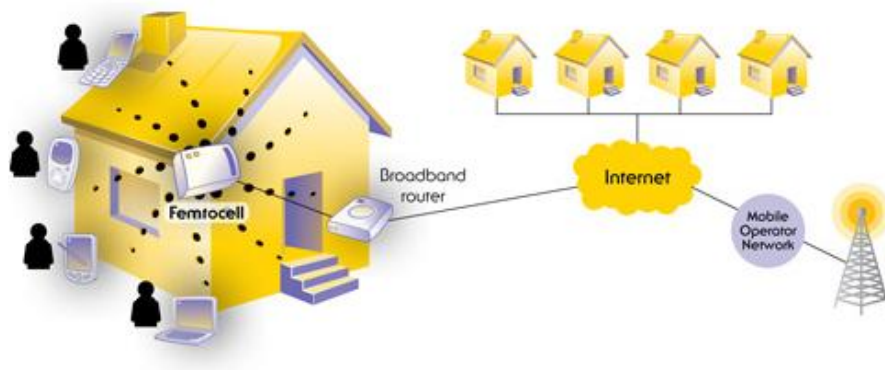


INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Área Departamental de Engenharia de Eletrónica e
Telecomunicações e de Computadores**Planeamento e Otimização de Femto-Células em**
Ambiente Empresarial**PEDRO NUNO PEREIRA DOS SANTOS**
(Licenciado)Trabalho Final de Mestrado para Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de
Eletrónica e Telecomunicações

Orientadores:

Doutor Pedro Manuel de Almeida Carvalho Vieira
Engenheira Ana Cristina Pereira dos Reis Dias

Júri:

Presidente: Doutor Mário Pereira Véstias

Vogais:

Doutor António José Castelo Branco Rodrigues
Doutor Pedro Manuel de Almeida Carvalho Vieira
Engenheira Ana Cristina Pereira dos Reis Dias

Outubro de 2012

Agradecimentos

Para a realização desta dissertação foram vários os intervenientes que contribuíram direta e indiretamente, os quais merecem o meu reconhecimento e gratidão.

Ao Instituto de Telecomunicações pelo apoio que deu na divulgação deste trabalho.

À Celfinet e em especial ao Eng. Luís Varela pela compreensão e apoio que me deu desde o início da realização deste trabalho.

À Vodafone Portugal e em especial à Eng. Ana Dias pela orientação, críticas e sugestões essenciais para o desenvolvimento deste trabalho e pelo constante acompanhamento ao longo de todo o percurso, e à Eng. Diana Caiado pelo apoio, interesse e pela forma como sempre me colocou à vontade permitindo conciliar os estudos com a atividade profissional.

Ao Eng. Pedro Vieira pela oportunidade, orientação, incentivo e aconselhamentos prestados, essenciais para a realização deste trabalho.

Aos colegas de trabalho Eng. Alexandre Brás, Eng. Paulo Alves e Eng. Emanuel Marques pela forma como me ajudaram na compreensão do funcionamento das ferramentas utilizadas neste trabalho, pelas sugestões e pela sua disponibilidade no esclarecimento de dúvidas.

Aos meus pais e irmão, sempre presentes em todos os momentos, pela compreensão, apoio incondicional, incentivo e motivação imprescindíveis para a conclusão do mestrado.

Agradeço a todos os que não foram mencionados acima mas que, de uma forma ou de outra, contribuíram para a realização deste trabalho.

Resumo

O objetivo deste trabalho consiste em avaliar as capacidades das femto-células, no âmbito do planeamento e otimização de redes *Universal Mobile Telecommunication System* (UMTS) instaladas no interior de edifícios num ambiente empresarial. A avaliação será feita através do estudo da tecnologia das femto-células, e do planeamento efetuado num cenário real onde, através do desenvolvimento e teste de um conjunto parametrizações, será avaliado o funcionamento das femto-células assim como forma de otimizar o seu desempenho.

O estudo realizado permitiu identificar um conjunto de características que as femto-células partilham com as *Self-Organizing Networks* (SON), como a auto-configuração, auto-otimização de parâmetros rádio, ajuste dinâmico da área de cobertura, atribuição automática de *Scrambling Codes* (SC) e da frequência da portadora, criação automática de relações de vizinhança, entre outras, que permitem facilitar o processo de planeamento e otimização de redes móveis UMTS.

Recorrendo a um cenário empresarial real, foi efetuado um planeamento celular *indoor* de raiz, através do qual foi possível testar o funcionamento de algumas das principais funções das femto-células, nomeadamente a capacidade de ajuste dinâmico da área de cobertura. Foi também avaliado o funcionamento de um grupo co-localizado de femto-células, onde foi possível testar parametrizações com o objetivo de melhorar o processo de *handover* entre as femto-células do grupo, e entre estas e a rede macro *Global System for Mobile Communications* (GSM). A avaliação de cada uma das parametrizações testada, é efetuada a partir das medidas recolhidas no terreno, recorrendo à ferramenta TEMS® *Investigation*, assim como aos *Key Performance Indicators* (KPIs) que as femto-células disponibilizam.

Os resultados obtidos mostram o benefício da utilização das femto-células num ambiente empresarial real, assim como os eventuais problemas e desafios que podem surgir do planeamento celular *indoor* recorrendo à tecnologia das femto-células, sendo apresentada a parametrização que permite obter o melhor desempenho da rede instalada.

Palavras-chave:

Femto-célula, *Home NodeB* (HNB), Planeamento *Indoor*, Otimização, Desempenho, Auto-configuração, Auto-Otimização, UMTS.

Abstract

The aim of this work is to evaluate the capabilities of femtocells with regard to planning and optimization in Universal Mobile Telecommunication System (UMTS) networks, installed inside of a building on an enterprise environment. Evaluation will be done through the study of femtocell technology, and by making an indoor planning on a real scenario where, by developing and testing a set of parameterizations, will assess the operation of femtocells as well as how to optimize its performance.

The study identified a set of features that the femtocells share with *Self-Organizing Networks* (SON), such as self-configuration, self-optimization of radio parameters, dynamic adjust of coverage area, automatic assignment of Scrambling Codes (SC) and the carrier frequency, automatic creation of neighbour relations, among others, that ease the process of planning and optimization of UMTS mobile networks.

On a real enterprise scenario was performed an indoor cellular planning, by which it was possible to test the operation of some of the main functions of femtocells, in particular the ability of the HNB to dynamically adjust the coverage area. It was also considered the performance of a group of co-located femtocells, where it was possible to test parameterizations in order to improve the handover process between the femtocell of the group, and between them and the Global System for Mobile Communications (GSM) network. Using a measurement tool, TEMS® Investigation, several walk tests were performed in the field collecting measurements, in order to evaluate the femtocell network performance, resulting for each of the parameterizations tested. An evaluation of the Performance Indicators (KPIs) provided by the femtocell, was also be made.

The obtained results show the benefits of a femtocell installation in a real enterprise environment, the parameterization that obtains the best results, and the problems and challenges that can arise on indoor femtocell planning.

Keywords:

Femtocell, Home NodeB (HNB), Indoor Planning, Optimization, Performance, Auto-configuration, Auto-optimization, UMTS.

Índice

Agradecimentos	i
Resumo	iii
<i>Abstract</i>	v
Índice	vii
Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xv
Índice de Equações	xvii
Acrónimos	xix
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Enquadramento	2
1.3 Objetivos	3
1.4 Estrutura da dissertação	4
1.5 Artigos Publicados	5
2 Estado da Arte	7
2.2 Desafios das Femto-células.....	7
2.3 Técnicas de cobertura no interior de edifícios	10
2.3.1 Macro-Células	10
2.3.2 Cabo radiante	11
2.3.3 <i>Distributed Antenna System (DAS)</i>	12
2.3.4 Repetidores.....	14
2.3.5 Pico-Células	15
2.3.6 Comparação das várias soluções <i>indoor</i>	15
2.4 <i>Universal Mobile Telecommunications System</i>	17
2.4.1 Arquitetura	18
2.4.2 Canais Lógicos	19
2.4.3 Canais de Transporte	20
2.4.4 Canais Físicos.....	21
2.5 Integração das femto-células na UTRAN	24
2.5.1 <i>Iub over IP</i>	25
2.5.2 <i>Generic Access Network (GAN)</i>	26
2.5.3 <i>IMS/SIP</i>	27
2.6 Normalização das Femto-células UMTS	28
2.7 Femto-células UMTS	30

2.7.1	Principais características das femto-células.....	31
2.7.2	Arquitetura.....	34
2.7.2.1	Elementos de rede	35
2.7.2.2	<i>Home NodeB</i> (HNB)	35
2.7.2.3	<i>Home NodeB Gateway</i> (HNB GW)	36
2.7.2.4	<i>Security Gateway</i> (SeGW)	37
2.7.2.5	<i>Authentication, Authorization and Accounting</i>	37
2.7.2.6	<i>HNB Management System</i> (HMS)	37
2.8	Protocolos da Interface <i>Iu-h</i>	38
2.9	Instalação e configuração do HNB.....	38
2.9.1	Auto-configuração e auto-otimização.....	40
2.9.2	Pesquisa do canal rádio.....	43
3	Planeamento e Otimização de Femto-células 3G	45
3.1	Planeamento femto-células <i>indoor</i>	45
3.1.1	Opções de configuração.....	47
3.1.1.1	Seleção do <i>Scrambling Code</i>	47
3.1.1.2	Frequência da portadora.....	48
3.1.1.3	Potência de transmissão DL.....	49
3.1.1.4	Configuração do LAC, RAC e SAC	51
3.1.1.5	Modos de Acesso.....	51
3.2	Etapas do planeamento femto-celular <i>indoor</i>	53
3.3	Femto-células em grupo co-localizado.....	54
3.3.1	Configuração.....	55
3.3.2	Interface <i>Iurh</i>	56
3.4	Gestão de Mobilidade.....	58
3.4.1	<i>Handover</i> entre femto-células.....	59
3.4.2	<i>Handovers</i> Femto → Macro GSM	61
3.4.3	Desafios	61
3.5	Otimização.....	62
3.5.1	Indicadores de performance – KPIs.....	62
4	Teste do HNB Empresarial	65
4.1	Características do HNB <i>Enterprise</i>	65
4.2	Avaliação do HNB <i>Enterprise</i>	66
4.2.1	Cenário de teste.....	67
4.2.2	Configuração do HNB na rede IP local do cliente.....	68
4.2.3	Configuração dos parâmetros RF	68

4.2.4	Avaliação da mobilidade	69
4.2.4.1	Modo dedicado	69
4.2.4.2	Modo <i>idle</i>	70
4.2.5	<i>Closed Access Mode</i>	72
4.2.5.1	Teste 1 - IMSI registado na ACL.....	73
4.2.5.2	Teste 2 - IMSI não registado na ACL	73
4.2.6	Avaliação da área de cobertura.....	74
4.2.6.1	Configuração do HNB	75
4.2.6.2	Análise da área de serviço do HNB	77
4.2.6.3	Análise do nível de RSCP	77
4.2.6.4	Análise da qualidade do sinal (<i>Ec/No</i>).....	79
4.2.6.5	Análise da potência transmitida pelo UE.....	80
4.2.3	Resumo.....	81
5	Cenários de Teste e Análise de Desempenho	83
5.1	Cenário de teste.....	83
5.2	Condições rádio existentes.....	84
5.2.1	Condições rádio UMTS.....	85
5.2.2	Condições rádio GSM	87
5.3	Planeamento dos HNBs	89
5.3.1	Determinação da quantidade e localização dos HNBs.....	89
5.3.2	Configuração inicial dos HNBs	92
5.4	Otimização	98
5.4.1	Controlo da área de cobertura	98
5.4.1.1	Análise da área de cobertura e qualidade de sinal	100
5.4.2	<i>Handovers</i> entre HNBs	105
5.4.2.1	Análise dos resultados	107
5.5.7	<i>Handovers</i> para GSM.....	112
5.5.7.1	Análise dos resultados	113
6	Conclusões	119
6.1	Conclusões	119
6.2	Trabalho Futuro.....	122
Anexos		125
A.1.	Localização das estações base.....	125
A.2.	Medidas efetuadas com TEMS® <i>Transmitter</i>	126
A.3.	Condições rádio iniciais	127
A.3.1	UMTS <i>indoor</i>	127

A.3.2 GSM <i>indoor</i>	128
A.4. Controlo da área de cobertura.....	129
A.5. <i>Handovers</i> entre HNBs.....	130
A.6. <i>Handovers</i> para GSM.....	132
A.7. <i>Key Performace Indicators</i>	132
Referências	133

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Cobertura <i>indoor</i> de um edifício de 3 andares a partir de uma antena <i>outdoor</i> [3].	11
Figura 2.2 - Constituição de um cabo radiante [4].	11
Figura 2.3 - Transmissão e receção num cabo radiante [4].	12
Figura 2.4 - Cabo radiante a dar cobertura a um edifício de 3 andares [3].	13
Figura 2.5 - DAS a dar cobertura a um edifício de 3 andares [3].	13
Figura 2.6 - Cobertura <i>indoor</i> utilizando um Repetidor [3].	14
Figura 2.7 - Cobertura através de estações base <i>indoor</i> [3].	14
Figura 2.8 - Várias soluções de cobertura <i>indoor</i> partindo das femto células [6].	17
Figura 2.9 - Arquitetura UMTS [7].	18
Figura 2.10 - Estrutura da trama para DPDCH/DPCCH em UL [8].	22
Figura 2.11 - Possibilidades de multiplexagem dos canais UTRAN. (a) DL, (b) UL [3].	24
Figura 2.12 – Arquitetura <i>Iub over IP</i> [3].	25
Figura 2.13 - Arquitetura HNB baseada numa GAN [3].	26
Figura 2.14 - Arquitetura HNB baseada em IMS/SIP [3].	27
Figura 2.15 – Arquitetura genérica da solução femto-celular [24].	32
Figura 2.16 - Arquitetura de referência para femto-células UMTS [3][11].	34
Figura 2.17 – Elementos de rede combinados num HNB.	36
Figura 2.18 - Protocolos da interface <i>Iuh</i> [33].	39
Figura 2.19 - Processo de auto-configuração e auto-otimização do HNB [3].	40
Figura 2.20 - Processo de registo do HNB através da interface <i>Iub</i> [27].	42
Figura 2.21 - <i>Hidden femtocell problem</i> [3].	44
Figura 2.22 - <i>Measurement Reports</i> [3].	44
Figura 3.1 - Planeamento de zona [7].	46
Figura 3.2 - Processo de planeamento celular <i>indoor</i>	53
Figura 3.3 - Interface <i>Iurh</i> ente HNBs via <i>Security Gateway</i> [27].	56
Figura 3.4 - Estabelecimento de uma ligação <i>Iurh</i> entre HNBs [27].	57
Figura 3.5 - Processo de <i>handover</i> intra-HNBs através da interface <i>Iurh</i> [27].	60
Figura 4.1 - HNB <i>Enterprise</i> (Vodafone Portugal) - utilizado nos testes.	65
Figura 4.2 - Planta da empresa.	67
Figura 4.3 - Processo de <i>handover inter-frequency</i> (Femto → GSM).	70

Figura 4.4 - Mensagens <i>Layer 3</i> do processo de HO da femto célula para macro-célula GSM.	71
Figura 4.5 - Re-selecção Femto → Macro → Femto.....	72
Figura 4.6 - <i>Closed Access Mode</i>	73
Figura 4.7 - Re-selecção da femto célula com IMSI registado na ACL.	74
Figura 4.8 - Eventos realizados pelo UE na re-selecção da femto célula.	74
Figura 4.9 - Re-selecção da femto célula com IMSI não registado na ACL.....	75
Figura 4.10 - Mensagens <i>Layer 3</i> do processo de re-selecção da femto-célula (IMSI não registado na ACL).	76
Figura 4.11 – Distribuição dos <i>Scrambling Code</i>	77
Figura 4.12 – Níveis de RSCP medidos no canal AS CPICH.....	77
Figura 4.13 - CDF do CPICH RSCP.	78
Figura 4.14 - Distribuição dos valores do CPICH RSCP.....	78
Figura 4.15 – Valores medidos de <i>Ec/No</i> no canal AS CPICH.....	79
Figura 4.16 – Distribuição dos valores de <i>Ec/No</i>	79
Figura 4.17 – Valores de potência Tx do UE.	80
Figura 4.18 - Distribuição dos valores de UETxPW.....	80
Figura 5.1 - Planta da empresa.....	84
Figura 5.2 - <i>Scrambling Codes UMTS indoor</i>	85
Figura 5.3 - Nível de CPICH RSCP <i>indoor</i>	85
Figura 5.4 – Nível de CPICH <i>Ec/No indoor</i>	85
Figura 5.5 - Nível de CPICH RSCP <i>outdoor</i>	86
Figura 5.6 - Nível de CPICH <i>Ec/No outdoor</i>	86
Figura 5.7 - CDF do CPICH RSCP.....	86
Figura 5.8 - Distribuição dos valores de CPICH RSCP.	86
Figura 5.9 - Nível de sinal recebido, <i>RxLev</i>	87
Figura 5.10 – Qualidade do sinal, <i>RxQUAL</i>	87
Figura 5.11 – CDF do <i>RxLev</i>	88
Figura 5.12 - Distribuição dos valores de <i>RxLev</i>	88
Figura 5.13 - Nível de sinal recebido, <i>RxLev</i>	88
Figura 5.14 - Qualidade de Sinal GSM, <i>RxQual</i>	88
Figura 5.15 - Nível de CPICH RSCP do HNB <i>Enterprise</i> (Centro TP, Tripé – orientação lateral).	91
Figura 5.16 - Nível de CPICH RSCP do TEMS® <i>Transmitter</i> com antena omnidirecional...	91

Figura 5.17 – Nível de sinal obtido para cada uma das posições do TEMS® <i>Transmitter</i> ; (a) Posição 1, (b) Posição 2, (c) Posição 3.....	92
Figura 5.18 – <i>Scrambling Codes</i> (SC) do grupo	96
Figura 5.19 – Nível de CPICH RSCP do grupo	96
Figura 5.20 – Nível de CPICH <i>Ec/No</i> do grupo	96
Figura 5.21 – Nível de potência transmitida pelo UE.	96
Figura 5.22 – CDF do CPICH RSCP, com e sem HNBs.....	97
Figura 5.23 – Distribuição dos valores CPICH RSCP, com e sem HNBs.....	97
Figura 5.24 – Distribuição dos valores CPICH <i>Ec/No</i> , com e sem HNBs.....	97
Figura 5.25 – Distribuição dos valores de potência Tx pelo UE, com e sem HNBs.....	97
Figura 5.26 - Efeito <i>ping-pong</i> entre o HNB1 e HNB3.	98
Figura 5.27 - <i>Scrambling codes</i> - TS2.....	100
Figura 5.28 - <i>Scrambling codes</i> - TS3.....	100
Figura 5.29 - Nível de CPICH RSCP - TS2.	101
Figura 5.30 - Nível de CPICH RSCP - TS3.	101
Figura 5.31 - Distribuição dos valores de CPICH RSCP, para os cenários TS1, TS2 e TS3.	101
Figura 5.32 - Níveis e CPICH <i>Ec/No</i> - TS2.	102
Figura 5.33 - Níveis de CPICH <i>Ec/No</i> - TS3.	102
Figura 5.34 - Distribuição dos valores de potência de CPICH <i>Ec/No</i> , para os cenários TS1, TS2 e TS3.	103
Figura 5.35 - Distribuição dos valores de potência Tx pelo UE, para os cenários TS1, TS2 e TS3.	103
Figura 5.36 - Taxa de Sucesso das Chamadas de Voz (CS).....	104
Figura 5.37 - Taxa de Sucesso das Chamadas de Dados (PS).....	104
Figura 5.38 - <i>Scrambling Codes</i> - TS4.....	107
Figura 5.39 - <i>Scrambling Codes</i> - TS5.....	107
Figura 5.40 - Nível de CPICH RSCP - TS4.	108
Figura 5.41 - Nível de CPICH RSCP - TS5.	108
Figura 5.42 - Distribuição dos valores de potência de CPICH RSCP, para os cenários TS1, TS4 e TS5.	109
Figura 5.43 - Nível de CPICH <i>Ec/No</i> - TS4.....	110
Figura 5.44 - Nível de CPICH <i>Ec/No</i> – TS5.	110
Figura 5.45 - Taxa de Sucesso de Chamadas de voz, para cenários TS1, TS4, TS5 e TS6....	110
Figura 5.46 - Taxa de Sucesso de HO entre HNBs, para os cenários TS1, TS4, TS5 e TS6..	111

Figura 5.47 - <i>Srambling Codes</i> - TS6.	115
Figura 5.48 - Nível de CPICH E_c/N_0 - TS6.	115
Figura 5.50 - Distribuição dos valores de potência de CPICH RSCP, para os cenários TS1 e TS6.	115
Figura 5.49 - Nível de CPICH RSCP - TS6.	115
Figura 5.51 - Taxa de Sucesso de HO para GSM, para os cenários TS1, TS4, TS5 e TS6.	116
Figura 5.52 - Nível de Potência Tx pelo UE - TS6.	116
Figura 5.53 - Distribuição dos valores de potência Tx pelo UE, para os cenários TS1 e TS6.	116

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Vantagens e Desvantagens do Cabo Radiante [3][4].	12
Tabela 2.2 - Vantagens e Desvantagens do Sistemas DAS.	14
Tabela 2.3 - Vantagens e Desvantagens das Pico-Células.	16
Tabela 2.4 - Caparação das técnicas de cobertura <i>indoor</i> existentes [3].	17
Tabela 2.5 - Normas 3GPP para as femto-células [23].	31
Tabela 3.1 - Valores 3GPP para as causa relacionada com gestão de mobilidade [15].	52
Tabela 4.1 - Valores <i>default</i> dos parâmetros RF das femto-células residenciais e empresariais	66
Tabela 4.2 - Valores dos parâmetros RF depois da auto-configuração do HNB	69
Tabela 4.3 - Lista das células vizinhas 2G/3G do HNB	69
Tabela 4.4 - Parâmetros para controlo da área de cobertura do HNB	76
Tabela 4.5 - Resumo dos resultados obtidos na Secção 4.2.6.	81
Tabela 5.1 - Valores de RSCP e E_c/N_0 para o HNB e TEMS® <i>Transmitter</i> .	90
Tabela 5.2 - Valores dos parâmetros RF das femto-células instaladas.	94
Tabela 5.3 - Valores dos parâmetros do perfil de grupo criado.	94
Tabela 5.4 - Parametrização e lista de HNBS vizinhos após conclusão da auto-configuração.	95
Tabela 5.5 - Cenários de teste do ajuste da potência do CPICH.	99
Tabela 5.6 - Resumo dos resultados obtidos nos cenários de teste: TS1, TS2 e TS3.	103
Tabela 5.7 - Paramtrização dos cenários de teste do <i>handover</i> entre HNBS	106
Tabela 5.8 - Resumo dos resultados obtidos nos cenários de teste: TS1, TS4 e TS5.	112
Tabela 5.9 - Parametrização dos cenários de teste TS1 e TS6.	114

Índice de Equações

Equação 3.1 – Potência do CPICH baseada no RSCP	50
Equação 3.2 – Máxima Atenuação de Percurso	50
Equação 3.3 – Atenuação de Espaço Livre.....	50
Equação 3.4 – Potência do CPICH baseada no E_c/I_o	50
Equação 3.5 – Taxa de Sucesso de Ch.de Voz.....	63
Equação 3.6 – Taxa de Sucesso de Ch.de Dados.....	63
Equação 3.7 – Taxa de Sucesso de HO CS para GSM	64
Equação 3.8 – Taxa de Sucesso de HO CS entre HNBs.....	64
Equação 4.1 – <i>Cumulative Distribution Function</i> (CDF)	78
Equação 4.2 – Percentagem de Cobertura	78

Acrónimos

2G	<i>2nd Generation</i>
3G	<i>3rd Generation</i>
3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
AAA	<i>Authentication, Accounting and Authorization</i>
ACL	<i>Access Control List</i>
ADSL	<i>Asymmetric Digital Subscriber Line</i>
AI	<i>Acquisition Indicators</i>
AICH	<i>Acquisition Indication Channel</i>
AKA	<i>Authentication and Key Agreement</i>
AP	<i>Access Point</i>
BCCH	<i>Broadcast Control Channel</i>
BCH	<i>Broadcast Channel</i>
BRAS	<i>Broad Band Remote Access Server</i>
BSC	<i>Base Station Controller</i>
CCCH	<i>Common Control Channel</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
CN	<i>Core Network</i>
CPCH	<i>Common Packet Channel</i>
CPICH	<i>Common Pilot Channel</i>
CS	<i>Circuit Switch</i>
CSG	<i>Closed Subscriber Group</i>
CTCH	<i>Common Traffic Channel</i>
DAS	<i>Distributed Antenna System</i>
DCCH	<i>Dedicated Control Channel</i>
DCH	<i>Dedicated Channel</i>
DHCP	<i>Dynamic Host Configuration Protocol</i>
DL	<i>Downlink</i>
DNS	<i>Domain Name System</i>
DPCCH	<i>Dedicated Physical Control Channel</i>
DPCH	<i>Downlink Dedicated Physical Channel</i>
DPDCH	<i>Dedicated Physical Data Channel</i>
DSCH	<i>Downlink Shared Channel</i>
DSL	<i>Digital Subscriber Line</i>
DTCH	<i>Dedicated Traffic Channel</i>
EAP	<i>Extensible Authentication Protocol</i>
FACH	<i>Forward Access Channel</i>
FAP	<i>Femtocell Access Point</i>
FDD	<i>Frequency Division Duplex</i>
FBI	<i>Feedback Information</i>
FMC	<i>Fixed Mobile Convergence</i>
FMS	<i>Femtocell Management System</i>
FTTH	<i>Fiber-To-The-Home</i>

GAN	<i>Generic Access Network</i>
GANC	<i>Generic Access Network Controller</i>
GGSN	<i>Gateway GPRS Support Node</i>
GMSC	<i>Gateway Mobile Switching Center</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>
GPS	<i>Global Position System</i>
GSM	<i>Global System for Mobile communication</i>
GTP	<i>GPRS Tunnelling Protocol</i>
GTP-U	<i>GPRS User Tunnelling Protocol</i>
HeNB	<i>Home evolved NodeB</i>
HLR	<i>Home Location Register</i>
HMS	<i>Home Management System</i>
HNB	<i>Home NodeB</i>
HNB GW	<i>Home NodeB Gateway</i>
HNBP	<i>HNB Application Part</i>
HO	<i>Handover</i>
HSDPA	<i>High Speed Downlink Packet Access</i>
HSPA	<i>High Speed Packet Access</i>
HSS	<i>Home Subscriber Service</i>
HSUPA	<i>High Speed Uplink Packet Access</i>
HUE	<i>HNB User Equipments</i>
IKE	<i>Internet Key Exchange</i>
IMS	<i>IP Multimedia Subsystem</i>
IMS CS	<i>IMS Centralized Service</i>
IMSI	<i>International Mobile Subscriber Identity</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
IPSec	<i>IP Security</i>
ISP	<i>Internet Service Provider</i>
<i>Iu-CS</i>	<i>Interface RNC-MSC defined by 3GPP</i>
<i>Iu-PS</i>	<i>Interface RNS-SGSN defined by 3GPP</i>
<i>Iub</i>	<i>Interface NodeB-RNC defined by 3GPP</i>
<i>Iurh</i>	<i>Interface HNB-HNB defined by 3GPP</i>
KPI	<i>Key Performance Indicator</i>
LAC	<i>Location Area Code</i>
LAU	<i>Location Area Update</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
MAC	<i>Media Access Control address</i>
ME	<i>Mobile Equipment</i>
MGW	<i>Media Gateway</i>
MO	<i>Mobile Originated</i>
MR	<i>Measurement Report</i>
MSC	<i>Mobile Switching Center</i>
MUE	<i>Macro User Equipment</i>
O&M	<i>Operations and Maintenance</i>
OAM	<i>Operations Administration and Maintenance</i>
OAMP	<i>Operations Administration Maintenance and Provisioning</i>

OMC	<i>Operation & Maintenance Center</i>
PCCH	<i>Paging Control Channel</i>
P-CCPCH	<i>Primary Common Control Physical Channel</i>
PCH	<i>Paging Channel</i>
PCPCH	<i>Physical Common Packet Channel</i>
P-CPICH	<i>Primary Common Pilot Channel</i>
PDSCH	<i>Physical Downlink Shared Channel</i>
PI	<i>Page Indicators</i>
PICH	<i>Paging Indication Channel</i>
PoE	<i>Power over Ethernet</i>
PRACH	<i>Physical Random Access Channel</i>
PS	<i>Packet Switch</i>
PSC	<i>Primary Scrambling Code</i>
PSTN	<i>Public Switched Telephone Network</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RAB	<i>Radio Access Bearer</i>
RAC	<i>Routing Area Code</i>
RACH	<i>Random Access Channel</i>
RAN	<i>Radio Access Network</i>
RANAP	<i>RAN Application Part</i>
RAU	<i>Routing Area Update</i>
RF	<i>Radio Frequency</i>
RLC	<i>Radio Link Control</i>
RNC	<i>Radio Network Controller</i>
RRC	<i>Radio Resource Control</i>
RSCP	<i>Received Signal Code Power</i>
RTP	<i>Real Time Protocol</i>
RUA	<i>RANAP User Application</i>
SA	<i>Security Association</i>
SAC	<i>Service Area Code</i>
SC	<i>Scrambling Code</i>
S-CCPCH	<i>Secondary Common Control Physical Channel</i>
SCH	<i>Synchronisation Channel</i>
SCTP	<i>Stream Control Transport Protocol</i>
SeGW	<i>Security Gateway</i>
SF	<i>Spreading Factor</i>
SFN	<i>System Frame Number</i>
SGSN	<i>Serving GPRS Support Node</i>
SIM	<i>Subscriber Identity Module</i>
SIP	<i>Session Initiation Protocol</i>
SON	<i>Self-Organized Network</i>
SRVCC	<i>Single Radio Voice Call Continuity</i>
TE	<i>Terminal Equipment</i>
TFCI	<i>Transport Format Combination Indicator</i>
TPC	<i>Transmit Power Control</i>
TR	<i>Terminal Research</i>

TR-69	<i>Technical Report 69</i>
TR-196	<i>Technical Report 196</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
UE	<i>User Equipment</i>
UL	<i>Uplink</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>
USIM	<i>Universal Subscriber Identity Module</i>
UTRAN	<i>Universal Terrestrial Radio Access Network</i>
VCC	<i>Voice Call Continuity</i>
VoIP	<i>Voice over Internet Protocol</i>
WCDMA	<i>Wideband Code Division Multiple Access</i>

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo será efetuada uma introdução ao trabalho realizado, começando por expor a motivação, seguindo para o enquadramento e apresentação dos objetivos. No final deste capítulo será também apresentada a estrutura do documento e os artigos publicados.

1.1 Motivação

Recentemente tem-se assistido a um crescimento acentuado do tráfego em telecomunicações móveis, em grande parte relacionado com o crescente aumento de *smart phones*, *tablets* e *dongles*, assim como o aumento das redes sociais. Esta procura por serviços de banda larga, segundo o estudo apresentado pelo IDATE [1], fez com que, globalmente, em 2009 a voz fosse ultrapassada pelos dados móveis, sendo este serviço o principal responsável pela maior parte do tráfego gerado nas redes móveis em 2010. O mesmo estudo mostra que, a uma escala mundial, o tráfego móvel que será realizado em 2020 será 33 vezes superior ao que foi realizado no ano de 2010, e que o tráfego diário nos países da Europa ocidental, desde 2010 a 2020, irá aumentar 67 vezes passando de 186 *Tera Bytes* (TB) para 12540 TB. Este aumento de tráfego esperado para os próximos anos traz grandes desafios aos operadores móveis, que procuram responder às exigências dos utilizadores aumentando cada vez mais a capacidade da sua rede, introduzindo novas tecnologias (como o *Long Term Evolution*, LTE) capazes de suportar serviços cada vez mais exigentes, tornando as suas redes móveis cada vez mais complexas.

O elevado crescimento do tráfego, para além de exigir redes móveis com maior capacidade e melhor cobertura, traz também associado o problema do congestionamento da rede móvel. Os operadores conseguem combater a necessidade de cobertura das redes móveis com o aumento do número de estações-base macro-celulares, tendo como consequência um aumento do consumo de energia. Por outro lado, como solução para este problema, o operador pode recorrer ao aumento do número de pequenas estações-base, que constituem células de pequenas dimensões e que por isso utilizam baixa potência de transmissão (Tx, tipicamente 20 dBm), designadas por femto-células. Devido à reduzida distância entre a estação-base e o

terminal móvel, esta permite débitos binários mais elevados e baixa latência. As femto-células surgem assim com uma solução que permite satisfazer as necessidades dos operadores em termos de débito binário e área de cobertura. Do ponto de vista financeiro, esta solução será uma alternativa de baixo custo ao consumo elevado de energia e aos elevados custos de instalação das macro-células, podendo fornecer uma qualidade de serviço (QoS, *Quality of Service*) semelhante às últimas [2].

As três razões pelas quais os sistemas celulares necessitam de introduzir a solução das femto-células são:

- **Área de cobertura**

Fornecer cobertura no interior dos edifícios a partir de uma rede macro-celular exterior é pouco eficiente, devido à atenuação elevada que o sinal vai sofrer ao penetrar nas paredes dos edifícios.

- **Capacidade**

Devido ao facto da femto-célula ter um raio de célula mais pequeno e ter menos utilizadores que a macro-célula, vai ser disponibilizada a cada um deles maior capacidade, em termos de atribuição de recursos rádio.

- **Potência/Congestionamento**

As femto-células permitem fazer alguma descarga de tráfego das macro-células, pois assim que os utilizadores transitam das macro-células para as femto-células, todo o tráfego gerado por estes será enviado para a rede do operador móvel através da ligação (*Digital Subscriber Line (DSL)*, *Fiber-To-The-Home (FTTH)*, etc.) do *Internet Service Provider (ISP)*. Desta forma, o número de utilizadores na macro-célula vai decair permitindo efetuar uma redução da potência de emissão, o que conduz à diminuição de interferência na rede. Permite também libertar recursos da rádio da rede macro reduzindo o congestionamento.

1.2 Enquadramento

No âmbito das comunicações móveis, uma femto-célula (*femtocell*) é uma pequena estação-base, tipicamente projetada para ser utilizada numa residência particular ou numa pequena empresa. Esta é ligada à rede do prestador de serviços através de banda larga (como DSL) podendo tipicamente suportar neste tipo de ambientes, entre 4 a 16 telemóveis ativos em simultâneo.

Para um operador de telefonia móvel, a atratividade das femto-células está diretamente ligada à melhoria de cobertura e capacidade, especificamente no interior de edifícios. Por sua vez, os utilizadores beneficiarão de uma melhor cobertura/qualidade de serviço, e potencialmente de uma melhor autonomia dos seus equipamentos.

As femto-células são uma forma alternativa de oferecer os benefícios da convergência fixo-móvel (FMC, *Fixed-Mobile Convergence*). A distinção é que a maioria das arquiteturas FMC requerem um aparelho (*dual-mode*) que trabalha com espectro não licenciado usando *Access Points*, enquanto que uma implementação baseada em femto-células trabalhará com os equipamentos existentes, mas requerendo a instalação de um novo ponto de acesso que usa espectro eletromagnético licenciado. O conceito das femto-células é aplicável a todas as tecnologias móveis, incluindo *Global System for Mobile communication (GSM)/General Packet Radio Service (GPRS)*, *Universal Mobile Telecommunications System (UMTS)* e *LTE*. As tecnologias utilizadas pelos equipamentos estudados nesta tese são: *UMTS (Wideband Code-Division Multiple Access, WCDMA)*, *High Speed Packet Access (HSPA)*.

As femto-células têm características semelhantes às *Self-Organized Network (SON)*, que lhe conferem a capacidade de se auto-configurar e auto-otimizar, permitindo ao operador automatizar as tarefas de operação e manutenção (O&M) das mesmas, contribuindo desta forma para uma mais fácil instalação e configuração dos equipamentos, e para uma redução de custos.

1.3 Objetivos

A presente dissertação aborda um conjunto de sistemas que permitem integrar as femto-células na rede *core* UMTS, utilizando uma arquitetura SON. Existem várias arquiteturas que permitem incorporar as femto-células na rede *core* do operador: *IP Multimedia Subsystem/ Session Initiated Protocol (IMS/SIP)*, *Generic Access Network (GAN)* e *Iub over IP*. Em cada uma das diferentes arquiteturas será necessário adicionar um conjunto de novos elementos que introduziram funções adicionais permitindo simplificar as tarefas de planeamento, configuração, operação e manutenção das femto-células.

Nesta tese será realizado um planeamento *indoor* num ambiente empresarial real, recorrendo à utilização de femto-células, com o objetivo de:

- Avaliar as capacidades SON das femto-células;
- Avaliar o funcionamento das femto-células em grupo co-localizado;
- Avaliar as melhorias que as femto-células apresentam relativamente à cobertura

- da rede macro *indoor* existente, em termos de qualidade e nível de sinal recebido;
- Perceber qual a configuração que permite obter melhores resultados em termos de área de cobertura rádio *indoor*;
- Perceber qual a melhor configuração em termos de mobilidade entre as femto-células do grupo e entre estas e rede macro GSM;
- Perceber quais os principais problemas que possam surgir num planeamento celular utilizando a tecnologia das femto-células (procurando solucioná-los);
- Avaliar o desempenho da rede femto-celular num ambiente empresarial real.

Os pontos referidos anteriormente serão avaliados através dos resultados obtidos de um conjunto de cenários de teste, constituídos por diferentes parametrizações a aplicar às femto-células. Para cada um dos cenários de teste será executada uma análise da cobertura no interior do edifício recorrendo à ferramenta de recolha de medidas *TEMS® Investigation*, serão também definidos um conjunto de KPIs que permitiram avaliar o desempenho da rede femto-celular em cada um dos cenários de teste aplicados, permitindo identificar eventuais problemas que possam surgir.

1.4 Estrutura da dissertação

Este trabalho encontra-se organizado da seguinte forma:

- **Capítulo 1: Introdução** – Neste capítulo é descrita a motivação da realização deste trabalho, é feito um enquadramento do estudo realizado, descrição dos objetivos e organização do relatório.
- **Capítulo 2: Estado da Arte** – Neste capítulo são introduzidos os conceitos, as tecnologias e o seu estado da arte, necessários para a compreensão do estudo realizado. Este capítulo começa com a apresentação dos desafios associados às femto-células, seguindo-se uma breve descrição do estado da arte das soluções atuais utilizadas na cobertura no interior de edifícios. Posteriormente é feita uma breve análise sobre o UMTS, onde se analisa a arquitetura e canais lógicos, físicos e de transporte. Segue-se uma apresentação do estado da arte da normalização das femto-células, concluindo com a apresentação da tecnologia, onde será abordada a arquitetura, elementos de rede e funcionamento das femto-células.
- **Capítulo 3: Planeamento e Otimização de Femto-células** – Neste capítulo são introduzidos os principais conceitos de planeamento de femto-células no interior

de edifícios. Começa-se por abordar os principais conceitos do planeamento *indoor*, sendo de seguida apresentadas as várias opções de configuração que o operador tem de efetuar para colocar a funcionar os *Home NodeBs* (HNB). Posteriormente, são descritas as várias etapas do planeamento *indoor*, de seguida aborda-se o funcionamento e configuração de um grupo de femto-células, concluindo com a análise do processo de *handover* (HO) entre HNBs, e entre estes e a rede macro GSM, e a apresentação dos KPIs utilizados para avaliar o desempenho de rede femto-celular.

- **Capítulo 4: Avaliação do HNB Empresarial** – Neste capítulo são testadas as capacidades do HNB utilizado neste trabalho, sendo avaliado o seu funcionamento num cenário empresarial real.
- **Capítulo 5: Cenários de Teste e Análise de Desempenho** – Neste capítulo é executado um planeamento celular numa empresa, utilizando a tecnologia das femto-células e aplicando os conceitos descritos no Capítulo 3. Através da apresentação de um conjunto de cenários de teste, é analisado o funcionamento e desempenho da rede femto-celular implementada.
- **Capítulo 6: Conclusões** – Neste capítulo são apresentadas as conclusões e algumas propostas de trabalho futuro, partindo do trabalho desenvolvido.

1.5 Artigos Publicados

Os resultados obtidos durante a realização deste trabalho permitiram a publicação dos seguintes artigos:

Santos, P., Vieira, P., Dias, A., “Planeamento e Otimização de Femto-Células em Ambiente Empresarial”, 1º Congresso Ibérico de Jovens Engenheiros (CIJE’2012), Braga, Portugal, Ordem dos Engenheiros, 2012.

Santos, P., Vieira, P., Dias, A., “Planeamento, Implementação e Otimização de um Grupo de Femto-Células em Redes UMTS”, 6º Congresso Comité Português da URSI - Aplicações das ondas eletromagnéticas: da eficiência energética à bioengenharia, Lisboa, Portugal, 2012.

(Submetido)

Capítulo 2

Estado da Arte

Este capítulo faz uma introdução aos conceitos e tecnologias que serão abordadas ao longo deste trabalho. Este capítulo inicia-se com a apresentação dos desafios associados às femto-células, seguindo-se um estudo comparativo entre as femto-células e as soluções de cobertura *indoor* existentes, sendo apresentadas as principais vantagens e desvantagens de cada uma delas. Introduzidos os principais conceitos do UMTS, são descritas as várias alternativas para incorporar as femto-células na rede *Universal Terrestrial Radio Access Network* (UTRAN), seguindo-se uma descrição do estado atual da normalização das femto-células, concluindo com o estudo da tecnologia das femto-células. Será apresentada a sua arquitetura, principais características e modo de funcionamento.

2.2 Desafios das Femto-células

Procurando obter baixos custos, as femto-células necessitam de ter uma instalação simples do ponto de vista do utilizador, assim como do ponto de vista do operador. Isto implica que as femto-células tenham a capacidade de se auto-configurar e auto-otimizar, sendo apenas necessário, para a sua instalação, ligar o cabo de rede DSL do utilizador e o cabo de alimentação do equipamento, tudo o resto será feito de forma automática.

Em termos gerais, será o utilizador a instalar o equipamento, o que levanta alguns problemas. Por exemplo, toda a informação de configuração da femto-célula terá de ser negociada com a rede para numa fase posterior, o HNB conseguir efetuar o *download* de todos os parâmetros necessários, terá também de ser o HNB a estabelecer as relações de vizinhança de forma automática, facilitando a sua instalação no ambiente rádio e permitindo a existência da mobilidade entre as femto-células e a rede macro.

A femto-célula terá de se adaptar ao ambiente celular existente que pode sofrer alterações: existem macro-células que são desativadas, outras novas que são colocadas para aumento de cobertura, pelo que o mesmo acontece num ambiente femto-celular. Por estas razões é essencial que o HNB tenha a capacidade de se auto-otimizar, evitando interferências e quebras de cobertura.

As femto-células utilizam um espectro licenciado, sendo por isso necessário efetuar um processo de autenticação do equipamento perante o operador, onde será averiguado se o mesmo tem autorização para se conectar à rede central (*core*) e começar a radiar. Igualmente importante é saber a localização do HNB que, para além de motivos legais, é fundamental para o *tracking* do *User Equipment* (UE) em serviços de emergência. A imprevisibilidade da localização de uma nova femto-célula e para que possa existir mobilidade entre a rede macro e cada uma das femto-células, implica que em todas as células da rede macro seja necessário definir relações de vizinhança para as femto-células. Sabendo que o número de relações de vizinhança é limitado, podem existir zonas do país onde a rede macro já não tem capacidade para a introdução de mais relações de vizinhança, limitando a mobilidade entre as femto-células e a rede macro.

A ligação do HNB à rede do operador móvel é feita através da rede do ISP que é uma rede *Internet Protocol* (IP) e por isso *best-effort type*, significa que não existem níveis máximos de *delay* ou *jitter*, caso a rede do ISP esteja muito ou pouco congestionada ou temporariamente indisponível. Desta forma, é necessário estabelecer uma ligação entre a femto-célula e a rede *core* do operador, através de uma interface mais flexível do que no caso das macro-células, pois as condições da rede DSL vão afetar diretamente a qualidade da voz nas chamadas *Circuit Switch* (CS) e o débito binário nas sessões *Packet Switch* (PS).

Num ambiente empresarial, todo o processo de instalação do HNB empresarial é semelhante ao processo de instalação utilizado em ambiente residencial, sendo apenas necessário conectar ao equipamento o cabo DSL e o cabo de alimentação (instalação *Plug&Play*). Depois, basta esperar que o HNB termine o processo de auto-configuração e auto-otimização. Contudo, num ambiente empresarial surge um novo conjunto de desafios:

- **Área de cobertura**

Neste tipo de ambiente será necessário realizar um projeto de planeamento dedicado, pois na maior parte das empresas apenas uma femto-célula não é suficiente para cobrir toda a área desejada. Tendo em conta o número de utilizadores, será necessário efetuar um dimensionamento da capacidade do grupo de femto-células, que irá determinar o número de HNBs necessários para uma determinada empresa.

- **Rede local**

As femto-células necessitam de uma ligação à internet para poderem

executar o processo de auto-configuração, assim como enviar todo o tráfego executado através das mesmas. Desta forma, será necessário configurar a *firewall* da rede local da empresa para que seja possível aos HNBs comunicar com a rede *core* do operador, caso contrário o HNB ficará sem radiar. É também necessário assegurar que a largura de banda contratada pelo utilizador, é suficiente para suportar todo o tráfego e sinalização proveniente do grupo de femto-células.

- **Mobilidade**

A instalação de um conjunto de femto-células co-localizado implica um estudo de parametrização que não se aplica numa instalação individual, em termos de interferência e mobilidade. Tratando-se de femto-células UMTS, cada uma delas necessita de um *Primary Scrambling Code* (PSC), e tendo em conta que o número de PSC UMTS é limitado, será necessário definir uma estratégia de reutilização de PSCs dentro do grupo de femto-células, procurando também evitar problemas de conflito de PSCs. Do lado da rede macro, para possibilitar a mobilidade macro-célula → femto-célula, será necessário criar relações de vizinhança para cada uma das femto-células, o que implica adicionar em todas as células macro, na zona de localização da empresa, relações de vizinhança para cada uma das femto-células do grupo, o que por vezes pode não ser possível devido ao número limitado de relações de vizinhança que cada célula macro suporta. Por isso, torna-se importante definir a estratégia de reutilização de PSC, que se traduz também numa maior ou menor lista de relações de vizinhança a adicionar nas células macro.

No interior da empresa, será necessário efetuar um estudo para a colocação de cada uma das femto-células, de forma evitar problemas de sobrecarga de utilizadores, buracos de cobertura, interferência e efeito de *ping-pong* entre femto-células.

Antes do aparecimento das femto-células já existia um conjunto de soluções orientadas para ao aumento de cobertura no interior dos edifícios. As várias soluções são apresentadas na Secção 2.2, sendo efetuado também uma comparação entre estas e as femto-células.

2.3 Técnicas de cobertura no interior de edifícios

A crescente procura por débitos binários superiores e sistemas com maior largura de banda, que permitem ao utilizador ter acesso a conteúdos multimédia mais complexos, exige uma boa cobertura celular. Por outro lado, esta procura reforça a necessidade da existência de uma boa cobertura no interior de edifícios, pois atualmente mais de 70% do tráfego móvel é gerado no interior de edifícios [3]. Ritmos de transmissão elevados no interior de edifícios requerem uma boa cobertura no interior dos mesmos, sendo por isso, a cobertura *indoor*, um fator de extrema importância.

Desta forma, surgiram diferentes soluções que permitem aumentar a cobertura *indoor*. Inicialmente surgiram os *Distributed Antenna Systems* (DAS) (pico-células), depois o cabo radiante e mais recentemente as femto-células. Todas as técnicas referidas serão descritas de forma mais detalhada nas seguintes secções.

2.3.1 Macro-Células

No início da 2ª Geração (2G) com a tecnologia GSM, a cobertura da rede era apenas disponibilizada através de estações base que criavam macro-células com alguns quilómetros, em zonas rurais, e com muitas centenas de metros nas zonas urbanas. O principal tipo de tráfego transportado pela rede 2G correspondia às chamadas de voz, pois um elevado débito binário para tráfego de pacotes não era necessário na altura. Por esta razão, a maior parte da cobertura *indoor* era proporcionada através de antenas *outdoor*. Hoje em dia ainda existe esta solução, pois as soluções *indoor* (descritas nas próximas secções) apenas começaram a ser implementadas nos últimos vinte anos [3].

Na Figura 2.1, está representado um esquema de como se pode proporcionar cobertura no interior dos edifícios a partir de um transmissor *outdoor*. As paredes do edifício, dependendo das propriedades dos seus materiais constituintes, irão provocar uma atenuação da potência do sinal transmitido pela antena *outdoor*. Por esta razão, os operadores tiveram de encontrar novas soluções para superar esta limitação, que incluíam a adição de novas estações base ou alterar a localização das estações base existentes. O aumento do número de estações base macro não será a solução mais eficiente, pois irá tornar bastante complexo o planeamento rádio, aumentando a interferência e dificultando a reutilização de frequências, sendo também uma solução bastante dispendiosa.

2.3.2 Cabo radiante

O cabo radiante (*leaky feeder*) foi uma solução que surgiu inicialmente com o objetivo de dar cobertura a grandes corredores, elevadores e túneis. Esta solução consiste em utilizar um cabo metálico que atua como uma antena. A energia eletromagnética pode ser transmitida ou recebida ao longo de todo o cabo, como se verifica na Figura 2.3. Geralmente, o cabo radiante está ligado a uma estação base, como se pode verificar na Figura 2.4.

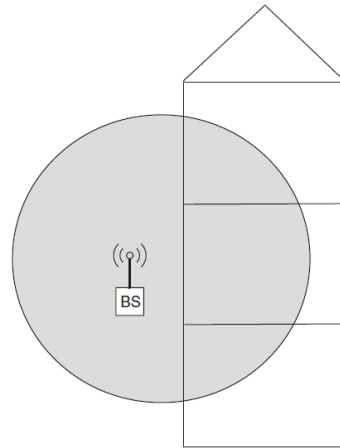


Figura 2.1 - Cobertura *indoor* de um edifício de 3 andares a partir de uma antena *outdoor* [3].

