutação tem maior eficiência que CS, pois as comunicações entre nós podem ser partilhadas simultaneamente por diferentes pacotes devido à existência de *buffers* internos com uma certa capacidade de armazenamento. Em caso de excesso de tráfego, este sistema apresenta atraso de entrega de pacotes, mas não apresenta bloqueio como nos sistemas CS.

Os serviços podem ser classificados em várias categorias: segundo o 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) [3GPP00], o UMTS Forum [UMTS98a], a Recomendação da ITU-T I.211 e a ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*). As duas primeiras são consideradas pela comunidade científica como as mais importantes, sendo esse o objecto de estudo neste trabalho.

O 3GPP propõe uma classificação dos serviços e aplicações consoante a sensibilidade de atraso que apresentam. Começando pela mais sensível temos as classes *conversational*, *streaming*, *interactive* e *background*. A Tabela 2.1 mostra algumas características de cada classe.

- A classe *conversational* tem como principal aplicação, o serviço de voz sobre CS, e ainda novas aplicações tais como voz sobre IP e vídeo telefonia. Na conversação em tempo real terá que se ter um atraso de utilizador para utilizador muito baixo (100 ms), tendo em conta a percepção humana de conversação áudio e vídeo. Trata-se de uma classe com tráfego simétrico.
- Na classe *streaming* recorre-se a uma técnica de *stream* multimédia que consiste em transferir dados segundo um fluxo estável e contínuo. Com esta técnica, o utilizador tem acesso a parte dos dados antes de ter sido completamente transferida, através de *buffering*. Estas aplicações tendem a ser muito assimétricas, comportando mais atraso que nos serviços *conversational* e tolerando mais incerteza no instante de amostragem na transmissão (*jitter*).
- A classe *interactive* caracteriza-se por haver um pedido de dados por parte do utilizador, seja este, máquina ou humano. Como exemplos de interacção humana com equipamento remoto tem-se a pesquisa na *Internet,* recuperação de base de dados e acesso a um servidor. Relativamente à interacção de uma máquina com equipamento remoto, tem-se como exemplos pedidos de informação de registo de medidas e de informações de base de dados automática. Um dos exemplos mais comuns trata-se de jogos interactivos em rede.
- Na classe *background*, quando há comunicação de dados, o destinatário não sabe o tempo que demorará até receber os dados pretendidos. O tempo de atraso poderá ser de apenas alguns segundos ou mesmo minutos. Como exemplos temos o serviço de mensagens curtas (SMS – *Short Message Service)*, *e-mails*, pesquisa de uma base de dados e postais electrónicos.

Tabela 2.1 – Características dos serviços segundo o 3GPP (extraído de [3GPP00a]).

Classe de Serviço	***Conversational***	***Streaming***	***Interactive***	***Background***
Tempo-real	✓	✓	×	×
Simétrico	✓	×	×	×
Comutação	CS	CS	PS	PS
Ritmo garantido	✓	✓	×	×
Atraso	Mínimo Fixo	Mínimo Variável	Moderado Variável	Grande Variável
Buffer	×	✓	✓	✓
Bursty	×	×	✓	✓
Exemplo	Voz	*video-clip*	www	*email*

Segundo o UMTS Forum [UMTS98b], o UMTS cobre uma larga área de aplicações que podem ser agrupadas em seis serviços principais:

- voz (S - *Speech*),
- mensagens simples (SM – *Simple Messaging*),
- comutação de dados (SD - *Switched Data*),
- multimédia de médio nível (MMM - *Medium MultiMedia*),
- multimédia de alto nível (HMM – *High MultiMedia*),

- multimédia interactivo (HIMM – *High Interactive MultiMedia*).

Os diferentes serviços têm diferentes pré-requisitos em termos de assimetria entre canais ascendente (UL – *uplink*) e descendente (DL - *downlink*) e débito binário, bem como no modo de comutação. O factor de assimetria representa a proporção de tráfego nos dois canais. Os serviços de voz, mensagens, comutação de dados e multimédia interactivo apresentam um factor de assimetria de 1/1. Os serviços de multimédia de médio e alto nível apresentam uma grande assimetria, podendo aqui ser favorável o uso de células especiais (em modo TDD) em detrimento das células normais em modo FDD, mas esta característica será aprofundada posteriormente. Na Tabela 2.2 apresentam-se algumas das características dos serviços já referidas, evidenciando se a sua compatibilidade com os tipos de células, p (pico-célula), μ (micro-célula) e M (macro-célula). Por exemplo, o serviço de multimédia de alto nível só será possível numa pico-célula. A definição dos vários tipos de células será feita posteriormente.

Tabela 2.2 – Características dos serviços segundo o UMTS Forum (extraído de [UMTS98a]).

Serviços	**Ritmo [kbps]**	**Factor de Assimetria (UL/DL)**	**Modo de Comutação**	**Tipo de Célula**	**Aplicações**
Mensagens Simples	14.4	1/1	PS	p, μ, M	*SMS*, *paging*, correio electrónico
Comutação de Dados	14.4	1/1	CS	p, μ, M	*Fax*, acesso à rede, *FTP*
Voz	16	1/1	CS	p, μ, M	Chamadas telefónicas, teleconferência, correio de voz
Multimédia Interactivo	128	1/1	CS	p, μ, M	Videotelefonia, videoconferência, telemedicina
Multimédia de Médio Nível	384	0.026/1	PS	p, μ	Compras *on-line*, movimentos bancários
Multimédia de Alto Nível	2 000	0.005/1	PS	p	*Download* de ficheiros de áudio e imagem, acesso rápido à *internet*

Os serviços e o tráfego estão intrinsecamente ligados, por isso a previsão da existência e as quantidades dos mesmos são fundamentais para o dimensionamento de uma rede celular. Sendo a capacidade das células finita, a não estimação do tráfego (e por isso os serviços) aquando, quer do dimensionamento quer da optimização da rede, resulta numa total perda de tempo. Vários factores têm influência no volume e tipos de serviços presentes numa dada área. Na distribuição geográfica da população nas zonas de maior densidade populacional (por exemplo, centro de cidade) espera-se um maior volume de tráfego que em zonas de densidade populacional baixa (zona rural). Na distribuição geográfica de empregos, estima-se que nas zonas comerciais exista um conjunto de serviços que serão mais utilizados que numa zona industrial, que por sua vez difere de uma zona habitacional. As idades, habilitações literárias, nível socioeconómico da população, têm influência no perfil do utilizador reflectindo-se nos serviços e volume requeridos. Segundo estes pressupostos estabelecem-se correspondências entre as várias características e a penetração dos vários serviços, estimando-se o volume de tráfego de cada serviço requerido por uma determinada área.

2.3 WCDMA

Como já foi referido anteriormente, a interface rádio do UMTS é o WCDMA. Trata-se de um sistema em banda larga de acesso múltiplo com divisão de código de sequência directa (DS-CDMA, *Direct-Sequence* CDMA). Neste sistema, os *bits* de informação do utilizador são multiplicados pelos *bits* (*chips*) derivados dos *Channelisation Codes* do CDMA, com tramas de 10 ms de duração, sendo que cada *chip* tem a duração de 240.4 ns. Este processo de espalhamento e de compressão por si só não fornece qualquer tipo de melhoria de sinal para aplicações sem fios. Com efeito, o aumento da largura de banda de transmissão é a desvantagem do aumento do ganho de processamento.

A bidirecionalidade da comunicação é suportada por dois modos de operação distintos:

- Divisão na Frequência, FDD
- Divisão no Tempo, TDD.

A Figura 2.2 mostra as bandas reservadas aos dois modos na totalidade do espectro total atribuído ao UMTS na Europa. O modo FDD caracteriza-se por permitir transmissão simultânea nos dois sentidos, necessitar de filtros com grande rejeição na banda adjacente e necessitar de utilizar filtros bidireccionais. Em UL este modo ocupa a banda de 1 920 MHz a 1 980 MHz enquanto que em DL ocupa a banda de 2 110 MHz a 2 170 MHz. Neste modo o ritmo binário utilizado é de 3.84 Mcps, conduzindo a uma largura de banda de aproximadamente 5 MHz. A banda de frequências é dividida de 5 em 5 MHz para a ligação do terminal ao *Node B* e para a ligação do *Node B* ao terminal respectivamente. O modo TDD caracteriza-se por efectuar transmissão sequencial nos dois sentidos, necessitar sincronismo e dispensar os filtros bidireccionais. Uma descrição mais pormenorizada do funcionamento da UTRA em TDD é apresentada no Anexo A.

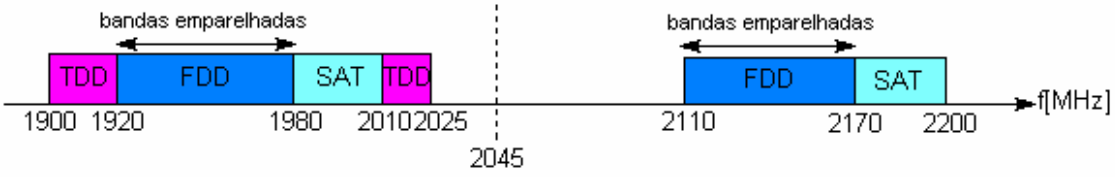


Figura 2.2 – Atribuição de frequências para os modos FDD e TDD na Europa (extraído de [VaCa02]).

O WCDMA em modo FDD suporta a operação assíncrona dos *Node Bs*, comporta vários serviços com diferentes requisitos de qualidade de serviço juntos numa ligação única e implementa uma detecção coerente baseada no uso de símbolos piloto ou piloto comum. A propagação multi-percurso causa muitas reflexões, difracções e atenuações na energia do sinal devido a obstáculos naturais, edifícios, montes, entre outros, e podem resultar da mesma dois efeitos: a energia do sinal pode chegar ao receptor através de distintos instantes de tempo, ou pode ocorrer um desvanecimento rápido, causado por um cancelamento de sinal no receptor. O rápido controlo de potência é um dos aspectos mais importantes no WCDMA. Um terminal móvel emitindo potência em excesso é capaz de bloquear toda a célula. Uma solução para o problema é o controlo de potência rápido de ciclo fechado, entre UE e o *Node B*, a um ritmo de 1.5 kHz, mantendo assim o mesmo nível de potência ao longo do tempo. Apesar do controlo de potência ser executado a um ritmo muito maior que em GSM, se o UE se deslocar a velocidades grandes este é ineficaz. Existe ainda o controlo de potência exterior controlado pelo RNC. Esta solução depende da existência de *soft handover*. O *handover* permite que as

chamadas ocorram sem interrupção quando o móvel se desloca de uma célula para outra, podendo ser classificado em *hard*, *soft* e *softer*. O *hard handover* existe quando uma ligação passa de um *Node B* para outro sem se manter simultaneamente nos dois. Será este tipo de *handover* que fará a ligação entes as duas gerações da rede (GSM e UMTS). Durante o *soft handover*, o UE está na zona de cobertura de dois *Node Bs* diferentes; em caso de comunicação entre UE e *Node B*, existirá concorrência entre dois canais da interface ar em cada *Node B* separadamente. No *softer handover*, o UE está na zona de cobertura de dois sectores adjacentes do mesmo *Node B*. Existirá concorrência entre dois canais da interface ar nas comunicações entre o *Node B* e o UE. Torna-se então necessário a utilização de dois códigos separados em DL, de modo a que o UE distinga os sinais.

A geração dos códigos pode facilmente ser operada através de um algoritmo em árvore. Os dados do utilizador são multiplicados por um *Channelisation Code* originando assim informação a um ritmo binário superior ao ritmo binário da informação do utilizador e constante, designado por ritmo de *chip*. Os dados multiplicados com o *Channelisation Code* são agora multiplicados por *Scrambling Code*, como se mostra na Figura 2.3.

Os *Channelisation Codes* são da família OVSF (*Orthogonal Variable Spreading Factor*) e causam espalhamento uma vez que aumentam o ritmo binário e consequentemente a largura de banda. No modo FDD o factor de espalhamento varia entre 4 a 512 enquanto que para o modo TDD varia de 1 a 16; estas diferenças apontam para a possibilidade de utilização de ligações a ritmos superiores no modo TDD, onde é teoricamente possível realizar ligações unidireccionais a 2 Mbps, ao passo que em FDD tal não é possível uma vez que o factor de espalhamento mínimo é 4, conduzindo a um ritmo binário bruto de 960 kbps.

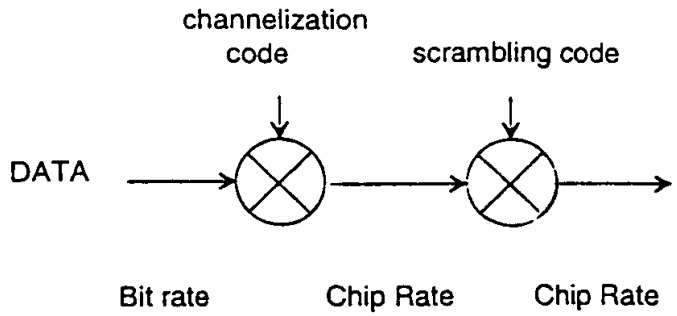


Figura 2.3 – Relação entre *Channelisation* e *Scrambling* (extraído de [HoTo00]).

Em FDD os códigos têm diferentes funções, e podem ter diferente duração, consoante a direcção da ligação, UL ou DL. Em UL, servem para a separação de canais tendo uma duração de 4 a 256 *chip*, enquanto que em DL tem como função a separação de terminais, com duração de 4 a 512 *chip*.

Os *Scrambling Codes* pertencem à família Gold ou S(2), com duração de 38 400 *chips*, e não causam espalhamento. Em UL têm como função a separação de terminais e são em número 512. Em DL fazem a separação de sectores e são em número superior a 1 000 000. As diferenças entre os dois tipos de códigos estão resumidas na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Funcionalidade dos *Channelisation Codes e Scrambling Codes* (extraído de [HoTo00]).

	Channelisation Code	***Scrambling Code***
Utilização	UL: Separação física dos canais de dados e de controlo do mesmo terminal DL: Separação das ligações descendentes de diferentes utilizadores dentro da mesma célula	UL: separação do terminal DL: Separação de sectores (células)
Comprimento	4 - 256 *chips* (1.0 – 66.7 μs) DL também pode ter 512 *chips*	UL: (1) 10 ms = 38 400 *chips* ou (2) 66.7 μs = 256 *chips* A opção (2) pode ser utilizada com receptores avançados nas estações base DL: 10 ms = 38 400 *chips*
Número de códigos	Número de códigos sobre um *scrambling code* = factor de espalhamento	UL: Vários milhões DL: 512
Família	OVSF	Código longo 10 ms: código *Gold* Código curto: código *Extended S(2)*
Espalhamento	Aumenta a largura de banda	Não afecta a largura de banda

O facto de utilizadores diferentes usarem códigos diferentes, concede um ganho de processamento, G_p, definido em (2.1), uma vez que a correlação de dois códigos diferentes é nula. Por exemplo, um serviço de voz com um ritmo binário 12.2 kbps tem um ganho de 25 dB. Sendo finito o número de códigos disponíveis, é necessário averiguar se é o factor limitativo do número máximo de utilizadores na célula. A Tabela 2.4 apresenta a relação entre o factor de espalhamento e o ritmo binário do canal (serviços). Verifica-se que existe menor número de códigos disponíveis quanto maior for o ritmo binário da ligação, impossibilitando a existência de maior número de ligações de ritmos elevados simultâneas comparado com ligações de ritmos binários mais baixos, facto que pode ter influência na capacidade do sistema. Para além do número de códigos disponíveis existe ainda um problema extra, derivado da utilização de códigos correspondentes a determinado factor de espalhamento por parte de ligações que podem utilizar códigos com factor de espalhamento maior. Assim um serviço pode ser bloqueado se existirem outros que ocupem os códigos que este pode utilizar, independentemente de outras características da rede.

$$G_{p[dB]} = 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{R_c}{R_b}\right) \tag{2.1}$$

Onde

- R_c é o ritmo de *chip*,
- R_b é o ritmo binário da ligação.

Tabela 2.4 – Factores de espalhamento e débitos binários (FDD) (adaptado de [HoTo00]).

Factor de espalhamento	**UL**	**DL**
	Débito binário do canal de dados [kbps]	**Débito binário do canal de dados [kbps]**
512	NA	3-6
256	15	12-24
128	30	42-51
64	60	90
32	120	210
16	240	432
8	480	912
4	960	1 872

2.4 Interferência e capacidade

Na recepção os sinais sofrem perturbação devido à presença de ruído. O ruído tem várias origens, sendo a mais importante, no contexto do UMTS, a provocada pelos outros utilizadores da rede. Uma vez que usam a mesma frequência, todos os utilizadores causam interferência entre si. Assim, a capacidade [HoTo00] de uma determinada célula é afectada pelo número de utilizadores e o tipo de serviço de cada um. É importante ter uma visão geral dos factores limitativos da capacidade, assim como das diferenças provocadas pela direcção de propagação. A quantidade de tráfego existente numa célula origina interferência no canal devido à reutilização da frequência, e quanto maior for o tráfego, maior será o aumento de ruído acima do ruído térmico. Existe uma margem de interferência, limitando o aumento máximo do ruído, pelo que a capacidade máxima da célula está relacionada com o factor de carga. O factor de carga pode ser diferente nas direcções, ascendente e descendente. Tem-se assim para UL:

$$\eta_{UL} = (1+i)\cdot\sum_{j=1}^{N}\frac{1}{1+\dfrac{R_c}{(E_b/N_0)_j\cdot R_{bj}\cdot\upsilon_j}} \tag{2.2}$$

onde

- N é o número de utilizadores na célula.
- L_j é o factor de carga de cada ligação
- i é o interferência intercélulas, normalizada à célula em questão
- υ é a factor de actividade do serviço
- E_b / N_0 é a energia de bit por densidade espectral de ruído

O factor de carga na direcção descendente, $\eta_{DL,}$ pode ser definido do mesmo modo que o factor de carga em direcção ascendente, apesar de alguns dos parâmetros serem diferentes.

$$\eta_{DL} = \sum_{j=1}^{N}\upsilon_j\cdot\frac{(E_b/N_0)_j}{\dfrac{R_c}{R_{bj}}}\cdot\left[(1-\alpha_j)+i_j\right] \tag{2.3}$$

Existe um novo parâmetro correspondendo ao facto de se utilizarem códigos ortogonais em DL, o factor de ortogonalidade (α_j), contabilizando a influência da propagação multi-percurso na ortogonalidade dos códigos. Em DL a interferência causada pelas outras células depende da posição de cada utilizador, assim i passa a ser expresso em função do utilizador (i_j). Verifica-se para as duas direcções que a carga depende do serviço através da relação E_b / N_0 e através da relação entre os ritmos, o da ligação e o de codificação. De modo a ser contabilizada a interferência causada pela carga na célula define-se uma margem de interferência, para UL e para DL:

$$M_{I_UL,DL[dB]} = -10 \cdot \log_{10}\left(1 - \eta_{UL,DL}\right) \tag{2.4}$$

Quanto maior for a carga, maior é o ruído de banda larga, por isso maior será a interferência na célula, diminuindo a área de cobertura. Assim a possibilidade de um utilizador efectuar um determinado serviço depende não só da distância a que este se encontra do *Node B*, mas também da capacidade da célula. A evolução do factor de carga com o número de utilizadores é apresentado na Figura 2.4, requerendo o mesmo serviço para as duas direcções de propagação, variando em UL o quociente de interferência inter-células e em DL o factor de ortogonalidade. Pode-se afirmar que o factor de ortogonalidade causa maior variação no factor de carga que o quociente de interferência inter-células. Verifica-se que para valores de α acima de 50% e para valores de i abaixo de 50% (pressuposto bastante razoável em ambientes reais) o número máximo de utilizadores para um dado factor de carga é limitado pela ligação ascendente. Como já foi supradito, α depende da diversidade multi-percurso, verifica-se então que a célula admite menos utilizadores quanto menor for α. Por exemplo a célula admite menos utilizadores veículares do que pedestres caracterizados por $\alpha = 0.6$ e $\alpha = 0.8$ respectivamente. O número máximo de utilizadores suportados pela célula depende fortemente do serviço, uma vez que o factor de carga aumenta rapidamente se os ritmos binários dos utilizadores forem elevados. Pode-se ser levado a crer que este resultado indica que a capacidade é limitada pela ligação UL, contudo este resultado não é válido para determinar a direcção limitativa da capacidade sendo necessário averiguar o andamento da cobertura (atenuação máxima de percurso), em função da carga em UL e DL. Esta dependência, apresentada em [HoTo00], mostra que a capacidade é limitada pela carga na direcção descendente. A razão é que em DL a potência máxima de transmissão é a mesma independentemente do número de utilizadores e é repartida pelos mesmos, enquanto que em UL cada utilizador tem a sua própria fonte. Este facto indica que mesmo para uma carga baixa em DL, a cobertura diminui com o aumento do número de utilizadores. Assim pode-se afirmar que a cobertura é limitada pelo sentido UL enquanto que a capacidade é limitada pelo sentido DL.

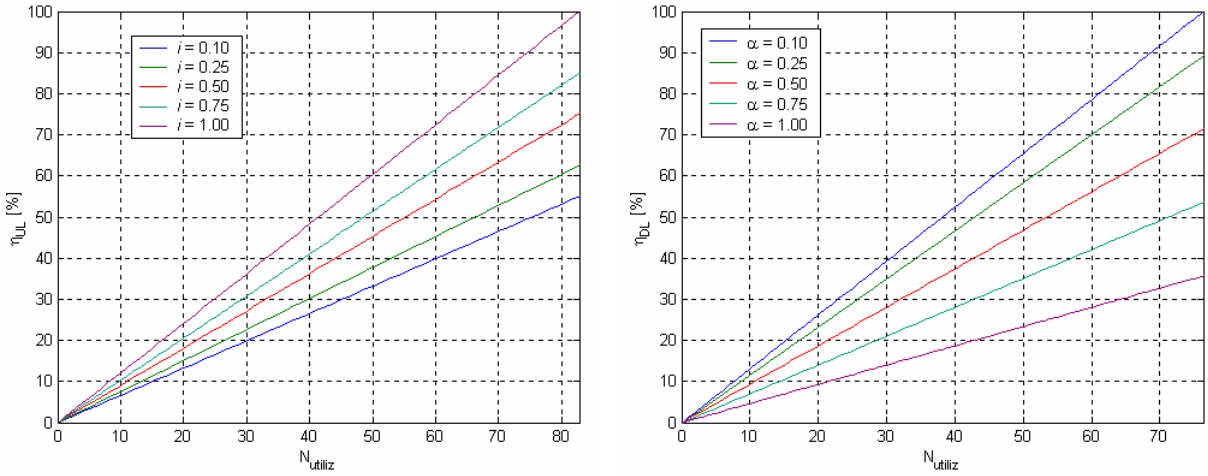
O potência de emissão total do *Node B* pode ser expressa por

$$P_{Tx}^{Node\,B} = \frac{N_{rf} \cdot R_c}{1 - \overline{\eta_{DL}}} \sum_{j=1}^{N} \upsilon_j \frac{\left(E_b / N_0\right)_j}{\frac{R_c}{R_{b\,j}}} \cdot \overline{L}_j \tag{2.5}$$

onde

- $\overline{L}_j$ é a atenuação média entre o *Node B* e o UE,

- $\overline{\eta_{DL}}$ é o factor de carga médio na direcção descendente e N_{rf} é a densidade espectral de ruído aos terminais do receptor dos UE.



a) UL b) DL

Figura 2.4 – Variação do factor de carga em função do número de utilizadores (extraído de [VaCa02]).

Sabendo o número de canais por célula pode-se calcular a densidade de tráfego máxima suportada, dada uma probabilidade de bloqueio. A densidade de tráfego é medida em *Erlang* e é definida por

$$\text{Densidade de tráfego}[\text{Erlang}] = \frac{\text{taxa de início de chamadas}[\text{chamadas/s}]}{\text{taxa de finalização de chamadas}[\text{chamadas/s}]} \tag{2.6}$$

Se o *hardware* limitar a capacidade, esta pode ser calculada a partir do modelo de *Erlang B*. Pelo contrário, se for a interferência o factor limitativo da capacidade, é por definição *soft capacity*, não existindo por isso um valor fixo para o seu máximo. A *soft capacity* é definida como sendo o aumento de capacidade de *Erlang*, com *soft blocking* (devido à interferência) comparada com a capacidade com *hard blocking* (devido ao *hardware*), para o mesmo número máximo de canais por célula. Esta capacidade não pode ser calculada a partir do modelo de *Erlang B*, uma vez que o número de canais é na realidade maior que o número médio de canais por célula, porque as células adjacentes partilham parte da mesma interferência e assim mais tráfego pode ser oferecido com a mesma probabilidade de bloqueio. A possibilidade de tirar vantagem destes resultados depende dos algoritmos de gestão de rede, isto é, a capacidade da rede atribuir maior capacidade a uma célula se as vizinhas apresentarem um factor de carga baixo. O aumento da capacidade tendo em conta este resultado é dado por:

$$Soft\ capacity = \frac{Capacidade\ com\ soft\ blocking}{Capacidade\ com\ hard\ blocking} - 1 \tag{2.7}$$

Se as células vizinhas não introduzirem muita interferência no meio (o ar), isto é, não apresentarem cargas elevadas, a célula em questão tem mais capacidade uma vez que o aumento do ruído não diminui a QoS. Existe também maior *soft capacity* se o número de utilizadores nas células vizinhas for menor que o número de utilizadores da célula em

questão. Uma forma de estimar a capacidade com *soft blocking* em UL é através dos seguintes passos:

- Calcular o número de canais, N_c, para células com o mesmo factor de carga segundo a equação do factor de carga em UL.
- Multiplicar o número de canais por 1 + *i*, obtendo-se o número total de canais no caso de *soft blocking*.
- Calcular o tráfego máximo oferecido através do modelo de *Erlang B*
- Dividir a capacidade por 1+ *i*

Apresentam-se alguns exemplos de cálculo da capacidade com *soft blocking*, na Tabela 2.5, assumindo os seguintes ritmos; para voz 12.2 kbps com um factor de actividade de 67%, para dados em tempo real de 16 a 144 kbps com um factor de actividade de 100%; energia de bit sobre densidade de ruído para voz igual a 4 dB para dados de 16 e 32 kbps, 3 dB, para dados a 64 kbps, 2 dB, e para dados a 144 kbps 1.5 dB; um factor interferência intercelular de 55% margem de interferência 3 dB e probabilidade de bloqueio 2%.

A capacidade com *soft blocking* depende do ambiente de propagação assim como do planeamento da rede uma vez que afectam a interferência intercelular. Existe da mesma forma capacidade com *soft blocking* para a direcção DL.

Tabela 2.5 – Exemplos de resultados de capacidade com *soft blocking* (extraído de [HoTa00]).

Ritmo binário (kbps)	Canais por célula	Capacidade com *hard blocking* [Erlang]	Capacidade com *soft blocking* [Erlang]	*Soft capacity* [%]
12.2	60.5	50.8	53.5	5
16	39.0	30.1	32.3	7
32	19.7	12.9	14.4	12
64	12.5	7.0	8.2	17
144	6.4	2.5	3.2	28

3 Estrutura Celular

No presente capitulo serão abordados alguns aspectos do planeamento celular, com especial ênfase na estrutura celular. Começa-se pela definição de células e os seus vários tipo. Dá-se alguns exemplos de métodos para aumentar a capacidade das células. Apresenta-se o conceito de rede hierárquica, além de se fazer referência a algumas considerações sobre balanços de potência. Por fim definem-se alguns parâmetros de eficiência.

3.1 Tipos de células

O objectivo do dimensionamento de uma rede de telecomunicações é cobrir o máximo de utilizadores de modo efectivo e eficiente. Centrando-se este trabalho em redes UMTS, são apresentadas diversas possibilidades de estruturação de uma rede deste tipo, focando as estruturas de camadas hierárquicas, mais flexíveis a um futuro crescimento do número de utilizadores, esgotando a capacidade da rede pré-estabelecida.

Os sistemas de telefonia móvel são caracterizados por dividirem a área total a ser coberta pela rede em áreas mais pequenas designadas por células, adjacentes umas às outras, cuja forma tipicamente é hexagonal, uma vez que é a que mais se aproxima da forma circular e ao mesmo tempo não deixando lacunas. A cobertura de cada célula está a cargo de um *Node B*. O raio da célula depende da intensidade de tráfego podendo atingir alguns quilómetros, conforme Figura 3.1. Às células com raios compreendidos entre 50 e 300 m, chamam-se pico-células; entre 300 m e 800 m, micro-células e com dimensões superiores, macro-células. Tendo em conta a Tabela 3.1, apresentam-se em seguida as propriedades relativas a cada tipo de célula:

- As macro-células são as que permitem maior cobertura de terreno não suportando ligações de débito binário elevado, comportando elevada mobilidade, permitindo evitar taxas de *handover* excessivamente elevadas.
- As micro-células são utilizadas para cobertura exterior, sendo mais requeridas em ambientes urbanos, possibilitando ligações com maior débito binário que as macro-células e permitindo mobilidade considerável.
- As pico-células possibilitam ligações com débitos elevados, sendo mais utilizadas em ambientes interiores tais como em superfícies comerciais de grandes dimensões, em grandes empresas ou em locais com bastante afluência de utilizadores em qualquer evento ou atracção. A mobilidade permitida ao utilizador é muito baixa.

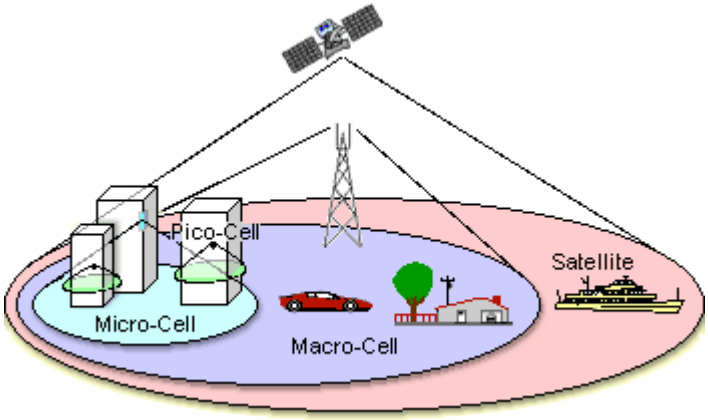


Figura 3.1 – Comparação entre tipos de células (extraído de [Serr02]).

Segundo as estimativas de [UMTS98b] para o ano 2005, o raio médio das células localizadas em áreas de elevada densidade populacional (CBD, *Central Business District*) e com grande penetração de serviços de elevado débito é de 75 m, correspondendo a pico-células. Por seu turno em ambientes urbanos com densidades populacionais menores que nos CBD o raio médio será 700 m, variando num intervalo de 400 m a 1000 m, correspondendo a micro-células, como se verifica na Tabela 3.1. Quanto ao transporte de tráfego, deve ser dividido pelos vários tipos de células segundo as características do próprio tráfego e dos tipos de células.

Tabela 3.1 - Propriedades dos diferentes tipos de células (extraído de [UMTS98b]).

Tipo de Célula	**Mobilidade**	**Débito Binário Nominal Máximo [kbps]**	**Raio de cobertura da Célula [m]**	**Área da Célula [km^2]**
Macro	Alta	384	1 000	0.288
Micro	Alta/Baixa	384 – 2 000	400	0.138
Pico	Baixa	2 000	75	0.005

Assim o tráfego de débito binário elevado deve ser transportado pelas pico-células, onde a mobilidade é baixa. Este facto pode não ser considerado uma desvantagem, pois a pico-célula poderá estar instalada dentro de um edifício; salienta-se ainda que dentro de edifícios a diversidade multi-percurso é muito menor que em ambientes exteriores reflectindo-se na diminuição do factor de carga em DL através de α_j, possibilitando maior capacidade à célula. As micro-células deverão transportar o tráfego de débito ainda elevado mas não tanto como nas pico-células, permitindo maior mobilidade ao utilizador. Este tipo de células deve assim cobrir zonas que requerem muita capacidade, não disponibilizando o serviço a 2 Mbps como acontece nas pico-células. E por fim o tráfego de baixo débito que requer grande mobilidade é transportado pelas macro-células.

Um dos maiores problemas com que se depara no dimensionamento de uma rede UMTS é a capacidade das células, não sendo suficiente na maioria dos casos. Segundo esta perspectiva há que aumentar a capacidade da célula em DL, e para isso pode-se recorrer às seguintes técnicas:

- Divisão das células
- Sectorização

A divisão de células consiste na divisão de uma ou mais células existentes em células de menor dimensão, sendo adicionada um novo *Node B* a cada uma das células resultantes e com uma potência de emissão inferior ao dos *Node Bs* das células maiores, de modo a reduzir a interferência co-canal. A sectorização consiste na utilização de várias antenas direccionais no *Node B*, cada uma emitindo para uma área da célula, proporcionando assim maior capacidade na mesma área. Pode-se ainda utilizar antenas inteligentes, usar diversidade ou técnicas de detecção multi-utilizador. Ainda no âmbito da técnica de divisão das células pode ser ainda mais vantajoso não alterar a célula em questão mas introduzir dentro dela outra ou outras mais pequenas constituindo assim uma estrutura celular de camadas hierárquicas.

3.2 Estruturas celulares de camadas hierárquicas

A ideia básica da estruturação por camadas é estabelecer cobertura sobre toda a região onde a rede será implementada e posteriormente colmatar, através da introdução de novas camadas,

as carências de capacidade de certas regiões, como se evidencia na Figura 3.2. Quando uma determinada célula não dispuser de capacidade suficiente para servir os utilizadores, recorre-se a um tipo de célula hierarquicamente superior e assim, as pico-células podem prestar assistência na cobertura às micro- e macro-células; e as micro-células podem prestar assistência às macro-células. Antes de mais é necessário justificar a abordagem ao problema do dimensionamento de redes UMTS através de camadas hierárquicas. Nas redes UMTS é inviável o uso de apenas uma camada de células por uma razão fundamental, a pré-existência de redes GSM que permitem muita mobilidade aos utilizadores. Essa mobilidade não está disponível numa rede UMTS com apenas uma camada celular oferecendo ao mesmo tempo todos os serviços. Devido à área das células, que seria muito reduzida, as taxas de *handover* seriam de tal modo elevadas, que a situação se tornaria insustentável. Para se proceder à implementação de uma rede com camadas hierárquicas é necessário que o operador disponha de recursos rádio, através da reserva de bandas de frequências, uma vez que as diferentes camadas devem operar em frequências diferentes. Estudos indicam que o espectro mínimo reservado para cada operador de modo a todos os serviços estejam disponíveis deve ser 2×15 MHz (emparelhados) e 5 MHz (desemparelhados) [UMTS98b], correspondendo a três portadoras FDD e uma portadora TDD. De notar porém que em casos especiais, onde as estimativas de tráfego apontem para uma penetração baixa de serviços de débito binário elevado, a rede inicial não necessitará de dispor de tal quantia de espectro. Existem ainda os casos em que esta quantia não satisfaz as necessidades de capacidade, sendo necessária a reserva de mais espectro.

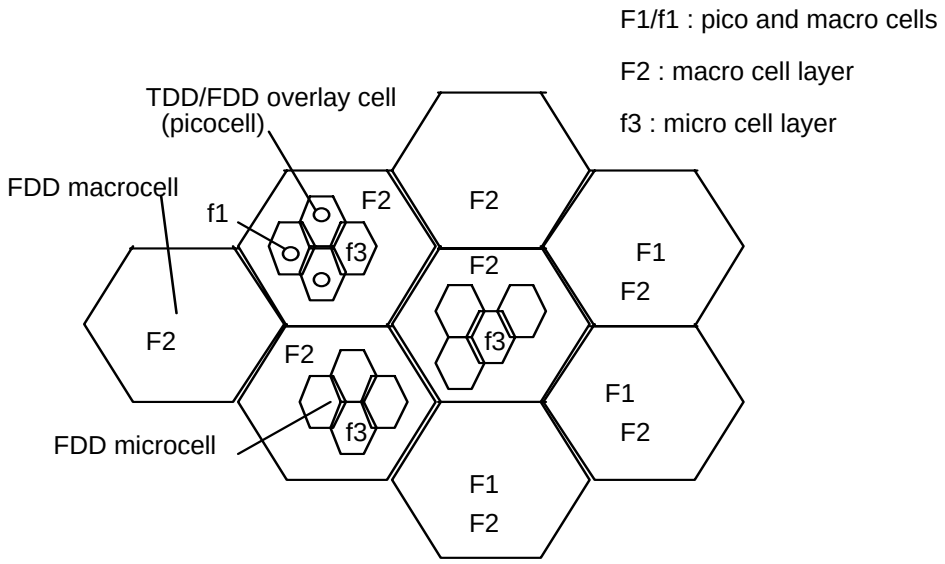


Figura 3.2 – Estrutura celular de camadas hierárquicas (extraído de [UMTS98b]).

A possibilidade do uso do espectro reservado para arquitectar camadas hierárquicas proporciona uma grande flexibilidade tanto na implementação como nas escolhas, resultando assim em variados tipos de estruturas dispondo da mesma quantidade de portadoras. Existe uma correspondência relacionando o espectro reservado e o tipo de estrutura resultante. Esta reciprocidade é evidenciada na Tabela 3.2, assim como a capacidade da rede. Está presente na mesma tabela a quantidade de espectro não reservado resultante da subtracção do espectro atribuído aos operadores à banda total (155 MHz).

Dado o grande número de estruturas de camadas hierárquicas disponíveis é necessário então proceder à escolha da mais adequada à área em estudo.

Tabela 3.2 – Relação entre espectro reservado e estrutura de camadas hierárquicas (extraído de [UMTS98b]).

Frequências emparelhadas reservadas a cada operador (FDD)	**Frequências não emparelhadas reservadas a cada operador (TDD)**	**Número máximo de operadores**	**Estruturas de células em camadas hierárquicas ***	**Tráfego total por operador [Mbps/km^2]**	**Espectro não reservado [MHz]**
2×5 MHz	-	12	M	5.85	35
	5 MHz	7	M, p_{TDD}	10.1	50
2×10 MHz	-	6	M, m ; M, p	11.6	35
	5 MHz	6	M, m, p_{TDD}	11.6	5
2×15 MHz	-	4	M, m, p	17.6	35
	5 MHz	4	M, 2m, p_{TDD}	17.6	15
2×20 MHz	-	3	M, 2m, p	23.2	35
	5 MHz	3	M, 2m, p, p_{TDD}	23.2	20

*) M: Macro célula FDD; m: micro célula FDD; p: pico célula FDD; p_{TDD}: pico célula TDD

Assim primeiramente é necessário estabelecer a cobertura de serviços de baixo débito na totalidade da área em estudo através de macro células. Posteriormente verifica-se se a capacidade das células é adequada à área. Se existir falta de capacidade, tentar-se-á averiguar as vantagens da atribuição de outra frequência à mesma célula comparadas com a introdução de uma nova célula. Ao optar-se por uma nova célula, recorrer-se-á a uma célula hierarquicamente superior (micro-célula) de modo a permitir maiores débitos e assim descongestionar a célula base. A introdução de uma nova célula pode causar problemas de interferência de canal adjacente, dependendo da sua localização. Este tipo de interferência é originada pelos UE, devido às diferenças entre as potências recebidas nos *Node Bs*, podendo ser evitada utilizando co-localização dos *Node Bs,* ou então impossibilitar a proximidade dos UE ao *Node B*. Se a co-localização não for possível é necessário ter em conta a atenuação requerida entre portadoras conforme a Tabela 3.3. Se por ventura ainda se verificar falta de capacidade, o processo repetir-se-á até que a capacidade oferecida pela área seja satisfeita pela rede.

Tabela 3.3 – Requisitos de atenuação entre portadoras (extraído de [HoTo00]).

Separação de portadoras	**Atenuação requerida [dB]**
Portadora adjacente (separação de 5 MHz)	33
Segunda portadora adjacente (separação de 10 MHz)	43

Em UMTS o número de canais físicos não é facilmente calculado, ao contrário do GSM, uma vez que depende de vários factores [Serr02]: serviço (ritmo, assimetria no tráfego, tempo médio de duração de chamadas), potência, multipercurso, interferência, número de utilizadores na área e as suas condições de propagação, ambiente (urbano, suburbano ou rural), *soft handover*, etc. A capacidade pode ser estimada em função não do número de canais físicos mas sim em função da área da célula, pois se esta for muito pequena, facilmente

se verifica que a célula não tem capacidade suficiente para a área. Se a área diminuir abaixo do valor marginal, torna-se necessário proceder ao reajustamento da rede. É necessário então, proceder à estimativa das áreas das células para determinados cenários através de balanços de potência.

3.3 Balanço de potência em WCDMA

O dimensionamento de uma rede de telecomunicações impõe um conhecimento prévio dos balanços de potência associados à transmissão. O objectivo do cálculo do balanço de potência é aferir, para determinados cenários, o impacto no sistema de determinadas condições de forma a obter-se a atenuação de propagação máxima e por fim a distância máxima a que um utilizador se poderá colocar e ainda comunicar com o *Node B*. No contexto do UMTS o balanço de potência deve ser calculado tendo em conta: a morfologia do terreno, a qual se reflecte no modelo de propagação e seus parâmetros; o tipo de serviço, ao qual está associado um ritmo de transmissão e uma dada QoS; o tipo de canal, imposto pela mobilidade dos utilizadores; e por fim as características particulares do sistema como por exemplo a possibilidade de *soft handover*, o ganho de processamento, etc.

Após a definição dos cenários de propagação, ambientes generalistas particularizando determinadas situações, pode-se estimar o raio máximo das células para as condições estabelecidas. Neste ponto aconselha-se a consulta do Anexo B, onde se expõe o procedimento para o cálculo dos referidos balanços. Uma possível definição para o tipo de área em estudo pode ser feita através da densidade de potenciais utilizadores por metro quadrado, juntamente com uma estimativa da altura média dos edifícios, características estas que estão intimamente ligadas. Assim podem-se definir os seguintes ambientes: urbano denso, caracterizado por edifícios altos, juntamente com elevada densidade populacional; urbano, edifícios médios com elevada densidade populacional; suburbano, edifícios médios com média densidade populacional; e por fim rural, com edifícios baixos com baixa densidade populacional. Após a caracterização do ambiente, passa-se à caracterização da mobilidade dos utilizadores: os que estão dentro de edifícios, interiores; os que estão parados ou se deslocam a velocidades baixas, os pedestres; e os que se deslocam a velocidades mais altas, os veículares. A mobilidade do utilizador reflecte-se na margem de desvanecimento rápido. É também necessário caracterizar o serviço utilizado quer em termos da relação E_b / N_0 quer em termos de ritmo de transmissão, uma vez que estes parâmetros são de extrema importância e reflectem o desempenho do sistema em termos de sensibilidade a ruído e interferência.

3.4 Parâmetros de eficiência

Aquando do planeamento, há que a ter em conta vários factores de modo a obter-se soluções viáveis, sendo estes, em alguns casos, bastante conhecidos do planeamento de outros sistemas, por exemplo o GSM. Há então que ter em conta:

- P_{ss} - Percentagem de utilizadores sem serviço
- $\eta_{UL/DL}$ - Factores de carga em UL e DL
- η_{SH} - Percentagem de carga em *soft handover*
- η_{STH} - Percentagem de carga em *softer handover*
- R - Raio da célula
- Serviço de referência
- RER - Ritmo Efectivo Relativo

Quanto à percentagem de utilizadores sem serviço é definida através de:

$$P_{ss} = \frac{\left(N_{cob} - N_{serv}\right)}{N_{cob}} \times 100 \tag{3.1}$$

onde

- N_{cob} é o número de utilizadores dentro da área de cobertura máxima;
- N_{serv} corresponde ao número de utilizadores servidos pela rede.

Este parâmetro reflecte o desempenho da rede em termos de cobertura da rede perante um cenário de utilizadores. Os factores de carga em ambas as ligações não devem ultrapassar os 50% como já foi referido de modo a que a interferência não aumente em demasia. A rede deve apresentar valores próximos do limite de modo a que a eficiência seja máxima. Pode-se considerar um factor de carga em DL superior a 50%, uma vez a ligação DL é mais resistente ao ruído devido à ortogonalidade dos códigos, mas nesse factor de carga está contida a carga gerada em sinalização resultando no limite já referido de 50% para o tráfego. As percentagens de carga em *soft* e *softer handover* não têm valores limites consensuais, especialmente o valor referente ao *softer handover*, uma vez que nos sistemas celulares de gerações anteriores apenas existia *hard handover*, mas facilmente se eliminam gamas de valores. Para redes uniformes, ao existirem valores médios acima dos 50%, a rede estará a transportar no mínimo o dobro do tráfego requerido pelos utilizadores, o que é claramente um desperdício de recursos. Assim, se tomar valores demasiado elevados, reduz a capacidade das células e se tomar valores demasiado baixos, reduz a mobilidade dos utilizadores, correspondendo a uma área de sobreposição entre células demasiado baixa, ou nula. Este parâmetro é representativo quer da capacidade disponível quer da área de sobreposição das células.

O serviço de referência corresponde à QoS mínima que é considerada pela rede. Se este for um serviço de qualidade baixa, os utilizadores que requererem serviços mais restritivos poderão não ser satisfeitos. Se pelo contrário o serviço de referência for muito restritivo, não existe degradação dos serviços requeridos mas o número de utilizadores e a área da célula serão mais reduzidos.

Quanto ao Ritmo Efectivo Relativo, reflecte a QoS da rede em termos dos serviços que na realidade são prestados aos utilizadores. Este parâmetro é uma consequência do serviço de referência e da distribuição da carga oferecida, podendo apresentar valores elevados se o serviço de referência for pouco restritivo e existirem locais onde exista muita concentração de carga oferecida à rede.

