



OFERTA

Departamento de Electrónica e Telecomunicações



UNIVERSIDADE DE AVEIRO  
SERVIÇOS DE DOCUMENTAÇÃO

PLANEAMENTO CELULAR E ENGENHARIA  
DE TELETRÁFEGO EM REDES MÓVEIS  
CELULARES

*Alberto de Jesus Nascimento*

*Setembro 1999*

## Sumário

Nos últimos anos, o desenvolvimento de novas técnicas de processamento digital do sinal, por um lado, e os avanços tecnológicos na área da microelectrónica que possibilitaram a implementação dos mesmos, por outro, levaram a uma miniaturização dos terminais móveis utilizados, quando comparados com os terminais analógicos utilizados nas redes de primeira geração. Este efeito, que permitiu uma melhoria significativa na qualidade da transmissão de voz e dados, aliado a uma crescente diversificação de novos serviços disponibilizados aos assinantes, levou a um aumento explosivo da taxa de penetração do serviço de rádio móvel celular. Da mesma forma, o tráfego oferecido, que antes era essencialmente de mobilidade, uma vez que os terminais instalados no interior das viaturas se destinavam à efectivação de chamadas quando em movimento nas estradas, passou a ser também do tipo estacionário. O tamanho reduzido, a elevada autonomia e portabilidade dos novos terminais permitem aos assinantes a efectivação de chamadas telefónicas nos mais variados lugares: dentro de casa, em centros comerciais, ou mesmo enquanto se deslocam nas ruas. O resultado de todo este processo de mudança foi um aumento explosivo do tráfego oferecido que passou a condicionar a qualidade do serviço prestado ao cliente e veio trazer novos desafios no projecto e implementação deste tipo de redes.

Este trabalho tem como objectivo estudar as implicações que este aumento explosivo do tráfego oferecido, tem tido no projecto e implementação das redes móveis celulares dos sistemas de segunda geração, nomeadamente no que respeita à manutenção da qualidade do serviço prestado ao assinante. Para tal, é feita uma análise detalhada do conjunto de técnicas e métodos de planeamento celular que foram desenvolvidos nos últimos anos, como forma de dar resposta a este problema. Algumas destas técnicas estão já a ser implementadas por muitos operadores. Estudam-se os modelos de propagação do sinal rádio normalmente utilizados, uma vez que são estes modelos que permitem derivar os parâmetros fundamentais, normalmente utilizados no planeamento celular, como sejam: os factores de interferência co-canal e de canal adjacente. São estudadas e comparadas diferentes técnicas de planeamento celular: decomposição de

células (*cell splitting*), sectorização de células, *overlaid/underlaid*, utilização dos saltos de frequência (*frequency hopping*), partilha de carga (*load sharing*), implementação de estruturas hierárquicas (microcélulas e picocélulas), transmissão descontinuada nos sentidos ascendente e descendente (*discontinuous transmission - uplink and downlink*). São estudados modelos para o cálculo da probabilidade de bloqueio para diferentes métodos de atribuição de canais: fixo (*fixed channel allocation*), dinâmico: *dynamic channel allocation*) e híbrido (*hybrid channel allocation*). São também apresentados diversos métodos para melhoria da probabilidade de bloqueio: canais de guarda para *handover* (*guard channels*) e utilização de filas de espera para ambos os tipos de chamada (novas ou por *handover*).

**Palavras chave:** Redes móveis celulares de segunda geração, grau de serviço, factor de interferência co-canal, factor de interferência por canal adjacente, chamadas por *handover*, reutilização de frequências, bloqueamento de chamadas, técnicas de planeamento celular, modelos de tráfego, modelos de propagação do sinal rádio.

## Abstract

In the last few years, the development of new methods on digital signal processing by one hand, and the technological outcomes in microelectronics, which made that possible, by another, carried out the decrease in the size of the mobile terminals when compared with the ones used in the analogue networks of the first generation systems. This effect, which allowed a significant improvement on the transmission of quality voice and data, coupled with an increasing mixture of new services made available to the subscriber, provoked an explosion of the service penetration rate. By the same way, the offered traffic, which was in its whole of mobility type in the past, since the terminal sets were designed for in-car use, turned out to be a stationary one. The smaller size, longer batteries life and ease of portability of the new handsets allow subscribers to carry out calls in a mixture of places: inside home, in shopping centres or even while on the move on the streets. The final result of this whole changing process was a tremendous increase on the traffic being offered. This process impose restrictions on the quality of the service made available to the subscriber and brought up new challenges in the design and implementation of these new networks.

The main purpose of this work is to analyse the implications that the increasing demand on the offered traffic have in the design and implementation of second generation mobile cellular networks, particularly to the maintenance of the quality of the service made available to the subscriber. For this reason a detailed analysis of a group of techniques and methods of cellular planning is carried out. Some of these techniques are already being implemented by many operators. Some signal propagation models are analysed, since these models allow the calculation and derivation of the parameters that describe the network performance, thus being used in the network planning process: co-channel and adjacent channel interference factors. A few planning techniques are analysed and compared to each other: cell splitting, sectorization, overlaid/underlaid, implementation of frequency hopping, load sharing, implementation of hierarquical networks (microcells and picocells), discontinuous transmission - uplink and downlink). Some models for the calculation of the

probability of blocking of new calls for different methods of channel allocation: fixed (fixed channel allocation), dynamic (dynamic channel allocation) and hybrid (hybrid channel allocation) allocation methods. A few methods for the improvement of the probability of blocking of calls are also introduced: guard channels (cut-off channels) and queuing of new and handover calls.

**Keywords:** Second generation cellular mobile networks, grade of service, co-channel and adjacent interference factor, handover calls, frequency reuse, call blocking, cellular planning methods, teletraffic models, signal propagation models.

# ÍNDICE

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 Enquadramento da dissertação .....	1
1.2 Estrutura da dissertação .....	3
<b>2. PRINCÍPIOS BÁSICOS DAS REDES MÓVEIS CELULARES.....</b>	<b>5</b>
2.1 Introdução .....	5
2.2 Breve introdução ao sistema GSM .....	8
2.2.1 Arquitectura do sistema GSM .....	11
2.2.2 Interface rádio do sistema GSM.....	14
2.2.2.1 Estrutura dos intervalos de tempo .....	14
2.2.3 Canais lógicos .....	16
2.2.3.1 Canal de tráfego - TCH .....	16
2.2.3.2 Canais de controlo - CCH.....	17
Canais de difusão - BCH .....	18
2.3 Reutilização de frequências.....	21
2.4 Interferência co-canal.....	26
2.4.1 Análise do factor de interferência co-canal como processo estocástico.....	28
2.5 Factor de interferência por canal adjacente.....	31
2.6 Métodos de atribuição de recursos rádio em sistemas de rádio móvel celular .....	33
2.7 Dimensionamento dos recursos rádio da rede.....	36
2.8 Processamento de <i>handovers</i> em redes móveis celulares .....	45
2.8.1 Mecanismos de atribuição de prioridades no processo de <i>handover</i> .....	52
2.8.2 Formas alternativas para o mecanismo de <i>handover</i> .....	53
2.9 Planeamento em redes móveis celulares.....	53
2.9.1 Padrões de reutilização de frequências.....	55
2.9.1.1 Padrão de reutilização $N_{cg} = 9$ .....	56
2.9.2 Metodologia seguida para aumento da capacidade das redes móveis celulares .....	59
2.9.2.1 Decomposição (cell splitting).....	60

2.9.2.2	Sectorização.....	62
2.9.2.3	Overlaid/Underlaid .....	64
2.10	Conclusões.....	70
<b>3.</b>	<b>PROPAGAÇÃO EM SISTEMAS DE RÁDIO MÓVEL CELULAR .....</b>	<b>72</b>
3.1	Introdução .....	72
3.2	Classificação das estações base da arquitectura de uma rede móvel celular .....	75
3.3	Diferentes cenários para o rádio móvel terrestre.....	76
3.3.1	Diferentes mecanismos de propagação: reflexão, difracção e dispersão.....	78
3.3.1.1	Aspectos relacionados com a topografia .....	81
3.3.1.2	Aspectos relacionados com o ambiente de propagação (morfologia) .....	82
3.4	Metodologia a seguir no projecto de uma estação base .....	83
3.4.1	Modelos de propagação comumente utilizados no planeamento celular.....	83
3.4.1.1	Modelo de Okumura-Hata.....	84
3.4.1.2	Modelo de Walfish-Ikegami.....	87
3.4.2	Variação logarítmica da atenuação do sinal com a distância .....	90
3.5	Conclusões .....	91
<b>4.</b>	<b>GESTÃO DO TRÁFEGO EM REDES MÓVEIS CELULARES.....</b>	<b>93</b>
4.1	Introdução .....	93
4.2	Modelos e factores de mérito das redes móveis celulares .....	98
4.2.1	Distribuição do tempo de ocupação de um recurso rádio em redes móveis celulares....	103
4.2.2	Derivação das expressões para a taxa de estabelecimento de novas chamadas $\lambda_n$ e de ocorrência de chamadas em processo de <i>handover</i> $\lambda_h$ .....	106
4.2.3	Derivação dos parâmetros descritores do desempenho da rede .....	108
4.3	Implementação de diferentes arquitecturas para uma rede móvel celular.....	113
4.3.1	Utilização de canais de guarda .....	114
4.3.2	Utilização de canais de guarda e de filas de espera para atribuição às chamadas em processo de <i>handover</i> .....	117
4.3.3	Utilização de filas de espera com ordenação dinâmica para chamadas em processo de <i>handover</i> .....	124

4.3.4	Utilização de canais de guarda para chamadas em processo de <i>handover</i> e de filas de espera para chamadas em fase de estabelecimento.....	128
4.3.5	Repetição continuada de tentativas de estabelecimento de chamadas e número limitado de assinantes registados por célula.....	129
4.3.6	Utilização do método <i>directed retry</i> - DR.....	133
4.3.6.1	Exemplo de implementação prática do método <i>directed retry</i> - “assignment to another cell”	140
4.3.7	Utilização da técnica denominada <i>directed handoff</i> - DH.....	141
4.3.7.1	Exemplo de implementação prática do método <i>directed handoff</i> - “cell load sharing”	142
4.4	Conclusões .....	143
<b>5.</b>	<b>TÉCNICAS AVANÇADAS DE PLANEAMENTO CELULAR.....</b>	<b>145</b>
5.1	Introdução .....	145
5.2	Implementação do <i>frequency hopping</i> (saltos de frequência) em redes móveis celulares. 146	
5.2.1	Análise do ganho na qualidade da ligação rádio conseguido com a introdução do FH .	148
5.2.2	Métodos de implementação do <i>frequency hopping</i> .....	156
5.2.2.1	Implementação em baseband hopping.....	157
5.2.2.2	Implementação em synthesized hopping.....	158
5.2.3	Configuração .....	159
5.2.4	Algoritmos implementados para as sequências de salto.....	161
5.2.5	Aspectos de planeamento celular a ter em conta com a implementação do FH.....	165
5.2.5.1	Aspectos a ter em conta na definição do padrão de reutilização para a banda de BCCHs	166
	Sem hopping.....	166
5.2.5.2	Definição do padrão de reutilização para a banda de TCHs.....	167
5.2.5.3	Exemplo de um processo de escolha do padrão de reutilização para a banda de TCHs	168
5.2.6	Exemplo de um processo de validação do FH numa rede celular operacional .....	168
5.2.7	Conclusões .....	170
5.3	Ajuste dinâmico da potência ( <i>dynamic power transmission</i> ).....	171
5.3.1	Descrição do algoritmo de ajuste dinâmico de potência .....	175
5.3.2	Implementação do algoritmo de ajuste dinâmico da potência em conjunto com o <i>frequency hopping</i> .....	176
5.3.3	Conclusões .....	177

5.4	<b>Transmissão descontinuada de voz e/ou dados (DTX - <i>discontinuous transmission</i>).....</b>	<b>177</b>
5.4.1	Resultados práticos da aplicação do DTX.....	179
5.4.2	Caso prático da implementação do FH em conjunto com o ajuste dinâmico da potência e do DTX	180
5.4.3	Conclusões .....	183
<b>6.</b>	<b>REDES MÓVEIS HIERÁRQUICAS .....</b>	<b>185</b>
6.1	Introdução .....	185
6.2	<b>Redes móveis hierárquicas - princípios básicos.....</b>	<b>190</b>
6.2.1	Estabelecimento de prioridades na gestão do tráfego oferecido.....	190
6.2.2	Distinção entre tráfego “lento” e tráfego “rápido” .....	193
6.2.3	Implementação em arquitecturas multi-banda (GSM 900 e 1800 MHz) .....	195
6.2.4	Evolução para a cobertura de espaços públicos interiores (cobertura <i>indoor</i> ) .....	195
6.2.5	Aspectos a considerar no projecto e implementação de uma rede móvel celular hierárquica	197
6.3	<b>Redes móveis hierárquicas - propagação em ambientes microcelulares.....</b>	<b>198</b>
6.4	<b>Redes móveis hierárquicas - planeamento celular .....</b>	<b>201</b>
6.4.1	Diferentes formas de organização da camada microcelular .....	201
6.4.2	Métodos utilizados na partilha do espectro disponível entre as camadas da rede .....	202
6.4.2.1	Reutilização do espectro disponível entre microcélulas isoladas para cobertura de áreas tipo hot spot.....	203
6.4.2.2	Separação do espectro disponível entre as diferentes camadas da rede.....	208
6.4.2.3	Controlo da potência emitida em redes hierárquicas .....	212
6.5	<b>Redes móveis hierárquicas - gestão do mecanismo de <i>handover</i>.....</b>	<b>214</b>
6.5.1	Métodos de distribuição do tráfego “rápido” e “lento” pelas camadas de uma rede hierárquica	216
6.5.1.1	Handover da camada macrocelular para a camada microcelular.....	218
6.5.1.2	Handover dentro da camada microcelular. ....	219
6.6	<b>Redes móveis hierárquicas - engenharia de teletráfego.....</b>	<b>220</b>
6.6.1	Modelos de tráfego para redes móveis hierárquicas - primeiro exemplo .....	220
6.6.1.1	Desenvolvimento do modelo de tráfego utilizado. ....	228
6.6.1.2	Obtenção dos parâmetros descritores do desempenho. ....	233
6.6.1.3	- Análise do desempenho da arquitectura de rede e apresentação dos resultados.....	236
6.6.2	Modelos de tráfego para redes hierárquicas - segundo exemplo.....	238
6.6.2.1	Desenvolvimento do modelo de tráfego utilizado. ....	239

---

6.6.2.2	Análise do desempenho da arquitectura de rede e apresentação dos resultados.....	243
6.7	Conclusões .....	244
7.	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>247</b>
8.	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>252</b>
9.	<b>GLOSSÁRIO.....</b>	<b>257</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1– Esquema de atribuição da largura de banda espectral ao sistema GSM. ....	9
Figura 2.2– Arquitectura do sistema GSM.....	13
Figura 2.3– Estrutura de uma multitrama.....	15
Figura 2.4– Multitrama de canal de controlo (a) sentido ascendente (b) sentido descendente. ....	17
Figura 2.5– Formação do padrão de reutilização $N_{cg} = 19$ .....	24
Figura 2.6– Perspectiva da cobertura real de uma dada região geográfica. ....	25
Figura 2.7– Ilustração do fenómeno interferência por canal adjacente.....	32
Figura 2.8– Ilustração do efeito resultante da definição do nível de threshold e da margem de histerese no processo de handover. ....	47
Figura 2.9– Ilustração do efeito conseguido com a definição da margem de histerese. ....	50
Figura 2.10 - Mapeamento dos grupos de frequências para o padrão de reutilização $N_{cg} = 9$ .....	57
Figura 2.11 - Esquema de atribuição de frequências no padrão de reutilização $N_{cg} = 9$ .....	58
Figura 2.12 - Ilustração de um esquema de decomposição celular. ....	61
Figura 2.13 - Padrão de reutilização 7/21. ....	64
Figura 2.14 - Ilustração da organização em camadas overlaid/underlaid. ....	65
Figura 2.15 - Mudança de localização (da camada Underlaid para a camada Overlaid). ....	67
Figura 2.16 - Mudança de localização (da camada Overlaid para a camada Underlaid) ....	68
Figura 3.1 –Atenuação do sinal (em dB) para a propagação em meio livre. ....	77
Figura 3.2 - Diferentes mecanismos de propagação.....	79
Figura 3.3 – Variação do coeficiente de atenuação com a altura do sistema de antenas.....	86
Figura 3.4 - Modelo de propagação em ambientes urbanos.....	89
Figura 3.5 – Variação do coeficiente de atenuação com a altura dos edifícios. ....	89
Figura 4.1 – Modelo funcional (gestão do tráfego oferecido) a uma célula. ....	100
Figura 4.2 – Ilustração do dwell time e channel holding time. ....	102
Figura 4.3– Ilustração do princípio da reflexão na ocorrência de um handover. ....	104
Figura 4.4– Instantes de desencadeamento do processo de handover. ....	110
Figura 4.5- Diagrama de transição de estados (cadeia de Markov) relativo à uma arquitectura de rede móvel celular genérica.....	111
Figura 4.6 - Diagrama de transição de estados da cadeia de Markov para a arquitectura considerada..	115
Figura 4.7 - Diagrama de transição de estados da cadeia de Markov para a arquitectura considerada..	120
Figura 4.8 - Comportamento do assinante. ....	130
Figura 4.9 - Cluster de células para o modelo de tráfego associado ao DR. ....	137
Figura 5.1– Atenuação dos fading dips através do frequency hopping.....	148
Figura 5.2– Arquitectura necessária para o baseband hopping. ....	157
Figura 5.3– Arquitectura necessária para o synthesized hopping. ....	159
Figura 5.4- Cluster de células para o padrão de reutilização 4/12.....	166