O tipo de cabo utilizado nesta solução é semelhante a um cabo coaxial, mas com a particularidade de ter pequenas aberturas no condutor externo (Figura 2.2), que permitem que o sinal seja radiado para o exterior ao longo de todo comprimento do cabo. O diagrama de radiação produzido pelo cabo radiante é omnidirecional.

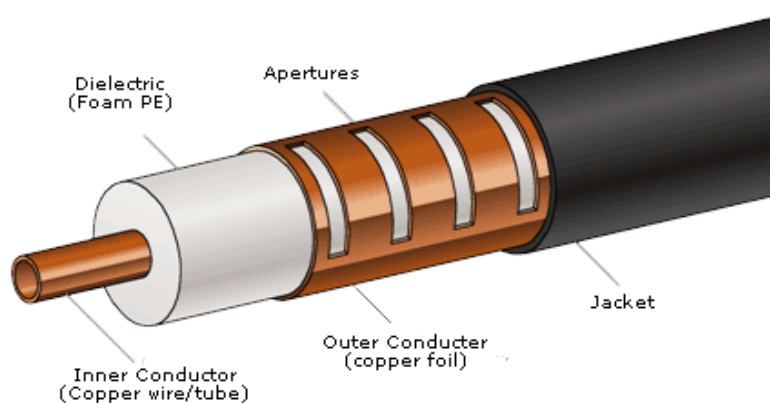


Figura 2.2 - Constituição de um cabo radiante [4].

As aberturas no condutor externo do cabo radiante estão dimensionadas para um determinado comprimento de onda ou para uma determinada banda de frequências. A energia eletromagnética propagada no cabo sai para o exterior sobre a forma de ondas

eletromagnéticas, através das aberturas (Figura 2.3). Para se obter uma máxima eficiência, é recomendado que o cabo esteja ligeiramente afastado da parede. A utilização de fixadores metálicos não é aconselhada, pois afeta o diagrama de radiação do cabo.

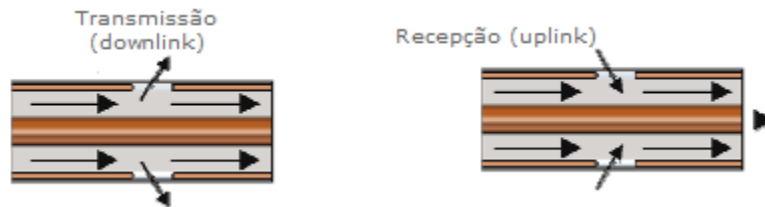


Figura 2.3 - Transmissão e recepção num cabo radiante [4].

Tabela 2.1 - Vantagens e Desvantagens do Cabo Radiante [3][4].

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Um único cabo radiante pode transmitir um grande número de serviços, desde FM, UMTS, WLAN; • Serviços adicionais podem ser adicionados mais tarde, sem novos custos de instalação de cabos; • Menor impacto visual (os cabos radiantes podem ser facilmente escondidos atrás de forros, teto falso, coberturas, etc.); • A energia está bem distribuída (por exemplo, num corredor, o cabo radiante permite obter uma cobertura homogénea ao longo de todo o cabo, semelhante ao que acontece com a utilização de um sistema de antenas ligadas a várias estações base); • Utilizando um cabo radiante pode ser possível que com apenas uma estação base se consiga dar cobertura a uma grande área, reduzindo os custos de implementação. 	<ul style="list-style-type: none"> • Instalação difícil e dispendiosa; • O cabo deve estar perfeitamente alinhado, para que o sinal radiado através das aberturas tenha a menor atenuação possível; • As impurezas degradam o desempenho do cabo (por exemplo em túneis públicos); • Tem um alcance limitado, especialmente quando se utilizam frequências elevadas.

2.3.3 *Distributed Antenna System (DAS)*

Um Sistema Distribuído de Antenas (DAS) constitui mais uma das várias soluções para cobertura no interior de edifícios. O princípio do sistema DAS consiste em dividir a transmissão da potência da estação base, por várias antenas. Isto permite dividir a área de cobertura total em pequenas regiões, como ilustra a Figura 2.5.

A utilização de pequenas regiões para proporcionar uma cobertura homogénea da

totalidade do edifício, permite aumentar o desempenho do sistema em termos de perdas de propagação (*path loss*) da onda eletromagnética, e em termos de potência de transmissão. As perdas de percurso diminuem quando se utilizam múltiplas antenas, o que permite também reduzir a potência de transmissão da estação base, pois será necessária uma menor potência para cobrir uma determinada área, conseqüentemente o UE irá necessitar de uma menor potência para comunicar com as antenas do sistema DAS, aumentando a autonomia da sua bateria [5].

Num sistema DAS, todas as antenas utilizadas estão ligadas a uma única estação base, através de cabo coaxial ou fibra ótica. Os sistemas DAS podem ser classificados em: passivos (*Passive DAS*) ou ativos (*Active DAS*).

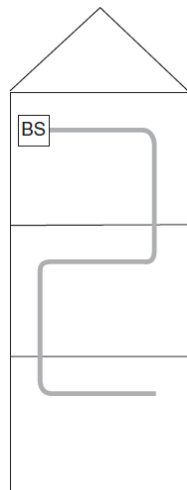


Figura 2.4 - Cabo radiante a dar cobertura a um edifício de 3 andares [3].

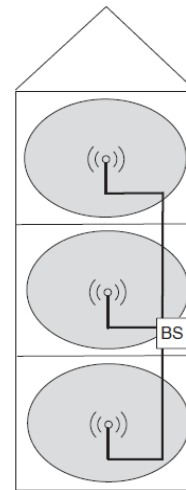


Figura 2.5 - DAS a dar cobertura a um edifício de 3 andares [3].

Os sistemas DAS (Figura 2.5) passivos necessitam de estações base que consigam fornecer potência suficiente para suportar a atenuação provocada por todos os elementos passivos (*splitters*, cabos coaxiais, *Tappers*, atenuadores, filtros, etc.) espalhados pelo edifício. O problema desta solução é que não consegue proporcionar uma cobertura uniforme do edifício, devido às perdas não uniformes provocadas pela cablagem do sistema. As perdas de potência dos cabos vão aumentar o ruído no sistema, o que afeta bastante as comunicações móveis, especialmente em *uplink* (UL).

Os sistemas DAS ativos são constituídos por elementos RF ativos interligados através de fibra ótica e cabos coaxiais. A utilização de fibra ótica permite reduzir a perdas relacionadas com a cablagem e, devido ao facto da fibra ter uma atenuação baixa, é possível disponibilizar uma cobertura homogénea utilizando uma baixa potência de transmissão na estação base.

Tabela 2.2 - Vantagens e Desvantagens do Sistemas DAS.

Vantagens	Desvantagens
<p>DAS Passivo:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Simples de instalar; • Componentes de diferentes fabricantes são compatíveis entre si. <p>DAS Ativo:</p> <ul style="list-style-type: none"> • As perdas num sistema DAS ativo são menores que as de um sistema DAS passivo; • A utilização da fibra ótica permite, ao sistema DAS ativo, obter uma cobertura uniforme que não era possível no sistema DAS passivo; • A redução das perdas da cablagem faz com que o sistema DAS ativo seja ideal para utilizar em edifícios de grandes dimensões (por exemplo: hospitais, centros comerciais, etc.) • A estação base necessita de menos potência de transmissão. 	<ul style="list-style-type: none"> • Perdas no sistema devido à utilização de cabos coaxiais, que implicam a utilização de potências de transmissão mais elevadas na estação base; • Os cabos coaxiais têm maiores atenuações para frequência mais elevadas, degradando a qualidade de serviço do sistema; • Difícil de se obter uma cobertura uniforme.

2.3.4 Repetidores

Devido à atenuação provocada pelas paredes dos edifícios, a ideia da utilização desta tecnologia é utilizar um elemento que amplifica o sinal recebido de uma antena *outdoor* e enviando-o, posteriormente para o interior do edifício, permitindo aumentar a cobertura. Como se pode verificar na Figura 2.6, pode ser utilizado um repetidor para retransmitir o sinal, obtido a partir de uma antena *outdoor*, para o interior do edifício.

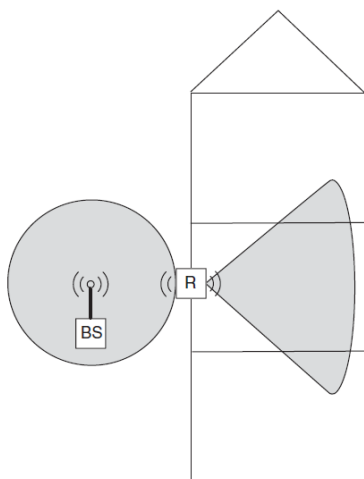


Figura 2.6 - Cobertura *indoor* utilizando um Repetidor [3].

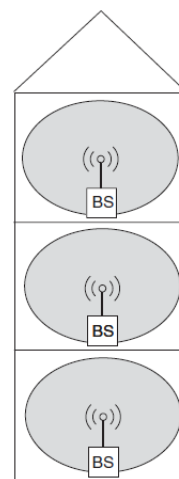


Figura 2.7 - Cobertura através de estações base *indoor* [3].

2.3.5 Pico-Células

Uma pico-célula é muito semelhante a um *Access Point* (AP), é basicamente uma estação base simplificada. Utiliza uma potência de transmissão baixa e tem uma capacidade inferior à de uma estação base micro-celular (Figura 2.7). Cada pico-célula está conectada a um *Radio Network Controller* (RNC) do operador. Assim, como acontece com as restantes estações base, o RNC controla a transmissão de dados entre a rede do operador e a pico célula, decide quando devem ser efetuados os *handovers* entre células e faz a gestão de recursos a atribuir aos diferentes utilizadores. A pico-célula está ligada à rede *core* do operador via fibra ótica ou *Ethernet*. Normalmente às estações base pico-celulares é acoplada uma antena omnidirecional [3]. As pico-células são compatíveis com a rede móvel *outdoor*, operam na banda de frequências licenciada e resolvem problemas de *handover* existentes. A instalação de pico-células no interior dos edifícios vai permitir aumentar a capacidade da rede *outdoor*, pois os utilizadores irão utilizar os recursos das pico-células ficando as macro-células apenas dedicadas ao tráfego *outdoor*, desta forma o operador pode reduzir a potência de transmissão das macro-células, diminuindo os custos.

2.3.6 Comparação das várias soluções *indoor*

Nesta secção será apresentada uma breve comparação das soluções de cobertura *indoor* descritas nas secções anteriores.

As primeiras soluções que surgiram (macro-células, micro-células e repetidores), permitiam aumentar a cobertura *indoor* através da extensão da área de cobertura das células *outdoor* para o interior dos edifícios, isto podia ser conseguido recorrendo ao aumento da potência do sinal *outdoor*, ou através da retransmissão do sinal *outdoor* para o interior dos edifícios utilizando repetidores. Estas soluções permitem aumentar a cobertura *indoor* mas não de uma forma eficiente, como apenas se limitam a estender a cobertura *outdoor* ao interior dos edifícios, não permitem proporcionar uma cobertura homogénea de todo o edifício existindo sempre zonas com uma cobertura mais fraca ou até mesmo sem cobertura.

Relativamente às soluções mais eficientes para o aumento da cobertura *indoor*, todas têm em comum a instalação de uma estação base no interior do edifício, assim como as respetivas antenas para transmissão do sinal. Surgindo assim a solução do cabo radiante como sendo ideal para utilizar em túneis, embora a sua utilização para o interior dos edifícios não seja a mais adequada devido à difícil instalação nesse tipo de ambientes. As pico- e femto-

células surgem com sendo as tecnologias mais eficientes, começando pelo facto de terem uma fácil instalação, e devido às suas dimensões compactas, estas podem ser colocadas em locais estratégicos permitindo moldar a cobertura celular às características arquitetónicas do edifício em questão.

Tabela 2.3 - Vantagens e Desvantagens das Pico-Células.

Vantagens	Desvantagem
<ul style="list-style-type: none"> • Baixo custo relativamente às estações base macro; • Baixos custos de instalação; • Permitem aumentar de forma eficiente a cobertura <i>indoor</i>, uma vez que são instaladas no interior dos edifícios (Figura 2.7). • Baixa potência de transmissão, relativamente às estações macro; • A utilização de uma potência de transmissão baixa, permite controlar melhor o elevado número de reflexões que o sinal transmitido sofre no interior do edifício. 	<ul style="list-style-type: none"> • Para se obter uma cobertura homogénea de um determinado edifício, são necessárias várias pico-células.

As femto-células distinguem-se das pico-células não pela sua área de cobertura mais reduzida, mas pelos seus atributos SON. Estas têm a capacidade de se auto-configurar e a sua gestão é feita remotamente pelo operador, estas funcionalidades permitem que o utilizador possa instalar a o equipamento sem dificuldades. O mesmo já não se verifica nas pico-células, onde para a sua instalação é necessário recorrer a pessoal especializado em *Radio Frequency (RF)* e *IP networking*, sendo por isso mais utilizadas em centros comerciais ou escritórios. Por outro lado, as femto-células estão orientadas para uma utilização doméstica em termos de preço e capacidade para funcionar com as ligações de banda larga (DSL, fibra, etc.) dos utilizadores. Com o passar do tempo é possível que as pico-células venham a adquirir funcionalidades das femto-células, mas é evidente que as femto-células representam uma nova classe de células na hierarquia atual (Figura 2.8).

Na Tabela 2.4 estão apresentadas as principais características das várias soluções de cobertura *indoor* descritas anteriormente, sendo também incluídas as femto-células a título de comparação.

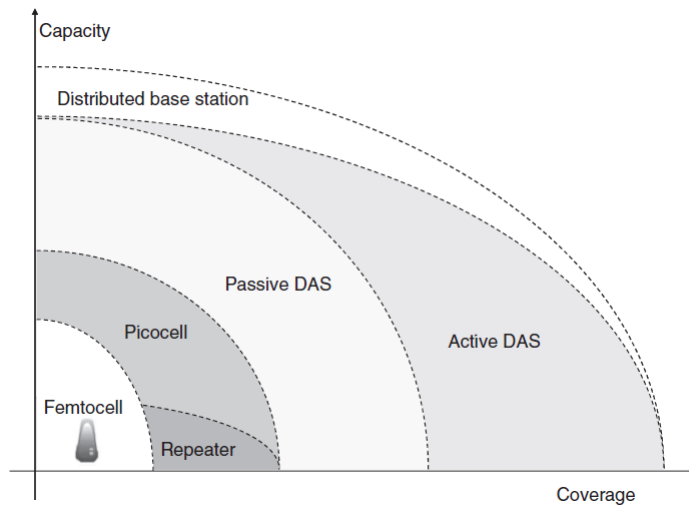


Figura 2.8 - Várias soluções de cobertura *indoor* partindo das femto células [6].

Tabela 2.4 - Caparação das técnicas de cobertura *indoor* existentes [3].

Macro/micro-células	Repetidores	DAS	Cabo Radiante	Pico-célula	Femto-célula
Custo elevado	Custo acessível	Custo acessível	Custo acessível	Baixo custo	Baixo custo
Custos de instalação elevados	Difícil de instalar	Difícil de instalar	Difícil de instalar	Fácil de instalar	Muito fácil de instalar
Elevada potência	Baixa potência	Baixa potência	Baixa potência	Muito Baixa potência	Muito Baixa potência
Fraca cobertura <i>indoor</i>	Cobertura <i>indoor</i> aceitável	Boa cobertura <i>indoor</i>	Boa cobertura <i>indoor</i>	Boa cobertura <i>indoor</i>	Boa cobertura <i>indoor</i>
Instalação e configuração efetuada por técnico especializado	Instalação e configuração efetuada por técnico especializado	Instalação e configuração efetuada por técnico especializado	Instalação e configuração efetuada por técnico especializado	Instalação e configuração efetuada por técnico especializado	Auto-configuração, auto-otimização e instalação efetuada pelo utilizador final

2.4 Universal Mobile Telecommunications System

Esta secção pretende fornecer ao leitor uma breve apresentação dos elementos básicos de uma arquitetura UMTS e dos canais lógicos, físicos e de transporte. Os principais elementos de uma arquitetura UMTS são: o *User Equipment* (UE), *UMTS Radio Access Network* (UTRAN) e a *Core Network* (CN).

2.4.1 Arquitetura

O ponto de entrada na arquitetura UMTS é estabelecido a partir do UE, que é constituído por três entidades: *Terminal Equipment* (TE) + *Mobile Equipment* (ME) + *Universal Subscriber Identity Module* (USIM). Através da interface rádio *Uu*, o UE estabelece a ligação com a rede UTRAN, iniciada pelo *NodeB*. As principais funções do *NodeB* são a transmissão e receção de sinais rádio, proceder à modelação e desmodulação dos sinais e também filtragem de sinais. O *NodeB* pode também ter funções de controlo de potência, este procede à execução de todas as suas funções através das interfaces *Uu* (interface rádio para comunicação com o UE, referida anteriormente) e através da interface *Iu-b*, para comunicar com o RNC.

O RNC controla a atribuição e libertação dos recursos rádio que o *NodeB* atribui a cada UE, pode controlar um ou mais *NodeBs* e encontra-se ligado a estes através da interface *Iu-b*. O RNC estabelece a ligação entre a rede UTRAN e a rede *core* UMTS (CN UMTS), estando ligado ao *Mobile Switching Center* (MSC) através da interface *Iu-CS* (utilizada para o tráfego de comutação de circuitos) e ao *Serving General Packet Radio Service Support Node* (SGSN) através da interface *Iu-PS* (utilizada para o tráfego de comutação de pacotes).

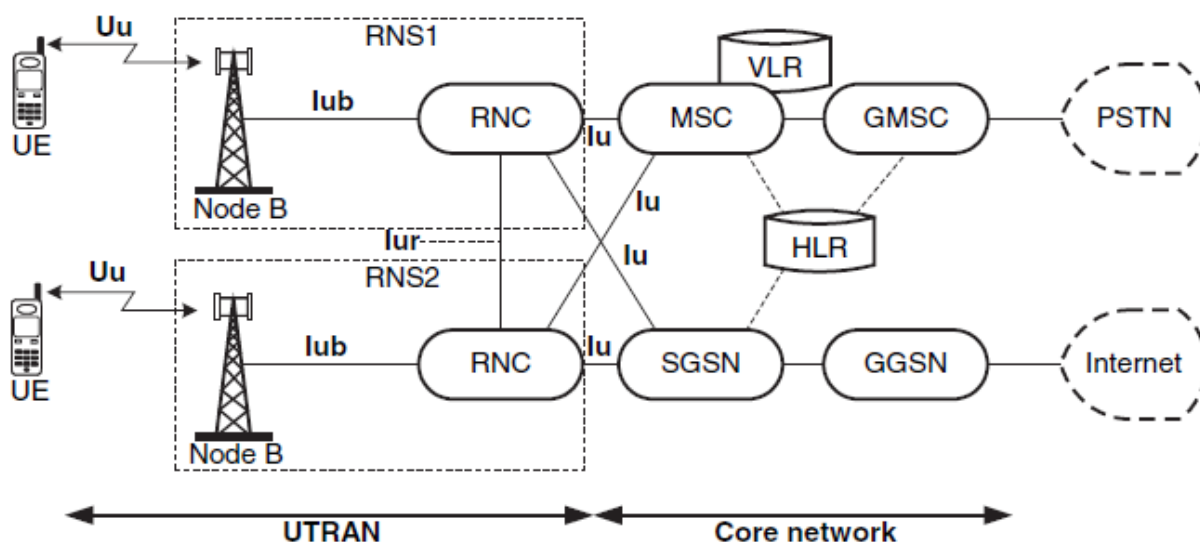


Figura 2.9 - Arquitetura UMTS [7].

A CN do operador está ligada à rede pública de telefone fixo (*Public Switch Telephone Network*, PSTN) para encaminhamento de chamadas para o exterior da rede do operador, e à Internet para disponibilizar serviços de dados. A CN está dividida em dois domínios: *Circuit-Switch* (CS) e *Packet-Switch* (PS). O tráfego CS enviado pelo RNC através da interface *Iu-CS*

para a CN é encaminhado para a PSTN, passando pelo MSC e *Gateway MSC* (GMSC). O tráfego PS proveniente do RNC através da interface *Iu-PS* é encaminhado para a internet, passando através dos elementos SGSN e GGSN. Na Figura 2.9 encontram-se ilustrados os elementos principais da arquitetura UMTS.

2.4.2 Canais Lógicos

Os canais lógicos definem os serviços disponibilizados pela camada *Medium Access Control* (MAC) à camada *Radio Link Control* (RLC). Cada tipo de canal lógico é definido pelo tipo de informação que transporta, desta forma é possível dividir os canais lógicos em dois grupos: canais de controlo, para o transporte de sinalização (informação de plano de controlo), e canais de tráfego, para o transporte de dados dos utilizadores (informação de plano do utilizador).

Os canais de controlo são os seguintes:

- *Broadcast Control Channel* (BCCH) – Canal unidirecional (*Downlink*, DL), permite efetuar a difusão da informação de célula;
- *Paging Control Channel* (PCCH) – Canal unidirecional (DL), utilizado para notificar o UE de uma chamada ou para comunicar a alteração da informação de célula;
- *Dedicated Control Channel* (DCCH) – Canal bidirecional (*UpLink*, UL, e DL), transporta informação de controlo em modo dedicado entre a rede e um determinado UE. Este canal é estabelecido através de uma ligação *Radio Resource Control* (RRC);
- *Common Control Channel* (CCCH) – Canal bidirecional (UL/DL), utilizado para comunicar informação de controlo quando não existe uma ligação RRC entre o UE e a rede.

Relativamente aos canais de tráfego temos:

- *Dedicated Traffic Channel* (DTCH) – Canal bidirecional (UL/DL), utilizado para transportar dados do utilizador, quando o UE se encontra em modo dedicado;
- *Common Traffic Channel* (CTCH) – Canal unidirecional (DL), utilizado para o envio da mesma informação para um grupo de UEs.

2.4.3 Canais de Transporte

Um canal de transporte é definido pela forma como e com que características os dados são transferidos através da interface rádio (multiplexagem, codificação e *interleaving*). Estes definem os serviços disponibilizados pela camada física para as camadas superiores. De uma forma geral, os canais de transporte dividem-se em canais dedicados e canais comuns [8] [9].

Quanto aos canais de transporte dedicados, apenas existe um:

- *Dedicated Channel* (DCH) – Canal bidirecional (UL/DL), transmitido em toda a célula ou apenas na parte desta que utiliza antenas *beam-forming*. Caracterizado pela possibilidade de permitir a alteração rápida de débitos binários (em cada 10 ms) e proporcionar um rápido controlo de potência, utiliza um *Spreading Factor* (SF) fixo em DL, pode ser utilizado no processo de *soft handover* e poderá ser mapeado para múltiplos canais físicos de forma a conseguir débitos elevados.

Os canais de transporte comuns são os seguintes:

- *Broadcast Channel* (BCH) – Canal unidirecional (DL), utilizado na difusão de informações da célula e do sistema. Este é sempre transmitido em toda a célula a um ritmo binário baixo e fixo;
- *Forward Access Channel* (FACH) – Canal unidirecional (DL), utilizado para transportar informação de controlo para o UE quando a localização é conhecida, é transmitido em toda a célula ou apenas na parte desta que utiliza antenas *beam-forming*, utiliza um controlo de potência lento e pode transportar pacotes curtos de dados dos utilizadores;
- *Paging Channel* (PCH) – Canal unidirecional (DL), transporta informação de controlo para o UE quando a respetiva localização é desconhecida, é sempre transmitido para toda a célula;
- *Random Access Channel* (RACH) – Canal unidirecional (UL), utilizado para transportar informação de controlo do UE que permite que este se sincronize com a rede. O RACH também pode transportar pequenos pacotes de dados;
- *Common Packet Channel* (CPCH) – Canal unidirecional (DL), utilizado para transmitir pacotes de dados do utilizador e de controlo. O CPCH está associado a um DCH que lhe permite efetuar o controlo de potência do CPCH em UL.
- *Downlink Shared Channel* (DSCH) – Canal unidirecional (DL), partilhado por

vários utilizadores para transportar dados de controlo ou de tráfego do utilizador fora de banda. O DSCH está sempre associado a um DCH.

2.4.4 Canais Físicos

A camada física mapeia canais físicos em canais de transporte. Basicamente, os canais físicos, consistem numa estrutura de três camadas composta por super-tramas, tramas rádio e intervalos de tempo (*time slots*). Dependendo do débito de símbolo de cada canal físico, a configuração das tramas rádio e dos *time slots* pode alterar-se.

Uma super-trama tem a duração de 720 ms e é constituída por 72 tramas rádio. Os limites da super-trama são definidos pelo *System Frame Number* (SFN) (cabeçalho \rightarrow SNF mod 72 = 0, cauda \rightarrow SNF mod 72 = 71). Uma trama rádio é uma unidade de processamento constituída por 15 *time slots*, e um *time slot* é um campo constituído por um conjunto de *bits*, o número de *bits* por *time slot* depende do canal físico [8].

Os canais físicos transportam informações diferentes em UL e em DL, desta forma é possível separar os canais físicos em UL e DL, e dentro destes grupos dividi-los em canais de físicos dedicados e canais físicos comuns. Começando pelos canais em UL temos:

Canais físicos dedicados:

- *Dedicated Physical Data Channel (uplink DPDCH)* – utilizado para transportar dados provenientes da camada 2 ou superior, por exemplo, para o transporte provenientes do canal DCH. Poderá existir zero, um ou mais DPDCH em cada ligação;
- *Dedicated Physical Control Channel (uplink DPCCH)* – utilizado para transportar informação de controlo proveniente da camada 1, como: os *pilot bits* para fazer a estimação do canal, comandos *Transmit Power Control* (TPC), *Feedback Information* (FBI) e *Transport Format Combination Indicator* (TFCI). Para cada ligação física apenas existirá um DPCCH.

O DPDCH e o DPCCH são multiplexados em fase e em quadratura, sendo enviados em simultâneo. A Figura 2.10 mostra a estrutura da trama para os canais físicos dedicados em UL. Cada trama de 10 ms é dividida em 15 *slots*, cada um com a dimensão de $T_{\text{slot}} = 2560$ *chips*, que corresponde a um período de controlo de potência. A super-trama é constituída por 72 tramas consecutivas, obtendo uma dimensão correspondente a 720 ms.

Canais físicos comuns:

- *Physical Random Access Channel (PRACH)* – utilizado para transportar a informação de controlo que o UE envia no canal RACH quando acede à rede pela primeira vez. O PRACH pode também transportar pequenas quantidades de dados do utilizador;
- *Physical Common Packet Channel (PCPCH)* – utilizado para transportar o CPCH. O PCPCH é muito semelhante ao RACH com a exceção de ter uma duração mais longa (até 640 ms), ter controlo de potência e indicação de colisão.

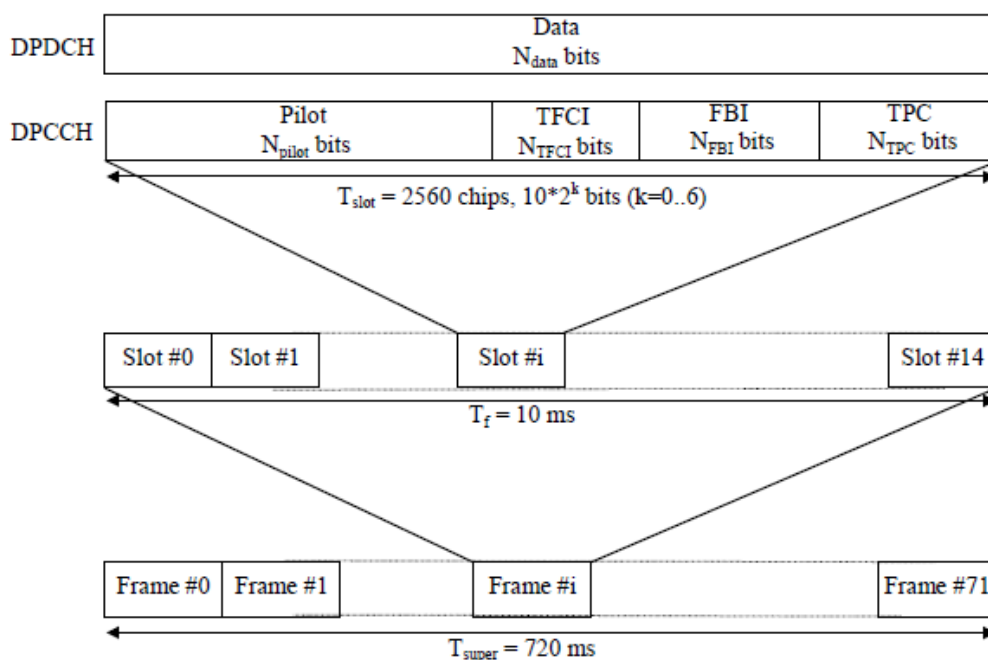


Figura 2.10 - Estrutura da trama para DPDCH/DPCCH em UL [8].

Relativamente aos canais físicos dedicados em DL, apenas existe um:

- *Downlink Dedicated Physical Channel (downlink DPCH)* – utilizado para transportar o DCH, este é multiplexado no tempo em conjunto com a informação proveniente da camada 1 (*pilot bits*, comandos TPC e um TFCI opcional - é a rede que decide se o TFCI deve ser ou não transmitido). Quando o débito binário da transmissão ultrapassa o débito binário do canal físico em DL, é aplicada uma transmissão em multi-código (são transmitidos em DL, para o mesmo UE, vários canais DPCH em paralelo a utilizar o mesmo SF).

Quanto aos canais físicos comuns em DL, existem os seguintes:

- *Common Pilot Channel (CPICH)* – transporta uma sequência de *bits/símbolo*

pré-definida, utiliza um ritmo de transmissão fixo (30 kbps, SF = 256) e permite ao UE detetar correntemente o canal. O CPICH é um importante canal físico de DL transmitido continuamente pelo HNB. Os UEs utilizam este canal para conseguirem detetar células vizinhas à sua volta [3].

- *Primary Common Control Physical Channel (P-CCPCH)* – utilizado para transportar o BCH, utiliza um ritmo de transmissão fixo (30 kbps, SF = 256) e é sempre transmitido em toda a célula. Ao contrário da trama DPCH em DL, na trama P-CCPCH não são transmitidos comandos TCP, TFCI nem *pilot bits*. O P-CCPCH não é transmitido nos primeiros 256 *bits*.
- *Secondary Common Control Physical Channel (S-CCPCH)* – utilizado para transportar o FACH e PCH e tem um ritmo de transmissão variável. Ao contrário do P-CCPCH, o S-CCPCH apenas é transmitido quando existem dados disponíveis e pode ser apenas transmitido numa determinada zona da célula. Existem dois tipos de S-CCPCH: os que transmitem o TFCI e os que não o transmitem. É a rede UTRAN que decide se o TFCI deve ser ou não transmitido.
- *Synchronisation Channel (SCH)* – consiste num conjunto de dois subcanais, o *Primary* e *Secondary SCH*. Os 10 ms da trama rádio do *Primary* e *Secondary SCH* é dividida em 15 *slots*, cada um com uma dimensão de 2560 *chips*.
 - *Primary SCH*: utiliza o mesmo código (de 256 *chips*) em todas células, é transmitido uma vez em cada *slot*. O PSC é o mesmo para todas as células.
 - *Secondary SCH*: consiste em transmitir repetidamente uma sequência de 15 códigos modulados com 256 *chips* cada um (*Secondary Synchronization Codes*, SSC), transmitidos em paralelo com o *Primary SCH*. Cada SSC é escolhido de um conjunto de 16 diferentes códigos constituinte de grupo de 256. Esta sequência no *Secondary SCH* indica a qual dos grupos de códigos pertence o DL *Scrambling Code* da célula.
- *Physical Downlink Shared Channel (PDSCH)* – utilizado para transportar o *Downlink Shared Channel (DSCH)*. Como o DSCH está sempre associado a um DCH, o PDSCH está sempre associado a um DL DPCH. O PDSCH e o DPCH não necessitam de utilizar o mesmo SF, e para o PDSCH o SF pode variar de trama para trama. A informação de controlo da camada 1 é transmitida na parte DPCCH do DPCH associado, o PDSCH não contém informação da camada física.

- *Acquisition Indication Channel (AICH)* – utilizado para transportar a indicação de recepção de acesso (*Acquisition Indicators, AI*), envia a mesma assinatura utilizada em todos os preâmbulos e normalmente é enviada com potência elevada.
- *Paging Indication Channel (PICH)* – utiliza um ritmo fixo ($SF = 256$) e transporta a informação de *Paging (Page Indicators, PI)*. O PICH está sempre associado a um S-CCPCH.

Na Figura 2.11 é apresentada a forma como é efetuado o mapeamento dos canais lógicos em canais de transporte, assim como dos canais de transporte em canais físicos, tanto para DL (a) como para UL (b).

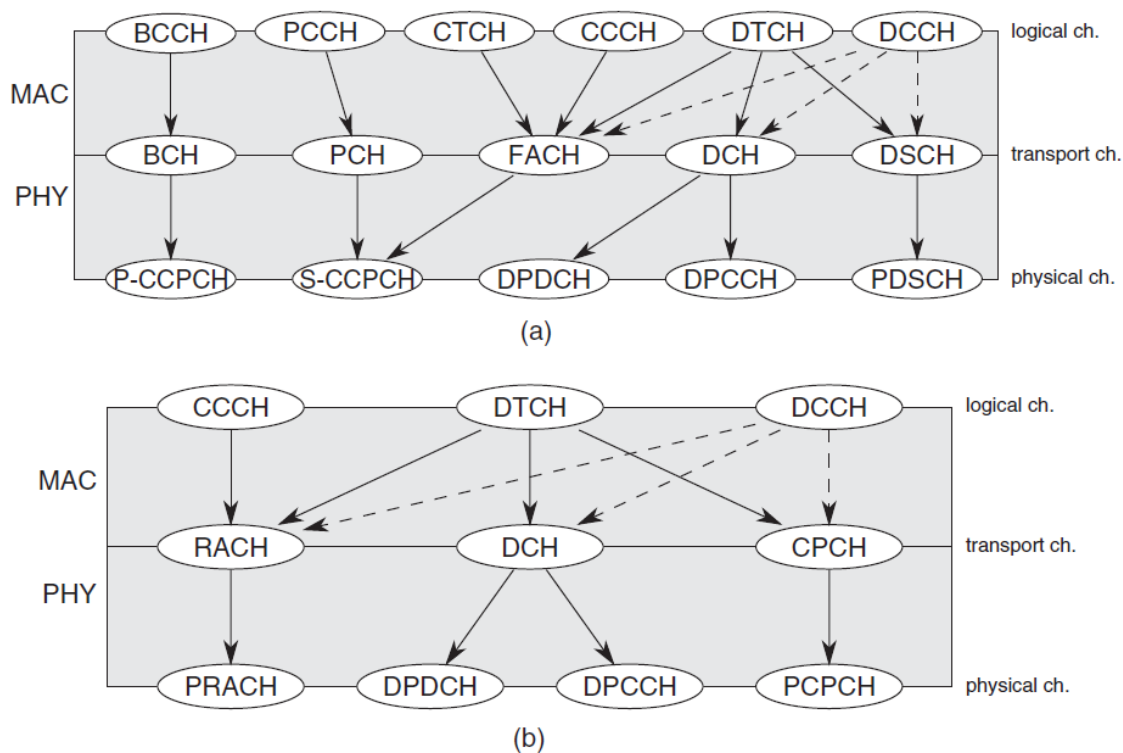


Figura 2.11 - Possibilidades de multiplexagem dos canais UTRAN. (a) DL, (b) UL [3].

2.5 Integração das femto-células na UTRAN

Nesta secção serão discutidas as três diferentes possibilidades para integrar as femto-células na rede UMTS atual.

2.5.1 *Iub over IP*

A ideia desta abordagem é efetuar o menor número de alterações na rede UTRAN, e utilizar as interfaces CS e PS existentes sobre túneis de segurança através da internet para estabelecer a ligação entre o HNB e o RNC. Cada HNB está ligado ao RNC através da interface *Iub* [10]. A segurança dos dados que passam através da internet é garantida pelo *Internet Protocol Security* (IPsec). A utilização de interfaces existentes (*Iu-CS* e *Iu-PS*) permite que do lado do operador não seja necessário existirem elevados custos de *hardware*. Esta aproximação permite que os RNCs dos operadores possam suportar vários HNB ligados para além dos *NodeBs* da rede macro UMTS.

A principal limitação desta abordagem está relacionada com a capacidade dos RNC em lidar com o tráfego de várias centenas de HNB. Os RNCs inicialmente dimensionados para suportar um determinado número *NodeBs* de elevada capacidade, poderão não ter capacidade de escalabilidade suficiente para suportar mais tráfego resultante de um elevado número de HNBs. Após alguns testes levados a cabo pelo *3rd Generation Partnership Project* (3GPP), permitiram confirmar o referido problema de escalabilidade desta solução, devido a isso esta abordagem deixou de ser considerada pelo 3GPP [3].

O acesso das femto-células à rede do operador utilizando a interface *Iub* através de uma ligação IP, encontra-se ilustrada na Figura 2.12.

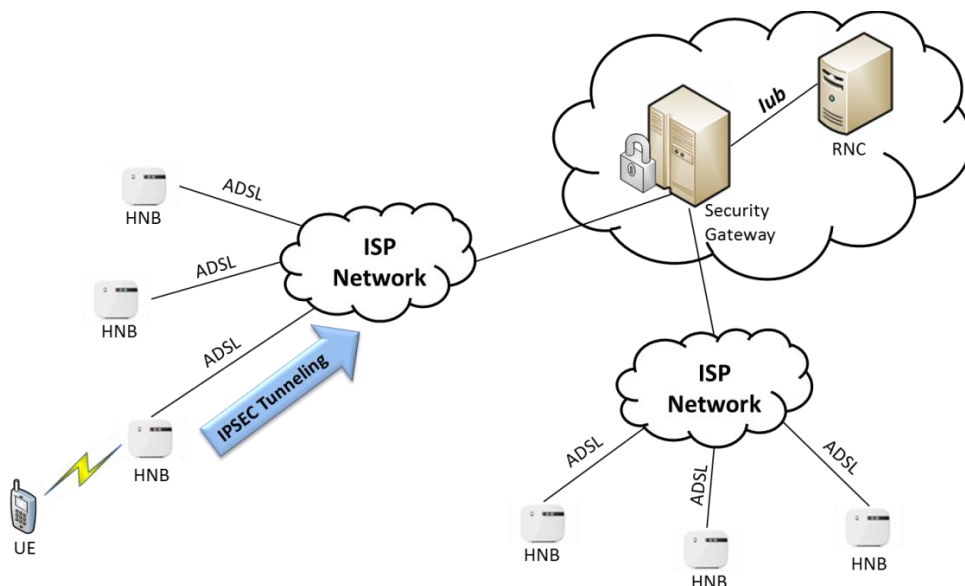


Figura 2.12 – Arquitetura *Iub over IP* [3].

2.5.2 Generic Access Network (GAN)

A arquitetura GAN, definida na TS 43.218 [11] e TS 44.318 [12], representa mais uma alternativa para dar suporte à femto-células. Numa arquitetura GAN, a femto-célula após ser integrada na rede do operador, é vista pela CN UMTS como sendo um RNC ou um conjunto de RNCs. Como forma de integrar o tráfego das femto-células na CN UMTS é utilizado o elemento GAN Controller (GANC) (também conhecido como HNB Gateway, HNB GW), que se encontra colocado entre a CN da operador e a rede de acesso IP. Este elemento, do lado da rede IP, agrega o tráfego de um conjunto de HNB utilizando a nova interface *Iu-over-IP*. De seguida encaminha o tráfego para a rede *core* do operador móvel utilizando as interfaces *Iu-CS* e *Iu-PS*, como ilustra a Figura 2.13.

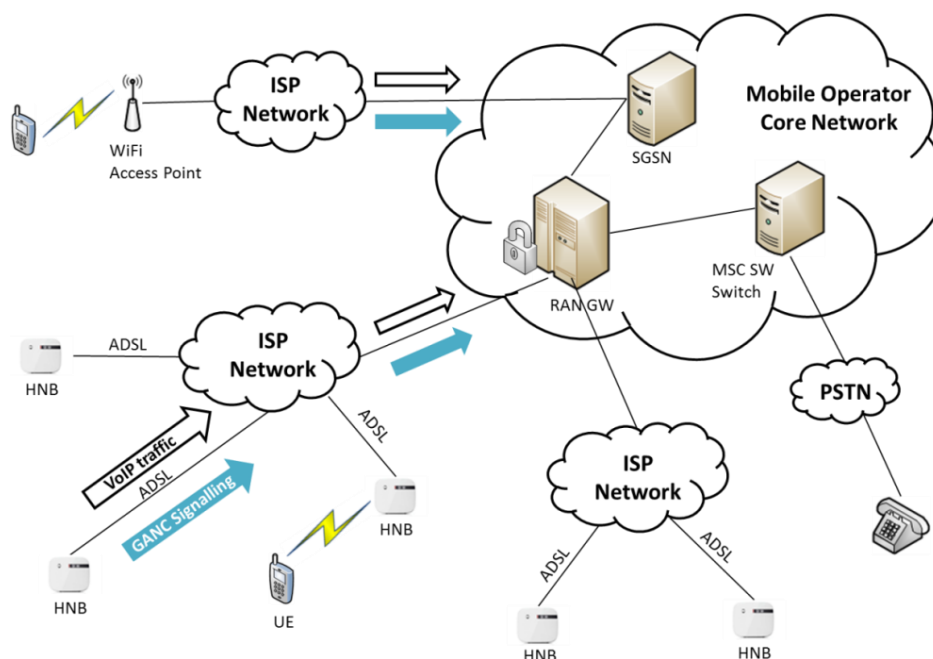


Figura 2.13 - Arquitetura HNB baseada numa GAN [3].

Nesta arquitetura, o RNC é removido, passando as funções deste a ser desempenhadas pelo HNB, permitindo evitar os problemas de escalabilidade associados à arquitetura *Iu-over-IP*. O facto das funcionalidades do RNC estarem integradas no HNB, torna-o num equipamento mais inteligente e autónomo passando a ser também designado por “Access Point” (AP) ou “Femto Access Point” (FAP). No entanto, as funções de RNC desempenhadas pelo HNB são mais simples que as desempenhadas por um RNC “standard”, por exemplo, o suporte para mobilidade é mais simples.

As femto-células conseguem assim concentrar num único equipamento, HNB,

funções de um *NodeB* 3G e de RNC, permitindo descentralizar a rede *core*, reduzir a latência e permitir uma solução com elevada escalabilidade. A utilização de uma rede IP como rede *core* (CN) reduz custos e permite que o HNB seja conectado diretamente à rede DSL do cliente. Esta é a arquitetura adotada pelo 3GPP, sendo definida como a arquitetura de referência para as femto-células UMTS (será estudada mais em pormenor na Secção 2.7.2).

2.5.3 IMS/SIP

Uma outra alternativa para a integração das femto-células na rede *core* do operador, é recorrer à utilização da interface *IP Multimedia Subsystem / Session Initiated Protocol* (IMS/SIP), definida na TS 23.832 [13] e TS 23.228 [14]. O protocolo SIP é utilizado para estabelecer a comunicação entre a HNB e a CN do operador. A interface IMS é utilizada para converter o tráfego do utilizador em tráfego *Voice over Internet Protocol* (VoIP). Nesta abordagem, em semelhança com a arquitetura GAN, as propriedades do RNC também estão incluídas no HNB.

Os operadores que recorrem à utilização de uma arquitetura femto-celular baseada em IMS/SIP, já deverão ter uma rede IMS comercial, caso contrário terão de fazer um investimento inicial na instalação de uma nova rede. A rede IMS funciona em paralelo com a rede *core* CS-PS existente, conferindo a esta solução uma elevada escalabilidade suportando um elevado número de HNBs. Quando um UE se regista na femto-célula, este recebe todos os serviços através da nova rede *core* IMS/SIP, permitindo reduzir o tráfego da rede *core* CS-PS.

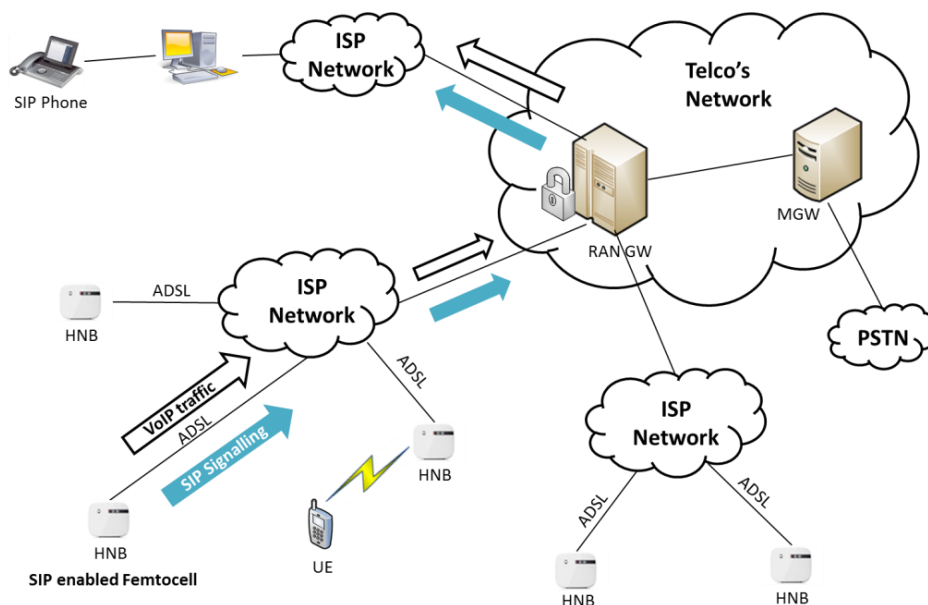


Figura 2.14 - Arquitetura HNB baseada em IMS/SIP [3].

Numa arquitetura baseada em IMS/SIP, o UE quando está conectado a uma femto-célula, os serviços móveis são-lhe disponibilizados através de uma rede *core* (IMS) diferente de quando está conectado à rede macro, desta forma a transição entre as estações base *indoor* e *outdoor* torna-se mais complexa devido às diferentes tecnologias envolvidas.

Esta abordagem requer um aumento das funcionalidades do HNB. As chamadas PS VoIP necessitam de ser convertidas em chamadas CS para os UE registados na femto-célula, e em vez dos *handovers* será utilizada uma nova solução designada por *Voice Call Continuity* (VCC), que permite efetuar a transferência de dados entre a CN UTRAN e CN IMS. Os MSCs também necessitam de estar preparados para suportar as capacidades IMS. Em relação ao MSC *Server* descrito na TS 24.008 [15], terão de ser adicionadas funcionalidades como o *Single Radio Voice Call Continuity* (SRVCC) [16] e o *IMS Centralized Service* (IMS CS) [17]. A Figura 2.14 mostra uma arquitetura genérica da solução IMS/SIP.

2.6 Normalização das Femto-células UMTS

De forma a tornar as femto-células numa solução robusta que possa ser desenvolvida por vários fabricantes permitindo a sua expansão no mercado das telecomunicações, é de extrema importância a existência de um conjunto de normas que definem as suas características e a forma como esta nova tecnologia se vai relacionar com as já existentes. Nesse sentido, do trabalho conjunto das organizações *Femto Forum*, *Broadband Forum*, *WiMAX Forum* e o 3GPP, resultou um conjunto de normas para a tecnologia das femto-células, oficialmente publicadas pelo 3GPP, algumas delas fazem parte da *Release 8* do 3GPP.

As normas desenvolvidas focam-se em quatro áreas da tecnologia das femto-células: arquitetura de rede, aspetos rádio e interferência, gestão/provisionamento e segurança. Ao nível da arquitetura da rede, as femto-células reutilizam os protocolos do 3GPP UMTS, sendo estes utilizados para dar suporte às necessidades emergentes provocadas pelo aumento do número de femto-células (detalhado na TS 25.469 [18]).

- **Normalizações 3GPP**

O 3GPP definiu as normas WCDMA para as femto-células na *Release 8* (Rel-8) e incluiu o suporte inicial para as femto-células LTE (conhecidas por *Home eNodeB*). Na conferência 3GPP RAN (Maio 2008) foi acordado que a arquitetura de referência das femto-células seria baseada numa arquitetura GAN, proposta que teve o apoio dos fabricantes

Kineto®, *NEC*®, *Motorola*® e *Alcatel-Lucent*®.

Na Rel-8, o 3GPP especifica as funcionalidades básicas (detalhadas na TS 22.011 [19]) necessárias para dar suporte ao HNB e *Home evolved NodeBs* (HeNB). Foi introduzida uma nova funcionalidade chamada *Closed Subscriber Group* (CSG), que permite ao HNB autorizar o acesso apenas aos UEs registados num CSG. As células do CSG são identificadas por valor numérico designado por *CSG Identity* (a descrição encontra-se na TS 25.367 [20]).

Na *Release 9* (Dezembro de 2009), foram consolidados todos os requisitos da Rel-8 e adicionados novos requisitos para o HNB e HeNB na TS 22.220 [21]. Esta *release* mostra como dar suporte *end-to-end* às femto-células LTE, incluindo todas as especificações relacionadas com a transmissão/receção rádio e com as funções de *Operation And Management* (OAM), o que permitiu o desenvolvimento dos primeiros equipamentos. É também apresentado o acesso híbrido às femto-células (*open mode* e *close mode*) que permite definir prioridades no acesso dos utilizadores à femto-célula através da criação de um CSG. Ainda na *Release 9*, foram revistas as especificações WCDMA em termos de largura de banda em *uplink*, permitindo aumentar o número de utilizadores em simultâneo [22].

A *Release 10* (Junho de 2011), introduz o suporte para a mobilidade entre os HeNBs, acrescenta também o 2º nível da arquitetura retificada no 3GPP RAN *Plenary* em Dezembro de 2010, surgindo assim uma nova interface, *Iurh*, entre os HNBs que permite suportar os *soft* e *hard handovers* entre femto-células [22].