Para além das considerações sobre os parâmetros enunciados, outras escolhas terão de ser feitas, bem como outras considerações, reflectindo-se no custo total da rede. A interligação com sistemas existentes, nomeadamente o GSM, tem de ser considerada, uma vez que não é nem economicamente nem comodamente viável desligar os sistemas já existentes, quer para operadores quer para utilizadores, para tornar apenas operacional o UMTS. A escolha das localizações dos *Node Bs*, bem como a disponibilidade das mesmas, deve ser criteriosamente estudada para que não exista nem sobre- nem sub-dimensionamento da rede. É um bom critério de selecção a simulação de uma rede UMTS hipotética de acordo com as localizações de estações base GSM e com um bom modelo de geração de tráfego estimar quais serão os melhores locais para a colocação dos *Node Bs* da rede a dimensionar.

4 Simulador de redes UMTS

Neste capítulo é apresentada uma breve descrição da ferramenta *Map UMTS* [VaCa02]. Seguidamente descreve-se a ferramenta *Our Box*, desenvolvida para a avaliação do desempenho de redes celulares hierárquicas. São descritos os parâmetros de entrada, o algoritmo e os parâmetros de saída.

4.1 A ferramenta de *software Map UMTS*

A ferramenta Map UMTS foi desenvolvida com o objectivo de estimação de tráfego em redes UMTS, no âmbito de um projecto de final de curso no IST. Esta funciona sobre uma aplicação de SIG (Sistemas de Informação Geográfica), que permite o relacionamento de dados geográficos, sendo assim de extrema utilidade quer para a análise e geração de tráfego, quer para a simulação e optimização de redes celulares. A ferramenta de SIG utilizada foi o MapInfo [MAPI] . A Figura 4.1 representa o modo de funcionamento da aplicação que tem como parâmetros de entrada a caracterização da população e a caracterização da área. A população é caracterizada em termos de número de pessoas por freguesia; número de pessoas com idades compreendidas entre {0,20},{20,64} e mais de 64 anos por freguesia; número de pessoas sem escolaridade obrigatória, com ensino obrigatório, ensino secundário e ensino superior, por freguesia; e rendimentos. A área é caracterizada quanto à tipologia dos edifícios e ocupação, em termos de zonas: habitacional denso, edifícios de utilização mista, edifícios de utilização terciária, habitacional pouco denso, edifícios industriais, estradas e zonas verdes.

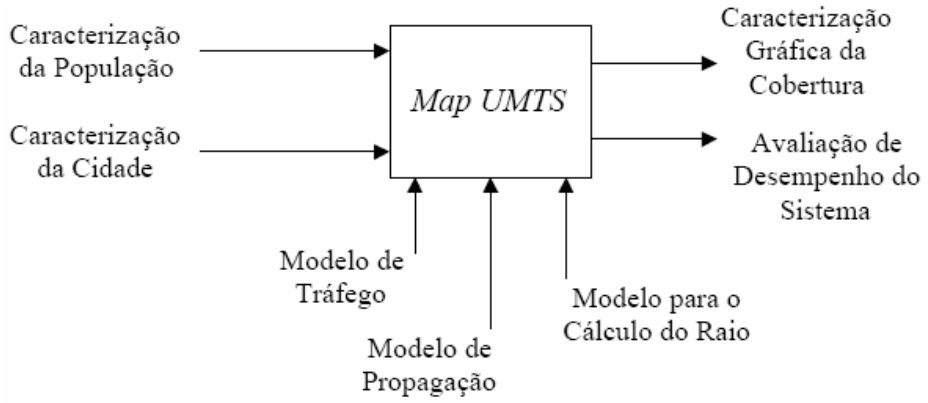


Figura 4.1 – Diagrama de blocos representativo da aplicação *Map UMTS* (extraído de [VaCa02]).

Quanto ao modelo de geração de tráfego, permite a alteração de vários parâmetros de modo a se proceder da forma mais aproximada possível da população a descrever. Os serviços disponíveis são apresentados na Tabela 4.1. De destacar ainda que os utilizadores podem realizar multi-serviço, sendo este sempre um conjunto de dois com o serviço voz e um outro. O modelo estima o número de potenciais utilizadores activos, o(s) serviço(s) requeridos de cada utilizador e a localização individual de cada potencial utilizador activo, sempre por freguesia. O número de utilizadores activos é calculado utilizando uma Distribuição de Poisson com valor médio dado por

$$\#\ médio\ de\ utilizadores = (tx.\ penetração) \times (tx.\ utilização) \times (\#\ utilizadores\ /\ freguesia) \quad (4.1)$$

em que:

- a taxa de penetração corresponde à percentagem de utilizadores que utilizam os serviços do operador móvel em questão, para o qual se pretende dimensionar a rede,
- a taxa de utilização corresponde ao número de potenciais utilizadores de serviços do operador, para uma dada hora do dia, para a cidade em questão.

Tabela 4.1 – Serviços disponíveis

Serviço
(Voz) 12.2 kbps, CS
64 kbps, CS
64 kbps, PS
144 kbps, CS
144 kbps, PS
384 kbps, PS

A distribuição de serviços entre os utilizadores activos na freguesia é calculada de acordo com as características da população segundo (4.2) em que cada elemento de **D** corresponde ao tipo de serviço que é disponibilizado pela rede:

$$\mathbf{D} = k_1\left(p_{<20}\cdot\mathbf{v_{11}} + p_{20<<64}\cdot\mathbf{v_{12}} + p_{>64}\cdot\mathbf{v_{13}}\right) + k_2\left(p_{sem}\cdot\mathbf{v_{21}} + p_{obrig}\cdot\mathbf{v_{22}} + p_{\sec}\cdot\mathbf{v_{23}} + p_{\sup}\cdot\mathbf{v_{24}}\right) + k_3\left(\mathbf{v_3}\right) \quad (4.2)$$

em que:

- **D** é o novo vector relativo à distribuição dos serviços por freguesia.
- k_1, k_2 e k_3 são os pesos relativos a cada uma das classificações utilizadas para a população: idade, escolaridade e rendimento, respectivamente.
- $\mathbf{v_{11}}$, $\mathbf{v_{12}}$ e $\mathbf{v_{13}}$ são vectores correspondentes às relações de utilização de serviços referentes as três classes de idades.
- $\mathbf{v_{21}}$, $\mathbf{v_{22}}$, $\mathbf{v_{23}}$ e $\mathbf{v_{24}}$ são vectores correspondentes às relações de utilização de serviços referentes as quarto classes de educação.
- $\boldsymbol{v}_3$ é o vector correspondente às relações de utilização relativa aos rendimentos.
- $p_{<20}$, $p_{10<<64}$ e $p_{>64}$ representam a probabilidade da população ter menos de 20 anos, entre 20 e 64 anos e mais de 64 anos, respectivamente, na freguesia considerada.
- p_{sem}, p_{obrig}, $p_{\sec}$ e $p_{\sup}$ representam a probabilidade da população não ter escolaridade, ter escolaridade obrigatória, ensino secundário ou ensino superior, respectivamente, na freguesia considerada.

Uma vez definido **D**, verifica-se (4.3) com igualdade apenas quando não existem utilizadores de multi-serviço, de onde se obtêm os $d_i s$ como a razão entre serviços. Finalmente pode-se obter o número de utilizadores de cada serviço recorrendo à relação presente na Tabela 4.2.

$$\mathbf{D} = \left[d_1 ... d_6\right];\ \sum_{i=1}^{6} d_i \geq 1 \quad (4.3)$$

Quanto à localização dos utilizadores, obtém-se através da intersecção da área da freguesia com zonas que caracterizam a área em termos ambientais, sociológicos e económicos às quais estão associadas percentagens de utilizadores. Assim, sabendo as percentagens de utilizadores correspondentes a cada zona, geram-se posições aleatoriamente seguindo uma Distribuição

Uniforme dentro de um rectângulo englobando a área de intersecção da freguesia com a zona em causa até que uma posição seja gerada dentro da área de intersecção.

Tabela 4.2 – Razão de utilização de serviços por freguesia (adaptado de [VaCa02]).

Serviço	**Razão de utilização**
Voz	d_1 - s
Mono-serviço que não voz	d_i , i=2,…,6
Multi-serviço	$\frac{d_j}{\sum_{i=1}^{6} d_i} s$, j=2,…,6

A intersecção entre zonas e a área da freguesia causa também que o número de utilizadores não corresponda a directamente ao valor da penetração, uma vez que o número de utilizadores em cada zona é aproximado ao valor inteiro. Com o aumento da penetração as diferenças tendem a ser menores. Como exemplo, apresentam-se na Tabela 4.3 valores médios resultantes de alguns valores de penetração.

Tabela 4.3 – Correspondência entre número médio de utilizadores e taxas de penetração e utilização.

$(tx.\ penetração) \times (tx.\ utilização)$ [%]	*# médio de utilizadores*
0.10	323
0.50	2423
1.00	5235
2.00	10914

O modelo de propagação utilizado é o modelo COST - 231 Walfisch-Ikegami [DaCo00], o qual é descrito no Anexo C; todos os parâmetros podem ser alterados, excepto a altura do *Node B* a qual está limitada ao valor 1 m acima do nível do telhados.

O modelo para o cálculo do raio das células foi desenvolvido considerando uma rede uniforme, gerada aquando da simulação, com células não sectorizadas. O raio usado para a geração da rede uniforme pode ser um valor introduzido pelo utilizador ou a distância máxima calculada através do balanço de potência para um serviço de referência. O modelo tem como base o cálculo dos factores de carga e potência de emissão de cada *Node B*. Após este cálculo é verificado se os valores máximos são excedidos. Se assim acontecer, reduz-se o ritmo de transmissão de um utilizador e calculam-se e testam-se de novo os parâmetros acima referidos. Apenas é permitido reduzir o ritmo de transmissão até ao serviço de referência, nunca abaixo. Se após a fase de redução de ritmos os limites ainda forem excedidos então será necessário reduzir o raio da célula. Esta redução é realizada bloqueando o utilizador mais distante e fixando o novo valor do raio como sendo a distância ao utilizador que está agora mais distante. Por fim, o raio da célula é a distância máxima considerada de modo a que os valores dos factores de carga e potência de emissão não excedam os limites considerandos. Existe ainda a possibilidade do raio aumentar se os factores de carga não forem excedidos. São calculadas novas margens de interferências e novos raios para os serviços, sendo então adicionados utilizadores que estejam dentro do novo raio, procedendo-se ao teste de cargas e potência de emissão.

Os parâmetros de saída são de dois tipos: os referentes às células, tais como o raio, factores de carga, potência de emissão do *Node B*, probabilidade de bloqueio, número total de utilizadores servidos e por serviço, qualidade das ligações em termos de numero de chamadas para as quais o ritmo binário foi reduzido ou não, capacidade em kbps e parâmetros referentes aos utilizadores; o número total de utilizadores e seus respectivos serviços requeridos. É ainda apresentado, através da interface da aplicação de SIG, um mapa da cobertura da rede gerada, os utilizadores activos e seus respectivos serviços requeridos.

4.2 As ferramentas *Map UMTS* V1.5 e *Our Box*

O planeamento celular de novas redes ou a optimização de redes preexistentes tem vindo a sofrer grandes alterações no modo como são executados, cada vez mais são utilizadas ferramentas automáticas que aceleram o processo e tendem a ser mais eficazes que o planeamento ou optimização manuais. O planeamento celular automático requer como parâmetros de entrada a caracterização geográfica da área, a caracterização do tráfego e um conjunto inicial de potenciais localizações dos *Node B*. Com estes dados iniciais são executados algoritmos que produzem soluções optimizadas para os cenários considerados. Das directrizes de planeamento, facilmente se identificam os grandes blocos de um simulador de redes celulares. Este tem de conter:

- Gerador de Tráfego
- Analisador de parâmetros da rede

e no caso de optimização

- Bloco de optimização

O bloco de geração de tráfego deve gerar tráfego de acordo com as características do próprio tráfego gerado e também que seja representativo de um cenário de utilizadores. O analisador de parâmetros da rede, por sua vez, procede aos cálculos dos vários parâmetros tendo em conta o tráfego gerado. Este bloco simula a operação da rede. Por fim o bloco de optimização é o que distingue os vários simuladores, bem como o gerador de tráfego. É neste bloco que se procede à escolha dos parâmetros a optimizar e também o modo como essa optimização é executada. Assim a escolha modelo de geração de tráfego e do algoritmo de optimização são fulcrais para o desempenho do planeamento automático e para a obtenção de soluções válidas.

Quanto à optimização é necessário primeiramente definir os objectivos, qual ou quais os parâmetros da rede a optimizar e qual o método de optimização. Quanto ao objectivo será melhorar a capacidade da rede. O parâmetro a optimizar será o raio dos sectores e o método de optimização será a disponibilização de novas frequências, i.e. a implementação de uma rede hierarquizada. De modo a aferir as alterações em termos eficiência e capacidade da utilização de redes uniformes ou não uniformes usando uma perspectiva de rede hierarquizada, foi desenvolvida uma ferramenta de *software*. Esta simula uma rede UMTS e faz escolhas automáticas em termos de atribuição de novas portadoras aos *Node Bs*.

4.2.1 Estrutura

O problema em análise requereu que se procedesse a profundas alterações na aplicação descrita anteriormente, para que novos resultados fossem apresentados bem como a disponibilização de novas funcionalidades. O diagrama de blocos é apresentado na Figura 4.2. A interface gráfica disponível ao utilizador é a da aplicação de SIG. Contudo, os cálculos computacionais referentes aos blocos de simulação e optimização são processados através de uma aplicação desenvolvida em C++, de modo a que a rapidez de processamento desta

linguagem fosse explorada. A comunicação entre as duas aplicações é praticamente transparente ao utilizador, sendo executada através da escrita e leitura de ficheiros. Aquando do desenvolvimento existiu a possibilidade de realizar a comunicação entre as duas aplicações através de ferramentas OLE (*Object Linking and Embedding*), mas as alterações que seriam necessárias na aplicação *Map UMTS* e o facto de um estudo adicional ter que ser efectuado, não justificariam os eventuais ganhos no tempo de processamento, uma vez que estes assuntos não fazem parte do currículo escolar dos autores.

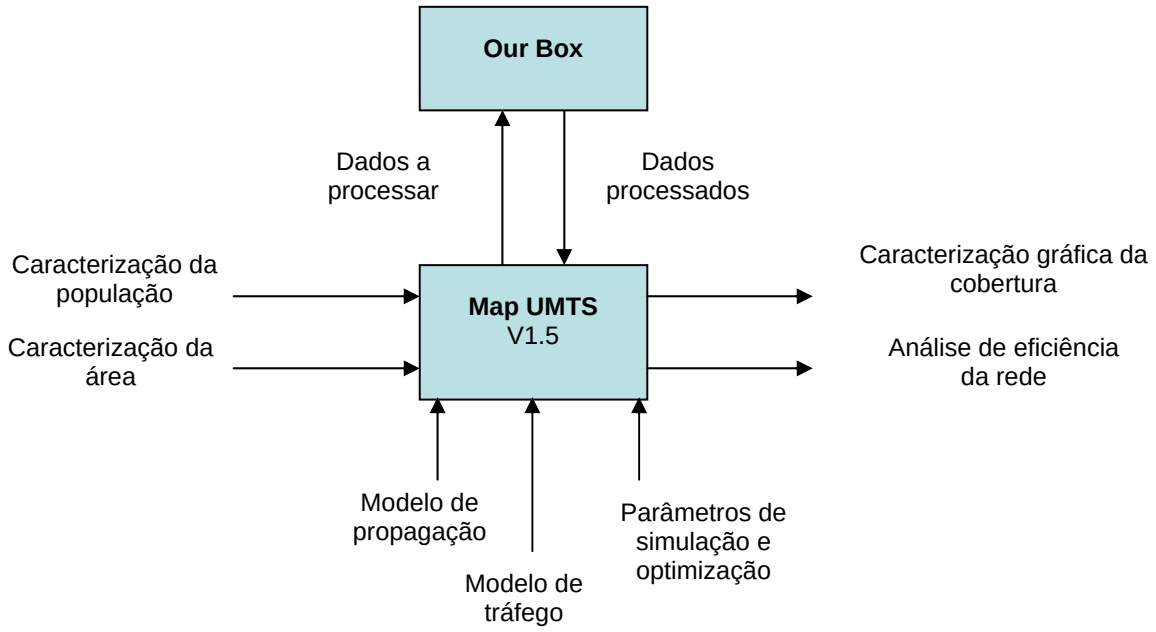


Figura 4.2 – Diagrama de blocos representando a interacção entre as aplicações *Map UMTS* V1.5, *Our Box* e utilizador.

Numa descrição simplista, são gerados utilizadores e uma rede na aplicação *Map UMTS*. A informação destes é enviada à aplicação Our Box. Esta simula a rede e procede à sua optimização enviando posteriormente os resultados para a aplicação *Map UMTS* que mostra ao utilizador um mapa com a cobertura dos *Node Bs* e alguns parâmetros de eficiência da rede.

4.2.2 Parâmetros de entrada

Os parâmetros de entrada da aplicação são:

- Serviço de referência
- Factores de carga máximos em UL e DL
- Potência de emissão do *Node B* máxima
- Cenário
- Número de portadoras disponíveis
- Valores das frequências
- Percentagem de redução permitida do raio dos sectores
- Margem α_r
- Estratégia de divisão dos utilizadores pelas frequências
- Parâmetros do modelo de propagação
- Parâmetros do modelo de tráfego

O serviço de referência pode ser qualquer entre os serviços disponíveis e será para este serviço que se calculará o raio do sector. Este serviço corresponde à QoS mínima na rede, i.e., serviços requeridos de ritmo superior podem ser degradados até este limiar mas nunca abaixo. Os factores de carga máximos assim como a potência de emissão do *Node B* correspondem aos limiares máximos que o sector pode apresentar. A potência de emissão máxima não pode exceder os 43 dBm, sendo este um requisito do UMTS. O cenário corresponde ao tipo de canal, podendo ser interior, pedestre ou veicular. O número de portadoras disponíveis é um parâmetro de optimização e representa o número máximo de portadoras que cada sector pode ter. São no máximo quatro uma vez que na actualidade portuguesa cada operador dispõe de três mas espera-se que venha a dispor de quatro canais FDD do espectro disponível pelo IMT 2000. Os valores das frequências podem ser seleccionados do conjunto dos canais das bandas de acesso rádio terrestre UMTS do modo FDD.

A percentagem de redução permitida do raio dos sectores representa o limiar abaixo do qual será adicionada uma nova frequência ao sector. Deverá compreender valores entre os 10 e os 20 %. Este parâmetro corresponde à sobreposição desejada entre sectores de *Node B*s diferentes na rede uniforme. A margem α_r é utilizada para o cálculo do raio do sector, tal como mostra a Figura 4.3.

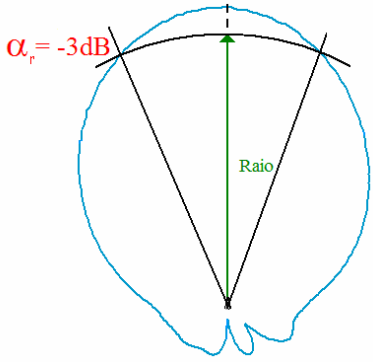


Figura 4.3 – Representação do processo de cálculo do raio de um sector.

As estratégias de divisão dos utilizadores pelas frequências só tem expressão quando o número de frequências disponíveis for maior que um e representa uma parte da camada de rrm (*radio resource management*) das redes reais. Os utilizadores podem ser escolhidos para determinada frequência de duas formas:

- Carga semelhante em todas as portadoras;
- Distância do utilizador ao *Node B.*

A estratégia baseada na carga atribui um utilizador à portadora que apresente menor carga, resultando em raios dos sectores para as várias frequências semelhantes. Por seu turno a estratégia baseada na distância, atribui os utilizadores mais próximos do *Node B* às frequências hierarquicamente mais altas, tentando simular portadoras com diferentes funções, umas dar capacidade e outras *handover*. Na utilização desta estratégia é esperada assimetria nos raios correspondentes às diferentes frequências, quanto maior for o nível hierárquico de determinada frequência menor tende a ser o seu raio. Outras estratégias foram pensadas como a divisão a partir dos serviços requeridos e pelo tipo ligação PS / CS. Estes métodos não foram implementados uma vez que para a divisão a partir dos serviços a eficiência depende demasiado da distribuição dos serviços requeridos na área e o método pelo tipo de ligação apresenta problemas para os utilizadores que utilizam serviços híbridos PS e CS. Ainda para o

método assente no tipo de ligação, caso fosse implementado, seria interessante tentar simular a interoperabilidade do UMTS e do GSM, como se espera que aconteça, transportando as ligações de voz através do GSM e os restantes serviços através do UMTS. Poder-se-ia assim averiguar as necessidades do operador em termos das localizações dos *Node Bs*. Os parâmetros do modelo de tráfego são os existentes na aplicação *Map UMTS*, uma vez que o modelo não foi reformulado. O modelo de propagação utilizado é o COST 231 – Walfisch - Ikegami, dado que a zona em estudo é da classe urbana regular, onde se esperam distâncias máximas de cobertura da ordem das centenas de metro. Os parâmetros para ambos os modelos são os considerados pela aplicação *Map UMTS*.

4.2.3 Algoritmo de simulação e optimização

A rede a analisar e optimizar pode ser uma rede uniforme gerada automaticamente, ou uma outra rede previamente estruturada. São consideradas células tri-sectorizadas uma vez que as redes reais também o são, de modo a reduzir a interferência. Os sectores, definidos de acordo com a Figura 4.4, estão sempre orientados segundo o azimute definido para o seu grupo conforme a Tabela 4.4.

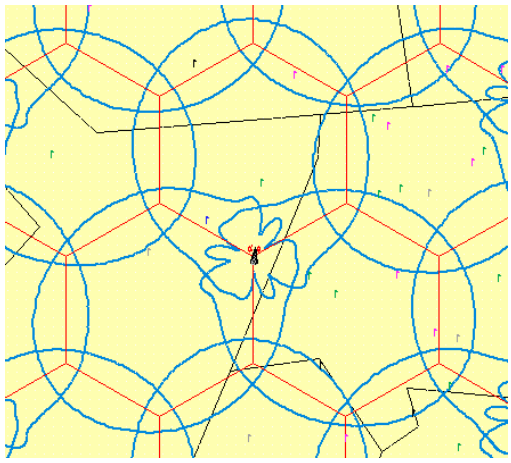


Figura 4.4 – *Node Bs* com três sectores.

Após o cálculo do raio do sector, definido de acordo com a Figura 4.3, através do balanço de potência e modelo de propagação, é gerada a posição dos *Node B*s e uma grelha de hexágonos representativa da cobertura mínima desejada. Os hexágonos são gerados a partir de um círculo com raio igual a uma percentagem do raio dos sectores como se pode verificar pela Figura 4.5 segundo (4.4) sendo este valor imposto para a redução máxima permitida do raio.

$$raio = \frac{(1 - \text{redução permitida}) \cdot \text{distância máxima}}{2} \tag{4.4}$$

O *Node B* posiciona-se no ponto que é interceptado pelos três hexágonos correspondentes a cada sector. O método de geração de hexágonos tem como base as propriedades geométricas dos mesmos. Facilmente a partir do ponto onde se situa o *Node B* se calculam os vértices e se podem traçar as linhas que formam o hexágono.

No caso da geração de rede uniforme, um método semelhante é utilizado para a escolha dos pontos em que se situam os outros *Node B*s. Após a escolha da localização do primeiro *Node B* são geradas as localizações à mesma longitude e posteriormente são geradas as restantes. A estimação da cobertura tem em conta a antena utilizada no *Node B*, através do seu diagrama

de radiação apresentado no Anexo D, mas esta será a mesma para todos os sectores e *Node Bs*. Se a área de cobertura interceptar a área em estudo em menos de 40% da área de cobertura máxima de um sector, esse sector será retirado automaticamente. Este valor foi adoptado de modo a que, mesmo que um sector seja eliminado, a área seja ainda coberta pelos restantes sectores, acontecimento este que é muito dependente da rede a analisar. Não se verificaram diferenças significativas na análise da rede não uniforme considerada utilizando quer o valor 40 quer 50%. Ao utilizador da aplicação são ainda facultadas as funcionalidades de retirar outros sectores para além dos retirados automaticamente, adicionar *Node Bs* através das suas coordenadas ou através do mapa da área na interface gráfica da aplicação e também remove-los.

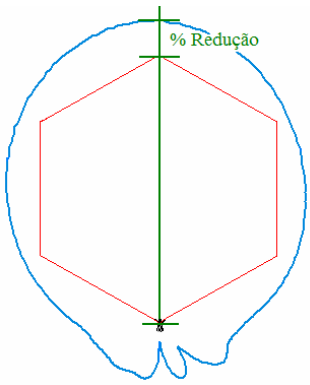


Figura 4.5 – Formação dos hexágonos.

Tabela 4.4 – Ângulos de orientação dos sectores

Identidade do Sector	**Azimute da direcção de máximo de radiação [º]**
1	0
2	120
3	240

O algoritmo de simulação e optimização está representado na Figura 4.6. É executado para todos os *Node Bs* e por cada um destes para os seus sectores. Para a execução do algoritmo foram criadas classes com as propriedades e métodos característicos das entidades que representam. Cada *Node B* corresponde a um objecto da classe *Bstation*, que está ligado a outro *Node B* através de um ponteiro para a sua classe, formando assim uma lista simplesmente ligada de objectos da classe *Bstation* correspondente à rede que se quer simular e optimizar. Cada um destes objectos contêm um conjunto de ponteiros, no máximo três, para a classe *Sector*, os quais representam os sectores de cada *Node B*. Os objectos pertencentes à classe *Sector* contêm todos os parâmetros para cada frequência referentes ao sector. Existem ainda nos elementos desta classe, um ponteiro para o *Node B* ao qual o sector pertence e três ponteiros para a classe *User*. Estes últimos apontam para listas de utilizadores activos no sector, utilizadores não servidos e utilizadores em *hard handover*, possibilitando assim uma boa base de dados para eventuais alterações da aplicação em termos de outras análises. Quanto à classe *User*, representa um utilizador da rede.

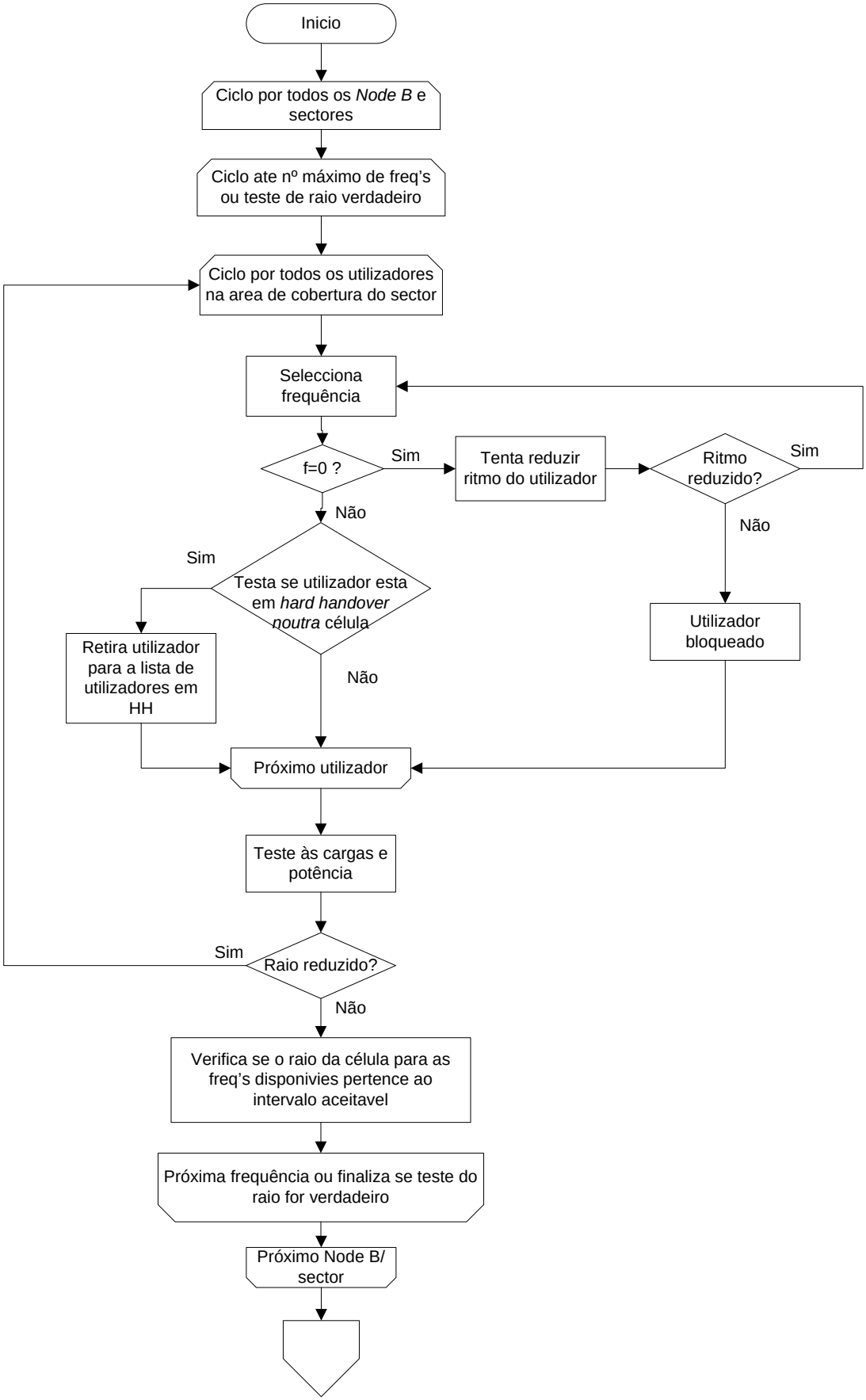


Figura 4.6 – Fluxograma do algoritmo de simulação e optimização.

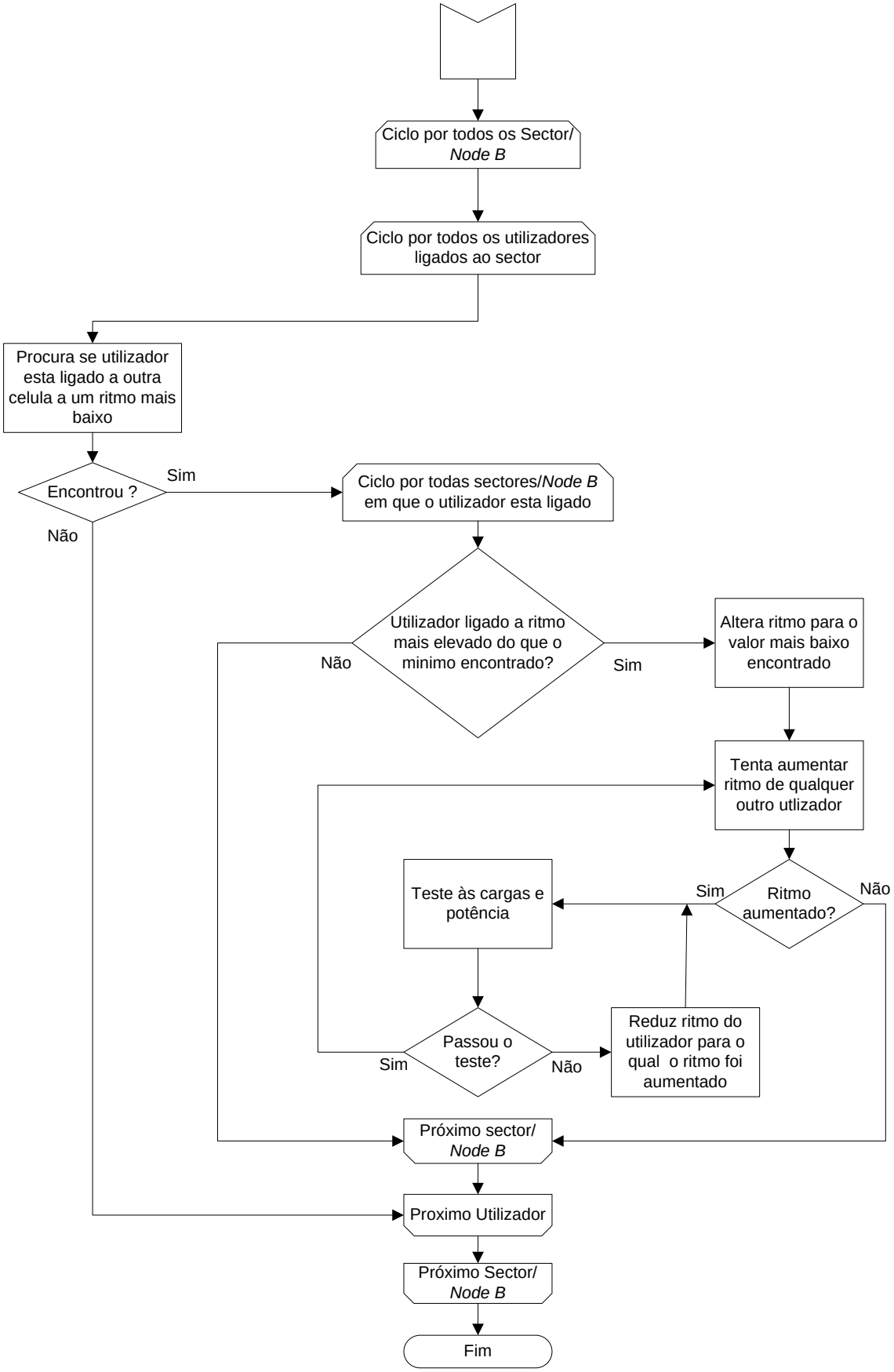


Figura 4.6 – Fluxograma do algoritmo de simulação e optimização.(continuação)

No início da simulação são calculados os raios máximos dos sectores para os vários serviços de acordo com os balanços de potência. São então geradas ou lidas de um ficheiro as localizações dos *Node Bs* da rede e seguidamente é calculada a distância máxima para todos os azimutes para cada sector, obtendo-se assim a cobertura máxima de cada sector. Após a obtenção da rede a analisar, são gerados utilizadores de acordo com a caracterização da população segundo o modelo desenvolvido por [VaCa02]. Então a tabela dos utilizadores é interceptada pela cobertura máxima de cada sector sequencialmente, produzindo assim um ficheiro com a lista de todos os *Node Bs*, seus sectores e os utilizadores que estão dentro da área de cobertura máxima dos mesmos. Cada linha do ficheiro corresponde a um utilizador que requer um ou dois serviços à rede e está dentro da área de cobertura de um sector. Após a obtenção das listas descritas anteriormente, selecciona-se um *Node B* da lista e para cada sector do mesmo é realizado o algoritmo que se descreve em seguida.

Seleccionam-se os utilizadores da lista de utilizadores activos no sector e atribui-se-lhes uma frequência do conjunto de frequências disponível no momento. Da primeira vez que se executa para cada sector apenas estará uma frequência disponível, pois pretende-se disponibilizar frequências apenas aos sectores que apresentem falta de capacidade. A frequência é escolhida para cada utilizador da rede de acordo com o método seleccionado pelo utilizador da aplicação e de acordo com um teste à potência recebida quer pelo UE quer pelo *Node B* para que seja superior à sensibilidade do receptor. Se algum dos utilizadores não satisfizer o teste de potência para nenhuma frequência será retirado para a lista de utilizadores não servidos. É ainda executado um teste à frequência atribuída ao utilizador, se este já estiver ligado a um outro qualquer sector (do *Node B* considerado ou de outro). Se a sua frequência for diferente da atribuída neste sector, então esse utilizador será retirado para a lista de utilizadores em *hard handover*. A frequência atribuída a cada utilizador é, como foi supradito, dependente da estratégia escolhida pelo utilizador da aplicação. Se for adoptada a estratégia baseada na carga igual, ao utilizador da rede será atribuída a frequência que apresentar menor carga (das disponíveis) ou no caso de carga igual à hierarquicamente inferior. Por exemplo, se a primeira portadora apresentar a mesma carga que a segunda, então o utilizador tentar-se-á ligar à primeira frequência. Se por outro lado a estratégia escolhida for a que tem em conta a distância do utilizador ao *Node B*, então todos os utilizadores que estiverem na área de cobertura da frequência hierarquicamente mais alta tentam ligar-se a ela. Os utilizadores que não estiverem na área de cobertura desta frequência serão ligados à frequência hierarquicamente abaixo, desde que também estejam dentro da sua área de cobertura e assim sucessivamente. É apresentado na Figura E.3 o fluxograma do algoritmo de atribuição de frequências.

Após a conclusão da atribuição de frequências aos utilizadores activos passa-se a um ciclo onde são calculados, para as frequências disponíveis, os factores de carga e a potência de emissão do *Node B*. Se algum destes ultrapassar os limites estabelecidos pelo utilizador então será tentada a diminuição do ritmo de transmissão dos utilizadores pertencentes à, ou às frequências onde acontece. Estes testes às cargas e potência de emissão são apresentados na Figura E.2. O ritmo de uma ligação apenas pode ser reduzido para uma ligação do mesmo tipo de comutação e os serviços de 64 kbps não podem ser reduzidos uma vez que são os serviços de dados de ritmo mais baixo disponíveis. Se não existir nenhum utilizador para o qual o ritmo possa ser reduzido (notar que apenas se pode reduzir o ritmo aos utilizadores que requerem serviços de ritmos de transmissão mais elevados que o serviço de referência), é reduzida de 5% a distância máxima dos utilizadores ao *Node B*. Se para alguma das frequências o raio do sector for diminuído, então volta-se à fase de atribuição de frequências e repete-se o processo até que os factores de carga e a potência de emissão não excedam os

limites impostos. Após conclusão do processo acima descrito é efectuado um teste aos raios referentes às várias frequências do sector. Se para todas das frequências do sector o raio for menor que o limiar definido pela redução permitida do raio do sector, então será disponibilizada mais uma frequência ao sector. Contudo se o número de frequências é igual ao máximo fixado pelo utilizador, não existem mais frequências a disponibilizar e passa-se a avaliar outro sector. Depois da conclusão desta fase realiza-se mais um ciclo sobre todos os *Node Bs* e sectores onde se procuram utilizadores que estejam ligados a vários *Node B*s ou sectores com serviços diferentes. Se isso acontecer procede-se a um ciclo por todos os *Node B*s e sectores onde o utilizador está ligado e altera-se o seu serviço para o mínimo a que esse utilizador esteja ligado. Nestes *Node B*s e sectores tenta-se aumentar o serviço de um utilizador que não esteja em *soft* ou *softer handover* e testam-se as cargas e potência de emissão. Se este teste for superado, tenta-se de novo aumentar o serviço de outro utilizador, senão reduz-se novamente o serviço e passa-se ao sector seguinte. Após a simulação e optimização é escrito um ficheiro que em cada linha tem os parâmetros calculados dos sectores referentes a cada frequência, ficheiro este que será lido pela aplicação *Map UMTS*. Por fim a aplicação *Map UMTS* apresenta os resultados finais ao utilizador.

Ainda em relação às estratégias de divisão dos utilizadores pelas frequências, em particular a baseada na distância entre utilizador e *Node B*, uma vez que se impõe que a frequência atribuída seja a mais alta hierarquicamente das disponíveis no ponto em que o utilizador se situa e a redução do raio se faz de modo discreto (reduções de 5% do valor máximo), verifica-se que em alguns casos podem ser apresentados valores que podem parecer absurdos mas na verdade são consequência das limitações do algoritmo especialmente em relação à redução do raio. Idealmente o raio seria reduzido de modo a que a o limiar da cobertura fosse um pouco abaixo do utilizador mais próximo desse limiar e então seriam atribuídas novamente as frequências e testadas as cargas e potências. Usando a estratégia de redução do raio dos sectores adoptada, ganha-se em tempo de processamento em detrimento de uma aproximação mais fiável da realidade. De notar porém que mesmo assim estamos a falar de valores que muitas vezes correspondem à largura de uma avenida.

Quanto às limitações da aplicação enunciando apenas algumas: alguma imprecisão no cálculo do azimute orientado ao sector que introduz erro no cálculo da distância máxima para a referida direcção; não contabilização da carga adicional provocada pela sinalização das ligações em *handover*; gestão de *hard handover* dependente da identidade do *Node B*; o ciclo principal do simulador disponibiliza as portadoras necessárias para se satisfazer os limites da redução do raio do sector, o que torna a implementação de outra abordagem de optimização para a disponibilização de portadoras, como por exemplo com dependência da carga em *soft handover*, mais trabalhosa pois o ciclo terá de ser completamente reestruturado.

4.2.4 Parâmetros de saída

Quanto aos parâmetros de saída da aplicação, podem ser de duas formas: em tabelas e informação gráfica. Todos os parâmetros referentes aos sectores e dentro destes, as frequências, são guardados em tabelas que podem ser consultadas pelo utilizador. Também toda a informação sobre os utilizadores activos e seus serviços requeridos e oferecidos é guardada em tabelas. São ainda apresentados alguns valores notáveis (mínimos, médias e máximos) de alguns dos parâmetros calculados. Quanto à informação gráfica é apresentada num mapa da cobertura da rede e os utilizadores que requerem serviços à rede. Os parâmetros referentes aos sectores são:

- R - raio do sector, em km, corresponde ao raio para uma frequência e é calculado de acordo com a definição exposta atrás, podendo apresentar valores diferentes para as várias frequências.
- R_{norm} - raio normalizado, o mesmo que o anterior mas normalizado raio máximo para a primeira frequência.
- P_{ss} - percentagem de utilizadores sem serviço.
- N_{ut} - número de utilizadores que estão ligados ao sector diz respeito a cada frequência.
- $\eta_{UL/DL}$ - factores de carga em UL e DL referentes a cada frequência são definidos conforme (2.2) e (2.3) respectivamente.
- Número de utilizadores em *hard handover* - refere-se a todas as frequências e corresponde aos utilizadores que poderiam estar ligados a outros *Node B*s ou sectores mas a frequência seleccionada pelo algoritmo era diferente da qual o utilizador está ligado.
- Número de utilizadores em *soft handover* - refere-se a cada frequência e corresponde aos utilizadores ligados a determinada frequência em vários *Node Bs.*
- Percentagem da carga em *soft handover* (UL e DL) - referentes aos factores de carga para cada frequência
- Número de utilizadores em *softer handover* - corresponde aos utilizadores da frequência em causa que estão ligados na mesma frequência em sectores diferentes do mesmo *Node B*.
- Percentagem da carga em *softer handover* (UL e DL) - referem-se aos factores de carga para cada frequência.
- $P_{Tx}^{Node\ B}$ - A potência de emissão do *Node B* em cada frequência é calculada de acordo com (2.5)
- Número de ligações de voz (12.2 kbps CS), número de ligações 64 kbps (CS), número de ligações 64 kbps (PS), número de ligações 144 kbps (CS), número de ligações 144 kbps (PS), número de ligações 384 kbps (PS), número de utilizadores que requerem dois serviços - o número de ligações dos vários serviços refere-se a cada frequência, não corresponde directamente ao número de utilizadores, uma vez que os utilizadores de dois serviços são contabilizados como duas ligações, uma de voz e outra do segundo serviço.
- Tráfego total em DL - corresponde à capacidade em kbps referente a cada frequência
- Percentagem de chamadas degradadas - A percentagem de chamadas degradadas corresponde à percentagem entre os utilizadores em determinada frequência que sofreram redução no ritmo do serviço requerido sobre os utilizadores que estão ligados nessa mesma frequência.
- Percentagem de chamadas não degradadas - o complementar do anterior.
- Número de frequências disponíveis - corresponde ao número de portadoras que foi necessário disponibilizar no sector de modo a que o raio do mesmo apresentasse valores dentro do intervalo requerido. Como existe um máximo de portadoras a disponibilizar, em alguns casos verifica-se que, mesmo atingindo esse máximo, o raio do sector não se situa dentro do intervalo pretendido.
- RER_{384} para ligações de 384 kbps PS – definido conforme (4.5), este valor é associado à rede. As ligações de 384 kbps podem sofrer no máximo duas reduções para níveis inferiores, até 64 kbps PS.
- Percentagem das ligações de 384 kbps PS degradadas

- $RERA_{384}$ - definido conforme (4.6), também é relativo à rede.
- $RER_{144\,PS/CS}$ - conforme (4.7), para ligações em PS ou CS. Os serviços de ritmo 144 kbps apenas podem ser reduzidos um nível, daí haver diferença de cálculo dos RER referentes a cada ritmo.
- Percentagem das ligações de 144 kbps PS ou CS degradadas
- $RERA_{144\,PS/CS}$ - conforme (4.8).

$$RER_{384} = \frac{384 - \frac{(384-144)\cdot N_{ut384-144} + (384-64)\cdot N_{ut384-64}}{N_{ut384}}}{384} \tag{4.5}$$

$$RERA_{384} = \frac{384 - \frac{(384-144)\cdot N_{ut384-144} + (384-64)\cdot N_{ut384-64}}{(N_{ut384-144} + N_{ut384-64})}}{384} \tag{4.6}$$

$$RER_{144\,PS/CS} = \frac{144 - \frac{(144-64)\cdot N_{ut144-64}}{N_{ut144}}}{144} \tag{4.7}$$

$$RERA_{144\,PS/CS} = \frac{144-(144-64)}{144} \tag{4.8}$$

5 Análise de Resultados

Ao longo do presente capítulo serão apresentados os resultados das várias abordagens consideradas com o intuito de se concluir sobre o impacto da utilização de redes celulares hierárquicas em termos de eficiência. É apresentada uma comparação da eficiência em função da estratégia de divisão de utilizadores pelas frequências: carga igual e distância ao *Node B*. Novamente é apresentada uma comparação mas neste ponto em função de dois serviços base diferentes, 64 kbps (PS) e 144 kbps (PS). É feito um estudo com base no mapa de cobertura, com estratégia de carga igual, serviço de referência 144 kbps (PS) e com quatro frequências disponíveis. Compara-se o efeito da distribuição de tráfego para duas situações uma que dá maior ênfase à voz e outro que destaca os serviços de maior débito. É ainda exposto o efeito de utilização de diferentes limiares, permissão de redução de 10 e 20 % do raio antes de disponibilizar novas portadoras nos *Node Bs.*

5.1 Dados de Entrada

Para a obtenção dos resultados foram adoptado os seguintes valores e considerações:

- Rede não uniforme - gentilmente fornecida pela Vodafone, à qual foram acrescentados alguns *Node B*s em zonas onde não existiam, a rede é apresentada na Figura 5.1 e tem 327 *Node Bs.*
- Frequências - de acordo com Tabela 5.1, correspondem aos quatro primeiros canais do modo FDD.
- Cenário - pedestre
- $\eta_{UL\,\max}$ = 50%
- $\eta_{DL\,\max}$ = 50%
- $P_{Tx\,\max}^{Node\ B}$ = 43 dBm
- Redução permitida do raio dos sectores - 10%
- a distribuição de serviços é a considerada por omissão em [VaCa02], sendo esta distribuição exposta nas Tabela F.2, Tabela F.3 e Tabela F.4.