Figura 5.5- Representação da sub-área de regulação da área de dominância de uma célula. ....	173
Figura 5.6- Variação da potência emitida. ....	174
Figura 5.7- Variação do nível médio do sinal recebido. ....	175
Figura 6.1- Arquitectura de uma rede celular hierárquica. ....	190
Figura 6.2- Diferentes mecanismos de propagação em ambientes microcelulares. ....	199
Figura 6.3- Microcélula isolada num cluster de macrocélulas. ....	203
Figura 6.4- Interferências entre camadas. ....	204
Figura 6.5- Variação na relação $C/I$ com a potência emitida na camada microcelular. ....	207
Figura 6.6- Padrão de reutilização múltiplo de frequências - MRP. ....	210
Figura 6.7- Influência do ajuste de potência na taxa de terminação forçada de chamadas a decorrer em redes hierárquicas. ....	213
Figura 6.8- Padrão de Manatan com a indicação da área de dominância das microcélulas. ....	223
Figura 6.9- Aproximação para o tráfego por handover. ....	225
Figura 6.10- Ilustração dos diferentes tipos de fluxos de chamadas e das probabilidades de bloqueio para um grupo de microcélulas a qual são atribuídos $C$ recursos rádio e uma única macrocélula a qual são atribuídos $C_0$ recursos rádio. ....	232
Figura 6.11- Variante da organização em arquitectura hierárquica. ....	239
Figura 6.12- Diagrama de transição de estados para o estado genérico $s$ , para uma estrutura em rede hierárquica formada por MAs compostas por uma macrocélula cuja área de cobertura sobrepõe a área de cobertura de tres microcélulas. ....	241

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Capacidade teórica para diferentes configurações.....	44
Tabela 2.2 -Classe “densamente urbana”.....	44
Tabela 2.3 - Classe “urbana”.....	44
Tabela 2.4 - Classe “rural”.....	44
Tabela 2.5 - Factor de carga para os diferentes tipos de ambientes considerados. ....	45
Tabela 2.6 – Esquema de atribuição de portadoras para o padrão $N_{cg} = 9$ .....	57
Tabela 2.7 – Esquema de atribuição de portadoras para o padrão $N_{cg} = 7/21$ – sector 1.....	63
Tabela 2.8 – Esquema de atribuição de portadoras para o padrão $N_{cg} = 7/21$ – sector 2.....	63
Tabela 2.9 – Esquema de atribuição de portadoras para o padrão $N_{cg} = 7/21$ – sector 3.....	63
Tabela 3.1 – Diferentes tipos de estações base utilizadas na arquitectura de uma rede móvel celular. ...	76
Tabela 3.2 – Valores do coeficiente de atenuação com o tipo de ambiente de propagação considerado. ....	90
Tabela 3.3 – Estimativas do desvio-padrão para o tipo de ambiente considerado. ....	91
Tabela 5.1 – Modelo de simulação considerado. ....	150
Tabela 5.2 – Modelo de simulação considerado. ....	154
Tabela 5.3 – Resultados obtidos a partir do processo de simulação .....	155
Tabela 5.4 – Configurações de frequências utilizadas no processo de simulação. ....	162
Tabela 5.5 – Especificações do GSM para o factor de interferência co-canal .....	166
Tabela 5.6 – Esquema de atribuição de portadoras para o padrão 4/12.....	167
Tabela 5.7 – Definição dos grupos de salto para o padrão 4/12.....	167
Tabela 5.8 – Diferentes modos de atribuição dos grupos de salto. ....	169
Tabela 5.9 – Resultados do processo de simulação.....	183

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento da dissertação

O processo de expansão dos sistemas celulares de comunicações móveis tem sido na presente década, e continuará a sê-lo com certeza nos próximos anos, uma das principais actividades na área das telecomunicações.

Após a introdução da tecnologia digital que caracterizou o processo de transição para os sistemas celulares de segunda geração, em contraste com os sistemas analógicos de primeira geração, assistiu-se a uma verdadeira explosão do número de assinantes e da taxa de penetração do serviço.

Vários foram os factores que contribuíram para este crescimento. Uma das razões prende-se ao facto de a evolução tecnológica ter levado a um processo de miniaturização dos terminais móveis disponibilizados a cada assinante. Outra razão que pode ser apontada é a diminuição acentuada das tarifas praticadas pelos operadores devido ao crescimento no tráfego gerado e na taxa de penetração do serviço, bem como da vulgarização do serviço.

O efeito resultante deste processo é a transição para os sistemas celulares de terceira geração, caracterizados pela total mobilidade pessoal do assinante que se torna independente do tipo de terminal utilizado. O assinante do serviço passa a estar contactável em qualquer lugar, seja em casa, no escritório, no transporte para o trabalho, etc., e através de um único número. Este é o princípio básico das redes celulares pessoais dos sistemas de terceira geração.

Para fazer face ao aumento do tráfego torna-se necessário redimensionar continuamente as redes. Este redimensionamento está, numa primeira fase, intrinsecamente ligado a um processo de diminuição do tamanho de cada célula, por forma a aumentar o número de recursos rádio disponíveis em cada uma, permitindo o escoamento do tráfego em excesso e a manutenção do grau de serviço prestado.

No entanto, a diminuição da área geográfica de cobertura de cada célula implica um aumento na interferência total resultante do processo de reutilização de frequências (característico das redes celulares) devido à diminuição da distância de separação entre células que utilizam a mesma gama de frequências (células co-canais). Existe assim uma relação de compromisso que importa satisfazer. Para se aumentar a capacidade da rede (através do aumento do número de recursos rádio tornados disponíveis em cada célula) é necessário diminuir a distância geográfica entre células co-canais (resultante do processo de reutilização de frequências), resultando num aumento da interferência total gerada e em consequência um aumento na qualidade do serviço prestado. Ou seja, o aumento da capacidade não deve ser conseguido à custa de uma degradação insustentável da qualidade, sob pena de que a taxa de chamadas forçadas a terminar devido à interferências na ligação rádio com cada estação base aumente significativamente.

Mas a manutenção do grau de serviço prestado não se prende apenas à necessidade de maximizar o número de recursos rádio disponíveis em cada célula. Está também directamente ligada ao valor permitido para a probabilidade de terminação forçada de chamadas a decorrer. As redes móveis celulares diferem das redes fixas na medida em que é permitida a total mobilidade de cada assinante do serviço. Durante a fase de transposição das fronteiras de cada célula, o mecanismo de *handover* é responsável pelo processo de manutenção das chamadas a decorrer. Para tal, procura a atribuição de um novo canal de rádio na célula de destino enquanto permite a libertação do recurso anteriormente utilizado na célula de origem. Importa assim que existam canais de rádio disponíveis na célula de destino para que a chamada não seja forçada a terminar, o que iria originar uma degradação na qualidade do serviço prestado. Do ponto de vista do assinante do serviço é mais desagradável o processo de terminação forçada de uma chamada a decorrer do que o seu bloqueio em fase de estabelecimento, pelo que o correcto planeamento da rede é um aspecto fundamental. Este planeamento envolve o estudo de modelos de mobilidade de cada assinante bem como do comportamento da rede em termos da gestão do tráfego total que é gerado. Estes modelos conduzem à obtenção de estratégias de planeamento que quando implementadas na arquitectura de rede satisfazem os graus de exigência de cada assinante do ponto de vista do serviço prestado.

## 1.2 Estrutura da dissertação

Esta dissertação aborda a problemática do planeamento e da engenharia de teletráfego em redes móveis celulares.

No capítulo 2 são apresentados os conceitos básicos de um sistema móvel celular, tais como: o princípio da reutilização de frequências, o mecanismo de *handover*, os diferentes métodos de acesso aos recursos disponíveis na fase quer de estabelecimento de uma chamada, quer de ocorrência de um *handover*, a existência e dimensionamento dos factores de interferência co-canal e por canal adjacente derivados do processo de reutilização de frequências, as técnicas básicas de aumento da capacidade numa rede móvel celular e finalmente é apresentada uma pequena descrição do caso de estudo utilizado nesta dissertação: o sistema GSM.

O capítulo 3 aborda a questão da propagação das ondas electromagnéticas em redes móveis celulares. São apresentados os mecanismos básicos através dos quais se dá a propagação no canal rádio, bem como os modelos de propagação normalmente utilizados no planeamento celular. A análise do processo de propagação é fundamental no correcto dimensionamento da arquitectura da rede e no processo de estimação dos factores de interferência co-canal e por canal adjacente.

No capítulo 4 é analisado em pormenor o processo de dimensionamento e a engenharia de teletráfego em redes móveis celulares. São apresentadas um conjunto de estratégias de planeamento por forma a maximizar o grau de serviço prestado (medido através da taxa de bloqueio de chamadas na sua fase de estabelecimento e da terminação forçada de chamadas a decorrer). Para cada estratégia são desenvolvidos modelos de tráfego que levam à derivação de parâmetros descritores do seu desempenho e que permitem avaliar a sua viabilidade de introdução numa arquitectura celular.

No capítulo 5 são apresentadas um conjunto de técnicas avançadas de planeamento celular que ao serem introduzidas na arquitectura de rede levam a um aumento considerável da capacidade instalada, permitindo dar resposta ao crescimento explosivo do tráfego e à manutenção do serviço prestado.

No capítulo 6 é abordado em pormenor o processo de evolução para uma arquitectura de rede organizada em camadas. São apresentados os princípios básicos de uma organização hierárquica, as técnicas básicas de planeamento, a implementação do mecanismo de *handover* neste tipo de redes, bem como são apresentadas e analisadas um conjunto de estratégias de planeamento para este tipo de redes. Mais uma vez estas técnicas são analisadas a partir de parâmetros descritores do seu desempenho e obtidos a partir da elaboração de modelos de tráfego.

No capítulo 7 são apresentadas as conclusões finais da dissertação.

## 2. PRINCÍPIOS BÁSICOS DAS REDES MÓVEIS CELULARES

### 2.1 Introdução

Em 1947, engenheiros dos *Bell Laboratories* apresentaram o conceito de rádio celular. Em vez de cobrir uma área extensa com um transmissor de alta potência, o conceito celular propunha a divisão da área a cobrir em porções mais pequenas, chamadas *células*, cada uma servida por um transmissor de baixa potência, a que se dá o nome de *estação base*. Reduzindo as áreas de cobertura de cada estação base e utilizando um número elevado de pequenas células, tornava-se possível reutilizar a frequência e, desse modo, aumentar significativamente a capacidade do sistema. O conceito básico era assim a *reutilização de frequências*.

No entanto, cedo se verificou que, devido à interferência entre móveis operando na mesma frequência em células próximas, as mesmas frequências não podiam ser utilizadas em todas as células. A este tipo de interferência chama-se *interferência co-canal*. A razão entre o nível da portadora desejada e o nível da interferência co-canal (*factor de interferência co-canal C/I*) passou assim a ser um parâmetro fundamental para a capacidade de reutilização do sistema. Era então necessário deixar algumas células de intervalo, de modo a satisfazer o factor de interferência co-canal, antes que se pudesse voltar a utilizar as mesmas frequências. À distância entre células que utilizem o mesmo conjunto de frequências chama-se *distância de reutilização D*.

Verificou-se também que os efeitos da interferência não estavam relacionados com o valor absoluto da distância entre células, mas sim com a relação entre a distância de reutilização e o raio das células da arquitectura da rede. A esta relação  $D/R$ , chama-se *factor de redução co-canal*. Este facto levou à criação de *padrões de reutilização*, que são determinados pelo número de células pelas quais se distribuem as várias portadoras disponíveis no sistema antes que se possam voltar a ser utilizadas a uma distância  $D$ .

É implícito concluir que é possível aumentar a densidade de reutilização de frequências, e portanto a capacidade da rede, devido ao número de portadoras disponíveis para atribuição a cada célula do padrão, através da diminuição das células e portanto da distância de reutilização  $D$ .

É também implícito concluir que existe um compromisso entre a qualidade de transmissão e capacidade de tráfego. Quanto mais baixo for o factor de redução co-canal ( $D/R$ ) maior é a probabilidade de interferência e, conseqüentemente, pior a qualidade de transmissão, mas menor é o número de células por padrão de reutilização e, conseqüentemente, maior a capacidade do sistema.

Outra das vantagens da organização da arquitectura de uma rede móvel no formato celular é a sua capacidade de crescimento gradual. Uma rede celular é inicialmente projectada para células com a maior área de cobertura possível e uma qualidade de serviço elevada. À medida que o número de utilizadores vai crescendo, vai-se assistindo a uma degradação da qualidade do serviço, nomeadamente em termos de bloqueio de chamadas, mas ainda dentro de limites aceitáveis. No entanto, se o número de assinantes continuar a crescer, torna-se necessário efectuar alguma alteração ao nível do sistema.

As redes celulares oferecem um conjunto de possibilidades para resolver este problema sem necessitarem de espectro adicional. Algumas das técnicas de implementação possíveis são a decomposição e a sectorização, conforme se verá nas secções a seguir.

Pelo que é descrito acima podemos afirmar que o planeamento de uma rede móvel celular compreende essencialmente três fases distintas:

### **Fase 1: estabelecimento da cobertura da rede (cobertura)**

Nesta fase do planeamento, o principal objectivo a ter em conta é a instalação de estações base por forma a expandir a cobertura da rede ao longo da área geográfica alvo. Nesta fase de arranque da rede normalmente são utilizadas estações base com sistemas de antenas omnidireccionais e localizadas em sítios relativamente elevados, por forma a que a área de cobertura de cada célula seja o mais abrangente possível. A finalidade desta estratégia é cobrir a maior área geográfica com a menor densidade de

estações base possível. De notar que nesta fase de arranque da rede o tráfego oferecido a cada célula é reduzido, não constituindo problema para o *grau de serviço* prestado.

Por outro lado, o reduzido número de estações base faz com que possam ser implementadas distâncias de reutilização que limitam a interferência co-canal e por canal adjacente a valores condizentes com um bom índice de qualidade para o processo de comunicação. Por exemplo, para um padrão de reutilização  $N_{cg} = 12$  (normalmente utilizado na fase de arranque) e um índice de propagação  $n = 4$  a relação C/I é igual a 20dB.

### **Fase 2: manutenção do grau de serviço prestado (capacidade)**

A partir daqui a expansão da cobertura da rede é já um dado praticamente adquirido. O objectivo fundamental passa a ser o re-dimensionamento da sua arquitectura que permita responder ao aumento do tráfego oferecido com a adesão de novos clientes ao serviço (repensar da arquitectura da rede por forma a manter o *grau de serviço* prestado). As estações base passam a ser instaladas em sítios mais baixos e passam a ser utilizados sistemas de antenas directivas (passam a ser sectorizadas por forma a possibilitar a integração das novas estações na arquitectura da rede).

Aqui começa-se também por planear a sua arquitectura em função do tipo de ambiente a que se destina (em termos de tráfego gerado). Basicamente são considerados dois tipos de ambientes (mais as suas variantes): os ambientes urbanos e os ambientes rurais. Os ambientes urbanos são ambientes geradores de grande densidade de tráfego. Já os ambientes rurais são caracterizados por serem geradores de uma menor densidade de tráfego.