- **Normalizações *Broadband Forum***

As normalizações iniciais das femto-células adotaram o protocolo de gestão do *Technical Report 69* (TR-69) do *Broadband Forum*. O protocolo de gestão foi alterado para suportar um novo modelo de dados para as femto-células, desenvolvido pelo *Broadband Forum* em cooperação com o *Femto Forum*, e especificado no *Technical Report 196* (TR-196), publicado pelo *Broadband Forum* em Abril de 2009. O TR-069 já utilizado em redes de banda larga, permite ao operador móvel simplificar a instalação do equipamento, obter estatísticas do seu funcionamento, fazer atualizações de *software* e fazer o provisionamento remotamente [3][22].

- **Normalizações *WiMAX Forum***

As primeiras publicações do *WiMAX Forum* para as femto-células *WiMAX*, surgiram em Junho de 2010. As especificações publicadas permitem às redes *WiMAX* suportar uma

elevado número de AP conectados utilizando o protocolo de segurança IPsec na comunicação entre a AP e *Security Gateway* (SeGW). Estas especificações introduzem as capacidades das redes SON na arquitetura femto-celular, permitindo uma configuração automática de um elevado número de femto-células. Nas futuras revisões está prevista a definição de normas para especificar a gestão automática de interferências entre as femto-células e macro-células. Foi também introduzido o suporte para três tipos de cenários de aplicação para as femto-células, em ambiente residencial, empresarial (*Enterprise*) e *outdoor*. São apresentados dois modos de acesso para as femto-células, o “*Open Access Mode*”, que permite o acesso de todos os UE, neste modo a femto-célula funciona como uma estação base normal, e o *Closed Subscriber Group* (CSG), que apenas permite o acesso aos utilizadores registados no CSG, todos os restantes serão rejeitados.

Resumindo, na Tabela 2.5 é apresentada a lista das especificações 3GPP publicadas na *Release 8* do 3GPP.

2.7 Femto-células UMTS

A femto-célula, consiste num *Access Point* de baixa potência, diretamente instalado pelo utilizador num ambiente residencial ou empresarial, para aumento da cobertura e capacidade da rede. Como se pode verificar na Figura 2.15, a femto-célula comunica com a rede do operador através de uma ligação de banda larga, ADSL ou fibra ótica, disponibilizada pelo ISP. Toda a troca de dados entre a femto-célula e rede *core* do operador é feita através da Internet, por isso, em vez de estarem conectadas ao RNC do operador (como uma pico célula), as femto-células estão diretamente ligadas à internet, pois não é necessário nenhum MSC. As femto-células têm potência de transmissão e capacidade limitadas produzindo células pequenas, devido à sua utilização *indoor*.

As femto-células permitem aumentar significativamente a cobertura no interior das casas, grandes ou pequenos edifícios ou em espaços públicos *outdoor*. Um bom nível de sinal permite melhorar a qualidade da voz nas chamadas, assim como proporcionar maiores débitos e baixos *atrasos* [5]. Por outro lado, as femto-células permitem retirar tráfego da rede macro-celular, libertando recursos para os utilizadores *outdoor*. Esta solução proporciona uma redução de custos considerável, pois para garantir boa cobertura no interior dos edifícios através de uma rede macro-celular seria necessário aumentar o número de estações base o que dificultaria o seu planeamento e otimização, como foi explicado na Secção 2.3.1.

Tabela 2.5 - Normas 3GPP para as femto-células [23].

Número	Título
22.220	Service requirements for Home Node B (HNB) and Home eNode B (HeNB)
23.830	Architecture aspects of Home Node B (HNB) / Home enhanced Node B (HeNB)
23.832	IMS aspects of architecture for Home Node B (HNB)
25.367	Mobility procedures for Home Node B (HNB); Overall description; Stage 2
25.467	UTRAN architecture for 3G Home Node B (HNB); Stage 2
25.469	UTRAN Iuh interface Home Node B (HNB) Application Part (HNBAP) signalling
25.820	3G Home Node B (HNB) study item Technical Report
25.967	FDD Home Node B (HNB) RF Requirements
32.581	Telecommunications management; Home Node B (HNB) Operations, Administration, Maintenance and Provisioning (OAM&P); Concepts and requirements for Type 1 interface HNB to HNB Management System (HMS)
32.582	Telecommunications management; Home Node B (HNB) Operations, Administration, Maintenance and Provisioning (OAM&P); Information model for Type 1 interface HNB to HNB Management System (HMS)
32.583	Telecommunications management; Home Node B (HNB) Operations, Administration, Maintenance and Provisioning (OAM&P); Procedure flows for Type 1 interface HNB to HNB Management System (HMS)
32.821	Telecommunication management; Study of Self-Organizing Networks (SON) related OAM Interfaces for Home Node B (HNB)
33.820	Security of Home Node B (HNB) / Home evolved Node B (HeNB)
25.468	UTRAN Iuh Interface RANAP User Adaption (RUA) signalling
25.469	UTRAN Iuh interface Home Node B (HNB) Application Part (HNBAP) signalling

2.7.1 Principais características das femto-células

- **Interface rádio compatível com a interface rádio UMTS**

As femto-células utilizam a interface rádio 3GPP UMTS, isto permite que os utilizadores utilizem os seus UEs 3G UMTS e permite aos operadores estenderem o serviço 3G da rede macro para as femto-células no interior dos edifícios.

- **Suporte para serviços CS e PS**

As femto-células disponibilizam serviços CS e PS incluindo dados de alta velocidade em HSPA para 4 ou 8 utilizadores. Os serviços CS incluem voz, dados e SMS.

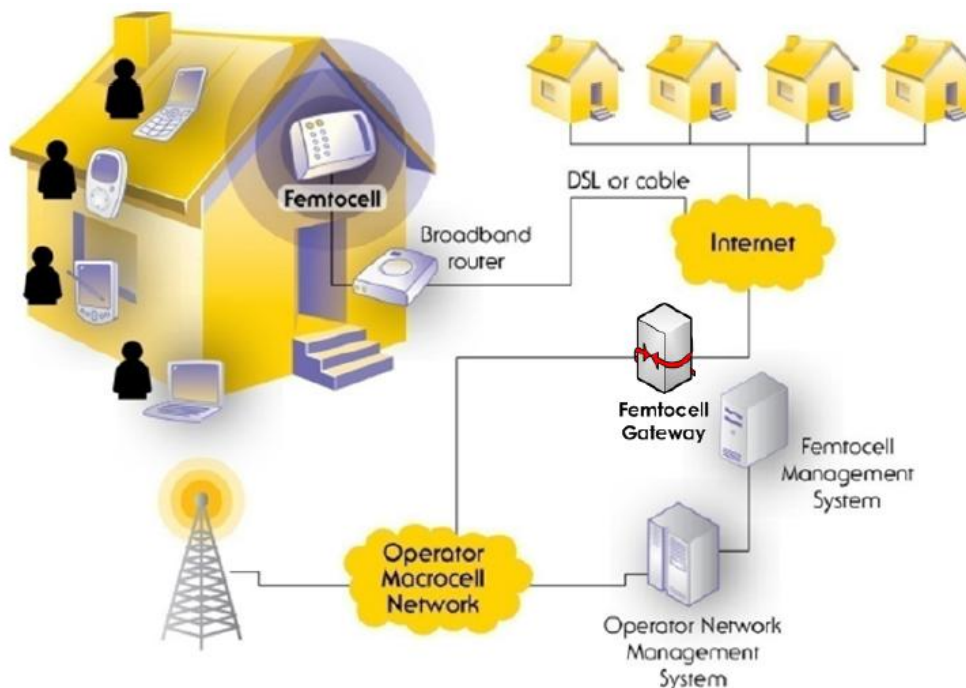


Figura 2.15 – Arquitetura genérica da solução femto-celular [24].

- **Arquitetura Flat IP**

As femto-células concentram num único equipamento, HNB, funções de um *NodeB* 3G e de um RNC, permitindo descentralizar a rede *core*, reduzir a latência e permitir uma solução com elevada escalabilidade. A utilização de uma rede IP como rede *core* reduz custos e permite que o HNB seja conectado diretamente à rede DSL do cliente.

- **Plug-and-Play e auto-configuração**

Depois da instalação do HNB, efetuada pelo utilizador final, é iniciado o processo de auto-configuração que não necessita de qualquer intervenção do utilizador final. Durante o processo de auto-configuração, o HNB estabelece uma ligação segura (túnel IPsec) com a rede do operador, autentica-se perante operador, faz o *download* da configuração e software (caso a autenticação for bem sucedida), regista-se na rede do operador e no final começa a radiar.

- **Auto-otimização**

O HNB tem a capacidade para monitorizar o ambiente rádio onde está instalado e, de acordo com a rede existente, escolhe o *Scrambling Code* e ajusta a potência de transmissão para evitar interferências. A monitorização do ambiente rádio é feita periodicamente (utilizando a função de pesquisa interna – Secção 2.9.2) permitindo fazer uma otimização dos

parâmetros rádio da femto-célula maximizando a área de cobertura e capacidade sem introduzir interferência nas células vizinhas.

- **Registo de utilizadores e controlo de acessos**

O número de utilizadores que se regista na femto-célula pode ser controlado por uma lista de acessos, *Access Control List* (ACL), caso a femto-célula esteja em *Closed Access Mode*, onde apenas os utilizadores cujo número de telefone consta na ACL, têm acesso aos recursos rádio da femto-célula. Em alternativa o acesso pode ser aberto a todos os utilizadores (*Open Access Mode*).

- **Suporte a chamadas de emergência**

As femto-células dão suporte a chamadas de emergência. As chamadas de emergência têm prioridade sobre os restantes serviços. Caso a femto-célula esteja em *Closed Access Mode*, esta permite que utilizadores fora da lista de acesso consigam estabelecer a chamada através da femto-célula.

- **Mobilidade**

Relativamente à mobilidade em modo *idle*, é suportada a re-seleção de e para células macro UMTS na mesma frequência ou numa frequência diferente. O mesmo se verifica em relação às células macro GSM. Para existir a possibilidade de selecionar as femto-células vindo da rede macro UMTS/GSM, é necessário definir em cada célula macro GSM e UMTS relações de vizinhança para as femto-células.

Em modo dedicado, as femto-células suportam a execução de *handover* de chamadas CS de voz para a rede macro UMTS e GSM. O processo de *handover* para a macro-célula ocorre quando o nível de sinal da femto-célula atinge valores abaixo do valor aceitável definido pelo operador. O *handover* entre femto-células também é suportado desde que as femto-células envolvidas se encontrem dentro do mesmo grupo (este assunto será abordado na Secção 3.4.1).

- **Segurança**

Os processos de verificação de identidade, autenticação e troca de chaves entre o UE e a rede são suportados pelas normas 3GPP UMTS, descritos na TS 33.234 [25] e TS 33.102 [26].

No *backhaul* IP a sinalização e o tráfego executado através das femto-células é

encriptado e transportado dentro de túneis IPsec até à rede do operador. O HNB tem uma *firewall* incorporada no seu sistema interno para proteção contra ataques provenientes da rede IP.

2.7.2 Arquitetura

A arquitetura femto-celular é baseada na arquitetura GAN (apresenta na Secção 2.7.2) que assenta sobre a rede UTRAN e constitui a arquitetura standard do 3GPP, que deve ser utilizada para dar suporte as femto-células.

Existem modos de funcionamento numa arquitetura GAN, o modo A/Gb e o modo *Iu* [11]. A arquitetura funcional das femto-células utiliza como base o modo GAN *Iu*, este modo permite a coexistência dos novos elementos da rede femto-celular com a já existente rede UTRAN, sendo utilizadas as interfaces 3GPP UMTS (*Iu-CS*, *Iu-PS*, *Iu-PC* e *Iu-BC*), que permitem às femto-células estabelecer comunicação com a rede *core* do operador.

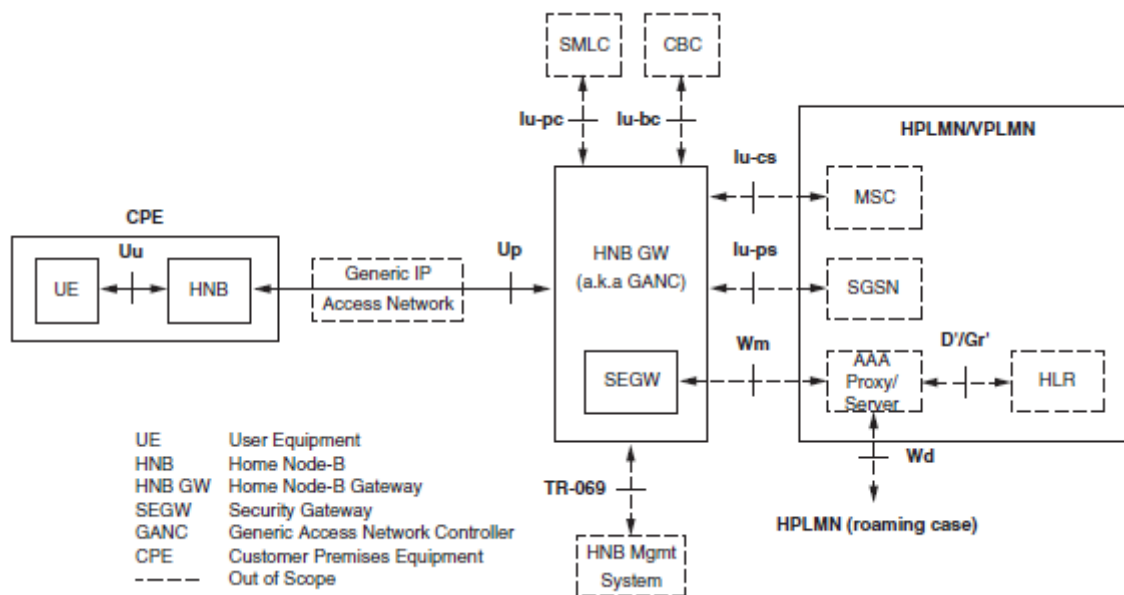


Figura 2.16 - Arquitetura de referência para femto-células UMTS [3][11].

Uma das grandes características desta arquitetura GAN *Iu* consiste na separação das funções do RNC, sendo o HNB responsável pela gestão dos recursos rádio e o HNB Gateway (HNB GW) responsável pelas ligações à rede *core* UMTS. Esta característica retira alguma complexidade à rede *core*, permitindo reduzir a latência relativamente a uma arquitetura tradicional. O *backhaul* das femto-células é feito através da rede DSL do utilizador, solução

mais económica e fácil de implementar do que a instalação de ligações E1 utilizadas noutras arquiteturas.

2.7.2.1 Elementos de rede

A arquitetura de GAN Iu, ilustrada na Figura 2.16, é constituída pelos seguintes elementos fundamentais: o *Home NodeB* (HNB), o *3G Home NodeB Gateway* (HNB GW), o *Security Gateway* (SeGW) e o *Home Management System* (HMS).

O HNB GW tem funções semelhantes às de um RNC, funcionando como um concentrador de ligações provenientes dos vários HNBs. A interface *Iu* estabelece a ligação entre a HNB GW e a CN do operador. Cada HNB tem apenas uma frequência e gera apenas uma célula [27]. A nova interface *Iu-h* estabelece a ligação entre o HNB e o HNB GW, esta disponibiliza um conjunto de protocolos que permitem que o HNB se registe na rede do operador e possa disponibilizar serviços 3G ao utilizador final. Os novos elementos são descritos de seguida.

2.7.2.2 Home NodeB (HNB)

O HNB combina numa só unidade funcionalidades UMTS de um *NodeB* e de um RNC (ver Figura 2.17). Desenhado para aumentar a cobertura 3G no interior dos edifícios em ambientes residências ou empresariais, o HNB está ligado à rede *core* do operador a partir da ligação de banda larga (DSL ou FTTH) do cliente. O HNB tem a capacidade de se auto-configurar e auto-otimizar, sendo apenas necessário conectar o cabo de rede e o cabo de alimentação para o colocar a funcionar. O HNB fornece uma cobertura 3G localizada e dedicada ao interior do edifício, permitindo melhorar a qualidade das chamadas e reduzir os *delays* disponibilizando uma melhor qualidade de serviço ao utilizador final. Cada HNB utiliza apenas uma frequência, e produz apenas uma célula com um raio compreendido entre 30 a 200 m, este valor vai depender das características rádio dos materiais constituintes do edifício, assim como das condições RF existentes no interior do mesmo. O HNB incorpora também um módulo que lhe permite efetuar uma pesquisa periódica do ambiente rádio do local onde foi instalado, de forma a assegurar que este tem conhecimento constante das suas células vizinhas, permitindo-lhe também ter a capacidade de se adaptar a possíveis alterações.

O HNB foi desenhado para suportar entre 4 a 8 utilizadores ativos em DCHs (*release* 99 do 3GPP), com serviços de dados em HSPA (*Release* 6 do 3GPP) na banda 2100 MHz do UMTS.

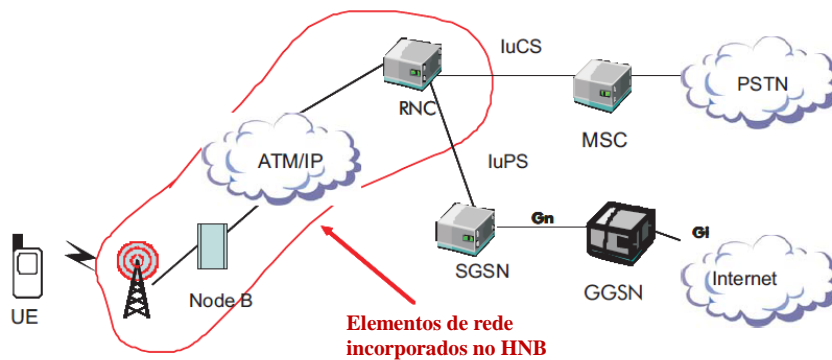


Figura 2.17 – Elementos de rede combinados num HNB.

O número de utilizadores da femto-célula está condicionado ao número de UE que estão registados na lista de acessos (*Access Control List* - ACL), pois apenas os *International Mobile Subscriber Identities* (IMSI) que constam na ACL têm autorização para se registar na femto-célula e realizar chamadas. A ACL pode ser atualizada pelo utilizador e pelo operador, esta também pode ser desativada para permitir o acesso a qualquer UE, passando o HNB a funcionar como um estação base normal.

O HNB interage com os UEs 3G utilizando a interface 3GPP *Uu*, não é necessário serem efetuadas quaisquer alterações, de *hardware* ou *software*, nos UE.

2.7.2.3 Home NodeB Gateway (HNB GW)

O HNB GW é o elemento de rede utilizado para estabelecer a ligação entre os HNBs e a rede UMTS do operador. Este concentra um elevado número de ligações provenientes de várias femto-células e possui funções relacionadas com segurança das ligações.

Numa arquitetura femto-celular o HNB e o HNB GW trabalham em conjunto para executar funções que não seriam possíveis de ser executadas sem a contribuição de cada um destes elementos, como por exemplo o *Paging*. A nova interface *Iu-h* é utilizada para estabelecer a comunicação entre o HNB e o HNB GW. O HNB GW está ligado à rede *core* do operador através da interface *Iu*, e é visto, por esta, como sendo um RNC.

Este elemento de rede pode ter também, opcionalmente, executar funções de *Authentication, Authorization and Accounting* (AAA) [28], permitindo aumentar o nível de segurança no acesso do HNB ao HNB GW. As funções AAA no HNB GW disponibilizam serviços de autenticação como o *Extensible Authentication Protocol - Subscriber Identity Module* (EAP-SIM) e *EAP - Authentication and Key Agreement* (AKA) [29] entre o HNB e o *Home Location Register* (HLR). Normalmente o servidor AAA encontra-se na CN do

operador junto com o HLR/ *Home Subscriber Service* (HSS), como é o caso da arquitetura GAN *Iu*.

O HNB GW pode também ter funções de *Media Gateway* (MGW). O HNB GW utiliza o protocolo H.248 MGW [21] para estabelecer os pedidos CS.

2.7.2.4 *Security Gateway (SeGW)*

O SeGW serve de *firewall* entre os elementos da rede *core* do operador e a rede pública de internet. Recorrendo ao *Internet Protocol Security* (IPsec), o SeGW permite estabelecer túneis IPsec de segurança ponto-a-ponto, permitindo que os dados trocados na interface *Up* (Figura 2.16) estejam protegidos contra possíveis ataques. O SeGW utiliza também o protocolo *GPRS Tunneling Protocol* (GTP) [30] para fornecer um acesso seguro dos dados através da interface *Iu-PS* (o GTP funciona dentro de uma ligação IPsec). O SeGW estabelece e gere todos os túneis IPsec que cada HNB necessita para assegurar a integridade dos dados trocados com a rede. É o SeGW que procede à alocação, gestão e distribuição dos endereços IP para cada um dos HNBs, e faz a gestão das *Internet Key Exchange* (IKE) *Security Associations* (SA) utilizadas para autenticar os HNBs.

2.7.2.5 *Authentication, Authorization and Accounting*

O servidor *Authentication, Authorization and Accounting* (AAA) é um elemento importante na arquitetura femto-celular, é este que permite ao HNB autenticar-se quando se liga à rede do operador. O servidor AAA disponibiliza serviços de autenticação EAP-SIM/EAP-AKA entre o HNB e o HLR. Está diretamente ligado ao SeGW através da interface *Wm* e comunica com HNB GW utilizando o protocolo RADIUS. Assim que cada HNB chega ao operador vindo do fabricante, os dados de cada HNB devem ser introduzidos no servidor AAA (por exemplo: o número de série, o tipo de HNB, etc.), para que este tenha informação suficiente que lhe permita ter a capacidade para autenticar um HNB que esteja a fazer um pedido de acesso à rede. Um único servidor AAA tem capacidade para suportar vários pedidos vindo do SeGW e do HNB GW.

2.7.2.6 *HNB Management System (HMS)*

O HMS utiliza uma interface baseada nas normas TR-069 [21] também utilizada pelos *modems* DSL. O HMS é o elemento de rede que oferece funções de *Operation Administration*

Maintenance and Provisioning (OAMP) [31]. Quando um HNB se conecta à rede, é o HMS que envia a informação de configuração e ajuda o HNB no processo de descoberta do HNB GW e SeGW. É através do HMS, que os técnicos de telecomunicações das operadoras podem efetuar alterações de parâmetros nos HNBs. O HMS permite fazer com que o HNB inicie uma atualização de *software*, e que proceda à verificação da sua localização.

2.8 Protocolos da Interface *Iu-h*

A interface *Iu-h* estabelece a comunicação entre o HNB e HNB GW. Sobre esta são utilizados vários protocolos de controlo e multimédia. Foram definidos os protocolos HNB *Application Protocol* (HNBAP) e *Radio Access Network Application Part User Application* (RUA), para que fosse possível englobar os HNBs na CN UMTS, devido às diferenças que estes apresentam face às estações base 3G (*NodeBs*). O protocolo *Radio Access Network Application Part* (RANAP) é responsável pela gestão de *Radio Access Bearer* (RAB) e pelo estabelecimento e terminação de chamadas. O protocolo RUA foi especificamente desenhado para transportar mensagens RANAP e informação de sinalização entre o HNB e o HNB GW, de uma forma transparente utilizando o protocolo *Stream Control Transport Protocol* (SCTP). O protocolo HNBAP [18] foi definido pelo 3GPP especificamente para ser aplicado aos HNBs, este permite que o HNB se consiga registar no HNB GW, define também o modo como o UE se vai registar no HNB. Ambos os protocolos RUA e HNBAP são executados sobre o protocolo SCTP, que é um protocolo de transporte semelhante ao *Transmission Control Protocol* (TCP) e que permite uma troca de mensagens fiável entre o HNB e o HNB GW [32].

No plano do utilizador, o protocolo *Real Time Stream Protocol* (RTP) é utilizado para o transporte de serviços de tempo real (entre o HNB e o HNB GW) como, chamadas de voz e vídeo, e o protocolo *GPRS User Data Tunneling Protocol* (GTP-U) é utilizado para transporte de dados. Nas camadas de transporte inferiores é utilizado o protocolo *User Datagram Protocol* (UDP) sobre IP. Ao nível IP, para aumentar a segurança, toda a troca de informação é efetuada dentro de um túnel IPsec encriptado. Na Figura 2.18 encontra-se ilustrado a pilha de protocolos da interface *Iuh*, definidos na TS 25.467 [27].

2.9 Instalação e configuração do HNB

Tendo em conta que os utilizadores não têm experiência técnica sobre redes móveis, é

essencial que as femto-células disponibilizem um mecanismo de auto-configuração, facilitando a instalação dos HNBs por parte dos clientes e que permita que cada unidade seja inserida num ambiente rádio causando o mínimo impacto na rede existente.

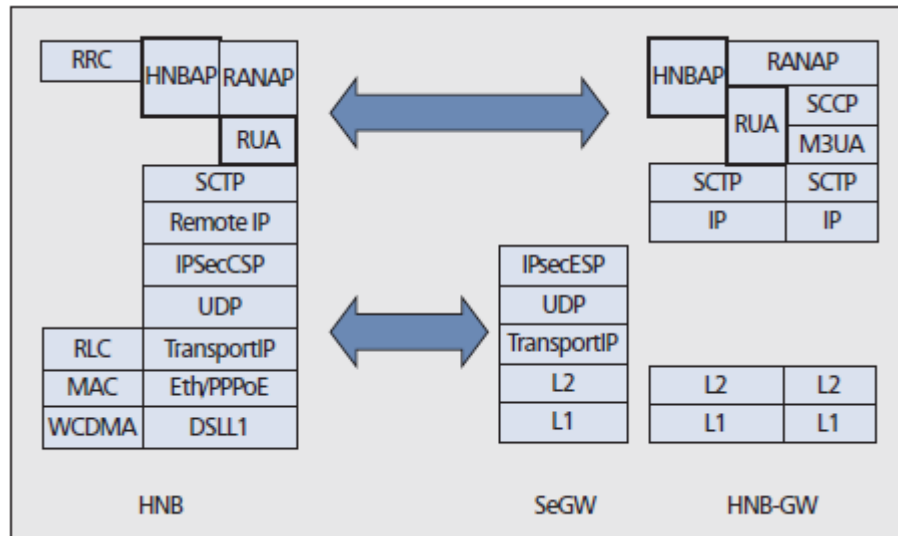


Figura 2.18 - Protocolos da interface Iuh [33].

A configuração automática é um fator chave para o sucesso da implementação femto-celular. Um sistema sofisticado de auto-configuração permite: que as femto-células se consigam conectar a redes existentes (DSL, fibra, etc.) com o mínimo de intervenção humana, escutar o ambiente rádio onde foram colocadas, criar a lista das células vizinhas (outras femto-células e estações base 2G ou 3G), e estabelecer uma parametrização de acordo com as características do ambiente rádio (escolha de frequência de funcionamento, *Scrambling Code* (SC), potência de transmissão em *downlink* (DL), etc.) de forma a reduzir a interferência. Desta forma, a auto-configuração vai permitir a fácil instalação do HNB pelo cliente, e por outro lado vai permitir aumentar a cobertura no interior dos edifícios sem recorrer à intervenção de técnicos especializados (com a exceção da femto-células empresariais e *outdoor*).

As funções de auto-configuração e auto-otimização presentes nas femto-células são herdadas das SON. Como nas SON, a configuração de cada HNB pode ser dividida em duas fases: uma primeira fase pré-operacional (onde são executadas as configurações básicas → auto-configuração) e uma segunda fase operacional (na qual o HNB já está a radiar → auto-otimização) [34]. A Figura 2.19 mostra os passos a executar sempre que o HNB é inicializado.

2.9.1 Auto-configuração e auto-otimização

O processo de auto-configuração é iniciado com o registo do HNB na rede do operador (o HNB vai efetuar o processo de registo sempre que for ligado). Depois de adquirir o HNB, o cliente apenas necessita de conectar o cabo de Internet (DSL) e o cabo de alimentação, a partir deste momento o HNB inicia o processo automático de configuração.

Em primeiro lugar, o HNB tem de se configurar na rede local, necessitando de obter um endereço IP via *Dynamic Host Configuration Protocol* (DHCP) assim como o endereço do servidor *Domain Name System* (DNS). Após a configuração do HNB na rede local, estão reunidas as condições para que o HNB inicie o processo de comunicação com a rede do operador.

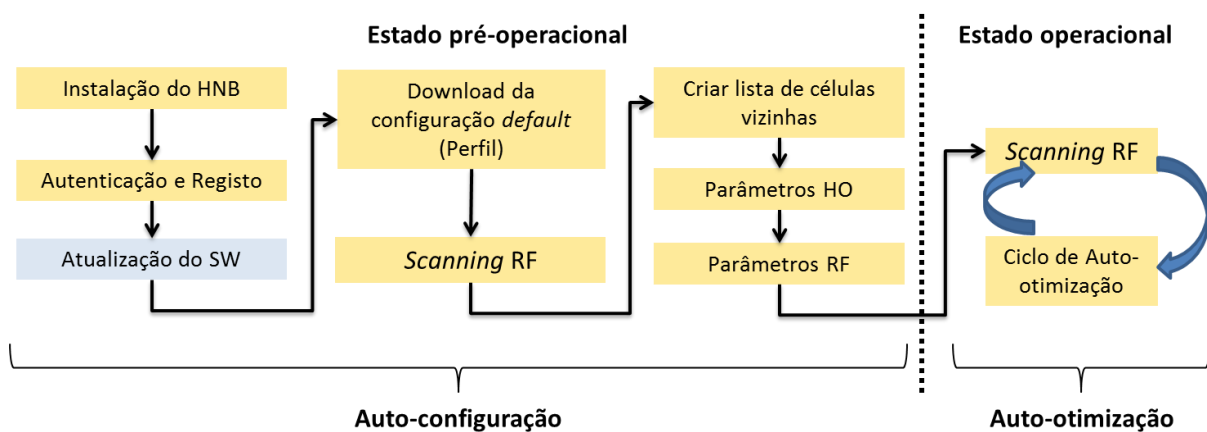


Figura 2.19 - Processo de auto-configuração e auto-otimização do HNB [3].

Para que o HNB possa disponibilizar serviços 3G aos clientes, este necessita de estabelecer uma ligação ao HNB GW. É o HMS que disponibiliza ao HNB o endereço do HNB GW. O HNB comunica com o SeGW, utilizando o endereço *default* configurado de fábrica, estabelece um túnel IPsec com o SeGW e pede o endereço do HMS, depois efetua uma ligação TR-069 com o HMS enviando o indentificador do HNB e informação de localização (podem ser coordenadas GPS). Neste ponto, o HMS autentica o HNB e verifica se a localização do mesmo é válida. Se estes parâmetros estiverem dentro da legalidade, o HMS permite que o HNB inicie a *download* da informação de gestão (necessária para poder disponibilizar serviços 3G) disponibilizando-lhe também o endereço do HNB GW [31][27].

Depois de efetuada a descoberta do HNB GW, o HNB vai iniciar o processo de registo na rede do operador, descrito de seguida.

1. A inicialização do HNB vai obter a configuração do HMS, o endereço do HNB GW e o endereço do SeGW, informações resultantes do processo de descoberta do

HNB GW.

2. O HNB estabelece um túnel de segurança até ao SeGW, utilizando o protocolo IPSec.
3. Depois do túnel estar estabelecido, o HNB cria uma sessão SCTP (*Stream Control Transmission Protocol*) para HNB GW.
4. Após estabelecido o canal SCTP, o HNB tenta registar-se no HNB GW utilizando a mensagem HNBAP *Registration Request*, que contém a informação necessária para o registo do HNB: o identificador do HNB (único para cada HNB da rede), *Location Area Code* (LAC), código de autenticação, o endereço de internet do HNB, a informação de localização, *Routing Area Code* (RAC), *Service Area Code* (SAC), *UE information list* e o endereço IP virtual do HNB. O HNB GW vai utilizar a informação da mensagem HNBAP *Registration Request* para realizar um controlo de acesso dos HNBs. Se o HNB GW aceitar a tentativa de registo do HNB (por exemplo, devido a este estar numa localização autorizada) este responde com uma mensagem HNB REGISTER ACCEPT, e a partir deste momento o processo de registo do HNB está concluído. Caso contrário, o HNB-GW deve rejeitar o pedido de registo (por exemplo, devido a congestão, se o HNB está na *blacklist* ou se encontra numa localização não autorizada). Nesta situação, o HNB GW deve responder com uma mensagem HNB REGISTER REJECT indicando que rejeitou a tentativa de registo do HNB. (O HNB apenas começa a radiar quando o registo for aceite pelo HNB GW).

O fluxo de mensagens trocadas durante o processo de registo do HNB é apresentado na Figura 2.20.

Concluído o processo de registo e autenticação, o HNB vai necessitar de efetuar o *download* da configuração *default* do HMS para configurar os parâmetros rádio. A informação fundamental como: a frequência de DL e UL, a lista de SCs ou a largura de banda do canal rádio devem ser disponibilizados durante o processo de inicialização do HNB pelo operador através da ligação DSL.

Os parâmetros como: LAC, RAC, SAC, lista de células vizinhas, potência de transmissão a utilizar, entre outros, podem ser calculados automaticamente a partir da informação recolhida da rede macro do operador e também através de dados presentes nos *Measurement Reports* (MR) enviados pelos UEs.

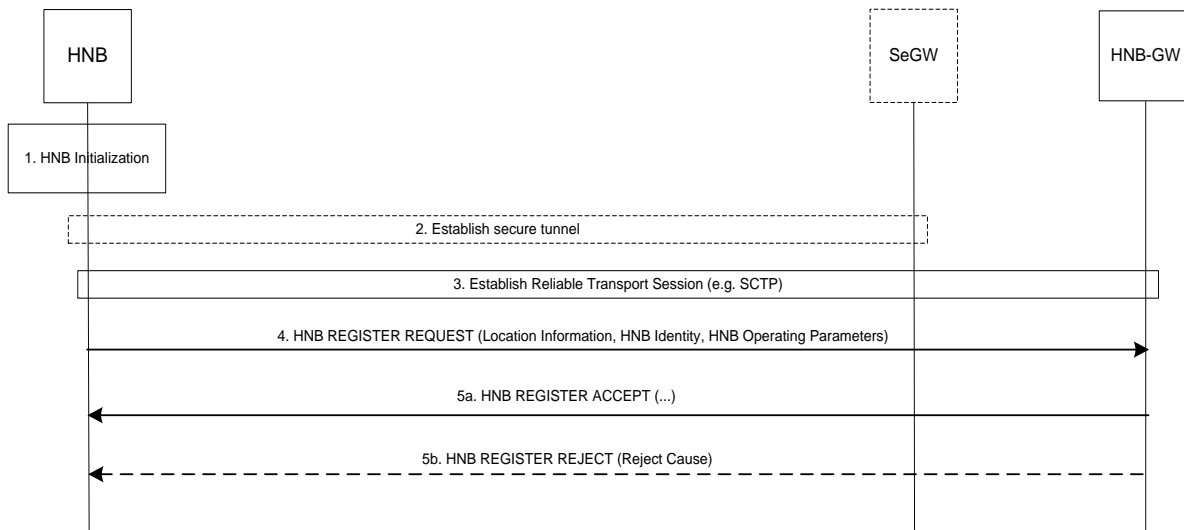


Figura 2.20 - Processo de registo do HNB através da interface *Iub* [27].

O HNB pode configurar os parâmetros rádio de forma automática, partindo de uma configuração vazia, obtendo toda a informação que necessita através dos dados resultantes da escuta do ambiente rádio onde o HNB está instalado. No entanto, com o objetivo de reduzir o período de configuração, é aconselhável que o HNB receba uma parametrização *default* do HMS, que lhe permita efetuar uma configuração inicial dos seus parâmetros de acordo com as características da rede do operador.

Depois do *download* da configuração *default* e para concluir o modo de auto-configuração, o HNB inicia uma pesquisa do ambiente rádio onde se encontra. Em geral, todos os HNBs têm a capacidade para efetuar escuta do canal rádio, pois possuem um *Network Listening Mode* que permite ao HNB descodificar canais de *broadcast* e de controlo da rede rádio existente. Desta forma o HNB consegue sincronizar-se com as células vizinhas e efetuar medidas. A informação obtida pode ser utilizada para atualizar os parâmetros rádio da configuração *default* (por exemplo: atualizar a lista de células vizinhas, melhorar parâmetros de *handover*, etc.).

Concluída a auto-configuração, o HNB inicia o ciclo de auto-otimização efetuando escuta do ambiente rádio periodicamente, uma vez que as femto-células necessitam de uma atualização constante dos seus parâmetros devido às alterações do ambiente rádio onde estão instaladas. Este processo consiste na otimização de um conjunto de parâmetros rádio de acordo com os objetivos propostos pelo operador. Os parâmetros mais importantes são:

- Frequência da portadora;
- *Scrambling Code* ótimo;
- LAC e/ou RAC adequadas;

- Potência máxima ótima de transmissão para DL e UL;
- Lista de células vizinhas;

O processo de auto-otimização, não deve ter impacto para os UE registados na femto-célula. Se algum UE estiver a efetuar uma chamada CS ou PS, o HNB deve esperar que o UE termine a sessão e liberte a ligação RRC, para depois dar início ao processo de auto-otimização [35].

O processo de auto-configuração é efetuado pelo HNB e também pode ser provocado pelo operador via HMS. A auto-otimização é efetuada pelo HNB (o período de auto-otimização é definido pelo operador) nos períodos de baixo tráfego. Ao executar a auto-otimização periodicamente, vai ajudar a reduzir a interferência que a femto-célula provoca na rede existente.

2.9.2 Pesquisa do canal rádio

As femto-células devem conhecer o ambiente rádio onde se encontram para poderem controlar a sua potência de transmissão e espectro de utilização, procurando evitar ao máximo a interferência com as células vizinhas. Existem várias formas de efetuar a pesquisa rádio permitindo à femto-célula detetar as células vizinhas e adaptar os seus parâmetros RF de forma a evitar interferências. As principais fontes de informação utilizadas pelo algoritmo de auto-otimização da femto-célula são:

- *Network Listening Mode*
- *Message Exchange*
- *Measurement Reports*

Utilizando o *Network Listening Mode*, o HNB efetua uma pesquisa periódica do ambiente rádio para verificar parametrização da rede, sincronização e condições de interferência. O HNB, neste caso tem um comportamento semelhante ao de um terminal móvel que está a efetuar uma escuta da rede, que antes de começar a transmitir, sincroniza-se com a estação base com melhor nível de sinal e descodifica os canais de *broadcast* e de controlo [3]. De um modo semelhante, o HNB vai-se sincronizar com a rede do operador e descodificar os canais de *broadcast* e controlo das células vizinhas. A informação recolhida através do *Network Listening Mode*, também pode ser utilizada para criar as listas das células vizinhas da femto-célula, distinguir se as células detetadas são macro UMTS/GSM ou outras femto-células, identificar o operador a que pertencem e estimar a atenuação de propagação para cada uma delas [3].

As duas técnicas anteriores, *Network Listening Mode* e *Message Exchange*, estão limitadas pela cobertura das femto-células. Por exemplo, no cenário em que dois HNBs estão fora do alcance um do outro, e por isso não conseguem detetar a presença do outro HNB nem conseguem efetuar troca de mensagens (através de interface de comunicação direta, *Iurh* – Secção 3.3.2) entre si. Desta forma, os HNBs não podem coordenar a utilização dos recursos rádio, provocando interferência intercelular para os utilizadores que se encontrem na área de cobertura de intersecção das duas femto-células. Este cenário está ilustrado na Figura 2.21 e é conhecido como *hidden femtocell problem* [3].

O problema da femto-célula escondida (*hidden femtocell problem*), pode ser resolvido com a utilização de *Measurement Reports* (MRs), que são criados pelos UEs e enviados para os HNBs. Desta forma, um utilizador situado na zona de sobreposição de duas células pode indicar à célula que o está a servir (*serving cell*), a presença (potência e frequência) da macro e/ou femto-célula que se está a sobrepor à *serving cell* (Figura 2.22).

Sempre que o UE está conectado à femto-célula, este envia periodicamente MRs ao HNB reportando a qualidade do sinal recebido (da femto-célula) assim como as medidas efetuadas ao nível de sinal das células vizinhas. Se o nível de sinal reportado estiver acima do nível mínimo parametrizado, o HNB não faz nenhuma alteração. Se o nível de sinal reportado for baixo, o HNB pode efetuar um *handover* da ligação para outra macro ou femto-célula [3].

Os MRs são importantes uma vez que disponibilizam a informação sobre o canal rádio em que o utilizador se encontra, informação que não é disponibilizada pelo *Network Listening Mode* e o *Message Exchange*.

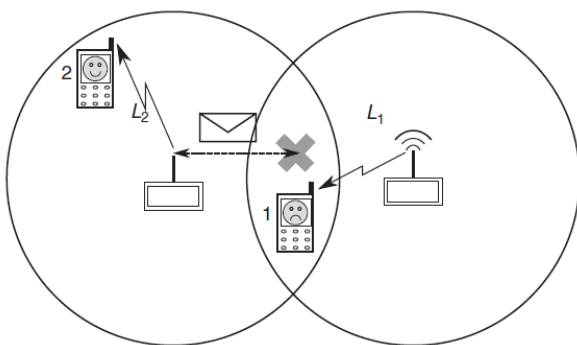


Figura 2.21 - *Hidden femtocell problem* [3].

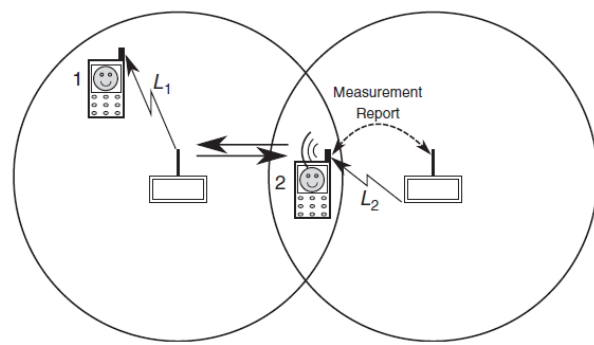


Figura 2.22 - *Measurement Reports* [3].

Capítulo 3

Planeamento e Otimização de Femto-células 3G

Neste capítulo, analisam-se as técnicas de planeamento e otimização em redes UMTS no interior de edifícios tendo em conta os mecanismos de auto-gestão anteriormente referidos. Este capítulo começa com uma revisão dos principais conceitos do planeamento *indoor*, sendo apresentados os principais fatores que têm de ser considerados num planeamento de femto-células *indoor*. De seguida, são analisadas as principais características que permitem o funcionamento de um grupo de HNBs co-localizado, é também estudado a forma como são executados os *handovers* entre femto-células pertencentes a um grupo, e entre as femto-células e a rede macro GSM. Finalmente, são apresentados os *Key Performance Indicators* (KPI) que serão utilizados para a análise de desempenho de uma rede de femto-células.

3.1 Planeamento femto-células *indoor*

O planeamento celular consiste num processo que permite efetuar o dimensionamento da rede. Este permite avaliar o número de estações que são necessárias, que equipamento será utilizado e como será configurado.

O planeamento celular no interior dos edifícios, tem um conjunto de procedimentos semelhante a um planeamento *outdoor*, no entanto existem aspetos que devem ser considerados, tais como:

- Isolamento

Um fator determinante num ambiente *indoor* é o nível de isolamento rádio existente entre o interior e o exterior do edifício. Com um bom isolamento, é mais fácil criar uma solução *indoor* dominante em termos de nível de sinal, fazendo com o UE se mantenha acampado na solução *indoor* sempre que se encontrar no interior do edifício. De igual forma, um bom isolamento, torna a solução *indoor* mais resistente a interferências provocadas pela penetração de sinal de estações base *outdoor*, e evita também a fuga de sinal para o exterior do edifício, reduzindo a interferência no ambiente macro-celular *outdoor* [7].

- Materiais de construção do edifício

Cada tipo de material tem uma atenuação diferente, e consoante a estrutura do edifício o sinal da rede macro *outdoor* irá sofrer uma maior ou menor atenuação fazendo variar também um o nível de interferência no interior do *edifício*. A existência de maior ou menor penetração do sinal *outdoor*, vai influenciar no número e localização dos equipamentos a utilizar na solução *indoor*.

- Qualidade do sinal rádio

O desempenho de uma ligação rádio em GSM, UMTS e HSPA, não depende apenas do nível de sinal absoluto, mas também da qualidade do mesmo, indicada pelo *Signal-to-Noise Ratio* (SNR). Quanto maior for a razão entre: o sinal desejado, o sinal proveniente da *-serving cell indoor* e o ruído, melhor será o desempenho da ligação rádio e melhor será o débito binário que pode ser disponibilizado nessa ligação [7]. Assim, o planeamento da solução *indoor* deverá criar o maior isolamento possível da rede macro *outdoor*, tentando ao máximo evitar a existência de zonas, no interior do edifício, cobertas pela rede macro *outdoor*. Caso isso aconteça, o resultado em 3G será um aumento das áreas de *soft handover* e de áreas com baixa performance em HSPA [7].

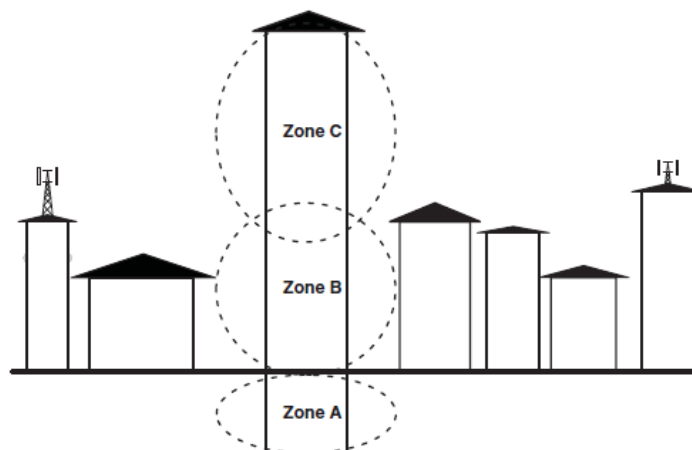


Figura 3.1 - Planejamento de zona [7].

- Conceito de planejamento de zona

O planejamento no interior de um edifício não se deve centralizar no nível de sinal *indoor*, nem utilizar apenas um nível de planejamento. O planejamento tem de ser adaptado às características do edifício. Tendo em conta a localização das estações base macro, a localização do edifício e as condições rádio existentes, pode ser necessário mais que um nível de planejamento para o mesmo edifício, como mostra a Figura 3.1.

Existindo diferentes níveis de interferência no interior do edifício, é necessário que o planeamento da solução *indoor* esteja de acordo com o ambiente rádio existente (por exemplo, na zona A (Figura 3.1) existirá um maior isolamento e conseqüentemente uma menor interferência da rede macro *outdoor*), desta forma, o edifício deve ser dividido em várias zonas onde cada uma terá um *design* de rede dedicado [7].

3.1.1 Opções de configuração

No processo de auto-configuração, descrito na Secção 2.9.1, o HNB necessita de um conjunto de parâmetros RF (*Radio Frequency*) essenciais para o seu funcionamento. Os parâmetros mais importantes são: frequência da portadora, *Scrambling Code*, LAC/RAC, potência de transmissão e lista de células vizinhas. Cada um dos parâmetros referidos pode ser configurado de maneiras diferentes, de acordo com a estratégia adotada e as características da rede do operador. Os parâmetros RF podem ser disponibilizados pelo HMS e transmitidos ao HNB via DSL, ou pode ser o próprio HNB a determinar os mesmos automaticamente, o que não é aconselhável pois irá aumentar o período de auto-configuração, como descrito na Secção 2.9.1. Assim, existe um conjunto de opções de configuração que têm de ser definidas relativamente a alguns dos parâmetros RF, descritas de seguida.

3.1.1.1 Seleção do *Scrambling Code*

A tecnologia UMTS utiliza um modo de acesso à rede do tipo *Code Division Multiple Access* (CDMA), o que implica que cada célula necessita de ter um código que a identifique, designado por *Scrambling Code* (SC). Desta forma, nas macro-células os SCs são escolhidos cautelosamente para evitar que estações na mesma região possam ter SCs iguais. No entanto, relativamente à femto-células, sabendo que cada uma delas necessita de um SC para transmitir em DL, é necessário um método mais autónomo, pois estas podem ser instaladas em qualquer ponto do país sendo por isso mais difícil controlar a colisão de SCs numa determinada área. No entanto, num ambiente empresarial, a localização dos HNBs é conhecida, desta forma será mais fácil determinar o conjunto de SCs que os HNB instalados numa determinada empresa podem utilizar.

Dependendo da estratégia adotada por cada operador, pode ser reservado um conjunto de SCs a atribuir aos HNBs. O número de SCs pertencentes a esse conjunto pode ser configurado. A lista de SC definida pelo operador é transmitida para o HNB durante o

processo de auto-configuração. O HNB, através do *Network Listening Mode* (descrito na Secção 2.9.2), tem a capacidade para detetar os SCs utilizados pelas células vizinhas, escolhendo um SC, do conjunto recebido, que não esteja a ser utilizado por nenhuma delas.

Por outro lado, pode ser o próprio HNB a determinar automaticamente o SC a utilizar. Caso o HNB utilize uma frequência partilhada com a rede macro UMTS, durante o processo de auto-configuração inicia uma pesquisa do ambiente rádio e constrói uma lista dos SCs das células vizinhas. Depois, o HNB escolhe o SC da célula que detetou baseando-se num determinado critério, como por exemplo: pode escolher o SC da célula vizinha com o CPICH (*Common Pilot Channel*) RSCP (*Received Signal Code Power*) e CPICH E_c/N_o (Relação entre a energia por *chip* (E_c) e a densidade espectral de ruído (N_o) [7]) mais baixo, de forma a evitar interferência com a rede macro [35]. Pode também ser atribuído um SC fixo a cada HNB, situação que apenas faz sentido aplicar numa solução onde se saiba a localização exata onde os HNBs serão instalados, ou então para efeitos de teste em laboratório onde se pretende ter um ambiente mais controlado.