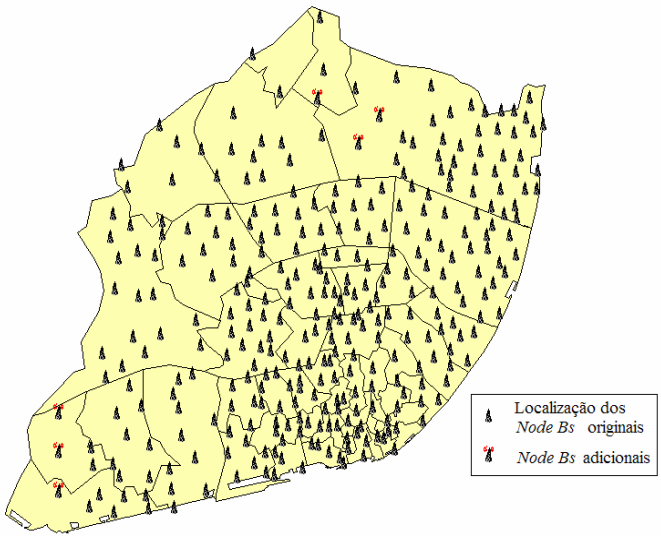


Figura 5.1 – Rede não uniforme, mapa de localização dos *Node B*s.

Como exemplo da distribuição geográfica dos utilizadores e serviços, apresenta-se a Figura 5.2, de onde se pode comprovar que o tráfego tem uma distribuição geográfica não uniforme e é característica das várias zonas de Lisboa. Por exemplo em Monsanto existe uma densidade de utilizadores menor que na zona da Baixa.

Tabela 5.1 – Frequência das portadoras em função da hierarquia

Hierarquia	**f [MHz]**	
	UL	DL
1	1922.5	2112.5
2	1927.5	2117.5
3	1932.5	2122.5
4	1937.5	2127.5

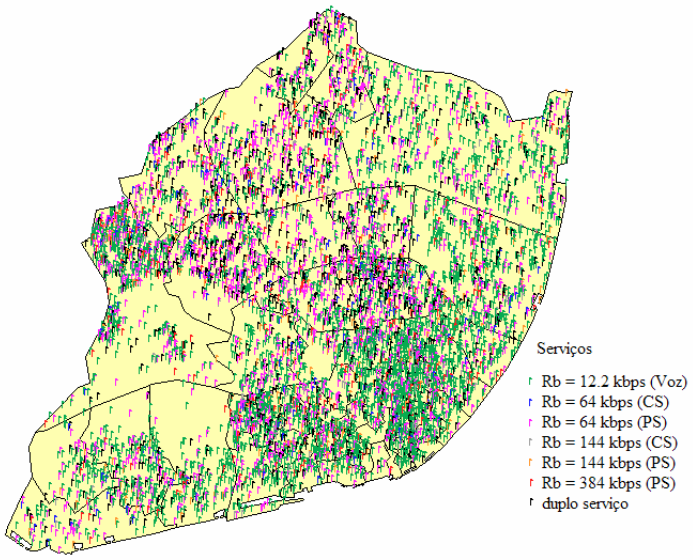


Figura 5.2 – Distribuição espacial da população e dos respectivos serviços.

Quando se referência um número de utilizadores estes correspondem aos utilizadores activos na área em estudo, apenas se utiliza este número para se ter um termo de comparação. De notar porém que mesmo apenas com um *Node B*, os valores apresentados de P_{ss} também seriam possíveis pela definição deste parâmetro.

5.2 Estratégia de Carga Igual

Como ponto de partida, são encontradas as populações que conduzem a P_{ss} médias abaixo dos 10%. Seguidamente são abordados alguns parâmetros estatísticos característicos dos resultados obtidos em função do número de simulações. Depois é apresentada uma análise exaustiva da eficiência da rede para a população que conduz a P_{ss} médio de 2%.

Achou-se a característica da influência do número de utilizadores na área em estudo sobre a rede não uniforme. Esta característica, Figura 5.3, representa a percentagem de utilizadores sem serviço em função do número de utilizadores e do número de portadoras disponíveis. É considerado o serviço de referência 144 kbps (PS), sendo este o mais restritivo depois do serviço 384 kbps (PS). A estratégia de divisão dos utilizadores pelas portadoras é a baseada na carga.

Cada ponto é resultante da média de cinco simulações. São necessárias fazer mais do que uma simulação por cada ponto porque, como já foi mencionado anteriormente, a distribuição dos utilizadores pela rede é aleatória, bem como os seus serviços, havendo necessariamente diferenças nos parâmetros da rede, para o mesmo número de utilizadores. É então necessário averiguar a relevância estatística dos resultados obtidos. O número de simulações parece-nos razoável dado que o desvio padrão é bastante pequeno, mostrando ter havido pouco desvio em relação à média, como se verifica na Tabela 5.2, para o caso da P_{ss}. Quanto maior número de utilizadores, menor é o desvio padrão. Para 2423 utilizadores o desvio padrão é cerca de um quarto do valor da média sendo por isso significativo. Por outro lado, quando a rede suporta 8062 utilizadores, o desvio padrão é cerca de 14 vezes menor, sendo praticamente insignificante. Destaca-se que, mesmo sendo o desvio padrão da mesma ordem de grandeza que a média para populações reduzidas, são esperados valores baixos de P_{ss}, o que esta de acordo com os resultados obtidos. Quanto aos valores máximo e mínimo demonstram também que o número de simulações é cada vez mais influente quanto menor for o número de utilizadores. Para os restantes resultados, verifica-se também esta tendência.

Tabela 5.2 – P_{ss}, com serviço de referência 144 kbps (PS), 4 frequências, Carga Igual.

# Utilizadores	P_{ss} **[%]**			
	Média	**Máx.**	**Mín.**	**Desv. Padrão**
2423	0.42	0.59	0.29	0.12
3833	1.05	1.22	0.74	0.18
4393	1.51	1.51	1.09	0.27
5235	2.26	2.44	1.79	0.28
8062	8.28	9.14	7.64	0.58

Quanto à característica destaca-se o resultado óbvio, o ganho de eficiência em termos de área coberta resultante da disponibilização de várias frequências. De facto o uso de várias portadoras aumenta a capacidade da célula, resultado num melhor desempenho da rede. Utilizando apenas uma frequência, a rede serve todos os utilizadores dentro da sua área de cobertura máxima para uma população de aproximadamente 300 utilizadores, com o aumento da população verifica-se um rápido aumento da P_{ss} até se atingir valores perto de 10% para uma população de aproximadamente 1500 utilizadores. Disponibilizando duas frequências, a rede serve todos os utilizadores para um população de aproximadamente 900 utilizadores. Para a mesma população, a rede com apenas uma frequência já apresenta valores de P_{ss} perto de 2%. Mais uma vez verifica-se um aumento da P_{ss} com o aumento da população, mas contrariamente a um aumento aproximadamente linear, como o verificado dispondo apenas de uma frequência, o aumento é aproximadamente exponencial, atingindo-se valores próximos dos 10% para populações da ordem dos 4000 utilizadores. À medida que se disponibilizam ainda mais frequências os ganhos em termos de eficiência não são tão acentuados e verifica-se, como é conhecido, que o aumento indiscriminado de portadoras não é, em geral, a abordagem ideal para resolver problemas de capacidade e cobertura. Verificam-se cada vez maiores diferenças em termos das populações que conduzem aos mesmos valores de P_{ss}, considerando as quatro características apresentadas admitindo valores de P_{ss} cada vez mais altos. De facto este resultado é uma consequência do algoritmo de optimização, com o aumento da população existem mais células onde o raio final não está dentro do intervalo

requerido e como consequência dessa ocorrência existem cada vez mais células com maior número de portadoras. Este facto implica assim maiores diferenças para os casos onde a rede apresenta já problemas que não são resolvidos com o número de portadoras disponíveis. Ainda destacando alguns resultados da referida característica, disponibilizando quatro frequências atinge-se valores de P_{ss} de 2% para aproximadamente 5000 utilizadores e para aproximadamente 8000 utilizadores a rede apresenta uma P_{ss} de 8%. As características apresentadas mostram que a disponibilização da terceira frequência apresenta menores ganhos em termos de população servida para a mesma P_{ss} que aquando da inserção da quarta. De facto não é esperado que isso aconteça e só pode ser explicado como sendo consequência das variações estatísticas nos resultados.

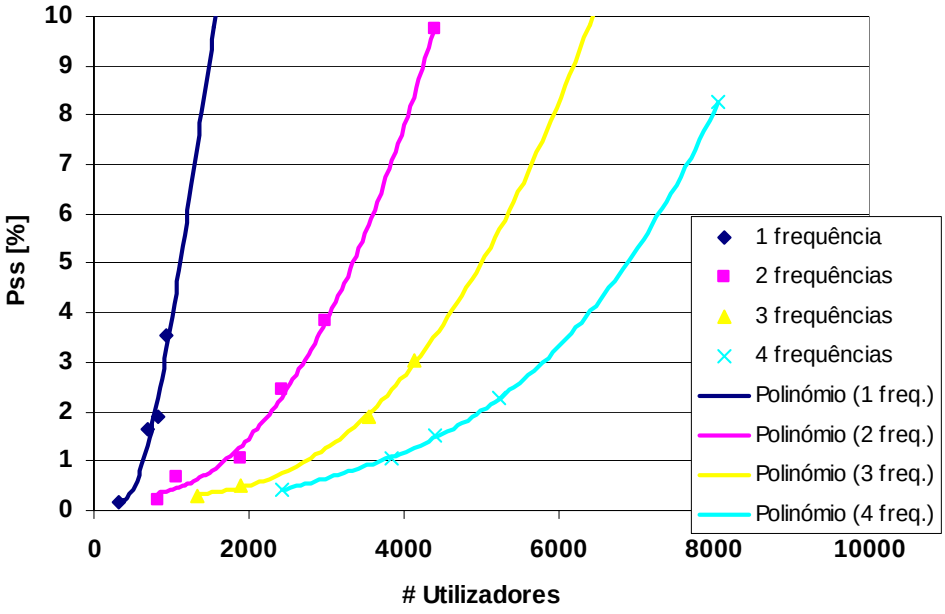


Figura 5.3 – P_{ss} média em função do número de utilizadores e do número de frequências para o serviço de referência 144 kbps (PS) e estratégia de carga igual.

São apresentados polinómios que aproximam as características da evolução da P_{ss} em função do número de utilizadores. Foram adoptados polinómios de grau 3 porque eram os que conduziam a valores de R^2, mais próximos de 1, todos acima de 0.9977.

$$P_{ss}^{1f} = -4 \cdot 10^{-9} \cdot N_{ut}^{\ 3} + 2 \cdot 10^{-5} \cdot N_{ut}^{\ 2} - 0.0095 \cdot N_{ut} + 1.7941 \quad (5.1)$$

$$P_{ss}^{2f} = 3 \cdot 10^{-11} \cdot N_{ut}^{\ 3} + 5 \cdot 10^{-7} \cdot N_{ut}^{\ 2} - 0.0006 \cdot N_{ut} + 0.5034 \quad (5.2)$$

$$P_{ss}^{3f} = 2 \cdot 10^{-11} \cdot N_{ut}^{\ 3} + 2 \cdot 10^{-7} \cdot N_{ut}^{\ 2} - 0.0005 \cdot N_{ut} + 0.627 \quad (5.3)$$

$$P_{ss}^{4f} = 3 \cdot 10^{-11} \cdot N_{ut}^{\ 3} - 2 \cdot 10^{-7} \cdot N_{ut}^{\ 2} + 0.0009 \cdot N_{ut} - 0.8929 \quad (5.4)$$

Analisando em detalhe a evolução da percentagem da utilização de frequências nas células, confirma-se o aumento da percentagem de utilização de mais frequências com o aumento da população. Para o caso onde se disponibilizam apenas duas frequências existe um progressivo

aumento da percentagem de células com duas frequências, com o aumento da população. Verifica-se que o aumento da população influencia as percentagens de células que utilizam maior número de frequências, aumentando como era esperado, conforme a Figura 5.4. Os resultados das percentagens de utilização de frequências são apresentados na Figura R.1, Figura R.3 e Figura R.5. Verifica-se que, para a mesma população, a disponibilidade de mais frequências tem influência no número de sectores com apenas uma frequência, aumentando quando se aumenta o número de frequências disponíveis. Este facto decorre do algoritmo de gestão de *handover*, uma vez que quando existem mais frequências, existem mais utilizadores em *hard handover*, implicando menor carga nas células onde estes utilizadores existem, havendo mais sectores onde apenas uma frequência é necessária. Esta consideração para o *hard handover* faz com que, em zonas onde existe muita sobreposição de sectores, os mesmos apresentem menor carga.

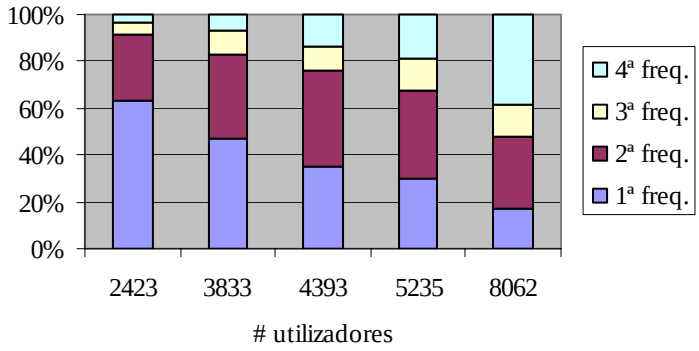


Figura 5.4 – Percentagem de utilização de frequências, média; 144 kbps (PS), carga igual, 4 frequências.

Quanto ao raio dos sectores, verifica-se a concordância com os resultados expostos acima. Tendo sobre análise apenas os resultados da variação da população, mantendo o número de frequências disponíveis, verifica-se que o raio das células tende a diminuir, justificando os valores de P_{ss} obtidos. Por exemplo, admitindo a disponibilidade de quatro frequências, observa-se da Figura Q.11, correspondente ao raio normalizado ordenado, que para 2423 utilizadores aproximadamente 99% dos sectores apresenta raios acima do limiar para a disponibilização de nova frequência. Aumentando o número de utilizadores, a percentagem de sectores que apresentam raio abaixo do limiar pretendido aumenta, como era esperado. Do ponto de vista do operador é necessário tomar uma decisão quando à percentagem de sectores que estejam abaixo do valor limiar, ou decidir quanto à P_{ss} alvo, uma vez que estes parâmetros estão ligados entre si.

5.3 Estratégia da Distância ao *Node B*

Como análise de desempenho é importante comparar várias estratégias para a atribuição de frequências aos utilizadores num contexto de rede hierárquica. Como já foi referido, na aplicação desenvolvida, existe a possibilidade de escolha entre duas estratégias diferentes. Uma vez que já foi analisado o desempenho da rede quando se considera a utilização da estratégia baseada na carga igual, passa-se agora a considerar a utilização da estratégia baseada na distância do utilizador ao *Node B*. Mais uma vez foram traçadas as características representativas da evolução da P_{ss} em função, quer do número de utilizadores, quer das frequências disponíveis. Estas características estão presentes na Figura T.2. Também aqui foram achados polinómios que aproximam as características da evolução da P_{ss} para quatro

frequências, (T.5), (T.6) e (T.7) , com R^2 acima de 0.9980. Uma vez mais os polinómios que aproximam melhor as características são de grau 3. De notar que não se apresentou o polinómio referente à primeira frequência porque é igual ao polinómio da primeira frequência da estratégia de carga igual, pois não há separação de utilizadores pelas frequências. Nesta estratégia observa-se que os ganhos relativos à adição de novas frequências são gradualmente menores com o aumento do número de frequências, o que não acontecia para a estratégia de carga igual devido a flutuações estatísticas.

Verifica-se que existem algumas diferenças em relação à característica resultante da estratégia de carga igual. Com o aumento da população, a P_{ss} tende a ser menor para a estratégia da distância, o que é resultado dos raios dos sectores apresentarem valores menores para a estratégia baseada na carga na maioria dos casos, como se verifica na Tabela 5.3. Com a estratégia baseada na distância as frequências hierarquicamente mais baixas, tendo como função dar cobertura para *handover*, apresentam raios mais elevados pois tendem a ter menos carga que as outras frequências. Assim a estratégia baseada na distância revela-se mais eficiente em termos de raio dos sectores e P_{ss}. Contudo verifica-se que com o aumento da população existe uma gradual aproximação entre os valores do raio normalizado para as duas estratégias e posteriormente a estratégia da carga apresenta raios médios superiores à estratégia da distância. Esta inversão deve-se à descontinuidade da redução do raio, com o aumento da população a estratégia baseada na distância apresenta problemas a nível da atribuição de frequências. Para esta estratégia a carga entre o limiar de cobertura de duas frequências não pode ser distribuída por varias frequências. Assim se esta carga for demasiada para uma frequência nunca será transportada pois o raio será reduzido. Provocando a existência de frequências com carga nula, não correspondendo à capacidade real.

Tabela 5.3 – R_{norm} para diferentes estratégias, 2 frequências e 144 kbps (PS) como serviço de referência.

# Utilizadores	**Raio Normalizado médio Carga Igual**	**Raio Normalizado médio Distância ao *Node B***
2423	0.99	0.99
3833	0.99	0.97
4393	0.96	0.96
5238	0.90	0.94
8062	0.82	0.86

Quanto à evolução da utilização de frequências, Figura R.7, Figura R.9 e Figura R.11 verifica-se mais uma vez que, com a disponibilização de mais frequências, a percentagem de sectores com apenas uma frequência aumenta pelas razões apresentadas anteriormente. Verifica-se que com a utilização desta estratégia os sectores necessitam de menos portadoras. Quando se comparam as percentagens de utilização de portadoras para o mesmo ponto da característica de evolução da P_{ss} , verifica-se que a estratégia baseada na distância apresenta percentagens de utilização de frequências hierarquicamente mais baixas, maiores que a estratégia baseada na carga, quando se dispõe de duas ou três portadoras. Este resultado é consequência de existir menor carga em *soft* e *softer handover* quando se utiliza a estratégia baseada na distância. Uma vez mais afere-se que a forma como são tratadas as ligações de *hard handover* têm influência no desempenho da rede. Quando se utilizam quatro frequências a estratégia da distância já não aparenta ser mais eficiente devido as limitações referidas da redução do raio.

Na presente situação, existe maior ganho relativo à utilização de uma ou duas frequências quando comparada com a outra estratégia, contudo essa situação já não se verifica quando se passa de duas para três frequências ou de três para quatro. Esta situação resulta da eficiência da estratégia. Sendo a estratégia da distância mais eficiente em termos de gestão de carga é normal que se atenuem as diferenças em termos de ganhos relativos. O resultado da melhor gestão da área de cobertura resulta na menor necessidade de adicionar novas frequências.

5.4 Planeamento de Rede

5.4.1 Serviços de referência

É também importante estimar o impacto da utilização de vários serviços de referência. Na análise feita anteriormente, era considerado o serviço 144 kbps (PS) como serviço de referência. Neste ponto serão averiguadas as alterações que a escolha do serviço de referência provoca na rede. Assim, considerando o serviço 64 kbps (PS) como o serviço de referência, foram encontradas as características da evolução da P_{ss} para as duas estratégias de divisão de utilizadores pelas frequências, apresentadas nas Figura T.3 e Figura T.4 e respectivos polinómios, (T.8) a (T.14), com valores de R^2 acima de 0.9994. Aponta-se o facto de (T.10) ser um polinómio de grau 2 uma vez que o polinómio de grau 3 que aproxima a característica apresentava uma zona onde a P_{ss} era negativa, o que é impossível. Quando se considera o serviço de referência 64 kbps (PS), a P_{ss} diminui. Dado que a cobertura máxima da rede é maior para este serviço de referência, existem em média mais utilizadores na rede, o que poderia levar a pensar que aumentasse. Mas uma vez que é possível degradar ainda mais os serviços mais restritivos, resulta que os utilizadores irão ver o seu serviço ser degradado em prol de se manter a área de cobertura.

Verifica-se a existência de maiores percentagens de sectores com raio acima do limiar requerido quando se considera 64 kbps (PS) como serviço de referência, resultante de existirem mais sectores com maior número de frequências. Para o caso em que apenas se disponibiliza uma frequência, a relação entre as percentagens altera-se, apresentando o caso de 144 kbps (PS) maior percentagem de sectores com raio acima do limiar, Figura 5.5. Este facto verifica-se apesar de a P_{ss} continuar a ser menor, uma vez que em geral os sectores que apresentam raios reduzidos pertencerem a zonas onde existe grande sobreposição de *Node B*s e assim apesar da redução do raio dos sectores os utilizadores continuam a ser servidos.

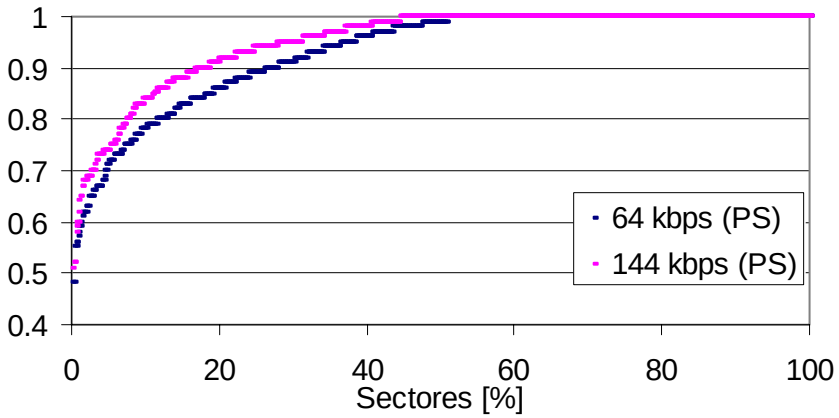


Figura 5.5 – Comparação do raio normalizado entre 144 kbps (PS) e 64 kbps (PS) como serviço de referência, com 1 frequência, 699 utilizadores.

Para o caso em que o serviço de referência é 64 kbps (PS), verifica-se a mesma relação entre a P_{ss} em função da estratégia de divisão de utilizadores pelas frequências que para o caso do 144 kbps (PS), isto é, também aqui a estratégia baseada na distância conduz a P_{ss} menores. Destaca-se a concordância dos resultados apresentados para este serviço de referência em relação às estratégias de atribuição de frequências aos utilizadores. Também aqui se confirma que a estratégia baseada na distância apresenta ganhos relativos em função do número de frequências menores, consequência da melhor gestão da área do sector como foi referido anteriormente. Quanto ao raio dos sectores, é em geral maior para a estratégia baseada na distância quando se dispõe de duas frequências. Com o aumento do número de frequências disponíveis verifica-se que o raio dos sectores tende a ser menor para a estratégia baseada na distância.

É ainda importante analisar o atraso na rede pois uma vez que o serviço de referência é pouco restritivo espera-se que muitos utilizadores sofram atraso. De facto como se pode verificar pela Tabela 5.4, pode afirmar-se que o número de utilizadores que sofrem degradação no ritmo de transmissão é muito maior quando se admite como serviço de referência 64 kbps (PS). Para além do número ser maior para este serviço também o atraso médio dos utilizadores atrasados é maior. Com este serviço de referência é muito difícil utilizar um serviço de 384 kbps (PS) ou mesmo de 144 kbps (PS ou CS). Pode-se concluir assim que, ao adoptar-se por este serviço como serviço de referência, a QoS prestada aos utilizadores será muito baixa. De notar porém que estes valores são resultado das escolhas que foram efectuadas no desenvolvimento da ferramenta de *software*. Se não se reduzisse o ritmo dos utilizadores chegar-se-iam a resultados óptimos em termos de atrasos mas de certo que apareceriam problemas com a redução, para valores muito baixos, dos raios dos sectores e consequentemente aumento da P_{ss}.

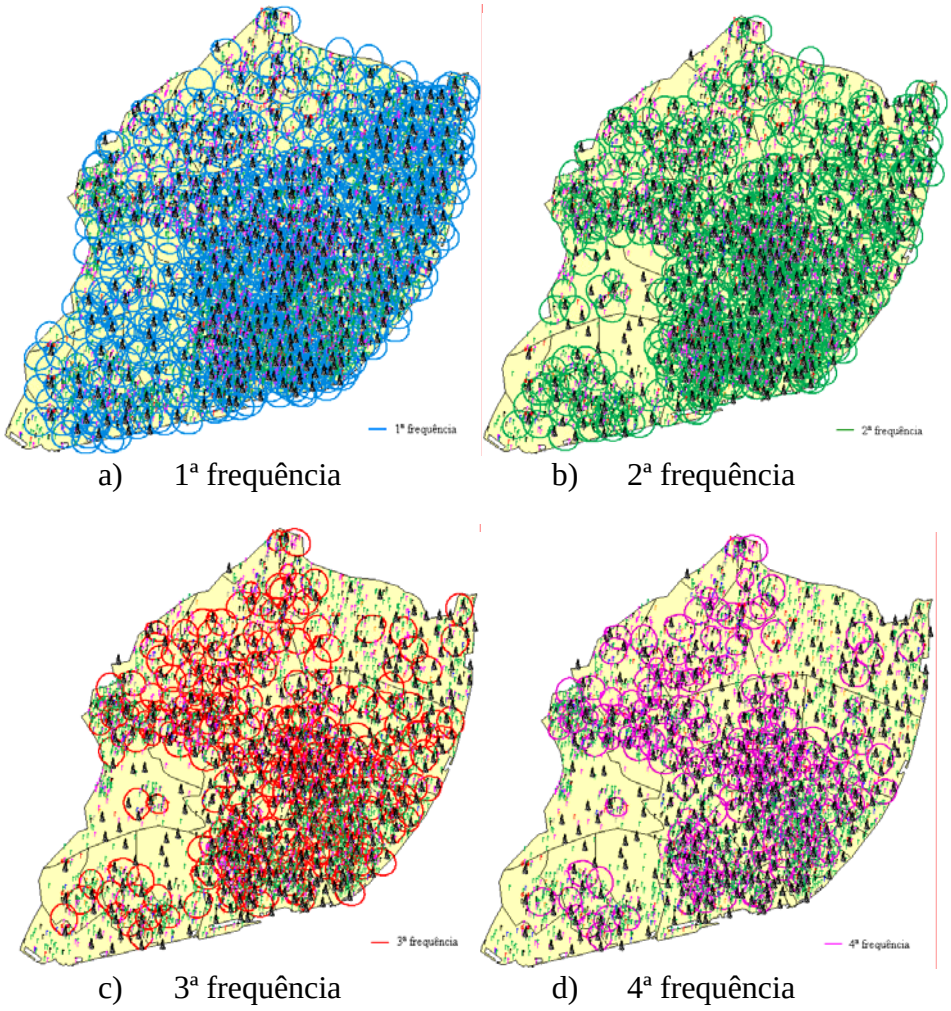
Tabela 5.4 – Percentagem de ligações atrasadas para 4 frequências, carga igual.

# Utilizadores	**Atrasados [%]**	
	64 kbps (PS)	**144 kbps (PS)**
2423	---	82.62
3833	---	80.43
4393	95.66	80.61
5235	95.07	75.86
6659	94.55	---
8062	---	74.70
10914	90.76	---

Após estas considerações pode-se afirmar que a rede deve ser dimensionada tendo como serviço de referência 144 kbps (PS), uma vez que apresenta enormes ganhos em termos de utilizadores atrasados e seu respectivo atraso. Contudo, não se pode descurar a hipótese de utilizar o serviço 64 kbps como serviço de referência, em cenários de utilização em que a penetração de serviços de elevado débito seja muito baixa. Sendo o UMTS um sistema do qual se esperam ritmos elevados, não é bom que não exista quase a possibilidade de se fazer o serviço 384 kbps. Tendo ainda em atenção às campanhas de *marketing*, as quais profetizavam serviços de 2 Mbps, se um utilizador for atrasado sempre que tente fazer um serviço de ritmo elevado, decerto que terá um impacto negativo na imagem do operador. O serviço de referência é muito importante no desempenho da rede e na satisfação dos utilizadores. Assim, tem de existir um balanceamento entre os custos de implementação e os serviços disponíveis.

5.4.2 Análise com base no mapa de cobertura

Passando a uma análise mais detalhada com suporte na área em estudo e suas características, considera-se o serviço de referência 144 kbps (PS), estratégia de divisão de utilizadores baseada na carga, quatro frequências e 5235 utilizadores. A cobertura da rede está apresentada na Figura 5.6. Verifica-se que existem zonas onde não é necessário disponibilizar quatro frequências e zonas onde nem com quatro frequências a capacidade é suficiente. Verifica-se que a área que tem disponível quatro frequências é muito menor que a área total da rede. É possível observar as diferenças em termos de concentração de carga na zona em estudo, as quais resultam na variação de utilização de frequências.



a) 1ª frequência b) 2ª frequência

c) 3ª frequência d) 4ª frequência

Figura 5.6 – Cobertura para as quatro frequências, com 5235 utilizadores, serviço de referência de 144 kbps (PS), carga igual.

Uma das zonas características da cidade de Lisboa é a zona verde de Monsanto, onde se verifica que a densidade de carga gerada nessa zona é em geral suportada por apenas uma frequência com apenas um sector a necessitar de disponibilizar quatro frequências. Nota-se que existe um eixo onde se concentra muita carga impondo grande concentração de sectores que requerem a utilização de quatro frequências. Este eixo corresponde à zona do Marquês de Pombal e Saldanha até Benfica, seguindo depois para norte até à zona do aeroporto. Verifica-se também a necessidade de quatro frequências na zona da Baixa e em Belém. Destaca-se a sobreposição dos *Node Bs*, existindo áreas onde a densidade de *Node Bs* é bastante elevada enquanto que noutras é baixa. De um modo geral, as diferenças na densidade de *Node Bs* de

zona para zona é concordante com as diferenças de densidade no tráfego. Contudo a densidade de *Node Bs* é em muitos casos sobredimensionada. Esta situação aliada ao método utilizado para a disponibilização de frequências, faz com que nas zonas onde existe muita densidade de tráfego, os sectores necessitem de quatro frequências. Uma vez que o raio dos sectores é máximo poder-se-iam retirar alguns *Node Bs* sem que a área de cobertura fosse afectada. Estas afirmações são ainda suportadas pelos resultados obtidos para a percentagem de carga em *soft* e *softer handover*, as quais em especial o *soft handover* apresenta valores em geral acima de 50%, como se verifica na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Factores de Carga em *soft e softer handover*, com serviço de referência 144 kbps (PS), 4 frequências, Carga Igual.

# Utilizadores	η_{SH}		η_{STH}	
	UL	**DL**	**UL**	**DL**
2423	80.07	80.07	23.58	23.59
3833	70.97	70.98	20.65	20.68
4393	71.47	71.46	21.67	21.64
5235	66.48	66.48	21.22	21.18
8062	48.03	48.02	18.73	18.72

Confirma-se que o aumento de frequências não resolve todos os problemas de capacidade, mesmo não considerando as limitações provocadas pela estratégia adoptada para a disponibilização de frequências. Considerando o *Node B* mais a norte verifica-se que por estar isolado os utilizadores serão impossibilitados de fazer *handover*, neste caso seria necessário adicionar mais Node Bs.

5.4.3 Análise para várias distribuições de tráfego

A distribuição de serviços na área varia em função do tempo. É previsto que inicialmente os utilizadores apresentem perfis diferentes do perfil estimado para a rede consolidada. Como o UMTS irá disponibilizar novos serviços que não existem nas redes celulares actuais, leia-se o GSM, o perfil de utilização esperado será o que dá maior ênfase aos serviços de baixo ritmo, como a voz. Posteriormente a penetração de serviços de elevado débito tenderá a crescer, até que eventualmente passem a ser os mais utilizados. Assim, faz todo o sentido analisar a eficiência da rede em função da distribuição de serviços, para o caso onde se dê mais ênfase à voz e outro que dê realce aos serviços de ritmo mais elevado. Pode-se assim fazer um prognóstico quanto à eficiência da rede considerando cenários de utilização diferentes. Não tendo sido feito nenhum estudo adicional, ou prospecção, foram criados dois cenários de utilização que diferem do cenário considerado por omissão na ferramenta *Map UMTS*. Estes novos cenários estão detalhados no Anexo F, onde também está presente o cenário normal. Para melhor se perceber a diferença entre estes cenários apresentam-se nas Figura F.1, Figura F.2 e Figura F.3 onde constam as percentagens de ligações resultantes. Estes apresentam uma percentagem de ligações de voz de 64.63% e 44.25%, diferindo assim dos 54.85% do cenário normal. É esperado que existam maiores diferenças nos resultados para o cenário que dá maior ênfase à voz. Nesta situação é previsto que a P_{ss} diminua pois existe menos carga na rede e eventualmente até uma diminuição na percentagem de ligações atrasadas.

Em relação ao atraso, não é fácil de traçar um prognóstico uma vez que sendo as ligações atrasadas antes de se diminuir o raio do sector, a carga no sector tem muita influência, podendo a carga ser um pouco acima do limiar e com a disponibilização de nova frequência

existir capacidade suficiente para que as ligações de ritmo mais alto não seja atrasadas, ou pelo contrário que nem com a disponibilização de nova frequência exista ainda capacidade para que não ocorra atraso.

Quanto à distribuição que dá menos ênfase à voz, espera-se que a P_{ss} aumente, pois existe maior carga. Uma vez que para este caso não existem grandes diferenças em termos de percentagem de serviços acima do serviço de referência, considerado o 144 kbps (PS), é possível verificar a influência do aumento de carga pois não se aumenta a percentagem de utilizadores para os quais o ritmo pode ser reduzido. Se a penetração do serviço 384 kbps (PS) fosse aumentada em maior percentagem, era esperado que não existissem muitas flutuações no valor de P_{ss}, pois estas ligações seriam de um modo geral degradadas.

Passando então à análise dos resultados, Tabela 5.6 considerando a distribuição que dá maior ênfase à voz, verifica-se como era esperado que a P_{ss} diminui, devido à menor carga gerada pelos utilizadores. Também para esta situação se verifica um aumento do raio médio dos sectores com o aumento do número de frequências, como consequência da maior capacidade dos sectores. Quanto à outra distribuição considerada, verifica-se um aumento da P_{ss} em comparação com a distribuição normal, sendo consequência da diminuição do raio médio dos sectores devido ao aumento da carga na rede. Como era esperado existe maiores diferenças nos valores de P_{ss} quando se comparam as distribuições normal e de maior voz, quando comparado com os valores para a distribuição que dá menos ênfase à voz.

Assim é aconselhável que exista uma boa estimação de tráfego para a penetração de serviços inicial, só assim se poderá não sobre dimensionar a rede. Os resultados revelam que uma outra estratégia tem de ser considerada por si só ou em complemento da disponibilização de novas frequências, uma vez que com o aumento da penetração de serviços de elevado ritmo a capacidade depressa se esgota. É necessário um planeamento de localizações cuidado e ajustado às perspectivas de aumento do tráfego de ritmo elevado.

Tabela 5.6 – Análise da influência da distribuição de tráfego na rede.

# Utilizadores	P_{ss} [%]			Raio Normalizado		
	Normal	**Menos Voz**	**Mais Voz**	**Normal**	**Menos Voz**	**Mais Voz**
2423	0.42	0.96	0.38	0.98	0.97	0.99
3833	1.05	2.07	0.58	0.98	0.96	0.98
4393	1.51	2.22	0.83	0.97	0.96	0.97
5235	2.26	2.68	1.44	0.96	0.95	0.97
8062	8.28	10.79	4.90	0.92	0.91	0.94

5.4.4 Limiares de decisão

Sendo um dos parâmetros com maior destaque nas considerações feitas até aqui é importante não deixar de avaliar a sua influência no desempenho. O parâmetro referido é o limiar de decisão para a disponibilização de nova frequência. Até aqui tem-se considerado a redução do raio até 10% do seu valor máximo. Neste ponto será analisada a rede não uniforme considerando agora uma redução de 20%. Como seria de esperar, nesta situação, a P_{ss} é maior e o raio relativo é menor, em média, como se verifica na Tabela 5.7. Com maior redução do raio, aumenta o número de utilizadores que irão ficar sem serviço e consequentemente

aumenta a P_{ss}, antes de se inserir uma nova frequência. O raio normalizado médio vai ser menor pela consequência óbvia de haver possibilidade de maior redução. Este facto pode ser benéfico se a solução passar por se utilizar um menor número de frequências, em detrimento de utilizadores servidos nas zonas limites da rede, pois a sobreposição de *Node B*s nas zonas interiores é em geral demasiada. Caso contrário, ao pretender-se garantir menor P_{ss} para um maior número de utilizadores e considerando a utilização de maior número de portadoras, a solução de menor redução do raio é a melhor.

Tabela 5.7 – Comparação da P_{ss} e do raio normalizado quando se reduz o raio de 10 e 20%, para 144 kbps como serviço de referência, 4 frequências, Carga Igual.

# Utilizadores	P_{ss}		**Raio Normalizado**	
	Redução 10%	**Redução 20%**	**Redução 10%**	**Redução 20%**
2423	0.42	1.55	0.98	0.95
3833	1.05	1.96	0.98	0.93
4393	1.51	2.86	0.97	0.91
5235	2.26	3.91	0.96	0.90
8062	8.28	11.06	0.92	0.81

Não deixa de ser importante analisar a percentagem de carga em *soft* e *softer handover*, contudo sendo os resultados fruto de apenas uma simulação para cada população, as conclusões a que se pode chegar são apenas as obvias. Com uma maior redução do raio dos sectores verifica-se, Tabela 5.8, que a carga em *soft handover* é em geral menor, existindo contudo alguns resultados que afirmam o contrário, fruto de flutuações estatísticas. A área de sobreposição resultante não é muito diferente quando se comparam os dois casos, logo os resultados tendem a ser muito aproximados. Para a carga em *softer handover*, este resultado também deveria verificar-se mas apenas é verdadeiro para duas das cinco simulações apenas justificável também por flutuações estatísticas. Como a diferença entre a área de sobreposição dos sectores do mesmo *Node B* quando se consideram os dois valores de redução do raio é muito pequena, a carga em *soft handover* deve ser menor para a redução de 20% mas muito aproximada ao valor obtido para a redução de 10%.

Tabela 5.8 – Percentagem de carga em *soft* e *softer handover* para redução de 10% e 20%.

# Utilizadores	**Redução 20%**		**Redução 10%**	
	η_{SH}	η_{STH}	η_{SH}	η_{STH}
2423	80.40	20.96	80.07	23.59
3833	72.40	23.82	70.98	20.68
4393	66.34	21.30	71.46	21.67
5235	61.34	22.08	66.48	21.18
8062	47.18	21.65	48.02	18.72

6 Conclusões

A actualidade das telecomunicações espera ansiosamente pela chegada de uma nova tecnologia, o UMTS. Esta nova tecnologia tem como grande evolução a possibilidade de integração de novos serviços resultante da disponibilidade de ritmos elevados. Para além dos novos serviços disponíveis, esta nova tecnologia difere em muitos outros aspectos das suas antecedentes, nomeadamente é utilizado o WCDMA como meio de acesso múltiplo. Assim os utilizadores são associados a um código que os distingue uns dos outros. Esta característica possibilita assim que todos os utilizadores estejam ligados na frequência. Contudo uma vez que assim acontece, todos os utilizadores causam interferência entre si, pois apesar dos códigos usados serem ortogonais, a propagação multipercurso causa alterações no sinal recebido alterando assim a ortogonalidade dos códigos resultando em interferência. A interferência é sem duvida o maior problema num sistema como o UMTS. As ligações UL e DL são caracterizadas por uma margem de interferência que atesta isso mesmo.

O foco deste trabalho é o planeamento de redes celulares em UMTS e vai de encontro à tendência actual da cada vez maior utilização de ferramentas de *software* que procedem ao planeamento e optimização automáticos. O planeamento automático é executado em muitos casos utilizando ferramentas de SIG, que ao permitirem relacionamento geográfico entre várias camadas de dados, possibilitando grande interacção das características do sistema em análise com a área geográfica onde se procede ao planeamento. Também neste trabalho é utilizada uma ferramenta de SIG para simular e analisar a rede celular, o Map UMTS. Para se proceder de forma mesmo que simplista ao planeamento de redes celulares, existem vários aspectos que não podem deixar de se ter em conta: o modelo de propagação a utilizar, o modelo de tráfego e características técnicas do próprio sistema sem as quais não se procede de forma minimamente realista. Quanto ao modelo de propagação utilizado é o COST 231 – Walfish-Ikegami, o qual tendo em conta que a área em estudo é urbana e as células apresentam raios abaixo do quilómetro, está dentro do seu intervalo de aplicabilidade. O modelo de tráfego foi desenvolvido no âmbito de um projecto de final de curso no IST, e tenta aproximar o tráfego multiserviço para a cidade de Lisboa, área que também neste trabalho é objecto de estudo. Este modelo é o utilizado pela ferramenta Map UMTS.

Foi desenvolvida uma ferramenta em C++ para processar os cálculos, tentando explorar a optimização de código inerente desta linguagem. Desenvolver um simulador de UMTS que tenha em conta todos os parâmetros de funcionamento do sistema é praticamente impossível. Neste trabalho tentou-se desenvolver um simulador com um objectivo bem definido; a caracterização da influência da utilização de redes hierárquicas.

Os resultados obtidos confirmaram que o aumento indiscriminado de frequências não é a solução ideal para um bom planeamento celular, conduzindo apenas a uma área de sobreposição das células que nas redes reais não deve acontecer em virtude da interferência. Verificou-se que a rede analisada apresenta áreas onde a cobertura de uma célula pode sobrepor quase por completo uma outra célula vizinha, claramente um desaproveitamento de recursos. Esta sobreposição também é fruto do método adoptado para a disponibilização de novas portadoras.

A estratégia adoptada para a disponibilização de novas portadoras faz todo o sentido quando se considera uma rede uniforme. Contudo, para uma rede não uniforme uma outra estratégia baseada na carga em *soft handover* em complemento da redução do raio seria a mais indicada.

Às células em que o raio fosse reduzido abaixo do limiar requerido apenas seria disponibilizada outra frequência se a percentagem de carga em *soft handover* fosse abaixo de um limiar. Um limiar adequado para a carga em *soft handover* seria da ordem dos 20%, o qual proporcionaria que existisse uma sobreposição adequada das células.

Quanto às duas estratégias de divisão de utilizadores pela rede, chegou-se a conclusão que a estratégia baseada na distância apresenta em geral melhores resultados em termos de utilizadores servidos e menor número de portadoras por sector. Contudo este resultado não deve ser extrapolado para outras redes, uma vez que a localização dos *Node Bs* e dos utilizadores têm influência nestes resultados, podendo existir casos onde o contrário se verifique.

Utilizando dois serviços de referência diferentes, a rede apresenta algumas diferenças quanto à utilização de frequências, sendo menor para o caso do serviço 64 kbps (PS), mas por outro lado o atraso que sofrem as ligações de ritmos elevados é muito maior com este serviço de referência. Apenas se aconselha a utilização deste serviço de referência em zonas onde a penetração de serviços de elevado débito seja baixa, como por exemplo na fase inicial de operação da rede onde não se espera grande afluência de serviços de elevado débito. Ao considerar-se o serviço de referência 64 kbps (PS), a P_{ss} alvo de 2% quando se disponibilizam quatro frequências e se considera a estratégia de carga igual, é atingida para uma população de aproximadamente 7000 utilizadores. No caso de só haver uma frequência disponível, a P_{ss} alvo é atingida para um número de utilizadores pouco maior que 1 000. para o serviço de referência de 144 kbps (PS) e estratégia de carga igual, obtém-se uma P_{ss} de aproximadamente 2% com cerca de 5 000 utilizadores quando se têm disponíveis quatro frequências. À medida que se reduz o número de portadoras, o número de utilizadores que a rede suporta diminui de modo a garantir os mesmos 2% de utilizadores sem serviço. No caso extremo em que só se utiliza uma frequência, a rede apresenta já P_{ss} muito acima de 2% para uma população de 1 000 utilizadores.