### **Fase 3 - estruturação da arquitectura em camadas (cobertura e capacidade)**

Nesta fase do planeamento, a arquitectura da rede deixa de ser constituída por uma só camada (caso da primeira e segunda fases) passando a ser constituída por 2 ou 3 camadas (organização em estrutura hierárquica). A introdução de novos serviços, os avanços tecnológicos que permitem ao assinante ter acesso ao serviço virtualmente em qualquer lugar e a redução das tarifas com o aumento da taxa de penetração, são factores que implicaram nos últimos anos um aumento explosivo do tráfego oferecido a este tipo de redes. Surgiu assim a necessidade de se proceder a uma nova reorganização

da arquitectura da rede, que permitisse a manutenção da qualidade do serviço prestado, como forma de satisfação do grau (cada vez maior) de exigência do cliente e como resposta à concorrência. Além do dimensionamento em função do tráfego, passa a ser dada importância à expansão da cobertura para os espaços públicos interiores tais como: centros comerciais, terminais de aeroportos, etc...

Este capítulo aborda os aspectos fundamentais a ter em conta no planeamento e dimensionamento das redes móveis celulares, no que concerne ao estabelecimento da sua cobertura e da sua capacidade de processamento das chamadas que são geradas sob a sua área de cobertura.

Na secção 2.2 é feita uma breve descrição do sistema GSM, nomeadamente da arquitectura da sua interface rádio. Na secção 2.3 descreve-se o princípio da *reutilização de frequências*, fundamental no planeamento da arquitectura de uma rede móvel do tipo celular, bem como os parâmetros fundamentais a considerar no projecto e implementação deste tipo de redes: o *factor de interferência co-canal*, C/I e o *factor de interferência por canal adjacente*, C/A. Nas secções 2.4 e 2.5 são analisadas em pormenor as duas fontes de interferência limitativas do desempenho dos sistemas de rádio móvel celular: a *interferência co-canal* e a *interferência por canal adjacente* respectivamente. Na secção 2.6 são analisados os métodos de atribuição dos recursos rádio disponíveis nos sistemas de rádio móvel celular. Na secção 2.7 é feita uma abordagem da forma como normalmente é feito o dimensionamento dos recursos rádio a atribuir a cada célula da rede, ou seja, da sua capacidade em função do tráfego oferecido que é esperado. Na secção 2.8 é feita uma análise pormenorizada do mecanismo e dos principais algoritmos de *handover* implementados para os sistemas de rádio móvel celular. Na secção 2.9 são apresentadas as conclusões.

## 2.2 Breve introdução ao sistema GSM

O ITU (*International Telecommunications Unit*) é o organismo responsável a nível internacional pela gestão e atribuição do espectro rádio-eléctrico. Em 1983 os estados membros da União Europeia aprovaram uma directiva que impunha a reserva das bandas espectrais 890-915MHz e 935-960MHz para atribuição a um sistema de comunicações móveis de âmbito pan-europeu e que viria a tornar-se no sistema GSM

(*Global System for Mobile Communications*) 900MHz. O objectivo era tornar o GSM um sistema de comunicações móveis celulares aberto através do *roaming* de cada assinante pelas redes dos estados membros que o adoptassem. Para o sistema GSM foi reservada uma largura de banda espectral de 50MHz centrada nos 900MHz (25MHz na ligação ascendente entre o móvel e a estação base e outros 25MHz na ligação descendente entre a estação base e o móvel):

Ligação ascendente (estação móvel para a estação base): 935 - 960MHz.

Ligação descendente (estação base para a estação móvel): 890 - 915MHz.

A largura de banda espectral reservada ao sistema GSM encontra-se subdividida num conjunto de 248 portadoras. Cada portadora encontra-se subdividida num conjunto de 8 canais de rádio para tráfego ou sinalização, sendo que cada canal de rádio ocupa uma largura de banda de 200KHz.

Uma vez que existem dois sentidos para a ligação rádio (sentido ascendente e descendente), as portadoras são atribuídas aos pares (uma para cada sentido da ligação). A separação espectral entre as portadoras do mesmo par é igual a 45MHz, conforme indicado na figura 2.1.

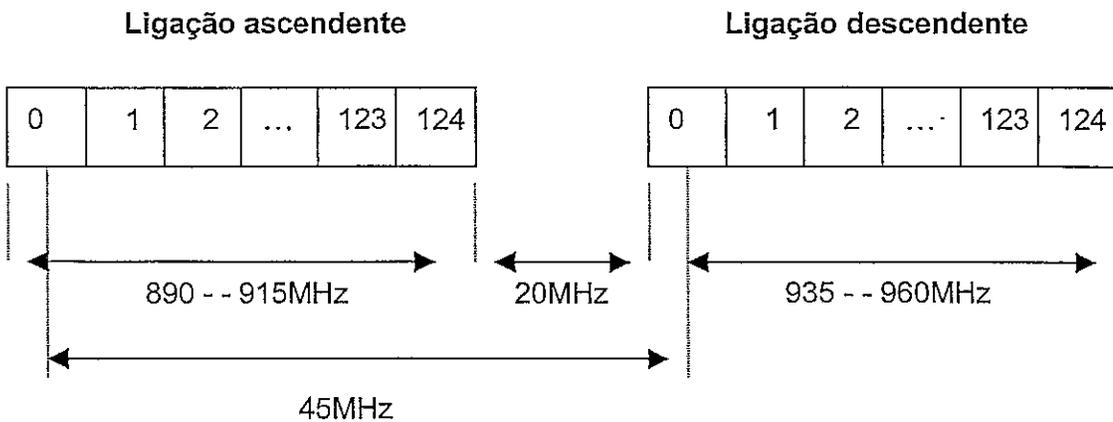


Figura 2.1– Esquema de atribuição da largura de banda espectral ao sistema GSM.

Ou seja, para 25MHz de largura de banda espectral atribuído para cada sentido da ligação rádio e 200KHz de largura de banda por canal, o número total de portadoras disponíveis para atribuição no sistema GSM900 é igual a:

$$NP = \frac{25 \times 10^5}{200 \times 10^3} = 125 \text{ pares de frequências} \quad (1)$$

Dado que são reservados 100KHz em cada uma das extremidades da largura de banda espectral como bandas de guarda, na verdade estão disponíveis para atribuição 124 portadoras. Cada portadora é identificada por um número inteiro compreendido entre 1 e 124. Por ser um sistema baseado na transmissão digital da informação, e com o objectivo de aumentar a quantidade de informação transportada em cada portadora, o sistema GSM possibilita o acesso a cada portadora por um número finito de assinantes. A partilha de cada portadora é realizada através da utilização de uma técnica de acesso múltiplo por divisão temporal (TDMA - *time division multiple access*). No sistema GSM, oito canais digitais são multiplexados temporalmente em cada frequência. Cada um destes canais constitui um intervalo de tempo (*time slot*) de cada uma das 124 portadoras. Pelos motivos apontados, o método de acesso aos recursos rádio da interface ar do sistema GSM (interface entre a estação base e a estação móvel) é uma combinação do método FDMA com o método TDMA - FDMA/TDMA.

Em Portugal, a entidade que regula o espectro radio-eléctrico é o ICP (Instituto das Comunicações de Portugal). Relativamente ao sistema GSM 900 existem neste momento três operadores de rádio móvel celular a operar. A cada um destes operadores o ICP atribuiu um total de 40 frequências (8 MHz de largura de banda):

- Operador 1 - frequências 1 a 40.
- Operador 2 - frequências 41 a 79.
- Operador 3 - frequências 80 a 119.

O GSM resulta de um trabalho de normalização que foi iniciado pelo CEPT no início da década de 80 e especifica um sistema de comunicações móveis celulares pan-europeu. O sistema GSM utiliza tecnologia digital e providencia capacidades de sinalização poderosas que possibilitam a localização e o acesso aos serviços pelo terminal móvel virtualmente em qualquer local, desde que coberto pela rede que o implementa. O GSM possibilita a mobilidade pessoal, sendo esta conseguida através da inserção de um módulo de identificação pessoal (SIM - *Subscriber Identity Module*) no terminal utilizado pelo assinante. A utilização do SIM torna o acesso ao serviço por parte do assinante independente do terminal utilizado. Esta é uma grande diferença relativamente aos sistemas analógicos de primeira geração.

A mobilidade dos assinantes apresenta dois aspectos essenciais:

- Assegurar a utilização dos serviços independentemente da localização e da rede que serve o assinante - *roaming*.
- Manutenção de uma ligação estabelecida quando o assinante se desloca entre as células da rede - *handover*.

O sistema GSM foi primeiramente introduzido no mercado em 1991. No fim de 1993 vários países não europeus da América do Sul, Ásia e Austrália adoptaram este sistema (bem como o seu equivalente em termos técnicos - o GSM1800 MHz), encontrando-se numa fase de grande expansão e desenvolvimento na Europa. Prevê-se que no ano 2000 existirão entre 20 e 50 milhões de assinantes de redes móveis celulares que utilizam o sistema GSM. O facto de se basear na tecnologia digital permite uma série de vantagens relativamente aos sistemas analógicos de primeira geração:

- Melhor qualidade de transmissão devido à maior imunidade ao ruído.
- Aumento significativo do tráfego transportado, através de uma maior rentabilização do espectro disponível, conseguida à custa de algoritmos de processamento e codificação do sinal.
- Plataforma que permite a criação e difusão de serviços de valor acrescentado além dos serviços de telefonia básicos (por exemplo através da implementação do conceito de redes inteligentes, IN).

Nesta secção é feita uma pequena descrição da arquitectura de rede do sistema GSM, nomeadamente da sua interface rádio e dos canais (de tráfego e sinalização) nela suportados.

### 2.2.1 Arquitectura do sistema GSM

A arquitectura do sistema GSM consiste de três subsistemas interligados e que interagem entre si e com os assinantes do serviço através de interfaces de rede previamente definidas. Os três subsistemas são os seguintes:

#### Base Station Subsystem - BSS

Também denominado subsistema de rádio, é responsável pela gestão e atribuição dos canais de rádio que possibilitam a ligação entre as estações móveis (MS) e os comutadores da rede (MSC). Compreende:

- A estação base - BTS (*Base Transceiver Station*) que inclui os recursos de rádio e de sinalização necessários ao tráfego de uma célula.
- O nó de controlo e gestão das estações base - BSC (*Base Station Controller*) que controla as estações base e faz a gestão global dos canais de rádio ao nível da área de cobertura da BSS.

A BSS é também responsável pelas funções de transcodificação da voz GSM/PCM.

### **Network and Switching Subsystem - NSS**

É responsável pelas funções de comutação do sistema e permite que os comutadores da rede (MSCs) comuniquem entre si e com outras redes tais como as redes fixas PSTN e ISDN. Compreende:

- Os comutadores da rede - MSC (*Mobile Switching Center*) que não passa de um comutador que adicionalmente possui mecanismos que possibilitam o controle de procedimentos como sejam os associados ao registo de localização de cada assinante e de execução de *handovers*. O MSC é o órgão responsável pelas funções de comutação das estações móveis que estão sob a sua área de influência.
- Os registos de localização de base dos assinantes - HLR (*Home Location Register*) que consistem numa base de dados que efectua a gestão dos assinantes através da armazenagem de um conjunto de informações que lhes diz respeito, tais como: serviços que podem utilizar e indicação da sua localização na rede por exemplo.
- Os registos de localização temporária - VLR (*Visitor Location Register*) que controlam as estações móveis que se deslocam numa dada área de localização. Quando uma estação móvel entra numa área de localização associada a um MSC/VLR, é feita a notificação por parte do MSC para o VLR da nova localização da estação móvel. O VLR também contém a informação necessária ao processamento das chamadas originadas ou terminadas pelas estações móveis registadas na sua base de dados.

- centro de autenticação- AUC (*Authentication Center*) que é uma base de dados fortemente protegida, responsável pelas tarefas de encriptação de toda a informação respeitante a cada assinante declarado num HLR. O HLR contém um registo - EIR (*Equipment Identity Register*) que identifica equipamento roubado ou fraudulento que transmite informação que não condiz com aquela que esta armazenada no HLR ou VLR.

### Operations and Support Subsystem - OSS

O OSS suporta um ou mais OMCs (*Operations and Maintenance Centers*), utilizados na monitorização e manutenção do desempenho de cada estação móvel, BTS, BSC e MSC da rede.

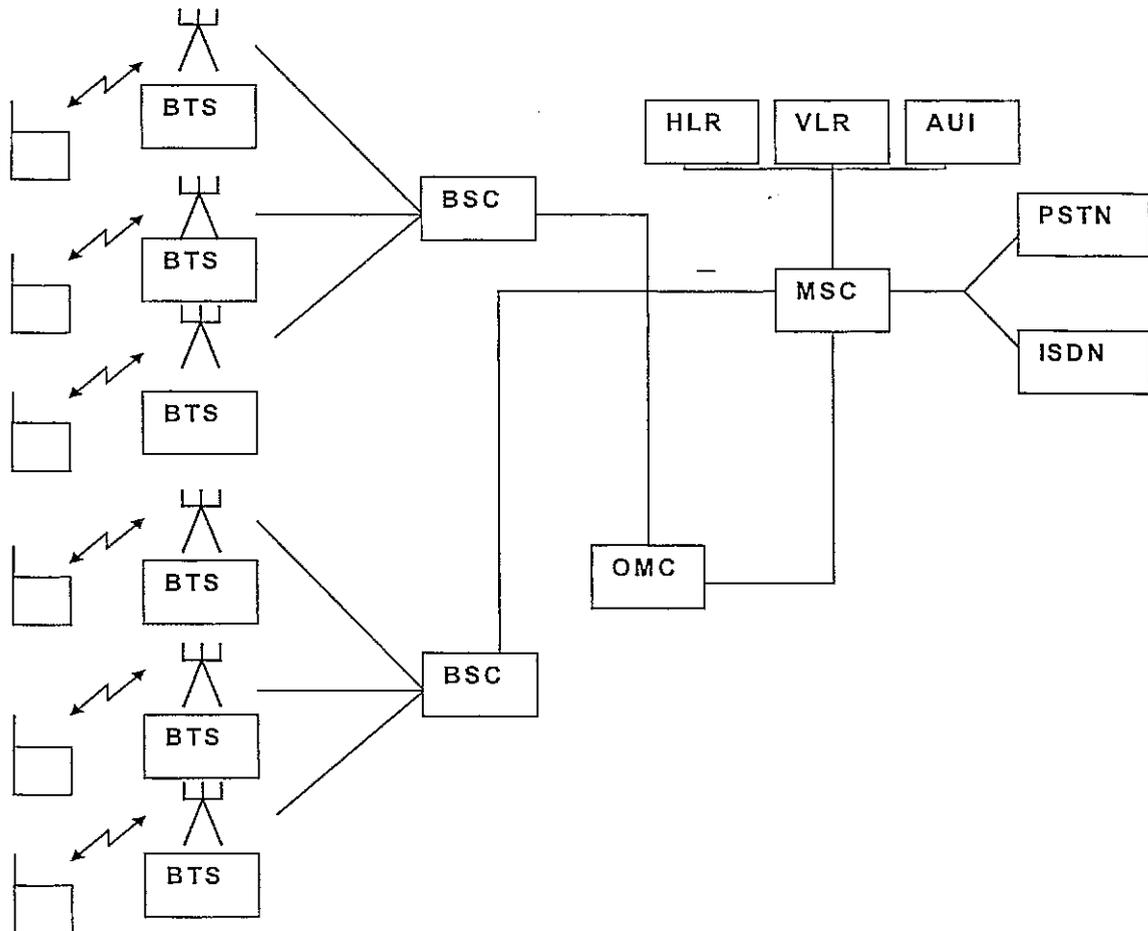


Figura 2.2- Arquitectura do sistema GSM.

A figura 2.2 ilustra a arquitectura do sistema GSM. Nela estão representados os subsistemas descritos. Como pode ser observado, a interface que estabelece a ligação

entre a estação base e o BSC é denominada *interface Abis*. Os BSCs estão fisicamente ligados ao MSC por meio de *links* de microondas ou linhas comutadas. A interface de ligação, denominada *interface A-Ter*, utiliza o sistema de sinalização SS7 responsável pelo suporte de mensagens de sinalização entre o MSC e a BSS, bem como a troca de mensagens entre os assinantes e o MSC.

## 2.2.2 Interface rádio do sistema GSM

A combinação de um intervalo de tempo com um canal de rádio constitui um canal físico. Cada um desses canais físicos pode ser mapeado em diferentes canais lógicos em diferentes instantes de tempo.