3.1.1.2 Frequência da portadora

Os HNBs podem operar num canal dedicado ou partilhar espectro com a rede macro-celular. Se as macro-células estiverem a operar no mesmo canal que os HNBs, a existência de interferência entre as macro-células e as femto-células, pode conduzir a uma degradação do desempenho que se fará sentir tanto nos *Macro User Equipments* (MUEs) como nos *HNB User Equipments* (HUEs). Apesar de os HNBs terem uma potência de transmissão relativamente baixa, vão causar interferência nas proximidades de uma rede macro-celular podendo limitar o serviço desta. Esta situação não será um problema caso os utilizadores presentes nessa área consigam ter acesso aos serviços que pretendem via HNB [36]. Por outro lado, caso os HNBs estejam a operar num canal dedicado, vai permitir reduzir bastante a interferência entre as femto-células e a rede macro-celular, ficando os HNBs a operar num ambiente rádio mais “limpo”. No entanto, a utilização de um canal dedicado para os HNBs, pode não ser uma boa solução para todas as operadoras, pois exige que estas detenham espectro suficiente. Tipicamente cada operadora tem 2 a 3 portadoras disponíveis. Cada canal UMTS *Frequency Division Duplex* (FDD) UL e DL utiliza uma largura de banda de 5 MHz do espectro existente [36]. Operadores que optem por utilizar uma frequência dedicada para as femto-células, terão de efetuar uma boa gestão dos seus recursos rádio. Atualmente, com o aparecimento do UMTS 900, surge mais um problema para os operadores que tenham femto-

células a operar numa frequência dedicada. Como os UEs UMTS, especificados pela *Release 8 3GPP*, apenas têm a capacidade para detetar três frequências (a frequência que está a utilizar e mais duas), podem existir problemas de mobilidade entre camadas. A limitação do UE relativamente à escuta de frequências, por exemplo, pode fazer com o UE nunca consiga fazer *rollback* de UMTS para GSM.

3.1.1.3 Potência de transmissão DL

De forma a evitar a existência de interferências entre as femto-células e as macro-células, que pode provocar um aumento da queda de chamadas, é possível configurar a potência de transmissão dos HNBs. De acordo com o conceito de planeamento de zona descrito anteriormente, a área de cobertura e o nível de interferência existente nos diferentes ambientes onde os HNBs são instalados, é diferente e variada. Por estes motivos, o HNB deve ter a capacidade de ajustar a sua potência de transmissão, de forma autónoma e/ou baseada na informação presente nos *Measurement Reports* (MRs) sobre a interferência e a qualidade de sinal detetadas pelo UE [35]. Assim, a potência de transmissão dos HNBs pode ser configurada para um valor fixo pré-definido ou ser determinada de forma dinâmica pelo HNB.

A potência de transmissão está relacionada com a área de cobertura, e é determinada pela potência do CPICH. O HNB utilizado neste trabalho, testado no Capítulo 4, disponibiliza três possibilidades para definir o valor da potência do CPICH: pode ser um valor fixo pré-definido, ou pode ser determinado de forma dinâmica tendo em conta o nível sinal recebido pelo UE (RSCP) ou o nível de Ec/I_0 (Relação entre a energia por *chip* (Ec) e a densidade de interferência (I_0) medida no canal CPICH [7]) das células vizinhas. A configuração de cada uma das opções é feita no HMS, e consiste em alterar os seguintes parâmetros no perfil¹ associado ao HNB: *pilotPowerAdjustMode* (indica a forma como vai ser determinado a potência do CPICH) e *CPICHPower* (indica o valor de potência em dBm a aplicar ao CPICH).

Para configurar a potência CPICH com um valor fixo, basta configurar o parâmetro *pilotPowerAdjustMode* com o valor '*mimBased*' e depois colocar o valor em dBm da potência no parâmetro *CPICHPower*. Para o HNB determinar de forma dinâmica a potência do CPICH é necessário configurar o parâmetro *pilotPowerAdjustMode* com os valores '*rscpBased*' ou

¹ Conjunto de parâmetros que determinam o funcionamento do HNB. Consoante o ambiente de instalação do HNB os parâmetros do perfil associado podem variar, permitindo um melhor funcionamento de acordo com as características rádio da zona de instalação.

'*ecIoBased*'.

Quando o *pilotPowerAdjustMode* tem o valor '*rscpBased*' o HNB vai calcular dinamicamente a potência do CPICH tendo em conta a atenuação em espaço livre mais as perdas de penetração (*MaxPathLoss*) entre o HNB o UE, e o nível do CPICH RSCP mínimo que o UE deve medir (*TargetCpichRSCP*), utilizando equação 3.1.

$$CPICHPower [new] = TargetCpichRSCP + MaxPathLoss [dBm] \quad (3.1)$$

onde,

$$MaxPathLoss = FreeSpacePathLoss + indoorPenetrationLoss [dBm] \quad (3.2)$$

$$FreeSpacePathLoss = 20\log_{10}(Freq_DL [MHz]) + 20\log_{10}(maxCoverageDist [m]) [dB] \quad (3.3)$$

Os parâmetros *TargetCpichRSCP*, *indoorPenetrationLoss* e *maxCoverageDist* são configuráveis pelo operador. O parâmetro *indoorPenetrationLoss* [dBm], é utilizado para controlar a cobertura do canal piloto, de forma a manter a cobertura mínima da femto-célula. O parâmetro *maxCoverageDist* [m], é utilizado para ajustar a cobertura da femto-célula, mantendo a potência do CPICH abaixo do limite máximo que o HNB consegue disponibilizar. O parâmetro *FreeSpacePathLoss* [dB], indica a atenuação em espaço livre existente entre o centro da femto-célula e o limite da mesma, para uma determinada frequência e distância de cobertura.

Quando o *pilotPowerAdjustMode* tem o valor '*ecIoBased*' o HNB vai calcular dinamicamente a potência do CPICH tendo em conta a atenuação em espaço livre mais as perdas de penetração (*MaxPathLoss*) entre o HNB o UE, o nível do CPICH *Ec/Io* mínimo que o UE deve medir (*TargetCpichEcIo*) e nível médio de interferência medido pelo HNB (*Io*), utilizando a equação 3.4.

$$CPICHPower [new] = TargetCpichEcIo + MaxPathLoss + Io [dBm] \quad (3.4)$$

O valor do parâmetro *MaxPathLoss*, é obtido pela equação 3.2. O parâmetro *Io* [dBm], indica o valor médio do *Received Signal Strength Interference* (RSSI) das células UMTS, medido pelo HNB durante a fase de escuta do ambiente rádio no processo de auto-configuração e auto-otimização.

Mediante as possibilidades de configuração da potência do CPICH, o operador deverá identificar qual a melhor configuração a utilizar de acordo com o ambiente rádio onde os HNBs irão ser instalados. Mais à frente nesta tese serão testadas várias possibilidades de

ajuste da área de cobertura através da manipulação da potência do canal CPICH.

3.1.1.4 Configuração do LAC, RAC e SAC

Os valores do LAC, RAC e SAC dos HNBs podem ser configurados de três formas:

- **Manual:** o operador atribui manualmente um LAC a cada HNB.
- **Automática:** neste caso o HMS vai atribuir um LAC ao HNB a partir das suas coordenadas geográficas. Esta funcionalidade necessita que o operador tenha configurado no HMS as coordenadas geográficas de cada HNB.
- **Aleatória:** o HNB vai escolher um valor para o LAC a partir de um intervalo de valores fornecido pelo HMS no momento da auto-configuração.

Cabe ao operador escolher qual a forma que pretende utilizar para efetuar a configuração dos códigos de área (LAC, RAC e SAC).

Durante o processo de auto-configuração, o HNB efetua uma pesquisa do ambiente rádio e verifica se existe colisão entre os valores que foram configurados para o LAC, RAC e SAC. Caso exista colisão de valores com os das células vizinhas, o HNB envia um alarme para o HMS.

A cada HNB é associado um LAC, diferente do utilizado pelas macro-células e pelos HNBs vizinhos. Assim, o UE sempre que entra na femto-célula e se tenta registar, será forçado a fazer um *Location Area Update* (LAU) e eventualmente um *Routing Area Update* (RAU), pois o RAC é diferente do utilizado pela rede macro-celular. Quando as femto-células se encontram em *Closed Access Mode*, esta é a forma de efetuar a autenticação do UE, pois neste modo de funcionamento apenas o IMSIs que constam na lista de acesso (ACL) vão poder utilizar os recursos rádio da femto-célula.

Os valores do LAC, RAC e SAC podem ser também utilizados para diferenciar os tarifários associados aos utilizadores. Caso o operador atribua tarifários específicos para os utilizadores das femto-células, o LAC, RAC e SAC permitem identificar a localização do UE e também identificar os serviços que utiliza. Os valores dos LAC e SAC enviados para a rede *core*, permitem também fornecer informação de localização utilizada nas chamadas de emergência.

3.1.1.5 Modos de Acesso

O HNB tem a capacidade de efetuar um controlo de acesso à femto-célula ao nível do

IMSI, e o operador pode configurar os HNBs para funcionarem em três modos diferentes: aberto, fechado (também denominado por *Closed Subscriber Group*, CSG) e híbrido [21].

Quando o modo de acesso é aberto, os HNB funcionam como estações normais, permitindo que todos os UEs que entrem na área de cobertura da femto-células se consigam registar nela, sem qualquer controlo ao nível do IMSI.

No modo de acesso fechado, é criada uma ACL com os IMSIs dos utilizadores que podem ter acesso aos recursos rádio da femto-célula (a ACL pode ser criada pelo utilizador acedendo à sua conta via internet, bastando apenas introduzir os números de telefone que pretender. Tipicamente cada HNB suporta uma ACL com 32 IMSIs individualmente e 256 IMSIs quando configurado em grupo – Secção 3.3). Assim, quando um UE entra na área de cobertura da femto-célula e se tenta registar, o HNB verifica se o IMSI consta na ACL (transferida do HMS). Se o IMSI estiver na ACL o UE consegue-se registar na femto-célula e utilizar os recursos rádio, caso contrário a tentativa de registo efetuada pelo UE vai ser rejeitada durante o processo de LAU/RAU (No Capítulo 4 será demonstrado o funcionamento desta funcionalidade). Quando o UE é rejeitado ao tentar registar-se numa determinada femto-célula, configura a *Location Area* (LA) da femto-célula na sua lista de LAs proibidas e não vai tentar mais aceder a nenhuma femto-célula nesta LA.

Na Tabela 3.1 estão representadas as causas típicas para a rejeição do LAU/RAU [15] (a causa que aparece no corpo da rejeição do LAU/RAU é configurável pelo operador).

Tabela 3.1 - Valores 3GPP para as causa relacionada com gestão de mobilidade [15].

Valor da causa	Causa
11	<i>PLMN not allowed</i>
12	<i>Location Area not allowed</i>
13	<i>Roaming not allowed in this location area</i>
15	<i>No Suitable Cells In Location Area</i>

Relativamente às chamadas de emergência, caso a femto-célula seja o único ponto de acesso à rede móvel do operador, estas podem ser efetuadas através da femto-célula mesmo que o IMSI do utilizador não conste na ACL do HNB.

O modo de acesso híbrido, junta as funcionalidades dos modos aberto e fechado. Este permite o acesso a todos os UEs, mas ao contrário do modo aberto, existe também uma ACL e é efetuado controlo ao nível do IMSI. Os IMSIs presentes na ACL do HNB têm prioridade no acesso aos recursos da femto-célula. Este modo de funcionamento pode ser utilizado por exemplo em locais públicos onde o dono do HNB terá prioridade sobre os restantes UE

registados na femto-célula.

3.2 Etapas do planeamento femto-celular *indoor*

De um modo genérico, o planeamento de femto-células *indoor* é constituído pelas seguintes etapas, representadas na Figura 3.2.

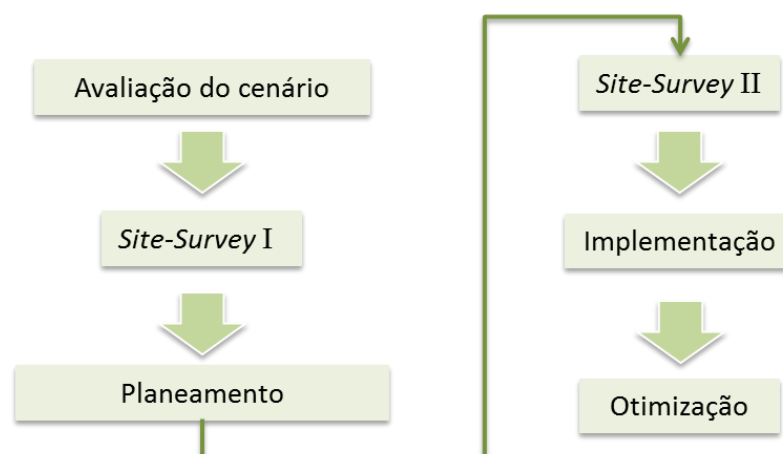


Figura 3.2 - Processo de planeamento celular *indoor*.

Desta forma, o processo de planeamento femto-celular *indoor* inicia-se com a avaliação do cenário. Nesta fase será efetuada a recolha de toda a informação do edifício e utilizadores. Relativamente aos utilizadores, é importante saber: a quantidade, que tipo de utilizadores são (CS, PS) e quais os seus requisitos. Em relação ao edifício, é necessário obter uma planta atualizada, saber quais as zonas onde o cliente necessita de cobertura celular, identificar os materiais constituintes do edifício e saber a distribuição dos utilizadores no interior do edifício. O próximo passo será fazer um *site-survey* inicial, o objetivo é perceber o ambiente rádio existente no interior e exterior do edifício. Nesta fase será efetuado um conjunto de medidas para determinar o nível de sinal e verificar quais as células que estão a servir no interior e exterior do edifício. Os dados são recolhidos com o auxílio de ferramentas especializadas, como o TEMS® *Investigation*². Esta informação permitirá definir a melhor estratégia de *handover* entre a solução *indoor* e a rede macro *outdoor*, no caso das femto-células 3G, permite obter a lista dos PSC que cada HNB poderá utilizar.

Segue-se a etapa de planeamento, na qual é efetuada uma previsão de cobertura e capacidade, usando ferramentas de planeamento (por exemplo, *iBwave*³). Estas ferramentas

² <http://www.ascom.com/en/tems-investigation-3.htm>

³ <http://www.ibwave.com/Products/iBwaveDesign.aspx>

permitem efetuar o cálculo do *Link-Budget* tendo em conta as características rádio dos materiais constituintes do edifício. Por isso, necessitam de ser calibradas de forma a garantir que os resultados provenientes das simulações estarão o mais próximo possível dos resultados obtidos depois da instalação dos equipamentos no interior do edifício. Nesta fase, será também determinada a estratégia de mobilidade entre a rede macro e a rede *indoor*, assim como a parametrização a aplicar aos HNBs. Tendo conhecimento das condições rádio *indoor*, resultantes das medidas efetuadas no *site-survey* inicial, será efetuada a escolha dos SCs que os HNBs irão utilizar, avaliando consoante o número de HNBs a instalar, se será necessário efetuar a reutilização de SCs na rede femto-celular.

Após a previsão de cobertura e capacidade, a próxima fase será realizar um segundo *site-survey*. Esta etapa permite identificar eventuais constrangimentos que possam existir e condicionar a localização dos equipamentos. No caso das femto-células, sabendo que estas trocam toda a informação com a CN do operador via DSL, será necessário avaliar os pontos de rede no edifício e configurar a rede da empresa para que o tráfego das femto-células possa passar através da *firewall* da rede IP local. Depois do segundo *site-survey*, são tomadas todas decisões finais quanto à localização, configuração e capacidade da rede *indoor*.

Após a implementação das femto-células será efetuada uma validação de cobertura e mobilidade entre os HNBs e entre estes e a rede macro *outdoor*, serão também introduzidos os números de telefone na ACL caso estejam a funcionar em modo fechado (*Closed Access Mode*). A partir deste momento a rede femto-celular está completamente funcional. Segue-se a etapa final, a otimização. Esta etapa consiste na avaliação do desempenho da rede aplicada, através da observação dos KPIs dos HNBs instalados, com o objetivo de identificar eventuais melhorias a aplicar. As possíveis melhorias poderão ser, um ajuste de potência, alteração da parametrização de controlo de acesso de chamadas, alteração da localização dos HNBs ou ainda ativar novas funcionalidades, que permitem ajustar a capacidade do HNB ao tipo e à densidade de tráfego existentes.

3.3 Femto-células em grupo co-localizado

A utilização de um grupo de HNBs ou um grupo de femto-células, provém essencialmente da necessidade de aumentar a área de cobertura. Esta necessidade verifica-se em pequenas e médias empresas (PMEs) ou em zonas públicas como centros comerciais, onde um único HNB é insuficiente em termos de capacidade e de área de cobertura disponibilizada.

Ao colocar um conjunto de HNBs co-localizados vai permitir aumentar a capacidade e a área de cobertura da solução *indoor*. No entanto, para que os vários HNBs possam funcionar em grupo, existe um conjunto de características que têm de ser garantidas de modo a evitar problemas como: interferência, colisão de LAC/RAC/SAC, colisão de SCs, não existência de mobilidade entre HNBs pertencentes ao grupo, etc. Assim, os HNBs pertencentes a um determinado grupo devem partilhar as seguintes características:

- O mesmo modo de acesso e a mesma lista de acessos (*Access Control List*, ACL);
- O mesmo endereço do *Security Gateway* (SeGW), ou seja, têm de estar todos ligados ao mesmo SeGW → Pertencer ao mesmo *cluster*;
- O mesmo LAC, RAC e SAC, podendo ser definidos valores específicos de LAC e SAC para cada HNB, que serão utilizados quando executadas chamadas de emergência;
- O mesmo nome de rede (nome que identifica um determinado grupo de HNBs no HMS);
- A mesma lista de SCs que as femto-células podem seleccionar (referida na Secção 3.1.1.1).

3.3.1 Configuração

O processo de auto-configuração da uma femto-célula pertencente a um grupo é semelhante ao de uma femto-célula individual (*standalone*). A única diferença está relacionada com o conjunto de parâmetros, referidos anteriormente, que têm de ser partilhados por todos os HNBs pertencentes a um determinado grupo. Assim, quando se pretende instalar um grupo de HNBs, tem de ser criado no HMS um perfil de grupo, neste vão constar todos os parâmetros que têm de ser partilhados pelos HNBs pertencentes ao grupo. O perfil de grupo tem um identificador numérico e tem também um nome associado que o permite identificar no HMS. Para associar um HNB a um determinado grupo, basta ao técnico de radiocomunicações do operador, configurar o identificador do grupo no HNB. Este processo consiste apenas em alterar o parâmetro que contém o identificador do grupo (normalmente com o valor zero) no HNB (*hnbGroupId*), colocando-o com o valor correspondente ao identificador numérico do grupo a que se pretende associar o HNB (por exemplo, pretendo associar o HNB3 ao grupo 1, basta colocar o parâmetro *hnbGroupId* = 1). Após a associação do HNB a um determinado grupo, o HMS força o HNB a efetuar o *download* do perfil do grupo a que foi associado. Depois de efetuado o *download* do perfil, o

HNB continua o processo de auto-configuração descrito na Secção 2.9.1 e representado na Figura 2.19, onde a próxima ação do processo será efetuar uma pesquisa do ambiente rádio (*Scanning RF*, Figura 2.19).

Quando os HNBs estão configurados em grupo, constroem mais uma lista de células vizinhas (durante o processo de auto-configuração utilizando o *Network Listening Mode*, descrito na Secção 2.9.2) onde constam todas as femto-células vizinhas que cada HNB consegue detetar. Posteriormente o HNB irá criar relações de vizinhança com todas as femto-células detetadas durante o processo de auto-configuração. Para tal, o HNB comunica com os HNBs vizinhos através da interface existente entre os HNB pertencentes ao grupo (interface *Iurh*). A partir do momento em que as relações de vizinhança estão criadas, é possível efetuar *handovers* entre esses HNBs. As relações de vizinhança também podem ser declaradas manualmente pelo operador. Caso a estrutura do edifício não permita que alguns HNBs não se consigam detetar, não sendo possível estabelecerem-se relações de vizinhança entre eles de forma automática. Neste caso, a definição de relações de vizinhança manual permite ultrapassar este problema.

Relativamente à mobilidade entre femto-células, é possível serem efetuados *handovers* entre as femto-células (desde que tenham as relações de vizinhança criadas) e entre estas e a rede macro-celular. A mobilidade entre femto-células será mais aprofundada na Secção 3.4.

3.3.2 Interface *Iurh*

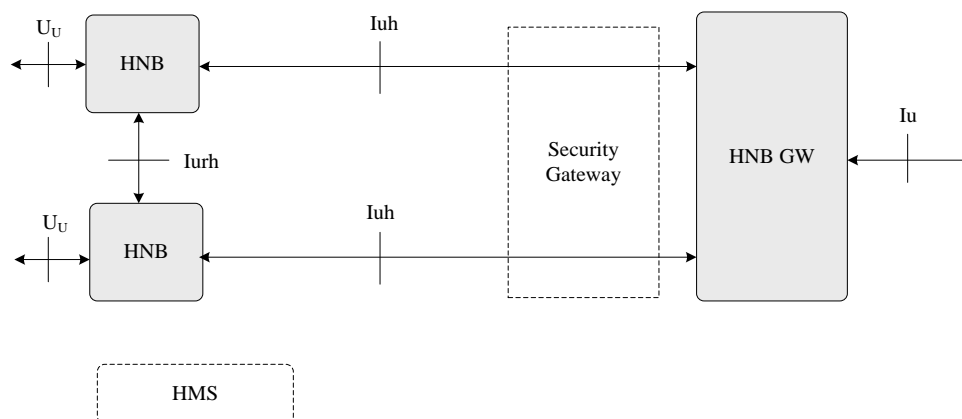


Figura 3.3 - Interface *Iurh* ente HNBs via *Security Gateway* [27].

Para além do *Network Listening Mode*, os HNBs também têm a capacidade para efetuar troca de mensagens com os HNBs vizinhos, apenas quando estão configurados em grupo. A troca de mensagem entre os HNBs é executada através da CN ou através de uma

interface de comunicação entre ambos, designada por *Iurh*. Segundo a TS 25.467 [27], existem outras formas de implementar a interface *Iurh*, no entanto a Figura 3.3 mostra a forma como esta interface está implementada na arquitetura femto-celular utilizada neste trabalho.

As mensagens trocadas entre HNBs através da interface *Iurh*, podem conter medidas de interferência (nível de sinal recebido da femto-célula vizinha) ou informação acerca do SC que estão a utilizar, assim como a potência de transmissão ou a frequência utilizada como portadora e ainda a informação sobre as células vizinhas do HNB vizinho (informação que permite aos HNBs evitar o problema de colisão de SC descrito na Secção 3.4.3). Desta forma, os HNBs conseguem avaliar o ambiente rádio em que estão instalados, o que lhes permite coordenar a utilização de recursos rádio minimizando a interferência.

A interface *Iurh*, é também utilizada na troca de sinalização durante o processo de *handover* entre HNBs, permitindo que este seja efetuado no interior da arquitetura femto-celular, tornando-o num processo completamente transparente para a rede *core* do operador [27].

O HNB GW utiliza a interface *Iurh* para disponibilizar aos vários HNBs de um determinado grupo, informação sobre o endereço dos outros HNBs sendo assim possível estabelecerem entre eles uma ligação *Iurh*. Os HNBs utilizam o endereço IP recebido do HNB GW, para contactar os HNBs vizinhos via *Iurh*. Na Figura 3.4 está ilustrada a troca de mensagens que permitem estabelecer a comunicação entre HNBs vizinhos via *Iurh*.

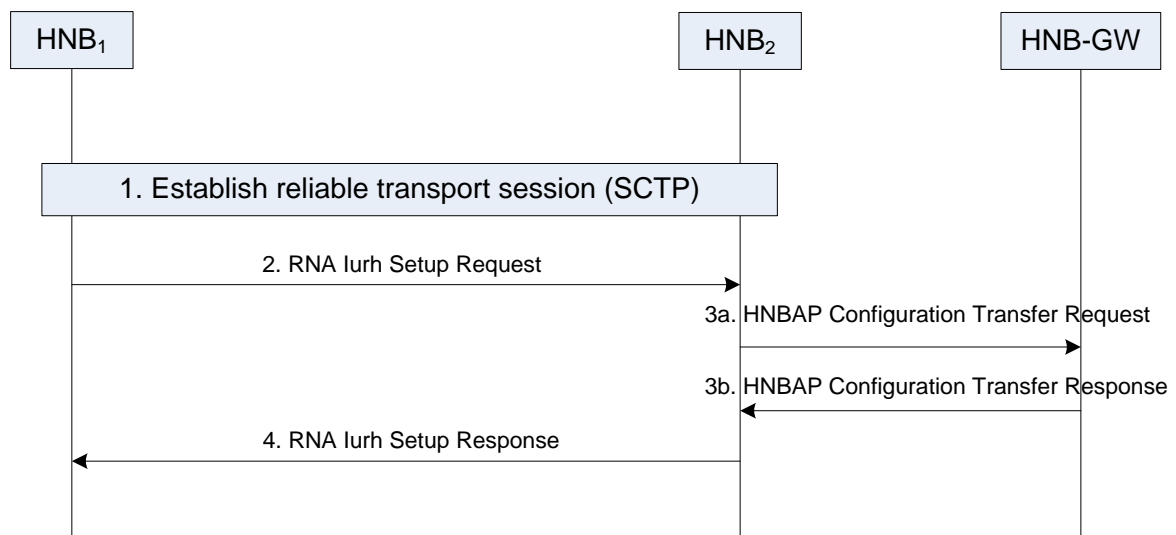


Figura 3.4 - Estabelecimento de uma ligação *Iurh* entre HNBs [27].

3.4 Gestão de Mobilidade

Para disponibilizar uma boa qualidade de serviço ao utilizador de uma rede móvel, este tem de ser capaz de se movimentar dentro dela, conseguindo manter e receber chamadas e também sessões de dados. Isto inclui a seleção e re-seleção de células e um mecanismo de *Paging*, enquanto o UE se movimenta em modo *idle*, e *handovers* entre as células quando o UE se desloca em modo dedicado.

Os processos de re-seleção e *handover* em UMTS são iniciados assim que uma nova célula surge com um nível de sinal que ultrapassa um determinado *threshold* pré-configurado. Este é também o princípio aplicado nas femto-células.

Em modo *idle*, o UE mede periodicamente o *Ec/Io* do *Primary Common Pilot Channel* (P-CPICH) e escuta o canal físico PICH procurando por mensagens de *Paging*. Os sinais piloto das células vizinhas também são medidos e caso exista uma célula com um melhor nível de *Ec/Io* o UE começa a escutar essa célula [36].

O processo de *handover* existente numa rede móvel é executado quando o UE transita em chamada da área da cobertura da célula de origem para a área de cobertura da célula destino. O processo de *handover* pode ser de dois tipos: *soft* ou *hard handover*. Na rede UTRAN é utilizado o *soft handover* entre *NodeBs* [36], o que significa que um UE ativo se encontra ligado a mais que uma célula em simultâneo (o conjunto de células às quais o UE se encontra ligado constitui o *Active Set*), existindo sempre pelo menos uma ligação rádio estabelecida e que será terminada apenas quando estiver estabelecida uma outra ligação com uma nova célula. Se o operador estiver a utilizar mais que uma portadora na sua rede, os *handovers* executados entre portadoras são *hard handovers*, ou seja, a ligação rádio estabelecida com a célula de origem é terminada antes de estar estabelecida a ligação rádio com a célula de destino [36]. Apesar de no *hard handover* não existirem múltiplas ligações rádio em simultâneo a várias células, este tipo de *handover* é geralmente rápido o suficiente para não ser detetado pelo utilizador.

Todos os *handovers* implementados nas femto-células são apenas do tipo *hard*, mesmo que sejam efetuados *intra-* ou *inter-frequency*. No *hard handover* apenas está estabelecida uma ligação rádio de cada vez. Os *hard handovers* permitem aumentar a escalabilidade do sistema e são mais fáceis de implementar sobre um *backhaul* IP [36], como é o caso das femto-células.

Apesar da tecnologia das femto-células permitir a existência de *handovers* nos sentidos: Femto→Macro 2G/3G e Macro 2G/3G→Femto, no âmbito deste trabalho, por

imposição das características da rede do operador onde foram executados os testes, para o estudo da mobilidade dos UEs serão apenas avaliados os *handovers* entre femto-células pertencentes ao mesmo grupo, e os *handovers* efetuados entre as femto-células do grupo e macro-células GSM, no sentido Femto→Macro 2G.

3.4.1 *Handover* entre femto-células

O processo de *handover* entre femto-células (*inter*-HNB) é baseado nas medidas que o UE efetua à femto-célula de serviço e às femto-células vizinhas. Este é despoletado (*handover trigger*) quando é identificada uma femto-célula, cujo sinal recebido apresenta melhores características que o sinal de serviço. O *handover inter*-HNBs é um *hard handover* e é executado entre femto-células com portadoras de igual frequência (*intra-frequency handover*).

O *handover inter*-HNB não tem impacto na rede *core* do operador, sendo executado localmente dentro do *cluster* de HNBs (constituído por todas as femto-células, SeGW e HNB GW). O HNB GW faz a transição de tráfego do plano de controlo (*control plane*) e do plano do utilizador (*user plane*) entre o HNB de origem e o HNB de destino, através da interface *Iurh*. O HNB de origem e de destino têm de estar conectados ao mesmo SeGW/HNB GW.

O processo de *handover* entre HNBs é despoletado pelo nível do P-CPICH *Ec/No* da femto-célula de serviço, assim que este atinge valores abaixo do nível definido o HNB configura um evento 1C [37]. Desta forma, o processo de *hard handover* *intra*-HNB, *intra*-HNB GW e *intra*-frequência, é constituído pelos seguintes passos:

1. O UE estabelece uma chamada CS no HNB de origem e configura um evento 1C (para medidas *intra*-frequência) para dar suporte ao *handover inter*-HNB.
2. O UE responde ao evento 1C enviando em UL um MR onde indica o P-CPICH do HNB alvo (*target* HNB), que tem o melhor nível de P-CPICH *Ec/No* que o HNB de origem. Após determinar o *target* HNB, o HNB de origem faz o *trigger* de *handover* para o *target* HNB⁴.
3. O HNB de origem inicia o processo de *hard handover* enviando uma mensagem de *Handover Request* para o *target* HNB.
4. O *target* HNB efetua um controlo de admissão de chamada, atribui recursos para receber a chamada CS e prepara a interface rádio para receber o *handover* (o *target* HNB inclui a mensagem *Radio Bearer Reconfiguration* na mensagem de

⁴ Devido às características da rede do operador onde foram executados os testes apresentados mais a frente neste trabalho, apenas é possível estabelecer *handover* de chamadas CS entre HNBs, desta forma nesta fase do processo de *handover*, se existir uma ligação PS entre o UE e o HNB de origem, esta será terminada.

Handover Request Acknowledge enviada para HNB de origem).

5. O HNB de origem reencaminha a mensagem *RRC Radio Bearer Reconfiguration*, recebida do *target* HNB, para o UE. Assim que o HNB de origem recebe a indicação que a mensagem RRC foi transmitida com sucesso, este pára de transmitir e inicia a transição da sinalização e do tráfego *user plane* para o *target* HNB.
6. O *target* HNB conclui a configuração da sinalização e informa o HNB GW para efetuar a transição do tráfego *user plane* do HNB de origem para o *target* HNB.
7. O UE e o *target* HNB sincronizam-se através da interface rádio, sendo posteriormente enviado pelo UE, uma mensagem *RRC Radio Bearer Reconfiguration Complete*. Neste momento o UE terminou o processo de *handover* e a ligação RRC está agora estabelecida com o *target* HNB.
8. O *target* HNB indica ao HNB GW que o UE transitou com sucesso para o *target* HNB, através da mensagem *Reallocation Complete*.
9. O HNB GW envia uma mensagem *UE De-Registration* para o HNB de origem libertar os recursos rádio associados ao UE.

A Figura 3.5⁵ mostra de forma genérica as mensagens *control plane* trocadas entre os vários intervenientes no processo de *hard handover* entre HNBs.

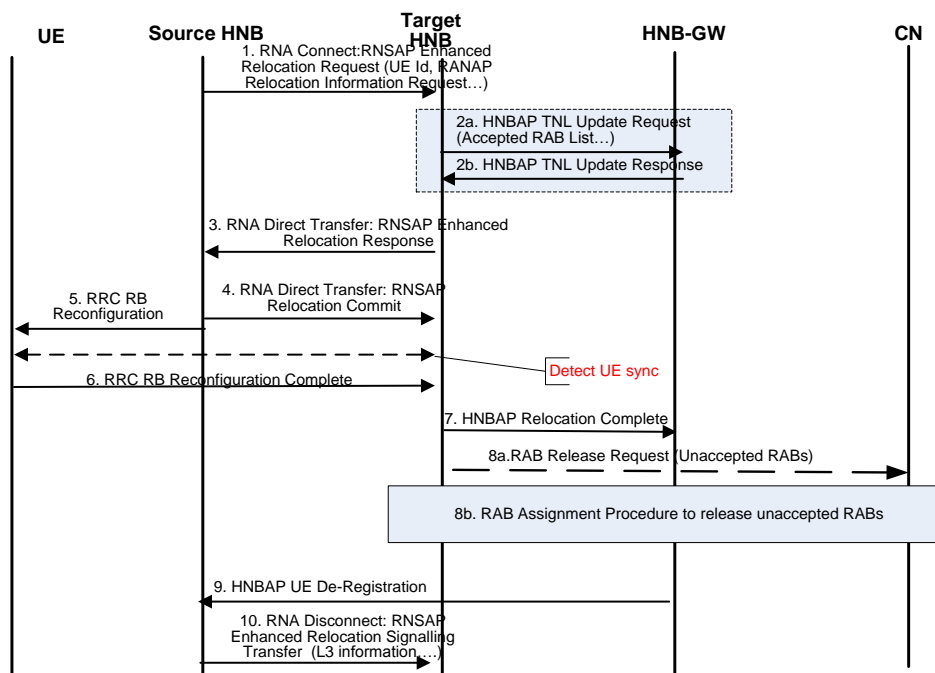


Figura 3.5 - Processo de *handover* intra-HNBs através da interface *Iurh* [27].

⁵ Os números das mensagens representadas na Figura 3.5, não correspondem exatamente aos passos do processo de *handover* descritos na Secção 3.4.1.

3.4.2 Handovers Femto → Macro GSM

O processo de *handover* para GSM é despoletado assim que o nível ou a qualidade do sinal da femto-célula, atinge um valor inferior ao nível aceitável. Assim, cada vez que o HNB necessita de efetuar uma avaliação da degradação rádio da ligação estabelecida com o UE, este configura dois eventos do lado do UE, segundo a TS 25.331 [37] são configurados os eventos 2D ou 2F.

- Quando a ligação rádio está degradada: o evento 2D é reportado pelo UE quando o HNB CPICH E_c/N_o ou o CPICH *Received Signal Code Power* (RSCP) têm valores abaixo do *threshold* definido pelo operador
- Quando a ligação rádio volta ao normal: o evento 2F é reportado pelo UE quando o HNB CPICH E_c/N_o ou o CPICH RSCP têm valores acima do *threshold* definido pelo operador.

Assim que o UE reporta um evento 2D, o HNB tenta encontrar uma célula de destino para o *handover* iniciando a procura na sua lista de células vizinhas GSM, criada durante o processo de auto-configuração e auto-otimização. Uma célula macro GSM é elegível como célula de destino de *handover*, se a banda de frequência desta é suportada pelo UE e se o valor do RSSI está de acordo com o *threshold* definido pelo operador. Nesse caso, o HNB cria uma lista das células GSM vizinhas que podem ser eleitas como destino de *handover*, sendo organizadas por nível de E_c/N_o , e se possível também por RSCP. Para finalizar, o HNB despoleta o processo de *handover* para a melhor célula vizinha GSM da lista de células elegíveis que criou. Se o processo de *handover* para a célula GSM eleita falhar, é feita uma nova tentativa para a próxima célula elegível da lista, até que o processo de *handover* seja executado com sucesso ou até chegar ao fim da lista.

3.4.3 Desafios

Para existir mobilidade entre a rede macro-celular e a solução *indoor* femto-celular, é necessário criar relações de vizinhança em todas as macro-células do operador, pois o HNB pode ser instalado em qualquer ponto do país. Num ambiente empresarial onde será necessário uma instalação de femto-células em grupo, e caso se pretenda que cada um dos HNBs tenha relação de vizinhança com a rede macro-celular, será necessário, uma vez conhecida a localização da empresa, adicionar em todas as macro-células da zona um número

de relações de vizinhança igual ao número de femto-células do grupo. Esta situação pode trazer problemas, pois pode não ser possível criar tal número de relações de vizinhança o que implica a necessidade de se efetuar uma estratégia de mobilidade entre as femto-células e as macro-células, definindo quais os pontos de entrada/saída na rede femto-celular a instalar (o número máximo de relações de vizinhança das macro-células depende do fabricante e varia entre 48 a 64). O mesmo acontece com os SCs (Secção 3.1.1.1), pode não ser possível atribuir a cada HNB, pertencente a um grupo, um SC único. Desta forma, será também necessário efetuar uma reutilização de SC dentro do mesmo grupo, de forma a utilizar o menor número possível, procurando evitar a existência de colisão dos mesmos dentro do grupo de HNBs. A utilização de um menor número de SCs, vai permitir reduzir o número de relações de vizinhança a adicionar nas macro-células vizinhas. Assim, uma boa reutilização de SCs dentro do grupo de femto-células reduz o número de SC a utilizar e, por sua vez, reduz também o número de entradas nas relações de vizinhança nas macro-células da zona.

3.5 Otimização

Relativamente aos processos de otimização de uma rede femto-celular UMTS, estes assemelham-se aos já utilizados na UTRAN e baseiam-se essencialmente na análise de KPIs. Através da análise de indicadores, após a integração e ao longo da vida de um HNB, resultam ajustes de parâmetros como potência, localização, relações de vizinhança, entre outros, que visam a otimização da qualidade, cobertura e capacidade da rede.

A aplicação das funções SON na fase de configuração e otimização permite facilitar as tarefas de planeamento. Como descrito no Capítulo 2, as funções de registo automático na rede local IP, a capacidade de escolher o SC a utilizar, a definição automática de relações de vizinhança (através da criação das listas de células vizinhas), a otimização da área de cobertura de forma dinâmica com vista a minimizar a interferência, são tarefas exaustivas e caso sejam mal executas podem levar a uma degradação dos KPIs. A realização destas e outras tarefas por parte das funções SON, permite reduzir a intervenção humana necessária para o *rollout* e otimização de novas femto-células.

3.5.1 Indicadores de performance – KPIs

A avaliação do desempenho de uma rede femto-celular, para além das medidas efetuadas no terreno, recorrendo à ferramenta TEMS® *Investigator*, por ser complementada

com à análise de KPIs, através dos quais será possível efetuar uma avaliação contínua do nível de QoS percebido pelos utilizadores. Tendo acesso ao conjunto de várias medidas reportadas pelos HNBs, disponibilizados pelo operador Vodafone Portugal, para a avaliação do desempenho da rede femto-celular criada neste trabalho, foram calculados os seguintes KPIs com objetivo de avaliar o desempenho das chamadas (CS/PS) estabelecidas e a performance de *handover* (entre HNB e entre este e a rede macro GSM):

- Taxa de sucesso das chamadas de voz (CS):

Indica a percentagem de chamadas de voz estabelecidas com sucesso. A taxa de sucesso de chamadas de voz é obtida através da equação 3.5, onde o valor *SuccEstabCS* corresponde ao número total de ligações RAB estabelecidas com sucesso para tráfego CS de voz (número de tentativas de chamadas CS efetuadas com sucesso), e o valor *AttEstabCS* corresponde ao número total de tentativas de chamadas de voz estabelecidas (este contador é incrementado sempre que o HNB recebe uma mensagem *RAB ASSIGNMENT REQUEST* do MSC para tráfego CS de voz)

$$\text{Taxa de Sucesso de Ch. de Voz}_{[\%]} = 100 \times \left(\frac{\text{SuccEstabCS}}{\text{AttEstabCS}} \right) \quad (3.5)$$

- Taxa de sucesso das chamadas de dados (PS):

Indica a percentagem das tentativas de estabelecimento de ligações RAB bem-sucedidas, de chamadas de dados. A taxa de sucesso de chamadas de dados é obtida através da equação 3.6, onde o valor *SuccEstabPS* corresponde ao número total de ligações RAB estabelecidas com sucesso para tráfego PS, e o valor *AttEstabPS* corresponde ao número total de tentativas de ligações RAB estabelecidas para tráfego PS (este contador é incrementado sempre que o HNB recebe uma mensagem *RAB ASSIGNMENT REQUEST* do HMS para PS).

$$\text{Taxa de Sucesso de Ch. de Dados}_{[\%]} = 100 \times \left(\frac{\text{SuccEstabPS}}{\text{AttEstabPS}} \right) \quad (3.6)$$

- Taxa de sucesso de *handover* CS para GSM:

Indica a percentagem de *hard handovers* de chamadas de voz (CS) estabelecidos para GSM. A taxa de sucesso de chamadas de *handover* CS para GSM é obtida através da equação 3.7, onde o valor *SuccBsrGSMCSVoice* corresponde ao número de *hard handovers* de chamadas de voz para GSM estabelecidos com sucesso entre um HNB e

uma macro-célula GSM, e o valor $AttBsrGSMCSVoice$ corresponde ao número total de tentativas de *hard handover* de chamadas de voz para GSM estabelecidos entre um HNB e uma macro-célula GSM.

$$Taxa\ de\ Sucesso\ de\ HO\ CS\ para\ GSM_{[\%]} = 100 \times \left(\frac{SuccBsrGSMCSVoice}{AttBsrGSMCSVoice} \right) \quad (3.7)$$

- Taxa de sucesso de *handover* CS entre HNBs:

Indica a percentagem de *hard handovers* de chamadas de voz (CS) estabelecidos HNBs pertencentes ao mesmo *cluster*. A taxa de sucesso de chamadas de *handover* CS entre HNBs é obtida através da equação 3.8, onde o valor $SuccHnbToHnbCSHOSC$ corresponde ao número de *hard handovers* de chamadas de voz estabelecidos com sucesso entre HNBs pertencentes ao mesmo *cluster*, e o valor $AttHnbToHnbCSHOSC$ corresponde ao número total de tentativas de *hard handover* de chamadas de voz estabelecidos entre HNBs pertencentes ao mesmo *cluster*.

$$Taxa\ de\ Sucesso\ de\ HO\ CS\ entre\ HNBs_{[\%]} = 100 \times \left(\frac{SuccHnbToHnbCSHOSC}{AttHnbToHnbCSHOSC} \right) \quad (3.8)$$

Capítulo 4

Teste do HNB Empresarial

Neste capítulo serão testadas as capacidades do HNB empresarial referidas no Capítulo 2, será também efetuado um estudo sobre os níveis de cobertura gerados por um HNB instalado em ambiente empresarial e integrado no operador Vodafone Portugal.

Existem vários tipos de HNBs desde *indoor* a *outdoor*, assim como diversos fabricantes. Os equipamentos utilizados nesta tese são apenas do fabricante *Alcatel-Lucent*®, este fabrica dois tipos de HNBs *indoor*, sendo um residencial (HNB *Consumer*) e outro empresarial (HNB *Enterprise*). No entanto, neste trabalho apenas serão utilizados HNBs empresariais.

4.1 Características do HNB *Enterprise*

O HNB *Enterprise*, representado na Figura 4.1, é um equipamento que permite até 8 utilizadores em simultâneo (8 DCH), suporta *High-Speed Downlink Packet Access* (HSDPA, 7.2 Mb/s) e *High-Speed Uplink Packet Access* (HSUPA, 1.4 Mb/s). Funciona na banda de frequência 2100 MHz e efetua pesquisa rádio nas bandas 2100 MHz, 1800 MHz e 900 MHz. A potência máxima de transmissão (Tx) é de 100 mW, produzindo uma célula com um raio máximo de aproximadamente 200 m (valor configurável e que depende das características do edifício). A antena incorporada no HNB *Enterprise* é omnidirecional e o equipamento apresenta uma sensibilidade de -113 dBm. Este equipamento pode também ser alimentado via *Ethernet PoE – Power over Ethernet*), facilitando a sua instalação.



Figura 4.1 - HNB *Enterprise* (Vodafone Portugal) - utilizado nos testes.

4.2 Avaliação do HNB *Enterprise*

Antes de se iniciarem os testes é necessário definir quais as opções de configuração (descritas na Secção 3.1.1) a escolher. Assim, procurando diminuir a interferência entre as femto-células e as macro-células, optou-se por atribuir uma frequência dedicada às femto-células (f1). Para diminuir a probabilidade de conflito entre os valores dos SCs, LAC e RAC das femto-células e das macro-células de uma determinada zona, foi atribuído às femto-células um conjunto de valores de SC (PSC1 e PSC2) que o HNB pode escolher (automaticamente no processo de auto-configuração) de acordo com o ambiente rádio onde é instalado. Para os valores do LAC e RAC, foi igualmente determinado um conjunto de valores que HNB pode seleccionar. Para o LAC foram definidos 22 valores (L1 a L23) que o HNB pode escolher e para o RAC foram definidos 2 valores (R1 e R2). O HNB obtém todos estes valores no processo de auto-configuração, fornecidos pelo HMS via DSL. Quando ao modo de acesso ao HNB, todos os testes foram realizados em *Closed Access Mode*.

Na Tabela 4.1, encontra-se um resumo dos parâmetros configurados para a femto-célula empresarial.

Tabela 4.1 - Valores *default* dos parâmetros RF das femto-células residenciais e empresariais.

Frequência da portadora	SC	LAC	RAC
UL: f1 DL: f2	PSC1/PSC2	L1-L23	R1/R2

Pretende-se, através dos testes efetuados, avaliar o funcionamento do HNB *Enterprise* num ambiente empresarial real, verificar se todos estes parâmetros são corretamente configurados pelo HNB, depois de concluir o processo de auto-configuração, e avaliar a área de cobertura da femto-célula. O conjunto de testes efetuados foi o seguinte:

- Verificação da configuração do HNB na rede IP local do cliente;
- Verificação da auto-configuração:
 - Escolha do *Scrambling Code* (SC) dentro dos valores definidos;
 - Verificação da frequência de transmissão;
 - Verificação dos valores do LAC e RAC escolhidos pelo HNB;
 - Verificação das listas de células vizinhas;
- Teste de mobilidade:
 - Modo dedicado: *Handovers* (Femto → Macro e Macro → Femto);
 - Modo *idle*: Re-selecção (Femto → Macro e Macro → Femto);

- Verificação do funcionamento do *Closed Access Mode*.
- Avaliação da área de cobertura
 - Análise do nível de RSCP;
 - Análise da qualidade do sinal (E_c/N_0);
 - Análise da potência transmitida pelo UE.

Os testes referidos anteriormente foram todos executados após o HNB ter concluído o processo de auto-configuração.

4.2.1 Cenário de teste

Todos os testes realizados ao HNB *Enterprise*, foram executados num cenário empresarial real. A planta da Figura 4.2, representa o piso empresa onde foram realizados todos os testes. Este piso é constituído por uma zona de *open space*, três salas de reuniões, uma copa, um gabinete e duas casas de banho. Existe do lado de fora da zona de trabalho um corredor exterior revestido a vidro com duas áreas de elevadores e uma varanda exterior.

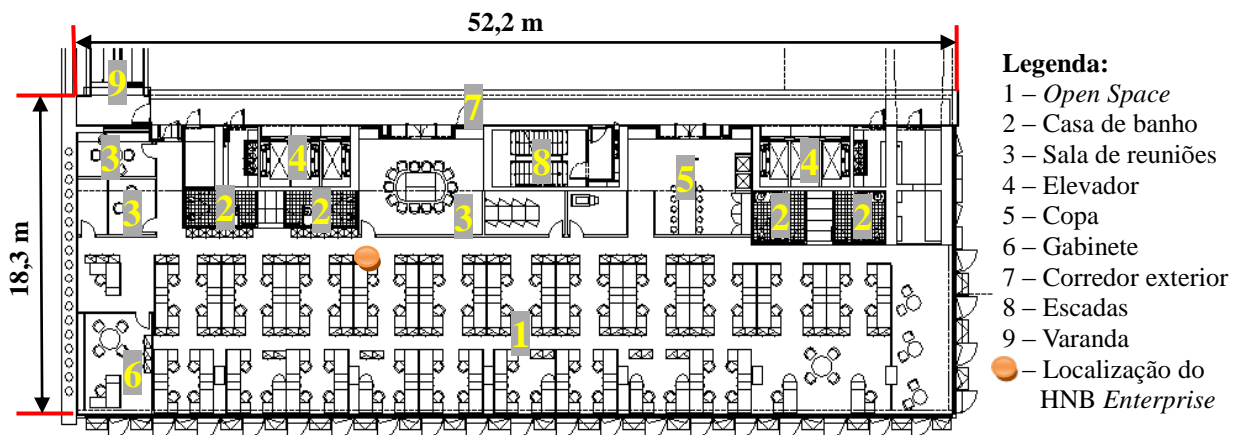


Figura 4.2 - Planta da empresa.

A localização do HNB para todos os testes efetuados encontra-se indicada na Figura 4.2 a laranja. O HNB comunica com a rede *core* do operador através da internet, nas empresas o acesso à internet da rede local está protegido através de uma *firewall*, como acontece com a rede IP interna da empresa onde foram executados os testes (Figura 4.2). Para que os HNBs consigam trocar dados sobre essa rede IP, é necessário configurar a *firewall* para permitir a passagem do tráfego proveniente do HNB, caso contrário este será barrado. Devido à impossibilidade de efetuar essa configuração, o HNB foi ligado a um *router* ADSL de teste com total acesso à internet. Devido à localização deste, apenas puderam ser efetuados testes de cobertura com o HNB colocado na posição indicada.

4.2.2 Configuração do HNB na rede IP local do cliente

Depois de se conectar o cabo DSL e o cabo de alimentação do HNB (instalação do HNB), este inicia de imediato o processo de auto-configuração (descrito Secção 2.9.1). A primeira ação a realizar no processo de auto-configuração consiste na configuração do HNB na rede IP local do cliente, ou seja, o HNB vai necessitar de um obter um endereço IP local (via DHCP). Durante este processo, o HNB regista também o endereço MAC do *router* onde se encontra ligado e também o primeiro endereço IP público a seguir ao *router* (este valor é obtido através de um *traceroute path* que o HNB efetua ao SeGW, normalmente o endereço obtido corresponde ao elemento de rede *Broad Band Remote Access Server* (BRAS) – todos os ISPs têm pelo menos um BRAS). O endereço MAC do *router* e o endereço do BRAS em conjunto com a lista de células vizinhas, serão utilizados para validação da localização do HNB.