Aliada ao serviço de referência está a QoS que é um dos aspectos que irá trazer maiores problemas às redes UMTS pois é uma questão que não passa apenas pela rede rádio mas também pela rede *core*. Contudo, o desempenho da rede *core* não é objecto de estudo neste trabalho. Verificou-se que para dar boa QoS a utilizadores de serviços de ritmo elevado é necessária a disponibilização de um grande número de frequências.

O impacto de varias distribuições de tráfego foi também analisado. Foram considerados dois casos distintos, um em que se dá maior ênfase ao serviço voz e outro em que o mesmo é descurado. Verificaram-se maiores diferenças para o caso em que a voz tem um papel mais significativo, uma vez que ao diminuir a carga média de cada utilizador a rede pode servi-los em maior número. Por exemplo considerando 144 kbps (PS) como serviço de referência e estratégia de carga igual, para uma população de 5235 utilizadores obteve-se P_{ss} = 1.44 para a distribuição que dá maior ênfase à voz e P_{ss} = 2.68 para o caso contrário.

No simulador não é considerada a carga excedente de sinalização provocada pelos *handovers*. Esta situação é uma grande limitação uma vez que pela análise dos resultados existe normalmente em média mais de 50% da carga em *soft handover*, resultado este provocado pela sobreposição das células. Os resultados mostram que o *hard handover* tem muita

influência na carga da rede. O modo como são tratados os utilizadores em *hard handover* não é o mais adequado à realidade, pois fá-lo depender da identidade do *Node B* ao qual o utilizador irá estar ligado. Numa rede real um utilizador que esteja em *hard handover* deve ligar-se ao *Node B* que proporcione menor atenuação de propagação, ou de outro modo ao *Node B* que apresente menor carga. Em geral o utilizador irá estar sempre ligado ao *Node B* do qual recebe mais potência existindo apenas o caso que o utilizador está na iminência de fazer *handover* por existir uma outra ligação que proporciona maior potência. No algoritmo desenvolvido o facto do utilizador estar ligado a um *Node B* e não ser retirado posteriormente, economiza muitos cálculos uma vez que não é necessário voltar a recalcular os parâmetros de todos os sectores onde o utilizador está ligado, (não esquecer que o utilizador irá mudar de frequência), e consequentemente a rede toda. Negligenciando a gestão do *hard handover,* ganha-se tempo de simulação descurando a exactidão dos resultados. Contudo, não é simples a quantificação do erro introduzido pelo algoritmo pois os resultados dependem da localização dos utilizadores, dos *Node Bs* e do número de frequências disponíveis. A todas estas condições existe ainda uma outra que não deve ser esquecida quando se considera a rede não uniforme, a identidade dos *Node Bs* utilizados não é sequencial em termos das localizações, i.e., os *Node Bs* de identidades numericamente seguidas não estão em geral vizinhos. Assim é praticamente impossível a quantificação do erro introduzido. Espera-se contudo que estes factores não actuem todos de modo majorante no erro.

Como trabalho futuro é sugerido que se reformule a estratégia de disponibilização de novas portadoras conforme as considerações acima traçadas. A redefinição do modo como se tratam os *hard handover* também seria interessante. Assim poder-se-ia estimar de uma forma mais aproximada e realista a operação de uma rede celular hierárquica.

Anexo A UTRA TDD

Enquanto que em modo FDD é necessária a utilização de bandas emparelhadas (uma para UL e outra para DL), no modo TDD apenas uma banda é necessária. Este modo opera sobre uma estrutura de tramas de 10 ms [HoTo00], com 15 *time-slots* (TS) cada. Na Europa estão reservadas as seguintes bandas para a operação em TDD: de 1 900 MHz a 1 920 MHz, e de 2 010 MHz a 2 025 MHz. A existência de propagação multi-percurso torna necessário o uso de tempos de guarda em cada TS para distinguir as direcções de propagação (UL e DL). É necessário sincronismo entre os *Node Bs* que operam no modo TDD, para que a interferência entre UL e DL seja também reduzida. A estrutura de tramas permite a atribuição de vários TS para a mesma direcção possibilitando assim um grande controlo sobre tráfego assimétrico. Existe no entanto, um máximo de assimetria para cada direcção, UL ou DL. Para UL é 2:13, pois dois TS são guardados para DL (canal de sincronismo), enquanto que para DL é 1:14 ficando um TS guardado para instrução de acesso. Uma vez que no modo TDD se usa a mesma frequência, o efeito do desvanecimento rápido é o mesmo para as duas direcções de propagação permitindo ao transmissor estimar o desvanecimento que vai afectar a sua transmissão. Assim o controlo de potência é feito a um ritmo menor (100 Hz a 200 Hz para UL e menor que 800 Hz para DL) que em FDD (1 500 Hz).

A descontinuidade da transmissão afecta a potência média de transmissão de um factor redutor de $10 \times \log_{10}(n/15)$, onde n é o número de TS activos por trama. Assim a cobertura de um *Node B* em modo TDD é menor que em FDD. Mas com o aumento do ritmo binário a diferença entre os dois modos reduz-se. As características do modo TDD apontam para a sua utilização em células pequenas (pico), em áreas onde o tráfego estimado seja de serviços de elevado débito binário, e muito assimétrico.

Uma vez que a área coberta pelos *Node Bs* em modo TDD é menor que em modo FDD, para além de se considerar interferência TDD-TDD também se deve analisar a interferência entre FDD e TDD. Há que ter em atenção que a banda de UL em FDD também pode ser utilizada em modo TDD.

A interferência TDD-TDD entre UL e DL pode ocorrer se os *Node Bs* não estivem sincronizados, ou se o factor de assimetria em UL e DL for diferente entre células adjacentes. Mesmo considerando portadoras diferentes, se as bandas forem adjacentes também pode existir interferência. Podem ocorrer três casos de interferência: entre terminais; entre *Node Bs*; e entre terminal e *Node B*. A interferência entre o terminal e o *Node B* é a mesma quer se opere em TDD ou FDD. Entre terminais ocorre interferência sempre que um transmite e o outro recebe ao mesmo tempo. Existem duas formas para contornar este tipo de interferência, podendo-se utilizar atribuição de canais dinâmica (DCA) e controlo de potência. Por seu turno a interferência entre os *Node Bs* depende da atenuação de percurso entre as duas estações e pode ser controlada através de planeamento. Existe ainda um problema adicional se existirem outros *Node Bs* de outro operador TDD próximos, só resolúvel através da cooperação entre operadores no planeamento. Mais uma vez direcciona-se para uma utilização de *Node Bs* em modo TDD em ambientes interiores ou em micro/pico células.

Uma vez que existem bandas adjacentes destinadas a TDD e FDD, a implementação de um sistema não deve ser realizada sem ter em conta factores de interferência resultantes das operações nos dois modos. A interferência entre dois *Node Bs* a operarem em modos diferentes (TDD e FDD) pode impossibilitar por completo a comunicação se não forem

satisfeitos requisitos mínimos, apresentados na Tabela A.1. Estes requisitos eliminam por completo a hipótese de colocação de *Node Bs* a operarem em modos diferentes no mesmo local, possibilidade que reduziria os custos. Este problema é mais facilmente controlado utilizando potências baixas, isto é, células mais pequenas.

Entre um terminal em modo TDD e um *Node B* em modo FDD a interferência é genericamente a mesma que a causada por um terminal em FDD numa banda adjacente à utilizada pelo *Node B*. Existe porém uma diferença: não existe interferência em DL, uma vez que as bandas já não são adjacentes. Esta interferência é ultrapassada reduzindo a sensibilidade do receptor (em pico células não implica a redução da área coberta), ou inviabilizar a aproximação do terminal ao *Node B* (através da localização, aquando do planeamento). Ao contrário da UTRA FDD, a co-localização de *Node Bs* (neste caso em modos diferentes) não resolve o problema. A interferência entre um *Node B* em modo TDD e um terminal em modo FDD é da mesma forma superada que a descrita anteriormente existindo ainda outra forma de a reduzir através de *handover*. Por fim existem ainda a interferência entre terminais em modos diferentes, podendo ser superada através de controlo de potência e *handover*. A gravidade deste tipo de interferência depende da potência de transmissão do terminal em modo FDD. Existe mais interferência se o terminal emitir muita potência. Uma vez que o posicionamento relativo dos *Node Bs* tem influência na potência transmitida dos terminais, através de um bom planeamento este tipo de interferência pode ser reduzido.

Tabela A.1 – Análise de perdas de acoplamento entre *Node Bs* TDD e FDD em frequências adjacentes a 1 920 MHz (extraído de [HoTo00]).

Potência de transmissão do *Node B* em TDD	24 / 43 dBm
Relação de potência entre canais adjacentes	-45 dBc
Isolamento entre antenas	-30 dB
Potência fora de banda recebida no *Node B* em FDD	-51 / -32 dBm
Potência fora de banda permitida	-110 dBm
Atenuação requerida	59 / 78 dB

Podem-se agora tirar algumas elações para o planeamento: é necessário sincronismo entre os *Node Bs* e entre os *Node Bs* inter-operadores se existirem em locais próximos; a disponibilização de capacidade assimétrica não é possível independentemente para cada célula; é necessário usar atribuição dinâmica de canais (DCA), para reduzir a interferência na banda TDD; a interferência entre a banda TDD e a banda de UL FDD pode ocorrer e não é evitada através de DCA; *handover* entre modos e entre frequências pode reduzir a interferência; não é possível a utilização do mesmo local para albergar *Node Bs* TDD e FDD; a existência dos dois modos pode afectar a cobertura em UL em FDD e a QoS em TDD. Existem muitas vantagens em utilizar os dois modos em complemento mas é necessário um planeamento muito cuidadoso.

Anexo B Cálculo de balanços de potência

Segundo [Corr02], a atenuação de propagação depende do sentido da ligação, sendo

$$L_{p[dB]} = EIRP_{[dBm]} - P_{r[dBm]} + G_{r[dBi]} \quad \text{(B.1)}$$

onde $EIRP$ (*Equivalent Isotropic Radiated Power*) é para UL

$$EIRP_{[dBm]} = P_{Tx[dBm]} + G_{e[dBi]} - L_{u[dB]} \quad \text{(B.2)}$$

com

- $P_{Tx[dBm]}$ a potência emitida
- $G_{e[dBi]}$ o ganho da antena
- $L_{u[dB]}$ as perdas provocadas pela presença do utilizador

enquanto que para DL

$$EIRP_{[dBm]} = P_{Tx[dBm]} - L_{c[dB]} + G_{e[dBi]} \quad \text{(B.3)}$$

onde

- $L_{c[dB]}$ é a atenuação no guia entre a antena e o emissor

O ganho da antena de recepção, G_r, vem alterado caso se use diversidade. Actualmente a tecnologia apenas permite o uso de diversidade nos *Node B*. O ganho total com diversidade é então para UL

$$G_{r_div[dB]} = G_{r[dBi]} + G_{div[dB]} \quad \text{(B.4)}$$

A potência aos terminais do receptor depende igualmente do sentido da ligação, para UL tem-se

$$P_{Rx[dBm]} = P_{r[dBm]} - L_{c[dB]} \quad \text{(B.5)}$$

e para DL

$$P_{Rx[dBm]} = P_{r[dBm]} - L_{u[dB]} \quad \text{(B.6)}$$

sendo

- $P_{r[dBm]}$ a potência recebida aos terminais da antena

Os valores típicos utilizados actualmente, segundo [ETSI01], [HoTo00] e [CaCo02], para algumas das grandezas introduzidas estão presentes na Tabela B.1.

A QoS predeterminada, impõe a potência mínima no receptor, i.e., a sensibilidade (B.7). Então a sensibilidade depende do serviço, pois como já foi supra mencionado serviços diferentes dependem de QoS diferentes. Da dependência do valor da sensibilidade com o

serviço são esperados raios máximos das células diferentes para cada serviço. O valor da sensibilidade é de extrema importância e revela o impacto de determinado cenário na rede, quanto menor for o seu valor maior será o impacto na rede (reflectindo-se num decréscimo do raio da célula).

$$P_{Rx\min[dBm]} = N_{[dBm]} - G_{p[dB]} + \left(E_b / N_0\right)_{[dB]} \tag{B.7}$$

com

- N a potência total de ruído
- E_b / N_0 energia de bit sobre a densidade espectral de ruído.

Tabela B.1 – Valores típicos de alguns parâmetros (adaptado de [VaCa02]).

Parâmetro		**Valor típico**	
		UL	**DL**
$P_{Tx\max}$ [dBm]		[10;33]	[20;43]
G_e [dBi]		0	18.5
L_c [dB]		2	2
L_u [dB]	Voz	3	3
	Dados	1	1
G_r [dBi]		18.5	0
G_{div} [dB]		0	-
F [dB]		5	9

Os valores típicos de E_b / N_0, segundo [MOME03] são apresentados na Tabela B.2, onde se consideram velocidades de 3 km/h e 50 km/h para utilizadores pedestres e veiculares respectivamente.

A potência de ruído total no receptor, N, tem em conta a o ruído térmico assim como a interferência causada pela presença de outros utilizadores. Uma vez que em CDMA o factor de reutilização de frequência é unitário, todos os utilizadores causam interferência entre si.

$$N_{[dBm]} = N_{0[dBm]} + M_{I[dB]} \tag{B.8}$$

com

- N_0 a potência de ruído média
- M_I a margem de interferência

A potência de ruído média depende da largura de banda do sinal e do factor de ruído do receptor, sendo dada por

$$N_{0[dBm]} = -174 + 10\log\left(\Delta f_{[Hz]}\right) + F_{[dB]} \tag{B.9}$$

onde

- Δf é a largura de banda do sinal, que em UMTS deve ser tomada igual a R_c, o ritmo de codificação
- F é o factor de ruído do receptor

Tabela B.2 - Valores de E_b / N_0 para diferentes serviços (adaptado de [MOME03]).

Serviço	**Tipo de comutação**	**Tipo de utilizador**	E_b / N_0 **[dB]**	
			Direcção da ligação	
			UL	**DL**
12.2	CS	Interior	5.5	7.5
		Pedestre	5.5	7.5
		Veicular	6.5	8.1
64	CS	Interior	4.1	6.7
		Pedestre	4.2	6.7
		Veicular	5.2	7.3
64	PS	Interior	4.3	6.0
		Pedestre	4.3	6.0
		Veicular	5.7	7.3
144	CS	Interior	3.5	5.1
		Pedestre	3.7	6.2
		Veicular	4.1	6.6
144	PS	Interior	4.3	6.0
		Pedestre	4.5	6.0
		Veicular	5.6	7.1
384	PS	Interior	1.7	3.7
		Pedestre	1.9	3.9
		Veicular	3.5	5.5

Relacionando a sensibilidade com a atenuação de percurso pode estimar-se o raio da célula, correspondendo ao raio máximo para predeterminadas probabilidades de bloqueio e QoS. Assim, a atenuação de propagação máxima dependente do sentido da ligação, vem dada por

$$L_{\max[dB]} = EIRP_{[dBm]} - P_{Rx\min[dB]} + G_{r[dBi]} - M_{[dB]} \tag{B.10}$$

As características do meio de propagação assim como a possibilidade de *soft handover* estão contabilizadas na margem de segurança

$$M_{[dB]} = M_{F\,SF[dB]} + M_{F\,FF[dB]} + L_{\text{int}[dB]} - G_{SH[dB]} \tag{B.11}$$

onde

- $M_{F\,SF}$ é a margem de desvanecimento lento
- $M_{F\,FF}$ é a margem de desvanecimento rápido
- L_{int} é a atenuação de penetração em interiores
- G_{SH} é o ganho de *soft handover*

Para além da distância entre emissor e receptor é necessário contabilizar ainda as variações em torno do valor médio da potência, provocadas pela mobilidade do utilizador, pela diversidade multi-percurso e pelas características do meio de propagação. A estas flutuações chama-se desvanecimento, podendo ser rápido (com períodos entre a fracção de segundo e alguns minutos) ou lento (com períodos de algumas horas) [Sale00]. O desvanecimento

rápido pode ser estimado pela distribuição de Rayleigh [HoTo00], podendo ser compensado através de controlo de potência para utilizadores que se desloquem a velocidades baixas. Para este tipo de desvanecimento deve-se guardar uma margem de 2 a 5 dB. O desvanecimento lento pode ser bem caracterizado por uma distribuição log-normal. Segundo os resultados apresentados em [VaCa02], considerando uma potência média de recepção de 40 dBm a uma distância de 1 km do *Node B* situado a 25 m de altura, com altura média dos edifícios de 24 m, apresenta-se a Figura B.1. Para uma percentagem de 95% de zonas cobertas, deve-se guardar uma margem de segurança de 5.67 dB para compensar o desvanecimento lento. Não se justifica aumentar a percentagem de cobertura pois seria demasiado dispendioso, não reflectindo melhorias significativas no desempenho da rede.

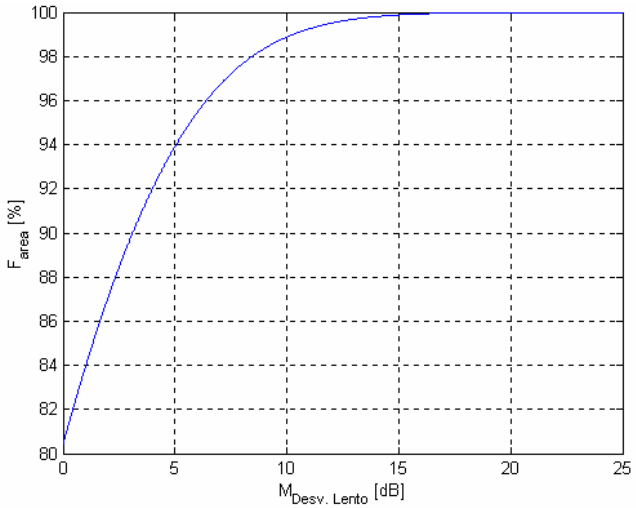


Figura B.1 – Percentagem de zonas cobertas em função da margem de desvanecimento, para o modelo de Walfisch-Ikegami (extraído de [VaCa02]).

Os valores típicos de alguns dos parâmetros comuns aos dois sentidos da ligação são apresentados na Tabela B.3.

Tabela B.3 – Valores típicos de alguns parâmetros (extraído de [VaCa02]).

Parâmetro		**Valores Típicos**
M_I [dB]		3.00
$M_{F\,SF}$ [dB]		5.67
$M_{F\,FF}$ [dB]	Interior	9.10
	Pedestre	9.10
	Veicular	<5.90
G_{SH} [dB]		2.00
L_{int} [dB]	Interior	20.00
	Pedestre	0.00
	Veicular	8.00

Pode-se assim, através do modelo de propagação adoptado, estimar o raio máximo da célula, correspondendo à distância entre receptor e emissor à qual corresponde o valor da atenuação máxima, tendo em conta os valores da Tabela B.4.

Tabela B.4 – Sensibilidade, margem de segurança, atenuação de propagação máxima e distância máxima para os vários serviços disponibilizados (adaptado de [VaCa02]).

Serviço [kbps]	**Tipo de Ligação**	*EIRP* **[dBm]**	G_r **[dBi]**	**Tipo de Utilizador**	$P_{Rx\,\min}$ **[dBm]**	*M* **[dB]**	$L_{p\,\max}$ **[dB]**	$dist_{\max}$ **[km]**
12.2 (CS)	UL	27.0	18.5	Interior	-119.6	32.8	**132.4**	**0.344**
				Pedestre	-119.6	12.8	**152.4**	**1.155**
				Veicular	-118.6	17.6	**146.6**	**0.813**
	DL	56.5	-3.0	Interior	-113.6	32.8	**134.4**	**0.353**
				Pedestre	-113.6	12.8	**154.4**	**1.186**
				Veicular	-113.0	17.6	**149.0**	**0.855**
64 (CS)	UL	29.0	18.5	Interior	-113.8	32.8	**128.6**	**0.273**
				Pedestre	-113.7	12.8	**148.5**	**0.912**
				Veicular	-112.7	17.6	**142.7**	**0.642**
	DL	58.5	-1.0	Interior	-107.2	32.8	**132.0**	**0.305**
				Pedestre	-107.2	12.8	**152.0**	**1.025**
				Veicular	-106.6	17.6	**146.6**	**0.739**
64 (PS)	UL	29.0	18.5	Interior	-113.6	32.8	**128.4**	**0.270**
				Pedestre	-113.6	12.8	**148.4**	**0.907**
				Veicular	-112.2	17.6	**142.2**	**0.623**
	DL	58.5	-1.0	Interior	-107.9	32.8	**132.7**	**0.318**
				Pedestre	-107.9	12.8	**152.7**	**1.070**
				Veicular	-106.6	17.6	**146.6**	**0.739**
144 (CS)	UL	29.0	18.5	Interior	-110.9	32.8	**125.6**	**0.229**
				Pedestre	-110.7	12.8	**145.4**	**0.760**
				Veicular	-110.3	17.6	**140.2**	**0.554**
	DL	58.5	-1.0	Interior	-105.3	32.8	**130.0**	**0.272**
				Pedestre	-104.2	12.8	**148.9**	**0.854**
				Veicular	-103.8	17.6	**143.7**	**0.623**
144 (PS)	UL	29.0	18.5	Interior	-110.1	32.8	**124.8**	**0.218**
				Pedestre	-109.9	12.8	**144.6**	**0.724**
				Veicular	-108.8	17.6	**138.7**	**0.506**
	DL	58.5	-1.0	Interior	-104.4	32.8	**129.1**	**0.257**
				Pedestre	-104.4	12.8	**149.1**	**0.864**
				Veicular	-103.3	17.6	**143.2**	**0.604**
384 (PS)	UL	29.0	18.5	Interior	-108.5	32.8	**123.2**	**0.197**
				Pedestre	-108.3	12.8	**143.0**	**0.654**
				Veicular	-106.7	17.6	**136.6**	**0.444**
	DL	58.5	-1.0	Interior	-100.2	32.8	**124.9**	**0.199**
				Pedestre	-100.2	12.8	**144.9**	**0.667**
				Veicular	-99.1	17.6	**139.0**	**0.467**

Anexo C Modelo de propagação COST 231 – Walfisch-Ikegami

A atenuação de percurso é estimada através de modelos de propagação empíricos, no caso de não se ter informação sobre a área em estudo em vez de se utilizarem modelos semi-determinísticos. Nesta secção é apresentado o modelo empírico COST 231 – Walfisch-Ikegami [DaCo99]. Os parâmetros de entrada deste modelo são:

- $h_{node\ B}$ a altura do *Node B* [m]
- h_{Edif} a altura dos edifícios [m]
- h_{UE} a altura do UE [m]
- w a largura das ruas [m]
- f a frequência [MHz]
- *dist* a distância entre emissor e receptor [km]
- b a separação entre edifícios [m]
- ψ o ângulo de orientação da rua [º]

São recomendados os seguintes valores típicos

- b entre 20 a 50 m
- $w = b/2$
- $h_{Edif} = 3 \times [\text{número de andares}] + \text{telhado}$
- $\psi = 90$ º

A atenuação de percurso em linha de vista (LoS, *Line of Sight*) é

$$L_{p[dB]} = 42.6 + 26 \cdot \log dist + 20 \cdot \log f \tag{C.1}$$

Enquanto que para o caso em que não existe linha de vista (NLoS, *Non Line of Sight*)

$$L_{p[\text{dB}]} = \begin{cases} L_{0[\text{dB}]} + L_{tt[\text{dB}]} + L_{tm[\text{dB}]}, L_{tt} + L_{tm} > 0 \\ L_{0[\text{dB}]} \qquad\qquad\qquad\qquad , L_{tt} + L_{tm} \le 0 \end{cases} \tag{C.2}$$

onde

- L_0 é a atenuação de espaço livre
- L_{tm} é a atenuação devido aos telhados e a rua
- L_{tt} é a atenuação devido às multilâminas

$$L_{0[\text{dB}]} = 32.44 + 20\log\left(dist_{[\text{km}]}\right) + 20\log\left(f_{[\text{MHz}]}\right) \tag{C.3}$$

$$L_{tt[\text{dB}]} = L_{bsh[\text{dB}]} + k_a + k_d \log\left(dist_{[\text{km}]}\right) + k_f \log\left(f_{[\text{MHz}]}\right) - 9\log\left(w_B\right) \tag{C.4}$$

com

- L_{bsh} é dada por
- k_a corresponde a perdas devido ao *Node B* estar abaixo do nível dos edifícios
- k_d e k_f representam respectivamente a dependência das perdas por difracção multilâmina com a distância e a frequência, conforme

$$L_{bsh[dB]}\begin{cases}-18\log(1+\Delta h_{node\,B}), h_{node\,B} > h_{Edif}\\ 0 \qquad\qquad\qquad\quad , h_{node\,B} \le h_{Edif}\end{cases} \tag{C.5}$$

com

$$\Delta h_{node\,B} = h_{node\,B} - h_{Edif} \tag{C.6}$$

$$k_a = \begin{cases}54 & , h_{node\,B} > h_{Edif}\\ 54 - 0.8\cdot\Delta h_{node\,B} & , dist \ge 0.5\text{km}\\ 54 - 1.6\cdot\Delta h_{node\,B}\cdot dist_{[\text{km}]} & , dist < 0.5\text{km}\end{cases} \quad h_{node\,B} \le h_{Edif} \tag{C.7}$$

$$k_d = \begin{cases}18 & , h_b > H_B\\ 18 - 15\dfrac{h_b - H_B}{H_B} & , h_b \le H_B\end{cases} \tag{C.8}$$

$$L_{tm} = -16.9 - 10\cdot\log w + 10\cdot\log f + 20\log(h_{Edif} - h_{UE}) + L_{ori} \tag{C.9}$$

em que

$$L_{ori[\text{dB}]} = \begin{cases}-10 + 0.354\cdot\Psi & , 0^\circ \le \Psi < 35^\circ\\ 2.5 + 0.075\cdot(\Psi - 35) & , 35^\circ \le \Psi < 55^\circ\\ 4.0 - 0.114\cdot(\Psi - 55) & , 55^\circ \le \Psi \le 90^\circ\end{cases} \tag{C.10}$$

A validade dos resultados só pode ser assegurada se os parâmetros satisfizerem as condições de aplicabilidade conforme a Tabela C.1. Segundo estas condições o uso deste modelo é aconselhado a áreas urbanas onde a probabilidade de ocorrer LoS é baixa e uma vez que o intervalo de aplicabilidade para o caso NLoS comporta os raios esperados para os diferentes tipos de células. Para finalizar a exposição deste modelo salientam-se alguns aspectos relevantes para o trabalho. Como é natural a atenuação cresce com o aumento da distância entre emissor e receptor. Os resultados retirados de [VaCa02] mostram que a sua variação com a distância é muito rápida para distâncias pequenas, até 1 km, reduzindo-se para distâncias maiores. Verifica-se também que a variação com a frequência por seu turno é pouco acentuada, não existindo variações significativas para distâncias abaixo dos 500 m e acima são da ordem de 1 dB entre bandas emparelhadas em FDD e entre as duas bandas do modo TDD.

Tabela C.1 – Intervalos de aplicabilidade do modelo COST 231 Walfisch-Ikegami (adaptado de [DaCo99]).

Frequência, f		800 a 2000 MHz
Distância, *dist*	NLoS	0.02 a 5 km
	LoS	0.02 a 0.2 km
Cota do *Node B*, $h_{node\,B}$		4 a 50 m
Cota do UE, h_{UE}		1 a 3 m

Anexo D Diagrama de radiação da antena

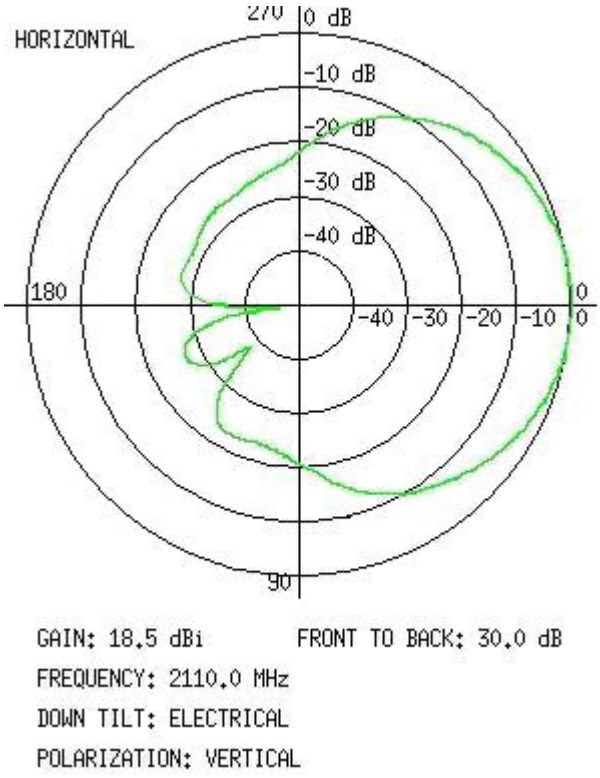


Figura D.1 – Diagrama de radiação

Anexo E Fluxogramas

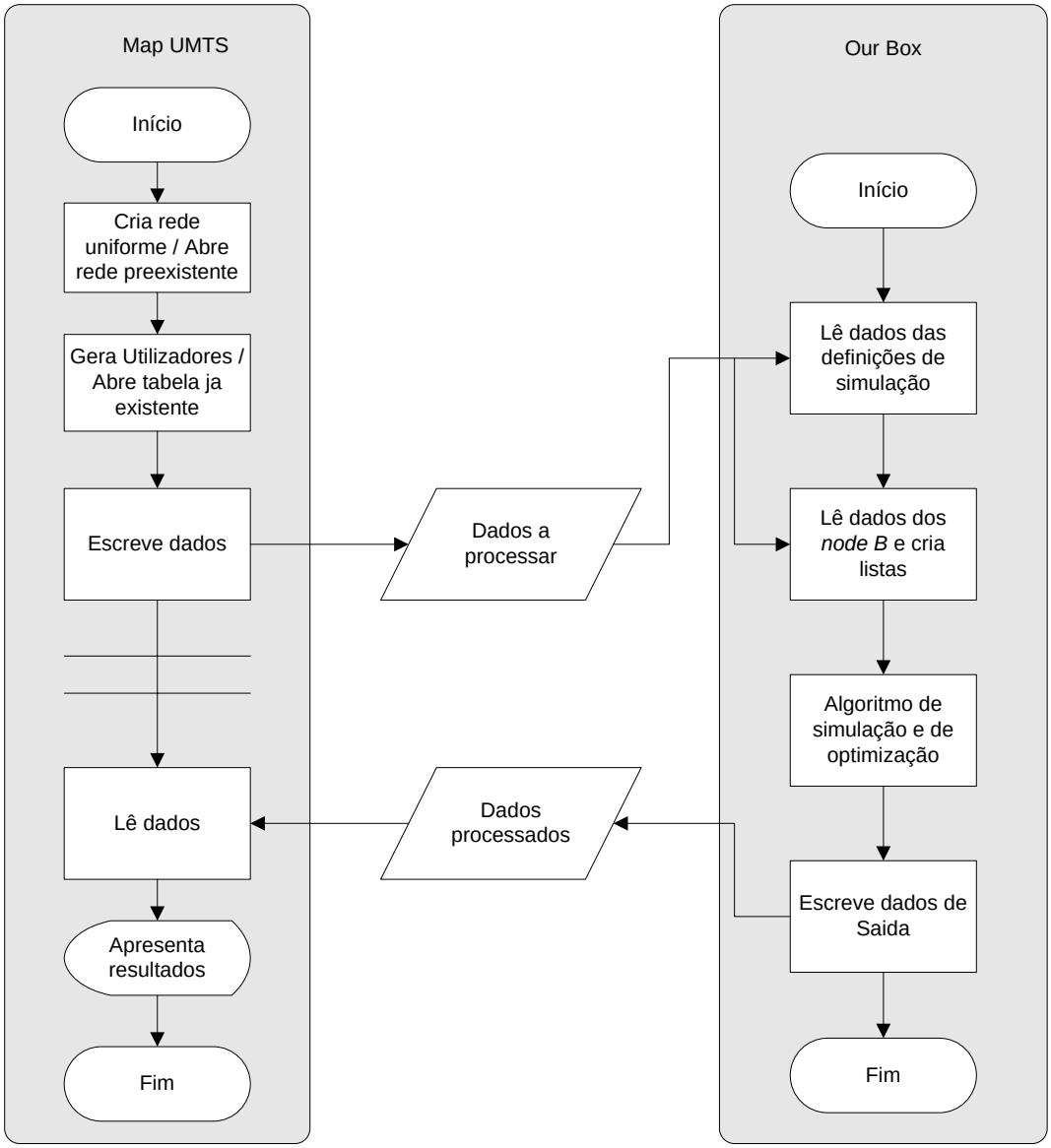


Figura E.1 – Fluxograma representativo da interacção entre as aplicações Map UMTS e Our Box.

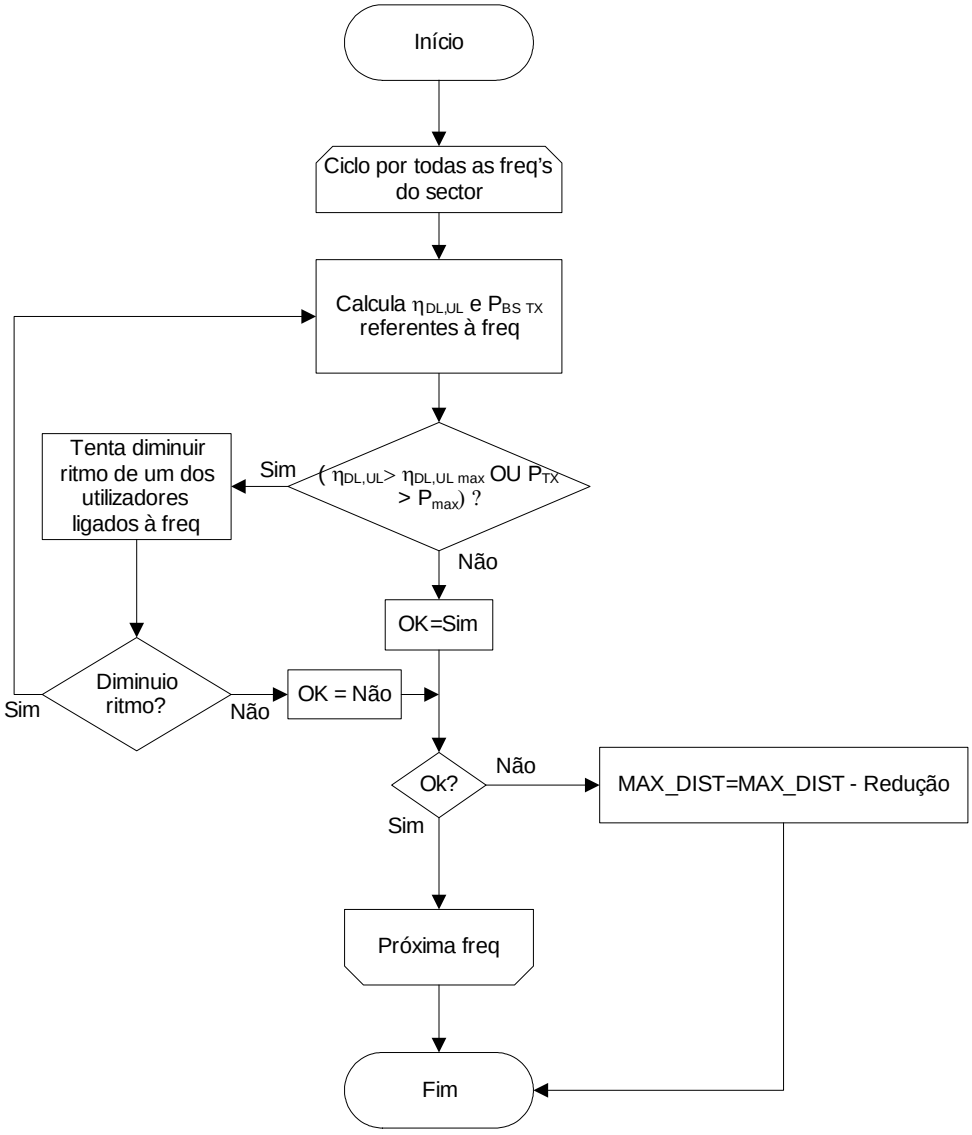


Figura E.2 – Fluxograma representativo do teste aos limites de cargas e potência e redução do raio.

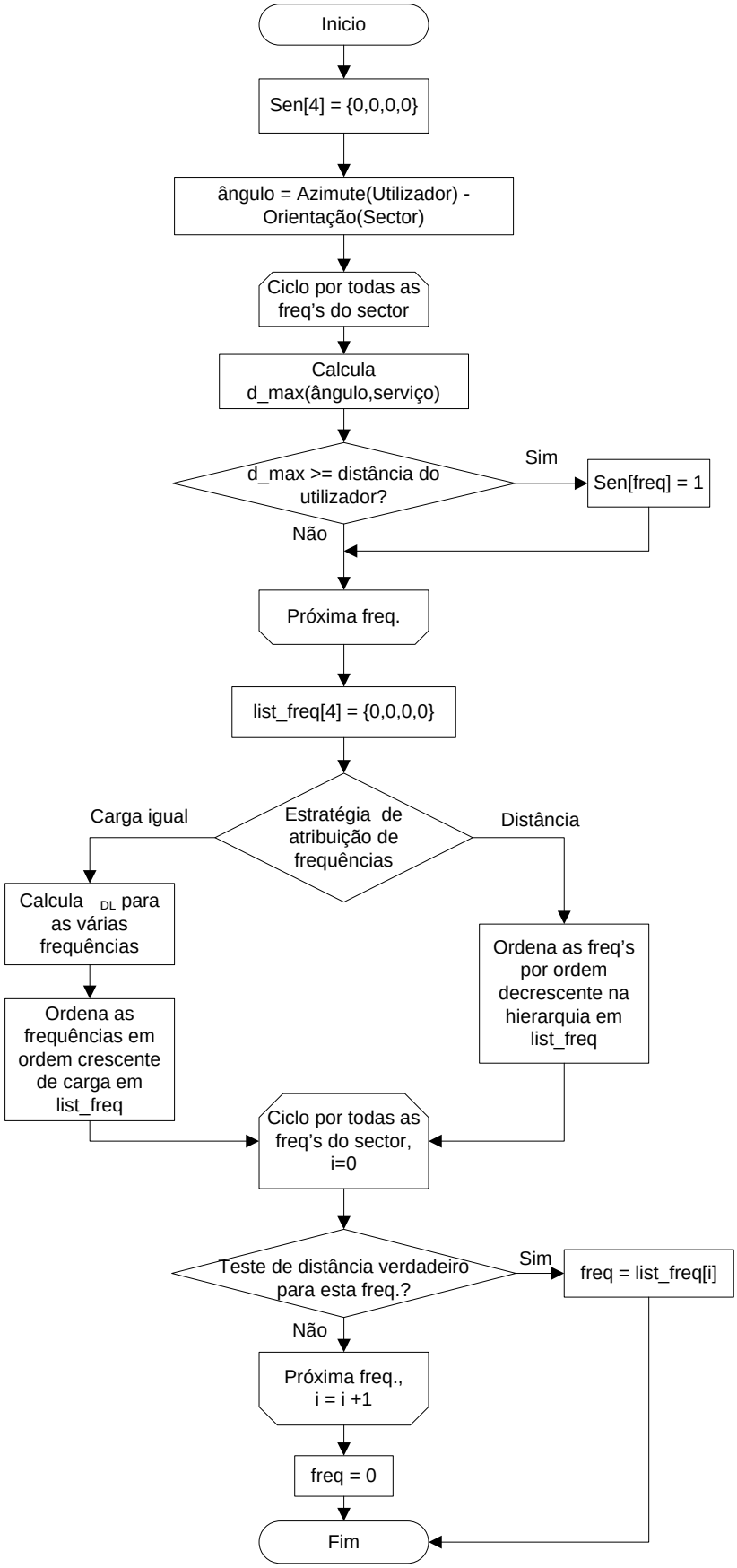


Figura E.3 – Fluxograma representativo do algoritmo de selecção de frequência.

Anexo F Serviços requeridos

Tabela F.1 – Mapeamento de serviços em ritmos binários e tipo de comutação.

Tipo de Informação	Classe de Serviço	Serviço	Aplicação	Débito [kps]	Tipo de Comutação
Áudio	*conversational*	telefonia	privado	12.2	CS
	streaming	*streaming audio*	*audio-on-demand*	64	PS
Áudio e Vídeo	*conversational*	video-telefonia	privado	64	CS
		video-conferência	privado *M-commerce*	64	PS
	streaming	*streaming video*	*video-on-demand*	64	PS
Dados	*conversational*	não restrito	jogos interactivos	144	CS
	streaming	*streaming data*	FTP	144	PS
	background	mensagens	correio electrónico	64	PS
		não restrito	*download* de ficheiros	384	PS
		distribuição de doc.	jornal electrónico	384	PS
Multimédia	*interactive*	comunicação multimédia	*web-browsing*	64	PS
			chat	144	
			armazenamento de ficheiros	384	
		localização geográfica	informação turística localização pessoal assistência em viagem emergências	64	PS
	background	mensagens	MMS	64	PS

Tabela F.2 – Percentagem de utilização de serviços do UMTS, segundo a idade.

Aplicações	**Idade**		
	< 20	20-64	> 64
privado (voz)	50	60	90
audio-on-demand	10	2	0
privado (video-telf)	5	5	1
privado (video-conf)	0	5	0
M-commerce	0	3	0
video-on-demand	3	2	0
web-browsing	5	10	0
Chat	10	3	0
armazenamento de ficheiros	0	5	0
informação turística	0	5	1
localização pessoal	0	3	0
assistência em viagem	1	1	1
Emergências	1	1	1
MMS	15	5	0
jogos interactivos	5	2	0
FTP	2	2	0
correio electrónico	5	5	1
download de ficheiros	0	2	0
jornal electrónico	2	5	5
$\sum_i \text{prob}_i$	114	126	100

Tabela F.3 – Percentagem de utilização dos serviços considerados no simulador segundo a idade.

Ritmo[kbps] / Comutação	**Idade**		
	< 20	20-64	> 64
12.2 - (CS)	50	60	90
64 - (CS)	5	5	1
64 - (PS)	40	42	4
144 - (CS)	5	2	0
144 - (PS)	12	5	0
384 - (PS)	2	12	5
$\sum_i \text{prob}_i$	114	126	100

Tabela F.4 – Percentagem de utilização de serviços do UMTS, segundo a escolaridade.

Aplicações	**Escolaridade**			
	Sem	Obrigatório	Secundário	Superior
privado (voz)	95	85	70	60
audio-on-demand	0	3	5	2
privado (video-telf)	1	1	2	5
privado (video-conf)	0	0	1	5
M-commerce	0	0	2	5
video-on-demand	0	0	2	1
web-browsing	0	1	5	10
chat	0	1	5	0
armazenamento de ficheiros	0	0	0	2
informação turística	0	0	1	2
localização pessoal	0	0	1	2
assistência em viagem	0	0	1	1
emergências	1	1	1	1
MMS	0	7	5	5
jogos interactivos	3	5	5	2
FTP	0	0	0	5
correio electrónico	0	1	2	5
download de ficheiros	0	0	0	2
jornal electrónico	0	1	5	5
$\sum_i \text{prob}_i$	100	106	113	120

Tabela F.5 – Percentagem de utilização dos serviços considerados no simulador segundo a escolaridade.

Ritmo[kbps] / Comutação	**Escolaridade**			
	Sem	Obrigatório	Secundário	Superior
12.2 - (CS)	95	85	70	60
64 - (CS)	1	1	2	5
64 - (PS)	1	13	26	39
144 - (CS)	3	5	5	2
144 - (PS)	0	1	5	5
384 - (PS)	0	1	5	9
$\sum_i \text{prob}_i$	100	106	113	120

Tabela F.6 – Percentagem de utilização de serviços do UMTS, segundo o rendimento.

Aplicações	**Rendimento**			
	Baixo	Médio	Médio-Alto	Alto
privado (voz)	95	90	75	50
audio-on-demand	0	0	2	10
privado (video-telf)	0	1	5	10
privado (video-conf)	0	0	0	5
M-commerce	0	0	2	5
video-on-demand	0	0	1	10
web-browsing	0	1	2	10
chat	1	2	5	2
armazenamento de ficheiros	0	0	0	1
informação turística	0	0	2	5
localização pessoal	0	0	1	2
assistência em viagem	0	1	1	2
emergências	0	1	1	1
MMS	3	5	7	10
jogos interactivos	1	3	5	8
FTP	0	0	0	2
correio electrónico	0	0	2	8
download de ficheiros	0	0	0	2
jornal electrónico	0	0	2	5
$\sum_i \text{prob}_i$	100	104	113	148

Tabela F.7 – Percentagem de utilização dos serviços considerados no simulador segundo o rendimento.

Ritmo[kbps] / Comutação	**Rendimento**			
	Baixo	Médio	Médio-alto	Alto
12.2 - (CS)	95	90	75	50
64 - (CS)	0	1	5	10
64 - (PS)	3	8	21	68
144 - (CS)	1	3	5	8
144 - (PS)	1	2	5	4
384 - (PS)	0	0	2	8
$\sum_i \text{prob}_i$	100	104	113	148

Tabela F.8 – Percentagem de utilização de serviços do UMTS, segundo a idade, dando mais ênfase ao serviço de voz.