### 2.2.2.1 Estrutura dos intervalos de tempo

A duração de cada intervalo de tempo é de 0,577ms, ocupando cada trama de oito intervalos de tempo (uma trama TDMA) 4,615ms. A velocidade de transmissão é de 270Kbits/s, com modulação GMSK com  $BT = 0,3$ . Cada intervalo de tempo corresponde à duração de 156,25 bits, preenchido fisicamente com diversos tipos de rajadas (*bursts*) que ocupam uma carga útil menor do que a duração do intervalo de tempo (período de guarda). Cada estação móvel transmite uma rajada de bits durante o intervalo de tempo que lhe é atribuído. Estas rajadas apresentam um dos formatos seguintes:

- Rajada normal (*normal burst*). - É utilizada no transporte de canais de tráfego e de controlo em ambos os sentidos (ascendente e descendente). Contém 116 (2x58) bits encriptados e um intervalo de guarda de 8,25 bits. A sequência de treinamento é constituída por 26 bits e obedece a um padrão que é repetido com um período de 8 rajadas, identificando os BCC (*Base Station Colour Codes*) da respectiva estação base.
- Rajada de correcção de frequência (*frequency correction burst*). - É utilizada no processo de correcção da frequência da estação móvel, equivalendo a uma portadora não modulada deslocada na frequência e inclui um tempo de guarda igual ao da rajada normal. A repetição cíclica desta rajada compõe o chamado canal de

correção de frequência (FCCH - *frequency correction channel*), conforme se verá mais à frente.

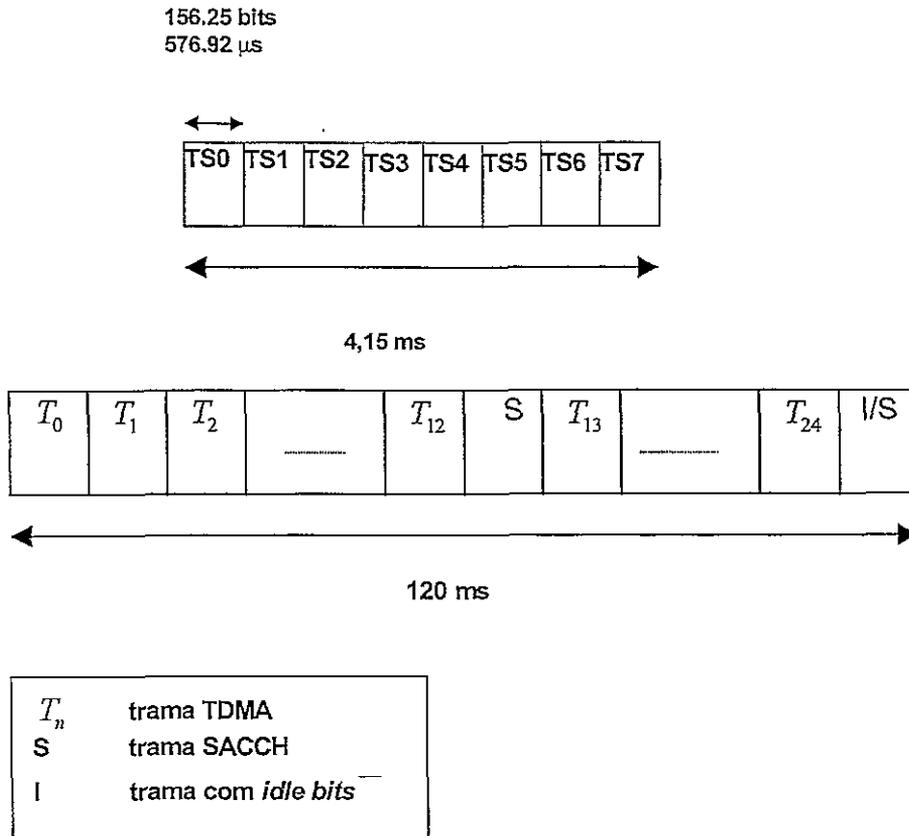


Figura 2.3– Estrutura de uma multitrama

- Rajada de sincronização (*synchronization burst*). - É utilizada no alinhamento temporal da estação móvel. Contém uma longa sequência de treinamento e transporta a informação do número da trama TDMA bem como a identificação da estação base, por forma a permitir o sincronismo da estação móvel com a estação base. É difundida em conjunto com a rajada de correção de frequência. A repetição cíclica desta rajada compõe o chamado canal de sincronismo (SCH-*synchronization channel*), conforme se verá mais à frente.
- Rajada de acesso (*access burst*). - É utilizada para acesso aleatório da estação móvel e caracterizada por um longo período de guarda (duração de 68,25 bits) de modo a acomodar a emissão de rajadas de uma estação móvel que desconhece o avanço no tempo aquando do acesso inicial. A repetição cíclica desta rajada

compõe o chamado canal de acesso aleatório ao meio de transmissão (RACH - *random access channel*).

### 2.2.3 Canais lógicos

O sistema GSM define um conjunto de canais lógicos para transporte de tráfego e sinalização, construídos a partir da associação de tramas básicas de 8 intervalos de tempo (tramas TDMA). Existem dois tipos de canais lógicos definidos no sistema GSM, denominados canais de tráfego (*traffic channels* - TCH) e canais de controlo (*control channels* - CCH). Os canais de tráfego transportam informação de voz ou dados em formato digital e têm funções e formatos idênticos em ambos os sentidos da comunicação (ligação ascendente e descendente). Os canais de controlo por sua vez transportam comandos de sinalização e de controlo entre as estações base e as estações móveis. Alguns tipos de canais de controlo apenas estão definidos para a ligação ascendente enquanto outros apenas para a ligação descendente. A associação de 26 tramas TDMA constitui uma multitrama sob a qual são definidos os canais lógicos TCH (*traffic channel*), SACCH (*slow associated control channel*) e FACCH (*fast associated control channel*) que transportam informação de tráfego e de sinalização entre a estação móvel e a estação base (ver figura 2.3).

#### 2.2.3.1 Canal de tráfego - TCH

Os canais de tráfego TCH transportam informação de voz ou de dados. Este canal suporta vários tipos de serviços, que são, voz a 13Kbit/s e dados a 2,4, 4,8 e 9,6Kbit/s em débito máximo ou voz e dados a 6,5, 2,4 e 4,8 a meia velocidade (utilizando 1 em cada 2 intervalos de tempo). Os canais de tráfego à velocidade máxima ocupam 24 dos 26 intervalos de tempo da multitrama. No sistema GSM os canais lógicos TCH não podem ser mapeados no intervalo de tempo 0 (*time slot* TS0) da portadora que é utilizada na difusão do canal lógico BCCH (portadora BCCH). Isto porque neste intervalo de tempo são mapeados canais de controlo que serão descritos mais à frente.

As tramas TDMA que transportam os canais de tráfego (multitramas de 26 tramas TDMA) são fraccionadas por forma a que o intervalo reservado à 13ª trama esteja destinado ao transporte de informação relativa ao canal lógico SACCH, conforme se verá mais à frente. O intervalo reservado à 26ª trama também não é utilizado no

transporte de canais TCH uma vez que é destinado ao transporte de informação também relativa ao canal lógico SACCH, no caso de se utilizar débito à meia velocidade (*half rate*), ou caso contrário não transporta informação relevante (*idle bits*).

### 2.2.3.2 Canais de controlo - CCH

No sistema GSM estão definidos três tipos de canais de controlo: canais de difusão (*broadcast channel - BCH*), canais de controlo comum (*common control channel - CCCH*) e canais de controlo dedicado (*dedicated control channel - DCCH*). Cada um dos canais de controlo consiste de vários canais lógicos.

Os canais BCH e CCCH que são utilizados apenas na ligação descendente são mapeados no intervalo de tempo 0 (TS0) da portadora designada como BCCH e são difundidos apenas em alguns intervalos de uma multitrama de 51 tramas TDMA, denominada multitrama de canal de controlo (MCC), conforme ilustrado na figura 2.4.

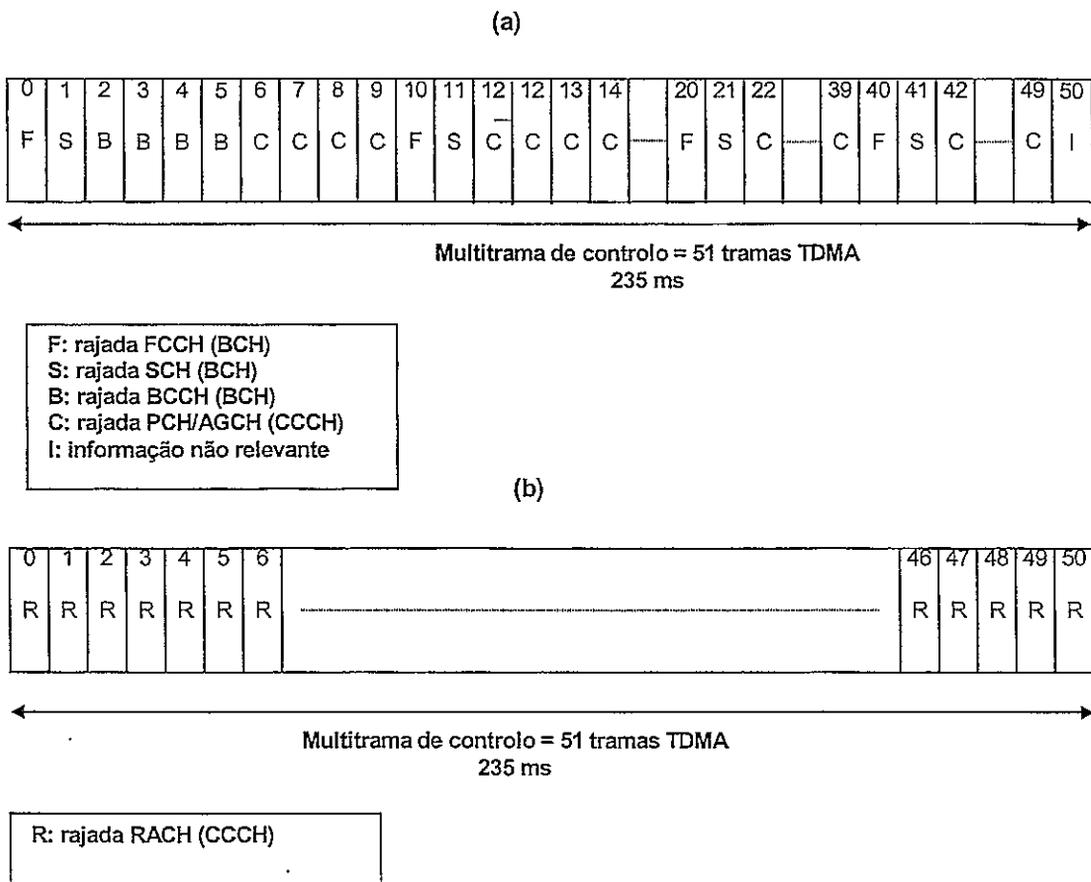


Figura 2.4– Multitrama de canal de controlo (a) sentido ascendente (b) sentido descendente.

## Canais de difusão - BCH

Os canais de difusão são utilizados apenas na ligação descendente, numa portadora específica denominada comumente por portadora BCCH. Apenas transmite informação em algumas tramas TDMA e são mapeados no intervalo de tempo 0 (TS0) da portadora BCCH. Nos restantes intervalos de tempo (TS1 a TS7) da trama TDMA são mapeados os canais de tráfego (TCH), de sinalização e controlo (DCCH) ou transportam informação não relevante (*idle bits*).

Os canais BCH servem como canais de rasteio que difundem informação importante relativa à cada célula da rede, por forma a que as estações móveis possam nelas se registar. Transmitem também informação de sincronismo que torna possível esse registo, bem como o seu sinal é monitorado por cada estação móvel exterior à célula, por forma a possibilitar a escolha da célula com melhor sinal para registo (*idle mode*) ou para realização de *handovers* (*dedicated mode*). Os canais BCH podem ser de três tipos: canais de controlo e difusão (*broadcast control channels - BCCH*), canais de correcção de frequência (*frequency correction channels - FCCH*) e canais de sincronização (*synchronization channels - SCH*):

- BCCH - Canal de difusão de informação importante relativa à cada estação base e utilizado para transmissão no sentido descendente. A informação engloba os parâmetros da estação base, como sejam: identificação da célula e da área da localização, descrição de canais, etc. Este canal está sempre activo, mesmo quando não há informação útil a transmitir, dado constituir a fonte de medida de sinal pela estação móvel para efeitos de *handover*. 4 das 51 tramas da multitrama MCC são reservados para transmissão de canais BCCH.
- FCCH - Canal de controlo utilizado no sentido descendente. Este canal transporta uma rajada especial denominada rajada de sincronização de frequência (*frequency correction burst*) já descrita anteriormente e ocupa o TS0 da trama TDMA 0 da multitrama MCC, sendo repetido com um período de 10 tramas TDMA desta multitrama. Este canal lógico possibilita o sincronismo do oscilador interno de cada estação móvel com a frequência utilizada pela estação base.
- SCH - Canal de sinalização utilizado no sentido descendente. Este canal transporta uma rajada especial denominada rajada de sincronismo (*synchronization burst*) já

descrita anteriormente e ocupa o TSO da trama TDMA 1 da multitrama MCC, sendo transmitido imediatamente a seguir ao canal FCCH. É utilizado na identificação de cada estação base, enquanto permite o sincronismo de cada estação móvel com a estação base na qual se pretende registar. Este sincronismo traduz-se na identificação do número da trama TDMA que está a ser transmitida. Este número (*frame number*) é transmitido em conjunto com o BSIC da estação (*base station identity code*). Na rajada de sincronismo também é transmitida informação relativa ao adiantamento da transmissão imposta por cada estação base a cada móvel, por forma a compensar o atraso na propagação decorrido da distância entre ambos (*timing advance*).

### Canais de controlo comum - CCCH

Na portadora BCCH, os canais de controlo comum são mapeados no TSO de todas as tramas TDMA da multitrama MCC que não são reservadas aos canais de difusão BCH.

Os canais de controlo comum podem ser de três tipos: canal de rasteio (*paging channel* - PCH) que é um canal utilizado apenas para transmissão no sentido descendente, canal de acesso aleatório (*random access channel* - RACH) que é um canal utilizado apenas para transmissão no sentido ascendente, e o canal de confirmação de atribuição de canal de tráfego ou sinalização (*access granted channel* - AGCH) que é um canal utilizado apenas para transmissão no sentido descendente.

- PCH - Canal de controlo utilizado no sentido descendente. Neste canal são enviados sinais de rasteio a partir da estação base para todos as estações móveis que estão registados na sua célula. Desta forma é feita a notificação de uma dada estação móvel de uma chamada a ela destinada. No canal PCH é enviado o IMSI (*International Mobile Subscriber Number*) do assinante de destino juntamente com um pedido de reconhecimento por parte da estação móvel em questão no canal RACH.
- RACH - Canal de controlo utilizado no sentido ascendente. Utilizado pela estação móvel no reconhecimento de um sinal de rasteio enviado no canal PCH. É também utilizado pelas estações móveis no processo de estabelecimento de novas chamadas. As estações base respondem a um pedido de estabelecimento de uma

chamada no canal RACH através da atribuição de um canal SDCCH que é utilizado no processo de sinalização da chamada. Esta atribuição é confirmada pela estação base através do canal AGCH.

- AGCH - Canal de controlo utilizado no sentido descendente. Este canal é utilizado como meio de confirmação da atribuição do canal SDCCH. Transporta ainda a indicação por parte da estação base da portadora e intervalo de tempo da trama TDMA, bem como o canal SDCCH a utilizar no processo de comunicação.

### **Canais de controlo dedicado - DCCH**

Tal como os canais de tráfego TCH, estes canais são bidireccionais e têm a mesma formatação quer no sentido ascendente quer no sentido descendente, podendo ainda ser mapeados em qualquer intervalo de tempo (TS0 ao TS7) e em qualquer portadora, excepto no TS0 da portadora BCCH. Existem três tipos de canais de controlo dedicado no sistema GSM: canal de sinalização SDCCH (*stand-alone dedicated control channel*), canal de sinalização SACCH (*slow associated control channel*) e canal de sinalização FACCH (*fast associated control channel*).

- SDCCH - Canal de sinalização utilizado na transferência de informação de sinalização na fase de estabelecimento da chamada. Os canais SDCCH transportam informação de sinalização a seguir a fase de estabelecimento da ligação rádio entre a estação móvel e a estação base (após o envio da confirmação no canal AGCH por parte da estação base), até o instante de atribuição de um canal de tráfego TCH por parte da estação base. O canal SDCCH pode ser visto como um canal intermediário e temporário responsável pelo suporte da chamada e do tráfego até o instante de atribuição do canal de tráfego TCH. Durante esta fase do processamento da chamada é feita a autenticação da estação móvel e são realizados os procedimentos necessários para atribuição do respectivo TCH (são trocadas mensagens de alerta e de autenticação mas nunca é transportada informação de voz ou dados neste canal). No caso de não serem precisos muitos canais PCH no TS0 da portadora BCCH, podem ser mapeados até no máximo 4 SDCCHs nesta portadora. Neste caso diz-se que a estação base é do tipo BCCH combinado.