O HNB foi ligado a um *router* ADSL de teste. Desta forma, o endereço IP que será atribuído ao HNB será um endereço privado da rede local, na gama de endereços 192.168.1.0/24. A partir do HMS é possível observar o endereço IP do HNB. O valor que toma é 192.168.1.68/24, que corresponde à gama de endereços IP da rede local configurada.

4.2.3 Configuração dos parâmetros RF

Neste ponto foi efetuada a verificação da configuração dos parâmetros RF assim como das listas das macro-células vizinhas GSM e UMTS (caso existam).

Como referido na Secção 2.9.2, após o *download* da configuração *default* (perfil associado à femto-célula) do HMS via DSL, o HNB inicia uma pesquisa do ambiente rádio recorrendo ao *Network Listening Mode* (módulo de *hardware* embebido no HNB que lhe permite perceber o ambiente rádio onde está instalado, descrito na Secção 2.9.2). Este módulo permite ao HNB efetuar uma pesquisa periódica do ambiente rádio para verificar a parametrização da rede, sincronização e condições de interferência. O HNB vai-se sincronizar com a rede do operador e decodificar os canais de *broadcast* e controlo das células vizinhas. A informação recolhida através do *Network Listening Mode*, também pode ser utilizada para criar as listas das células vizinhas, distinguir se as células detetadas são macro UMTS/GSM ou outras femto-células, identificar o operador a que pertencem e estimar o *path loss* para cada uma delas.

Depois da criação das listas de células vizinhas, é necessário determinar os parâmetros

RF: o SC, frequência da portadora, potência de Tx, RAC e LAC. Só depois de todos estes parâmetros estarem configurados é que o HNB entra em modo operacional e começa a radiar. Os parâmetros RF e as listas de células vizinhas foram ambos verificados no HMS e os valores obtidos encontram-se descritos na Tabela 4.2 e Tabela 4.3, respetivamente.

Tabela 4.2 - Valores dos parâmetros RF depois da auto-configuração do HNB.

Parâmetros	Valor após a auto-configuração
Scrambling Code (SC)	PSC1
Routing Area Code (RAC)	R1
Location Area Code (LAC)	L20
Frequência da portadora DL	f2

Tabela 4.3 - Lista das células vizinhas 2G/3G do HNB.

CellID	Banda de frequência	SC	LAC	BCCH RSSI ⁶	CPICH RSCP ⁷	ARFCN DL	BCCH ARFCN
M1	UMTS 2100 [Mhz]	SC6	L1	-----	88	f5	-----
M2	UMTS 2100 [Mhz]	SC7	L1	-----	73	f6	-----
M3	GSM 900 [Mhz]	-----	L1	54	-----	-----	f4

Os valores dos parâmetros RF (Tabela 4.2) obtidos pelo HNB após a auto-configuração estão dentro dos intervalos definidos na Tabela 4.1. A lista de células vizinhas 2G/3G (2 células UMTS e 1 célula GSM) obtida pelo HNB através do *Network Listening Mode*, corresponde às macro-células do operador que a HNB consegue medir com melhor nível de sinal a partir da sua localização (Tabela 4.3).

4.2.4 Avaliação da mobilidade

Nesta secção foi efetuado um teste à mobilidade disponibilizada pelo HNB *Enterprise*. Foram efetuados testes de *handover* e de re-selecção entre a femto-célula *indoor* e a rede macro *outdoor* do operador Vodafone Portugal, os resultados encontram-se descritos a seguir.

4.2.4.1 Modo dedicado

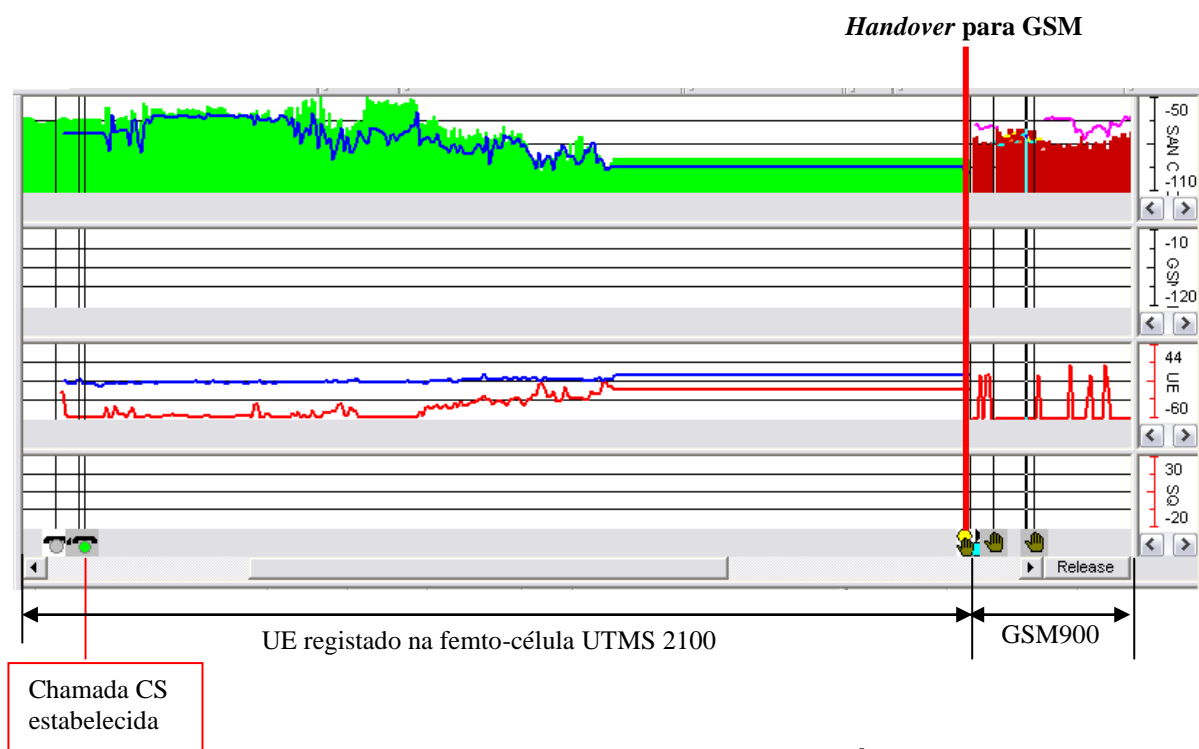
A Figura 4.3 ilustra o processo de *handover* CS entre a femto-célula *indoor* e uma macro-célula GSM *outdoor* (A *release* de *software* atual das femto-células associadas à

⁶ O mapeamento entre o valor do BCCH RSSI (Tabela 4) e o valor real do RSSI encontra-se na Secção 9.1.4 da TS 25.133 [38].

⁷ O mapeamento entre o valor do CPICH RSCP (Tabela 4) e o valor real do RSCP encontra-se na Secção 9.1.1.3 da TS 25.133 [38].

Vodafone Portugal, apenas permite efetuar *handover* CS das femto-células para macro-células GSM). É o HNB que toma a decisão da execução de *handover*, tendo em conta as medidas reportadas pelo UE. A macro-célula GSM de destino de *handover*, indicada nos MRs enviados pelo UE, tem de constar na lista de células vizinhas GSM do HNB, pois foi apenas para essas macro-células é que o HNB criou relações de vizinhança.

O teste foi iniciado estabelecendo uma chamada CS MO (*Mobile Originated*) através da femto-célula. De seguida, iniciou-se o deslocamento do UE até se sair da área de cobertura da femto-célula de forma a provocar um *handover inter-frequency*, como mostra a Figura 4.3. Da observação das mensagens nível 3 trocadas entre o UE e a rede durante todo o teste executado, representadas na Figura 4.4, conclui-se que o processo de *handover* foi executado com sucesso. Concluído o processo de *handover*, a chamada continuou em GSM 900 na macro-célula 2G com o CellID M3, presente na lista de células vizinhas GSM do HNB (Tabela 4.3).



Não foi possível efetuar *handover* no sentido Macro 3G → Femto, nem no sentido Macro GSM → Femto, devido à configuração atual da rede macro do operador.

4.2.4.2 Modo *idle*

Quando o UE se encontra no estado *idle*, monitoriza o canal de *Paging*, para detetar

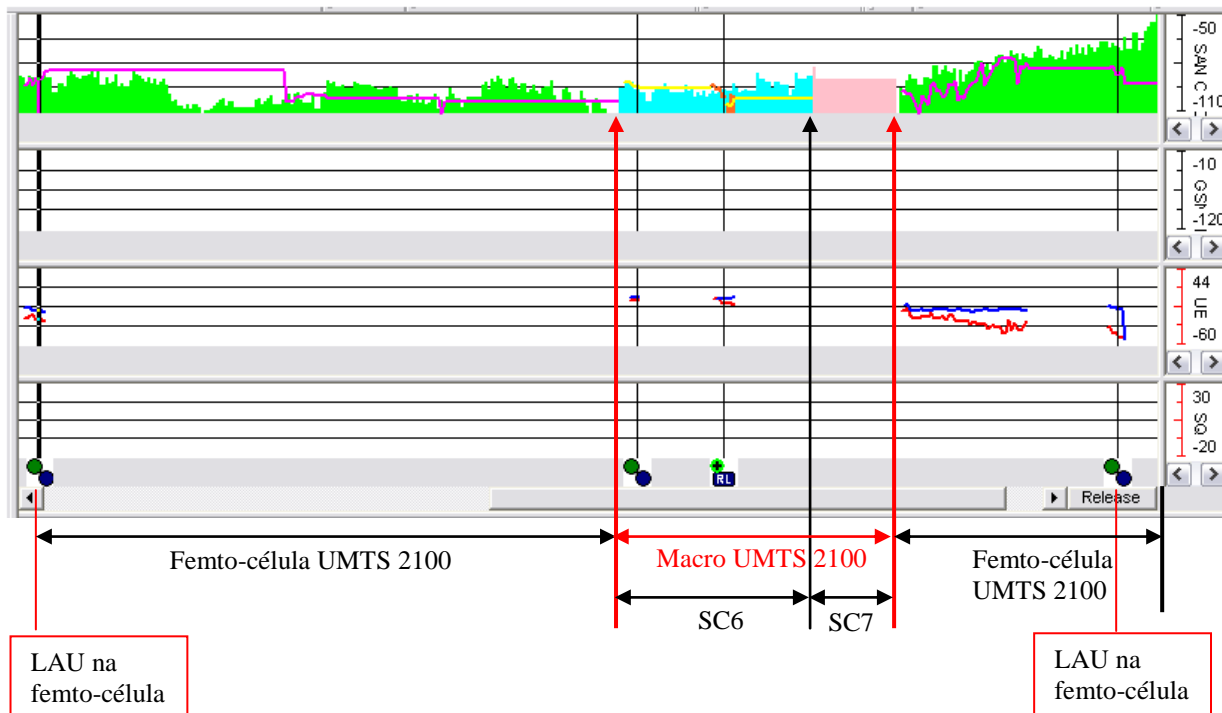


Figura 4.5 - Re-selecção Femto → Macro → Femto.

4.2.5 Closed Access Mode

O modo de acesso aos recursos rádio configurado no HNB testado é o *Closed Access Mode*, significa que apenas os utilizadores cujo IMSI se encontra registado na lista de acesso do HNB (ACL) têm a possibilidade de se registar na mesma, de acordo com o representado na Figura 4.6 pelos utilizadores UE1 e UE2. Caso um novo utilizador entre na área de cobertura da femto-célula (UE4, Figura 4.6) e se o IMSI deste utilizador não consta na ACL do HNB, este utilizador não vai conseguir registar-se na femto-célula, sendo rejeitado o processo de LAU e RAU. Na Tabela 3.1 estão representadas as causas típicas para a rejeição do LAU/RAU, a causa que aparece no corpo da rejeição do LAU/RAU é configurável pelo operador, e a que está configurada nas femto-células associadas à Vodafone Portugal é a causa 15: “*No Suitable Cells In Location Area*”. Foi escolhida esta causa entre as restantes, devido ao facto de esta ser suportada por todos os UE presentes na rede da Vodafone Portugal, o que não se verifica com todas as outras causas de rejeição apresentadas na Tabela 3.1.

Para a verificação do *Closed Access Mode* foram realizados dois testes utilizando um UE em modo *idle*. Em ambos os testes foi efetuada a re-selecção da femto-célula vindo de uma célula macro GSM. No primeiro teste (Secção 4.2.5.1), o IMSI correspondente ao USIM colocado no UE encontra-se registado na ACL do HNB. No segundo teste (Secção 4.2.5.2), o

IMSI correspondente ao USIM colocado no UE não está registado na ACL do HNB.

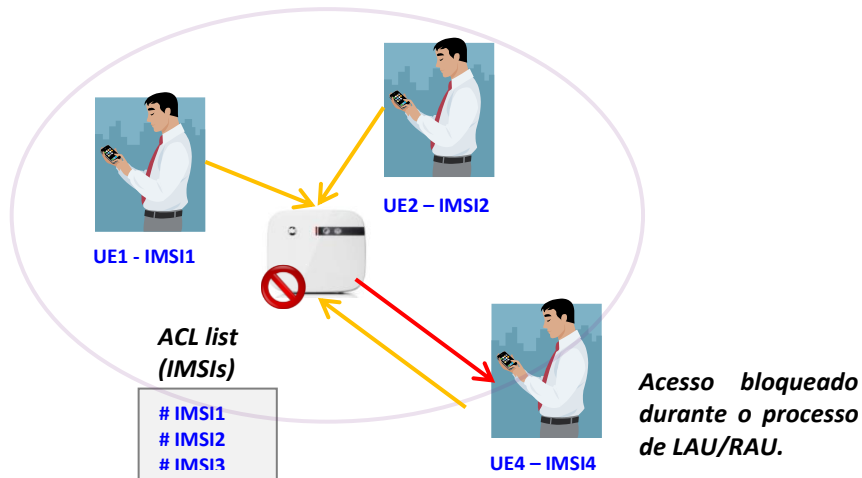


Figura 4.6 - Closed Access Mode.

4.2.5.1 Teste 1 - IMSI registado na ACL

Iniciou-se o Teste 1 em modo *idle* com UE bloqueado em GSM 900 dentro da área de cobertura da femto-célula. De seguida, o UE foi colocado em modo automático de escolha da rede (seleccionando a tecnologia com melhores condições na localização do UE) e, como esperado, o UE selecciona de imediato a femto-célula UMTS, devido ao nível de sinal recebido da femto-célula ser superior ao da macro-célula GSM mas também devido à configuração da rede macro da Vodafone Portugal, que tem uma parametrização de re-selecção bastante agressiva, e assim que um UE deteta uma femto-célula vai de imediato tentar seleccioná-la.

Como o IMSI correspondente ao USIM colocado no UE utilizado estava na ACL do HNB, o RAU *Request* e LAU *Request* não são rejeitados pela femto-célula. De seguida, o UE regista-se (RRC *Established*, Figura 4.8) na femto-célula e o processo de seleção é concluído com o LAU, como se pode observar na Figura 4.7. A partir desse momento o utilizador pode utilizar os recursos rádio da femto-célula.

Os eventos realizados pelo UE durante o processo de re-selecção da femto-célula estão apresentados na Figura 4.8.

4.2.5.2 Teste 2 - IMSI não registado na ACL

No Teste 2, foi realizado o mesmo processo que no Teste 1, com a diferença de que o IMSI correspondente ao USIM utilizado não está registado na ACL do HNB. Por esse motivo, o UE não se vai conseguir registar na femto-célula, e os pedidos de RAU e LAU vão ser

rejeitados pelo HNB, como se pode observar na Figura 4.9 e Figura 4.10. De acordo com o esperado, a causa da rejeição indicada nas mensagens *Routing Area Update Failure* e *Location Area Update Failure*, é a causa número 15 definida pelo 3GPP: “*No Suitable Cells In Location Area*”, configurada na rede da Vodafone Portugal. A partir deste momento, o UE considera a femto-célula como sendo uma célula não permitida e deixa de efetuar medidas da mesma durante um determinado período de tempo.

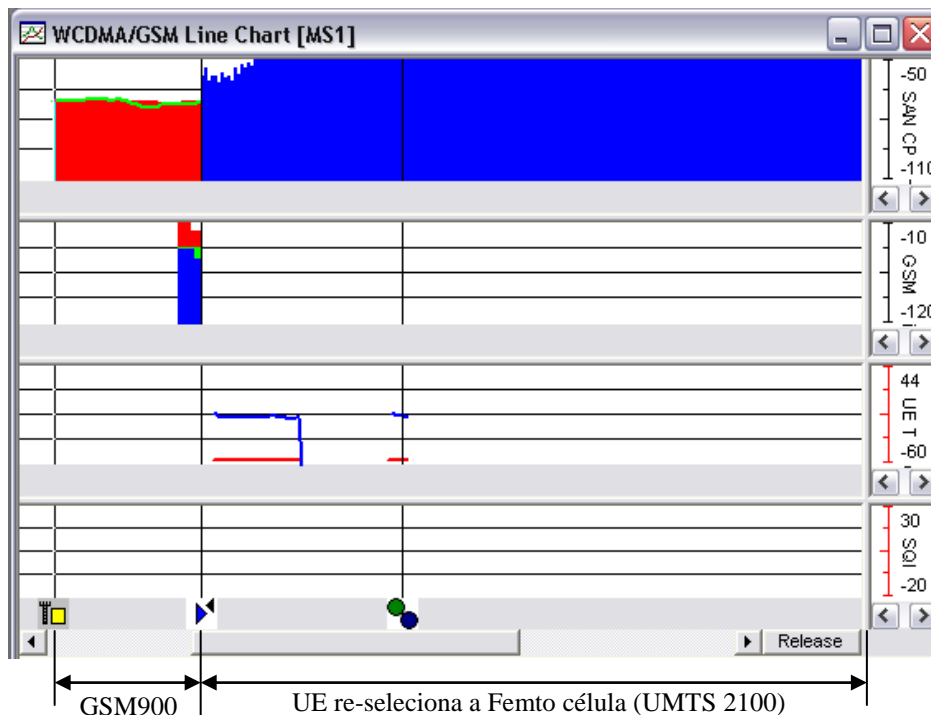


Figura 4.7 - Re-seleção da femto célula com IMSI registado na ACL.

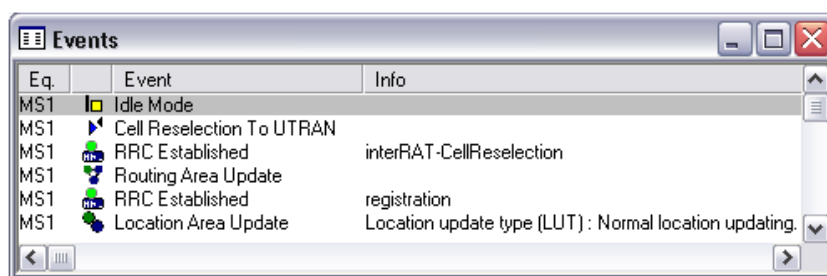


Figura 4.8 - Eventos realizados pelo UE na re-seleção da femto célula.

4.2.6 Avaliação da área de cobertura

Como o objetivo de avaliar a área de cobertura da femto-célula num cenário empresarial, realizaram-se vários testes de cobertura num dos pisos da empresa cuja planta se encontra ilustrada na Figura 4.2.

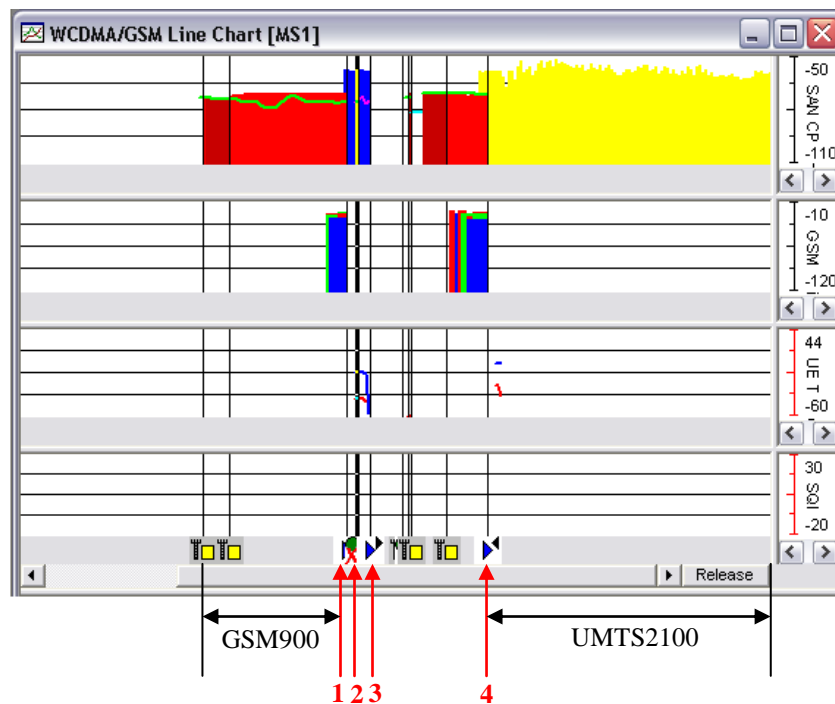


Figura 4.9 - Re-selecção da femto célula com IMSI não registado na ACL.

4.2.6.1 Configuração do HNB

Tal como foi referido no Capítulo 2, cada femto-célula tem a capacidade de se auto-configurar e auto-otimizar. Durante o processo de auto-otimização, o HNB tem a capacidade de adaptar a área de cobertura baseando-se em medidas que obtém relativas ao ambiente rádio em que se encontra instalado. De acordo com o referido na Secção 3.1.1.3, o HNB consegue otimizar a área de cobertura da femto-célula alterando a potência do CPICH. Esta última pode ser alterada de forma dinâmica pelo HNB ou pode ser estática sendo o seu valor determinado pelo operador (o parâmetro que controla esta funcionalidade do HNB é o *pilotPowerAdjustMode*). Com o objetivo de avaliar a capacidade de cobertura máxima do HNB, a potência do CPICH (*CPICHPower*) foi definida como fixa (que corresponde a colocar o parâmetro *pilotPowerAdjustMode = mimBased*) e com o valor máximo permitido pelo equipamento, que segundo o fabricante corresponde a 10 dBm (10 dB inferior à potência máxima do HNB, 20 dBm = 100 mW).

Terminado o processo de auto-configuração do HNB, iniciaram-se os testes de cobertura no piso apresentado na Figura 4.2.

Os testes de cobertura realizados foram efetuados em modo dedicado, estabelecendo uma ligação de dados na femto-célula (*Mobile Originated (MO) PS call*). Como a *Release* atual das femto-células do fabricante não permite efetuar *handover* de ligações PS da femto-

célula para a macro-célula, a chamada de dados estabelecida na área de cobertura da femto-célula só vai ser forçada a terminar quando o UE sair totalmente da área de cobertura da femto-célula. Desta forma, será possível determinar qual a cobertura máxima da femto-célula neste cenário empresarial.

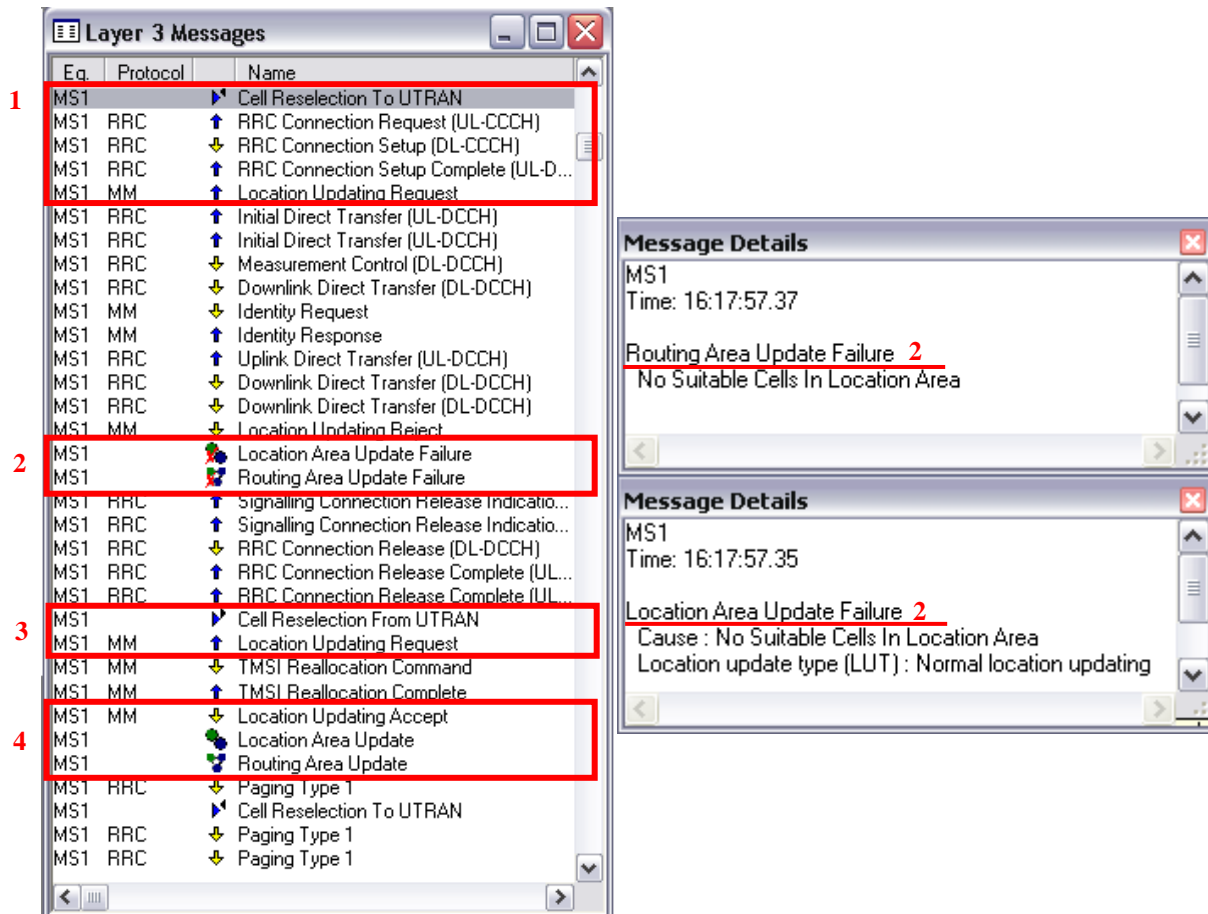


Figura 4.10 - Mensagens Layer 3 do processo de re-seleção da femto-célula (IMSI não registrado na ACL).

De seguida são apresentados os resultados obtidos da análise de cobertura efetuada no piso representado na Figura 4.2. Foram recolhidas as medidas relativas ao SC da femto-célula que estava a servir o edifício, ao nível de RSCP, variação do E_c/N_0 e potência de transmissão do UE. São também apresentadas as distribuições estatísticas dos valores obtidos para cada parâmetro nos vários pontos do edifício.

Tabela 4.4 - Parâmetros para controlo da área de cobertura do HNB.

Parâmetros de teste
$pilotPowerAdjustMode^8 = mimBased$
$maxPowerLimit = 20$ [dBm]
$CPICHPower = 10$ [dBm]

⁸ Quando o valor do parâmetro $pilotPowerAdjustMode$ está com o valor ‘ $mimBased$ ’, a potência do CPICH fica fixa e com valor igual ao representado pelo parâmetro $CPICHPower$.

4.2.6.2 Análise da área de serviço do HNB

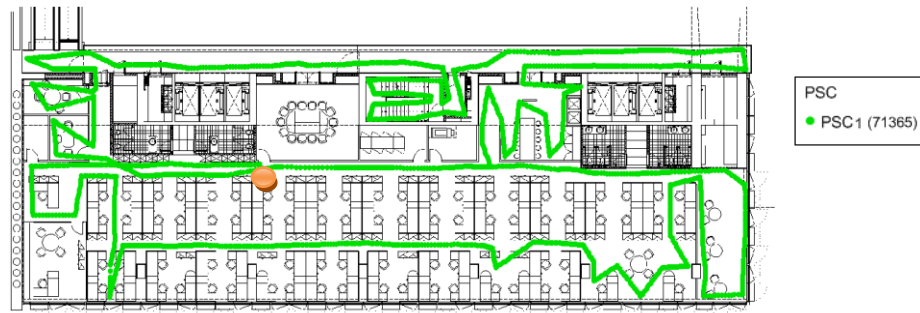


Figura 4.11 – Distribuição dos Scrambling Code.

Na Figura 4.11 verifica-se que a ligação PS estabelecida na femto-célula, não termina por falta de cobertura, pois pode-se observar um percurso contínuo sem interrupções desde o início até ao final do *walk test*. O único SC que aparece nos resultados do teste é o PSC1 (corresponde ao *Primary Scrambling Code* (PSC) da femto-célula) demonstrando mais uma vez que a chamada não foi terminada, pois apenas se verifica a cor verde em todo o percurso. Caso contrário, seriam visíveis mais cores, correspondentes aos SCs pertencentes às macro-células próximas do edifício.

4.2.6.3 Análise do nível de RSCP

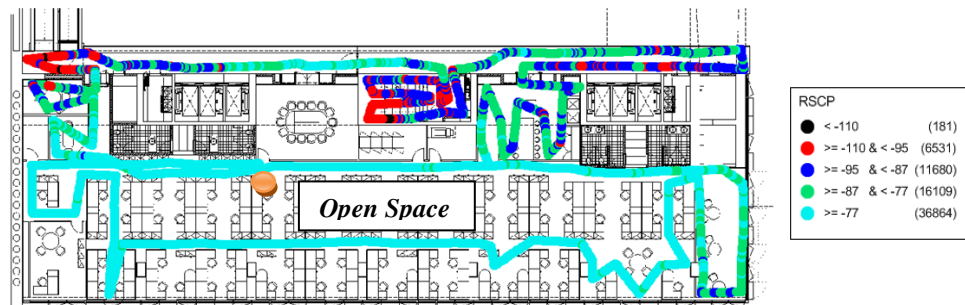


Figura 4.12 – Níveis de RSCP medidos no canal AS CPICH.

Quanto ao nível de sinal recebido no móvel (representado na Figura 4.12), na zona *open space* do edifício existe boa cobertura, com níveis de RSCP acima de -77 dBm. Quando a distância entre o UE e o HNB aumenta aumentando também o número de paredes que o sinal atravessa, o nível de RSCP vai diminuindo, mas ainda assim, nas zonas mais distantes do HNB verificam-se valores entre -95 e -87 dBm. No geral, a femto-célula consegue disponibilizar uma boa cobertura no interior do edifício, apresentando um nível de RSCP médio de -80,4 dBm (com desvio padrão de 15,6 dB), e, como se pode verificar no gráfico da

Figura 4.14, aproximadamente 71,3% dos valores de RSCP encontram-se compreendidos entre -90 e -60 dBm.

A partir da informação recolhida, é possível calcular distribuições de probabilidade de sinal (CDF, *Cumulative Distribution Function* – equação 4.1) para diferentes intervalos de potência. Desta forma é possível aferir a percentagem de cobertura recorrendo à equação 4.2 [40].

$$CDF(int_i \leq x < limiar_{cobertura}) = \%_{n\grave{a}o\ coberta} \tag{4.1}$$

$$\%_{coberta} = 100 - CDF(int_i \leq x < limiar_{cobertura}) \tag{4.2}$$

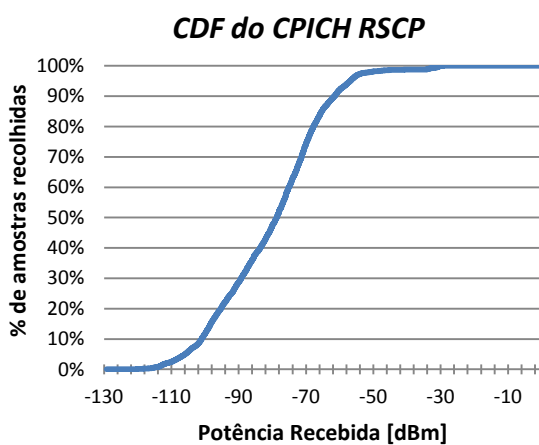


Figura 4.13 - CDF do CPICH RSCP.

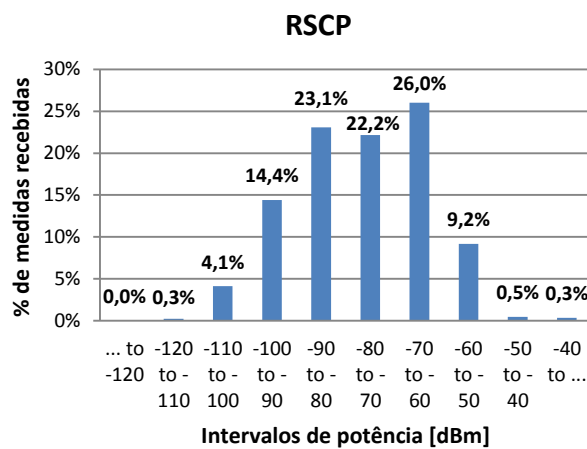


Figura 4.14 - Distribuição dos valores do CPICH RSCP.

Relativamente ao critério de cobertura, os testes realizados pelo fabricante do HNB *Enterprise (Alcatel-Lucent®)* em ambientes empresariais semelhantes a este, permitiu-lhes concluir que assumindo um *threshold* de -95 dBm como limiar de potência da portadora para uma cobertura de 95%, se obtêm bons resultados em termos de nível e qualidade de sinal. Desta forma, este foi o critério adotado para o planeamento de femto-células num ambiente empresarial realizado neste trabalho. É também que ter em conta que uma maior percentagem de cobertura com um limiar de potência mais alto, vai aumentar o custo do sistema, sendo necessário encontrar um compromisso entre estes dois fatores [7]. Utilizando o critério de cobertura adotado, obteve-se uma cobertura existente de 80% de área coberta, com a distribuição de potência apresentada na Figura 4.13 e Figura 4.14.

4.2.6.4 Análise da qualidade do sinal (E_c/N_o)

A qualidade de sinal no interior do edifício é boa com 73,1 % dos valores de E_c/N_o compreendidos entre -10 e -7 dB (ver Figura 4.16). Nas zonas perto do limite da femto-célula, o nível de qualidade decresce um pouco, atingindo valores entre -13 e -10 dB devido à interferência provocada pelas macro-células no exterior do edifício (ver, Figura 4.15). O nível médio de E_c/N_o obtido foi de -8,7 dB (com desvio padrão de 1,6 dB), para uma femto-célula com apenas um utilizador. No entanto verifica-se que na zona muito próxima do HNB, o nível de E_c/N_o do CPICH não é excelente, apresentando muitos valores entre -7 e -10 dB. Esperava-se que na proximidade do HNB apenas se verificassem valores de E_c/N_o superiores a -7 dB, acontece que no mesmo piso onde foram realizados os testes, existe um sistema distribuído de antenas para UMTS e existe também uma célula UMTS de teste, que utiliza a mesma portadora que as femto-células (f2). Este ambiente rádio provoca uma diminuição dos valores de E_c/N_o do HNB.

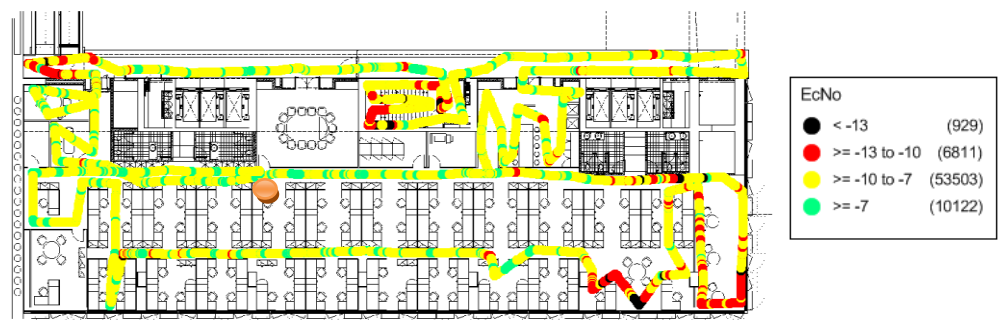


Figura 4.15 – Valores medidos de E_c/N_o no canal AS CPICH.

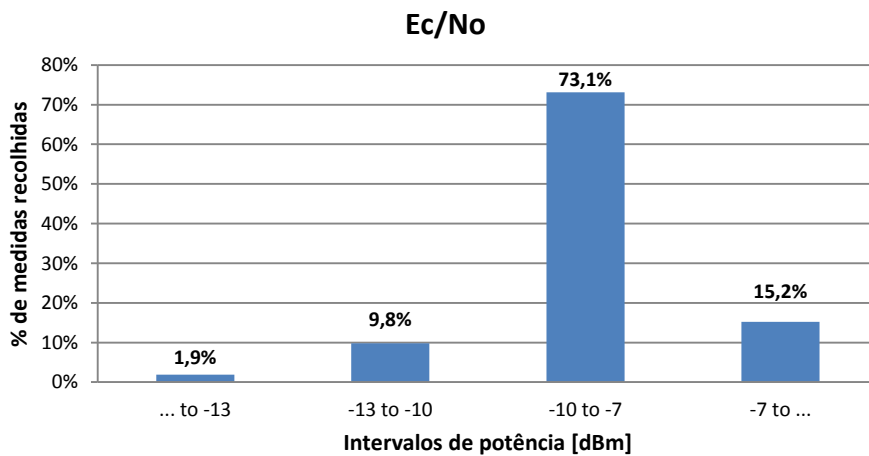


Figura 4.16 – Distribuição dos valores de E_c/N_o .

4.2.6.5 Análise da potência transmitida pelo UE

A partir da observação dos valores de potência transmitida pelo UE (necessária para se conseguir manter na femto-célula) é possível avaliar também o nível de sinal existente em cada zona do edifício, verificando-se uma proporcionalidade inversa entre os valores de RSCP e de potência transmitida pelo UE (UETxPW). Pode-se verificar na Figura 4.17 que às zonas onde existe menor cobertura correspondem zonas onde os níveis de potência transmitida (Tx) atingem valores mais elevados (compreendidos entre -7 e 0 dBm). Para uma distância próxima do HNB, obtêm-se valores de potência Tx entre -30 e -13 dBm. O nível médio da potência Tx pelo UE é de -15,3 dBm (com desvio padrão de 13,9 dB), onde aproximadamente 64,2% dos valores de potência Tx estão compreendidos entre -40 e -10 dBm (Figura 4.18), valores de potência relativamente baixos, que permitirão uma diminuição da interferência e aumentar a autonomia do UE.

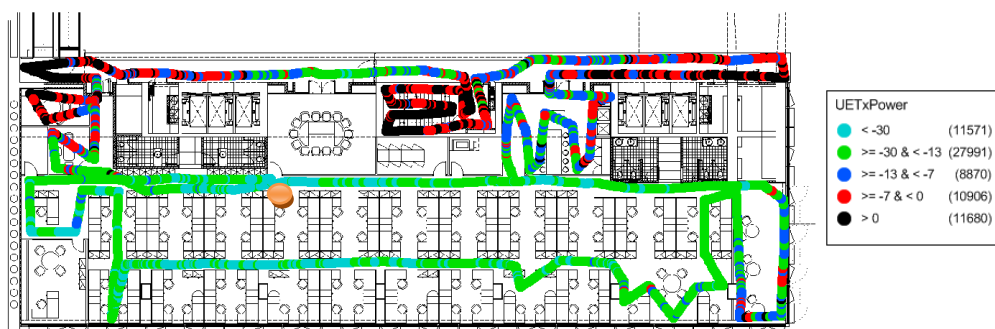


Figura 4.17 – Valores de potência Tx do UE.

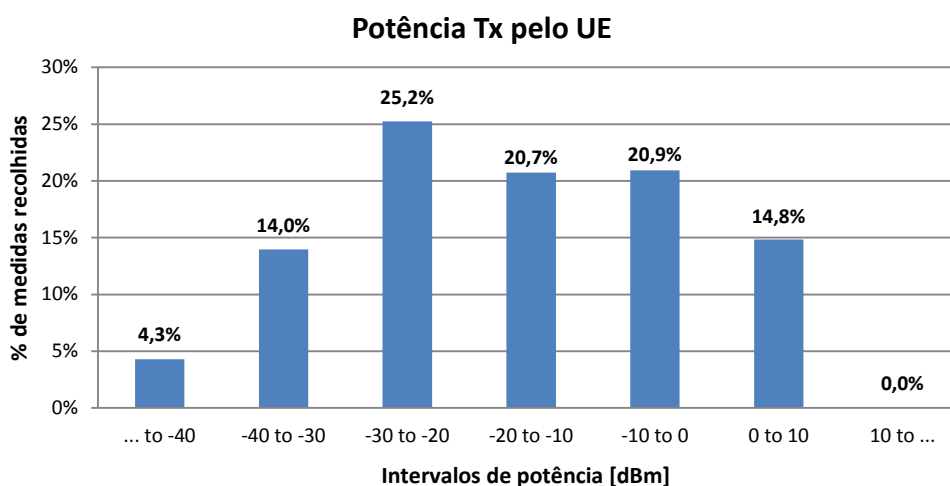


Figura 4.18 - Distribuição dos valores de UETxPW.

Na Tabela 4.5, é apresentado um resumo dos resultados obtidos da análise da cobertura disponibilizada pelo HNB *Enterprise* testado para os valores de RSCP, *Ec/No*, potência Tx pelo UE e cobertura atingida.

Tabela 4.5 - Resumo dos resultados obtidos na Secção 4.2.6.

	RSCP [dBm]	<i>Ec/No</i> [dB]	Pot. Tx UE [dBm]	Cobertura Atingida [%]
Valor Médio	-80,4	-8,7	-15,3	80 ⁽⁹⁾
Desvio Padrão	15,6	1,6	13,9	

4.2.3 Resumo

Os testes realizados neste capítulo permitiram avaliar o comportamento de um HNB num ambiente empresarial real, onde através de um conjunto de cenários de testes foram testadas as principais funcionalidades de um HNB.

Verificou-se o correto funcionamento do processo de auto-configuração, através da análise, via HMS, dos parâmetros configurados após a conclusão do mesmo. Foi possível observar que as configurações descarregadas do HMS foram corretamente configuradas pelo HNB: este ficou operar na portadora configurada, utilizando um SC, LAC e RAC escolhido do intervalo de valores definido inicialmente, e criou uma lista das macro-células vizinhas (UMTS e GSM) onde apenas constam células próximas da localização do HNB.

Verificou-se também o funcionamento do processo de *handover*, sendo apenas possível efetuar *handover* entre o HNB e a rede macro GSM. Numa segunda fase foi testado o *Closed Access Mode*, onde se verificou que apenas os utilizadores presentes na ACL têm acesso aos recursos rádio da femto-célula, de acordo com o descrito na Secção 3.1.1.5.

Relativamente aos testes de cobertura, a utilização de apenas um HNB não permite cumprir os critérios de cobertura assumidos, obtendo-se apenas uma cobertura existente de 80% da área de cobertura⁹, no entanto obteve-se um bom nível de cobertura no interior do edifício com boa qualidade de sinal (Tabela 5.6).

Os testes realizados permitiram ter uma noção dos resultados esperados em termos de auto-configuração, mobilidade e área de cobertura, quando o HNB testado é instalado num ambiente real.

⁹ De referir que o objetivo dos testes realizados, passa por compreender o funcionamento de um HNB *Enterprise* num ambiente empresarial real. Caso se pretendesse efetuar um planeamento femto-celular para o piso da Figura 4.2, ficou claro que apenas um HNB não será suficiente para atingir os 96% de cobertura impostos pelo critério de cobertura utilizado.

Capítulo 5

Cenários de Teste e Análise de Desempenho

Neste capítulo é descrito o planeamento *indoor* executado num cenário empresarial real, utilizando o HNB testado no Capítulo 4. No planeamento realizado foram cumpridos os passos enunciados na Secção 3.2. Com base num conjunto de cenários de teste constituídos por diferentes parametrizações, será analisado o funcionamento e desempenho da rede femto-celular instalada. Serão também utilizados um conjunto de KPIs, que permitirão complementar a análise de desempenho da rede e avaliar os resultados de cada um dos vários testes realizados. Este capítulo começa com uma apresentação da empresa na qual será executado o planeamento celular *indoor*, sendo também descrito o ambiente rádio existente no interior e exterior da empresa (recorrendo à ferramenta de medidas TEMS® *Investigation*). Posteriormente serão efetuados os testes que mostram a forma como foi determinada a localização e quantidade de HNBs *Enterprise* a utilizar na empresa. Depois da instalação do equipamento, serão apresentados os testes de validação de cobertura e mobilidade entre os HNBs. De seguida, segue-se a fase da otimização da rede instalada, sendo realizado um conjunto de vários testes que se centralizam na otimização: da área de cobertura, dos *handovers* entre HNBs e dos *handovers* entre os HNBs e a rede macro GSM. Serão também avaliados os KPIs que permitirão identificar eventuais problemas existentes e ajudarão a escolher a melhor parametrização testada na rede instalada.

5.1 Cenário de teste

A planta da empresa onde serão instalados os HNBs e executados todos os testes, está representada na Figura 5.1. O cliente apenas pretende ter boa cobertura na zona a branco indicada, pois a zona representada a amarelo é constituída maioritariamente por áreas de armazenamento onde raramente circulam pessoas. A empresa é constituída por dois pisos mas apenas será efetuado o planeamento para o piso zero representado na Figura 5.1. No piso 1 encontra-se maquinaria pesada, por esse motivo as paredes do piso zero são constituídas por betão reforçado, o que provoca uma atenuação elevada do sinal dos HNBs. O piso zero é constituído por vários escritórios, salas de reunião, uma zona *open space*, uma cantina, uma

zona de manutenção e um conjunto de divisões de armazenamento de materiais. A maior parte dos funcionários da empresa encontram-se localizados na zona a branco indicada na Figura 5.1. O piso zero tem uma área de 3660 m² e tem 50 funcionários. Os funcionários da empresa pretendem apenas estabelecer chamadas CS de voz, existindo apenas alguns funcionários que pretendem estabelecer ligações PS de dados. Apesar de existirem 50 funcionários a trabalhar no piso zero da empresa, apenas um conjunto de 25 funcionários poderá utilizar as femto-células, pois estas estarão a funcionar em modo fechado (*Closed Access Mode*).

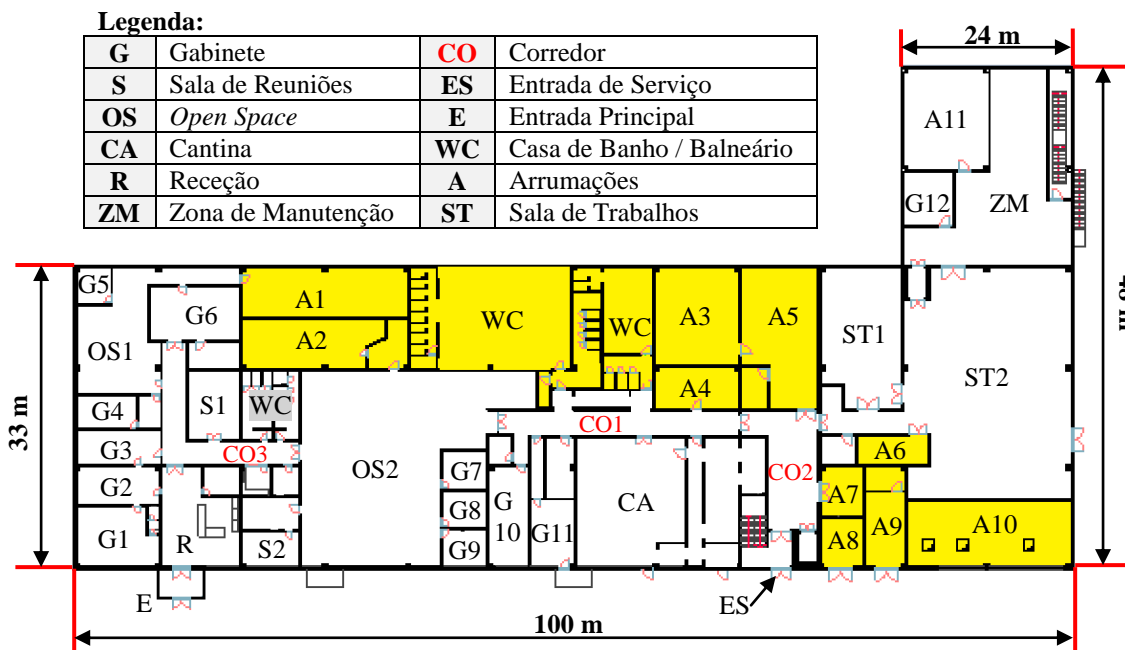


Figura 5.1 - Planta da empresa.