Aplicações	**Idade**		
	< 20	20-64	> 64
privado (voz)	70	80	95
audio-on-demand	5	2	0
privado (video-telf)	4	4	1
privado (video-conf)	0	4	0
M-commerce	0	2	0
video-on-demand	2	2	0
web-browsing	4	5	0
Chat	8	2	0
armazenamento de ficheiros	0	4	0
informação turística	0	2	1
localização pessoal	0	2	0
Assistência em viagem	1	1	1
Emergências	1	1	1
MMS	10	4	0
jogos interactivos	4	1	0
FTP	1	1	0
correio electrónico	3	4	0
download de ficheiros	0	1	0
jornal electrónico	1	4	1
$\sum_i \text{prob}_i$	114	126	100

Tabela F.9 – Percentagem de utilização dos serviços considerados no simulador segundo a idade, dando mais ênfase ao serviço de voz.

Ritmo[kbps] / Comutação	**Idade**		
	< 20	20-64	> 64
12.2 - (CS)	50	60	90
64 - (CS)	5	5	1
64 - (PS)	40	42	4
144 - (CS)	5	2	0
144 - (PS)	12	5	0
384 - (PS)	2	12	5
$\sum_i \text{prob}_i$	114	126	100

Tabela F.10 – Percentagem de utilização de serviços do UMTS, segundo a escolaridade, dando mais ênfase ao serviço de voz.

Aplicações	**Escolaridade**			
	Sem	Obrigatório	Secundário	Superior
privado (voz)	95	90	80	80
audio-on-demand	0	2	4	1
privado (video-telf)	1	1	1	3
privado (video-conf)	0	0	1	3
M-commerce	0	0	2	3
video-on-demand	0	0	1	1
web-browsing	0	1	4	5
Chat	0	1	4	0
armazenamento de ficheiros	0	0	0	1
informação turística	0	0	1	2
localização pessoal	0	0	1	2
assistência em viagem	0	0	1	1
Emergências	1	1	1	1
MMS	0	5	4	3
jogos interactivos	3	3	3	2
FTP	0	0	0	4
correio electrónico	0	1	1	4
download de ficheiros	0	0	0	1
jornal electrónico	0	1	4	3
$\sum_i \text{prob}_i$	100	106	113	120

Tabela F.11 – Percentagem de utilização dos serviços considerados no simulador segundo a escolaridade, dando mais ênfase ao serviço de voz.

Ritmo[kbps] / Comutação	**Escolaridade**			
	Sem	Obrigatório	Secundário	Superior
12.2 - (CS)	95	85	70	60
64 - (CS)	1	1	2	5
64 - (PS)	1	13	26	39
144 - (CS)	3	5	5	2
144 - (PS)	0	1	5	5
384 - (PS)	0	1	5	9
$\sum_i \text{prob}_i$	100	106	113	120

Tabela F.12 – Percentagem de utilização de serviços do UMTS, segundo o rendimento, dando mais ênfase ao serviço de voz.

Aplicações	**Rendimento**			
	Baixo	Médio	Médio-Alto	Alto
privado (voz)	97	93	90	80
audio-on-demand	0	0	1	5
privado (video-telf)	0	1	3	5
privado (video-conf)	0	0	0	4
M-commerce	0	0	2	4
video-on-demand	0	0	1	5
web-browsing	0	1	1	5
chat	0	1	3	2
armazenamento de ficheiros	0	0	0	1
informação turística	0	0	1	5
localização pessoal	0	0	1	2
assistência em viagem	0	1	1	2
emergências	0	1	1	0
MMS	2	3	5	5
jogos interactivos	1	3	3	7
FTP	0	0	0	2
correio electrónico	0	0	1	7
download de ficheiros	0	0	0	2
jornal electrónico	0	0	1	5
$\sum_i \text{prob}_i$	100	104	113	148

Tabela F.13 – Percentagem de utilização dos serviços considerados no simulador segundo o rendimento, dando mais ênfase ao serviço de voz.

Ritmo[kbps] / Comutação	**Rendimento**			
	Baixo	Médio	Médio-alto	Alto
12.2 - (CS)	95	90	75	50
64 - (CS)	0	1	5	10
64 - (PS)	3	8	21	68
144 - (CS)	1	3	5	8
144 - (PS)	1	2	5	4
384 - (PS)	0	0	2	8
$\sum_i \text{prob}_i$	100	104	113	148

Tabela F.14 – Parâmetros referentes a 144 kbps como serviço de referência, 1 frequência, com distribuição de serviços com mais voz.

# Utilizadores	P_{ss} [%]	Raio Normalizado	Capacidade [kbps]	Potência [dBm]	Atraso Médio [kbps]	Atrasados [%]
699	0.43	0.96	156.62	7.83	213.33	88.89
824	1.11	0.96	175.23	8.35	194.59	81.08
946	1.29	0.93	181.70	8.16	224.68	93.62
2423	11.32	0.73	247.09	6.98	220.18	91.74

Tabela F.15 – Parâmetros referentes a 144 kbps como serviço de referência, 2 frequências, com distribuição de serviços com mais voz.

# Utilizadores	P_{ss} [%]	Raio Normalizado	Capacidade [kbps]	Potência [dBm]	Atraso Médio [kbps]	Atrasados [%]
824	0.00	0.99	157.94	8.42	189.77	79.07
1070	0.00	0.99	173.28	8.71	174.55	72.73
1890	0.80	0.97	215.86	9.09	208.48	86.87
2423	1.34	0.96	229.79	9.07	215.80	89.92
2999	2.14	0.93	242.18	8.91	213.16	88.82
4393	6.74	0.84	246.42	7.66	198.53	82.72

Tabela F.16 – Parâmetros referentes a 144 kbps como serviço de referência, 3 frequências, com distribuição de serviços com mais voz.

# Utilizadores	P_{ss} [%]	Raio Normalizado	Capacidade [kbps]	Potência [dBm]	Atraso Médio [kbps]	Atrasados [%]
1346	0.38	0.99	193.61	8.97	205.30	85.54
1890	0.27	0.98	219.87	9.41	180.65	75.27
3556	0.83	0.96	241.58	9.17	201.33	83.89
4120	1.68	0.95	249.36	9.13	204.63	85.26
5235	2.97	0.91	249.13	8.82	196.18	81.74

Tabela F.17 – Parâmetros referentes a 144 kbps como serviço de referência, 4 frequências, com distribuição de serviços com mais voz.

# Utilizadores	P_{ss} [%]	Raio Normalizado	Capacidade [kbps]	Potência [dBm]	Atraso Médio [kbps]	Atrasados [%]
2423	0.38	0.99	222.85	9.45	197.78	82.41
3833	0.58	0.98	240.76	9.38	206.95	86.23
4393	0.83	0.97	250.87	9.30	191.78	79.91
5235	1.44	0.97	253.69	9.27	196.80	82.00
8062	4.90	0.94	255.89	8.31	182.96	76.23

Tabela F.18 – Percentagem de utilização de serviços do UMTS, segundo a idade, dando menos ênfase ao serviço de voz.

Aplicações	**Idade**		
	< 20	20-64	> 64
privado (voz)	30	40	80
audio-on-demand	15	3	0
privado (video-telf)	2	6	10
privado (video-conf)	0	6	0
M-commerce	0	4	0
video-on-demand	5	3	0
web-browsing	8	12	0
chat	13	4	0
armazenamento de ficheiros	0	6	0
informação turística	0	6	2
localização pessoal	0	4	0
assistência em viagem	1	2	1
emergências	1	3	1
MMS	15	6	0
jogos interactivos	8	3	0
FTP	4	3	0
correio electrónico	8	6	1
download de ficheiros	1	3	0
jornal electrónico	2	6	5
$\sum_i \text{prob}_i$	114	126	100

Tabela F.19 – Percentagem de utilização dos serviços considerados no simulador segundo a idade, dando menos ênfase ao serviço de voz.

Ritmo[kbps] / Comutação	**Idade**		
	< 20	20-64	> 64
12.2 - (CS)	50	60	90
64 - (CS)	5	5	1
64 - (PS)	40	42	4
144 - (CS)	5	2	0
144 - (PS)	12	5	0
384 - (PS)	2	12	5
$\sum_i \text{prob}_i$	114	126	100

Tabela F.20 – Percentagem de utilização de serviços do UMTS, segundo a escolaridade, dando menos ênfase ao serviço de voz.

Aplicações	**Escolaridade**			
	Sem	Obrigatório	Secundário	Superior
privado (voz)	95	70	55	40
audio-on-demand	0	4	6	5
privado (video-telf)	1	4	4	6
privado (video-conf)	0	1	2	6
M-commerce	0	0	3	6
video-on-demand	0	0	1	2
web-browsing	0	3	8	11
chat	0	3	6	1
armazenamento de ficheiros	0	0	1	3
informação turística	0	0	2	3
localização pessoal	0	0	1	3
assistência em viagem	0	0	1	2
emergências	1	1	1	1
MMS	0	8	6	5
jogos interactivos	3	6	6	3
FTP	0	0	1	5
correio electrónico	0	3	4	8
download de ficheiros	0	0	0	3
jornal electrónico	0	2	5	7
$\sum_i \text{prob}_i$	100	106	113	120

Tabela F.21 – Percentagem de utilização dos serviços considerados no simulador segundo a escolaridade, dando menos ênfase ao serviço de voz.

Ritmo[kbps] / Comutação	**Escolaridade**			
	Sem	Obrigatório	Secundário	Superior
12.2 - (CS)	95	85	70	60
64 - (CS)	1	1	2	5
64 - (PS)	1	13	26	39
144 - (CS)	3	5	5	2
144 - (PS)	0	1	5	5
384 - (PS)	0	1	5	9
$\sum_i \text{prob}_i$	100	106	113	120

Tabela F.22 – Percentagem de utilização de serviços do UMTS, segundo o rendimento, dando menos ênfase ao serviço de voz.

Aplicações	**Rendimento**			
	Baixo	Médio	Médio-Alto	Alto
privado (voz)	95	85	60	35
audio-on-demand	0	0	3	11
privado (video-telf)	0	1	6	11
privado (video-conf)	0	0	2	6
M-commerce	0	0	2	5
video-on-demand	0	0	1	11
web-browsing	0	3	5	11
chat	1	2	5	3
armazenamento de ficheiros	0	0	0	2
informação turística	0	0	3	5
localização pessoal	0	0	2	3
assistência em viagem	0	1	2	3
emergências	0	1	1	1
MMS	3	5	7	11
jogos interactivos	1	3	5	9
FTP	0	0	0	3
correio electrónico	0	2	5	9
download de ficheiros	0	0	0	3
jornal electrónico	0	0	4	6
$\sum_i \text{prob}_i$	100	104	113	148

Tabela F.23 – Percentagem de utilização dos serviços considerados no simulador segundo o rendimento, dando menos ênfase ao serviço de voz.

Ritmo[kbps] / Comutação	**Rendimento**			
	Baixo	Médio	Médio-alto	Alto
12.2 - (CS)	95	90	75	50
64 - (CS)	0	1	5	10
64 - (PS)	3	8	21	68
144 - (CS)	1	3	5	8
144 - (PS)	1	2	5	4
384 - (PS)	0	0	2	8
$\sum_i prob_i$	100	104	113	148

Tabela F.24 – Parâmetros referentes a 144 kbps como serviço de referência, 1 frequência, com distribuição de serviços com menos voz.

# Utilizadores	P_{ss} [%]	Raio Normalizado	Capacidade [kbps]	Potência [dBm]	Atraso Médio [kbps]	Atrasados [%]
699	1.88	0.93	165.50	8.00	228.57	95.24
824	2.72	0.90	189.51	8.20	210.61	87.76
946	4.61	0.87	210.19	8.08	221.25	92.19
2423	19.97	0.65	244.53	5.78	212.31	88.46

Tabela F.25 – Parâmetros referentes a 144 kbps como serviço de referência, 2 frequências, com distribuição de serviços com menos voz.

# Utilizadores	P_{ss} [%]	Raio Normalizado	Capacidade [kbps]	Potência [dBm]	Atraso Médio [kbps]	Atrasados [%]
824	0.98	0.99	172.85	8.93	192.00	80.00
1070	1.23	0.98	194.17	9.02	188.57	78.57
1890	2.06	0.94	230.79	9.07	186.05	77.52
2423	2.90	0.91	231.66	8.58	203.92	84.97
2999	6.43	0.87	242.59	8.40	198.96	82.90
4393	14.13	0.76	247.05	6.95	180.73	75.30

Tabela F.26 – Parâmetros referentes a 144 kbps como serviço de referência, 3 frequências, com distribuição de serviços com menos voz.

# Utilizadores	P_{ss} [%]	Raio Normalizado	Capacidade [kbps]	Potência [dBm]	Atraso Médio [kbps]	Atrasados [%]
1346	0.23	0.99	205.41	9.34	210.00	87.50
1890	1.23	0.98	219.68	9.36	207.52	86.47
3556	3.06	0.92	242.35	8.79	186.78	77.82
4120	5.57	0.89	244.87	8.30	171.90	71.63
5235	9.01	0.83	246.81	7.83	175.09	72.96

Tabela F.27 – Parâmetros referentes a 144 kbps como serviço de referência, 4 frequências, com distribuição de serviços com menos voz.

# Utilizadores	P_{ss} [%]	Raio Normalizado	Capacidade [kbps]	Potência [dBm]	Atraso Médio [kbps]	Atrasados [%]
2423	0.96	0.97	239.71	9.60	185.18	77.16
3833	2.07	0.96	244.27	9.18	187.67	78.20
4393	2.22	0.96	248.04	8.85	189.02	78.76
5235	2.68	0.95	251.17	8.55	173.33	72.22
8062	10.79	0.91	248.37	6.75	170.18	70.91

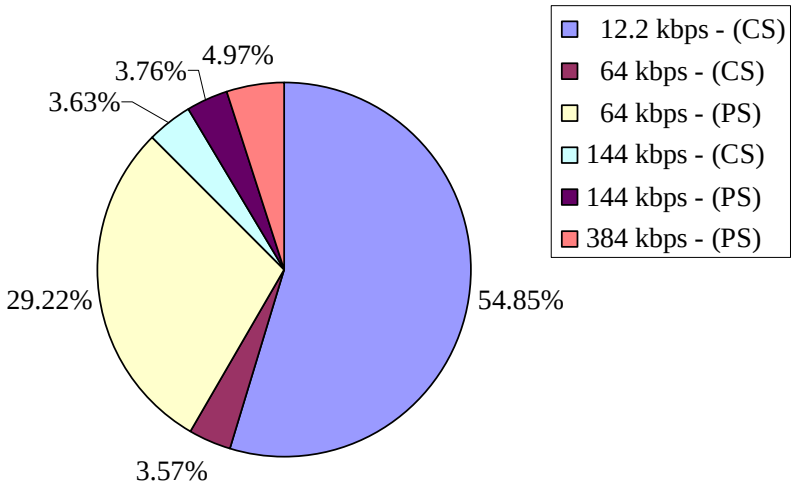


Figura F.1 – Percentagem de ligações para a distribuição utilizada por omissão.

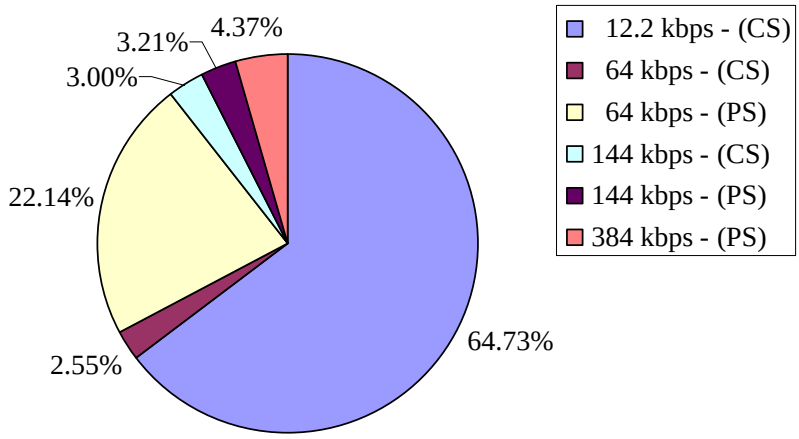


Figura F.2 – Percentagens de ligações para a distribuição de serviços com mais voz.

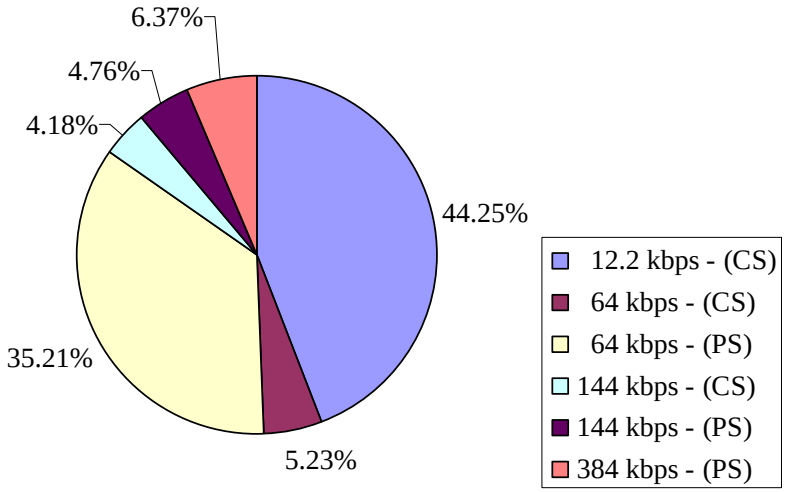


Figura F.3 – Percentagem de ligações para a distribuição de serviços com menos voz.

Anexo G Percentagem de Utilizadores Sem Serviço

Tabela G.1 – P_{ss}, com serviço de referência 64 kbps (PS), 1 frequência, Carga Igual.

# Utilizadores	P_{ss} [%]			
	Média	**Máx.**	**Mín.**	**Desv. Padrão**
699	0.29	0.53	0.00	0.23
1070	1.30	1.59	1.03	0.22
1890	5.13	5.58	4.57	0.45
3556	19.13	19.73	18.54	0.60

Tabela G.2 – P_{ss}, com serviço de referência 64 kbps (PS), 2 frequência, Carga Igual.

# Utilizadores	P_{ss} [%]			
	Média	**Máx.**	**Mín.**	**Desv. Padrão**
1070	0.02	0.09	0.00	0.04
2423	0.59	1.08	0.25	0.35
2999	1.28	1.68	0.94	0.36
3556	2.35	2.54	2.21	0.14
5235	7.64	7.88	7.27	0.24

Tabela G.3 – P_{ss}, com serviço de referência 64 kbps (PS), 3 frequência, Carga Igual.

# Utilizadores	P_{ss} [%]			
	Média	**Máx.**	**Mín.**	**Desv. Padrão**
2423	0.14	0.29	0.04	0.12
4120	1.07	1.27	0.78	0.20
5235	2.09	2.28	1.94	0.16
8062	9.15	9.82	8.59	0.52

Tabela G.4 – P_{ss}, com serviço de referência 64 kbps (PS), 4 frequência, Carga Igual.

# Utilizadores	P_{ss} [%]			
	Média	**Máx.**	**Mín.**	**Desv. Padrão**
4393	0.42	0.71	0.18	0.19
5235	0.92	1.17	0.71	0.19
6659	1.97	2.25	1.49	0.29
10914	8.25	8.82	7.60	0.45

Tabela G.5 – P_{ss}, com serviço de referência 64 kbps (PS), 2 frequências, Distância.

# Utilizadores	P_{ss} [%]			
	Média	**Máx.**	**Mín.**	**Desv. Padrão**
1346	0.09	0.22	0.00	0.10
2423	0.47	0.79	0.29	0.20
3556	1.62	1.84	1.44	0.17
4681	3.98	4.29	3.30	0.41
5235	5.46	5.85	4.53	0.57

Tabela G.6 – P_{ss}, com serviço de referência 64 kbps (PS), 3 frequências, Distância.

# Utilizadores	P_{ss} [%]			
	Média	**Máx.**	**Mín.**	**Desv. Padrão**
2423	0.07	0.12	0.00	0.05
4681	1.18	1.54	0.77	0.29
5235	1.93	2.34	1.50	0.39
8062	6.58	7.95	5.67	0.90

Tabela G.7 – P_{ss}, com serviço de referência 64 kbps (PS), 4 frequências, Distância.

# Utilizadores	P_{ss} [%]			
	Média	**Máx.**	**Mín.**	**Desv. Padrão**
4393	0.59	1.12	0.30	0.33
5235	0.94	1.73	0.56	0.47
6934	2.20	2.68	1.78	0.32
10914	8.25	8.82	7.21	0.61

Tabela G.8 – P_{ss}, com serviço de referência 144 kbps (PS), 1 frequência, Carga Igual.

# Utilizadores	P_{ss} [%]			
	Média	**Máx.**	**Mín.**	**Desv. Padrão**
323	0.19	0.32	0.00	0.17
699	1.63	2.03	1.01	0.39
824	1.88	2.47	1.49	0.36
946	3.53	4.30	2.80	0.68
2423	15.68	16.43	15.07	0.57

Tabela G.9 – P_{ss}, com serviço de referência 144 kbps (PS), 2 frequências, Carga Igual.

# Utilizadores	P_{ss} [%]			
	Média	**Máx.**	**Mín.**	**Desv. Padrão**
824	0.22	0.37	0.12	0.10
1070	0.68	0.86	0.38	0.19
1890	1.08	1.24	0.91	0.12
2423	2.46	3.06	1.89	0.45
2999	3.82	4.57	3.23	0.52
4393	9.77	10.02	9.27	0.30

Tabela G.10 – P_{ss}, com serviço de referência 144 kbps (PS), 3 frequências, Carga Igual.

# Utilizadores	P_{ss} [%]			
	Média	**Máx.**	**Mín.**	**Desv. Padrão**
1346	0.30	0.45	0.08	0.15
1890	0.53	0.75	0.16	0.27
3556	1.88	2.25	1.32	0.37
4120	3.02	3.65	2.64	0.40
6934	12.28	13.18	10.68	0.97

Tabela G.11 – P_{ss}, com serviço de referência 144 kbps (PS), 4 frequências, Carga Igual.

# Utilizadores	P_{ss} [%]			
	Média	**Máx.**	**Mín.**	**Desv. Padrão**
2423	0.42	0.59	0.29	0.12
3833	1.05	1.22	0.74	0.18
4393	1.51	1.51	1.09	0.27
5235	2.26	2.44	1.79	0.28
8062	8.28	9.14	7.64	0.58

Tabela G.12 – P_{ss}, com serviço de referência 144 kbps (PS), 2 frequências, Distância.

# Utilizadores	P_{ss} [%]			
	Média	**Máx.**	**Mín.**	**Desv. Padrão**
1070	0.34	0.66	0.09	0.23
1890	1.19	1.72	0.75	0.37
2423	1.70	2.06	0.97	0.45
2999	2.73	2.92	2.47	0.19
4393	6.80	7.42	5.96	0.62

Tabela G.13 – P_{ss}, com serviço de referência 144 kbps (PS), 3 frequências, Distância.

# Utilizadores	P_{ss} **[%]**			
	Média	**Máx.**	**Mín.**	**Desv. Padrão**
1346	0.12	0.23	0.08	0.07
2423	0.97	1.13	0.84	0.11
3556	2.02	2.31	1.66	0.27
4120	2.34	2.82	2.15	0.28
6934	9.65	10.34	9.13	0.56

Tabela G.14 – P_{ss}, com serviço de referência 144 kbps (PS), 4 frequências, Distância.

# Utilizadores	P_{ss} **[%]**			
	Média	**Máx.**	**Mín.**	**Desv. Padrão**
2423	0.55	1.08	0.25	0.38
3279	1.05	1.68	0.68	0.41
3833	1.68	2.09	1.14	2.23
5235	2.54	3.14	2.23	0.36
8062	8.01	8.61	7.00	0.61

Anexo H Raio Normalizado

Tabela H.1 – Raio Normalizado, com serviço de referência 64 kbps (PS), 1 frequência, Carga Igual.

# Utilizadores	Raio Normalizado			
	Média	**Máx.**	**Mín.**	**Desv. Padrão**
699	0.93	1.00	0.30	0.13
1070	0.86	1.00	0.20	0.18
1890	0.72	1.00	0.20	0.22
3556	0.55	1.00	0.15	0.22

Tabela H.2 – Raio Normalizado, com serviço de referência 64 kbps (PS), 2 frequências, Carga Igual.

# Utilizadores	Raio Normalizado			
	Média	**Máx.**	**Mín.**	**Desv. Padrão**
1070	0.99	1.00	0.50	0.03
2423	0.95	1.00	0.30	0.11
2999	0.92	1.00	0.25	0.14
3556	0.89	1.00	0.25	0.17
5235	0.79	1.00	0.15	0.23

Tabela H.3 – Raio Normalizado, com serviço de referência 64 kbps (PS), 3 frequências, Carga Igual.

# Utilizadores	Raio Normalizado			
	Média	**Máx.**	**Mín.**	**Desv. Padrão**
2423	0.98	1.00	0.40	0.06
4120	0.94	1.00	0.30	0.13
5235	0.90	1.00	0.25	0.18
8062	0.80	1.00	0.15	0.25

Tabela H.4 – Raio Normalizado, com serviço de referência 64 kbps (PS), 4 frequências, Carga Igual.

# Utilizadores	Raio Normalizado			
	Média	**Máx.**	**Mín.**	**Desv. Padrão**
4393	0.98	1.00	0.35	0.07
5235	0.97	1.00	0.25	0.09
6659	0.96	1.00	0.25	0.11
10914	0.92	1.00	0.20	0.18

Tabela H.5 – Raio Normalizado, com serviço de referência 64 kbps (PS), 2 frequências, Distância.

# Utilizadores	Raio Normalizado			
	Média	**Max.**	**Mín.**	**Desv. Padrão**
1346	0.99	1.00	0.45	0.04
2423	0.97	1.00	0.25	0.10
3556	0.93	1.00	0.25	0.16
4681	0.87	1.00	0.20	0.21
5235	0.85	1.00	0.15	0.23

Tabela H.6 – Raio Normalizado, com serviço de referência 64 kbps (PS), 3 frequências, Distância.

# Utilizadores	Raio Normalizado			
	Média	**Max.**	**Mín.**	**Desv. Padrão**
2423	0.99	1.00	0.40	0.06
4681	0.94	1.00	0.20	0.14
5235	0.93	1.00	0.15	0.16
8062	0.83	1.00	0.15	0.24

Tabela H.7 – Raio Normalizado, com serviço de referência 64 kbps (PS), 4 frequências, Distância.

# Utilizadores	Raio Normalizado			
	Média	**Max.**	**Mín.**	**Desv. Padrão**
4393	0.97	1.00	0.40	0.10
5235	0.95	1.00	0.20	0.13
6934	0.92	1.00	0.10	0.17
10914	0.80	1.00	0.05	0.26

Tabela H.8 – Raio Normalizado, com serviço de referência 144 kbps (PS), 1 frequência, Carga Igual.

# Utilizadores	Raio Normalizado			
	Média	**Max.**	**Mín.**	**Desv. Padrão**
323	0.99	1.00	0.30	0.05
699	0.95	1.00	0.25	0.11
824	0.92	1.00	0.20	0.15
946	0.91	1.00	0.20	0.16
2423	0.70	1.00	0.10	0.23

Tabela H.9 – Raio Normalizado, com serviço de referência 144 kbps (PS), 2 frequências, Carga Igual.

# Utilizadores	Raio Normalizado			
	Média	**Max.**	**Mín.**	**Desv. Padrão**
824	0.99	1.00	0.50	0.03
1070	0.99	1.00	0.35	0.04
1890	0.96	1.00	0.20	0.09
2423	0.94	1.00	0.20	0.12
2999	0.90	1.00	0.25	0.15
4393	0.82	1.00	0.15	0.21

Tabela H.10 – Raio Normalizado, com serviço de referência 144 kbps (PS), 3 frequências, Carga Igual.

# Utilizadores	Raio Normalizado			
	Média	**Máx.**	**Mín.**	**Desv. Padrão**
1346	0.99	1.00	0.70	0.03
1890	0.98	1.00	0.45	0.05
3556	0.95	1.00	0.25	0.11
4120	0.93	1.00	0.30	0.14
6934	0.81	1.00	0.81	0.23

Tabela H.11 – Raio Normalizado, com serviço de referência 144 kbps (PS), 4 frequências, Carga Igual.

# Utilizadores	Raio Normalizado			
	Média	**Máx.**	**Mín.**	**Desv. Padrão**
2423	0.98	1.00	0.60	0.04
3833	0.98	1.00	0.35	0.06
4393	0.97	1.00	0.35	0.07
5238	0.96	1.00	0.30	0.09
8062	0.92	1.00	0.10	0.16

Tabela H.12 - Raio Normalizado, com serviço de referência 144 kbps (PS), 2 frequências, Distância.

# Utilizadores	Raio Normalizado			
	Média	**Máx.**	**Mín.**	**Desv. Padrão**
1070	0.99	1.00	0.45	0.04
1890	0.97	1.00	0.20	0.08
2423	0.96	1.00	0.20	0.11
2999	0.94	1.00	0.25	0.13
4393	0.86	1.00	0.20	0.20

Tabela H.13 – Raio Normalizado, com serviço de referência 144 kbps (PS), 3 frequência, Distância.

# Utilizadores	Raio Normalizado			
	Média	**Máx.**	**Mín.**	**Desv. Padrão**
1346	0.99	1.00	0.35	0.04
2423	0.98	1.00	0.20	0.07
3556	0.96	1.00	0.15	0.10
4120	0.94	1.00	0.20	0.13
6934	0.84	1.00	0.10	0.22

Tabela H.14 – Raio Normalizado, com serviço de referência 144 kbps (PS), 4 frequências, Distância.

# Utilizadores	Raio Normalizado			
	Média	**Máx.**	**Mín.**	**Desv. Padrão**
2423	0.98	1.00	0.30	0.06
3279	0.97	1.00	0.15	0.08
3833	0.96	1.00	0.25	0.09
5235	0.93	1.00	0.15	0.14
8062	0.86	1.00	0.10	0.21

Anexo I Factores de Carga

Tabela I.1 – Factores de Carga, com serviço de referência 64 kbps (PS), 1 frequência, Carga Igual.

# Utilizadores	Factores de Carga [%]					
	Média		Máx.		Mín.	
	UL	DL	UL	DL	UL	DL
699	19.45	29.81	33.64	49.99	0.00	0.00
1070	22.83	35.05	33.64	49.99	0.00	0.00
1890	25.53	39.13	33.64	49.99	0.00	0.00
3556	26.29	40.32	33.64	49.99	0.00	0.00

Tabela I.2 – Factores de Carga, com serviço de referência 64 kbps (PS), 2 frequências, Carga Igual.

# Utilizadores	Factores de Carga [%]					
	Média		Máx.		Mín.	
	UL	DL	UL	DL	UL	DL
1070	19.38	29.84	34.24	49.99	0.00	0.00
2423	23.58	36.19	33.64	49.99	0.00	0.00
2999	24.28	37.22	33.64	49.99	0.00	0.00
3556	24.48	37.60	33.64	49.99	0.00	0.00
5235	24.97	38.31	34.24	49.99	0.00	0.00

Tabela I.3 – Factores de Carga, com serviço de referência 64 kbps (PS), 3 frequências, Carga Igual.

# Utilizadores	Factores de Carga [%]					
	Média		Máx.		Mín.	
	UL	DL	UL	DL	UL	DL
2423	23.00	35.27	34.24	49.99	0.00	0.00
4120	24.72	37.92	33.64	49.99	0.00	0.00
5235	24.80	38.07	34.24	49.99	0.00	0.00
8062	24.48	37.58	34.24	49.99	0.00	0.00

Tabela I.4 – Factores de Carga, com serviço de referência 64 kbps (PS), 4 frequências, Carga Igual.

# Utilizadores	Factores de Carga [%]					
	Média		Máx.		Mín.	
	UL	DL	UL	DL	UL	DL
4393	24.81	38.08	34.24	49.99	0.00	0.00
5235	25.13	38.59	33.64	49.99	0.00	0.00
6659	25.18	38.63	34.24	49.99	0.00	0.00
10914	24.74	37.98	34.24	49.99	0.85	1.34

Tabela I.5 – Factores de Carga, com serviço de referência 64 kbps (PS), 2 frequências, Distância.

# Utilizadores	Factores de Carga [%]					
	Média		Máx.		Mín.	
	UL	DL	UL	DL	UL	DL
1346	17.35	26.62	34.24	49.99	0.00	0.00
2423	17.98	27.57	33.64	49.99	0.00	0.00
3556	19.00	29.16	34.24	49.99	0.00	0.00
4681	19.99	30.67	33.64	49.99	0.00	0.00
5235	20.33	31.20	33.64	49.99	0.00	0.00

Tabela I.6 – Factores de Carga, com serviço de referência 64 kbps (PS), 3 frequências, Distância.

# Utilizadores	Factores de Carga [%]					
	Média		Máx.		Mín.	
	UL	DL	UL	DL	UL	DL
2423	18.29	28.04	34.24	49.99	0.00	0.00
4681	19.57	30.01	34.24	49.99	0.00	0.00
5235	19.65	30.14	33.64	49.99	0.00	0.00
8062	20.96	32.13	34.24	49.99	0.00	0.00

Tabela I.7 – Factores de Carga, com serviço de referência 64 kbps (PS), 4 frequência, Distância.

# Utilizadores	Factores de Carga [%]					
	Média		Máx.		Mín.	
	UL	DL	UL	DL	UL	DL
4393	19.30	29.62	33.64	49.99	0.00	0.00
5235	19.70	30.24	34.24	49.99	0.00	0.00
6934	19.92	30.56	33.64	49.99	0.00	0.00
10914	20.18	30.93	34.24	49.99	0.00	0.00

Tabela I.8 – Factores de Carga, com serviço de referência 144 kbps (PS), 1 frequência, Carga Igual.

# Utilizadores	Factores de Carga [%]					
	Média		Máx.		Mín.	
	UL	DL	UL	DL	UL	DL
323	8.89	13.52	34.24	49.86	0.00	0.00
699	15.82	24.13	34.24	49.99	0.00	0.00
824	17.53	26.70	34.24	49.99	0.00	0.00
946	18.47	28.12	34.24	49.99	0.00	0.00
2423	24.08	36.57	34.24	49.99	0.00	0.00

Tabela I.9 – Factores de Carga, com serviço de referência 144 kbps (PS), 2 frequências, Carga Igual.

# Utilizadores	Factores de Carga [%]					
	Média		Máx.		Mín.	
	UL	DL	UL	DL	UL	DL
824	15.46	23.51	34.24	49.96	0.00	0.00
1070	17.62	26.86	34.24	49.99	0.00	0.00
1890	20.68	31.49	34.24	49.99	0.00	0.00
2423	22.49	34.23	34.24	49.99	0.00	0.00
2999	23.08	35.24	34.24	49.99	0.00	0.00
4393	23.64	36.06	34.24	49.99	0.00	0.00

Tabela I.10 – Factores de Carga, com serviço de referência 144 kbps (PS), 3 frequências, Carga Igual.

# Utilizadores	Factores de Carga [%]					
	Média		Máx.		Mín.	
	UL	DL	UL	DL	UL	DL
1346	18.64	28.40	34.24	49.99	0.00	0.00
1890	20.77	31.55	34.24	49.99	0.00	0.00
3556	23.34	35.68	34.24	49.99	0.00	0.00
4120	23.62	35.95	34.24	49.99	0.00	0.00
6934	23.08	35.20	34.24	49.99	0.00	0.00

Tabela I.11 – Factores de Carga, com serviço de referência 144 kbps (PS), 4 frequências, Carga Igual.

# Utilizadores	Factores de Carga [%]					
	Média		Máx.		Mín.	
	UL	DL	UL	DL	UL	DL
2423	22.34	33.97	34.24	49.99	0.00	0.00
3833	22.68	34.56	34.24	49.99	0.00	0.00
4393	24.02	36.57	34.24	49.99	0.00	0.00
5235	24.02	36.69	34.24	49.99	0.00	0.00
8062	23.13	35.33	34.24	49.99	0.00	0.00

Tabela I.12 – Factores de Carga, com serviço de referência 144 kbps (PS), 2 frequências, Distância.

# Utilizadores	Factores de Carga [%]					
	Média		Máx.		Mín.	
	UL	DL	UL	DL	UL	DL
1070	15.88	24.26	34.24	49.99	0.00	0.00
1890	17.44	26.52	34.24	49.99	0.00	0.00
2423	18.17	27.64	34.24	49.99	0.00	0.00
2999	18.81	28.69	34.24	49.99	0.00	0.00
4393	20.13	30.74	34.24	49.99	0.00	0.00

Tabela I.13 – Factores de Carga, com serviço de referência 144 kbps (PS), 3 frequências, Distância.

# Utilizadores	Factores de Carga [%]					
	Média		Máx.		Mín.	
	UL	DL	UL	DL	UL	DL
1346	16.61	25.34	34.24	49.99	0.00	0.00
2423	18.36	27.89	34.24	49.99	0.00	0.00
3556	19.31	29.46	34.24	49.99	0.00	0.00
4120	19.65	29.94	34.24	49.99	0.00	0.00
6934	20.45	31.22	34.24	49.99	0.00	0.00

Tabela I.14 - Factores de Carga, com serviço de referência 144 kbps (PS), 4 frequências, Distância.

# Utilizadores	Factores de Carga [%]					
	Média		Máx.		Mín.	
	UL	DL	UL	DL	UL	DL
2423	18.53	28.17	34.24	49.99	0.00	0.00
3279	18.96	28.96	34.24	49.99	0.00	0.00
3833	19.39	29.52	34.24	49.99	0.00	0.00
5235	19.58	29.87	34.24	49.99	0.00	0.00
8062	19.91	30.35	34.24	49.99	0.00	0.00

Anexo J Percentagem de Carga em *Soft Handover*

Tabela J.1 – Percentagem de Carga em *Soft Handover*, com serviço de referência 64 kbps (PS), 1 frequência, Carga Igual.

# Utilizadores	Percentagem de Carga em *Soft Handover* [%]					
	Média		Máx.		Mín.	
	UL	DL	UL	DL	UL	DL
699	94.22	94.22	100.00	100.00	0.00	0.00
1070	93.70	93.70	100.00	100.00	0.00	0.00
1890	89.01	89.02	100.00	100.00	0.00	0.00
3556	72.43	72.45	100.00	100.00	0.00	0.00

Tabela J.2 – Percentagem de Carga em *Soft Handover*, com serviço de referência 64 kbps (PS), 2 frequências, Carga Igual.

# Utilizadores	Percentagem de Carga em *Soft Handover* [%]					
	Média		Máx.		Mín.	
	UL	DL	UL	DL	UL	DL
1070	92.94	92.94	100.00	100.00	0.00	0.00
2423	93.26	93.27	100.00	100.00	0.00	0.00
2999	90.07	90.06	100.00	100.00	0.00	0.00
3556	86.91	86.91	100.00	100.00	0.00	0.00
5235	74.82	74.80	100.00	100.00	0.00	0.00

Tabela J.3 – Percentagem de Carga em *Soft Handover*, com serviço de referência 64 kbps (PS), 3 frequências, Carga Igual.

# Utilizadores	Percentagem de Carga em *Soft Handover* [%]					
	Média		Máx.		Mín.	
	UL	DL	UL	DL	UL	DL
2423	90.34	90.35	100.00	100.00	0.00	0.00
4120	84.67	84.68	100.00	100.00	0.00	0.00
5235	78.78	78.79	100.00	100.00	0.00	0.00
8062	63.04	63.06	100.00	100.00	0.00	0.00

Tabela J.4 – Percentagem de Carga em *Soft Handover*, com serviço de referência 64 kbps (PS), 4 frequências, Carga Igual.

# Utilizadores	Percentagem de Carga em *Soft Handover* [%]					
	Média		Máx.		Mín.	
	UL	DL	UL	DL	UL	DL
4393	81.52	81.52	100.00	100.00	0.00	0.00
5235	78.53	78.53	100.00	100.00	0.00	0.00
6659	71.26	71.27	100.00	100.00	0.00	0.00
10914	53.87	53.89	100.00	100.00	0.00	0.00

Tabela J.5 - Percentagem de Carga em *Soft Handover*, com serviço de referência 64 kbps (PS), 2 frequências, Distância.

# Utilizadores	Percentagem de Carga em *Soft Handover* [%]					
	Média		Máx.		Mín.	
	UL	DL	UL	DL	UL	DL
1346	75.35	75.35	100.00	100.00	0.00	0.00
2423	62.20	62.19	100.00	100.00	0.00	0.00
3556	56.15	56.13	100.00	100.00	0.00	0.00
4681	50.21	50.20	100.00	100.00	0.00	0.00
5235	48.35	48.35	100.00	100.00	0.00	0.00

Tabela J.6 – Percentagem de Carga em *Soft Handover*, com serviço de referência 64 kbps (PS), 3 frequências, Distância.

# Utilizadores	Percentagem de Carga em *Soft Handover* [%]					
	Média		Máx.		Mín.	
	UL	DL	UL	DL	UL	DL
2423	65.36	65.35	100.00	100.00	0.00	0.00
4681	51.74	51.74	100.00	100.00	0.00	0.00
5235	49.64	49.64	100.00	100.00	0.00	0.00
8062	38.56	38.56	100.00	100.00	0.00	0.00

Tabela J.7 – Percentagem de Carga em *Soft Handover*, com serviço de referência 64 kbps (PS), 4 frequências, Distância.

# Utilizadores	Percentagem de Carga em *Soft Handover* [%]					
	Média		Máx.		Mín.	
	UL	DL	UL	DL	UL	DL
4393	53.40	53.41	100.00	100.00	0.00	0.00
5235	49.54	49.54	100.00	100.00	0.00	0.00
6934	42.68	42.68	100.00	100.00	0.00	0.00
10914	29.30	29.30	100.00	100.00	0.00	0.00

Tabela J.8 – Percentagem de Carga em *Soft Handover*, com serviço de referência 144 kbps (PS), 1 frequência, Carga Igual.

# Utilizadores	Percentagem de Carga em *Soft Handover* [%]					
	Média		Máx.		Mín.	
	UL	DL	UL	DL	UL	DL
323	73.25	73.25	100.00	100.00	0.00	0.00
699	87.57	87.57	100.00	100.00	0.00	0.00
824	87.62	87.61	100.00	100.00	0.00	0.00
946	87.07	87.06	100.00	100.00	0.00	0.00
2423	73.47	73.50	100.00	100.00	0.00	0.00

Tabela J.9 – Percentagem de Carga em *Soft Handover*, com serviço de referência 144 kbps (PS), 2 frequências, Carga Igual.

# Utilizadores	**Percentagem de Carga em *Soft Handover* [%]**					
	Média		**Máx.**		**Mín.**	
	UL	DL	UL	DL	UL	DL
824	86.13	86.14	100.00	100.00	0.00	0.00
1070	86.98	86.96	100.00	100.00	0.00	0.00
1890	81.83	81.83	100.00	100.00	0.00	0.00
2423	83.03	83.03	100.00	100.00	0.00	0.00
2999	79.51	79.52	100.00	100.00	0.00	0.00
4393	67.21	67.20	100.00	100.00	0.00	0.00

Tabela J.10 – Percentagem de Carga em *Soft Handover*, com serviço de referência 144 kbps (PS), 3 frequências, Carga Igual.

# Utilizadores	**Percentagem de Carga em *Soft Handover* [%]**					
	Média		**Máx.**		**Mín.**	
	UL	DL	UL	DL	UL	DL
1346	84.69	84.68	100.00	100.00	0.00	0.00
1890	83.94	83.94	100.00	100.00	0.00	0.00
3556	76.21	76.20	100.00	100.00	0.00	0.00
4120	72.48	72.47	100.00	100.00	0.00	0.00
6934	55.24	55.23	100.00	100.00	0.00	0.00

Tabela J.11 – Percentagem de Carga em *Soft Handover*, com serviço de referência 144 kbps (PS), 4 frequências, Carga Igual.

# Utilizadores	**Percentagem de Carga em *Soft Handover* [%]**					
	Média		**Máx.**		**Mín.**	
	UL	DL	UL	DL	UL	DL
2423	80.07	80.07	100.00	100.00	0.00	0.00
3833	70.97	70.98	100.00	100.00	0.00	0.00
4393	71.47	71.46	100.00	100.00	0.00	0.00
5235	66.48	66.48	100.00	100.00	0.00	0.00
8062	48.03	48.02	100.00	100.00	0.00	0.00

Tabela J.12 – Percentagem de Carga em *Soft Handover*, com serviço de referência 144 kbps (PS), 2 frequências, Distância.

# Utilizadores	**Percentagem de Carga em *Soft Handover* [%]**					
	Média		**Máx.**		**Mín.**	
	UL	DL	UL	DL	UL	DL
1070	75.56	75.55	100.00	100.00	0.00	0.00
1890	67.11	67.11	100.00	100.00	0.00	0.00
2423	60.97	60.98	100.00	100.00	0.00	0.00
2999	56.18	56.19	100.00	100.00	0.00	0.00
4393	45.83	45.85	100.00	100.00	0.00	0.00

Tabela J.13 – Percentagem de Carga em *Soft Handover*, com serviço de referência 144 kbps (PS), 3 frequências, Distância.

# Utilizadores	**Percentagem de Carga em *Soft Handover* [%]**					
	Média		**Máx.**		**Mín.**	
	UL	DL	UL	DL	UL	DL
1346	73.50	73.51	100.00	100.00	0.00	0.00
2423	61.70	61.71	100.00	100.00	0.00	0.00
3556	54.22	54.23	100.00	100.00	0.00	0.00
4120	49.63	49.64	100.00	100.00	0.00	0.00
6934	34.15	34.16	100.00	100.00	0.00	0.00

Tabela J.14 – Percentagem de Carga em *Soft Handover*, com serviço de referência 144 kbps (PS), 4 frequências, Distância.