- SACCH - Canal de sinalização implementado na trama nº 12. A trama nº 25 é reservada para implementar os 8 SACCH adicionais necessários quando é utilizada transmissão a meio débito. Este tipo de canal está sempre associado com um canal de tráfego TCH ou de sinalização SDCCH, sendo mapeado no mesmo TS. O canal SACCH é responsável pelo transporte de informação genérica entre a estação móvel e a estação base. Assim sendo, no sentido descendente transporta informação de controlo relativa a estação móvel como sendo ordens quanto ao nível de potência a ser emitida pelo móvel, bem como instruções acerca do *timing advance*. No sentido ascendente transporta informação relativa ao nível de sinal recebido a partir da estação base e a qualidade da ligação rádio, bem como o nível do sinal recebido na portadora BCCH das suas estações base vizinhas.
- FACCH - Este tipo de canal transporta informação prioritária contendo essencialmente o mesmo tipo de informação que o canal SACCH. O canal FACCH é atribuído sempre que não tiver sido dedicado um canal SACCH a um assinante que necessite de enviar uma mensagem prioritária, tal como um pedido de *handover*. O FACCH serve-se dos canais de tráfego através da reserva de um conjunto de tramas TDMA antes destinadas ao transporte de canais de tráfego TCH.

## 2.3 Reutilização de frequências

*Reutilização de frequências* significa repetição na utilização de cada uma das frequências disponíveis no processo de cobertura de uma região geográfica. Esta repetição acarreta que cada frequência seja reutilizada em diferentes células da rede.

A repetição na utilização de uma frequência implica naturalmente problemas de interferência, degradando a qualidade da ligação rádio estabelecida para cada estação base. Por este motivo, esta interferência é denominada interferência co-canal. Para que se possa aplicar o princípio da reutilização de frequências ao planeamento celular é necessário confinar o mais possível o sinal emitido por cada estação base aos limites interiores definidos pelas fronteiras da célula que lhe está associada. As técnicas de planeamento normalmente utilizadas neste processo são as seguintes:

- Escolha criteriosa da localização da estação base e da altura do sistema de antenas relativamente ao solo. Por exemplo sítios pouco elevados, vales,... De notar que a altura efectiva da estação (determinada pela cota do local de instalação, adicionada à altura da torre ou do edifício onde é instalado o sistema de antenas) é um parâmetro fundamental no estabelecimento da cobertura da estação (ver capítulo 3). A determinação da altura da torre a utilizar ou do edifício utilizado na implantação do sistema de antenas prende-se mais com a necessidade de contornar obstáculos no terreno.
- Escolha de antenas directivas com larguras de feixe a 3dB no plano horizontal estreitas, por exemplo, larguras de feixe a 3dB no plano horizontal de 65°.
- Utilização de inclinações no feixe principal de radiação a 3dB no plano vertical (*downtilt*).
- Redução da potência transmitida pela estação.

O planeamento celular é executado através da implementação de *padrões de reutilização de frequências*. Cada padrão é formado pela associação de grupos (clusters) de células, sendo que dentro de um mesmo grupo não pode haver repetição na utilização de frequências. O número de células que compõe cada *cluster* determina o padrão de reutilização utilizado bem como impõe a distância de reutilização na arquitectura da rede.

A visualização de todas as células como tendo o mesmo formato geométrico possibilita a implementação de padrões regulares. A ideia seguida é aproximar o formato real de cada célula por um polígono regular que permita a definição de uma malha regular onde o princípio do padrão de reutilização de frequências possa ser aplicado. Pelas suas características, o círculo é a figura geométrica que melhor se aproxima do formato real de cobertura de uma célula (quando são utilizados sistemas de antenas omnidireccionais). No entanto, a utilização do círculo como elemento base da malha regular não é muito adequada pois esta apresentaria zonas de não cobertura (*gaps*) ou de sobreposição de cobertura (*overlaps*). O polígono regular normalmente utilizado é o hexágono pois das formas geométricas mais simples e possíveis para cobrir um plano sem falhas nem sobreposições é a que mais se aproxima de um círculo e permite a cobertura de uma mesma área com o menor número de células e, conseqüentemente,

estações base.

A figura 2.5 ilustra uma malha celular composta por hexágonos regulares bem como o processo normalmente seguido na determinação da distância de reutilização  $D$ . Por forma a repetir o *cluster* individual e formar o padrão de reutilização sem originar buracos ou sobreposições de cobertura entre células adjacentes, a geometria dos hexágonos regulares impõe que o número de células que constituem um *cluster* seja determinado pela expressão seguinte:

$$N_{cg} = i^2 + ij + j^2 \quad (2)$$

em que  $i$  e  $j$  são números inteiros não negativos. Por forma a determinar cada uma das seis células do primeiro anel de células co-canalais deve-se proceder da seguinte forma: (1) mover-se  $i$  células ao longo da cadeia de hexágonos; (2) rodar  $60^\circ$  no sentido anti-horário e mover-se  $j$  células. Sendo assim, o número de *layouts* possíveis para um *cluster* é limitado a um conjunto finito. No *cluster* representado na figura 2.5,  $i = 3$  e  $j = 2$ , resultando em  $N_{cg} = 19$  células contidas no *cluster*. Isto pode ser verificado na figura, onde as 19 células do *cluster* estão delimitadas por um traço a cheio.

Na figura 2.5 também está ilustrada a distância de reutilização  $D$  entre células co-canalais vizinhas  $A$ , bem como o primeiro anel de células co-canalais composto pelas seis células marcadas por  $A$  e situadas nos vértices do hexágono regular a tracejado. Por meio de considerações geométricas demonstra-se que o factor de redução co-canal é dado por:

$$D/R = \sqrt{3N_{cg}} \quad (3)$$

Ou seja, está directamente relacionado com o número de células que constituem o *cluster*. Para o exemplo da figura 2.5,  $D/R \approx 7,5$ .

Na fase inicial do planeamento as frequências disponíveis são divididas uniformemente pelas  $N_{cg}$  células de cada *cluster* individual. Se  $N_{fc}$  representar o número total de frequências disponíveis, então são atribuídas  $N_{fc}/N_{cg}$  frequências por cada célula do *cluster*:

$$N_{fc} = \frac{N_{fs}}{N_{cg}} \quad (4)$$

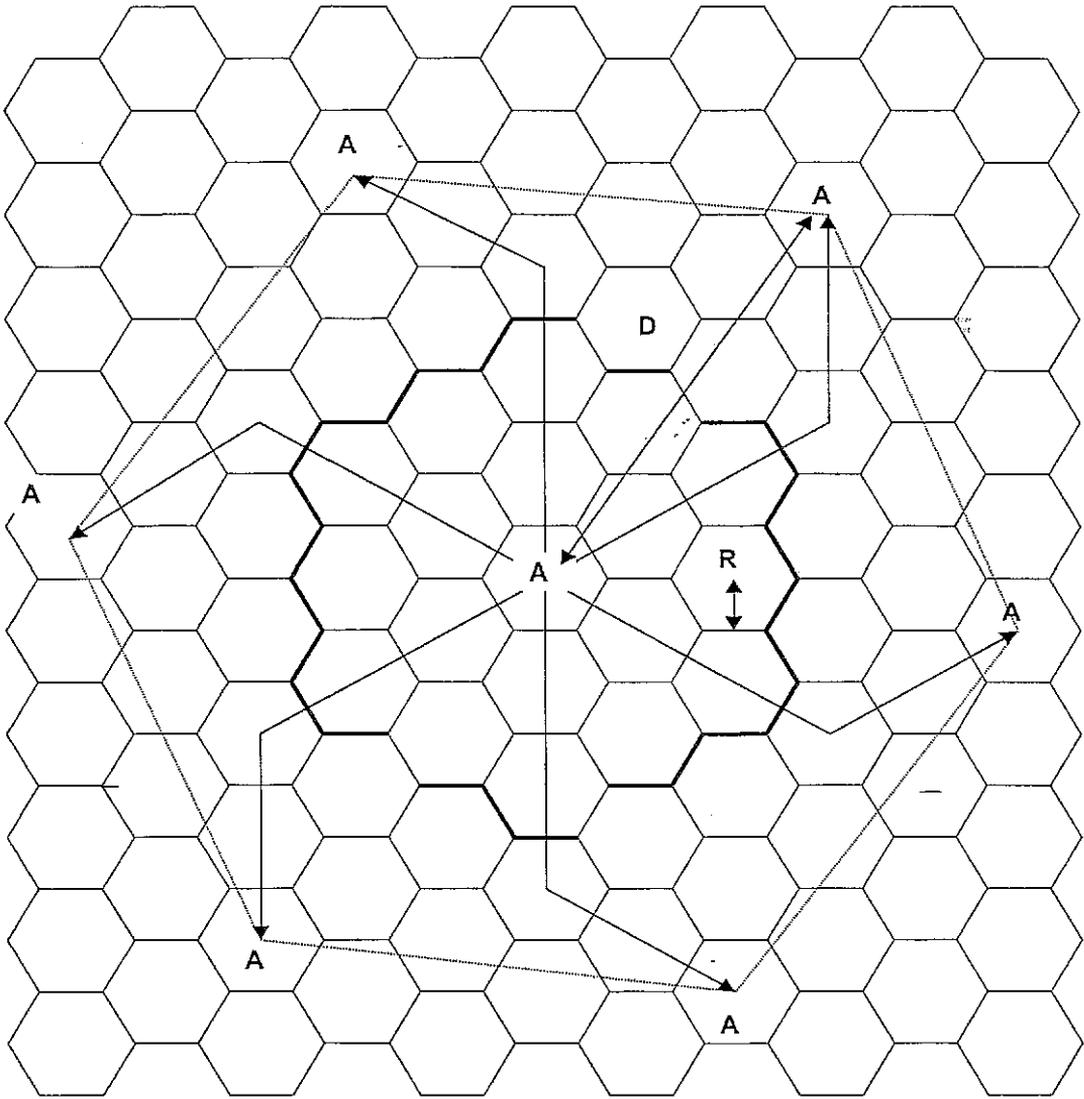


Figura 2.5-- Formação do padrão de reutilização  $N_{cg} = 19$ .

Uma vez que o número de frequências disponíveis  $N_{fs}$  é fixo, à medida que o número de células por *cluster*  $N_{cg}$  diminui, aumenta o número de frequências atribuídas a cada célula  $N_{fc}$ , o que acarreta um aumento na capacidade da rede relativamente ao tráfego transportado. No entanto, também à medida que o número de células por *cluster*  $N_{cg}$  diminui, pela equação (4) verifica-se que o factor de redução co-canal (D/R) também diminui. Isto significa que o primeiro anel de células co-canal passa a estar mais próximo, originando um aumento na interferência co-canal e desta forma um aumento na degradação da qualidade da ligação rádio estabelecida.

O valor a considerar para o número de células por *cluster*  $N_{cg}$  está directamente relacionado com o nível máximo de interferência co-canal que se pode tolerar, por forma a manter a qualidade do processo de comunicação. Existe aqui uma relação de compromisso:

- Procurar obter o menor valor possível para  $N_{cg}$  por forma a maximizar a capacidade da rede.
- Impedir que a diminuição progressiva de  $N_{cg}$  (como forma de aumentar a capacidade da rede) acarrete uma degradação intolerável da qualidade.

Para finalizar, resta salientar que na prática a cobertura real de uma célula apresenta um carácter totalmente amorfo, dependendo das características de propagação do meio em que se processa. A figura 2.6 ilustra a cobertura de uma região geográfica através de oito células. O carácter perfeitamente amorfo da forma geométrica de cada célula, bem como a falta de regularidade no espaçamento entre estações base vizinhas está de acordo com aquilo que se passa na realidade. No entanto, a aplicação de um padrão regular de frequências, que tornaria possível a evolução da rede através da escolha de novos *sites* e atribuição de frequências seria muito difícil ou mesmo impossível nesta situação. Por esta razão considera-se que a área de dominância de cada célula tem o formato de um hexágono regular.

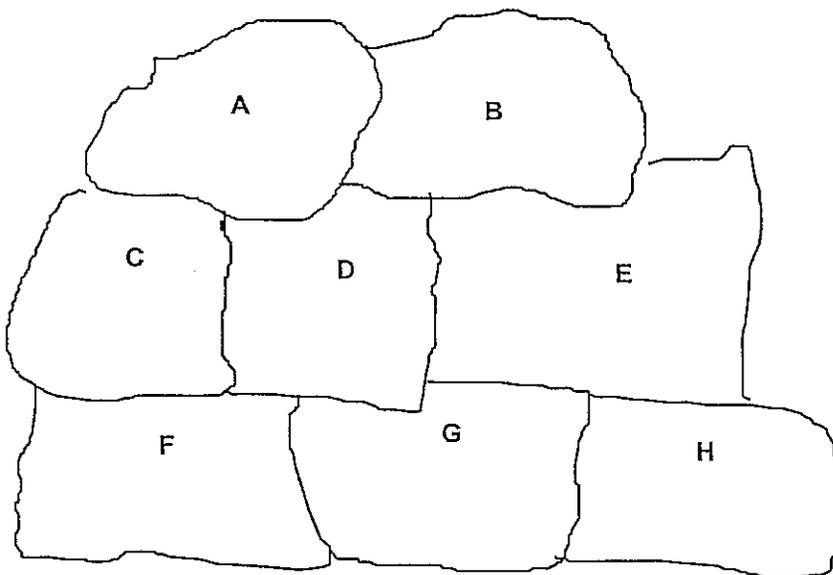


Figura 2.6– Perspectiva da cobertura real de uma dada região geográfica.

Além da interferência co-canal, existem duas outras fontes de interferência que também degradam (embora com menor peso) a qualidade do processo de comunicação: *interferência por canal adjacente* e os *produtos de intermodulação*:

- Interferência por canal adjacente. - Os filtros que são utilizados não são filtros passa-banda ideais, havendo sempre uma sobreposição entre bandas laterais correspondentes a canais adjacentes. Esta sobreposição pode gerar interferência entre canais adjacentes no espectro, que importa limitar.
- Produtos de intermodulação - Devido a não linearidades são gerados produtos de intermodulação que podem originar interferências. Este efeito é muito menos significativo que os anteriores.

## 2.4 Interferência co-canal

A interferência co-canal é um factor determinante no desempenho das redes móveis celulares. Todo o processo de planeamento celular deve ter como ponto de partida o nível máximo admitido para esta interferência, que esteja de acordo com a qualidade pretendida para o processo de comunicação.

Ao contrário das redes telefónicas fixas, onde o ruído térmico gerado tem um papel preponderante e onde o aumento da potência do sinal que é transmitido constitui uma forma de limitar os seus efeitos (através do aumento da relação S/N), nas redes móveis celulares, o aumento da potência emitida quer pelas estações base, quer pelos terminais também origina um aumento na interferência causada em células co-canal vizinhas. A forma de reduzir esta interferência é separar as células co-canal de uma distância mínima que assegure o seu isolamento (em termos de rádio-frequência) devido às perdas por propagação do sinal.

Pelos motivos apontados acima, diz-se que neste tipo de redes a limitação é imposta pelo factor de interferência co-canal. Importa assim proceder a uma análise cuidadosa do processo de caracterização deste factor, para deste modo serem encontradas e desenvolvidas formas de o minimizar.

O factor de interferência co-canal é medido pela razão C/I onde  $C$  corresponde à potência do sinal desejado, emitido pela estação base que suporta a ligação e  $I$

corresponde à soma das potências do sinal interferente emitido pelas estações base de células co-canais vizinhas. No dimensionamento do factor de interferência co-canal são consideradas normalmente as seguintes aproximações:

- As células têm aproximadamente as mesmas dimensões.
- São consideradas apenas as primeiras células co-canais, isto é as do primeiro anel de células interferentes (ver figura 2.5).
- Considera-se que o mecanismo de propagação é exactamente o mesmo em ambos os sentidos da comunicação (ascendente e descendente), ou seja, o canal de propagação é simétrico.
- Estima-se a interferência co-canal para o pior caso possível (o móvel está situado nas fronteiras da sua célula, ou seja, a distância de reutilização é igual a  $(D - R)$ ).
- Medidas de propagação mostram que a potência média do sinal recebido em qualquer ponto situado a distância  $d$  da estação base diminui segundo a lei da potência inversa desta distância. Ou seja a potência média do sinal recebido a uma distância  $d$  da estação base é aproximada por:  $P_r(d) = P_0 \left(\frac{d}{d_0}\right)^{-n}$  ou

$P_r(dBm) = P_0(dBm) - 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right)$ , onde:  $P_0$  é uma referência (potência média recebida no ponto de referência  $d_0$  e  $n$  corresponde ao índice de atenuação. Considera-se que  $n$  assume o mesmo valor, quer na ligação ascendente quer na ligação descendente.