5.2 Condições rádio existentes

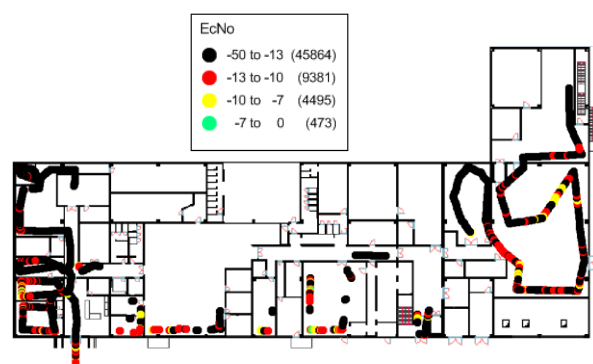
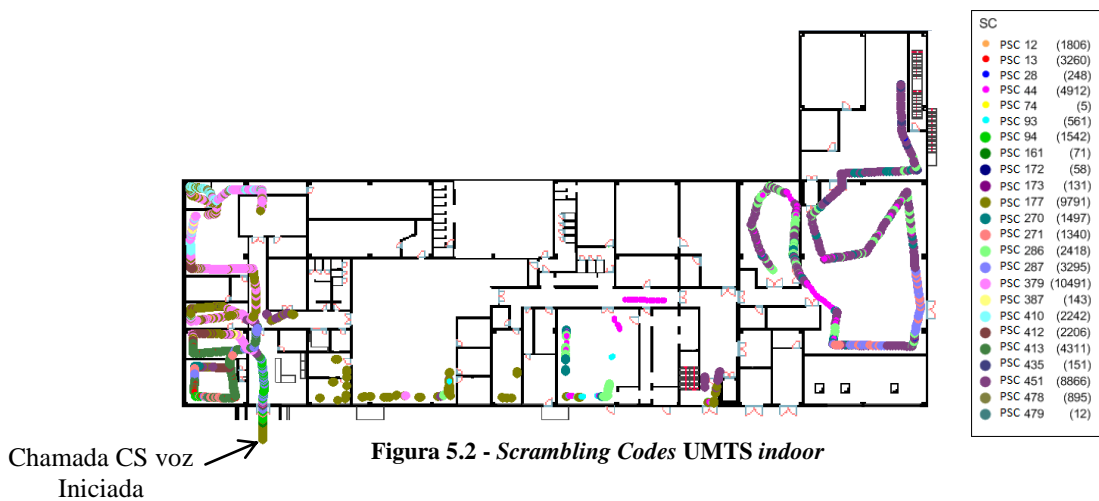
Tendo conhecimento da estrutura da empresa onde será efetuado o planeamento femto-celular, o próximo passo será obter medidas no interior e exterior do edifício com o objetivo de conhecer as condições rádio existentes no local. A informação recolhida será útil no processo de planeamento e permitirá avaliar as melhorias introduzidas pela rede femto-celular a planear.

O HNB utilizado neste trabalho é o HNB *Enterprise*, testado no Capítulo 4. É um HNB UMTS e (devido as características da rede do operador) apenas permite que sejam efetuados *handovers* de saída da femto-célula para a rede GSM. Por esse motivo, é importante avaliar as condições rádio UMTS e GSM no interior e exterior da empresa, permitindo também definir a melhor estratégia de mobilidade entre a rede femto-celular a rede macro

UMTS/GSM. Com as medições iniciais pretende-se identificar quais as células UMTS e GSM que estão a servir no interior e exterior da empresa. No caso das células UMTS, pretende-se identificar os SCs e verificar o nível de RSCP e de Ec/No . Relativamente às células GSM, pretende-se analisar os níveis de $RxLev$ (nível de sinal recebido pelo UE) e $RxQual$ (qualidade do sinal recebido pelo UE). De seguida, serão apresentados os resultados das medidas efetuadas no interior e exterior da empresa, recorrendo à ferramenta de medidas TEMS® *Investigation*.

5.2.1 Condições rádio UMTS

Nas figuras seguintes estão ilustrados os resultados obtidos com as medidas recolhidas durante uma chamada CS de voz (em UMTS) efetuada no interior da empresa. A Figura 5.2 mostra o número de SCs UMTS correspondentes às células que estão a servir no interior da empresa. A Figura 5.3 mostra o nível de sinal recebido pelo UE das células UMTS, e a Figura 5.4 mostra a qualidade do sinal recebido pelo UE no interior da empresa.



Os resultados das medições UMTS mostram o baixo nível de sinal existente no interior do edifício. Na Figura 5.2 é possível identificar o elevado número de células que estão a servir no interior da empresa, onde cada SC corresponde a uma célula macro UMTS diferente. Apesar do elevado número de células a servir no interior do edifício, verifica-se na Figura 5.3 e Figura 5.4, que o nível de sinal recebido pelo UE é bastante baixo (RSCP) assim como a qualidade de sinal (Ec/No). Obtendo-se valores médios de -113,17 dBm, para o RSCP e -18,3 dB para o Ec/No . Na Figura 5.3 é possível verificar que apenas nas zonas próximas das janelas é possível obter um nível de RSCP (entre os -110 e -95 dBm) que permite efetuar uma chamada, nas zonas mais afastadas das janelas (como no CO1, CO2, OS2, CA, Figura 5.1) o UE não consegue detetar nenhuma célula UMTS, sendo completamente impossível manter ou estabelecer uma chamada no interior do edifício num zona distante das janelas, com a exceção das zonas ST1, ST2 e ZM, devido à localização das estações macro UMTS. A Figura 5.5 permite confirmar que nessas zonas, no exterior da empresa, existe melhor nível de RSCP (valores a variar entre -87 e -95 dBm) e de Ec/No (Figura 5.6, com maior parte dos valores a variar entre -7 a -10 dB).

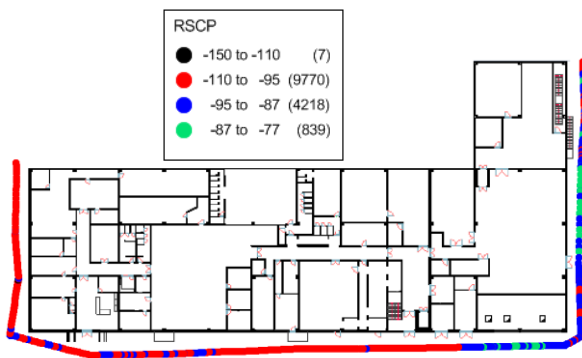


Figura 5.5 - Nível de CPICH RSCP outdoor.

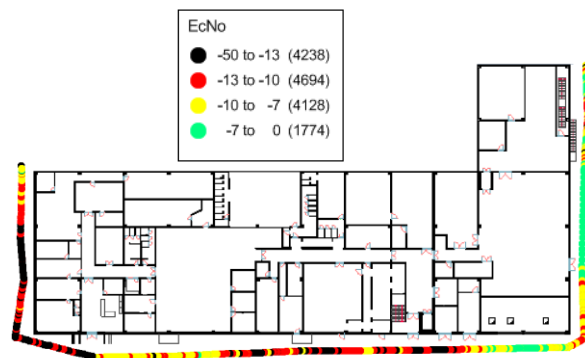


Figura 5.6 - Nível de CPICH Ec/No outdoor

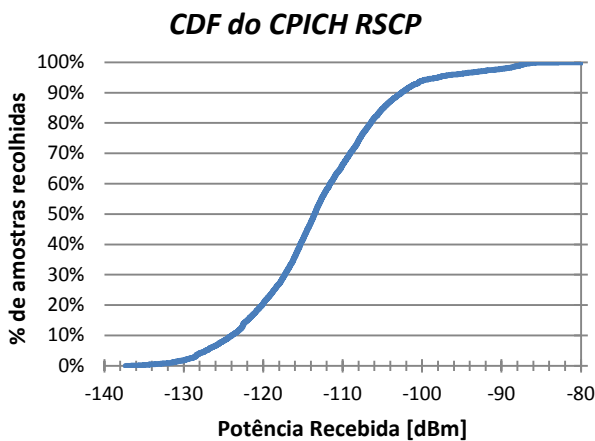


Figura 5.7 - CDF do CPICH RSCP.

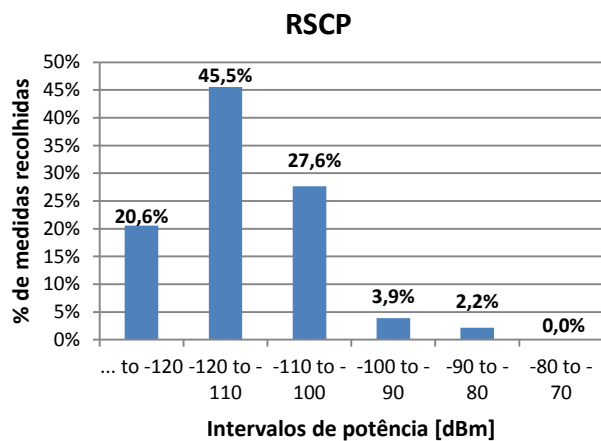


Figura 5.8 - Distribuição dos valores de CPICH RSCP.

Aplicando o critério de cobertura adotado (cobertura mínima de 95%, tendo como limiar de potência -95 dBm), dos testes realizados no interior da empresa, obteve-se uma cobertura existente de 3,8% de área coberta, com a distribuição de potência apresentada na Figura 5.7 e Figura 5.8, onde se verifica que aproximadamente 94% da cobertura existente tem valores de RSCP inferiores a -100 dBm. Estes valores confirmam as más condições de cobertura UMTS existente no interior da empresa.

5.2.2 Condições rádio GSM

Nas figuras seguintes estão ilustrados os resultados das medidas da uma chamada CS de voz (em GSM) efetuada no interior da empresa. A Figura 5.9 mostra o nível de sinal recebido pelo UE das células GSM que estão a servir no interior da empresa, e a Figura 5.10 mostra a qualidade do sinal recebido pelo UE.



Figura 5.9 - Nível de sinal recebido, *RxLev*.

Figura 5.10 – Qualidade do sinal, *RxQUAL*.

Comparando o nível de sinal recebido em GSM (Figura 5.9) com o nível de sinal recebido em UMTS (Figura 5.3) verifica-se que a cobertura GSM no interior do edifício é melhor que a cobertura UMTS, apresentado um nível médio de *RxLev* igual a -90,1 dBm. Em GSM o nível de sinal existente nas zonas mais afastadas das janelas é suficiente para manter ou estabelecer uma chamada, desta forma foi possível efetuar medidas em praticamente toda a área da empresa. Obteve-se uma área de cobertura existente de 82,7%, com 60,9% dos valores de *RxLev* entre -95 e -85 dBm (Figura 5.11), contra os 3,8% de área coberta obtidos em UMTS com apenas 6,1% dos valores de RSCP a variar entre -100 e -80 dBm (Figura 5.8). A qualidade do sinal GSM no interior do edifício é razoável como se pode verificar na Figura 5.10, obtendo-se um nível médio de *RxQUAL* igual a 3,9. Verifica-se também que, à semelhança do que acontece em UMTS, nas zonas mais próximo das janelas o *RxLev* e o

RxQUAL apresentam melhores resultados, com a maior parte dos valores a variar entre -95 e -85 dBm para o *RxLev*, e entre 3 a 6 para o *RxQUAL*, de acordo com os resultados indicados na Figura 5.13 e Figura 5.14, respetivamente.

Devido ao facto dos HNBs utilizarem a rede GSM como destino dos *handovers* de chamadas CS provenientes da rede femto-celular, é importante conhecer as condições rádio GSM no exterior do edifício, procurando verificar se poderá existir alguma situação problemática que mais tarde poderá levar ao aumento de queda de chamadas por falha de *handover* para GSM. Na Figura 5.13 e Figura 5.14, estão representados os valores do *RxLev* e *RxQUAL* no exterior do edifício.

Em comparação com os resultados obtidos em o UMTS, é nítido que existe uma melhor cobertura *outdoor* em GSM, embora esta também não seja excelente. De qualquer das formas, verifica-se a necessidade de efetuar uma melhoria do sinal rádio no interior do edifício.

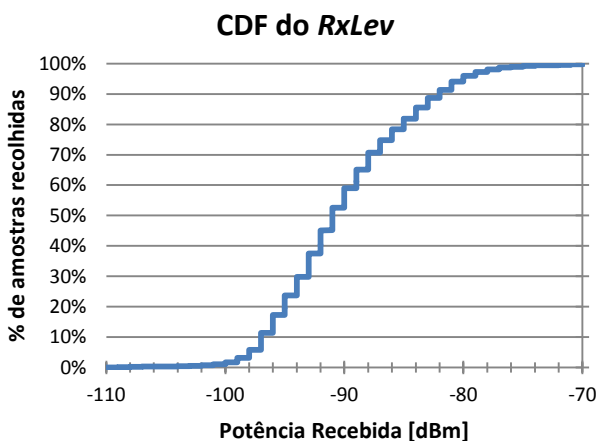


Figura 5.11 – CDF do *RxLev*.

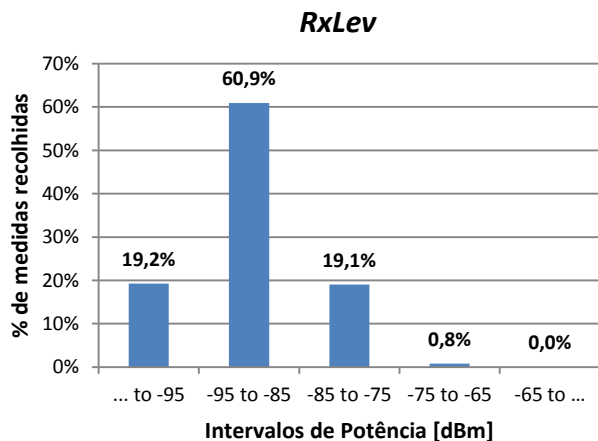


Figura 5.12 - Distribuição dos valores de *RxLev*.

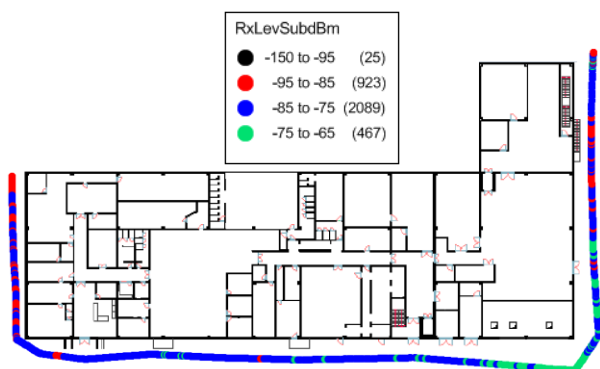


Figura 5.13 - Nível de sinal recebido, *RxLev*.

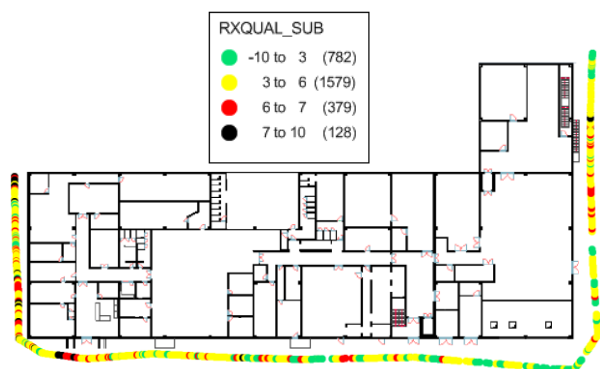


Figura 5.14 - Qualidade de Sinal GSM, *RxQual*.

5.3 Planeamento dos HNBs

Obtida toda a informação necessária sobre a empresa onde será efetuada a instalação das femto-células e após conhecer as condições rádio existentes, o próximo passo consiste em efetuar o planeamento da rede femto-celular a instalar na empresa. Neste passo é necessário definir a parametrização inicial que os HNBs vão ter, será necessário determinar qual o número de HNBs a instalar para cumprir o critério de cobertura (assumindo um cobertura mínima de 95% e tendo como limiar de potência o valor de -95 dBm) e ter capacidade para suportar todos os utilizadores da empresa com acesso às femto-células, uma vez que estas estarão a funcionar apenas em modo fechado.

5.3.1 Determinação da quantidade e localização dos HNBs

Na Secção 3.2, estão descritas as várias etapas de um planeamento femto-celular *indoor*, no qual, na fase de planeamento celular, é referida a utilização de uma ferramenta de simulação para a predição da cobertura que os HNBs a instalar podem criar, permitindo assim determinar qual a quantidade de HNBs necessários em termos de cobertura e qual a sua melhor localização no interior do edifício. No entanto, a utilização de uma ferramenta de simulação para a predição da área de cobertura, exige que a mesma esteja muito bem calibrada, um vez que a predição da cobertura será efetuada com base nas características rádio dos materiais constituintes do edifício. Desta forma, é necessário determinar com exatidão a atenuação provocada por cada um dos materiais constituintes das paredes do edifício, assim como dos vários objetos presente no seu interior, dependendo do grau de precisão que se pretender utilizar.

Outro parâmetro que as ferramentas utilizadas na predição de cobertura têm de ter em conta, será o número de utilizadores a associar a cada HNBs, pois a área de cobertura de uma femto-célula vai variar de acordo com o número de utilizadores que nela estão registados. Assim, caso a ferramenta não esteja bem calibrada, os resultados finais podem não ser coerentes com a realidade, e para que isso não aconteça é necessário um período exaustivo de calibração da ferramenta às condições estruturais da empresa que vai aumentar a duração do projeto de planeamento. A maior parte destas ferramentas tem também um elevado custo, sendo pouco atrativas para os operadores móveis.

O trabalho desenvolvido nesta tese foi executado no interior de uma empresa de telecomunicações, e como forma de reduzir o tempo necessário para a calibração das

ferramentas de simulação, foi adotada uma alternativa mais rápida para a determinação do número necessário de HNBs a instalar na empresa representada na Figura 5.1. O método utilizado consiste em determinar, em ambiente controlado (designado por *Test Plant*, TP), qual a área de cobertura máxima que o HNB *Enterprise* (testado Capítulo 4) consegue criar. Depois, recorrendo à ferramenta TEMS® *Transmitter*¹⁰, determina-se qual a potência a colocar na antena do transmissor, para que seja obtida a mesma área de cobertura de um HNB *Enterprise*. De seguida, o TEMS® *Transmitter* será colocado a radiar no interior da empresa (Figura 5.1) com o nível de potência determinado anteriormente, e a partir do nível de RSCP medido será determinada a localização e o número de HNBs necessários. Esta abordagem tem a vantagem de a predição de sinal estar a ser efetuada no ambiente real onde serão colocados os HNBs. A ferramenta TEMS® *Transmitter* é constituída por um transmissor que transmite o sinal UMTS para uma antena que pode ser colocada no topo de um tripé ou sobre uma bancada. A antena utilizada pode ser de painel ou omnidirecional.

O conjunto de medições realizadas em TP, vão permitir afinar a potência do transmissor do TEMS® *Transmitter* de forma a simular um HNB *Enterprise* e determinar a antena a utilizar. Os resultados dos testes estão representados na Figura 5.15, Figura 5.16 e na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Valores de RSCP e *Ec/No* para o HNB e TEMS® *Transmitter*.

Posição	Orientação	RSCP [dBm]		<i>Ec/No</i> [dB]	
		HNB	<i>Transmitter</i>	HNB	<i>Transmitter</i>
Bancada (Extremo TP)	0° (frente)	-58,02	-60,21 (Antena Painel)	-4,02	-4,02 (Antena Painel)
	90° (lateral)	-57,36		-3,98	
	180° (costas)	-51,96		-3,58	
	Cima (costas assentes na bancada)	-61,08		-3,11	
Tripé	Baixo (frente virada para baixo)	-59,24	-59,36 (Antena Omni.)	-4,00	-3,5 (Antena Omni.)
	Lateral	-56,81		-3,43	
Bancada (Centro TP)	Cima (costas assentes na bancada)	-66,02		-3,14	

Nota: O TEMS® *Transmitter* só tem uma posição na bancada e no tripé.

Na Tabela 5.1 estão representados os valores médios dos de RSCP e *Ec/No* do HNB e TEMS® *Transmitter*, colocados em diferentes localizações no TP, e também com diferentes orientações. Como referido na Secção 4.1, o HNB tem uma potência máxima de transmissão de 20 dBm (100 mW), mas, por limitações de *hardware*, a potência máxima do CPICH é apenas de 10 dBm. Com 10 dBm de potência de CPICH obteve-se, num dos testes efetuados,

¹⁰ <http://pt.scribd.com/doc/86092005/20/TEMS-TRANSMITTER>

um nível de RSCP indicado na Figura 5.16, onde se verifica um excelente nível de sinal *indoor*, com todas as medidas recolhidas a obter valores superiores a -77 dBm. A potência utilizada no TEMS® *Transmitter* para os testes realizados foi de 20 dBm (o TEMS® *Transmitter* transmite um canal com o SC zero e com uma potência de transmissão máxima de 10% da potência configurada, neste caso será de 10 dBm) e foram testados dois tipos de antenas. No final, a configuração que obteve uma melhor simulação da área de cobertura do HNB, foi obtida com a colocação de uma antena omnidirecional num tripé com uma potência de transmissão de 10 dBm. A distribuição de RSCP resultante desta configuração está representada na Figura 5.16, obtendo-se um nível médio de RSCP igual a -59,36 dBm e um valor médio de E_c/N_0 de -3,5 dB, como se pode verificar na Tabela 5.1.

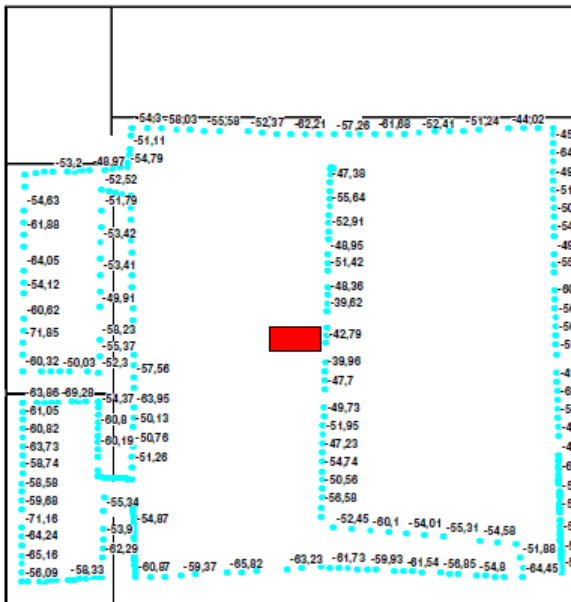


Figura 5.15 - Nível de CPICH RSCP do HNB *Enterprise* (Centro TP, Tripé – orientação lateral).

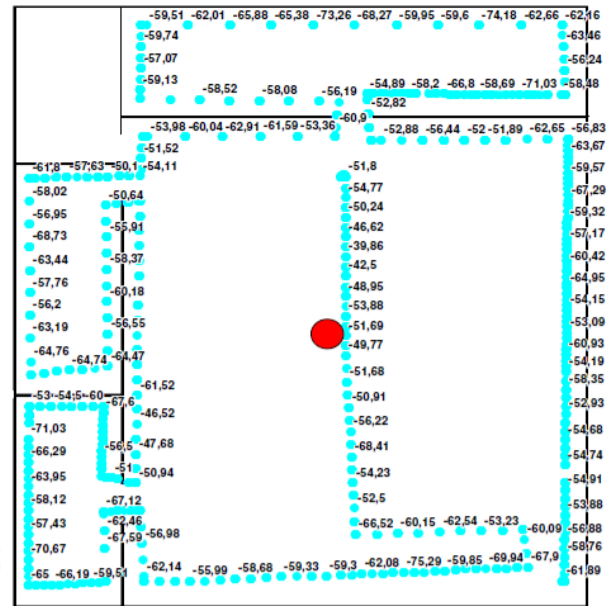


Figura 5.16 - Nível de CPICH RSCP do TEMS® *Transmitter* com antena omnidirecional.

Depois de determinada a configuração do TEMS® *Transmitter* que melhor simula um HNB *Enterprise*, este foi colocado em diferentes zonas da empresa, representada na Figura 5.1, e efetuadas as medidas do nível de RSCP resultantes das várias posições onde o TEMS® *Transmitter* foi colocado. Após efetuados vários testes no terreno, verificou-se que seria necessário instalar pelo menos 3 HNBs *Enterprise* para obter uma cobertura homogênea no interior da empresa. Na Figura 5.17, encontram-se os resultados obtidos da colocação do TEMS® *Transmitter* na localização onde serão instalados cada um dos HNBs *Enterprise*.

Antes dos HNBs serem ligados têm de ser devidamente parametrizados, de seguida será descrita a configuração inicial a atribuir a cada HNB.

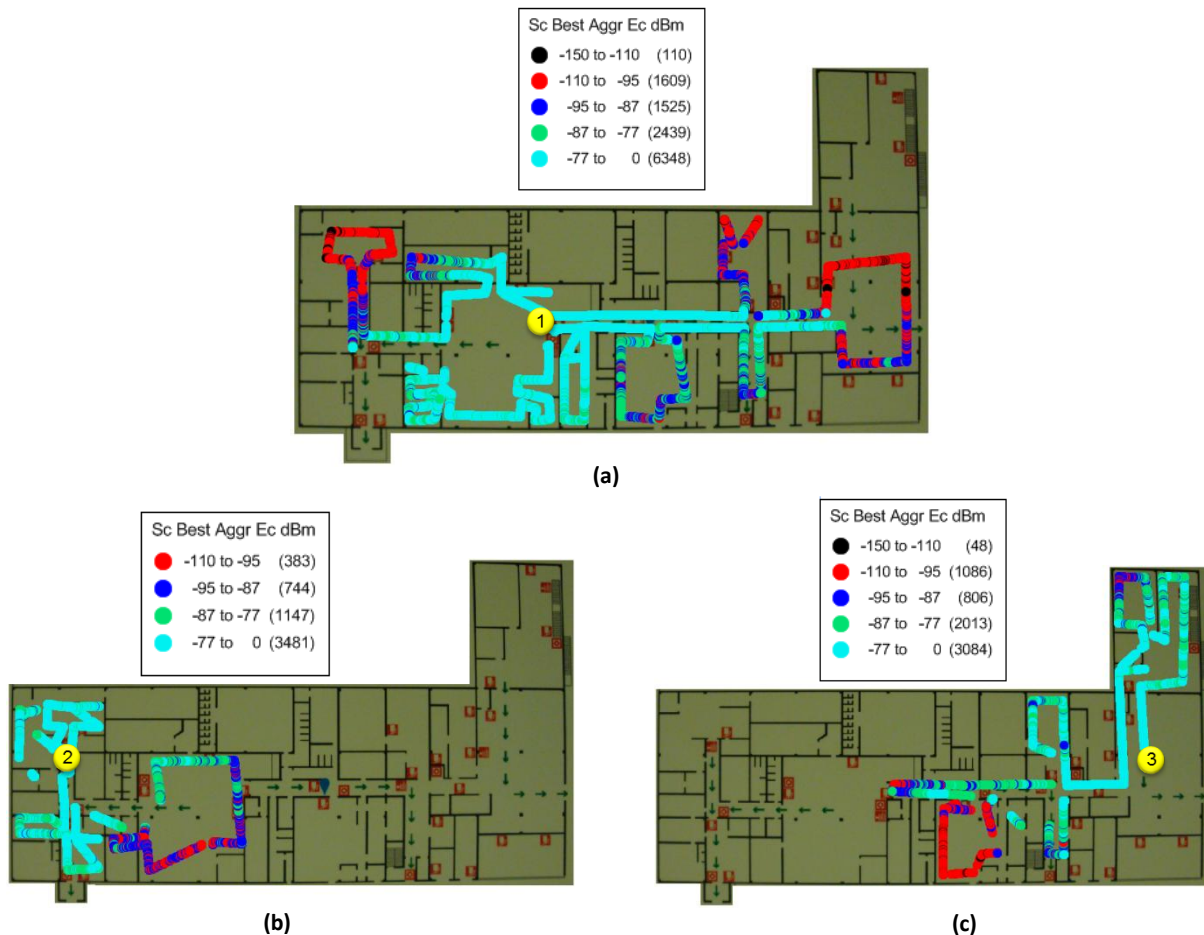


Figura 5.17 – Nível de sinal obtido para cada uma das posições do TEMS® Transmitter; (a) Posição 1, (b) Posição 2, (c) Posição 3.

5.3.2 Configuração inicial dos HNBs

Antes de ligar cada um dos HNBs instalados de acordo com a Figura 5.17, é necessário definir a parametrização que cada um irá obter do HMS no processo de auto-configuração (descrito na Secção 2.9.1). Neste sentido, é necessário definir como serão configuradas as várias opções de configuração enunciadas na Secção 3.1.1. De acordo com o referido na Secção 3.3, para que os HNBs possam funcionar em grupo co-localizado, como ilustrado na Figura 5.17, é necessário criar um conjunto de parametrizações específicas no HMS, que permite a cada um dos HNBs detetar os HNBs vizinhos, comunicar entre si e estabelecer relações de vizinhança, essenciais para a mobilidade dentro do grupo de HNBs. Este conjunto de parametrizações constitui o perfil de grupo que será criado no HMS, sendo posteriormente enviado para todas os HNBs do grupo via DSL (como descrito na Secção 3.3.1).

Cada HNB instalado possui um conjunto de parametrizações individuais (perfil de

femto) e um conjunto de parametrizações de grupo (perfil de grupo). As parametrizações de grupo só são configuradas quando existe a necessidade. O perfil de grupo sobrepõe-se ao perfil de femto, assim, caso os parâmetros comuns aos dois perfis tenham valores diferentes, o que ficará configurado no final será o indicado no perfil de grupo, como acontece no caso do LAC.

Relativamente às configurações individuais, estas são semelhantes às configuradas no HNB *Enterprise* testado no Capítulo 4. Desta forma, os três HNB irão partilhar o mesmo perfil de femto com as seguintes características:

- O SC de funcionamento do HNB será escolhido automaticamente pelo próprio HNB (durante o processo de auto-configuração) de uma lista de três SCs definida pelo operador. De notar que o operador apenas tem definidos dois SC dedicados para uso exclusivo das femto-células (Secção 4.2), neste caso serão necessários três SC (um para cada HNB), por isso o terceiro SC, PSC3 (Tabela 5.2), a adicionar à lista terá de ser partilhado com a rede macro UMTS. Logo, o PSC3 foi determinado com base no estudo das condições rádio UMTS, descritas na Secção 5.2.1, sendo escolhido um SC, de entre os SC disponíveis na zona de localização da empresa, que não constava na lista de SC das células macro que estão a servir nessa zona (Figura 5.2). Tendo em conta os desafios de mobilidade descritos na Secção 3.4.3, como o número de HNBs a utilizar é reduzido, decidiu-se atribuir um SC diferente a cada HNB.
- Os HNBs vão utilizar uma portadora dedicada, f1(nunca utilizada pela rede macro UMTS), reduzindo assim a interferência entre as femto-células e as macro-células.
- Os valores do LAC e RAC, são também definidos pelo operador. Para o LAC foram definidos 22 valores (L1 a L23) e para o RAC foram definidos 2 valores (R1 e R2). O HNB irá escolher um valor de cada automaticamente.
- Todos os HNBs estarão a funcionar em modo fechado, sendo necessário criar uma lista de acesso (ACL).
- A potência do CPICH será fixa e está configurada para a máxima potência (10 dBm), de acordo com a parametrização indicada na Tabela 4.4.

Na Tabela 5.2 encontra-se um resumo dos parâmetros configurados para os HNBs *Enterprise*.

Tabela 5.2 - Valores dos parâmetros RF das femto-células instaladas.

Freq. portadora	SC	LAC	RAC
UL: f1 DL: f2	PSC1/PSC2/PSC3	L1-L23	R1/R2

Um grupo de HNBs, possui um conjunto de características específicas, descritas na Secção 3.3. Na Tabela 5.3 está indicada a configuração dos principais parâmetros do perfil de grupo criado para os HNBs instalados. O grupo criado é identificado no HMS pelo parâmetro *GroupID*, neste caso com o valor 2. Este é o valor que terá de ser configurado no parâmetro *hnbGroupId*, de cada um dos HNBs instalados (processo descrito na Secção 3.3.1). É possível atribuir um LAC e SAC específico para cada HNB utilizar em chamadas de emergência, nesta fase inicial o LAC_{SOS} e SAC_{SOS} terão o mesmo valor do LAC e SAC.

Após concluído o processo de auto-configuração, verificou-se, via HMS, se os parâmetros estavam configurados corretamente, os resultados estão representados na Tabela 5.4. Quando um HNB está configurado em grupo, cria mais uma lista de células vizinhas onde constam às femto-células vizinhas que cada HNB consegue detetar, durante o processo de auto-configuração e auto-otimização. Por isso, quando o HNB *Enterprise* foi testado individualmente, no Capítulo 4, apenas criou as listas de células vizinhas GSM e UMTS (Tabela 4.3).

Tabela 5.3 - Valores dos parâmetros do perfil de grupo criado.

Parâmetros	Valores
<i>GroupID</i>	2
SAC	SAC_G2
SAC_{SOS}	SAC_G2
LAC	LAC_G2
LAC_{SOS}	LAC_G2
RAC	RAC1
PSClist	[PSC1, PSC2, PSC3]
ACL	[lista de IMSIs correspondentes aos números de telefone dos clientes]

Da observação da Tabela 5.4, verifica-se que todos os HNBs estão configurados no grupo 2. Os valores que se encontram entre parêntesis, são aqueles que cada HNB irá configurar caso deixe de pertencer ao grupo 2.

Durante o processo de construção da lista de femto-células vizinhas, assim que o HNB deteta um HNB vizinho, adiciona-o na lista de femto-células e comunica-lhe, através da interface *Iurh* (Secção 3.3.2), que o vai considerar como HNB vizinho, estabelecendo assim as relações de vizinhança com os vários HNBs vizinhos. Caso dois HNBs pertencentes ao

mesmo grupo não constem na lista de femto-células vizinhas um do outro, não será possível estabelecer *handovers* entre eles, como acontece com o HNB2 e o HNB3 (Tabela 5.4). Sendo assim, apenas será possível estabelecer *handovers* entre o HNB1 e HNB2, e entre o HNB1 e HNB3. Neste caso, se se pretender a existência de *handovers* diretamente entre o HNB2 e o HNB3, terão de ser definidas relações de vizinhança manualmente via HMS.

Concluído o período de auto-configuração dos HNBs e configurados os IMSIs na ACL do grupo, foram executados um conjunto de testes para averiguar a cobertura, disponibilizada pelos três HNBs do grupo, no interior da empresa. De seguida serão apresentados os resultados provenientes de uma chamada CS de voz iniciada no interior da empresa.

Na Figura 5.18 é possível verificar os limites de cada uma das femto-células criadas pelo HNB1, HNB2 e HNB3. O nível de sinal UMTS no interior da empresa é bastante bom (Figura 5.19), apresentando um valor médio de RSCP de -74,8 dBm. O mesmo se pode concluir relativamente à qualidade do sinal, na Figura 5.20 e Figura 5.24 é possível visualizar a distribuição dos valores de *Ec/No* (com valor médio de -3.04 dB), onde se verifica que praticamente toda a área de cobertura tem um nível de *Ec/No* superior a -7 dB, o que corresponde a 98% das medidas recolhidas. Estes níveis de RSCP e de *Ec/No* no interior do edifício, fazem com que o UE permaneça registado nas femto-células sempre que este esteja no interior do edifício. Desta forma, como se pode verificar na Figura 5.21, a potência utilizada pelo UE para conseguir comunicar com a femto-célula de serviço é bastante baixa apresentando um valor médio de -30,21 dBm, contra o valor médio de 10,43 dBm obtido antes da instalação dos HNBs, onde 81% das medidas de potência recolhidas têm valores superiores a 10 dBm, como se pode verificar na Figura 5.25.

Tabela 5.4 - Parametrização e lista de HNBs vizinhos após conclusão da auto-configuração.

Parâmetros	Valores		
	HNB2	HNB1	HNB3
<i>hnbGroupId</i>	2 (0)	2 (0)	2 (0)
SAC	SAC_G2 (SAC2)	SAC_G2 (SAC1)	SAC_G2 (SAC3)
SAC _{SOS}	SAC_G2 (SAC2)	SAC_G2 (SAC1)	SAC_G2 (SAC3)
LAC	LAC_G2 (LAC2)	LAC_G2 (LAC1)	LAC_G2 (LAC3)
LAC _{SOS}	LAC_G2 (LAC2)	LAC_G2 (LAC1)	LAC_G2 (LAC3)
RAC	RAC1	RAC1	RAC1
PSCList	PSC2	PSC1	PSC3
HNBs Vizinhos	HNB1	HNB2 e HNB3	HNB1

Os resultados obtidos depois da instalação dos HNBs demonstram uma melhoria bastante significativa em comparação com os resultados obtidos antes da instalação dos HNBs

no interior da empresa, obtendo-se um melhor nível de RSCP e de Ec/No permitindo reduzir a potência de transmissão (Tx) do UE, como se pode verificar na Figura 5.23, Figura 5.24 e Figura 5.25. A rede femto-celular instalada permite cumprir o critério de cobertura adotado (uma cobertura mínima de 95% da área de cobertura, e ter como limiar de potência o valor de -95 dBm). Dos testes realizados, obteve-se uma cobertura existente de 96% da área de cobertura contra os apenas 3,8% obtidos antes da instalação do grupo de femto-células. Na Figura 5.22 está explícito o ganho em termos de RSCP, obtido com instalação dos HNBS. Para 50% da percentagem de amostras recolhidas, é possível verificar um aumento de aproximadamente 38,37 dB, no nível de RSCP obtido no interior da empresa.

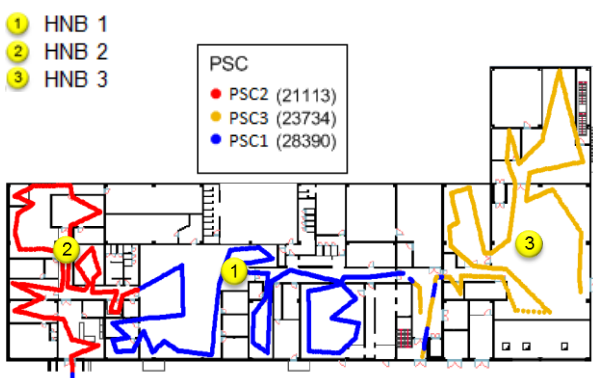


Figura 5.18 – Scrambling Codes (SC) do grupo



Figura 5.19 – Nível de CPICH RSCP do grupo



Figura 5.20 – Nível de CPICH Ec/No do grupo



Figura 5.21 – Nível de potência transmitida pelo UE.

Relativamente à mobilidade em modo dedicado, é possível estabelecer *handovers* entre os HNBS e entre estes e a rede macro GSM, o que demonstra que as relações de vizinhança foram criadas com sucesso. Como se pode verificar na Figura 5.18, Figura 5.19, Figura 5.20 e Figura 5.21, a chamada iniciada na área de cobertura do HNB3 mantém-se na rede femto-celular até o UE chegar ao corredor CO2 junto a entrada de serviço (ES), nessa zona o UE faz *handover* para GSM, por isso é que se verifica uma descontinuidade nos resultados do *walk test*. Para continuar o *walk test*, foi iniciada uma nova chamada CS de voz

no HNB1, sendo posteriormente terminada no exterior da empresa junto à entrada principal (E). Durante o percurso entre o corredor CO2 e a entrada principal (E) o UE efetuou o *handover* do HNB1 para o HNB2 (descrito na Secção 3.4.1), e já no exterior da empresa efetuou o *handover* para GSM (descrito na Secção 3.4.2).

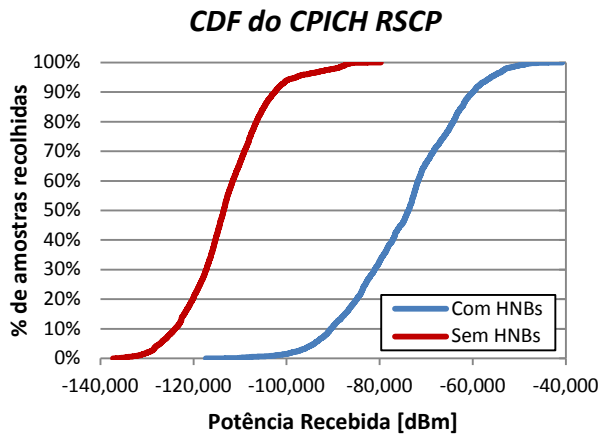


Figura 5.22 – CDF do CPICH RSCP, com e sem HNBs.

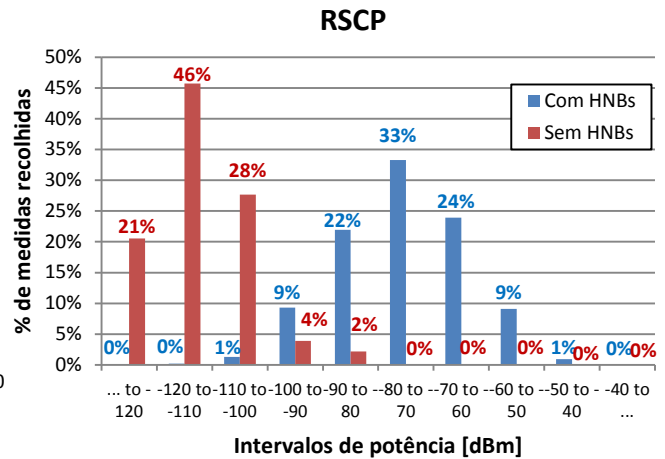


Figura 5.23 – Distribuição dos valores CPICH RSCP, com e sem HNBs.

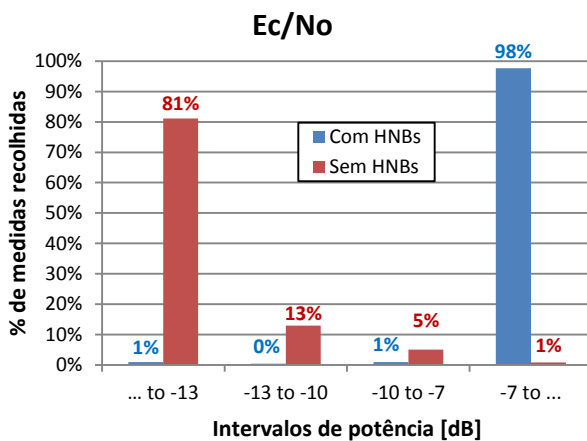


Figura 5.24 – Distribuição dos valores CPICH E_c/N_0 , com e sem HNBs.

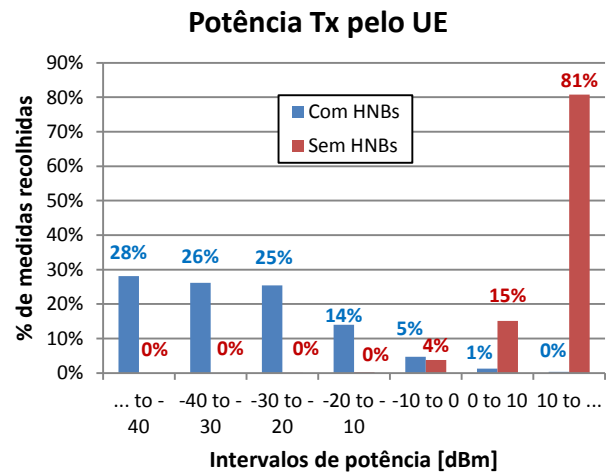


Figura 5.25 – Distribuição dos valores de potência Tx pelo UE, com e sem HNBs.

A zona do corredor CO2 encontra-se no limite das femto-células criadas pelo HNB1 e HNB3, como se pode verificar na Figura 5.18. Assim, nessa zona, os níveis de RSCP e de E_c/N_0 do HNB1 e HNB3 atingem valores muito próximos e que se degradam com facilidade à medida que o UE se desloca em direção à entrada de serviço (ES), estas condições rádio provocam um efeito de *ping-pong* de *handovers* entre o HNB1 e o HNB3 (Figura 5.26). Este efeito não se verifica na transição da HNB1 para o HNB2, pois o nível de sinal do HNB2 sobrepõem-se ao do HNB1 assim que o UE se desloca do *open space* (OS2) para o corredor CO3.

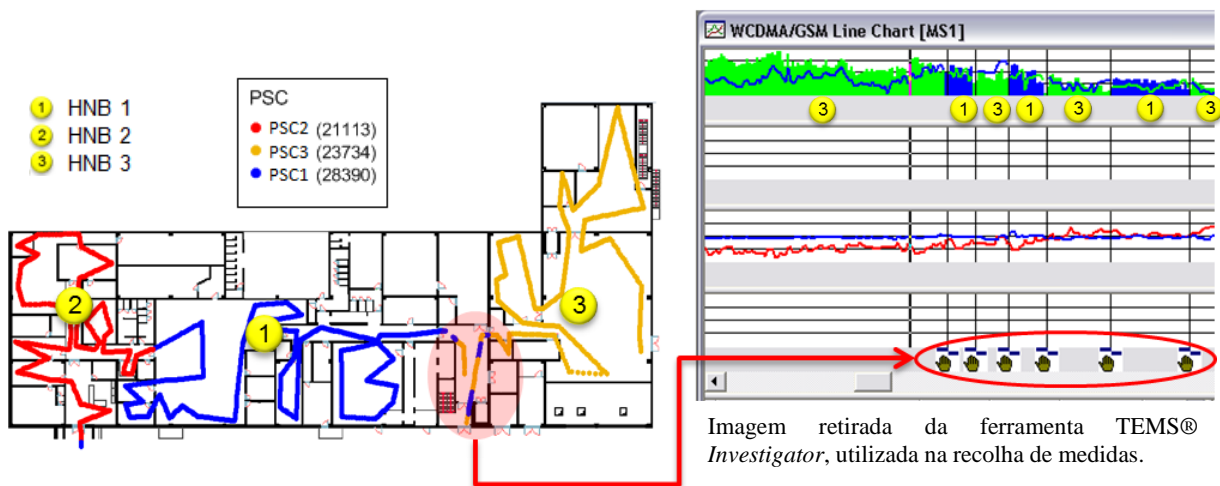


Figura 5.26 - Efeito *ping-pong* entre o HNB1 e HNB3.

5.4 Otimização

Apesar dos bons resultados obtidos em termos de área de cobertura e qualidade de sinal, descritos anteriormente, existem alguns pontos onde a rede femto-celular instalada pode ser otimizada. Nas secções seguintes será apresentado um conjunto de testes cujo objetivo será melhorar o desempenho da rede instalada. Através de um conjunto de cenários de teste, constituídos por diferentes parametrizações, será testado em primeiro lugar as capacidades SON que os HNBs oferecem em termos de ajuste automático da área de cobertura através do cálculo dinâmico da potência do CPICH, como descrito na Secção 3.1.1.3. Os testes realizados de seguida irão incidir sobre a melhoria do processo de *handover* entre HNBs e entre estes e a rede macro GSM, procurando solucionar eventuais problemas como o efeito de *ping-pong* encontrado entre o HNB1 e o HNB3. Pretende-se com os teste realizados, otimizar o desempenho da rede femto-celular procurando não alterar a localização inicial dos HNBs, representada na Figura 5.17.

5.4.1 Controlo da área de cobertura

No processo de planeamento de uma rede femto-celular, existe um conjunto de opções de configuração, descritas na Secção 3.1.1, que operador tem de tomar relativamente ao funcionamento dos HNBs. O objetivo dos testes realizados nesta secção será avaliar qual das formas de configuração da potência do CPICH, descritas na Secção 3.1.1.3, permite obter melhores resultados em termos de cobertura e qualidade de sinal no interior do edifício.

De acordo com o descrito na Secção 3.1.1.3, o HNB utilizado neste trabalho, testado no Capítulo 4, permite definir o valor da potência do CPICH de três formas: pode ser um valor fixo pré-definido, pode ser determinado de forma dinâmica tendo em conta o nível sinal recebido pelo UE (utilizando a equação 3.1) ou tendo em conta o nível de Ec/Io experimentado pelo UE mais o nível médio de RSSI das células UMTS vizinhas (utilizando a equação 3.4). Os parâmetros do perfil de femto envolvidos nas configurações estão descritos na Secção 3.1.1.3.

Para avaliar o desempenho da rede obtida para cada uma das configurações de ajuste da potência do CPICH, foram definidos três cenários de teste:

- **Cenário TS1:** Configura a potência do CPICH com um valor fixo ($pilotPowerAdjustMode = mimbased$) de 10 dBm ($CPICHPower = 10$), valor máximo permitido pelo HNB *Enterprise* (Esta parametrização corresponde à configuração inicial cujos resultados estão representados na Figura 5.18, Figura 5.19, Figura 5.20 e Figura 5.21).
- **Cenário TS2:** Permite ao HNB determinar dinamicamente a potência do CPICH, tendo em conta o nível de RSCP recebido pelo UE ($pilotPowerAdjustMode = rscpBased$), utilizando a equação 3.1.
- **Cenário TS3:** Permite ao HNB determinar dinamicamente a potência do CPICH, tendo em conta o nível de Ec/Io das células vizinhas ($pilotPowerAdjustMode = ecIoBased$), utilizando a equação 3.4.

Tabela 5.5 - Cenários de teste do ajuste da potência do CPICH.

Parâmetros	Valor		
	TS1	TS2	TS3
<i>pilotPowerAdjustMode</i>	<i>mimBased</i>	<i>rscpBased</i>	<i>ecIoBased</i>
<i>CPICHPower</i> [dBm]	10	Calculado pelo HNB através da equação 3.1	Calculado pelo HNB através da equação 3.4
<i>TargetCpichRSCP</i> [dBm]	-100	-100	-100
<i>TargetCpichEcIo</i> [dB]	-10	-10	-10
<i>indoorPenetrationLoss</i> [dB]	30	30	30
<i>maxCoverageDist</i> [m]	30	30	30
Período de aplicação	12 – 26/6/2012	27/6 – 4/7/2012	5 – 12/7/2012
Data da recolha de medidas	26/6/2012	3/7/2012	11/7/2012

Na Tabela 5.5 estão indicados os valores a atribuir a cada um dos parâmetros para configurar cada um dos cenários descritos. Cada cenário de teste esteve configurado nos HNBs durante 8 dias (com a exceção do TS1 que esteve configurado durante 12 dias, como se

verifica na Figura 5.36 e Figura 5.37), de forma a permitir que o processo de auto-otimização dos HNBs, executado nas horas de menor tráfego, determinasse o melhor valor para a potência do CPICH. A recolha de medidas foi sempre executada no dia imediatamente antes de ser configurado o próximo cenário de teste. De seguida são apresentados os resultados provenientes de uma chamada CS de voz iniciada no interior da empresa.

5.4.1.1 Análise da área de cobertura e qualidade de sinal

Sempre que a parametrização relativa a cada um dos cenários de teste é configurada, cada HNB vai fazer o *download* do novo perfil de femto, efetuando novamente o processo de auto-configuração, descrito na Secção 2.9.1. Cada HNB irá escolher novamente um SC, para transmitir em DL, da lista de SCs (*PSClist*) representada na Tabela 5.3. Por isso existe a possibilidade de se verificar uma alteração de SCs entre os HNBs, mas em nenhuma das alterações de parametrização se verificou essa situação, como se pode observar na Figura 5.27 e Figura 5.28, todos os HNB mantiveram o SC que tinham inicialmente (cenário TS1).