# Utilizadores	**Percentagem de Carga em *Soft Handover* [%]**					
	Média		**Máx.**		**Mín.**	
	UL	DL	UL	DL	UL	DL
2423	60.62	60.62	100.00	100.00	0.00	0.00
3279	55.92	55.93	100.00	100.00	0.00	0.00
3833	52.50	52.49	100.00	100.00	0.00	0.00
5235	42.83	42.84	100.00	100.00	0.00	0.00
8062	30.58	30.57	100.00	100.00	0.00	0.00

Anexo K Percentagem de Carga em *Softer Handover*

Tabela K.1 – Percentagem de Carga em *Softer Handover*, com serviço de referência 64 kbps (PS), 1 frequência, Carga Igual.

# Utilizadores	Percentagem de Carga em *Softer Handover* [%]					
	Média		Máx.		Mín.	
	UL	DL	UL	DL	UL	DL
699	30.16	30.13	100.00	100.00	0.00	0.00
1070	29.67	29.69	100.00	100.00	0.00	0.00
1890	30.04	30.05	100.00	100.00	0.00	0.00
3556	29.34	29.32	100.00	100.00	0.00	0.00

Tabela K.2 – Percentagem de Carga em *Softer Handover*, com serviço de referência 64 kbps (PS), 2 frequências, Carga Igual.

# Utilizadores	Percentagem de Carga em *Softer Handover* [%]					
	Média		Máx.		Mín.	
	UL	DL	UL	DL	UL	DL
1070	26.39	26.42	100.00	100.00	0.00	0.00
2423	24.34	24.36	100.00	100.00	0.00	0.00
2999	24.48	24.51	100.00	100.00	0.00	0.00
3556	24.89	24.90	100.00	100.00	0.00	0.00
5235	25.05	25.07	100.00	100.00	0.00	0.00

Tabela K.3 – Percentagem de Carga em *Softer Handover*, com serviço de referência 64 kbps (PS), 3 frequências, Carga Igual.

# Utilizadores	Percentagem de Carga em *Softer Handover* [%]					
	Média		Máx.		Mín.	
	UL	DL	UL	DL	UL	DL
2423	23.41	23.40	100.00	100.00	0.00	0.00
4120	21.55	21.57	100.00	100.00	0.00	0.00
5235	22.97	22.96	100.00	100.00	0.00	0.00
8062	22.54	22.53	100.00	100.00	0.00	0.00

Tabela K.4 – Percentagem de Carga em *Softer Handover*, com serviço de referência 64 kbps (PS), 4 frequências, Carga Igual.

# Utilizadores	Percentagem de Carga em *Softer Handover* [%]					
	Média		Máx.		Mín.	
	UL	DL	UL	DL	UL	DL
4393	21.32	21.33	100.00	100.00	0.00	0.00
5235	21.14	21.17	100.00	100.00	0.00	0.00
6659	20.41	20.39	100.00	100.00	0.00	0.00
10914	20.72	20.74	100.00	100.00	0.00	0.00

Tabela K.5 – Percentagem de Carga em *Softer Handover*, com serviço de referência 64 kbps (PS), 2 frequências, Distância.

# Utilizadores	Percentagem de Carga em *Softer Handover* [%]					
	Média		Máx.		Mín.	
	UL	DL	UL	DL	UL	DL
1346	17.24	17.24	100.00	100.00	0.00	0.00
2423	13.18	13.19	100.00	100.00	0.00	0.00
3556	13.32	13.31	100.00	100.00	0.00	0.00
4681	13.49	13.49	100.00	100.00	0.00	0.00
5235	13.33	13.33	100.00	100.00	0.00	0.00

Tabela K.6 – Percentagem de Carga em *Softer Handover*, com serviço de referência 64 kbps (PS), 3 frequências, Distância.

# Utilizadores	Percentagem de Carga em *Softer Handover* [%]					
	Média		Máx.		Mín.	
	UL	DL	UL	DL	UL	DL
2423	13.22	13.22	100.00	100.00	0.00	0.00
4681	11.19	11.23	100.00	100.00	0.00	0.00
5235	10.71	10.71	100.00	100.00	0.00	0.00
8062	10.85	10.85	100.00	100.00	0.00	0.00

Tabela K.7 – Percentagem de Carga em *Softer Handover*, com serviço de referência 64 kbps (PS), 4 frequências, Distância.

# Utilizadores	Percentagem de Carga em *Softer Handover* [%]					
	Média		Máx.		Mín.	
	UL	DL	UL	DL	UL	DL
4393	10.55	10.55	100.00	100.00	0.00	0.00
5235	10.30	10.30	100.00	100.00	0.00	0.00
6934	8.73	8.73	100.00	100.00	0.00	0.00
10914	8.89	8.90	100.00	100.00	0.00	0.00

Tabela K.8 – Percentagem de Carga em *Softer Handover*, com serviço de referência 144 kbps (PS), 1 frequência, Carga Igual.

# Utilizadores	Percentagem de Carga em *Softer Handover* [%]					
	Média		Máx.		Mín.	
	UL	DL	UL	DL	UL	DL
323	22.79	22.80	100.00	100.00	0.00	0.00
699	28.39	28.37	100.00	100.00	0.00	0.00
824	28.63	28.64	100.00	100.00	0.00	0.00
946	28.65	28.67	100.00	100.00	0.00	0.00
2423	29.84	29.85	100.00	100.00	0.00	0.00

Tabela K.9 – Percentagem de Carga em *Softer Handover*, com serviço de referência 144 kbps (PS), 2 frequências, Carga Igual.

# Utilizadores	Percentagem de Carga em *Softer Handover* [%]					
	Média		Máx.		Mín.	
	UL	DL	UL	DL	UL	DL
824	26.10	26.11	100.00	100.00	0.00	0.00
1070	25.47	25.47	100.00	100.00	0.00	0.00
1890	22.63	22.65	100.00	100.00	0.00	0.00
2423	24.96	24.97	100.00	100.00	0.00	0.00
2999	24.92	24.92	100.00	100.00	0.00	0.00
4393	26.15	26.15	100.00	100.00	0.00	0.00

Tabela K.10 – Percentagem de Carga em *Softer Handover*, com serviço de referência 144 kbps (PS), 3 frequências, Carga Igual.

# Utilizadores	Percentagem de Carga em *Softer Handover* [%]					
	Média		Máx.		Mín.	
	UL	DL	UL	DL	UL	DL
1346	25.05	25.04	100.00	100.00	0.00	0.00
1890	25.14	25.17	100.00	100.00	0.00	0.00
3556	22.38	22.40	100.00	100.00	0.00	0.00
4120	22.66	22.67	100.00	100.00	0.00	0.00
6934	23.37	23.35	100.00	100.00	0.00	0.00

Tabela K.11 – Percentagem de Carga em *Softer Handover*, com serviço de referência 144 kbps (PS), 4 frequências, Carga Igual.

# Utilizadores	Percentagem de Carga em *Softer Handover* [%]					
	Média		Máx.		Mín.	
	UL	DL	UL	DL	UL	DL
2423	23.58	23.59	100.00	100.00	0.00	0.00
3833	20.65	20.68	100.00	100.00	0.00	0.00
4393	21.67	21.64	100.00	100.00	0.00	0.00
5235	21.22	21.18	100.00	100.00	0.00	0.00
8062	18.73	18.72	100.00	100.00	0.00	0.00

Tabela K.12 – Percentagem de Carga em *Softer Handover*, com serviço de referência 144 kbps (PS), 2 frequências, Distância.

# Utilizadores	Percentagem de Carga em *Softer Handover* [%]					
	Média		Máx.		Mín.	
	UL	DL	UL	DL	UL	DL
1070	17.90	17.90	100.00	100.00	0.00	0.00
1890	14.78	14.78	100.00	100.00	0.00	0.00
2423	13.25	13.26	100.00	100.00	0.00	0.00
2999	13.22	13.22	100.00	100.00	0.00	0.00
4393	13.68	13.70	100.00	100.00	0.00	0.00

Tabela K.13 – Percentagem de Carga em *Softer Handover*, com serviço de referência 144 kbps (PS), 3 frequências, Distância.

# Utilizadores	Percentagem de Carga em *Softer Handover* [%]					
	Média		Máx.		Mín.	
	UL	DL	UL	DL	UL	DL
1346	17.75	17.74	100.00	100.00	0.00	0.00
2423	12.70	12.68	100.00	100.00	0.00	0.00
3556	11.06	11.06	100.00	100.00	0.00	0.00
4120	10.37	10.37	100.00	100.00	0.00	0.00
6934	9.84	9.84	100.00	100.00	0.00	0.00

Tabela K.14 – Percentagem de Carga em *Softer Handover*, com serviço de referência 144 kbps (PS), 4 frequências, Carga Igual.

# Utilizadores	Percentagem de Carga em *Softer Handover* [%]					
	Média		Máx.		Mín.	
	UL	DL	UL	DL	UL	DL
2423	12.12	12.10	100.00	100.00	0.00	0.00
3279	10.67	10.68	100.00	100.00	0.00	0.00
3833	9.98	9.96	100.00	100.00	0.00	0.00
5235	8.37	8.37	100.00	100.00	0.00	0.00
8062	7.33	7.34	100.00	100.00	0.00	0.00

Anexo L Capacidade

Tabela L.1 – Capacidade, com serviço de referência 64 kbps (PS), 1 frequência, Carga Igual.

# Utilizadores	Capacidade [kbps]		
	Média	Máx.	Mín.
699	201.30	472.40	0.00
1070	236.79	472.40	0.00
1890	264.39	472.40	0.00
3556	272.60	472.40	0.00

Tabela L.2 – Capacidade, com serviço de referência 64 kbps (PS), 2 frequências, Carga Igual.

# Utilizadores	Capacidade [kbps]		
	Média	Máx.	Mín.
1070	200.00	493.80	0.00
2423	242.49	472.40	0.00
2999	250.97	472.40	0.00
3556	253.16	481.60	0.00
5235	258.29	493.80	0.00

Tabela L.3 – Capacidade, com serviço de referência 64 kbps (PS), 3 frequências, Carga Igual.

# Utilizadores	Capacidade [kbps]		
	Média	Máx.	Mín.
2423	237.27	481.60	0.00
4120	255.72	481.60	0.00
5235	257.10	481.60	0.00
8062	254.76	493.80	0.00

Tabela L.4 – Capacidade, com serviço de referência 64 kbps (PS), 4 frequências, Carga Igual.

# Utilizadores	Capacidade [kbps]		
	Média	Máx.	Mín.
4393	255.79	472.40	0.00
5235	260.30	472.40	0.00
6659	260.95	493.80	0.00
10914	258.48	481.60	0.00

Tabela L.5 – Capacidade, com serviço de referência 64 kbps (PS), 2 frequências, Distância.

# Utilizadores	Capacidade [kbps]		
	Média	Máx.	Mín.
1346	180.42	472.40	0.00
2423	186.77	481.60	0.00
3556	197.87	472.40	0.00
4681	207.76	472.40	0.00
5235	211.24	472.40	0.00

Tabela L.6 – Capacidade, com serviço de referência 64 kbps (PS), 3 frequências, Distância.

# Utilizadores	Capacidade [kbps]		
	Média	Máx.	Mín.
2423	189.82	472.40	0.00
4681	202.38	481.60	0.00
5235	203.16	472.40	0.00
8062	216.26	481.60	0.00

Tabela L.7 – Capacidade, com serviço de referência 64 kbps (PS), 4 frequências, Distância.

# Utilizadores	Capacidade [kbps]		
	Média	Máx.	Mín.
4393	199.43	472.40	0.00
5235	203.32	481.60	0.00
6934	205.48	493.80	0.00
10914	208.08	472.40	0.00

Tabela L.8 – Capacidade, com serviço de referência 144 kbps (PS), 1 frequência, Carga Igual.

# Utilizadores	Capacidade [kbps]		
	Média	Máx.	Mín.
323	93.70	472.40	0.00
699	163.96	472.40	0.00
824	181.24	472.40	0.00
946	192.15	472.40	0.00
2423	249.04	481.60	0.00

Tabela L.9 – Capacidade, com serviço de referência 144 kbps (PS), 2 frequências, Carga Igual.

# Utilizadores	Capacidade [kbps]		
	Média	Máx.	Mín.
824	160.06	493.80	0.00
1070	183.21	493.80	0.00
1890	214.42	481.60	0.00
2423	233.04	493.80	0.00
2999	240.89	493.80	0.00
4393	247.89	493.80	0.00

Tabela L.10 – Capacidade, com serviço de referência 144 kbps (PS), 3 frequências, Carga Igual.

# Utilizadores	Capacidade [kbps]		
	Média	Máx.	Mín.
1346	192.70	493.80	0.00
1890	214.23	481.60	0.00
3556	244.59	493.80	0.00
4120	246.34	493.80	0.00
6934	244.80	493.80	0.00

Tabela L.11 – Capacidade, com serviço de referência 144 kbps (PS), 4 frequências, Carga Igual.

# Utilizadores	Capacidade [kbps]		
	Média	**Máx.**	**Mín.**
2423	231.63	493.80	0.00
3833	236.63	493.80	0.00
4393	250.23	493.80	0.00
5235	252.21	493.80	0.00
8062	244.59	493.80	0.00

Tabela L.12 – Capacidade, com serviço de referência 144 kbps (PS), 2 frequências, Distância.

# Utilizadores	Capacidade [kbps]		
	Média	**Máx.**	**Mín.**
1070	165.94	472.40	0.00
1890	181.09	472.40	0.00
2423	188.97	493.80	0.00
2999	196.05	472.40	0.00
4393	210.92	481.60	0.00

Tabela L.13 – Capacidade, com serviço de referência 144 kbps (PS), 3 frequências, Distância.

# Utilizadores	Capacidade [kbps]		
	Média	**Máx.**	**Mín.**
1346	174.39	481.60	0.00
2423	191.37	493.80	0.00
3556	201.34	493.80	0.00
4120	204.86	493.80	0.00
6934	214.25	481.60	0.00

Tabela L.14 – Capacidade, com serviço de referência 144 kbps (PS), 4 frequências, Distância.

# Utilizadores	Capacidade [kbps]		
	Média	**Máx.**	**Mín.**
2423	192.90	481.60	0.00
3279	198.45	493.80	0.00
3833	202.34	493.80	0.00
5235	204.53	481.60	0.00
8062	208.08	493.80	0.00

Anexo M Potência

Tabela M.1 – Potência, com serviço de referência 64 kbps (PS), 1 frequência, Carga Igual.

# Utilizadores	Potência [dBm]		
	Média	Máx.	Mín.
699	12.32	20.85	-50.52
1070	12.30	21.36	-45.05
1890	10.68	21.38	-64.09
3556	7.82	21.27	-40.84

Tabela M.2 – Potência, com serviço de referência 64 kbps (PS), 2 frequências, Carga Igual.

# Utilizadores	Potência [dBm]		
	Média	Máx.	Mín.
1070	13.16	20.97	-59.92
2423	13.17	21.03	-60.09
2999	12.81	21.08	-56.32
3556	12.26	21.89	-40.32
5235	10.96	20.75	-79.48

Tabela M.3 – Potência, com serviço de referência 64 kbps (PS), 3 frequências, Carga Igual.

# Utilizadores	Potência [dBm]		
	Média	Máx.	Mín.
2423	13.49	22.41	-49.23
4120	13.09	21.20	-56.55
5235	12.38	21.12	-43.28
8062	10.85	20.90	-85.12

Tabela M.4 – Potência, com serviço de referência 64 kbps (PS), 4 frequências, Carga Igual.

# Utilizadores	Potência [dBm]		
	Média	Máx.	Mín.
4393	13.37	21.01	-37.21
5235	13.13	21.00	-42.58
6659	12.48	21.15	-55.17
10914	10.70	22.21	-63.78

Tabela M.5 – Potência, com serviço de referência 64 kbps (PS), 2 frequências, Distância.

# Utilizadores	Potência [dBm]		
	Média	Máx.	Mín.
1346	13.10	21.66	-44.48
2423	12.72	22.25	-44.62
3556	11.89	21.51	-39.18
4681	10.82	21.63	-55.17
5235	10.46	21.10	-48.47

Tabela M.6 – Potência, com serviço de referência 64 kbps (PS), 3 frequências, Distância.

# Utilizadores	Potência [dBm]		
	Média	Máx.	Mín.
2423	13.01	21.37	-49.23
4681	11.86	21.74	-43.21
5235	11.57	21.88	-48.43
8062	10.01	22.41	-67.54

Tabela M.7 – Potência, com serviço de referência 64 kbps (PS), 4 frequências, Distância.

# Utilizadores	Potência [dBm]		
	Média	Máx.	Mín.
4393	12.50	22.17	-58.22
5235	12.16	22.16	-45.72
6934	11.44	21.95	-46.94
10914	9.87	22.58	-58.31

Tabela M.8 – Potência, com serviço de referência 144 kbps (PS), 1 frequências, Carga Igual.

# Utilizadores	Potência [dBm]		
	Média	Máx.	Mín.
323	6.75	18.24	-61.02
699	8.01	18.33	-62.59
824	8.05	18.13	-57.61
946	8.19	19.32	-54.74
2423	6.52	18.33	-61.40

Tabela M.9 - Potência, com serviço de referência 144 kbps (PS), 2 frequências, Carga Igual.

# Utilizadores	Potência [dBm]		
	Média	Máx.	Mín.
824	8.49	17.96	-55.38
1070	8.92	17.83	-86.08
1890	9.11	17.83	-67.50
2423	8.94	17.66	-55.21
2999	8.55	18.13	-55.46
4393	7.43	17.43	-85.15

Tabela M.10 – Potência, com serviço de referência 144 kbps (PS), 3 frequências, Carga Igual.

# Utilizadores	Potência [dBm]		
	Média	Máx.	Mín.
1346	9.15	17.97	-65.15
1890	9.32	18.35	-56.30
3556	9.17	17.99	-54.16
4120	8.81	17.71	-59.60
6934	7.16	17.71	-65.15

Tabela M.11 – Potência, com serviço de referência 144 kbps (PS), 4 frequências, Carga Igual.

# Utilizadores	Potência [dBm]		
	Média	Máx.	Mín.
2423	9.54	17.78	-66.44
3833	9.37	18.19	-90.84
4393	9.22	17.98	-56.05
5235	8.88	18.11	-56.70
8062	7.61	18.57	-62.74

Tabela M.12 – Potência, com serviço de referência 144 kbps (PS), 2 frequências, Distância.

# Utilizadores	Potência [dBm]		
	Média	Máx.	Mín.
1070	9.07	19.00	-49.56
1890	9.06	18.52	-44.59
2423	8.92	18.81	-53.79
2999	8.70	19.21	-54.02
4393	7.60	18.18	-58.22

Tabela M.13 – Potência, com serviço de referência 144 kbps (PS), 3 frequências, Distância.

# Utilizadores	Potência [dBm]		
	Média	Máx.	Mín.
1346	9.06	18.15	-48.45
2423	9.29	18.67	-51.18
3556	8.89	19.11	-56.18
4120	8.60	19.11	-52.88
6934	7.03	18.85	-72.98

Tabela M.14 – Potência, com serviço de referência 144 kbps (PS), 4 frequências, Distância.

# Utilizadores	Potência [dBm]		
	Média	Máx.	Mín.
2423	9.41	18.80	-47.58
3279	9.26	18.74	-51.15
3833	9.12	18.35	-60.99
5235	8.49	18.52	-49.54
8062	7.31	18.85	-71.48

Anexo N Ritmo Efectivo Relativo Médio

Tabela N.1 – Ritmo Efectivo Relativo Médio, com serviço de referência 64 kbps (PS), 1 frequência, Carga Igual.

# Utilizadores	Serviço	Ritmo Efectivo Relativo Médio [%]		
		Média	Máx.	Mín.
699	144 kbps CS	47.29	51.11	44.44
	144 kbps PS	48.16	50.98	44.44
	384 kbps PS	20.88	26.39	17.30
1070	144 kbps CS	47.32	49.49	45.74
	144 kbps PS	46.10	48.32	44.44
	384 kbps PS	17.94	19.03	16.67
1890	144 kbps CS	46.89	47.81	45.93
	144 kbps PS	48.20	50.34	45.23
	384 kbps PS	18.63	19.72	17.83
3556	144 kbps CS	49.42	51.19	47.78
	144 kbps PS	47.88	49.54	46.76
	384 kbps PS	19.29	20.57	18.38

Tabela N.2 – Ritmo Efectivo Relativo Médio, com serviço de referência 64 kbps (PS), 2 frequências, Carga Igual.

# Utilizadores	Serviço	Ritmo Efectivo Relativo Médio [%]		
		Média	Máx.	Mín.
1070	144 kbps CS	48.13	51.65	45.68
	144 kbps PS	48.25	51.75	44.44
	384 kbps PS	19.14	20.26	18.48
2423	144 kbps CS	49.19	50.17	47.06
	144 kbps PS	48.31	48.80	47.45
	384 kbps PS	18.91	19.72	18.32
2999	144 kbps CS	49.39	50.73	48.18
	144 kbps PS	49.15	50.82	48.06
	384 kbps PS	19.61	20.31	18.79
3556	144 kbps CS	48.76	50.62	47.18
	144 kbps PS	49.11	51.08	48.36
	384 kbps PS	19.75	20.55	18.68
5235	144 kbps CS	52.57	53.94	50.29
	144 kbps PS	51.40	53.08	50.32
	384 kbps PS	22.48	24.22	21.32

Tabela N.3 – Ritmo Efectivo Relativo Médio, com serviço de referência 64 kbps (PS), 3 frequências, Carga Igual.

# Utilizadores	Serviço	Ritmo Efectivo Relativo Médio [%]		
		Média	Máx.	Mín.
2423	144 kbps CS	49.85	50.88	48.72
	144 kbps PS	48.74	50.16	47.37
	384 kbps PS	20.72	23.13	18.56
4120	144 kbps CS	50.83	51.94	48.83
	144 kbps PS	50.15	50.69	49.25
	384 kbps PS	21.16	21.88	20.50
5235	144 kbps CS	51.66	53.86	50.30
	144 kbps PS	52.86	54.95	52.00
	384 kbps PS	24.20	25.70	21.86
8062	144 kbps CS	56.58	58.06	54.94
	144 kbps PS	54.78	55.35	54.37
	384 kbps PS	26.82	27.45	26.26

Tabela N.4 – Ritmo Efectivo Relativo Médio, com serviço de referência 64 kbps (PS), 4 frequências, Carga Igual.

# Utilizadores	Serviço	Ritmo Efectivo Relativo Médio [%]		
		Média	Máx.	Mín.
4393	144 kbps CS	51.08	53.09	48.60
	144 kbps PS	50.70	52.01	49.22
	384 kbps PS	23.07	24.23	21.79
5235	144 kbps CS	52.10	52.72	51.29
	144 kbps PS	52.41	53.47	52.03
	384 kbps PS	23.92	24.40	23.24
6659	144 kbps CS	54.25	56.05	52.27
	144 kbps PS	53.90	54.73	53.19
	384 kbps PS	24.37	25.25	23.63
10914	144 kbps CS	58.77	59.34	57.52
	144 kbps PS	56.32	57.68	54.98
	384 kbps PS	28.25	28.97	26.04

Tabela N.5 – Ritmo Efectivo Relativo Médio, com serviço de referência 64 kbps (PS), 2 frequências, Distância.

# Utilizadores	Serviço	Ritmo Efectivo Relativo Médio [%]		
		Média	Máx.	Mín.
1346	144 kbps CS	49.08	51.92	46.50
	144 kbps PS	48.88	50.85	47.13
	384 kbps PS	21.66	24.51	19.73
2423	144 kbps CS	48.90	51.05	47.46
	144 kbps PS	49.22	51.39	46.89
	384 kbps PS	20.17	20.73	19.32
3556	144 kbps CS	51.11	51.39	50.70
	144 kbps PS	50.22	52.49	48.96
	384 kbps PS	20.60	21.21	20.11
4681	144 kbps CS	52.42	53.94	51.24
	144 kbps PS	50.30	51.85	48.59
	384 kbps PS	21.83	22.72	20.87
5235	144 kbps CS	52.73	54.07	51.22
	144 kbps PS	50.67	51.48	49.80
	384 kbps PS	20.67	21.44	18.94

Tabela N.6 – Ritmo Efectivo Relativo Médio, com serviço de referência 64 kbps (PS), 3 frequências, Distância.

# Utilizadores	Serviço	Ritmo Efectivo Relativo Médio [%]		
		Média	Máx.	Mín.
2423	144 kbps CS	49.67	51.06	48.11
	144 kbps PS	50.07	52.02	47.59
	384 kbps PS	20.57	21.98	19.31
4681	144 kbps CS	51.32	53.86	49.35
	144 kbps PS	50.36	53.10	48.66
	384 kbps PS	21.27	22.17	20.26
5235	144 kbps CS	51.96	52.76	51.68
	144 kbps PS	50.31	52.15	48.57
	384 kbps PS	21.03	21.56	20.46
8062	144 kbps CS	52.88	53.33	52.00
	144 kbps PS	51.80	53.79	50.26
	384 kbps PS	21.58	23.31	20.24

Tabela N.7 – Ritmo Efectivo Relativo Médio, com serviço de referência 64 kbps (PS), 4 frequências, Distância.

# Utilizadores	Serviço	Ritmo Efectivo Relativo Médio [%]		
		Média	Máx.	Mín.
4393	144 kbps CS	51.77	53.33	50.07
	144 kbps PS	51.01	52.02	50.07
	384 kbps PS	21.23	22.23	20.55
5235	144 kbps CS	52.53	53.04	51.75
	144 kbps PS	51.18	53.36	49.77
	384 kbps PS	20.46	21.15	19.71
6934	144 kbps CS	52.73	54.49	52.00
	144 kbps PS	51.46	51.73	51.12
	384 kbps PS	20.21	21.27	19.38
10914	144 kbps CS	54.46	55.47	52.96
	144 kbps PS	52.96	53.77	51.42
	384 kbps PS	21.72	22.26	21.02

Tabela N.8 – Ritmo Efectivo Relativo Médio, com serviço de referência 144 kbps (PS), 1 frequência, Carga Igual, com serviço 384 kbps PS.

# Utilizadores	Ritmo Efectivo Relativo Médio [%]		
	Média	Máx.	Mín.
323	52.22	54.86	48.53
699	43.18	46.43	39.19
824	43.17	46.43	39.02
946	43.71	45.31	40.48
2423	44.28	45.65	42.07

Tabela N.9 – Ritmo Efectivo Relativo Médio, com serviço de referência 144 kbps (PS), 2 frequências, Carga Igual, com serviço 384 kbps PS.

# Utilizadores	Ritmo Efectivo Relativo Médio [%]		
	Média	Máx.	Mín.
824	45.89	48.44	42.43
1070	46.06	50.21	43.75
1890	47.29	50.93	44.38
2423	46.13	47.52	44.91
2999	48.36	51.43	45.36
4393	49.47	50.39	48.43

Tabela N.10 – Ritmo Efectivo Relativo Médio, com serviço de referência 144 kbps (PS), 3 frequências, Carga Igual, com serviço 384 kbps PS.

# Utilizadores	Ritmo Efectivo Relativo Médio [%]		
	Média	Máx.	Mín.
1346	46.45	50.40	42.54
1890	43.95	46.88	41.89
3556	49.75	50.66	49.32
4120	48.94	49.95	48.06
6934	55.01	56.49	54.11

Tabela N.11 – Ritmo Efectivo Relativo Médio, com serviço de referência 144 kbps (PS), 4 frequências, Carga Igual, com serviço 384 kbps PS.

# Utilizadores	Ritmo Efectivo Relativo Médio [%]		
	Média	Máx.	Mín.
2423	48.36	49.58	47.01
3833	49.73	52.29	47.64
4393	49.62	51.60	47.30
5235	52.59	54.02	50.19
8062	53.31	56.14	45.57

Tabela N.12 – Ritmo Efectivo Relativo Médio, com serviço de referência 144 kbps (PS), 2 frequências, Distância, com serviço 384 kbps PS.

# Utilizadores	Ritmo Efectivo Relativo Médio [%]		
	Média	Máx.	Mín.
1070	46.85	52.87	44.92
1890	46.87	48.45	43.69
2423	49.00	51.54	46.09
2999	47.71	51.09	45.52
4393	49.57	51.26	47.20

Tabela N.13 – Ritmo Efectivo Relativo Médio, com serviço de referência 144 kbps (PS), 3 frequências, Distância, com serviço 384 kbps PS.

# Utilizadores	Ritmo Efectivo Relativo Médio [%]		
	Média	Máx.	Mín.
1346	48.25	50.83	44.35
2423	47.97	50.37	45.37
3556	47.00	49.09	44.60
4120	48.48	50.16	47.25
6934	49.42	50.14	48.62

Tabela N.14 – Ritmo Efectivo Relativo Médio, com serviço de referência 144 kbps (PS), 4 frequências, Distância, com serviço 384 kbps PS.

# Utilizadores	**Ritmo Efectivo Relativo Médio [%]**		
	Média	**Máx.**	**Mín.**
2423	47.13	48.55	45.54
3279	48.40	50.39	46.47
3833	47.74	48.22	46.79
5235	48.81	53.81	45.57
8062	49.63	51.26	48.81

Anexo O Ritmo Efectivo Relativo dos Atrasados

Tabela O.1 – Ritmo Efectivo Relativo dos Atrasados, com serviço de referência 64 kbps (PS), 1 frequência, Carga Igual, com serviço 384 kbps PS.

# Utilizadores	Ritmo Efectivo Relativo dos Atrasados [%]		
	Média	Máx.	Mín.
699	17.69	18.21	17.23
1070	17.11	17.47	16.67
1890	17.28	17.59	17.06
3556	18.11	18.66	17.88

Tabela O.2 – Ritmo Efectivo Relativo dos Atrasados, com serviço de referência 64 kbps (PS), 2 frequências, Carga Igual, com serviço 384 kbps PS.

# Utilizadores	Ritmo Efectivo Relativo dos Atrasados [%]		
	Média	Máx.	Mín.
1070	17.70	18.48	17.41
2423	17.98	18.64	17.53
2999	18.16	18.36	17.86
3556	18.69	19.30	18.24
5235	18.98	19.13	18.78

Tabela O.3 – Ritmo Efectivo Relativo dos Atrasados, com serviço de referência 64 kbps (PS), 3 frequências, Carga Igual, com serviço 384 kbps PS.

# Utilizadores	Ritmo Efectivo Relativo dos Atrasados [%]		
	Média	Máx.	Mín.
2423	18.43	18.80	17.88
4120	19.03	19.40	18.59
5235	19.54	19.81	19.13
8062	20.09	20.38	19.55

Tabela O.4 – Ritmo Efectivo Relativo dos Atrasados, com serviço de referência 64 kbps (PS), 4 frequências, Carga Igual, com serviço 384 kbps PS.

# Utilizadores	Ritmo Efectivo Relativo dos Atrasados [%]		
	Média	Máx.	Mín.
4393	19.58	20.37	19.04
5235	19.98	20.25	19.63
6659	20.01	20.41	19.44
10914	20.95	21.33	20.39

Tabela O.5 – Ritmo Efectivo Relativo dos Atrasados, com serviço de referência 64 kbps (PS), 2 frequências, Distância, com serviço 384 kbps PS.

# Utilizadores	**Ritmo Efectivo Relativo dos Atrasados [%]**		
	Média	**Máx.**	**Mín.**
1346	17.98	18.86	17.30
2423	18.55	19.01	17.67
3556	18.58	18.99	18.18
4681	19.21	19.95	18.80
5235	18.99	19.43	18.64

Tabela O.6 – Ritmo Efectivo Relativo dos Atrasados, com serviço de referência 64 kbps (PS), 3 frequências, Distância, com serviço 384 kbps PS.

# Utilizadores	**Ritmo Efectivo Relativo dos Atrasados [%]**		
	Média	**Máx.**	**Mín.**
2423	18.31	18.62	17.98
4681	18.93	19.29	18.73
5235	18.48	18.85	18.31
8062	19.48	19.89	19.11

Tabela O.7 – Ritmo Efectivo Relativo dos Atrasados, com serviço de referência 64 kbps (PS), 4 frequências, Distância, com serviço 384 kbps PS.

# Utilizadores	**Ritmo Efectivo Relativo dos Atrasados [%]**		
	Média	**Máx.**	**Mín.**
4393	19.06	19.26	18.92
5235	18.77	18.97	18.53
6934	19.05	19.99	18.55
10914	19.65	20.01	19.11

Anexo P Percentagem de Atrasados

Tabela P.1 – Percentagem de Atrasados, com serviço de referência 64 kbps (PS), 1 frequência, Carga Igual.

# Utilizadores	Serviço	Atrasados [%]		
		Média	Máx.	Mín.
699	144 kbps CS	94.88	100.00	88.00
	144 kbps PS	93.31	100.00	88.24
	384 kbps PS	96.10	100.00	90.00
1070	144 kbps CS	94.82	97.67	90.91
	144 kbps PS	97.02	100.00	93.02
	384 kbps PS	99.00	100.00	98.11
1890	144 kbps CS	95.60	97.33	93.94
	144 kbps PS	93.24	98.59	89.39
	384 kbps PS	98.37	99.07	97.41
3556	144 kbps CS	91.05	94.00	87.85
	144 kbps PS	93.82	95.83	90.83
	384 kbps PS	98.56	99.41	97.58

Tabela P.2 – Percentagem de Atrasados, com serviço de referência 64 kbps (PS), 2 frequências, Carga Igual.

# Utilizadores	Serviço	Atrasados [%]		
		Média	Máx.	Mín.
1070	144 kbps CS	93.37	97.78	87.04
	144 kbps PS	93.16	100.00	86.84
	384 kbps PS	98.25	100.00	96.55
2423	144 kbps CS	91.47	95.28	89.69
	144 kbps PS	93.04	94.59	92.16
	384 kbps PS	98.87	99.28	98.47
2999	144 kbps CS	91.10	93.28	88.68
	144 kbps PS	91.52	93.50	88.52
	384 kbps PS	98.22	98.87	97.59
3556	144 kbps CS	92.24	95.07	88.89
	144 kbps PS	91.61	92.96	88.06
	384 kbps PS	98.70	99.54	97.54
5235	144 kbps CS	85.37	89.47	82.91
	144 kbps PS	87.48	89.42	84.46
	384 kbps PS	95.68	97.22	93.66

Tabela P.3 – Percentagem de Atrasados, com serviço de referência 64 kbps (PS), 3 frequências, Carga Igual.

# Utilizadores	Serviço	Atrasados [%]		
		Média	Máx.	Mín.
2423	144 kbps CS	90.27	92.31	88.42
	144 kbps PS	92.27	94.74	89.72
	384 kbps PS	97.20	99.17	94.48
4120	144 kbps CS	88.51	92.11	86.50
	144 kbps PS	89.74	91.36	88.76
	384 kbps PS	97.37	98.25	96.20
5235	144 kbps CS	87.00	89.45	83.04
	144 kbps PS	84.85	86.41	81.08
	384 kbps PS	94.21	97.44	92.65
8062	144 kbps CS	78.16	81.11	75.50
	144 kbps PS	81.39	82.13	80.37
	384 kbps PS	91.58	92.52	90.78

Tabela P.4 – Percentagem de Atrasados, com serviço de referência 64 kbps (PS), 4 frequências, Carga Igual.

# Utilizadores	Serviço	Atrasados [%]		
		Média	Máx.	Mín.
4393	144 kbps CS	88.06	92.53	84.43
	144 kbps PS	88.74	91.40	86.39
	384 kbps PS	95.66	96.83	94.80
5235	144 kbps CS	86.22	87.68	85.11
	144 kbps PS	85.66	86.34	83.76
	384 kbps PS	95.07	96.06	94.29
6659	144 kbps CS	82.36	85.91	79.11
	144 kbps PS	82.99	84.25	81.48
	384 kbps PS	94.55	95.65	93.70
10914	144 kbps CS	74.22	76.46	73.18
	144 kbps PS	78.62	81.04	76.18
	384 kbps PS	90.76	92.91	89.88

Tabela P.5 – Percentagem de Atrasados, com serviço de referência 64 kbps (PS), 2 frequências, Distância.

# Utilizadores	Serviço	Atrasados [%]		
		Média	Máx.	Mín.
1346	144 kbps CS	91.65	96.30	86.54
	144 kbps PS	92.02	95.16	88.46
	384 kbps PS	95.52	98.70	92.21
2423	144 kbps CS	91.97	94.57	88.12
	144 kbps PS	91.40	95.60	87.50
	384 kbps PS	98.01	98.64	97.35
3556	144 kbps CS	88.00	88.73	87.50
	144 kbps PS	89.61	91.87	85.53
	384 kbps PS	97.51	98.35	96.45
4681	144 kbps CS	85.64	87.77	82.90
	144 kbps PS	89.46	92.54	86.67
	384 kbps PS	96.76	97.94	95.98
5235	144 kbps CS	85.09	87.80	82.67
	144 kbps PS	88.79	90.36	87.33
	384 kbps PS	97.93	99.64	97.07

Tabela P.6 – Percentagem de Atrasados, com serviço de referência 64 kbps (PS), 3 frequências, Distância.

# Utilizadores	Serviço	Atrasados [%]		
		Média	Máx.	Mín.
2423	144 kbps CS	90.59	93.40	88.10
	144 kbps PS	89.88	94.34	86.36
	384 kbps PS	97.23	98.51	95.86
4681	144 kbps CS	87.63	91.18	83.05
	144 kbps PS	89.35	92.42	84.42
	384 kbps PS	97.12	98.13	96.43
5235	144 kbps CS	86.48	86.97	85.03
	144 kbps PS	89.43	92.58	86.12
	384 kbps PS	96.88	97.50	96.14
8062	144 kbps CS	84.81	86.39	84.00
	144 kbps PS	86.76	89.53	83.19
	384 kbps PS	97.39	98.70	95.73

Tabela P.7 - Percentagem de Atrasados, com serviço de referência 64 kbps (PS), 4 frequências, Distância.

# Utilizadores	Serviço	Atrasados [%]		
		Média	Máx.	Mín.
4393	144 kbps CS	86.82	89.88	84.00
	144 kbps PS	88.18	89.87	86.36
	384 kbps PS	97.32	98.10	95.95
5235	144 kbps CS	85.44	86.85	84.54
	144 kbps PS	87.88	90.41	83.94
	384 kbps PS	97.91	99.03	96.84
6934	144 kbps CS	85.09	86.40	81.91
	144 kbps PS	87.37	87.99	86.89
	384 kbps PS	98.57	98.98	98.38
10914	144 kbps CS	81.97	84.68	80.15
	144 kbps PS	84.66	87.44	83.22
	384 kbps PS	97.42	98.11	96.83

Tabela P.8 – Percentagem de Atrasados, com serviço de referência 144 kbps (PS), 1 frequências, Carga Igual.

# Utilizadores	Atrasados [%]		
	Média	Máx.	Mín.
323	76.44	82.35	72.22
699	90.91	97.30	85.71
824	90.92	97.56	85.71
946	90.07	95.24	87.50
2423	89.16	92.68	86.96

Tabela P.9 – Percentagem de Atrasados, com serviço de referência 144 kbps (PS), 2 frequências, Carga Igual.

# Utilizadores	Atrasados [%]		
	Média	Máx.	Mín.
824	86.57	92.11	82.50
1070	86.30	90.00	79.66
1890	84.34	89.00	78.50
2423	86.19	88.15	83.97
2999	82.63	87.42	77.71
4393	80.84	82.51	79.38

Tabela P.10 – Percentagem de Atrasados, com serviço de referência 144 kbps (PS), 3 frequências, Carga Igual.

# Utilizadores	Atrasados [%]		
	Média	Máx.	Mín.
1346	85.68	91.94	79.37
1890	89.69	92.98	85.00
3556	80.39	81.09	78.95
4120	81.70	83.11	80.08
6934	71.98	73.42	69.62

Tabela P.11 – Percentagem de Atrasados, com serviço de referência 144 kbps (PS), 4 frequências, Carga Igual.

# Utilizadores	Atrasados [%]		
	Média	Máx.	Mín.
2423	82.62	84.78	80.67
3833	80.43	83.77	76.34
4393	80.61	84.31	77.45
5235	75.86	79.70	73.56
8062	74.70	87.09	70.18

Tabela P.12 – Percentagem de Atrasados, com serviço de referência 144 kbps (PS), 2 frequências, Distância.

# Utilizadores	Atrasados [%]		
	Média	Máx.	Mín.
1070	85.05	88.14	75.41
1890	85.01	90.09	82.47
2423	81.60	86.26	77.54
2999	83.67	87.16	78.26
4393	80.69	84.48	77.98

Tabela P.13 – Percentagem de Atrasados, com serviço de referência 144 kbps (PS), 3 frequências, Distância.

# Utilizadores	Atrasados [%]		
	Média	Máx.	Mín.
1346	82.80	89.04	78.67
2423	83.25	87.41	79.41
3556	84.80	88.64	81.46
4120	82.43	84.40	79.74
6934	80.93	82.22	79.78

Tabela P.14 – Percentagem de Atrasados, com serviço de referência 144 kbps (PS), 4 frequências, Distância.