Atendendo aos pressupostos enunciados, o factor de interferência co-canal pode ser estimado pela seguinte expressão:

$$C/I \cong 10 \log \left[ \frac{1}{j} \left( \frac{D-R}{R} \right)^n \right] \text{ (dB)} \quad (5)$$

Pela equação 3 chega-se ao seguinte resultado:

$$C/I \cong 10 \log \left[ \frac{1}{j} \left( \sqrt{3N_{cg}} - 1 \right)^n \right] \text{ (dB)} \quad (6)$$

em que:

- $D$  é a distância de reutilização.
- $R$  é o raio de cada célula.
- $j$  é o número de células co-canais do primeiro anel.
- $n$  é a constante de propagação.

Através de medidas de propagação efectuadas em ambientes urbanos, verificou-se que a constante de propagação  $n$  normalmente assume valores compreendidos entre 2 e 4. Por forma a estimar a razão C/I para o pior caso normalmente assume-se  $n = 4$  (máxima atenuação).

### 2.4.1 Análise do factor de interferência co-canal como processo estocástico

Na realidade o processo de variação da relação C/I é estocástico devido ao carácter aleatório dos seguintes acontecimentos [PRA91]:

- Localização perfeitamente aleatória de cada móvel na área de dominância da célula onde se encontra ancorado.
- Desvanecimento lento do sinal emitido (*slow fading* - segue uma distribuição tipo *log-normal*) e rápido (*fast fading* - segue uma distribuição de *Rayleigh*).
- Características do sistema de antenas das estações base (não são sempre as mesmas em todas as estações base).
- Localização das estações base (muito dificilmente se consegue instalar a estação base no local inicialmente pretendido).

Formalmente a relação C/I pode ser caracterizada através da sua probabilidade de ocorrência:

$$P(C/I < \alpha) = \sum_k P(C/I < \alpha | k) P_k(k) \quad (7)$$

em que:

- $P_k(k)$  é a probabilidade do acontecimento *estarem  $k$  interferentes activos ao mesmo tempo*.

- $P(C/I|k)$  é a probabilidade de ocorrência de interferência co-canal condicionada ao acontecimento *estarem k interferentes activos ao mesmo tempo*.
  - $p_d$  é a potência instantânea do sinal desejado (emitido pela estação base que suporta a ligação rádio).
  - $p_k$  é a potência instantânea do sinal resultante da soma dos  $k$  interferentes co-canais.
  - $\alpha$  é o factor de protecção co-canal estabelecido. Considera-se que há interferência co-canal nos instantes de tempo em que  $p_d < \alpha p_k$ .
- A componente de desvanecimento rápido (*fast fading*) do sinal rádio emitido é um processo estocástico que segue uma distribuição de *Rayleigh*.

Para os casos em que ambos os sinais (desejado e interferente) sofrem desvanecimento do tipo *log-normal shadowing* ou desvanecimento combinado tipo *log-normal shadowing* sobreposto com *Rayleigh*, não existe solução analítica para a expressão (7). No entanto, para o caso em que ambos os sinais sofrem desvanecimento do tipo *Rayleigh* existe solução analítica para esta expressão. Sendo assim, para o caso particular em que ambos os sinais sofrem desvanecimento do tipo *Rayleigh* temos que [PRA91]:

A função densidade de probabilidade definida para o valor instantâneo da potência do sinal desejado e condicionada ao seu valor médio  $p_{od}$  é dada por:

$$f_{pd}(p_d | p_{od}) = \frac{1}{p_{od}} \exp\left(-\frac{p_d}{p_{od}}\right) \quad (8)$$

A função densidade de probabilidade definida para o valor instantâneo da potência associada ao  $i$ -ésimo sinal interferente e condicionada ao seu valor médio  $p_{oi}$  é dada por:

$$f_{pi}(p_i | p_{oi}) = \frac{1}{p_{oi}} \exp\left(-\frac{p_i}{p_{oi}}\right) \quad (9)$$

E portanto vem para a equação (7) o seguinte resultado:

$$P\left[\left(\frac{C}{I}\right) | k\right] = 1 - \left(\frac{1}{\alpha p_0 / p_{0d} + 1}\right)^k \quad (10)$$

em que:

- $\alpha$  é o factor de protecção co-canal.
- $p_0$  é o valor médio da potência de cada um dos sinais interferentes.
- $p_{0d}$  é o valor médio da potência do sinal desejado.
- $k$  é o número total de células interferentes do primeiro anel de células co-canais.

Supondo que são considerados apenas os 6 interferentes do primeiro anel de células co-canais e que estes são processos aleatórios independentes e identicamente distribuídos, chega-se à seguinte expressão para  $P_k(k)$  [PRA91]:

$$P_k(k) = \binom{6}{k} a_c^k (1 - a_c)^{6-k} \quad (11)$$

em que  $a_c = A_c / k_c$  é a intensidade do tráfego escoado em cada canal de rádio ( $A_c$  é a intensidade do tráfego escoado por cada célula e  $k_c$  é o número de canais de rádio em cada célula).

Através das equações (10) e (11) obtém-se a expressão final para a probabilidade de o factor de interferência co-canal  $C/I$  estar abaixo do respectivo factor de protecção (equação 7).

$$P(C/I) = \binom{6}{k} a_c^k (1 - a_c)^{6-k} \left[ 1 - \left(\frac{1}{\alpha p_0 / p_{0d} + 1}\right)^k \right] \quad (12)$$

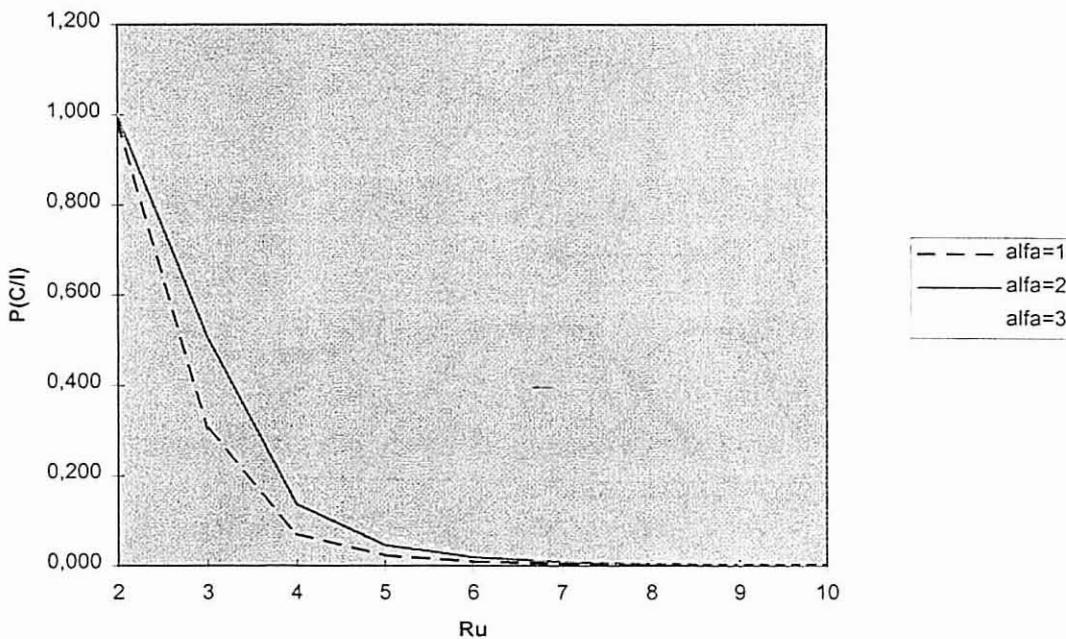
Uma vez que  $p_0 = \bar{I}$ ,  $p_{0d} = \bar{C}$  e  $\bar{C} / \bar{I} = (R_u - 1)^y$  podemos escrever:

$$P(C/I) = \binom{6}{k} a_c^k (1 - a_c)^{6-k} \left[ 1 - \left(\frac{1}{\alpha / (R - 1)^n + 1}\right)^k \right] \quad (13)$$

Esta expressão final é muito útil em termos de planeamento celular, uma vez que expressa o valor da probabilidade de ocorrência do acontecimento *haver interferência co-canal*, em função do factor de reutilização  $D/R$ .

O gráfico a seguir ilustra o comportamento de  $P(C/I)$ , para as aproximações aqui consideradas (equação 13) e para três valores distintos do factor de protecção co-canal ( $\alpha = 1, \alpha = 2, \alpha = 3$ ).

Como era de se esperar, verifica-se que com o aumento da distância de reutilização  $D$  entre célula co-canal, há uma diminuição na probabilidade de haver interferência co-canal. Por outro lado, à medida que se exige uma maior protecção relativamente à interferência co-canal ( $\alpha$  aumenta), para a mesma distância de reutilização, há um aumento no valor desta probabilidade.



## 2.5 Factor de interferência por canal adjacente

Outro parâmetro que importa considerar no planeamento das redes móveis celulares, por também constituir uma fonte de interferência é o *factor de interferência por canal adjacente*. A interferência por canal adjacente consiste no aparecimento, na banda do sinal desejado, de sinal interferente proveniente de um canal adjacente.

O termo canal adjacente não significa necessariamente que o canal interferente seja o canal imediatamente a seguir ao canal interferido na banda espectral. Isto porque há sempre um espalhamento da energia do sinal transportado em cada canal pelos canais

que lhe são adjacentes no espectro (além dos canais vizinhos) e que constitui interferência.

Uma forma de limitar a interferência resultante deste processo de espalhamento da energia é utilizar filtros com características de atenuação adequadas, conforme ilustrado na figura 2.7.

Se considerarmos dois canais de rádio com larguras de banda  $B$  separados duma distância  $\Delta f$  e filtros com uma característica de  $k$  dB/oitava na banda de atenuação, a atenuação (em dB) da componente do sinal que é espalhada para o canal vizinho (isolamento conseguido) é dada por:

$$\text{Isolamento} = k \log_2 \left( \frac{\Delta f}{B/2} \right) \text{ (dB)} \quad (14)$$

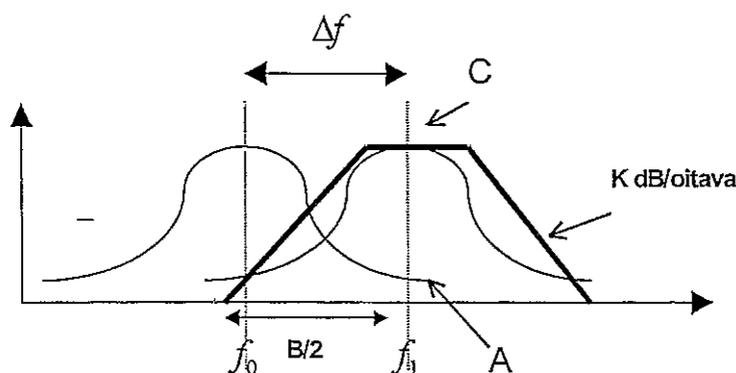


Figura 2.7— Ilustração do fenómeno interferência por canal adjacente.

No entanto, este processo de filtragem não é ideal, resultando sempre em algum espalhamento de energia pelos canais adjacentes no espectro e que constitui interferência. Por este motivo, o processo de atribuição de portadoras a cada célula de um *cluster* deve ser executado por forma a manter-se uma distância mínima entre as portadoras atribuídas a células vizinhas entre si. O objectivo é utilizar a atenuação do sinal no canal rádio por forma a minimizar este efeito, uma vez que a interferência por canal adjacente é também atenuada pela distância geográfica das duas fontes (interferido e interferente) à estação base:

$$\Delta L_p = 10n \log \left( \frac{d_i}{d_c} \right) \text{ (dB)} \quad (15)$$

em que:

- $\Delta L_p$  é a atenuação da componente do sinal que é espalhada pelos canais adjacentes.
- $d_i$  e  $d_c$  correspondem às distâncias respectivamente para o sinal interferente e o sinal desejado.

A equação anterior leva-nos a concluir que a interferência por canal adjacente pode ser limitada através da não atribuição de portadoras adjacentes no espectro a células vizinhas entre si.

## 2.6 Métodos de atribuição de recursos rádio em sistemas de rádio móvel celular

Uma vez que o espectro disponível a cada operador é limitado, a sua utilização deve ser rentabilizada ao máximo. Por este motivo, o método escolhido no processo de atribuição de portadoras às células da rede deve ser condizente com este objectivo, sem no entanto implicar uma degradação insustentável da qualidade do processo de comunicação, devido às interferências co-canal e por canal adjacente vistas anteriormente. Basicamente existem três formas distintas de se proceder à atribuição de portadoras às células de uma rede móvel celular:

- Método de atribuição fixa de canais de rádio (*fixed channel allocation* - FCA).
- Método de atribuição dinâmica de canais de rádio (*dynamic channel allocation* - DCA).
- Método de atribuição híbrida de canais de rádio (*hybrid channel allocation* - HCA).

A maior parte dos sistemas de comunicações móveis celulares utiliza o método FCA para atribuição de canais de rádio (por exemplo o GSM). Num esquema fixo é atribuído a cada célula um conjunto pré-determinado de portadoras segundo um padrão de reutilização que, conforme já se viu, está directamente relacionado com o nível máximo permitido para o factor de interferência co-canal e por canal adjacente. O número de portadoras a atribuir bem como a forma de atribuição é imposto pelo padrão de reutilização e deve seguir um algoritmo de atribuição para ele definido.

Na fase de estabelecimento de uma nova chamada somente podem ser utilizados os recursos rádio atribuídos à célula onde esta chamada será suportada. Na eventualidade de todos os canais de rádio atribuídos na fase de dimensionamento estarem ocupados a chamada é bloqueada.

No método de atribuição FCA o planeamento é feito em função do tráfego esperado para um período de semanas ou mesmo meses, não possibilitando o seguimento das variações do tráfego oferecido a cada célula da rede ao longo do dia. Sendo assim, este dimensionamento tem de ser sempre executado para o pior caso possível (considerando o tráfego máximo oferecido ao longo do dia), por forma a que os picos de tráfego esperados em determinados períodos possam ser absorvidos, o que faz com que esta forma de planeamento não seja eficaz na rentabilização dos recursos rádio atribuídos.

Por outro lado, o método FCA baseia-se em estimativas para a relação C/I efectuadas considerando o pior caso possível, que corresponde à situação em que o móvel se encontra localizado nas fronteiras da célula (situação em que a interferência co-canal é máxima). No entanto, este esquema conduz a um dimensionamento conservativo, uma vez que não entra em linha de conta com o facto de a interferência co-canal não ser constante ao longo do curso de uma chamada. A principal vantagem deste método é a sua simplicidade de implementação e funcionamento.

O método DCA resulta numa maior rentabilização na utilização de cada canal rádio pelas diferentes células da rede, em função do tráfego que lhes é oferecido em cada instante. Neste método, as portadoras não são atribuídas de uma forma permanente às células de cada *cluster*. Não existe um padrão fixo de atribuição de frequências. Ao invés, todas as portadoras formam um grupo único de recursos que são atribuídos à medida que são solicitados. A consequência deste facto é que o padrão de reutilização de frequências varia de uma forma dinâmica com o tráfego oferecido.

Os algoritmos implementados tendo como base o método DCA invariavelmente baseiam-se em medições contínuas do nível médio de sinal transportado em cada canal rádio, por forma a determinar o valor para a relação C/I em cada instante. Sendo assim, o método DCA não impõe a utilização de distâncias de reutilização fixas, dado que estas se baseiam no comportamento da relação C/I em cada instante (as distâncias de reutilização são dinâmicas no tempo). O resultado conseguido é um aumento na

capacidade máxima de escoamento do tráfego oferecido a cada célula, bem como na capacidade de adaptação ao processo de variabilidade do tráfego oferecido. No entanto, este aumento é conseguido à custa de:

- Por um lado implicar uma degradação na qualidade do processo de comunicação com a conseqüente diminuição da relação  $C/I$ , devido a não se estar a utilizar padrões de reutilização de frequências fixos e dimensionados para o pior caso e o método basear-se em medições do nível médio do sinal recebido para estimar a relação  $C/I$ .
- Por outro, os esquemas DCA serem de implementação bastante mais complexa quando comparados com os esquemas FCA.