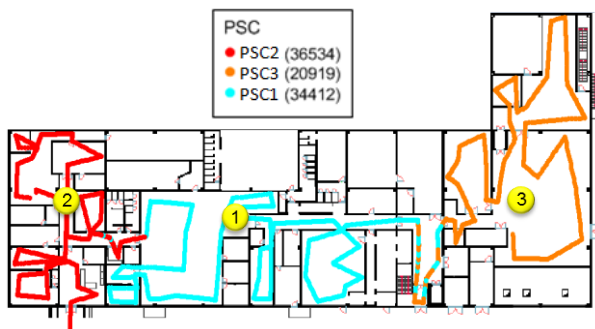


Figura 5.27 - Scrambling codes - TS2

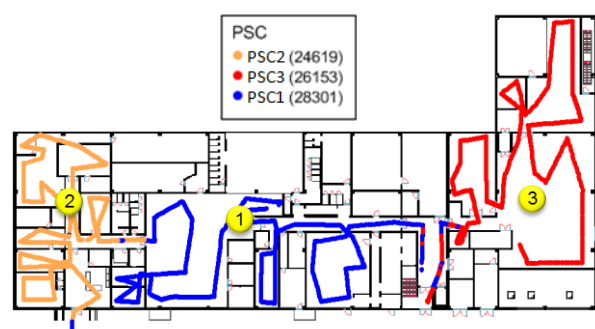


Figura 5.28 - Scrambling codes - TS3

Após a conclusão do processo de auto-configuração, a potência do CPICH obtida com a configuração dos cenários TS2 e TS3, calculada a partir das equações 3.1 e 3.4 respetivamente, tem um valor de -3 dBm. Apesar da diminuição da potência do CPICH relativamente à configuração do cenário TS1 (com uma potência de CPICH de 10 dBm), não se verificaram alterações significativas relativamente às zonas onde cada HNB está a servir, continuando a verificar-se o efeito de *ping-pong* de *handovers* entre o HNB1 e o HNB3 no corredor CO2, facilmente identificável, na Figura 5.27 e Figura 5.28, pelo segmento de medidas a tracejado constituído pelas cores correspondentes aos SCs pertencentes ao HNB1 (PSC1) e HNB3 (PSC3). O critério de cobertura adotado deixa de ser cumprido nos cenários TS2 e TS3, obtendo-se uma cobertura existente de 82% da área de cobertura no cenário TS2 e de 84% no cenário TS3.

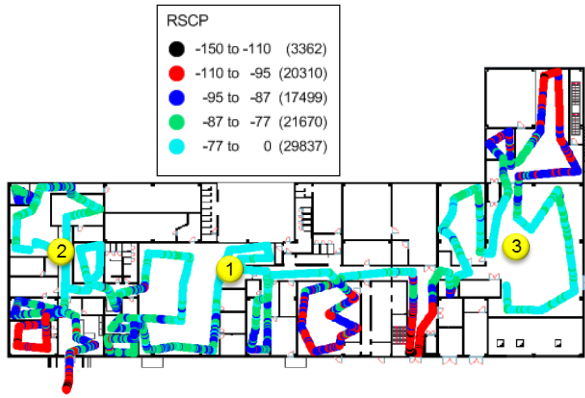


Figura 5.29 - Nível de CPICH RSCP - TS2.

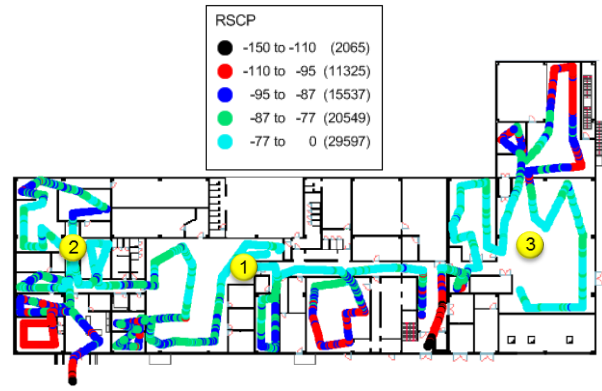


Figura 5.30 - Nível de CPICH RSCP - TS3.

O nível de RSCP médio obtido nos cenários TS2 e TS3 é muito semelhante, apresentando valores de -82,8 dBm (com desvio padrão de 12,2 dB) e -82,6 dBm (com desvio padrão de 12,8 dB) respetivamente, no entanto no cenário TS1 obteve-se um valor médio de RSCP de -74,8 dBm (com desvio padrão de 11,7 dB), aproximadamente 12 dB superior ao nível médio obtido nos cenários TS2 e TS3. A Figura 5.31 reflete os valores referidos, nesta é possível verificar que o cenário TS1 apresenta melhores resultados que os obtidos nos cenários TS2 e TS3, onde, nos últimos, se verifica que a percentagem de medidas recolhidas entre os -70 dBm e -50 dBm (muito bom nível de sinal) é em média 7,3% inferior à obtida no cenário TS1.

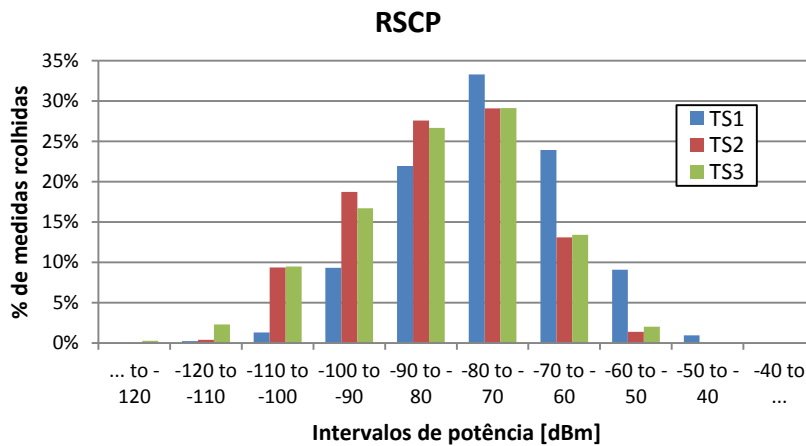


Figura 5.31 - Distribuição dos valores de CPICH RSCP, para os cenários TS1, TS2 e TS3.

A diminuição da potência do CPICH de 10 dBm (cenário TS1) para -3 dBm (cenários TS2 e TS3), degradou o nível de RSCP obtido nas zonas mais distantes dos HNBS. Na Figura 5.29 e Figura 5.30, é possível identificar três zonas problemáticas onde se obtiveram valores de RSCP baixos (≤ -110 dBm): na zona da manutenção (ZM, Figura 5.1), no gabinete junto da receção (G1, Figura 5.1) e no corredor CO2.

Relativamente à qualidade de sinal no interior do edifício, a Figura 5.32 e a Figura

5.33 mostram os resultados obtidos nos cenários TS2 e TS3, respetivamente. O nível médio de E_c/N_0 obtido no cenário TS1 é de -3 dB (com desvio padrão de 1,7 dB), no cenário TS2 é de -4,7 dB (com desvio padrão de 3,7 dB) e no cenário TS3 é de -5,2 (com desvio padrão de 4,4 dB). Apesar de no cenário TS1 se obter um melhor nível de E_c/N_0 , em termos gerais, a qualidade do sinal obtido no interior da empresa em cada um dos cenários de teste é muito boa, com uma distribuição de potência muito semelhante, como se pode verificar na Figura 5.34. No entanto identificam-se também, na Figura 5.32 e Figura 5.33, a existência de zonas onde o nível de E_c/N_0 atinge valores ≤ -13 dB, nomeadamente no gabinete G1, na cantina (CA, Figura 5.1), no corredor CO2 na zona de manutenção (ZM). Nas mesmas divisões, os resultados obtidos no TS1 apresentam um nível de E_c/N_0 a variar entre os -10 e -7 dB.

O facto do HNB ser instalado no interior da empresa (permitindo um maior isolamento da rede UMTS exterior) utilizando uma portadora dedicada, contribui bastante para o aumento da qualidade de sinal *indoor*, explicando os resultados representados na Figura 5.35. Uma boa cobertura no interior do edifício associada a uma boa qualidade de sinal, permite ao UE utilizar uma menor potência de transmissão para conseguir comunicar com as femto-células, o que se traduz numa diminuição da interferência.

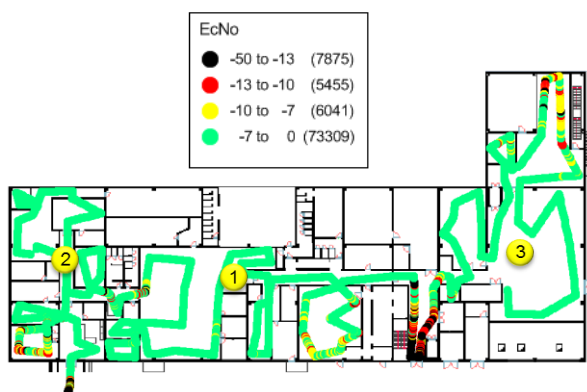


Figura 5.32 - Níveis e CPICH E_c/N_0 - TS2.

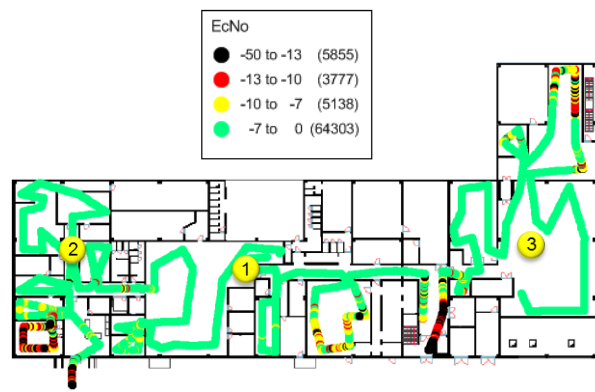


Figura 5.33 - Níveis de CPICH E_c/N_0 - TS3.

Na Figura 5.35, é possível observar a consequência da diminuição do nível da potência do CPICH obtido nos cenários TS2 e TS3, que se traduz no aumento da potência de transmissão do UE. Verifica-se que a potência de transmissão utilizada pelo UE no cenário TS1 foi inferior à utilizada nos cenários TS2 e TS3 (Tabela 5.6), obtendo-se um valor médio de -30,2 dBm (com um desvio padrão de 14,1 dBm) no cenário TS1, contra os -20,9 dBm (com um desvio padrão de 14,8 dBm) obtidos no cenário TS2, e os -20,8 dBm (com um desvio padrão de 15,1 dBm) obtidos no cenário TS3.

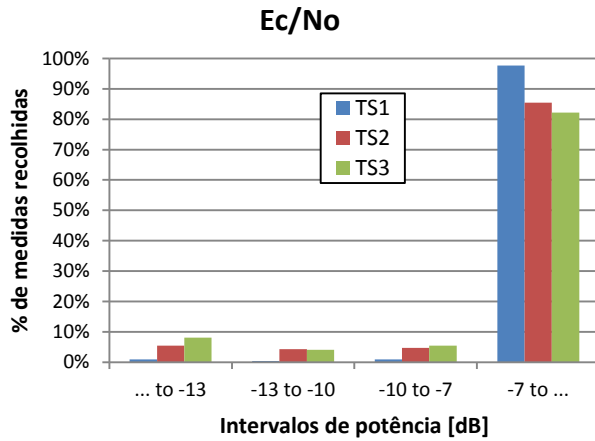


Figura 5.34 - Distribuição dos valores de potência de CPICH *Ec/No*, para os cenários TS1, TS2 e TS3.

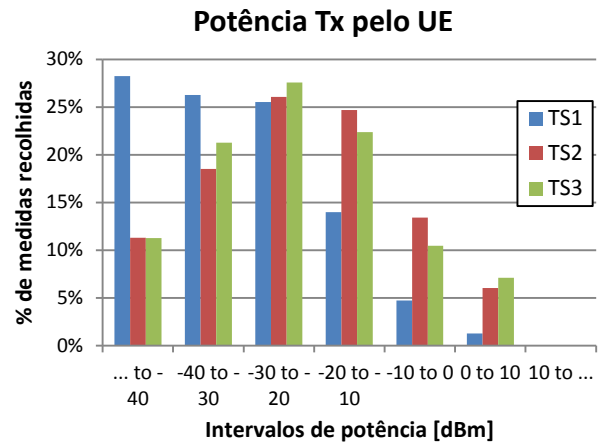


Figura 5.35 - Distribuição dos valores de potência Tx pelo UE, para os cenários TS1, TS2 e TS3.

Na Tabela 5.6 encontra-se um resumo dos principais resultados obtidos nos cenários de teste TS1, TS2 e TS3.

Tabela 5.6 - Resumo dos resultados obtidos nos cenários de teste: TS1, TS2 e TS3.

Cenários de Teste	CPICH RSCP		CPICH <i>Ec/No</i>		Pot. TX pelo UE		Cobertura Atingida [%]
	Valor Médio [dBm]	Desvio Padrão [dB]	Valor Médio [dB]	Desvio Padrão [dB]	Valor Médio [dBm]	Desvio Padrão [dB]	
TS1	-74,8	11,7	-3	1,7	-30,2	14,1	96
TS2	-82,8	12,2	-4,7	3,7	-20,9	15,1	83
TS3	-82,6	12,8	-5,2	4,4	-20,8	14,8	84

Da observação dos KPIs, disponibilizados pela Vodafone Portugal (descritos na Secção 3.5.1), verifica-se que não existe impacto no desempenho da rede entre as várias configurações aplicadas nos cenários de teste TS1, TS2 e TS3, sendo praticamente impercetível o período em que cada um dos cenários esteve aplicado, como se pode observar na Figura 5.36 e Figura 5.37, que mostram a taxa de sucesso de chamadas de voz e de dados, respetivamente. Nestas figuras verifica-se que durante o período de aplicação dos cenários TS2 e TS3, as taxas de sucesso das chamadas de voz e dados estão, na maior parte dos dias, a 100%.

Neste cenário de aplicação, representado na Figura 5.1, onde se verifica que o nível de sinal UMTS (proveniente das macro-células UMTS) no interior do edifício é baixo (Figura 5.3), conclui-se que a configuração inicial (cenário TS1, onde se configura a potência do CPICH com um valor fixo) é a melhor solução em termos de cobertura e de qualidade de sinal, face à determinação dinâmica da potência do CPICH utilizada nos cenários TS2 e TS3.

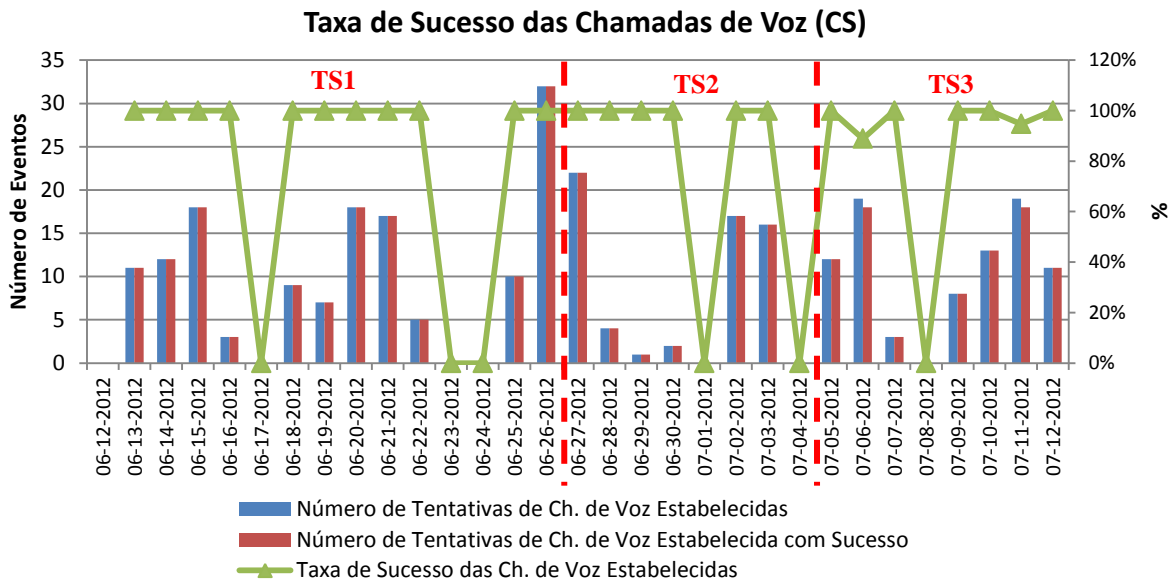


Figura 5.36 - Taxa de Sucesso das Chamadas de Voz (CS).

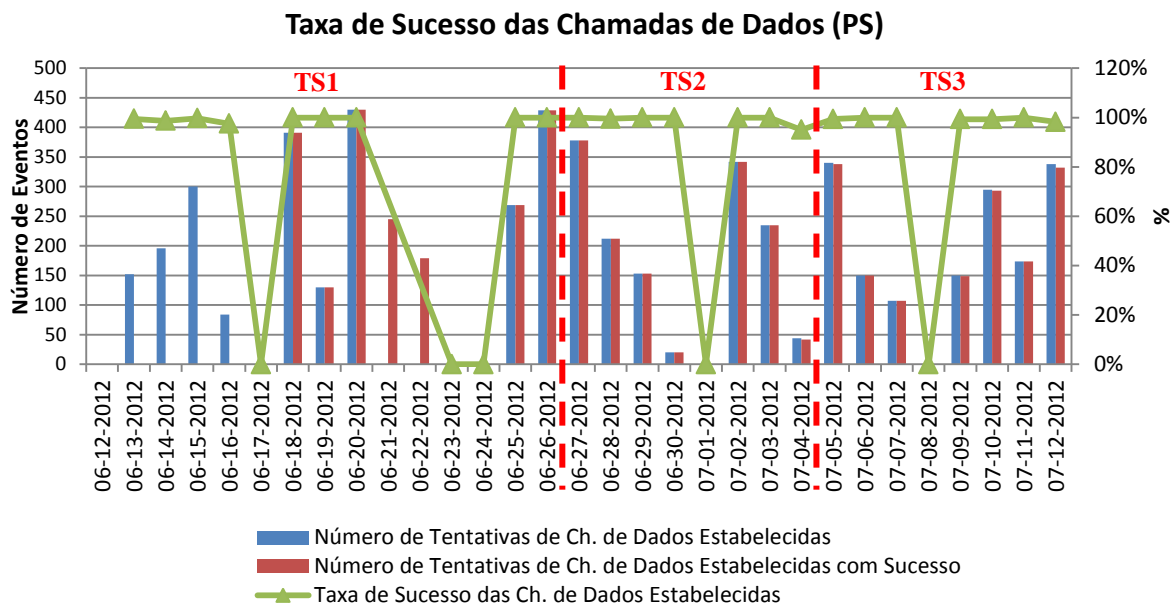


Figura 5.37 - Taxa de Sucesso das Chamadas de Dados (PS).

Os resultados obtidos nos cenários TS2 e TS3 são muito próximos (Tabela 5.6), no entanto se a instalação dos HNBS fosse realizada num edifício onde existisse maior penetração do sinal proveniente das estações macro *outdoor*, é possível que a determinação dinâmica da potência do CPICH, feita pelo HNB através da equação 3.4, obtivesse melhores resultados, uma vez que tem em conta o nível médio de RSSI das células vizinhas.

Assim, perante os resultados obtidos, a configuração testada no cenário TS1 foi novamente configurada em todas as femto-células do grupo, sendo esta a opção de configuração da potência do CPICH que estará configurada durante a realização de todos os testes que se seguem.

5.4.2 Handovers entre HNBs

Nesta secção será estudada a parametrização que permite otimizar o processo de *handover* entre os HNBs do grupo de femto-células instalado. Com o valor do CPICH configurado na potência máxima (10 dBm), obtiveram-se os melhores resultados em termos de cobertura e qualidade de sinal no interior do edifício (Tabela 5.6). No entanto, durante a recolha das medidas relativas a cada um dos cenários de teste apresentados na Secção 5.4.1, verificou-se a existência de um efeito de *ping-pong* de *handovers* entre as femto-células criadas pelo HNB1 e HNB3, no corredor CO2 representado na Figura 5.26. Este corredor serve como zona de passagem para entrada e saída da maior parte dos funcionários da empresa, neste corredor estão também localizadas máquinas de venda de refrigerantes e de café, sendo uma zona onde existe sempre muita circulação de UEs. Por isso, a existência de um efeito de *ping-pong* entre o HNB1 e HNB3 verificado nesta zona torna-se muito problemático, devido à má utilização dos recursos rádio (necessários para efetuar o processo de *handover*), afetando o desempenho da rede.

De acordo com o descrito na Secção 3.4.1, o processo de *handover* entre HNBs é despoletado pelo nível do P-CPICH E_c/No da femto-célula de serviço, assim que este atinge valores abaixo do nível configurado pelo operador o UE envia um MR em UL, e o HNB configura um evento 1C, dando início ao processo de *handover*. O evento 1C é controlado através de dois valores, *time to trigger* (parâmetro $IcTimeToTrigger$) e histerese (parâmetro $IcHysteresis$). O *time to trigger* corresponde ao período de tempo (em ms) que o UE espera até despoletar o processo de *handover*. Assim que o valor do P-CPICH E_c/No existente mais o valor da histerese ultrapassa o valor mínimo configurado pelo operador (condições rádio não ideais), é iniciada a contagem do período correspondente ao *time to trigger*. Durante esse período de tempo, se as condições rádio voltarem ao normal, ou seja, se o valor do P-CPICH E_c/No baixar para valores aceitáveis, o processo de *handover* não é despoletado, caso contrário o *handover* para a nova femto-célula será executado. O valor da histerese corresponde ao valor (em dBs) que é adicionado ao nível do P-CPICH E_c/No existente e permite controlar o número de eventos que o UE envia (em UL) para despoletar o processo de *handover*. Um valor elevado de histerese vai fazer atrasar o processo de *handover* para a nova célula. Através da manipulação destes parâmetros é possível controlar o número de *handovers* executados entre duas femto-células. Um valor muito baixo de *time to trigger* e de histerese, vai resultar num efeito de *ping-pong* entre femto-células. Por outro lado, a utilização de um valor muito elevado nestes parâmetros, aumenta o risco da queda de chamadas devido à

degradação da qualidade do sinal do HNB de origem antes do processo de *handover* ser executado.

Nos cenários de teste criados, descritos na Tabela 5.7, serão testadas diferentes configurações para os parâmetros *IcTimeToTrigger* e *IcHysteresis*, procurando verificar qual o cenário que permite eliminar o efeito de *ping-pong* que se verifica entre o HNB1 e o HNB3.

No cenário TS4, o valor da histerese é aumentado 2 dB em relação ao configurado inicialmente (cenário TS1), mantendo-se o valor do *time to trigger* a 320 ms. No cenário TS5, o valor do *time to trigger* é aumentado para 640 ms, e o valor da histerese volta a ser colocado a 4 dB. O cenário TS1, indica a configuração inicial dos valores do *time to trigger* (*IcTimeToTrigger*) e de histerese (*IcHysteresis*), este servirá de referência para a comparação dos resultados obtidos nos cenários TS4 e TS5. Todos os cenários de teste estiveram configurados nos HNBs durante vários dias, de forma a obter informação significativa dos KPIs.

Tabela 5.7 - Paramtrização dos cenários de teste do *handover* entre HNBs.

Parâmetros	Valores		
	TS1	TS4	TS5
<i>IcTimeToTrigger</i> [ms]	320	320	640
<i>IcHysteresis</i> [dB]	4	6	4
Período de aplicação	12/6 – 12/7/2012	13 – 19/7/2012	20 – 25/7/2012
Data da recolha de medidas	26/6/2012	13/7/2012	24/7/2012

A alteração do valor *IcHysteresis* de 4 para 6 dB, no cenário TS4, vai provocar um atraso no processo de *handover* para a femto-célula de destino, como consequência o UE irá manter-se durante mais tempo acampado na femto-célula de serviço, existindo a possibilidade de as condições rádio melhorarem, evitando assim o *handover*. Por outro lado, no cenário TS5, aumentado o valor do *time to trigger*, vai aumentar o período que o UE vai estar à espera antes de executar *tigger* de *handover* para a femto-célula de destino, durante esse período as condições rádio podem melhorar evitando assim o *handover*, esta será a teoria que se pretende analisar nesta secção. De seguida serão apresentados os resultados obtidos da aplicação dos cenários TS1, TS4 e TS5, provenientes de uma chamada CS de voz iniciada no interior da empresa.

5.4.2.1 Análise dos resultados

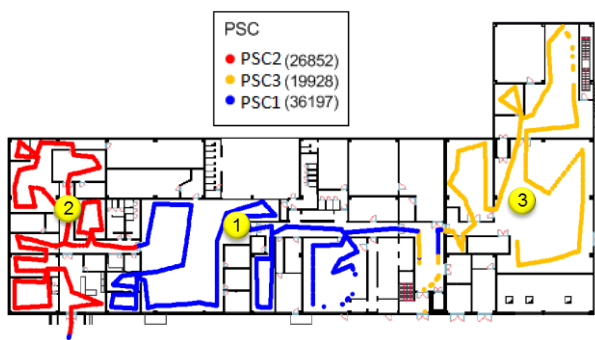


Figura 5.38 - Scrambling Codes - TS4.

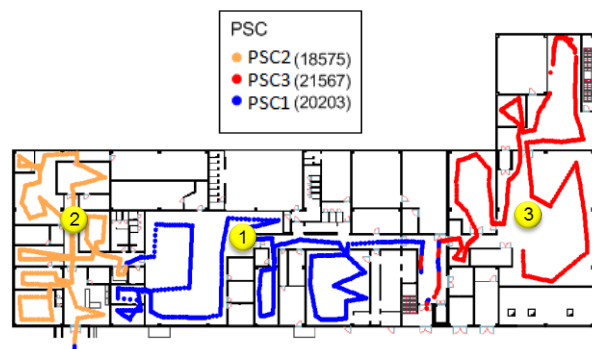


Figura 5.39 - Scrambling Codes - TS5.

A área de serviço de cada HNB é semelhante em todos os cenários de teste, como se verifica na Figura 5.20, Figura 5.38 e Figura 5.39, observando-se apenas pequenas oscilações na distribuição do nível de RSCP no interior da empresa, representado na Figura 5.42. De acordo com o critério de cobertura, no cenário TS1 obteve-se uma cobertura existente de 96% da área de cobertura, contra os 92% obtidos no cenário TS5 e os 84% obtidos no cenário TS4, apesar da potência do CPICH estar configurada na máxima potência (10 dBm) em todos os cenários (cenários TS1, TS4 e TS5).

Na Figura 5.39, verifica-se que a configuração do cenário TS5 alterou a zona de *handover* entre o HNB 1 e o HNB2, deslocando-a alguns metros para o interior do corredor CO3. No cenário TS4 (Figura 5.39) a zona de *handover* entre o HNB1 e HNB2 manteve-se praticamente na mesma localização que a observada no cenário TS1 (Figura 5.18). No entanto, continua a verificar-se o efeito de *ping-pong* entre o HNB1 e HNB3 em todos os cenários de teste aplicados (cenários TS1, TS4 e TS5). No cenário TS1 obteve-se um número de *handovers*, entre o HNB1 e o HNB3, igual a 7 (num total de 9), no cenário TS4 verificaram-se 5 *handovers* (num total de 7) e no cenário TS5 8 *handovers* (num total de 10).

Verificou-se também que a parametrização do cenário TS4 aumenta o número de falhas de *handover* para GSM (Figura 5.51). O atraso do processo de *handover* entre HNBs, proveniente do aumento do valor da histerese do evento 1C, vai provocar um aumento do número de *handovers* para GSM no interior da empresa. Ao estar a atrasar o *handover* para a nova femto-célula, as condições rádio degradam-se de tal forma que a única alternativa será efetuar *handover* para GSM. Se o nível de sinal GSM *indoor* for baixo na zona onde o UE inicia o processo de *handover* para GSM, este não será executado com sucesso. No *walk test* relativo ao cenário TS1 (cujo os resultado se encontram representados na Figura 5.18, Figura 5.19, Figura 5.20 e na Figura 5.21) obtiveram-se 3 tentativas sem sucesso de *handover* para

GSM, no cenário TS4 obtiveram-se 34 e no cenário TS5 obtiveram-se 14.

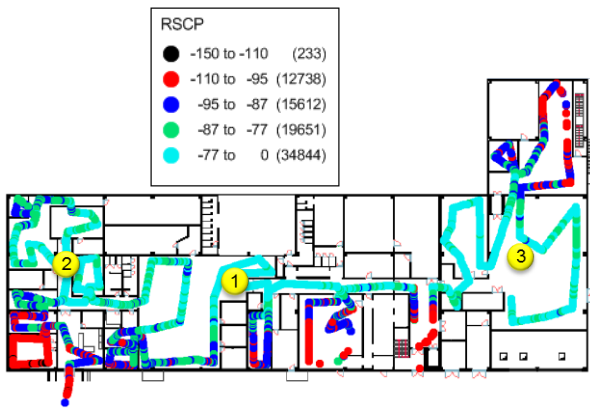


Figura 5.40 - Nível de CPICH RSCP - TS4.

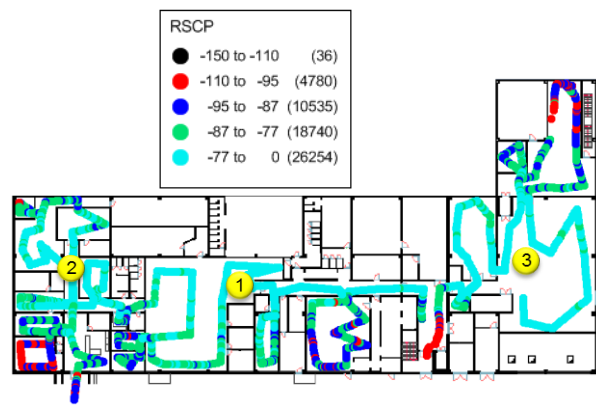


Figura 5.41 - Nível de CPICH RSCP - TS5.

No cenário TS4, a maior parte das tentativas sem sucesso de *handover* para GSM, acontecem no corredor CO2, na cantina (CA) e na zona de manutenção (ZM) (zonas com nível de RSCP baixo, <math><-95\text{ dBm}</math>). Nas referidas zonas, devido ao facto do UE estar constantemente a efetuar tentativas de *handover* para GSM, não se conseguiu efetuar uma recolha medidas contínua do nível de RSCP, o que explica as falhas de medidas verificadas na Figura 5.4. A instabilidade introduzida fez baixar o nível médio de RSCP obtendo-se um valor de $-81,7\text{ dBm}$ (com desvio padrão de $11,7\text{ dB}$) contra os $-74,8\text{ dBm}$ (com desvio padrão de $11,9\text{ dB}$) obtidos no TS1. Pois, enquanto o UE se mantém na femto-célula de serviço à espera que o processo de *handover* para uma nova célula seja executado, o nível de RSCP vai-se degradando e consequentemente o nível médio de RSCP obtido vai diminuir devido à recolha de um maior número de medidas com uma baixa potência de RSCP. O mesmo se verifica no cenário TS5, onde, apesar do nível médio de RSCP ser superior ao obtido no cenário TS4 ($-78,8\text{ dBm}$, com desvio padrão de $11,9\text{ dB}$), também existe uma enorme dificuldade em manter a chamada na zona de manutenção (ZM), no corredor CO2 e na cantina (CA), devido à instabilidade criada na rede provocada pelo atraso do processo de *handover* derivado do aumento do *time to trigger*.

Na Figura 5.20 está representado o nível de E_c/N_0 obtido no cenário TS1, verifica-se que no corredor CO2, facilmente o nível de E_c/N_0 do HNB1 e do HNB3 atinge valores inferiores ($\leq -11\text{ dB}$) ao nível configurado pelo operador, variando de acordo com a localização do UE no corredor CO2, o mesmo se verifica com a aplicação dos cenários TS4 (Figura 5.43) e TS5 (Figura 5.44). Esta variação do nível de E_c/N_0 , no corredor CO2, deve-se ao facto de este se encontrar localizado na zona limite da área de cobertura do HNB1 e HNB3, fazendo com que nessa zona o UE esteja constantemente a efetuar *handover* entre

estas duas femto-células.

O nível médio de Ec/No obtido no cenário TS4 é de -4,4 dB (com desvio padrão de 3,4 dB) e o obtido no cenário TS5 é de -3,6 dB (com desvio padrão de 2,2 dB), no cenário TS1 continua-se a obter o melhor resultado, com um nível médio de Ec/No igual a -3 dB (com desvio padrão de 1,7 dB). Em termos gerais o nível de Ec/No no interior da empresa é muito bom nos três cenários de teste, verificando-se apenas algumas zonas no interior do edifício onde, o nível de Ec/No , atinge valores muito baixos (< -13 dB).

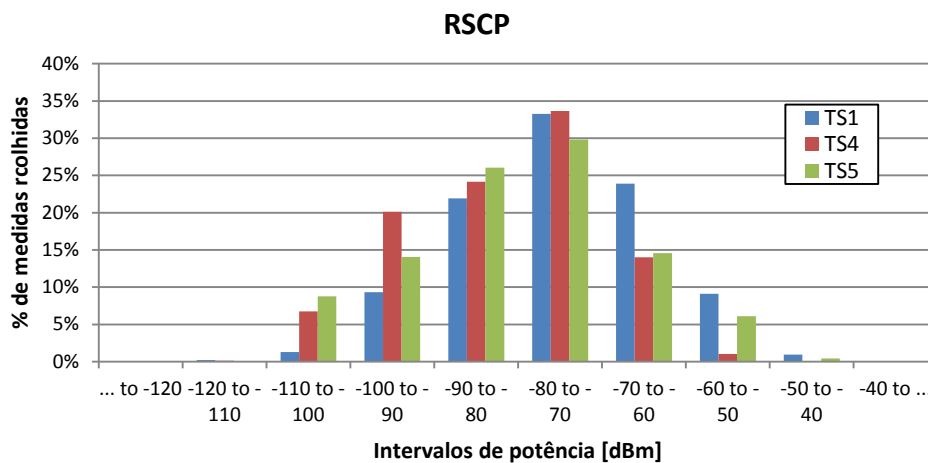


Figura 5.42 - Distribuição dos valores de potência de CPICH RSCP, para os cenários TS1, TS4 e TS5.

Tomando como referência o nível de RSCP (Figura 5.19) e de Ec/No (Figura 5.20) obtidos para o cenário TS1 na zona de manutenção (ZM), no corredor CO2 e na cantina (CA), verifica-se que, nas referidas zonas para o cenário TS4 o nível de RSCP (Figura 5.40) e de Ec/No (Figura 5.43) é inferior ao obtido no cenário TS1, apesar de nos cenários TS1, TS4 e TS5 a potência do CPICH estar configurada com o mesmo valor (valor fixo pré-definido de 10 dBm Tabela 4.4) proporcionando uma área de cobertura semelhante. O mesmo se verifica nos resultados obtidos no cenário TS5 na zona de manutenção (ZM) e no corredor CO2, onde, apesar de se obterem melhores resultados do que no cenário TS4, o nível de RSCP (Figura 5.41) e de Ec/No (Figura 5.44) nessas divisões é inferior ao obtido no cenário TS1. Estes resultados demonstram as consequências do atraso no processo de *handover*, que levou a um aumento das tentativas de *handover* para GSM no interior da empresa onde o nível de sinal GSM (Figura 5.9) também é fraco, como consequência verificou-se uma diminuição da taxa de sucesso de *handover* para GSM (Figura 5.51).

Da observação dos KPIs, verifica-se na Figura 5.46 que a taxa de sucesso das chamadas de voz estabelecidas durante o período de aplicação dos cenários TS4 e TS5 é de

aproximadamente 100%, verificando-se apenas uma queda de chamada no dia 13 de Julho. Apesar da instabilidade provocada na rede femto-celular pelos cenários TS4 e TS5, não se verifica um aumento abrupto da queda de chamadas.



Figura 5.43 - Nível de CPICH Ec/No - TS4.



Figura 5.44 - Nível de CPICH Ec/No - TS5.

Relativamente à taxa de sucesso de *handovers* entre HNBs, representada na Figura 5.46, verifica-se que os utilizadores da empresa não se movimentam muito no interior da mesma, estabelecendo a maior parte das chamadas a partir do seu lugar. Por este motivo, para avaliar os cenários TS4 e TS5, tiveram de ser executados mais testes no terreno que os realizados para os avaliar os cenários anteriores. Desta forma, identificam-se perfeitamente, na Figura 5.46 os dias em que foram executados os referidos testes, pois coincidem com os dias em que se verifica maior número de tentativas de *handover* entre HNBs.

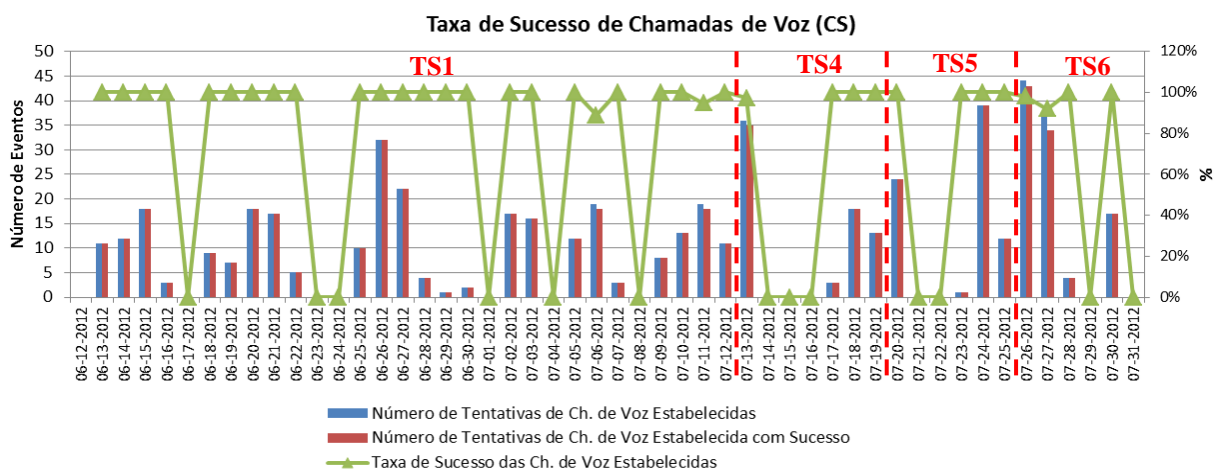


Figura 5.45 - Taxa de Sucesso de Chamadas de voz, para cenários TS1, TS4, TS5 e TS6.

Durante o período correspondente à configuração inicial (cenário TS1), devido ao processo de atualização de *software* de alguns dos elementos da rede *core* das femto-células, perdeu-se a informação dos KPIs entre o dia 20 e 26 de Junho. Na Figura 5.46, verifica-se que

durante o período de configuração do cenário TS4, nos dias 13/7/2012 e 18/7/2012, a taxa de sucesso de *handovers* entre HNBs é de 95% registando-se apenas uma falha de *handover* em cada um destes dias. Durante o período do cenário TS5, a taxa média de sucesso de *handover* entre HNBs é de 93,3%. Perante estes resultados, verifica-se que a configuração aplicada nos cenários TS4 e TS5, não degradou a taxa de sucesso de *handover* entre HNBs.

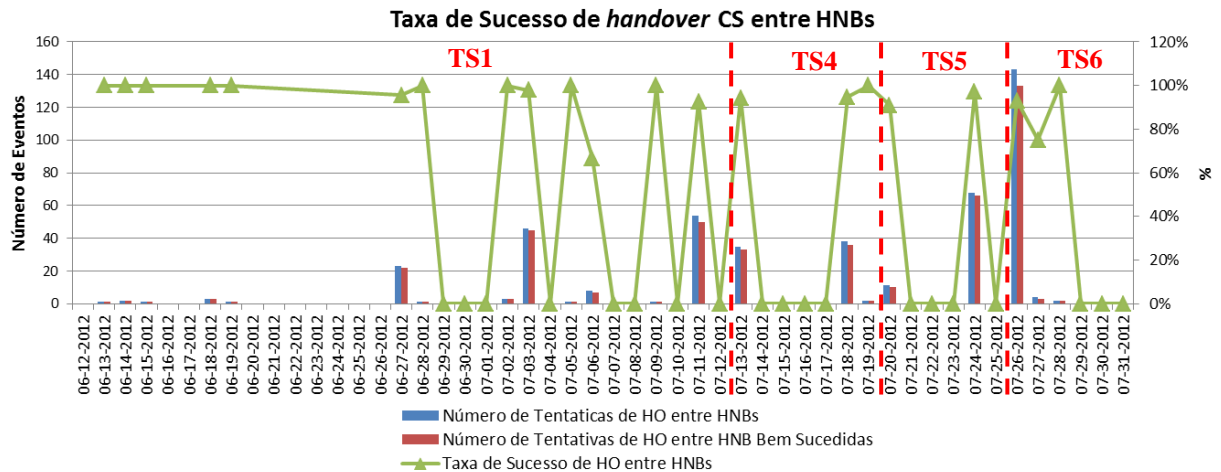


Figura 5.46 - Taxa de Sucesso de HO entre HNBs, para os cenários TS1, TS4, TS5 e TS6.

Relativamente à taxa de sucesso de *handover* para GSM, representada na Figura 5.51, é possível observar a consequência da instabilidade provocada pelo atraso na execução de *handover* entre HNBs, resultante da configuração dos cenários TS4 e TS5. A instabilidade referida traduz-se no aumento do número de tentativas de *handover* para GSM e na redução taxa de sucesso de *handover* para GSM, como se verifica nos dias 13/7/2012 e 18/7/2012, durante o período do cenário TS4 e em todos os dias correspondentes ao período do cenário TS5.

Concluindo, os cenários TS4 e TS5, não permitiram melhorar o efeito de *ping-pong* que se verifica entre o HNB1 e o HNB3, piorando a mobilidade na rede femto-celular, aumentando o número de tentativas de *handover* para GSM e reduzindo a taxa de sucesso de *handover* para GSM. O atraso no *trigger* do processo de *handover* entre HNBs, provocado pelo aumento dos valores do *time to trigger* (cenário TS5) e da histerese (cenário TS4), não produziu resultados significativos sobre a redução do número de *handovers* entre HNBs relativamente aos resultados obtidos no cenário TS1. Como consequência do atraso no processo de *handover*, verificou-se um aumento das tentativas de *handover* para GSM sem sucesso no interior da empresa.

A Tabela 5.8, mostra o resumo dos resultados para os cenários TS1, TS4 e TS5 testados nesta secção.

Tabela 5.8 - Resumo dos resultados obtidos nos cenários de teste: TS1, TS4 e TS5.

Cenários de Teste	CPICH RSCP		CPICH Ec/No		Pot. TX pelo UE		Cobertura Atingida [%]
	Valor Médio [dBm]	Desvio Padrão [dB]	Valor Médio [dB]	Desvio Padrão [dB]	Valor Médio [dBm]	Desvio Padrão [dB]	
TS1	-74,8	11,7	-3	1,7	-30,2	14,1	96
TS4	-81,7	11,7	-4,4	3,4	-22,5	14,9	84
TS5	-78,8	11,9	-3,6	2,2	-27,2	14,2	92

Após a análise dos resultados, a configuração do cenário TS1 foi novamente colocada nos HNBs do grupo, mantendo-se o efeito de *ping-pong* entre o HNB1 e HNB3. A solução para eliminar este efeito consiste em aumentar o nível de sinal na zona do corredor CO2. Isso pode ser obtido através da colocação de um novo HNB (HNB4) dedicado a essa zona. Desta forma, a femto-célula criada pelo HNB4 vai sobrepor-se às femto-células criadas pelo HNB1 e HNB3, eliminando a zona problemática de cobertura (que se verifica no corredor CO2) criada pelo limite da área de cobertura do HNB1 e HNB3. Outra solução possível para prolongar a área de cobertura dos HNBs, fazendo com que os UEs apenas façam a tentativa de *handover* para GSM o mais próximo possível do exterior da empresa, consiste em configurar os parâmetros que controlam os eventos 2D e 2F, que determinam o *trigger* de *handover* para GSM (Secção 3.4.2).

Na Secção 5.5.7 será testada uma nova parametrização onde serão alterados os valores dos parâmetros que determinam a configuração dos eventos 2D e 2F, procurando colocar a zona de *handover* para GSM no exterior do edifício, assim como reduzir o número de tentativas de *handover* para GSM verificado no interior da empresa.

5.5.7 Handovers para GSM

Nesta secção será testada uma nova parametrização com o objetivo de otimizar a mobilidade, em modo dedicado, entre os HNBs e a rede macro GSM. A estratégia de mobilidade utilizada no planeamento efetuado, pretende fazer com que o UE se mantenha sempre que possível na rede femto-celular, procurando deslocar a zona de *handover* para GSM para o exterior do edifício. Pretende-se avaliar também qual o impacto que a alteração dos parâmetros relacionados com os eventos 2D e 2F (cenário TS6) produz no número de tentativas de *handover* para GSM no interior da empresa, verificadas nos cenários TS4 e TS5.

Para tal foi criado o cenário TS6, cuja parametrização se encontra descrita na Tabela 5.9.

Segundo o descrito na Secção 3.4.2, quando a ligação rádio está degradada, o *trigger* de *handover* para GSM é executado e o evento 2D é reportado pelo UE quando:

- O nível de RSCP corrente + $2dRSCPHysteresis/2$ atinge um valor inferior ao $2dRSCPThesold$ durante $2dRSCPTimeToTrigger$.
- O nível de Ec/No corrente + $2dEcNoHysteresis/2$ atinge um valor inferior ao $2dEcNoThreshold$ durante $2dEcNoTimeToTrigger$.

Quando a ligação rádio volta ao normal, o processo de *handover* é cancelado e o evento 2F é reportado pelo UE quando:

- O nível de RSCP corrente + $2fRSCPHysteresis/2$ atinge um valor superior ao $2fRSCPTheshold$ durante $2fRSCPTimeToTrigger$.
- O nível de Ec/No corrente + $2fEcNoHysteresis/2$ atinge um valor superior ao $2fEcNoThreshold$ durante $2fEcNoTimeToTrigger$.

Os resultados obtidos da análise dos cenários TS1 e TS6, provenientes de uma chamada CS de voz iniciada no interior da empresa, são apresentados de seguida.

5.5.7.1 Análise dos resultados

Na Figura 5.47 é possível verificar que, na zona do corredor CO2, o UE manteve-se, a maior parte do tempo, acampado no HNB3. No cenário TS6, apesar de se verificar uma diminuição no número de *handovers* estabelecidos entre o HNB1 e o HNB3 (6 *handovers* obtidos no cenário TS6, contra os 7 *handovers* obtidos no cenário TS1) na zona do corredor CO2, o efeito de *ping-pong* entre estes HNBs mantém-se, pelo que a solução para este problema passa pela alteração da localização do HNB3 ou pela colocação de um novo HNB dedicado a essa zona. No corredor CO2, zona da manutenção e na cantina, o número de tentativas de *handover* para GSM sem sucesso reduziu bastante relativamente ao encontrado nos cenários TS4 e TS5. No *walk test* efetuado no interior da empresa, cujo os resultados estão representados nas figuras desta secção, foi apenas detetada uma falha na execução de *handover* para GSM, nos restantes *walk tests* realizados no dia 26/6/2012, verificou-se a existência de mais algumas falhas de *handover* para GSM, como se pode observar na Figura 5.51 (com 14 falhas no processo de *handover* para GSM). Dois dias depois, no dia 28/7/2012, apesar de terem sido efetuados poucos *handovers* para GSM, verifica-se que a taxa de sucesso de *handovers* para GSM é de 100%.

Tabela 5.9 - Parametrização dos cenários de teste TS1 e TS6.

Parâmetros	Valores	
	TS1 ¹¹	TS6
2dEcNoTheshold [dBm]	-11	-15
<i>2dEcNoTimetoTrigger</i> [ms]	320	320
<i>2dEcNoHysteresis</i> [dB]	2	2
2dRSCPTheshold [dBm]	-100	-110
<i>2dRSCPTimetoTrigger</i> [ms]	320	320
<i>2dRSCPHysteresis</i> [dB]	2	2
2fEcNoTheshold [dBm]	-11	-15
<i>2fEcNoTimetoTrigger</i> [ms]	640	640
<i>2fEcNoHysteresis</i> [dB]	2	2
2fRSCPTheshold [dBm]	-100	-110
<i>2fRSCPTimetoTrigger</i> [ms]	640	640
<i>2fRSCPHysteresis</i> [dB]	2	2
Período de aplicação	12/6 – 26/7/2012	26 – 31/7/2012
Data da recolha de medidas	26/6/2012	26/7/2012

No cenário TS1, no corredor CO2 o UE efetuou *handover* para GSM, ainda no interior da empresa (Figura 5.19, falha na recolha de medidas RSCP no corredor CO2, devido ao facto do UE ter efetuado *handover* para GSM nessa zona) tal não se verificou no cenário TS6, onde foi possível manter sempre a chamada na rede femto-celular, mesmo na zona junto à porta da entrada de serviço (ES). Junto à entrada principal (E) da empresa, tanto no cenário TS1 como no TS6, o *handover* para GSM é efetuado já no exterior da empresa.

Relativamente ao nível de RSCP, obteve-se um valor médio de -79 dBm (com desvio padrão de 13,6 dB) verificando-se, na Figura 5.50, as zonas onde o nível de RSCP está mais baixo, mais suscetíveis a provocar o *trigger* de *handover* para GSM. As zonas referidas são a zona de manutenção, o corredor CO2 a cantina e o gabinete G1¹², na Figura 5.19, verifica-se que no cenário TS1, estas também são as zonas onde se atingem valores mais baixos de RSCP.

Na Figura 5.49 está representada a distribuição de potência do RSCP, verifica-se que os resultados obtidos no TS1 são ligeiramente melhores que os obtidos no cenário TS6, esta diferença reflete-se também nos valores médios do nível de RSCP dos dois cenários de teste, obtendo-se no cenário TS1 um valor médio de RSCP de -74,8 dBm (com desvio padrão de 11,7 dB). A diferença verificada entre os resultados obtidos para os cenários TS1 e TS6, está

¹¹ O cenário TS1 representa a configuração dos parâmetros relacionados com os eventos 2D e 2F, configurada inicialmente em todos os HNBS.