# Utilizadores	Atrasados [%]		
	Média	Máx.	Mín.
2423	84.59	87.14	82.31
3279	82.56	85.64	79.38
3833	83.61	85.14	82.84
5235	81.91	87.08	73.90
8062	80.59	81.90	77.99

Anexo Q Raio Normalizado

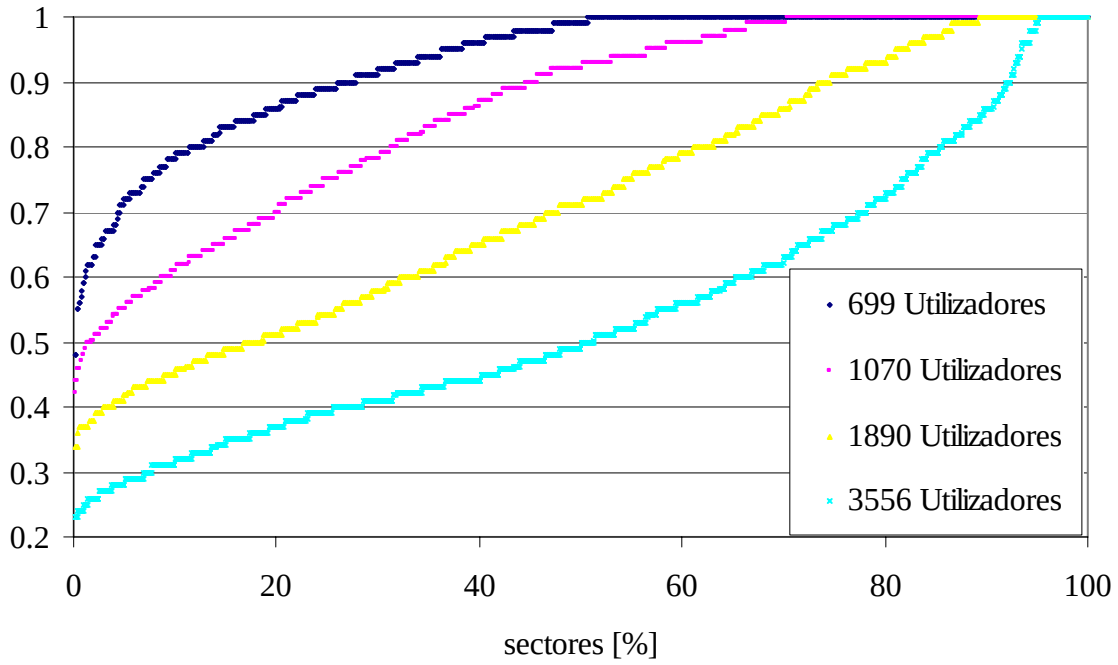


Figura Q.1 – Raio normalizado ordenado; 64 kbps (PS), Carga Igual, 1 frequência

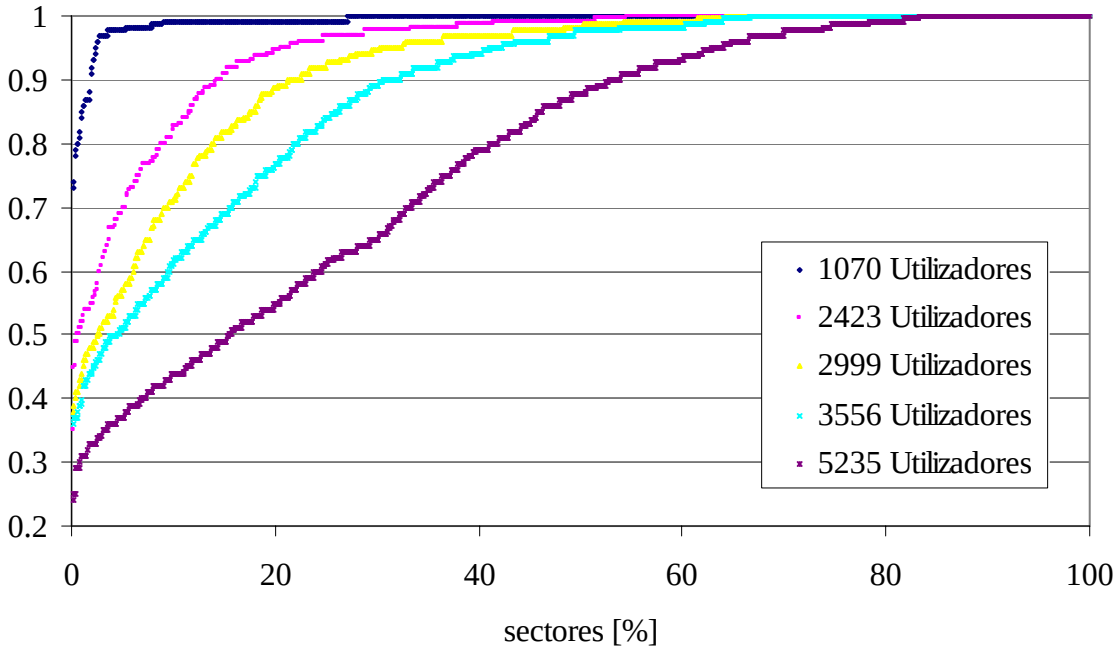


Figura Q.2 – Raio normalizado ordenado; 64kbps (PS), Carga Igual, 2 frequências

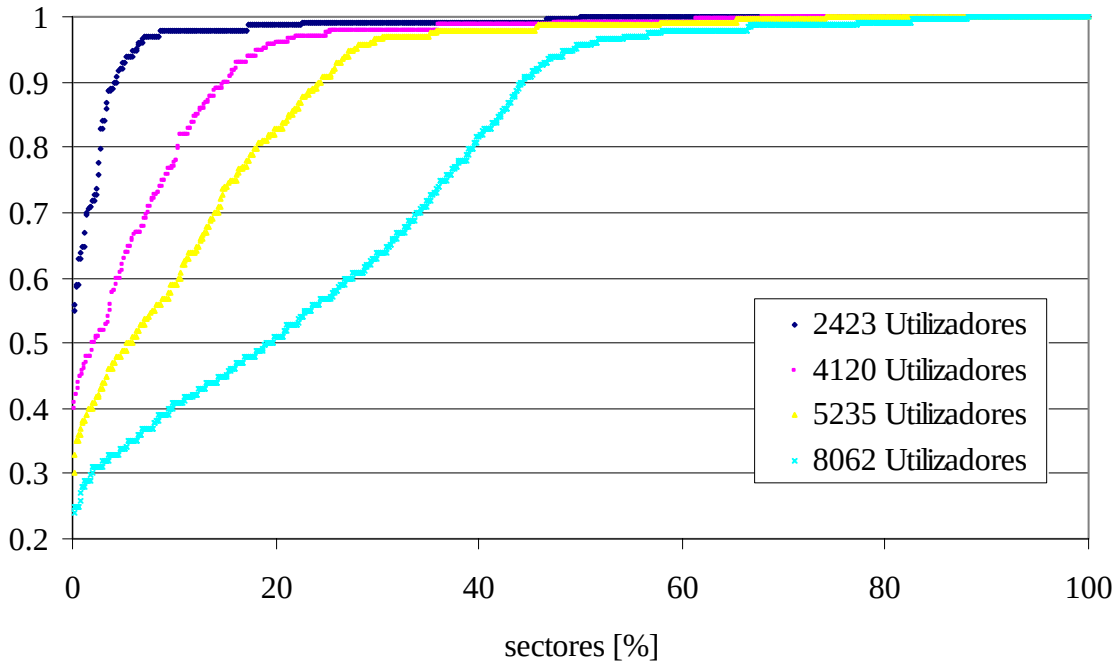


Figura Q.3 – Raio normalizado ordenado; 64kbps (PS), Carga Igual, 3 frequências

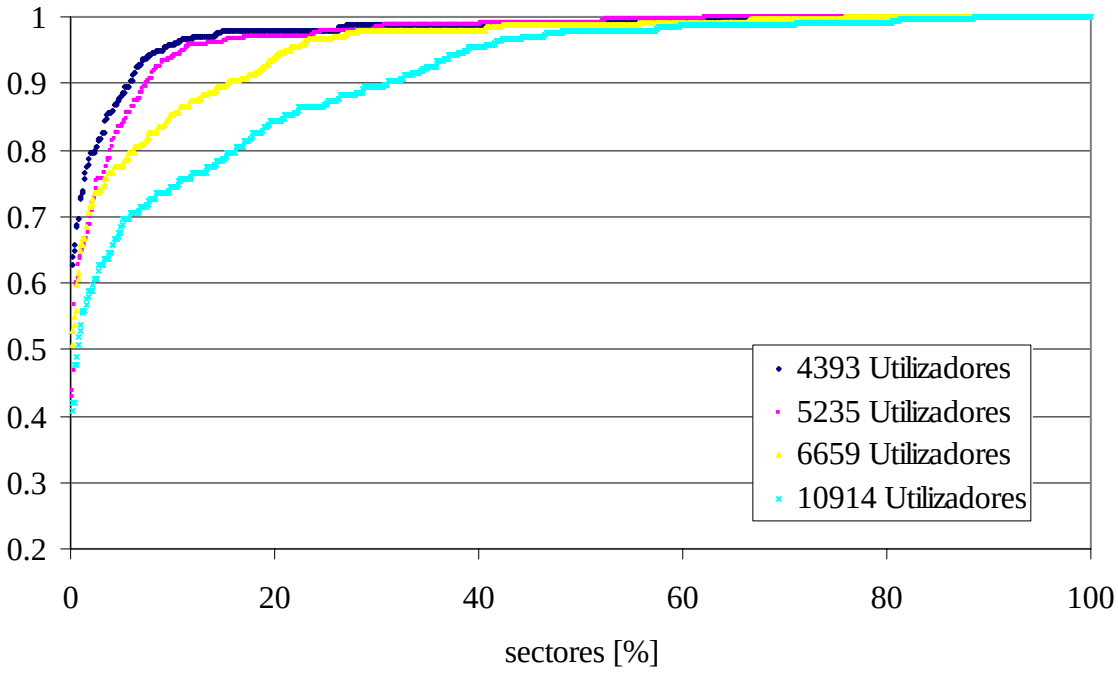


Figura Q.4 – Raio normalizado ordenado; 64kbps (PS), Carga Igual, 4 frequências

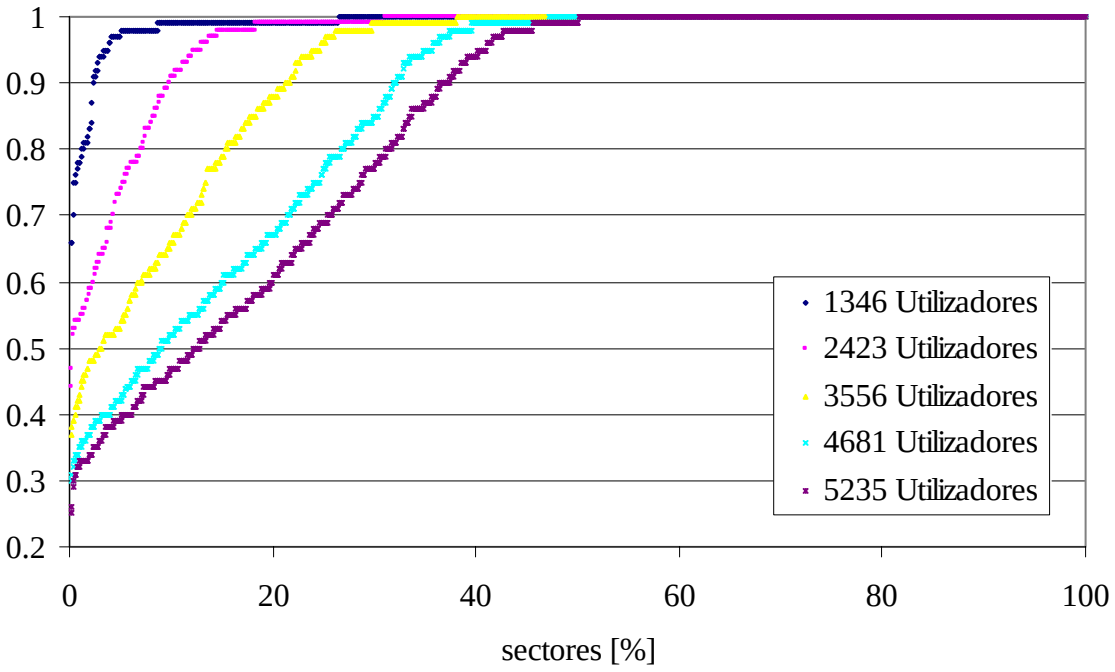


Figura Q.5 – Raio normalizado ordenado; 64kbps (PS), Distância, 2 frequências

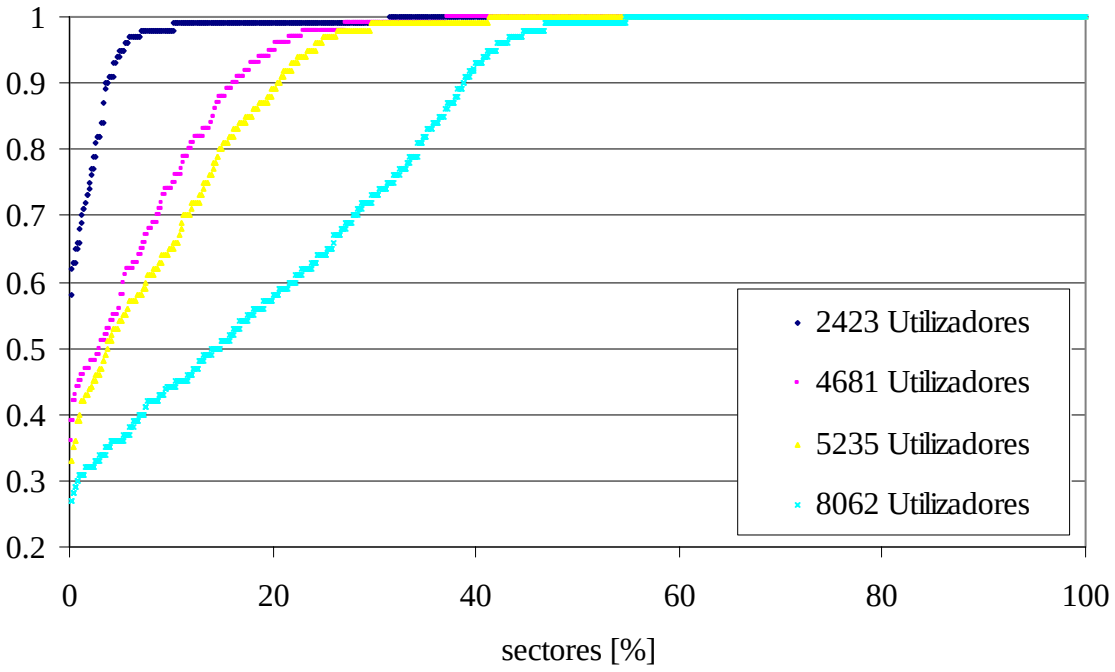


Figura Q.6 – Raio normalizado ordenado; 64kbps (PS), Distância, 3 frequências

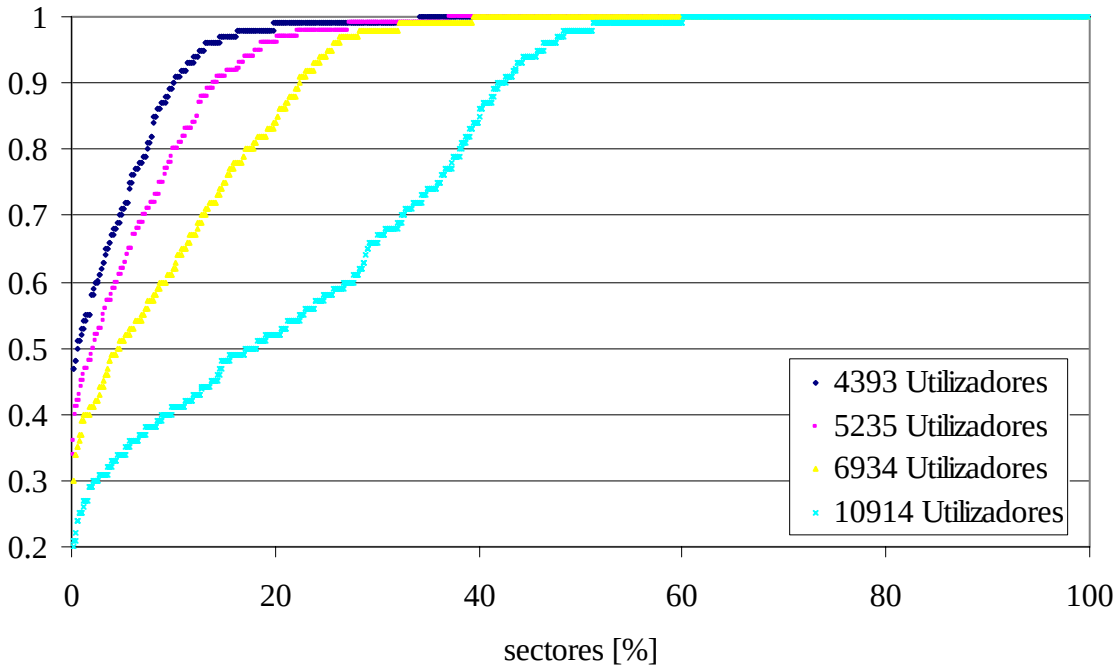


Figura Q.7 – Raio normalizado ordenado; 64kbps (PS), Distância, 4 frequências

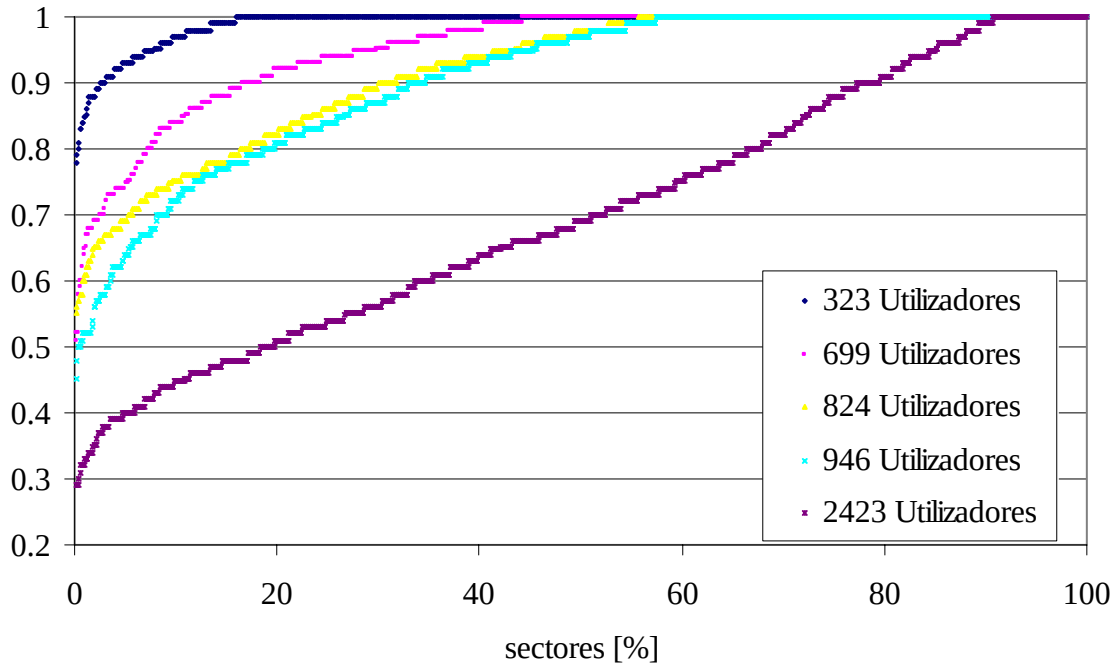


Figura Q.8 – Raio normalizado ordenado; 144kbps (PS), Carga Igual, 1 frequências

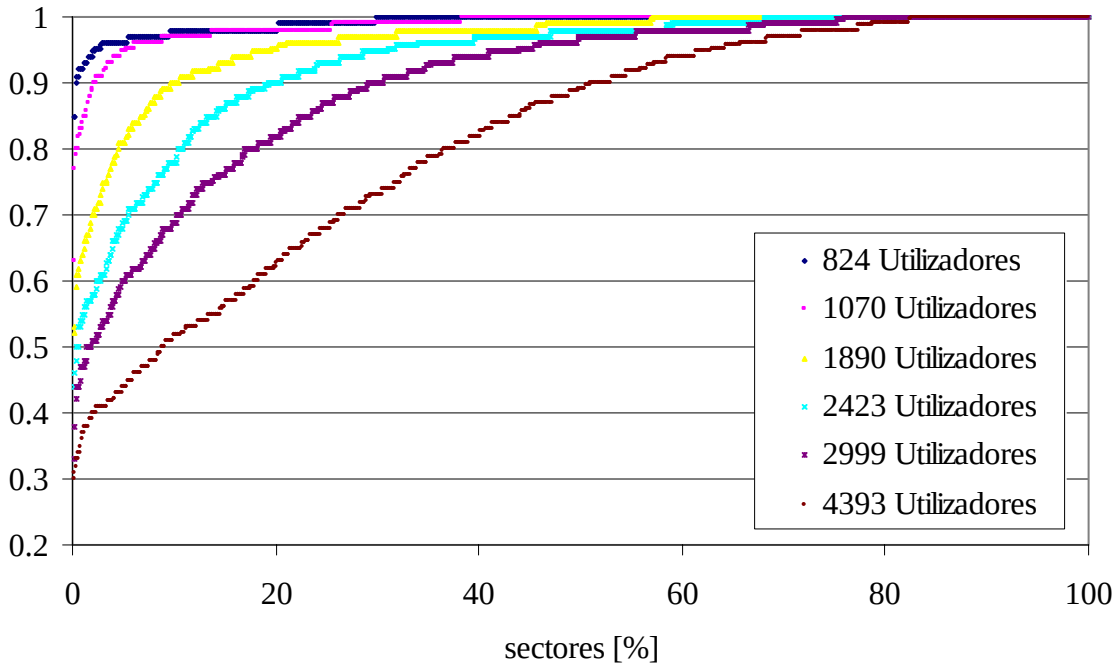


Figura Q.9 – Raio normalizado ordenado; 144kbps (PS), Carga Igual, 2 frequências

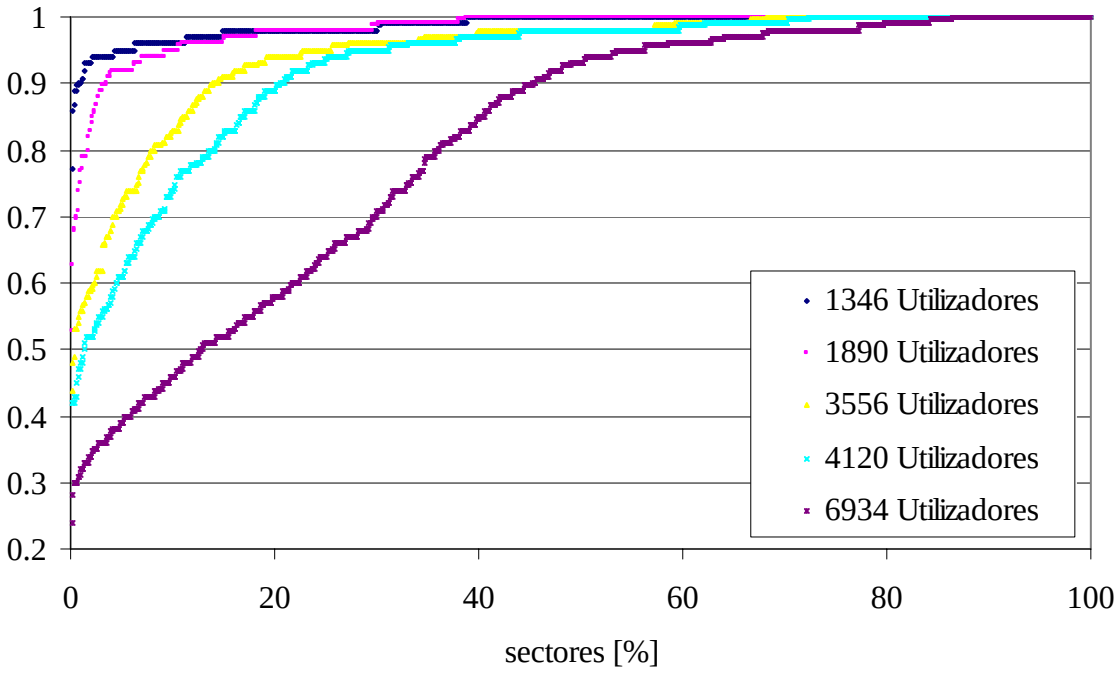


Figura Q.10 – Raio normalizado ordenado; 144kbps (PS), Carga Igual, 3 frequências

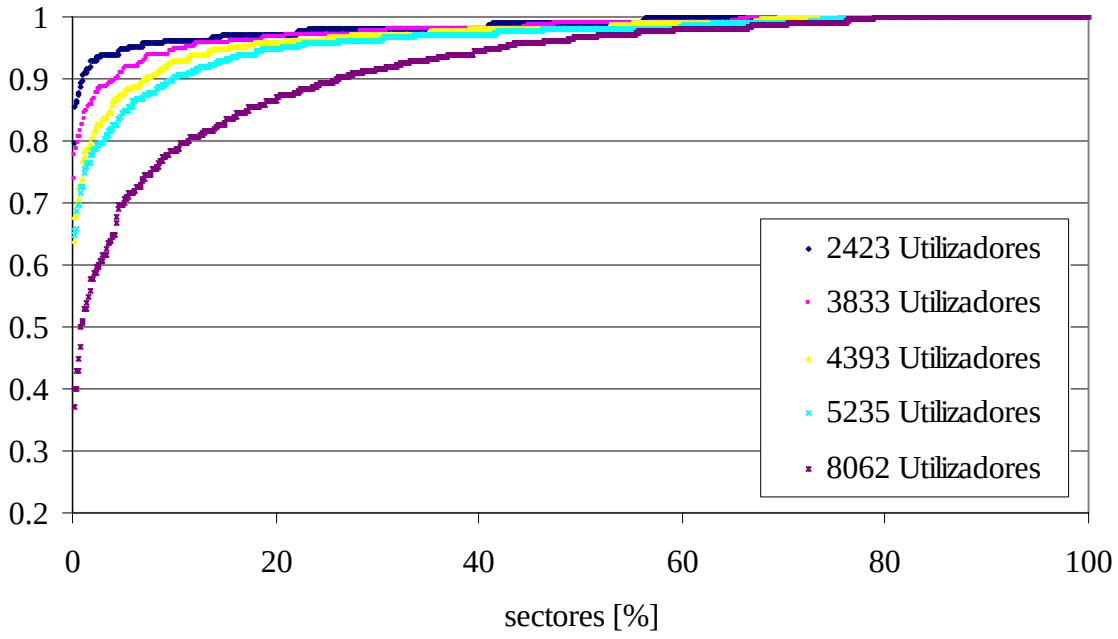


Figura Q.11 – Raio normalizado ordenado; 144kbps (PS), Carga Igual, 4 frequências

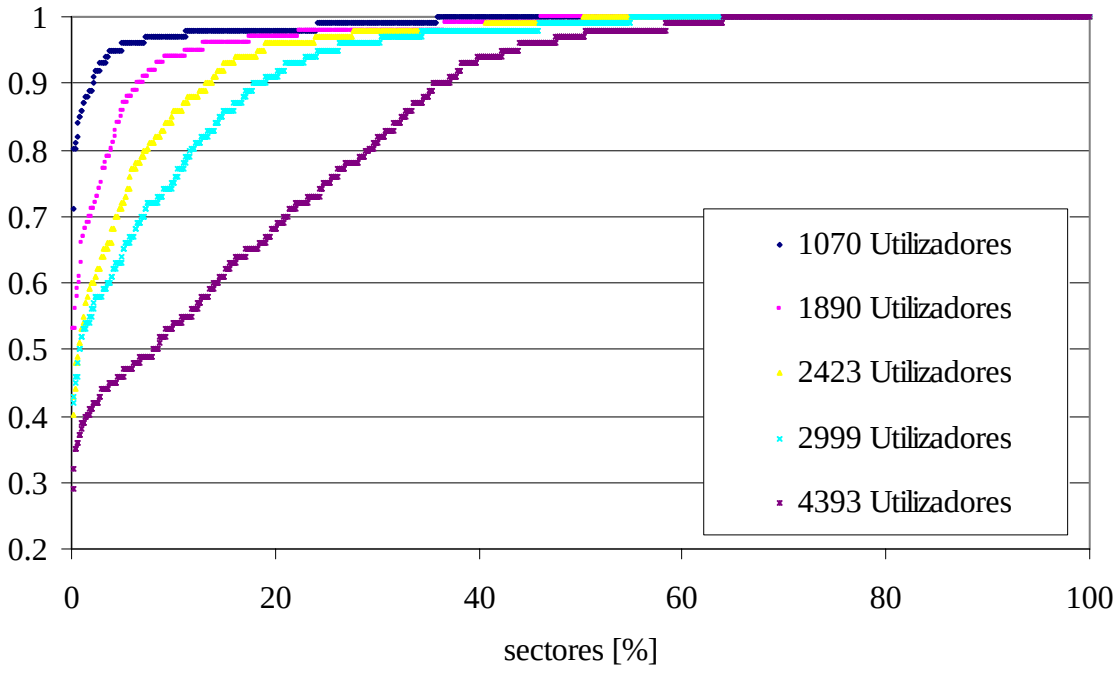


Figura Q.12 – Raio normalizado ordenado; 144kbps (PS), Distância, 2 frequências

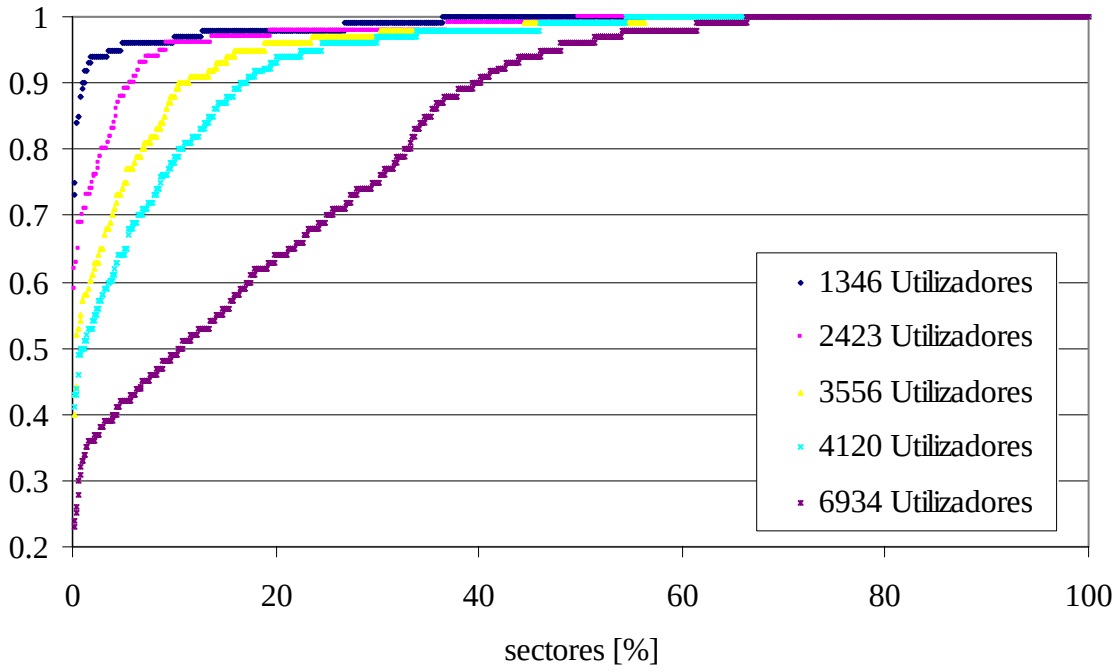


Figura Q.13 – Raio normalizado ordenado; 144kbps (PS), Distância, 3 frequências

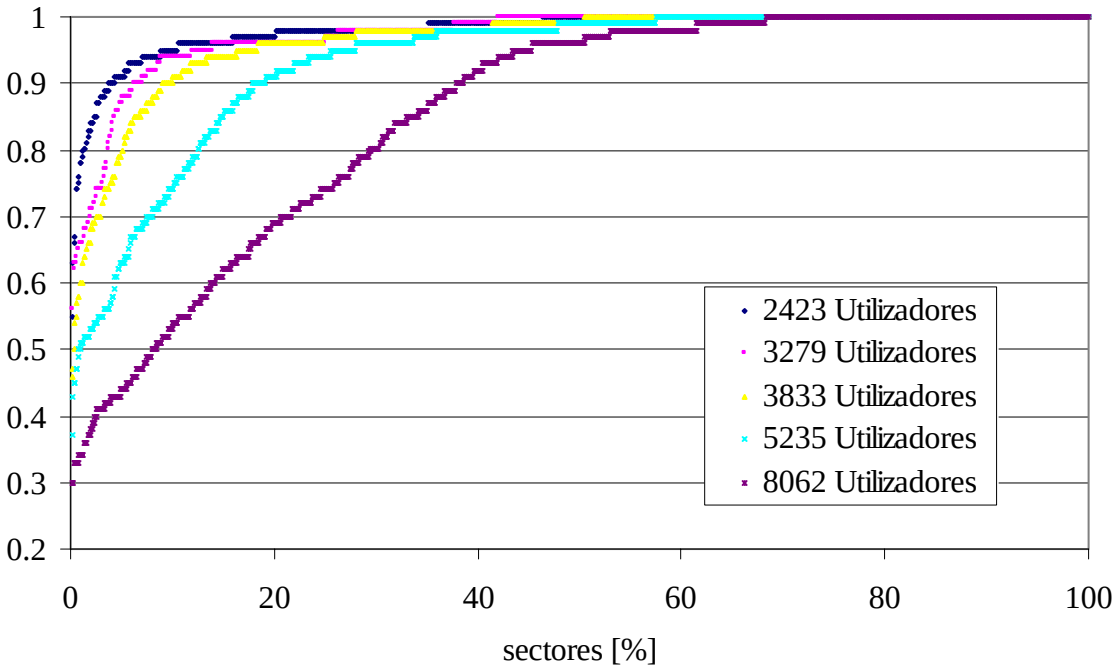


Figura Q.14 – Raio normalizado ordenado; 144kbps (PS), Distância, 4 frequências

Anexo R Percentagem de utilização de frequências

Nos títulos das figuras apresentadas neste anexo considera-se 144 kbps (PS) e 64 kbps (PS) como serviço de referência, carga igual e distância como a estratégia de divisão de utilizadores pelas frequências.

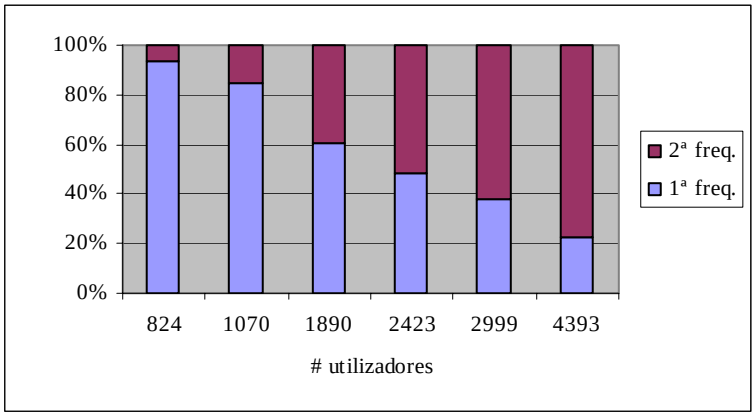


Figura R.1 – Percentagem de utilização de frequências, média; 144 kbps (PS), carga igual, 2 frequências.

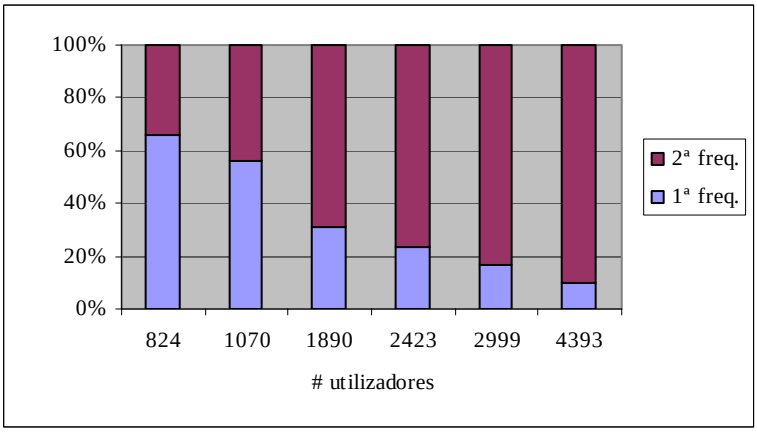


Figura R.2 – Percentagem de utilização de frequências, máximo; 144 kbps (PS), carga igual, 2 frequências.

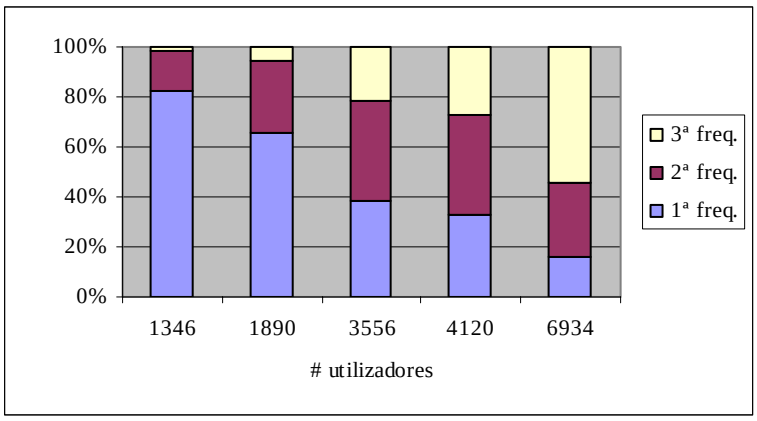


Figura R.3 – Percentagem de utilização de frequências, média; 144 kbps (PS), carga igual, 3 frequências.

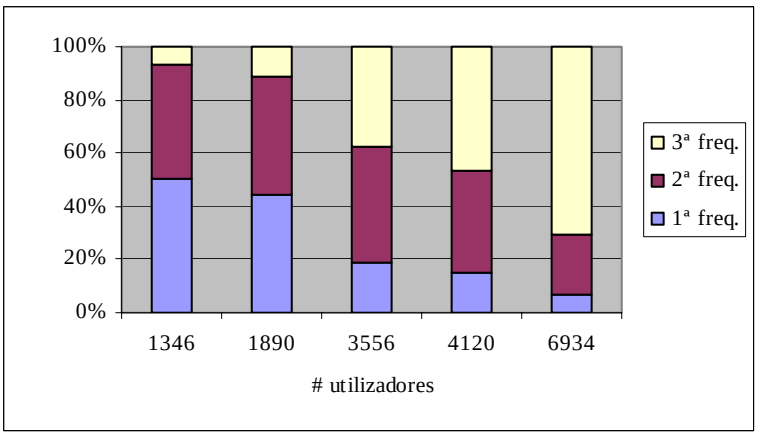


Figura R.4 – Percentagem de utilização de frequências, máximo; 144 kbps (PS), carga igual, 3 frequências.

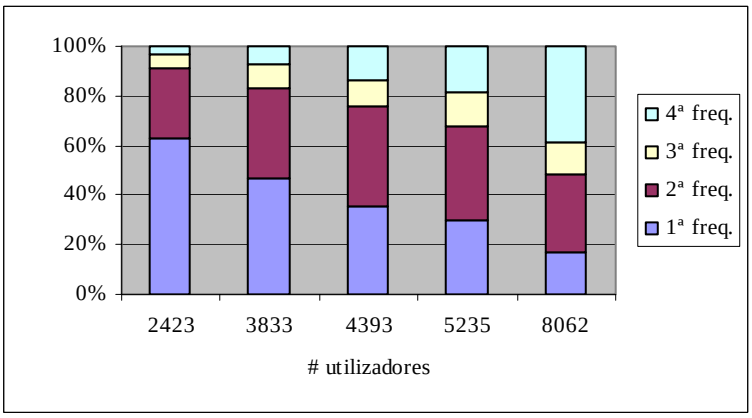


Figura R.5 – Percentagem de utilização de frequências, média; 144 kbps (PS), carga igual, 4 frequências.

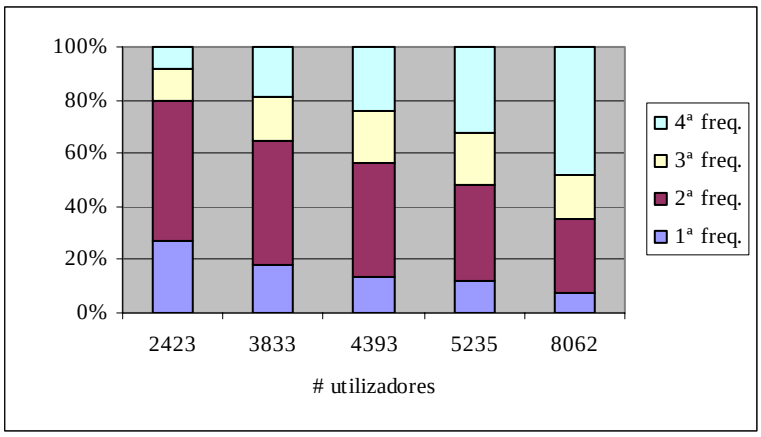


Figura R.6 – Percentagem de utilização de frequências, máximo; 144 kbps (PS), carga igual, 4 frequências.

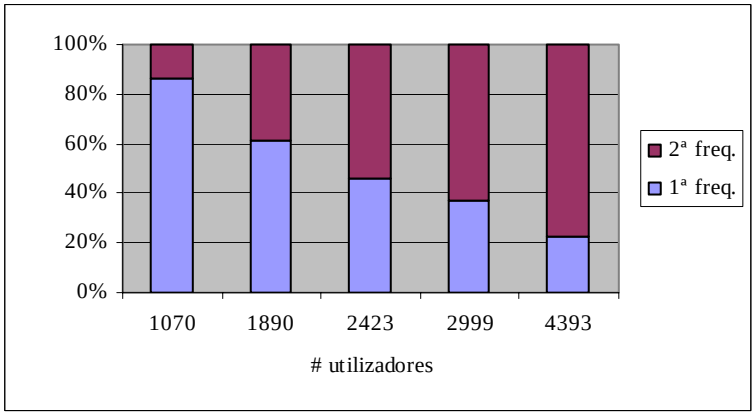


Figura R.7 – Percentagem de utilização de frequências, média; 144 kbps (PS), distância, 2 frequências.

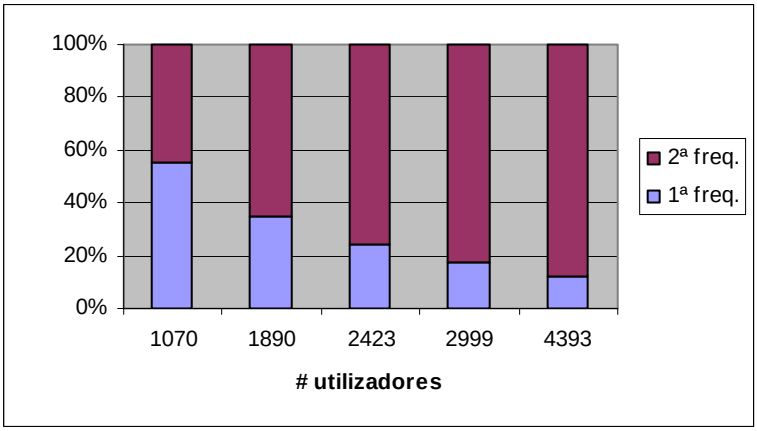


Figura R.8 – Percentagem de utilização de frequências, máximo; 144 kbps (PS), distância, 2 frequências.

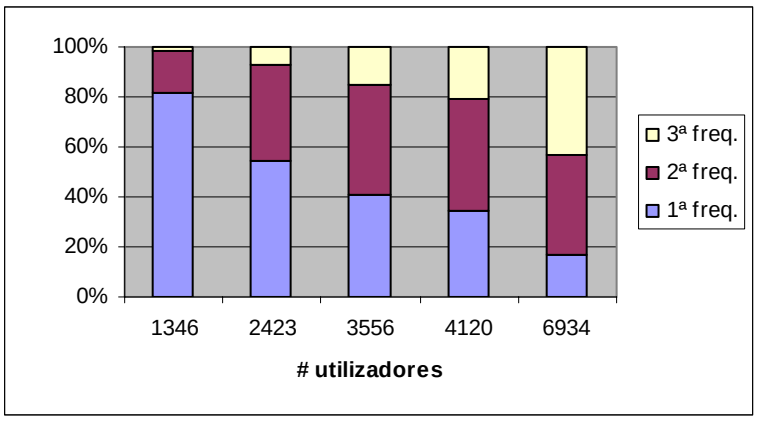


Figura R.9 – Percentagem de utilização de frequências, média; 144 kbps (PS), distância, 3 frequências.

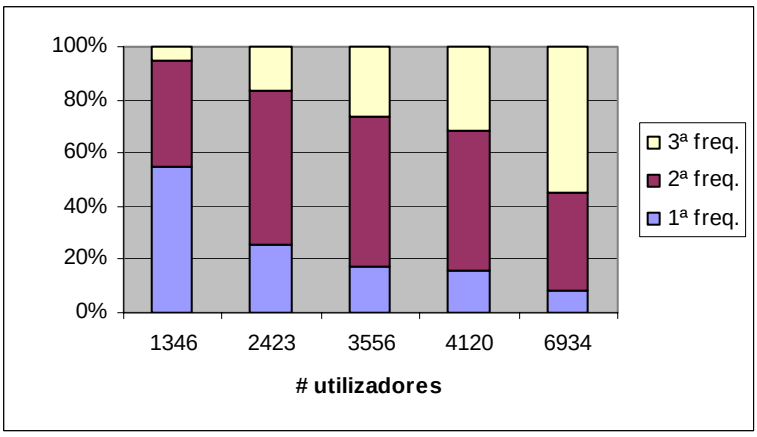


Figura R.10 – Percentagem de utilização de frequências, máximo; 144 kbps (PS), distância, 3 frequências.

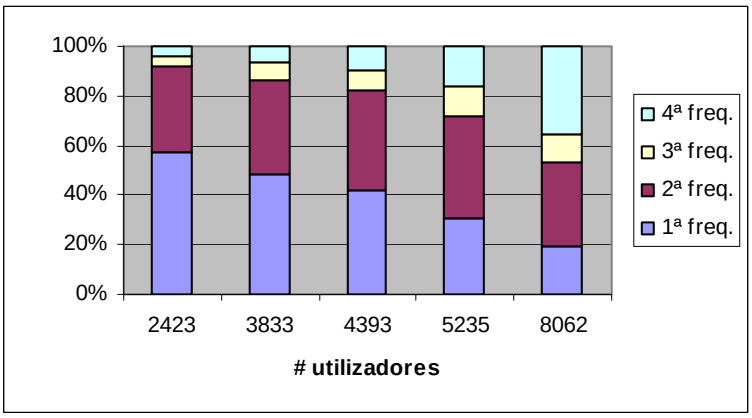


Figura R.11 – Percentagem de utilização de frequências, média; 144 kbps (PS), distância, 4 frequências.

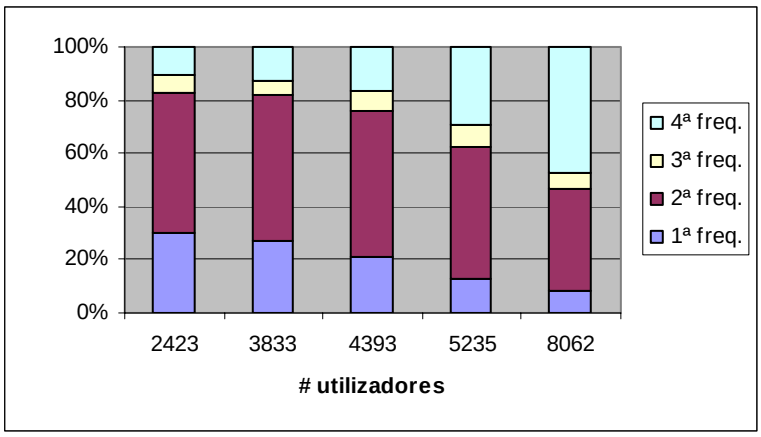


Figura R.12 – Percentagem de utilização de frequências, máximo; 144 kbps (PS), distância, 4 frequências.

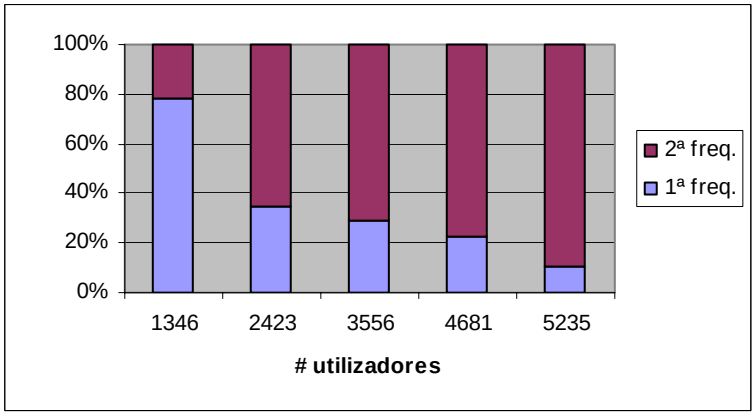


Figura R.13 – Percentagem de utilização de frequências, média; 64 kbps (PS), carga igual, 2 frequências.