Em [EVE94] é salientado que o ganho do sistema (em termos do aumento no tráfego escoado) está compreendido entre 5% e 10% quando se utiliza o DCA aliado ao método de acesso TDMA/FDMA. Saliente-se ainda que para se conseguir elevados ganhos de capacidade e de desempenho que compensem o aumento da complexidade do sistema, deve-se proceder a alterações contínuas na atribuição dos canais de rádio a cada chamada que esteja a decorrer em função do valor determinado para a relação  $C/I$  em cada instante.

A escolha do algoritmo a utilizar na implementação do método DCA é um processo bastante complexo. Invariavelmente os algoritmos utilizados no método de atribuição dinâmica de recursos rádio baseiam-se em medições contínuas e periódicas do nível médio de sinal recebido pelo móvel em cada instante. Por este motivo, o método DCA não possibilita o agrupamento dos diferentes canais de tráfego em grupos de reutilização perfeitamente compactos e fechados, ao contrário do método FCA que utiliza padrões de reutilização de frequências fixos. Outra consequência deste método é a possibilidade de ocorrência de situações de *deadlock*, que corresponde ao facto de não serem encontrados canais para atribuição por não satisfazerem o nível exigido para a relação  $C/I$ .

No entanto, conforme demonstrado em [KAT96], existem situações em que o desempenho da rede (em termos do grau de serviço prestado) degrada-se mesmo com a utilização do DCA. Isto ocorre sempre que o tráfego oferecido a cada célula aumenta, atingindo o ponto em que faria com que todos os recursos disponíveis por meio da

aplicação do FCA estivessem ocupados. Quando o tráfego oferecido atinge valores bastante mais elevados, a utilização de padrões de reutilização compactos, em que são satisfeitas distâncias mínimas de reutilização de frequências, permite ganhos de desempenho superiores com a utilização do FCA. Nesta situação a taxa máxima de reutilização de cada canal é sempre conseguida.

Finalmente, os esquemas híbridos de atribuição de recursos rádio (*hybrid channel allocation* - HCA) resultam de uma combinação dos dois esquemas descritos (FCA e DCA).

## 2.7 Dimensionamento dos recursos rádio da rede

Antes de se proceder à análise do processo de dimensionamento dos recursos rádio da rede importa estabelecer algumas definições:

- Tráfego oferecido é uma grandeza que corresponde ao estabelecimento de novas chamadas, devendo ser suportado pela rede. Supondo que a taxa de estabelecimento de novas chamadas por cada assinante é igual a  $\mu$  ( $s^{-1}$ ), e que cada uma tem a duração média de  $H(s)$  (*call holding time*), então o tráfego oferecido por cada assinante à rede é dado por:  $A = \mu H(E)$ .
- Tráfego escoado é uma grandeza que corresponde à fatia do tráfego total oferecido que é efectivamente processado pela rede.

Os sistemas de rádio móvel celular são limitados em termos do número de recursos rádio disponíveis para absorver o tráfego que é oferecido. Isto porque a largura de banda atribuída a cada operador é limitada e deve ser rentabilizada ao máximo, conforme já se viu.

Por outro lado, os recursos rádio disponíveis são partilhados pelo universo de assinantes do serviço. Cada estação base pode ser vista como um servidor ao qual são atribuídos  $N$  recursos. Sempre que um assinante deseja estabelecer uma nova chamada, é-lhe atribuído um recurso deste servidor que esteja disponível. Quando a chamada é finalizada, este recurso é novamente libertado para o servidor. Por este motivo, o dimensionamento do número de recursos rádio a atribuir a cada servidor, em função do tráfego oferecido é feito tendo em conta que um número finito de recursos

pode suportar o tráfego gerado por um número muito superior de assinantes. Obviamente, uma vez que o número de recursos é limitado, nem todas as chamadas podem ser atendidas. Sendo assim, uma parte do tráfego inicialmente oferecido é bloqueada sempre que a capacidade do sistema se encontra esgotada.

A quantidade de tráfego inicialmente oferecida e que não é atendida está directamente relacionada com a qualidade do serviço prestado pelo operador (*grade of service - GoS*). O grau de serviço (GoS) traduz directamente o valor para a probabilidade que um assinante tem de ser bem sucedido na obtenção de um recurso rádio na fase de estabelecimento de uma chamada. Um GoS de 2% significa que 2 em 100 chamadas são bloqueadas no seu estabelecimento devido à falta de recursos rádio disponíveis.

Na fase de dimensionamento da rede, a partir de um valor pretendido para o GoS (2% é um valor normalmente utilizado) e de um valor estimado para o tráfego oferecido a cada célula, é determinado o número de recursos rádio a atribuir a cada uma (e logo de portadoras a instalar) por forma a satisfazer o GoS pretendido.

O GoS é um parâmetro fundamental na medição do nível da qualidade do serviço prestado por um operador. O GoS é considerado tanto na fase de planeamento da rede (em termos do número de portadoras a instalar no equipamento rádio em cada estação base) bem como na fase de manutenção e optimização (medições do tráfego escoado).

Existem dois tipos possíveis de sistemas, que se distinguem quanto à forma como é processado o tráfego que não pode ser atendido.

### **Blocked calls cleared**

Este esquema atribui recursos rádio às chamadas em fase de estabelecimento sempre que exista pelo menos um disponível. Quando não existe nenhum recurso rádio disponível a chamada é bloqueada, devendo-se proceder a uma nova tentativa em igualdade de circunstâncias com as restantes chamadas, daí a sua designação como *blocked calls cleared*. É possível derivar uma expressão para o valor da probabilidade de bloqueio na fase de estabelecimento de novas chamadas. Esta expressão é conhecida como *fórmula de Erlang B* e é válida se forem consideradas as aproximações seguintes:

- O tráfego oferecido segue uma distribuição do tipo *Poisson*.
- O número de assinantes é considerado infinito.

A probabilidade de bloqueio no estabelecimento de uma nova chamada  $P_B$ , em função do número de recursos rádio disponíveis e do tráfego oferecido é dada por:

$$\text{GoS} = P_B = \frac{\frac{A^C}{C!}}{\sum_{i=0}^C \frac{A^i}{i!}} \quad (16)$$

em que:

- $C$  é igual ao número de recursos rádio disponíveis.
- $A$  é o tráfego oferecido.

### Blocked calls delayed

Este esquema é semelhante ao anterior. No entanto, quando não existe nenhum recurso rádio disponível para atribuição à uma chamada em fase de estabelecimento, esta é posta em fila de espera até que exista um recurso rádio novamente disponível. Daí a sua designação como *blocked calls delayed*. Para se obter o GoS, em primeiro lugar é preciso determinar a probabilidade de uma chamada não ser inicialmente atendida e desta forma ser posta em fila de espera. Este parâmetro é dado pela *fórmula de Erlang C*:

$$P[\text{atraso na fila} > 0] = \frac{A^C}{A^C + C! \left(1 - \frac{A}{C}\right) \sum_{i=0}^{C-1} \frac{A^i}{i!}} \quad (17)$$

O GoS corresponde à probabilidade de uma chamada sofrer um atraso na fila de espera por um período de tempo superior a  $T$  segundos (é função directa de um terceiro parâmetro - o tempo). O seu valor é dado por:

$$\begin{aligned} \text{GoS} &= P_r[\text{atraso na fila} > T] \\ &= P_r[\text{atraso na fila} > 0] P_r[\text{atraso na fila} > T / \text{atraso} > 0] \\ &= P_r[\text{atraso na fila} > 0] \exp(-(C - A)T / H) \end{aligned} \quad (18)$$

em que  $H$  é a duração média de uma chamada em segundos.

O dimensionamento dos recursos rádio e da capacidade de uma rede móvel celular é normalmente realizado com base no modelo de *Erlang B* e para cada célula

individualmente, resultando numa capacidade por célula igual a  $C_{Ti}$ , sendo  $i$  uma célula genérica da rede.

Sendo assim, a capacidade total  $C_T$  da rede é dada pelo somatório das capacidades parciais  $C_{Ti}$ :

$$C_T = \sum_{i:Z_i \in G} C_{Ti} \quad (19)$$

em que:

- $G$  representa o conjunto de células da rede num todo ou em parte.
- $Z_i$  representa uma célula individual da rede.
- $C_{Ti}$  é a capacidade teórica de uma célula da rede e obtida a partir do modelo de *Erlang B*.

Por imposições que têm a ver com o método de acesso FDMA\TDMA, o aumento da capacidade de cada célula da rede é um processo descontínuo, conseguido através da adição de novas portadoras ao equipamento rádio de cada estação base. Cada portadora resulta na adição de no máximo 8 canais de tráfego (este número pode variar conforme o número de canais de sinalização utilizados), sendo que o número  $N$  de canais de rádio disponíveis para um grupo  $M$  de portadoras é igual a  $8M$  subtraído do número de canais de rádio utilizados para sinalização e controlo.

Por outro lado, na prática, a distribuição espacial do tráfego ao longo da área de cobertura da rede não é uniforme, o que faz com que cada célula esteja normalmente “parcialmente carregada” no que respeita à percentagem de ocupação dos recursos rádio por ela disponibilizados.

Os dois pontos anteriores comprovam que a capacidade teórica total  $C_T$ , obtida a partir do modelo de *Erlang B*, é um valor teórico que, quando utilizado no processo de análise de tráfego e redimensionamento continuado dos recursos rádio a atribuir à cada célula da rede é ineficiente, devido ao sobre-dimensionamento do seu real valor. Ou seja, o tráfego efectivamente escoado é inferior ao valor teórico deduzido através do modelo de *Erlang B*, resultando numa capacidade real inferior ao valor teórico [BAI97].

Define-se então o parâmetro  $L_i$  denominado por “factor de carga” de uma célula da rede:

$$L_i = \frac{A_i}{C_{Ti}} \quad (20)$$

em que:

- $A_i$  é o tráfego efectivamente gerado na área de dominância da célula genérica  $i$  da rede.
- $C_{Ti}$  é a capacidade teórica da célula genérica  $i$  da rede, calculada pelo modelo de *Erlang B*.

Em [BAI97] *Baier* propõe um método de dimensionamento da capacidade de uma rede celular mais eficaz. Para tal, são utilizadas estatísticas de tráfego que estão disponíveis nos respectivos centros de operação e manutenção da rede (OMC - *operations and maintenance centers*), bem como estimativas para a distribuição do tráfego oferecido a cada célula. Os autores descrevem um processo eficiente de redimensionamento dos recursos da rede em função do aumento do tráfego oferecido ao longo do tempo (análise de tráfego).

### Análise de tráfego.

No processo de dimensionamento da capacidade e do tráfego de uma rede móvel celular, para efeitos de análise é considerado o tráfego gerado na hora mais carregada da rede (*busy hour*), ou seja, o dimensionamento é efectuado sempre para o pior caso.

O tráfego total  $A_i$  oferecido a uma célula  $Z_i$  da rede é função da área geográfica de dominância da célula e da forma como o tráfego se distribui espacialmente ao longo da mesma, ou seja, da “densidade espacial de tráfego”  $a$  (em *Erlangs* por  $Km^2$ ). Para efeitos práticos considera-se a área de dominância de cada célula como sendo composta por uma matriz de quadrados de lado  $d$  (*pixel*). Para cada um destes quadrados considera-se o tráfego como estando uniformemente distribuído. Sendo assim, o tráfego  $A_i$  oferecido à uma célula qualquer da área de cobertura da rede móvel celular pode ser aproximado por:

$$A_i = \sum_{P_j \in Z_i} a(P_j) d^2 \quad (21)$$

em que:

- $a(P_j)$  corresponde a densidade de tráfego gerada no *pixel*  $P_j$  da célula  $Z_i$ .
- $d^2$  é a área de cada *pixel*.
- A área de uma célula  $Z_i$  é igual a soma das áreas elementares de todos os seus *pixels*.

Na prática, não é possível estimar a densidade de tráfego gerada em cada célula da rede, *pixel a pixel*, uma vez que somente é possível obter valores para o tráfego gerado ao nível de cada célula no seu todo. No entanto, a densidade de tráfego em cada *pixel* pode ser aproximada a partir de um processo de classificação do mesmo quanto à morfologia do ambiente onde está inserido. Para este processo de classificação é feita uma análise do ambiente a cobrir quanto a: tipo e densidade dos edifícios, distribuição das ruas, avenidas e estradas, etc... Este processo de análise resulta numa classificação da área de cobertura de cada *pixel* (zona rural, urbana e urbana densa por exemplo). A seguir a este processo de classificação é feita uma estimativa para o peso da contribuição de cada zona no tráfego total gerado em cada célula. Esta estimativa deve ser ajustada continuamente ao valor obtido a partir das estatísticas da rede para o tráfego total oferecido a cada célula.

### **Redimensionamento da capacidade da rede - evolução do tráfego oferecido**

Para fazer face ao aumento do tráfego oferecido torna-se necessário redimensionar a capacidade instalada numa forma contínua. Para redimensionamentos a longo prazo torna-se necessária a elaboração de novos planos de frequências que permitam a adição de novas portadoras ou inserção de novas estações base na arquitectura da rede, sem comprometer a qualidade da mesma. Por outro lado, torna-se necessário dispor de dados relativos ao crescimento esperado do número de assinantes do serviço para o período de redimensionamento considerado. Uma forma simples e prática de se estimar estes valores é recorrer ao número de assinantes registados em cada uma das bases de dados de registo de assinantes (VLR) associada a cada um dos comutadores da rede (MSC). Sendo assim, se  $S_{VLR}$  é igual ao número actual de assinantes registados num

VLR da rede num dado instante e  $\alpha_{VLR}$  é o tráfego médio gerado por assinante, então a partir da estimativa da densidade de tráfego actual  $a(P_j)$  pode ser obtida a densidade de tráfego prevista  $a'(P_j)$  para o fim do período de dimensionamento:

$$a'(P_j) = a(P_j) \frac{S'_{VLR} \alpha'_{MSC}}{S_{VLR} \alpha_{MSC}} \quad (22)$$

em que:

- $a(P_j)$  é a densidade de tráfego por *pixel* no instante de tempo  $t$ .
- $a'(P_j)$  é a densidade de tráfego por *pixel* no instante de tempo  $t'$ .
- $\alpha_{VLR}$  é o tráfego médio gerado por assinante no instante de tempo  $t$ .
- $\alpha'_{VLR}$  é o tráfego médio gerado por assinante no instante de tempo  $t'$ .
- $S_{VLR}$  é o número de assinantes registados num VLR da rede no instante de tempo  $t$ .
- $S'_{VLR}$  é o número de assinantes registados num VLR da rede no instante de tempo  $t'$ .

Ou seja, à densidade de tráfego actual (instante  $t$ :  $a(P_j)$ ) é aplicada uma constante de proporcionalidade que reflecte o crescimento do número de assinantes, fornecendo uma estimativa para a densidade de tráfego futura (instante  $t'$ :  $a'(P_j)$ ).

O tráfego médio gerado por cada assinante pode ser estimado da seguinte forma:

$$\alpha_{MSC} = \frac{\sum_{i:Z_i \in MSC} A_i}{S_{VLR}} \quad (23)$$

O tráfego médio gerado por cada assinante é estimado ao nível de cada MSC, uma vez que apenas é possível dispor de estatísticas do número de assinantes do serviço ao nível de cada MSC.

### Capacidade de uma rede móvel celular - aproximação a um valor prático

Atendendo aos dois pontos enunciados anteriormente, *Baier* supôs que o valor para a capacidade da rede conforme estimada pela fórmula de *Erlang B* (capacidade teórica)

não está de acordo com a realidade, estimando o seu valor por excesso. Por este motivo, propôs um valor mais próximo da realidade ao qual denominou capacidade real da rede e que é expressa a partir da seguinte expressão:

$$C_{Ri} = C_{Ti} \lambda(M_i, K_i) \quad (24)$$

em que:

- $C_{Ri}$  é a capacidade real de uma célula da rede.
- $C_{Ti}$  é a capacidade teórica obtida pela fórmula de *Erlang B* para cada célula da rede.
- $\lambda(M_i, K_i)$  é o “coeficiente de carga” de cada célula. Depende do número de portadoras instaladas na célula ( $M_i$ ) e do tipo de distribuição de tráfego característica da morfologia do ambiente de cobertura de cada célula ( $K_i$ )

A expressão anterior demonstra claramente que a capacidade real  $C_{Ri}$  de uma célula da rede é uma fracção da capacidade teórica  $C_{Ti}$  que é dada pelo modelo de *Erlang B*. O valor desta fracção é determinado pelo coeficiente de carga  $\lambda(M_i, K_i)$ . O parâmetro  $K$  caracteriza o peso de cada tipo de ambiente na contribuição do tráfego total gerado em cada célula. Pelo facto de normalmente cada célula cobrir diferentes tipos de ambientes (no que respeita à sua morfologia), o tráfego oferecido não está uniformemente distribuído pela sua área de cobertura. Este aspecto é caracterizado por este parâmetro. Em [BAI97] foram considerados três tipos de ambientes para a cobertura celular:

$$K \in \{ "rural", "urbano", "urbano denso" \} \quad (25)$$

Para esta classificação foram considerados critérios tais como: tipo e densidade de edifícios e número de habitantes por Km quadrado, por exemplo.