¹² No *walk test* realizado para recolher as medidas da rede obtidas para o cenário TS1, não foi possível efetuar a passagem no gabinete G1. No entanto, como a localização dos HNBS não foi alterada desde o início dos testes, e como a potência do CPICH configurada no cenário TS6 também é fixa com valor de 10 dBm, assume-se que o nível de RSCP obtido no gabinete G1 no cenário TS1, é semelhante ao obtido no cenário TS6.

relacionada com o atraso provocado pela alteração dos *thresholds* de *handover* para GSM. Ao deslocar a zona de *handover* para GSM para o exterior da empresa, vai fazer com que o UE recolha maior número de medidas de RSCP com valores baixos, nas zonas no interior da empresa onde o nível de RSCP está mais baixo (como por exemplo no corredor CO2) refletindo-se nos resultados obtidos. O oposto também se verifica em termos da potência transmitida pelo UE, como se pode observar na Figura 5.52, verificando-se um aumento da potência transmitida nas zonas onde o nível de RSCP está mais baixo.

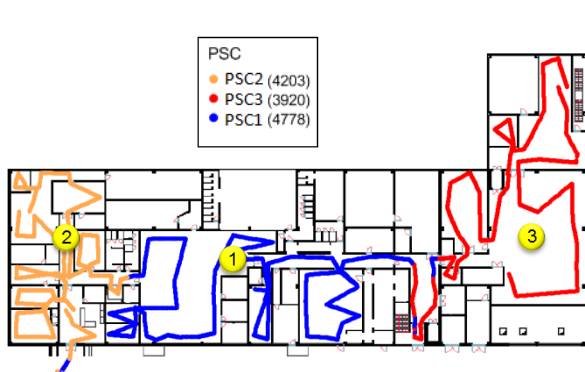


Figura 5.47 - *Srambling Codes* - TS6.



Figura 5.48 - Nível de CPICH *Ec/No* - TS6.

No cenário TS6 obteve-se um nível médio de potência Tx pelo UE de -25 dBm (com desvio padrão de 14,1 dB) e no cenário TS1 obteve-se um valor médio de -30,2 dBm (com desvio padrão de 14,1 dB). No entanto, no cenário TS1 obtém-se uma maior percentagem de medidas nos valores de potência mais baixos, com se verifica na Figura 5.53.

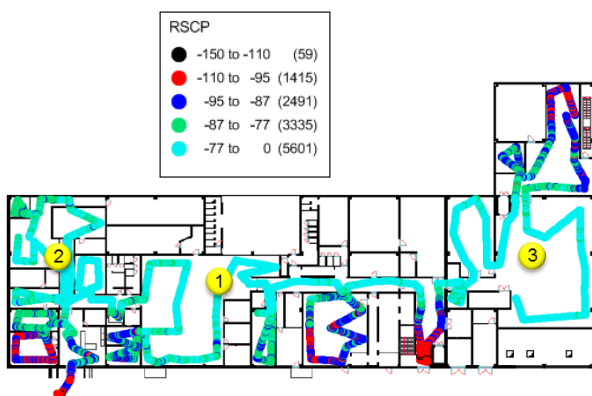


Figura 5.50 - Nível de CPICH RSCP - TS6.

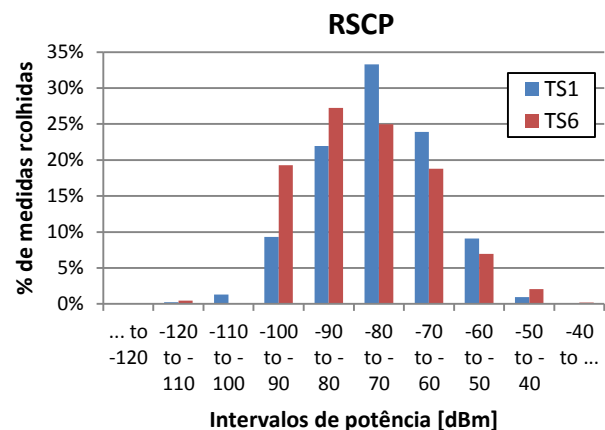


Figura 5.49 - Distribuição dos valores de potência de CPICH RSCP, para os cenários TS1 e TS6.

No corredor CO2 e na zona de manutenção (ZM), o UE manteve-se acampado no HNB3, reduzindo as várias tentativas de *handover* para GSM a apenas uma. O nível de sinal GSM (*RxLev*) na zona de manutenção atinge valores de -110 dBm (Figura 5.9), o que explica

a falhas de *handover* para GSM quando os *thresholds* dos eventos 2D e 2F estavam mais baixos. Ainda na zona de manutenção, apesar de o nível de RSCP apresentar por vezes valores inferiores a -95 dBm, o valor de *Ec/No* elevado (no TS6) e os *thresholds* configurados permitem evitar que o UE efetue *handover* para GSM no interior da empresa.

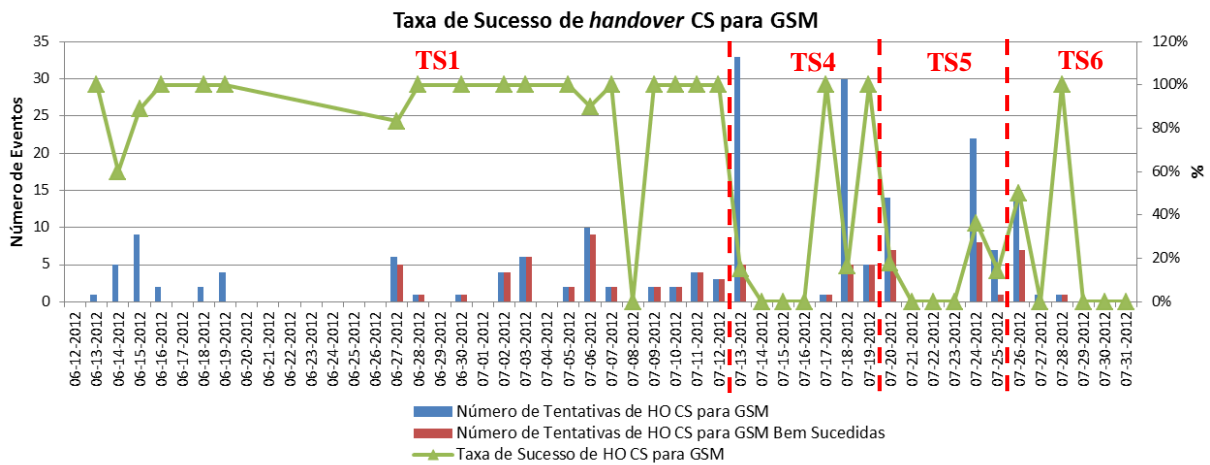


Figura 5.51 - Taxa de Sucesso de HO para GSM, para os cenários TS1, TS4, TS5 e TS6.

Em relação ao nível de *Ec/No*, verifica-se que o valor médio obtido no cenário TS6 é de -4,1 dB (com desvio padrão de 1,7 dB) aproximadamente um 1 dB inferior ao obtido no cenário TS1, com um valor de -3 dB (e desvio padrão de 1,7 dB). Na Figura 5.48, verifica-se que a qualidade do sinal no interior do edifício é muito boa, o mesmo se verifica no cenário TS1 (Figura 5.20).

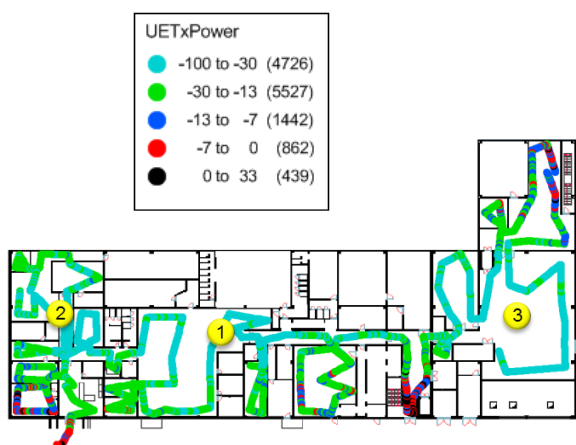


Figura 5.52 - Nível de Potência Tx pelo UE - TS6.

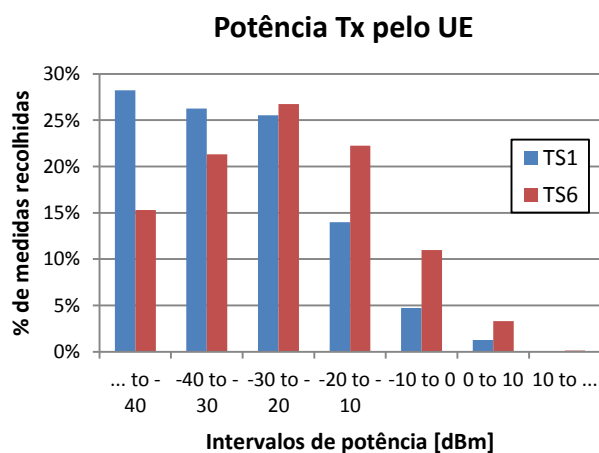


Figura 5.53 - Distribuição dos valores de potência Tx pelo UE, para os cenários TS1 e TS6.

Na Figura 5.48, verifica-se que nas zonas onde existe um baixo nível de RSCP, este é compensado com um nível elevado de *Ec/No*, ficando o *handover* para GSM apenas dependente do nível de RSCP, o que contribuiu para a deslocação da zona de *handover* para

GSM para o exterior do edifício, como acontece no corredor CO2, que no cenário TS1 se encontrava no interior do edifício (Figura 5.19¹²). Isto permitiu reduzir o número de tentativas de *handover* para GSM no interior da empresa, verificado nos cenários TS4 e TS5.

Relativamente à área de cobertura obtida, no cenário TS6 o critério de cobertura não é atingido, obtém-se uma cobertura existente de 84% da área, contra os 96% obtidos no cenário TS1.

Capítulo 6

Conclusões

Neste capítulo, são revistos os objetivos propostos para este trabalho, as metodologias adotadas, analisam-se os resultados obtidos para o conjunto de testes realizados e propõem-se o trabalho futuro.

6.1 Conclusões

Este trabalho teve como objetivo estudar o conceito das femto-células, no contexto do planeamento e otimização de redes UMTS instaladas no interior de edifícios. Através da realização de um planeamento celular para o interior de uma empresa, foi estudado o funcionamento de um grupo de HNBs co-localizado, sendo avaliados os principais problemas que podem surgir numa instalação deste tipo, assim como a forma de melhorar o desempenho da rede. Nesse âmbito, o principal enfoque foi em avaliar as capacidades do HNB relativamente ao ajuste dinâmico da área de cobertura, e estudar a mobilidade em modo dedicado entre os HNBs e entre estes e a rede macro GSM. Recorrendo à utilização da ferramenta de medidas TEMS® *Investigation*, foi efetuado um conjunto de recolha de medidas, no interior da empresa, que permitiram avaliar o comportamento da rede femto-celular instalada, em termos de área de cobertura, nível e qualidade de sinal no interior do edifício, ajudando a perceber o ganho obtido com a instalação das femto-células, assim como a avaliar o impacto que os vários cenários de teste introduziram na rede.

Para além desta medidas recorreu-se à análise dos KPIs, permitindo assim complementar a análise do desempenho da rede, com uma avaliação contínua do nível de QoS percecionado pelos funcionários da empresa.

Da análise inicial realizada na empresa, onde foram colocados os HNBs, verificou-se o baixo nível e qualidade de sinal existente no interior da mesma, existindo a necessidade de se proceder a um planeamento *indoor* para melhorar as condições rádio UMTS. Os resultados obtidos (antes da colocação dos HNBs), permitem concluir que as medidas rádio existentes se degradam à medida que o UE se desloca para o interior do edifício, sendo apenas possível manter/estabelecer chamadas nas zonas próximo das janelas (nível médio de RSCP de -113 dBm e o nível médio de E_c/N_0 era de -18,3 dB). A percentagem de cobertura obtida foi de

apenas 3,8%, valor extremamente baixo para satisfazer as necessidades do cliente em termos de cobertura.

Relativamente ao planeamento da rede femto-celular, foi utilizada uma estratégia envolvendo a ferramenta TEMS® *Transmitter*, que permitiu simular a área de cobertura dos HNBs utilizados, bem como quantificar o seu número.

Após a instalação dos HNBs, verificou-se claramente o ganho em termos de cobertura e qualidade de sinal no interior da empresa relativamente ao existente inicialmente. As medidas realizadas no interior da empresa permitiram concluir que passou a existir uma melhor cobertura (nível médio de RSCP de -74,8 dBm), sendo atingido o critério de cobertura. Assim, obteve-se uma cobertura de 96% da área, com uma qualidade de sinal também excelente (97% dos valores com $Ec/No \geq -7$ dB, e nível médio de Ec/No de -3,04 dB). No entanto, apesar de se cumprir o critério de cobertura imposto, verificaram-se algumas zonas com níveis de RSCP inferiores a -95 dBm e verificou-se também a existência do problema de *ping-pong* de *handovers* entre dois HNBs.

Apesar dos bons resultados em termos de área de cobertura e qualidade de sinal, obtidos depois a instalação dos HNBs, verificaram-se alguns pontos onde a rede femto-celular instalada podia ser otimizada. Nesse sentido, foram desenvolvidos um conjunto de cenários de teste com objetivo de melhorar o desempenho da rede instalada procurando não alterar a localização inicial dos HNBs. Os cenários desenvolvidos permitiram analisar um conjunto de opções com vista a otimizar a área de cobertura e processo de *handover* entre os HNBs do grupo, e entre estes e a rede GSM.

Em primeiro lugar foram avaliadas as capacidades SON que os HNBs oferecem em termos de ajuste automático da área de cobertura através do cálculo dinâmico da potência do CPICH, para tal foram desenvolvidos dois cenários de teste. Nestes cenários, a potência era determinada tendo em conta, para além da atenuação em espaço livre mais as perdas de penetração, o nível de RSCP mínimo (cenário TS2) e o nível médio do RSSI (cenário TS3). Os resultados obtidos permitem concluir que, neste tipo de cenário, a configuração que permite obter melhor desempenho é a colocação da potência do CPICH fixa, com o valor máximo possível (10 dBm), obtendo-se uma cobertura existente de 96% da área, contra os 82% obtidos no TS2 e os 84% obtidos no TS3.

Para completar a avaliação do impacto, na rede, dos cenários de teste configurados, analisaram-se os KPIs relativos à taxa de sucesso de chamadas de voz (CS) e à taxa de sucesso das chamadas de dados (PS). Da análise dos mesmos concluiu-se que as alterações

relativamente ao ajuste da potência do CPICH, não degradaram os KPIs, observando-se que a maior parte das tentativas de chamadas foram efetuadas com sucesso.

No que diz respeito ao processo de *handover* entre HNBs, tendo em conta o efeito de *ping-pong* verificado entre o HNB1 e o HNB3, foram criados dois cenários de teste (cenários TS4 e TS5), com o objetivo de tentar eliminar o referido efeito. O processo de *handover* entre HNBs é controlado pelo evento 1C, desta forma no cenário TS4 aumentou-se o valor da histerese associada ao evento 1C de 4 dB (cenário TS1) para 6 dB, e no cenário TS5 aumentou-se o valor do *time to trigger* de 320 ms (cenário TS1) para 640 ms. Os resultados obtidos permitem verificar que a zona de *handover* entre o HNB1 e o HNB2, no cenário TS5 foi alterada, estendendo-se mais para dentro da área de cobertura do HNB1. Esta deslocação na zona de *handover* entre HNBs não teve qualquer impacto na em relativamente ao número de queda de chamadas. Em relação ao efeito de *ping-pong* entre o HNB1 e o HNB3, este mantém-se em todos os cenários testados (cenários TS1, TS4 e TS5), no entanto no cenário TS4 obtém-se o menor número de *handovers* entre o HNB1 e o HNB3 (5 *handover*, num total de 7 *handovers* entre HNBs registados no teste executado). Verifica-se também que o atraso provocado no processo de *handover* para o a nova femto-célula, derivado do aumento do valor da histerese (cenário TS4) ou do valor do *time to trigger* (cenário TS5), introduz uma instabilidade na rede fazendo aumentar o número de processo de *handover* para GSM no interior da empresa nas zonas onde o nível de RSCP está mais baixo. Este problema associado ao baixo nível de sinal GSM existente no interior da empresa, vai provocar um aumento do número de falhas de *handover* para GSM.

Para completar a avaliar o impacto, na rede, dos cenários de teste configurados, analisaram-se os KPIs relativos à taxa de sucesso de chamadas de voz (CS), taxa de sucesso de *handovers* entre HNBs e taxa de sucesso de *handovers* para GSM. Da análise da taxa de sucesso de chamadas de voz (CS) concluiu-se que as alterações relativamente efetuadas nos cenários TS4 e TS5 não produzem efeitos significativos. Da análise da taxa de sucesso de *handover* entre HNBs, verifica-se o elevado número de *handovers* existentes nos dias em que foram efetuados testes no terreno, traduzindo o efeito de *ping-pong* existente entre o HNB1 e o HNB3. Da análise da taxa de sucesso de *handover* para GSM, é possível identificar o aumento do número de tentativas de *handover* para GSM verifica nos dias de teste, assim como o elevado número de falhas de *handover* para GSM.

Relativamente ao processo de *handover* para GSM, a estratégia de mobilidade consiste em colocar a zona de *handover* para GSM no exterior da empresa, procurando reduzir ao máximo o número de tentativas de *handover* para GSM no interior da empresa. Para tal foi

criado o cenário TS6. Neste foram testados novos *thresholds* menos agressivos para os valores mínimos de RSCP e *Ec/No*, diretamente relacionados com a configuração dos eventos 2D e 2F, responsáveis pelo controlo do processo de *handover* para GSM. Da análise dos resultados verifica-se que a zona o número de pedidos de *handover* para GSM no interior da empresa diminuiu, sendo possível deslocar a zona de *handover* para GSM para os exterior do edifício. No entanto a área de cobertura obtida no TS6 é de 84%, não cumprindo o critério de cobertura utilizado. Da análise da taxa de sucesso de *handover* para GSM, é possível verificar ainda a existência de algumas falhas de *handover* para GSM. No entanto no *walk test* realizado para avaliar o nível e qualidade sinal no interior da empresa para o cenário TS6, apenas se obteve uma falha de *handover* para GSM no interior da empresa.

Relativamente ao efeito de *ping-pong* entre o HNB1 e HNB3, continua presente no cenário TS6. As configurações testadas para tentar eliminar este efeito, não foram bem-sucedidas. Como forma de o resolver, verifica-se a necessidade de efetuar um ajuste na localização dos HNBs instalados, precedendo à instalação de um novo HNB dedicado à zona onde o efeito de *ping-pong* se verifica (corredor CO2).

6.2 Trabalho Futuro

No que diz respeito ao planeamento dos HNB, foram encontradas algumas dificuldades, não tendo sido possível utilizar uma ferramenta de simulação para determinar a localização e quantidade de HNBs a instalar na empresa de forma a cumprir os critérios de cobertura. Como alternativa, recorreu-se à ferramenta TEMS® *Transmitter* através da qual se tentou simular uma femto-célula. Apesar dos testes estarem a ser realizados no cenário onde os HNBs vão ser instalados, a utilização de uma ferramenta de simulação teria evitado alguns problemas de cobertura verificados apenas após a instalação, assim como teria possibilitado uma análise mais exaustiva da localização dos HNBs.

Relativamente ao problema *ping-pong* de *handovers* entre o HNB1 e o HNB3, através dos cenários de teste realizados, não foi possível ser eliminado, mexendo-se apenas na parametrização. Fica por analisar se a instalação de um quarto HNB dedicado a dar cobertura a zona da cantina e do corredor CO2 poderá resolver o problema.

Devido ao baixo número de utilizadores das femto-células na empresa onde foram instaladas, não foi possível analisar o comportamento dos HNBs em caso de congestão. O estudo do controlo de admissão de chamadas que permite efetuar uma gestão dos recursos rádio dos HNBs, é um fator importante no funcionamento de um grupo de femto-células

colocado num ambiente com elevado número de utilizadores.

Outro ponto importante, que pode complementar o estudo efetuado, consiste na análise do comportamento dos HNBs a funcionar em modo aberto, ficando estes a funcionar como um *NodeB*, onde todos os UE têm acesso aos recursos rádio das femto-células. Este tipo de acesso pode ter inúmeras aplicações, nomeadamente a instalação de femto-células em ambiente públicos, como centros comerciais.

Sabendo que existem operadores que têm as femto-células a funcionar na mesma frequência que a rede macro UMTS, seria importante avaliar o comportamento em termos de interferência, e verificar as vantagens e desvantagens desta opção de configuração.

Anexos

A.1. Localização das estações base

A Figura 1.1 mostra a localização das estações base macro UMTS e GSM num raio de 2 kms em redor da empresa. Neste caso, as estações base UMTS e GSM são co-localizadas.

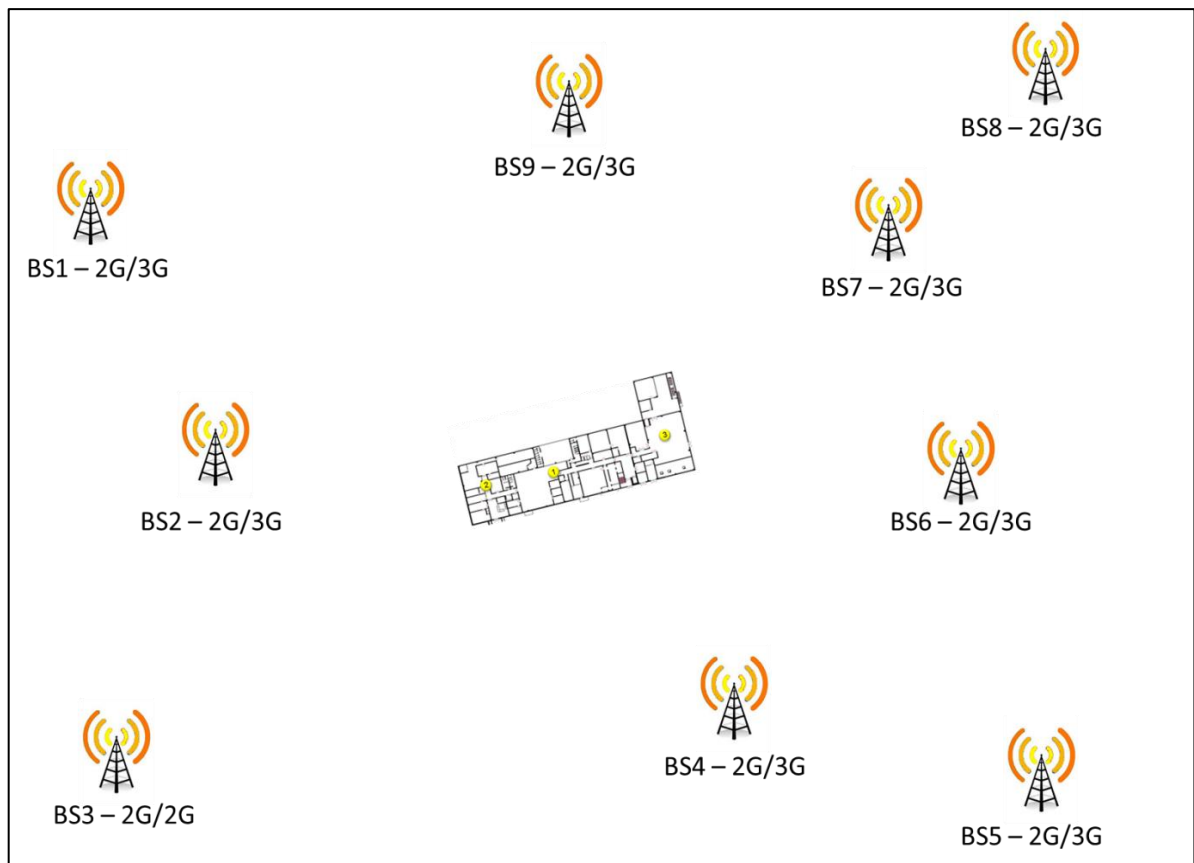


Figura 1.1 - Distribuição das estações base UMTS/GSM em redor da empresa.

A.2. Medidas efetuadas com TEMS® Transmitter

As figuras desta secção mostram os níveis de E_c/I_o , obtido no interior da empresa, para as diferentes localizações do TEMS® Transmitter, onde foram colocados os HNBs. As medidas estão representadas sobre uma planta de emergência da empresa. Pois nos primeiros testes não houve a possibilidade de obter uma planta digital da empresa.

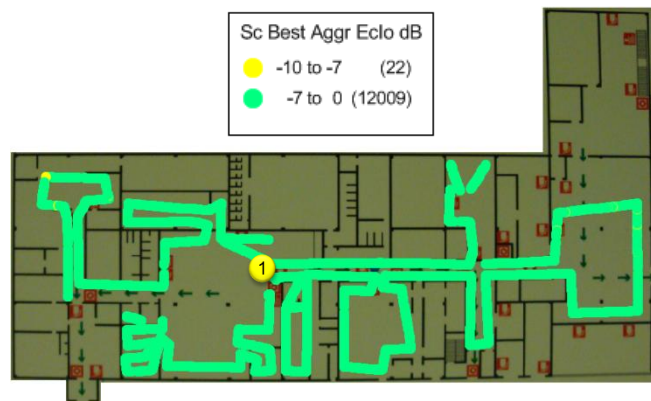


Figura 2.1 - Nível de E_c/I_o obtido com o TEMS® Transmitter colocado na posição 1.

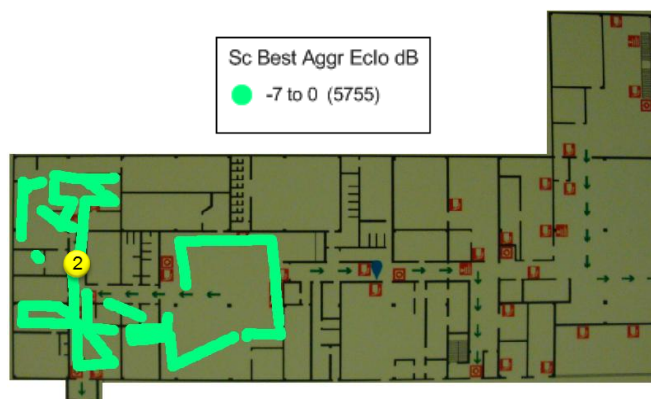


Figura 2.2 - Nível de E_c/I_o obtido com o TEMS® Transmitter colocado na posição 2.



Figura 2.3 - Nível de E_c/I_o obtido com o TEMS® Transmitter colocado na posição 3.

A.3. Condições rádio iniciais

A.3.1 UMTS indoor

A Figura 3.1 apresenta a o nível de potência transmitida (Tx) pelo UE no interior da empresa antes da colocação dos HNBs.



Figura 3.1 - Nível de potência Tx pelo UE (Sem HNBs).

A Figura 3.2 apresenta a distribuição dos níveis de potência Tx pelo UE representados na Figura 3.1.

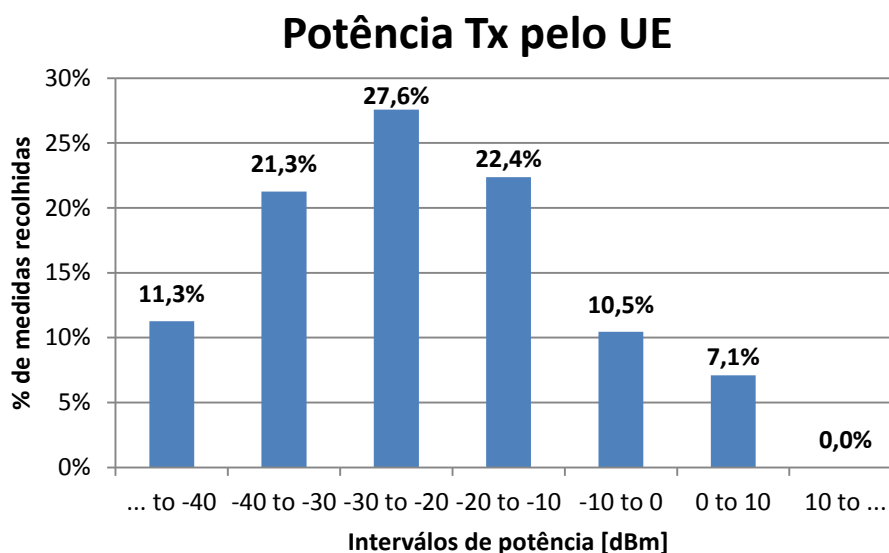


Figura 3.2 - Distribuição dos níveis de potência Tx pelo UE no interior da empresa - Sem HNBs.

A Figura 3.3 apresenta a distribuição dos níveis de E_c/N_0 obtidos no interior da empresa antes da colocação dos HNBS

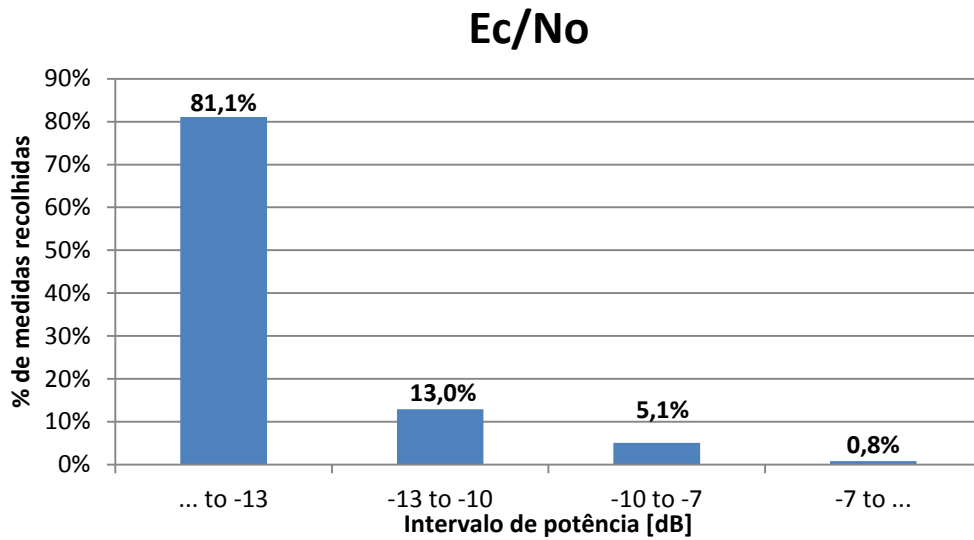


Figura 3.3 - Distribuição dos níveis de E_c/N_0 no interior da empresa – Sem HNBS.

A.3.2 GSM indoor

A Figura 3.4 representa a distribuição dos valores de R_xQUAL do sinal GSM recebido no interior da empresa.

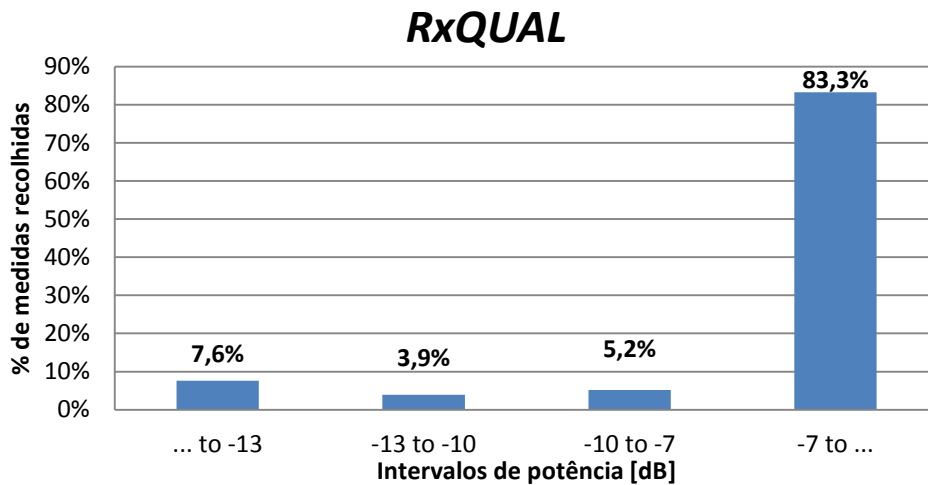


Figura 3.4 - Distribuição dos valores de R_xQUAL no interior da empresa – Sem HNBS.

A.4. Controlo da área de cobertura

As Figura 4.1 e 4.2 mostram os níveis de potência transmitida pelo UE, para os cenários de TS2 e TS3 (definidos na Secção 5.4.1), respetivamente.



Figura 4.1 - Nível de potência Tx pelo UE – TS2.

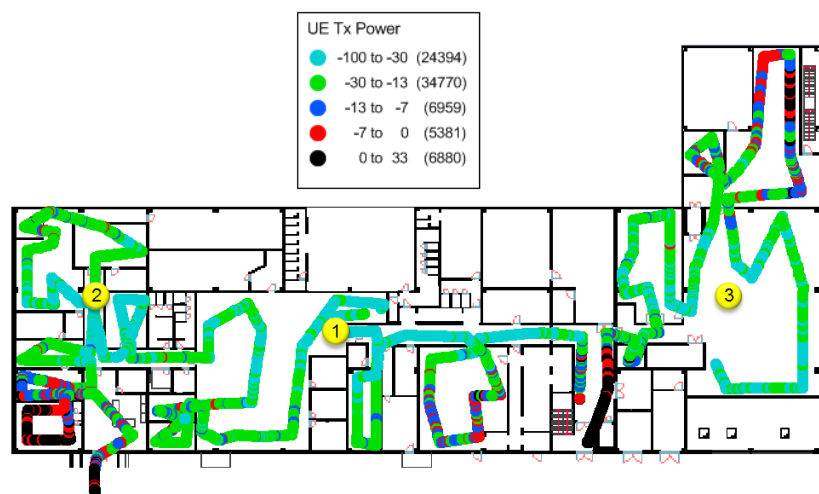


Figura 4.2 - Nível de potência Tx pelo UE – TS3

A.5. Handovers entre HNBS

A Figuras 5.1 e 5.2 representam o nível de potência Tx pelo o UE obtida no interior da empresa para os cenários TS4 e TS5 (descritos na Secção 5.4.2), respetivamente.

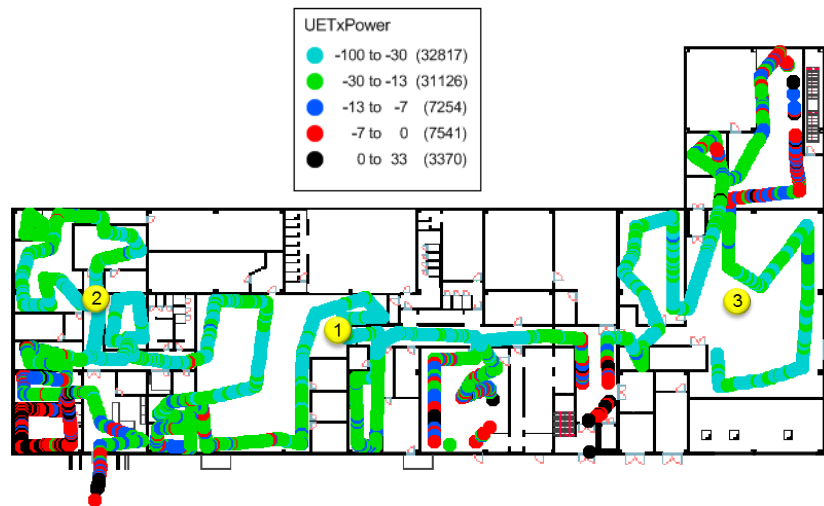


Figura 5.1 - Nível de potência Tx pelo UE – TS4.



Figura 5.2 - Nível de potência Tx pelo UE – TS5.

A Figura 5.3 mostra a distribuição dos níveis de Ec/No obtida no interior da empresa, para os cenários de teste TS1, TS4 e TS5.

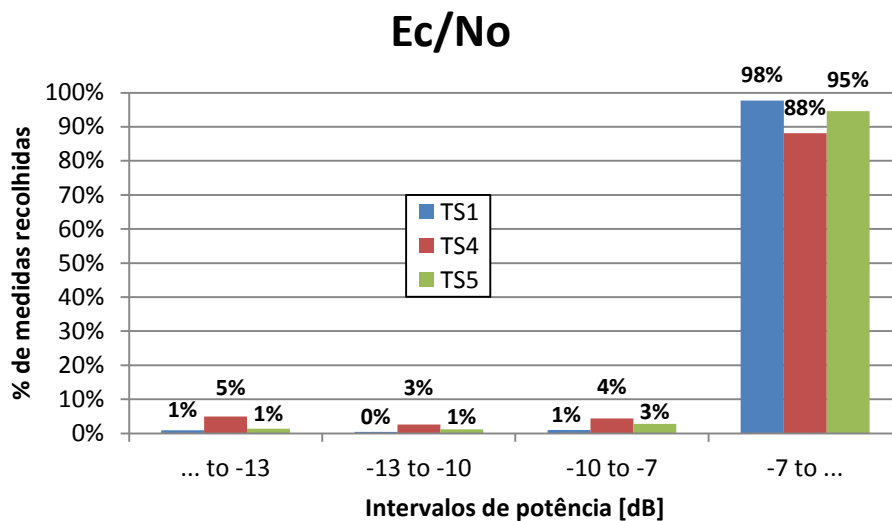


Figura 5.3 - Distribuição dos níveis de Ec/No para os cenários de teste TS1, TS4 e TS5.

A Figura 5.4 mostra a distribuição da potência transmitida pelo UE (Figuras anteriores), no interior da empresa para os cenários TS1, TS4 e TS5.

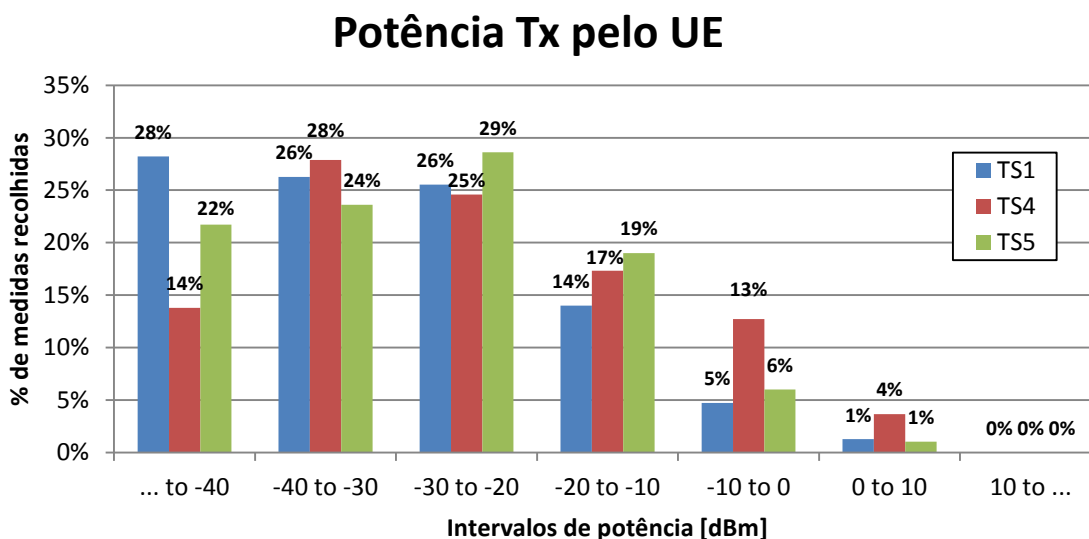


Figura 5.4 - Distribuição do nível de potência Tx pelo UE, para os cenários TS1, TS4 e TS5.

A.6. Handovers para GSM

A Figura 6.1 mostra a distribuição dos níveis de Ec/No obtida no interior da empresa, para os cenários de teste TS1 e TS6 (definidos na Secção 5.5.7).

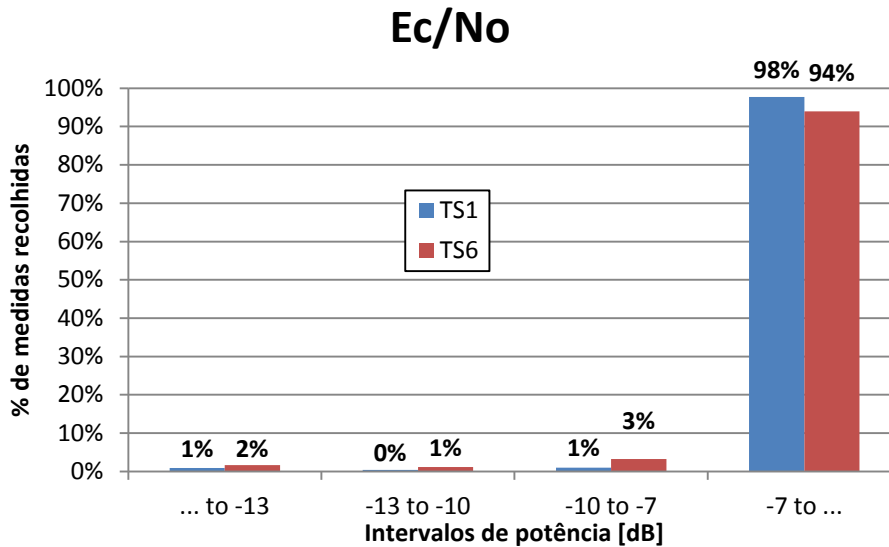


Figura 6.1 - Distribuição dos níveis de Ec/No para os cenários TS1 e TS6.

A.7. Key Performance Indicators

A Figura 7.1 mostra a variação da taxa de sucesso das chamadas de dados, obtida durante todo o período de testes realizados neste trabalho (12/6 – 31/7/2012).

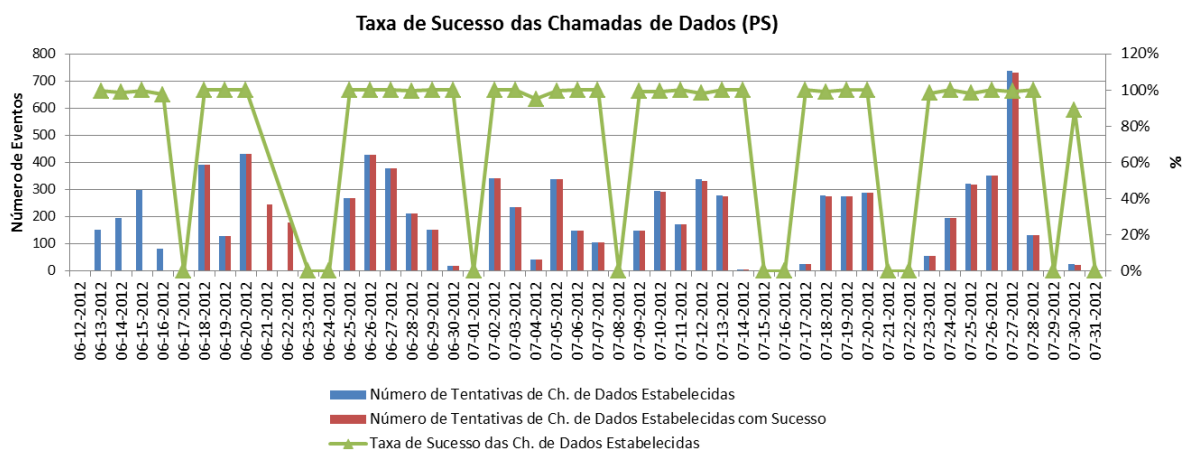


Figura 7.1 - Taxa de sucesso das chamadas de dados, de 12/6 a 31/7/2012.

Referências

- [1] IDATE, "*Mobile traffic forecasts 2010-2020 & offloading solutions*", Workshop, 2011,
http://www.ictbefemto.eu/fileadmin/documents/publications/workshop_2011/F._PUJOL_IDATE_15_05_2011.pdf. Acedido 9/9/2012.
- [2] Ozturk, U., "*Coordinated Multipoint Transmission*", Master Thesis, Department of Communications and Networking, Aalto University, 2011.
- [3] Zhang, J., Roche, G., "*Femtocells Technologies and Deployment*", John Wiley & Sons, 2010, ISBN 978-0-470-74298-3.
- [4] TELECO, http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialwifi/pagina_3.asp. Acedido em 14/9/2012.
- [5] Chandrasekhar, V., Andrews, J., Gatherer, A., "*Femtocell Networks: A Survey*", IEEE Communications Magazine, vol. 46, no. 9, pp 59-67, 2008.
- [6] Saunders, S., Carlaw, S., Giustina, A., Bhat, R., Rao, V., Siegborg, R., "*Femtocells Opportunities and Challenges for Business and Technology*", John Wiley & Sons, 2009, ISBN 978-0-470-74816-9.
- [7] Tolstrup, M., "*Indoor Radio Planning - A Practical Guide for GSM, DCS, UMTS and HSPA*" John Wiley & Sons, 2008, ISBN 978-0-470-05769-8.
- [8] 3GPP TS 25.211, *Technical Specification Group (TSG) Radio Access Network (RAN); Working Group 1 (WG1); Physical channels and mapping of transport channels onto physical channels (FDD); (Release 9)*, 2010.
- [9] Vieira, P., Cota, N., "*Universal Mobile Telecommunication System*", Slides da Cadeira de Redes de Telecomunicações, Mestrado em Engenharia Eletrónica e Telecomunicações, ADEETC, ISEL, 2011.
- [10] 3GPP TS 25.434, *UTRAN Iub Interface Data Transport and Transport Signalling for Common Transport Channel Data Streams (Release 10)*; 2011.
- [11] 3GPP TS 43.318, *Radio Access Network; Generic Access Network (GAN); Stage 2; (Release 8)*, 2009.
- [12] 3GPP TS 44.318, *Radio Access Network; Generic Access Network (GAN); Stage 2 (Release 8)*; 2009.
- [13] 3GPP TS 23.832, *IP Multimedia Subsystem (IMS) aspects of architecture for Home Node B (HNB); Stage 2 (Release 10)*, 2010.

Referências

- [14] 3GPP TS 23.228, *IP Multimedia Subsystem (IMS); Stage 2; (Release 9)*, 2010.
- [15] 3GPP TS 24.008, *Mobile radio interface Layer 3 specification; Core network protocols; Stage 3 (Release 9)*; 2010.
- [16] 3GPP TS 23.216, *Single Radio Voice Call Continuity (SRVCC); Stage 2 (Release 9)*, 2011.
- [17] 3GPP TS 23.292, *IP Multimedia Subsystem (IMS) centralized services; Stage 2 (Release 10)*, 2011.
- [18] 3GPP TS 25.469, *UTRAN Iuh interface Home Node B (HNB) Application Part (HNBAP) signalling (Release 10)*, 2011.
- [19] 3GPP TS 22.011, *Service accessibility, (Release 8)*, 2008.
- [20] 3GPP TS 25.367, *Mobility procedures for Home Node B (HNB); Overall description; Stage 2; (Release 10)*, 2011.
- [21] ETSI TS 122.220, *Service requirements for Home Node B (HNB) and Home eNodeB (HeNB)*, 2011.
- [22] Femto-Forum, "*Regulatory Aspects of Femtocells - Second Edition*", White Paper, 2011;
http://www.smallcellforum.org/Files/File/024_FF_Regulatory_Aspects_of_Femtocells_Ed2_0311.pdf. Acedido em 14/9/2012.
- [23] 3GPP, "*Worlds first femtocell standard published by 3GPP*",
<http://www.3gpp.org/World-s-first-femtocell-standard>. Acedido em 14/9/2010.
- [24] Khan, M., "*Femtocellular Aspects on UMTS Architecture Evolution*", Master Thesis, Department of Communications and Networking, Aalto University, 2010.
- [25] ETSI TS 33.234, *Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; 3G security; Wireless Local Area Network (WLAN) interworking security*, 2011.
- [26] 3GPP TS 33.102, *3G Security; Security Architecture*, 1999.
- [27] 3GPP TS 25.467, *UTRAN architecture for 3G Home Node B (HNB); Stage 2; (Release 9)*, 2010.
- [28] Laat, C., Gross, G., Gommans, L., Vollbrecht, J., Spence, D., "*Generic AAA Architecture*", 2000, <http://tools.ietf.org/rfc/rfc2903.txt>. Acedido em 14/9/2012.
- [29] 3GPP TS 33.320, *Security of Home Node B (HNB) /Home evolved Node B (HeNB); (Release 9)*, 2010.
- [30] 3GPP TS 29.060, *General Packet Radio Service (GPRS); GPRS Tunnelling Protocol (GTP) across the Gn and Gp interface; (Release 1999)*, 2004.

- [31] 3GPP TS 32.821, *Telecommunication management; Study of Self-Organizing Networks (SON) related Operations, Administration and Maintenance (OAM) for Home Node B (HNB); (Release 9)*, 2009.
- [32] Boccuzzi, J., Ruggiero, M., "*Femtocells Design & Application*", MacGraw-Hill, 2011, ISBN 978-0-07-163359-8.
- [33] Knisley, D., Yoshizawa, T., Favichia, F., "*Standardization of Femtocells in 3GPP*", IEEE Communications Magazine, vol. 47, no. 9, pp. 68-75, 2009; <http://www.iith.ac.in/~tbr/teaching/docs/3G-FemtoCells.pdf>. Acedido em 14/9/2012.
- [34] Carvalho, M., "Planeamento e otimização em rede celulares móveis auto-geridas assentes em LTE", Tese de Mestrado, Área Departamental de Engenharia de Eletrónica e Telecomunicações e de Computadores (ADEETC), Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL), 2011.
- [35] 3GPP TS 25.967, *Home Node B Radio Frequency (RF) Requirements (FDD); (Release 8)*, 2009.
- [36] Jarvinen, M., "*Femtocell Deployment in 3th Generation Networks*", Master Thesis, Faculty of Electronics, Communications and Automation, Helsinki University of Technology, 2009.
- [37] 3GPP TS 25.331, *RRC Protocol Specification*, 1999.
- [38] 3GPP TS 25.133, *Requirements for support of radio resource management (FDD);(Release 9)*, 2010.
- [39] ETSI TS 36.304, *LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) procedures in idle mode*, 2010.
- [40] Taxeiro, N., Vieira P., "Dimensionamento, Implementação e Monitorização de Desempenho (QoS) de um projeto *Indoor* por Antenas Distribuídas para UMTS", Artigo Publicado no 3º Congresso do Comité Português da URSI "Radiocomunicações: da Terra ao Universo", 3 e 4 de Novembro de 2009; http://www.anacom.pt/streaming/Dimensionamento_UMTS.pdf?contentId=992881&field=ATTACHED_FILE. Acedido 9-9-2012.