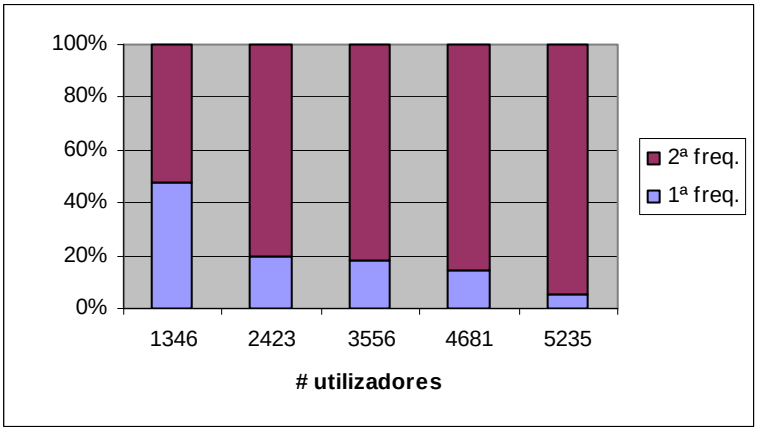


Figura R.14 – Percentagem de utilização de frequências, máximo; 64 kbps (PS), carga igual, 2 frequências.

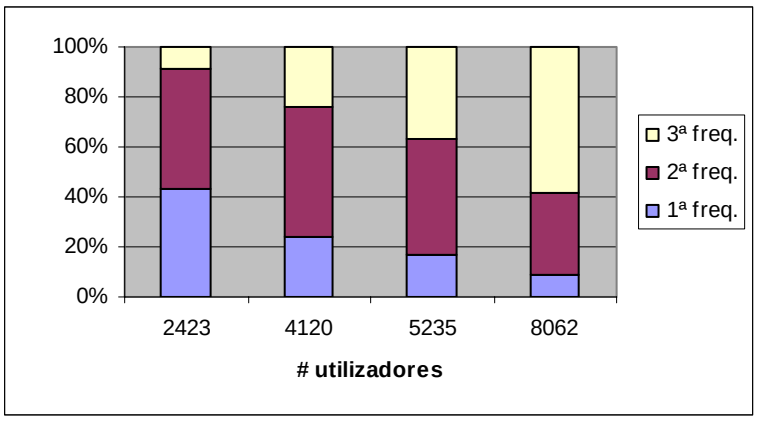


Figura R.15 –Percentagem de utilização de frequências, média; 64 kbps (PS), carga igual, 3 frequências.

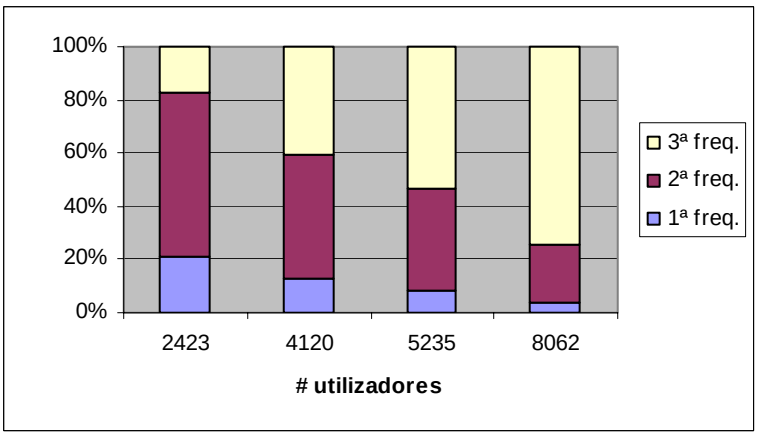


Figura R.16 – Percentagem de utilização de frequências, máximo; 64 kbps (PS), carga igual, 3 frequências.

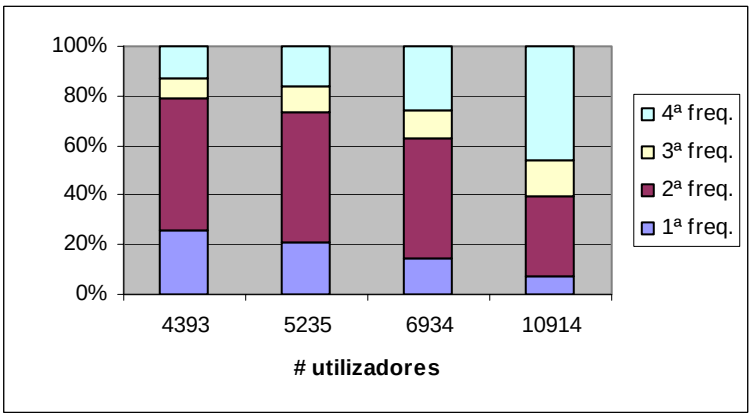


Figura R.17 – Percentagem de utilização de frequências, média; 64 kbps (PS), carga igual, 4 frequências.

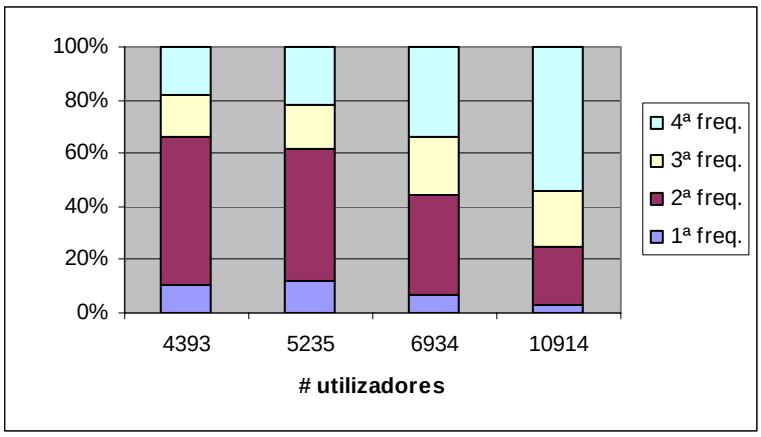


Figura R.18 – Percentagem de utilização de frequências, máximo; 64 kbps (PS), carga igual, 4 frequências.

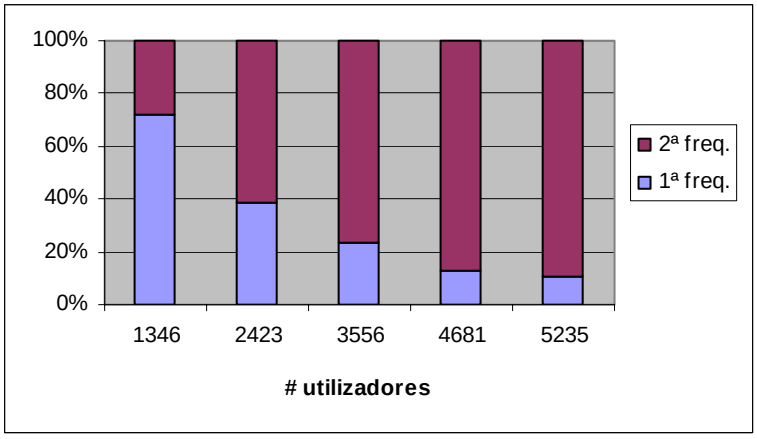


Figura R.19 – Percentagem de utilização de frequências, média; 64 kbps (PS), distância, 2 frequências.

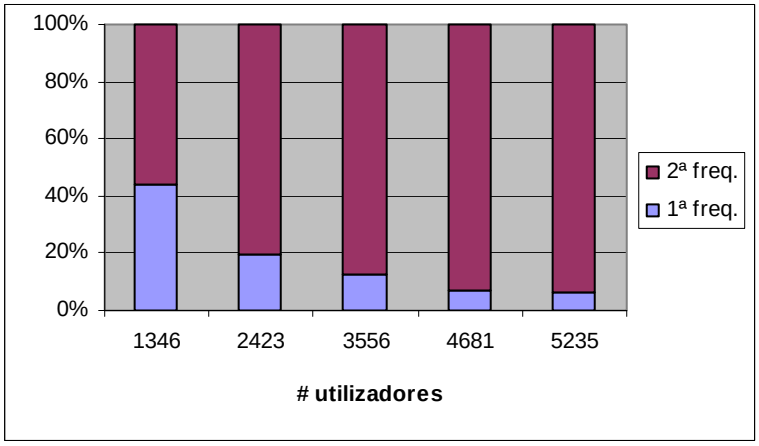


Figura R.20 – Percentagem de utilização de frequências, máximo; 64 kbps (PS), distância, 2 frequências.

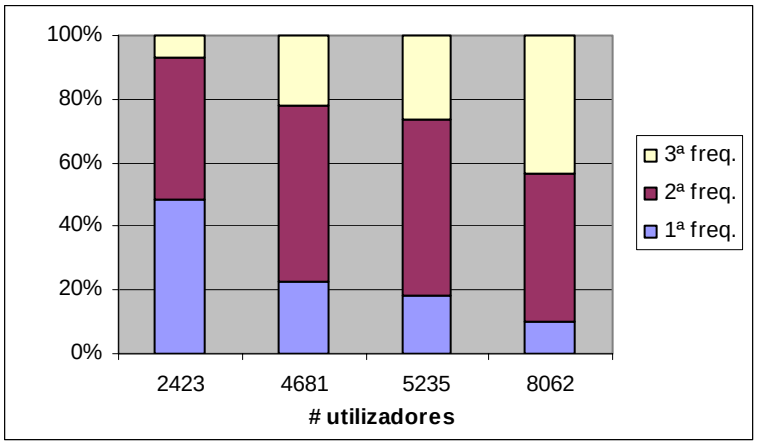


Figura R.21 – Percentagem de utilização de frequências, média; 64 kbps (PS), distância, 3 frequências.

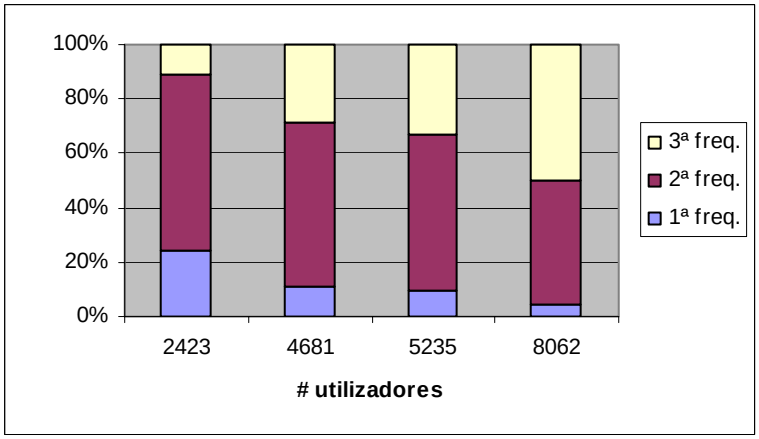


Figura R.22 – Percentagem de utilização de frequências, máximo; 64 kbps (PS), distância, 3 frequências.

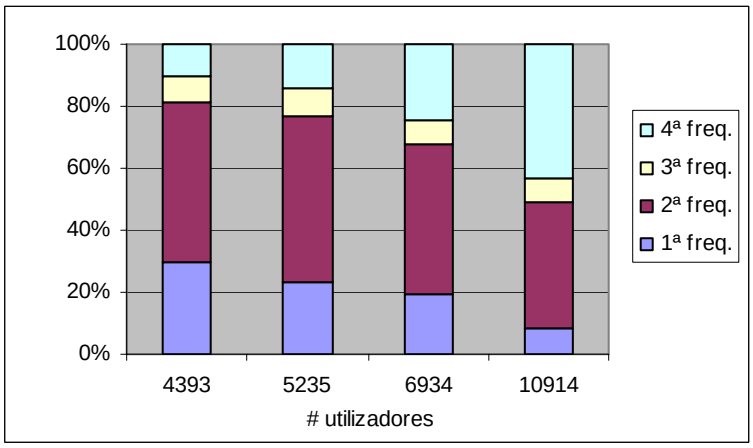


Figura R.23 – Percentagem de utilização de frequências, média; 64 kbps (PS), distância, 4 frequências.

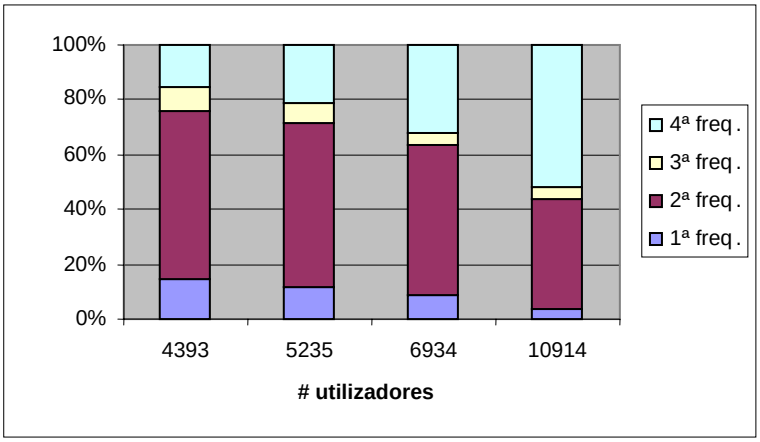


Figura R.24 – Percentagem de utilização de frequências, máximo; 64 kbps (PS), distância, 4 frequências.

Anexo S Cálculo de R^2

O valor de R^2 [Excel] revela a proximidade com que os valores estimados para a linha de tendência correspondem aos dados reais. Quanto mais próximo de 1, melhor é a proximidade.

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} \tag{S.1}$$

onde

- SSE é o erro quadrático definido segundo (S.1);
- SST é dado por (S.2).

$$SSE = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 \tag{S.2}$$

onde

- y_i é a amostra i;
- $\hat{y}_i$ é o valor estimado da amostra i.

$$SST = \left(\sum y_i^2\right) - \frac{\left(\sum y_i\right)^2}{n} \tag{S.3}$$

onde

- n é o número de amostras.

Anexo T Características da P_{ss}

Característica da P_{ss} para as 4 frequências, com serviço de referência 144 kbps e estratégia de carga igual:

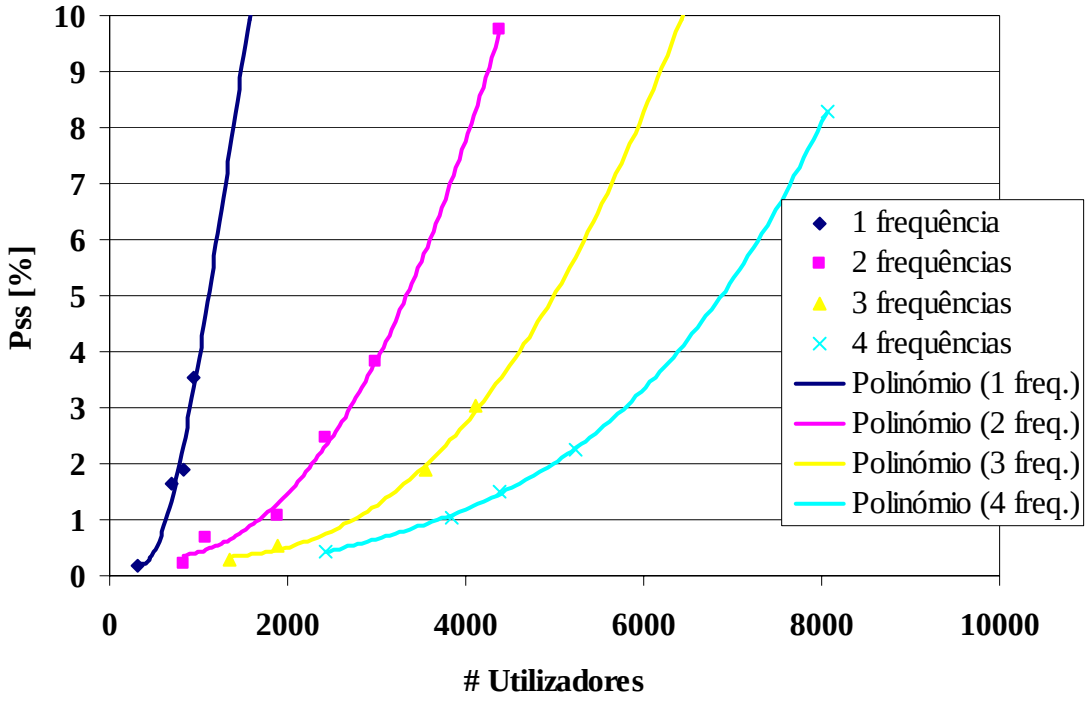


Figura T.1 – P_{ss} média em função do número de utilizadores e do número de frequências para o serviço de referência 144 kbps (PS) e estratégia de carga igual.

$$P_{ss}^{1f} = -4 \cdot 10^{-9} \cdot N_{ut}^{\ 3} + 2 \cdot 10^{-5} \cdot N_{ut}^{\ 2} - 0.0095 \cdot N_{ut} + 1.7941 \quad \text{(T.1)}$$

$$P_{ss}^{2f} = 3 \cdot 10^{-11} \cdot N_{ut}^{\ 3} + 5 \cdot 10^{-7} \cdot N_{ut}^{\ 2} - 0.0006 \cdot N_{ut} + 0.5034 \quad \text{(T.2)}$$

$$P_{ss}^{3f} = 2 \cdot 10^{-11} \cdot N_{ut}^{\ 3} + 2 \cdot 10^{-7} \cdot N_{ut}^{\ 2} - 0.0005 \cdot N_{ut} + 0.627 \quad \text{(T.3)}$$

$$P_{ss}^{4f} = 3 \cdot 10^{-11} \cdot N_{ut}^{\ 3} - 2 \cdot 10^{-7} \cdot N_{ut}^{\ 2} + 0.0009 \cdot N_{ut} - 0.8929 \quad \text{(T.4)}$$

Característica da P_{ss} para as 4 frequências, com serviço de referência 144 kbps e estratégia da distância ao *Node B*:

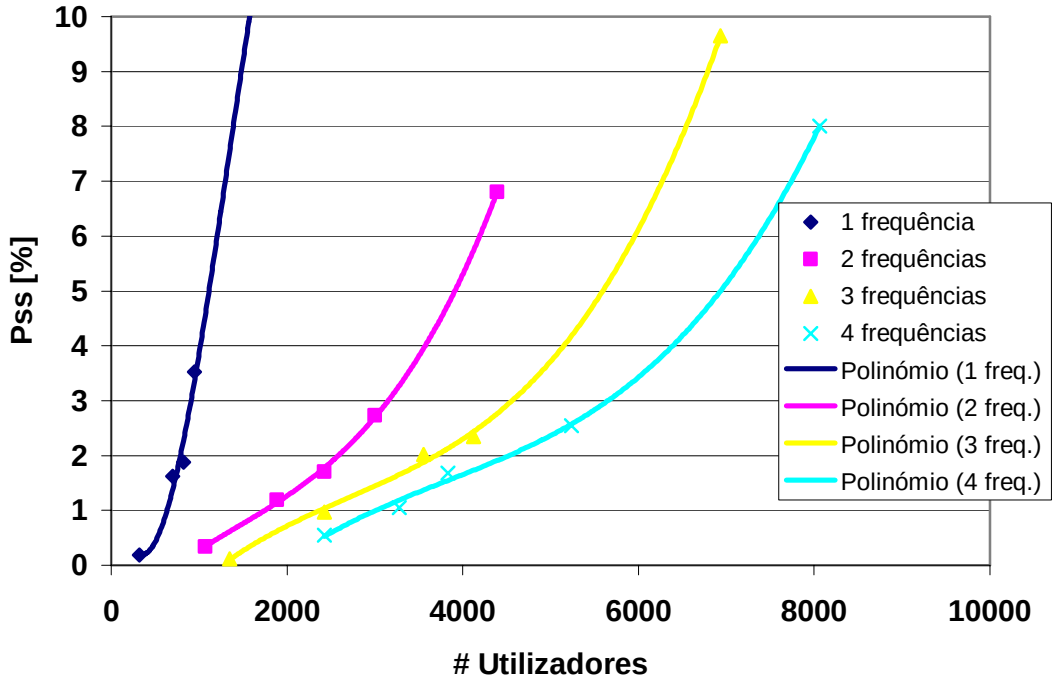


Figura T.2 – Evolução da P_{ss} com o número de utilizadores e o número de frequências, 144 kbps (PS), estratégia baseada na distância.

$$P_{ss}^{2f} = 1\cdot10^{-10}\cdot N_{ut}^{\ 3} - 5\cdot10^{-7}\cdot N_{ut}^{\ 2} + 0.0016\cdot N_{ut} - 0.9708 \quad \text{(T.5)}$$

$$P_{ss}^{3f} = 7\cdot10^{-11}\cdot N_{ut}^{\ 3} - 6\cdot10^{-7}\cdot N_{ut}^{\ 2} + 0.0023\cdot N_{ut} - 2.0841 \quad \text{(T.6)}$$

$$P_{ss}^{4f} = 5\cdot10^{-11}\cdot N_{ut}^{\ 3} - 6\cdot10^{-7}\cdot N_{ut}^{\ 2} + 0.0028\cdot N_{ut} - 3.6593 \quad \text{(T.7)}$$

Característica da P_{ss} para as 4 frequências, com serviço de referência 64 kbps e estratégia de carga igual:

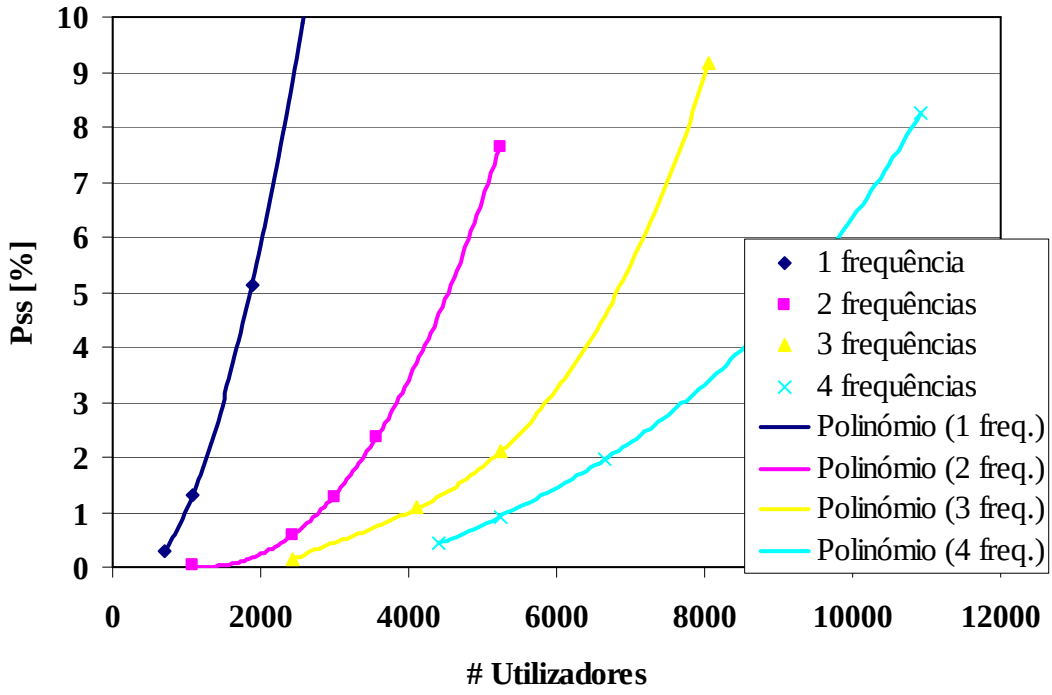


Figura T.3 – Evolução de P_{ss} com o número de utilizadores e número de frequências, 64 kbps (PS) e estratégia de carga igual.

$$P_{ss}^{1f} = -5\cdot10^{-11}\cdot N_{ut}^{\ 3} + 2\cdot10^{-6}\cdot N_{ut}^{\ 2} - 0.0004\cdot N_{ut} - 0.3062 \quad \text{(T.8)}$$

$$P_{ss}^{2f} = 2\cdot10^{-11}\cdot N_{ut}^{\ 3} + 2\cdot10^{-7}\cdot N_{ut}^{\ 2} - 0.0006\cdot N_{ut} + 0.5574 \quad \text{(T.9)}$$

$$P_{ss}^{3f} = 2\cdot10^{-7}\cdot N_{ut}^{\ 2} - 0.0008\cdot N_{ut} + 0.8615 \quad \text{(T.10)}$$

$$P_{ss}^{4f} = 1\cdot10^{-12}\cdot N_{ut}^{\ 3} + 1\cdot10^{-7}\cdot N_{ut}^{\ 2} - 0.0007\cdot N_{ut} + 1.5896 \quad \text{(T.11)}$$

Característica da P_{ss} para as 4 frequências, com serviço de referência 64 kbps e estratégia da distância ao *Node B*:

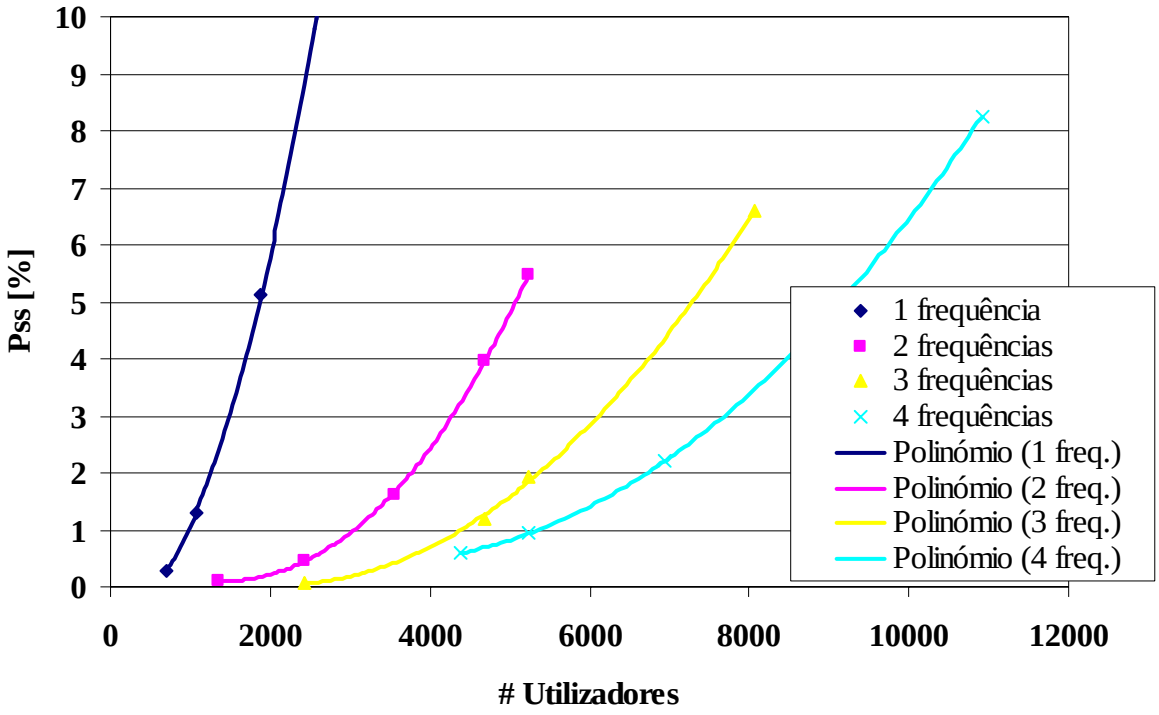


Figura T.4 - Evolução da P_{ss} em função do número de utilizadores e do número de utilizadores, 64 kbps (PS), distância.

$$P_{ss}^{2f} = 3 \cdot 10^{-11} \cdot N_{ut}^{3} + 3 \cdot 10^{-07} \cdot N_{ut}^{2} - 0.0008 \cdot N_{ut} + 0.5413 \quad \text{(T.12)}$$

$$P_{ss}^{3f} = 5 \cdot 10^{-11} \cdot N_{ut}^{3} - 4 \cdot 10^{-7} \cdot N_{ut}^{2} + 0.0018 \cdot N_{ut} - 2.4207 \quad \text{(T.13)}$$

$$P_{ss}^{4f} = 1 \cdot 10^{-11} \cdot N_{ut}^{3} - 1 \cdot 10^{-7} \cdot N_{ut}^{2} + 0.0009 \cdot N_{ut} - 2.3561 \quad \text{(T.14)}$$

Anexo U Mapas

Mapas de cobertura para a cidade de Lisboa, com 5235 utilizadores, com quatro frequências disponíveis, com serviço de referência de 144 kbps (PS) e estratégia de carga igual:

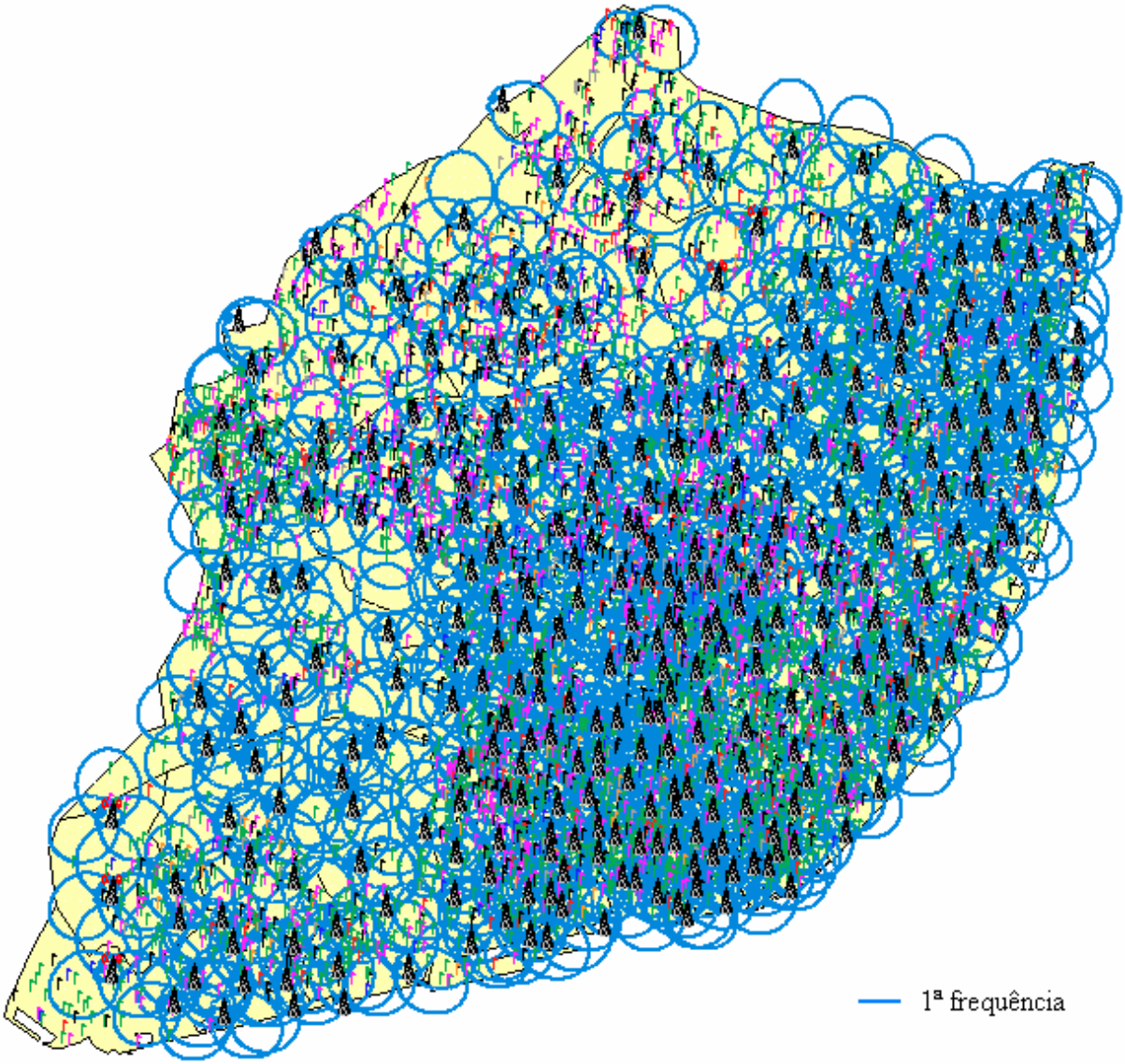


Figura U.1 – Mapa da cobertura para a 1ª frequência.

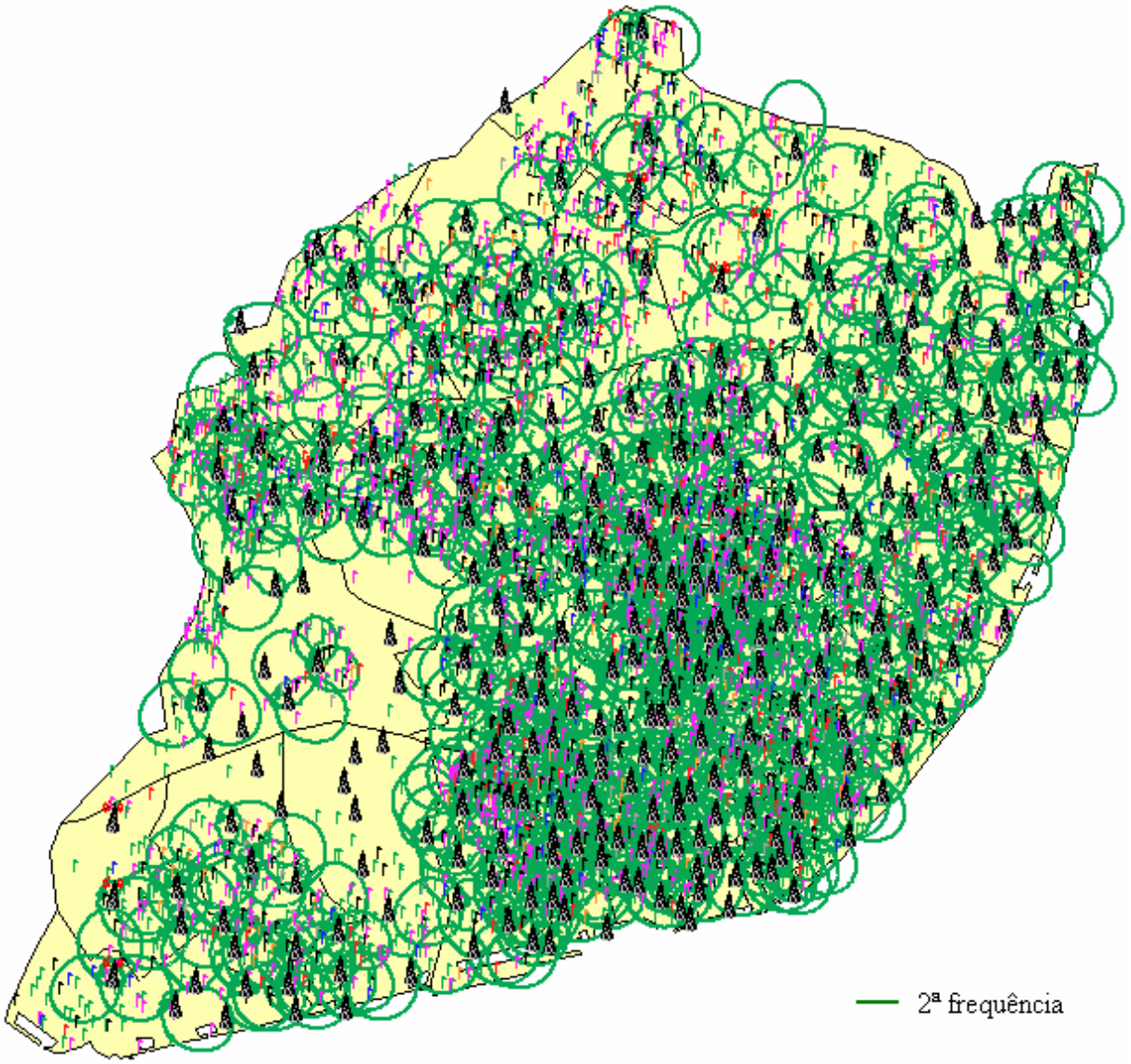


Figura U.2 – Mapa da cobertura para a 2ª frequência.

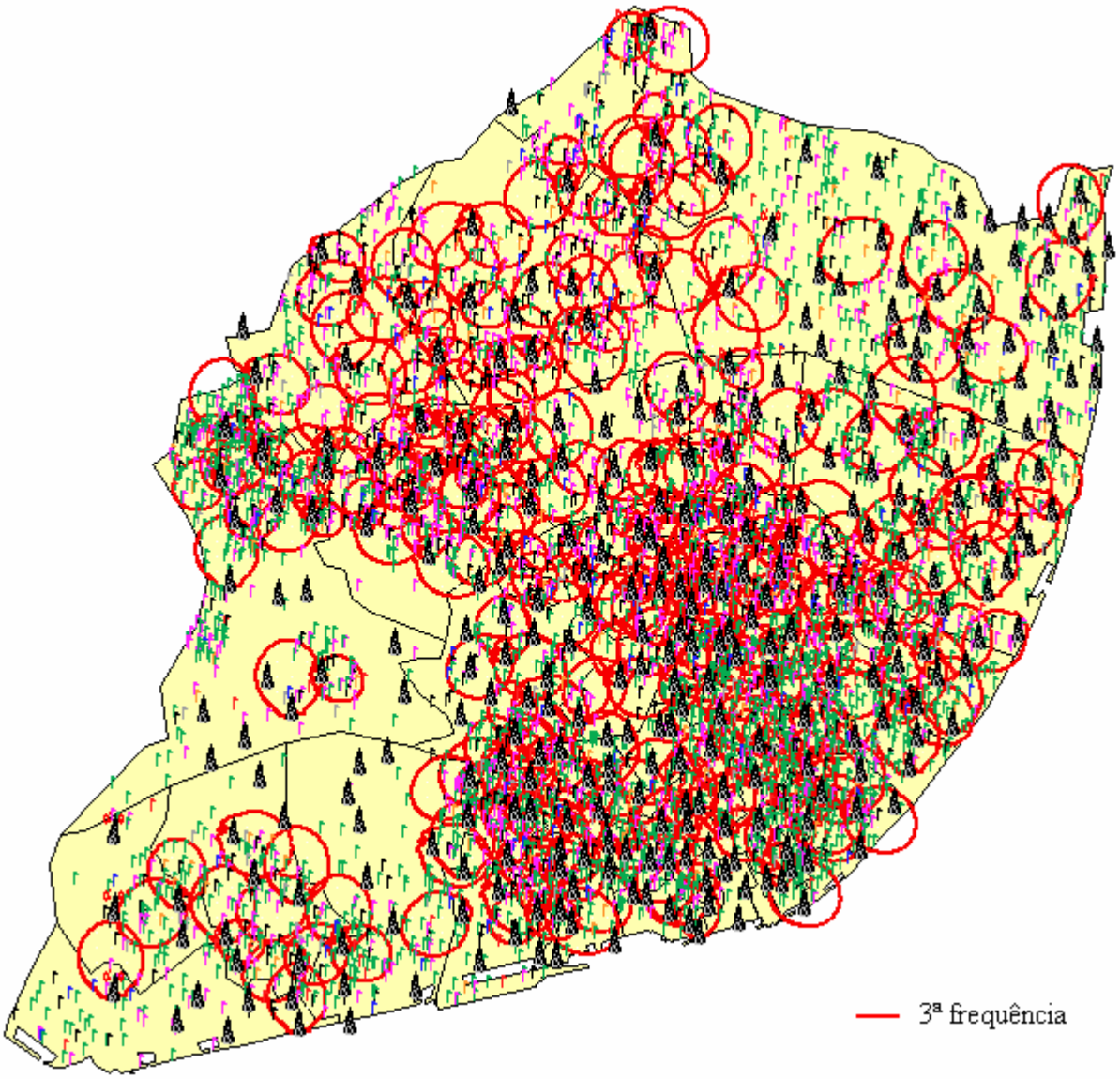


Figura U.3 – Mapa da cobertura para a 3ª frequência.

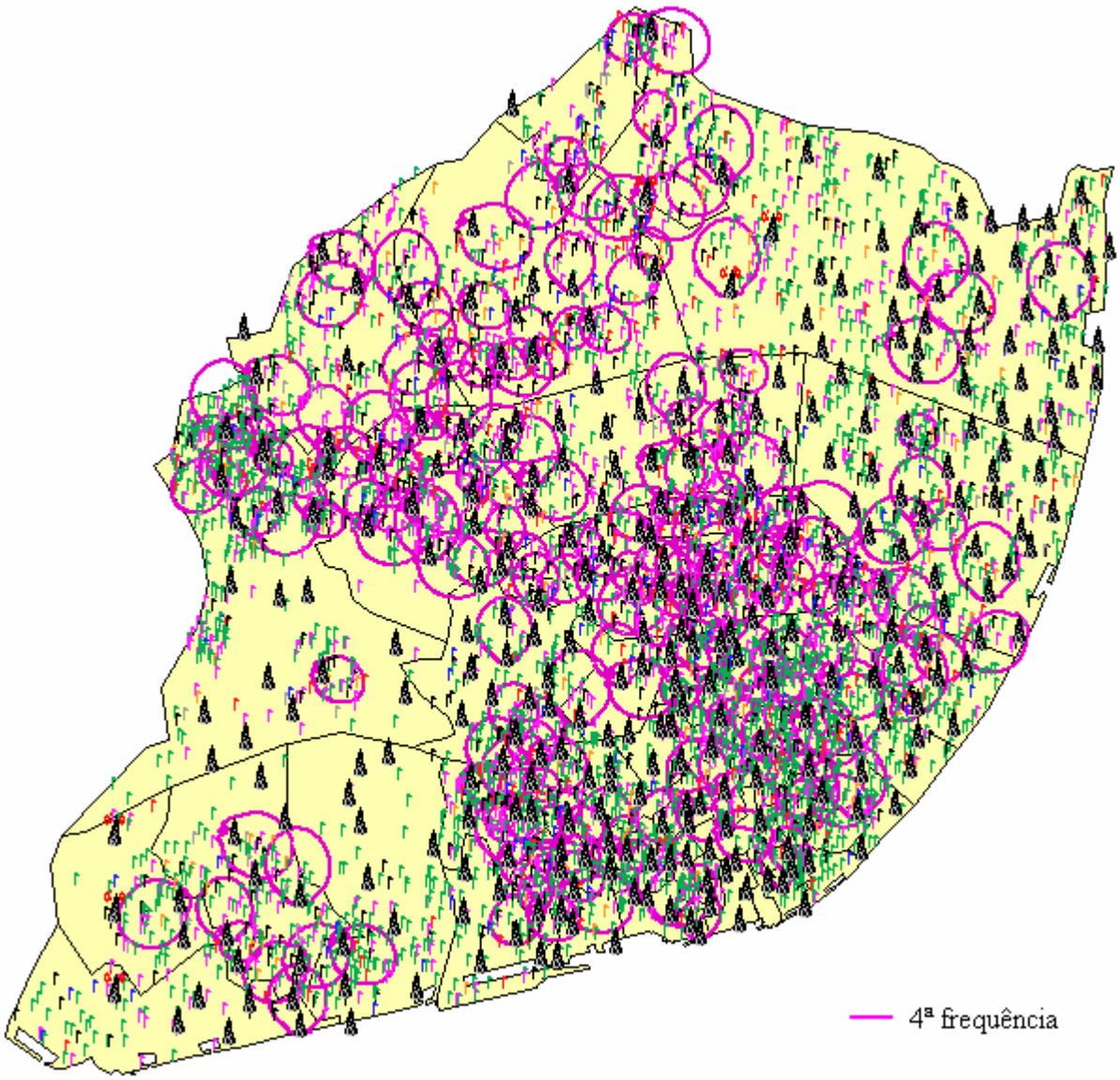


Figura U.4 – Mapa da cobertura para a 4ª frequência.

Referências

[3GPP00] 3GPP, *UTRAN Overall Description*, Report 3G TS 25.401. V3.3.0, 2000, http://www.3gpp.org.

[CaCo02] Cardoso, F. and Correia, L. M., *Fading Depth Evaluation in Mobile Communications from GSM to Future Mobile Broadband Systems*, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, Sep. 2002.

[DaCo99] Damasso, E. and Correia, L. M., *Digital Mobile Radio Towards Future Generation Systems (COST 231 Final Report)*, COST Telecom Secretariat European Commission, Brussels, Belgium, 1999.

[Excel] Microsoft Excel Help, *Equations for calculating trendlines, R-squared value.* Microsoft Corporation, 2003.

[ETSI01] ETSI, *UMTS RF System Scenarios Technical Report,* Report TR 125 942 v4,0,0*,* France, Sep. 2001.

[HoTo00] Holma, H. and Toskala, A., (eds,), *WCDMA for UMTS*, John Wiley, London, UK, 2000.

[MapI] http://www.mapinfo.com.

[MOME03] MOMENTUM, *Models and Simulations for Network Planning and Control of UMTS*, IST-MOMENTUM Project Technical Annex, Lisbon, Portugal, Apr. 2003, http://momentum.zib.de.

[Sale00] Salema, C., *Feixes Hertzianos*, IST Press, Lisboa, Portugal, 2002.

[Serr02] Serrador, A., *Optimisation of Cell Radius in UMTS-FDD Networks*, M. Sc. Thesis, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, Jul. 2002.

[Stal00] Stallings, W., *Data & Computer Communications*, Prentice Hall International, New Jersey, USA, 2000.

[UMTS98a] UMTS Forum, *UMTS / IMT – 2000 Spectrum*, Report Nº 6, London, UK, Dec. 1998.

[UMTS98b] UMTS Forum, *Minimum Spectrum Demand per Public Terrestrial UMTS Operator in the Initial Phase*, Report Nº 5, London, UK, Sep. 1998.

[VaCa02] Vasconcelos, A. e Carvalho, P., *Modelos de Tráfego para Estações de Base em UMTS*, Trabalho Final de Curso, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2002.