O parâmetro  $\lambda$  tem em conta o facto de, normalmente, cada célula estar apenas “parcialmente carregada” em termos de aproveitamento dos seus recursos rádio (tal como expresso anteriormente). Isto significa que cada célula, na maior parte do tempo, apenas tem uma parte dos recursos disponíveis ocupados a processar tráfego. Obviamente este raciocínio apenas é válido para uma rede bem dimensionada onde o GoS está dentro dos limites para os quais a rede foi planeada.

No processo de determinação dos coeficientes de carga  $\lambda_i$  ( $\lambda_i = (M_i, K_i)$ ), cada célula da rede  $Z_i$  é classificada de acordo com este critério, ou seja, é associado um atributo de classe  $K_i$  ( $K_i = K(Z_i)$ ). Finalmente, o coeficiente de carga individual de cada célula  $\lambda_i$  é ajustado ao valor médio do “factor de carga”  $L_{av}$ , de todas as células com o atributo  $K_i = K$  e com  $M_i = M$  portadoras, sendo dado por:

$$\lambda(M, K) = L_{av}(Z:K_i = K, M_i = M) \quad (26)$$

Sendo assim, a capacidade total da rede pode ser estimada a partir da seguinte expressão:

$$C_R = \sum_{i:Z_i \in G} C_{Ti} \lambda(M_i, K_i) \quad (27)$$

<i>N.º de TRXs por célula M</i>	1	2	3	4
<i>N.º de canais de tráfego N</i>	6	14	22	30
<i>Capacidade teórica C<sub>Ti</sub> (Erl)</i>	1,91	7,35	13,7	20,4

*Tabela 2.1 – Capacidade teórica para diferentes configurações.*

<i>Coefficiente de carga <math>\lambda</math></i>	0,7	0,56	0,7	0,79
<i>Capacidade prática C<sub>Ri</sub> (Erl)</i>	1,34	4,09	9,75	16,01

*Tabela 2.2 - Classe “densamente urbana”.*

<i>Coefficiente de carga <math>\lambda</math></i>	0,7	0,56	0,7	0,79
<i>Capacidade prática C<sub>Ri</sub> (Erl)</i>	1,34	4,09	9,75	16,01

*Tabela 2.3 - Classe “urbana”.*

<i>Coefficiente de carga <math>\lambda</math></i>	0,51	0,48	0,68	0,72
<i>Capacidade prática C<sub>Ri</sub> (Erl)</i>	0,96	3,54	9,26	14,68

*Tabela 2.4 - Classe “rural”.*

As tabelas 2.1 a 2.4 ilustram os resultados obtidos:

- Como se pode observar, para  $M \geq 2$  o coeficiente  $\lambda$  não depende do ambiente onde a célula se encontra inserida (classe). Isto está de acordo com o facto de normalmente células com duas ou mais portadoras estarem a assegurar a cobertura de zonas com uma densidade de tráfego relativamente elevada (características das zonas urbanas e urbanas densas) onde o “factor de carga”  $L_i$  é significativo
- É de realçar ainda que para  $M = 4$  este coeficiente atinge valores bastante elevados (cerca de 80%) o que reflecte uma taxa de reutilização dos recursos rádio disponíveis bastante significativa. Para  $M = 1$ , as células do tipo “rural” são aquelas com “factores de carga” mais baixos, o que condiz com o facto de o tráfego normalmente oferecido à este tipo de células ser pouco significativo, daí a instalação de apenas uma portadora.
- Finalmente, verifica-se que não existem diferenças entre as classes “urbana” e “densamente urbana” ao nível de resultados práticos.

A tabela 2.5 ilustra o valor obtido para o quociente entre a capacidade total teórica  $C_T$  e a capacidade total prática  $C_R$ , para cada uma das três classes até aqui consideradas. Estes valores permitem quantificar a desproporção entre o valor da capacidade da rede estimada consoante o modelo de *Erlang* B (na fase de planeamento) e a capacidade efectiva, causada pelo efeito de carga parcial dos recursos disponíveis em cada célula.

	“Densamente urbana”	“Urbana”	“Rural”
$C_R / C_T$ (%)	65,9	65,8	54,9

Tabela 2.5 - Factor de carga para os diferentes tipos de ambientes considerados.

## 2.8 Processamento de *handovers* em redes móveis celulares

A realização de *handovers* é um processo fundamental em redes móveis celulares. [POL96, JAB91, JAB95, STE95]. Um *handover* (ou *handoff*) ocorre na transição entre as áreas de dominância de duas células vizinhas entre si. Quando um móvel atinge as fronteiras da sua célula, torna-se necessário que a rede lhe atribua um novo recurso rádio na célula de destino, por forma a dar continuidade ao processo de comunicação,

evitando que a chamada seja forçada a terminar. Após a sua atribuição, o controlo da chamada é transferido para a nova estação base. Uma vez finalizado este processo de transferência e estabelecido o início da transmissão no novo recurso rádio da célula de destino é necessário libertar o recurso rádio anteriormente atribuído na célula de origem. Portanto, a execução de um processo de *handover* pressupõe sempre três fases distintas (pela ordem seguinte):

- Fase correspondente à realização de medições.
- Reunião das condições necessárias para realização do processo de *handover* (início do processo).
- Controlo e execução do processo de *handover*.

Cada uma dessas fases é analisada em pormenor a seguir. No que se segue, a abordagem é sempre feita relativamente à forma como o mecanismo de *handover* é processado em redes móveis celulares que implementam o sistema GSM.

### Realização de medições

A primeira fase de um processo de *handover* envolve a realização de medições do nível médio de sinal na ligação rádio (RSSI - *received signal strength indication*) bem como da qualidade da transmissão suportada por esta ligação (medida através da detecção do número de bits errados na recepção (BER- *bit error rate*). No sistema GSM, estas medições são efectuadas periodicamente por cada móvel em modo de chamada (*busy mode*). Uma vez que o método utilizado no acesso aos recursos rádio da rede é o FDMA/TDMA, os intervalos de tempo durante os quais um recurso rádio não está a ser utilizado para transmissão ou recepção de informação são utilizados para a realização destas medições.

As medições realizadas são as seguintes:

- Nível médio do sinal rádio recebido a partir da estação base ao qual está ancorado (que suporta a chamada) - RSSI.
- Qualidade da transmissão efectuada nesta ligação - BER.
- Nível médio do sinal rádio recebido no canal BCCH de cada uma das estações que foram declaradas como suas vizinhas no seu processo de configuração. Com esta

informação é elaborada uma lista com as seis estações com nível médio de sinal mais elevado na recepção (por nível de prioridade).

Esta informação é formatada num relatório que é enviado periodicamente à estação base de suporte da ligação (no canal SACCH). Por sua vez, a estação base encaminha o relatório para o respectivo BSC. Isto permite que o BSC avalie o instante de tempo em que se deve dar início ao processo de *handover* e para qual estação base a chamada deve ser encaminhada. Por este motivo diz-se que no GSM o processo de execução de *handovers* é do tipo MAHO (*mobile assisted handover*).

As medições do nível médio do sinal rádio efectuadas por cada móvel e enviadas ao BSC são filtradas por forma a eliminar as flutuações que lhe estão sobrepostas devido aos mecanismos de desvanecimento (lento e rápido) do sinal.

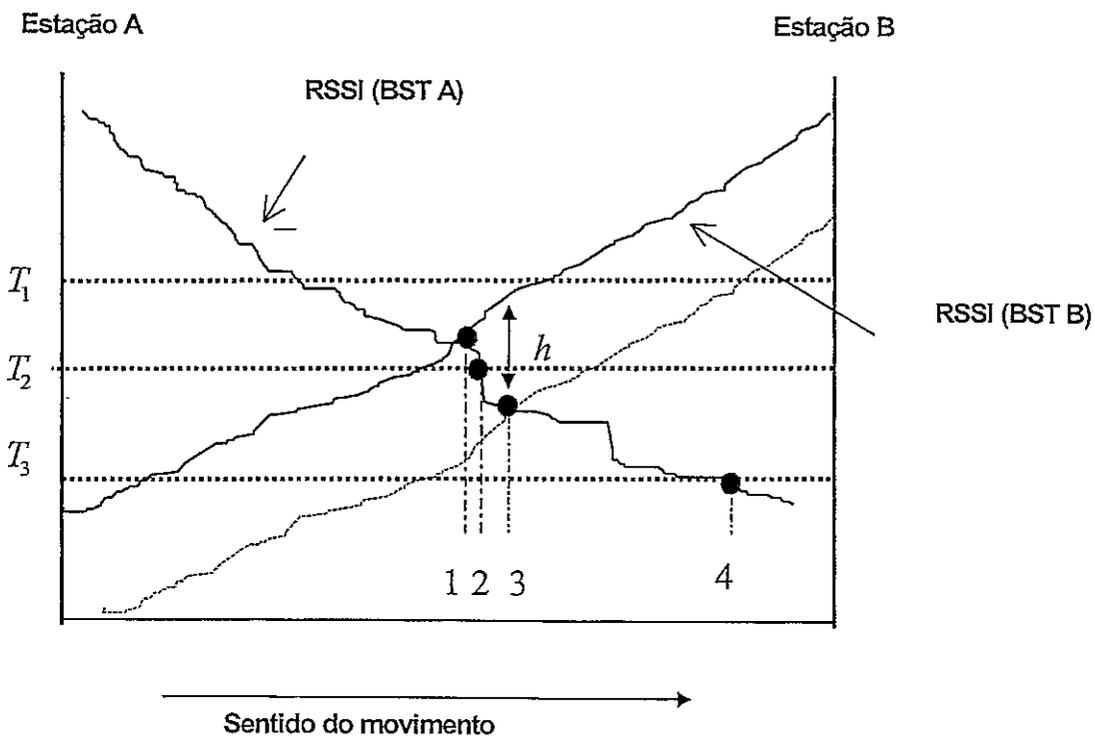


Figura 2.8— Ilustração do efeito resultante da definição do nível de threshold e da margem de histerese no processo de handover.

### Reunião das condições necessárias para início do processo de handover

A reunião das condições necessárias para início do processo de *handover* e consequente pedido de realização está directamente relacionada com o algoritmo

implementado. O algoritmo baseia-se em quatro parâmetros (definidos na fase de configuração de cada estação base), por forma a determinar o instante correcto para dar início ao processo. Estes parâmetros são os seguintes: nível de *threshold*, *margem de histerese*, formato e comprimento do filtro responsável pela eliminação das variações bruscas do sinal rádio devido ao efeito de multipercurso (*averaging filter*). A combinação destes quatro parâmetros permite definir diferentes estratégias por forma a se dar início ao processo de *handover*.

A figura 2.8 ilustra o movimento de um móvel com origem na célula servida pela estação *A* e término na célula servida pela estação *B*. Como se pode observar, o nível do sinal rádio recebido a partir da estação *A* diminui à medida que o móvel se afasta. Da mesma forma, o nível do sinal rádio recebido a partir da estação *B* aumenta à medida que o móvel se aproxima. Esta figura ilustra os efeitos resultantes da aplicação das seguintes estratégias para detecção do início do processo de *handover*.

#### **Estratégia baseada na relação entre os níveis de sinal rádio (relative signal strength)**

Com este método, o início do processo de *handover* ocorre quando o nível médio do sinal rádio recebido a partir da estação *B* for superior ao nível médio do sinal rádio recebido a partir da estação *A*. A principal desvantagem deste método é o facto de implicar a ocorrência de muito *handovers* desnecessários quando o nível de sinal e a qualidade da ligação rádio ainda é aceitável.

#### **Estratégia baseada na relação entre os níveis de sinal rádio mais nível de threshold (relative signal strength with threshold).**

Com este método, o início do processo de *handover* ocorre quando são satisfeitas as duas condições seguintes: o nível médio de sinal da estação *A* é inferior a um nível de *threshold*  $T$  enquanto ao mesmo tempo o nível médio de sinal da estação *B* é superior ao nível médio de sinal da estação *A*. O efeito resultante da definição de  $T$  depende do seu valor quando comparado com o nível médio do sinal correspondente ao ponto de cruzamento dos sinais emitidos pelas duas estações.

Por exemplo, para um nível de *threshold*  $T_1$  conforme definido na figura 2.8, este esquema comporta-se da mesma forma que o método anterior (sem utilização de níveis

de *threshold*). Desta forma, o processo de *handover* volta a ser iniciado quando o móvel se encontra na posição 1. Para um nível de *threshold* inferior ao ponto de cruzamento dos sinais emitidos pelas duas estações, o início do processo de *handover* é retardado até que o nível médio de sinal emitido pela estação *A* seja inferior. Desta forma, para um nível de *threshold*  $T_2$  conforme definido na figura 2.8, o início do processo de *handover* ocorre quando o móvel se encontra no ponto 2. No entanto, para o nível de *threshold*  $T_3$  o atraso no início do processo é demasiado longo, resultando numa degradação na qualidade da ligação, devido ao facto de esta continuar a ser suportada pela estação *A* com níveis de sinal muito baixos quando comparado com o nível de sinal recebido a partir da estação *B*. Para o nível  $T_3$  o *handover* é iniciado quando o móvel se encontra na posição 4.

**Estratégia baseada na relação entre os níveis de sinal rádio mais nível de histerese (relative signal strength with hysteresis).**

Com este método, o início do processo de *handover* ocorre apenas a partir do ponto em que o nível médio de sinal da estação *B* é superior ao nível médio de sinal da estação *A* por uma margem denominada margem de histerese  $h$ . Na figura 2.8, o início deste processo é activado quando o móvel se encontra na posição 3. O objectivo da introdução da margem de histerese é evitar a ocorrência de *handovers* sucessivos devido à flutuação no nível do sinal rádio (efeito *ping-pong*).

**Estratégia baseada na relação entre os níveis de sinal rádio mais nível de threshold e nível de histerese (relative signal strength with threshold and hysteresis).**

Este método resulta na combinação dos dois métodos anteriores: nível de *threshold*  $T$  e margem de histerese  $h$ .

Em resumo, a função do nível de *threshold* é evitar a ocorrência de *handovers* nas situações em que o nível médio do sinal na ligação rádio com a estação base de origem ainda é suficientemente forte para suportar a ligação. Sendo assim, o processo de *handover* não pode ser desencadeado enquanto o nível médio do sinal rádio for superior a esse valor. Conforme se verificou, a definição do nível de *threshold* envolve sempre uma relação de compromisso: por um lado não pode corresponder a um nível

de sinal demasiado elevado, uma vez que não teria nenhum efeito ( $T_1$  na figura 2.8); por outro não pode corresponder a um nível de sinal demasiado reduzido que atrase o processo de *handover*, podendo forçar a terminação da chamada por falha na ligação rádio, RF losses, ( $T_3$  na figura 2.8). Um bom compromisso seria o nível indicado por  $T_2$  na figura 2.8. Nesta situação, apesar do nível médio do sinal rádio recebido a partir da estação  $B$  ser já superior ao da estação  $A$ , o processo de *handover* apenas é iniciado a partir do ponto correspondente a este nível de *threshold* (ponto 2).

A escolha do valor adequado para a *margem de histerese* está ligada ao processo de dimensionamento do número de recursos rádio, ou seja, de portadoras a atribuir a cada estação base em função da estimativa do tráfego oferecido. Isto porque a *margem de histerese* acarreta um deslocamento dinâmico das fronteiras de cada célula devido ao atraso no início do processo de *handover*. O raciocínio seguido é basicamente o seguinte:

- Facilitar o processo de *handover* para uma célula menos congestionada através da diminuição da sua *margem de histerese*.
- Dificultar o processo de *handover* para uma célula mais congestionada através do aumento da sua *margem de histerese*.

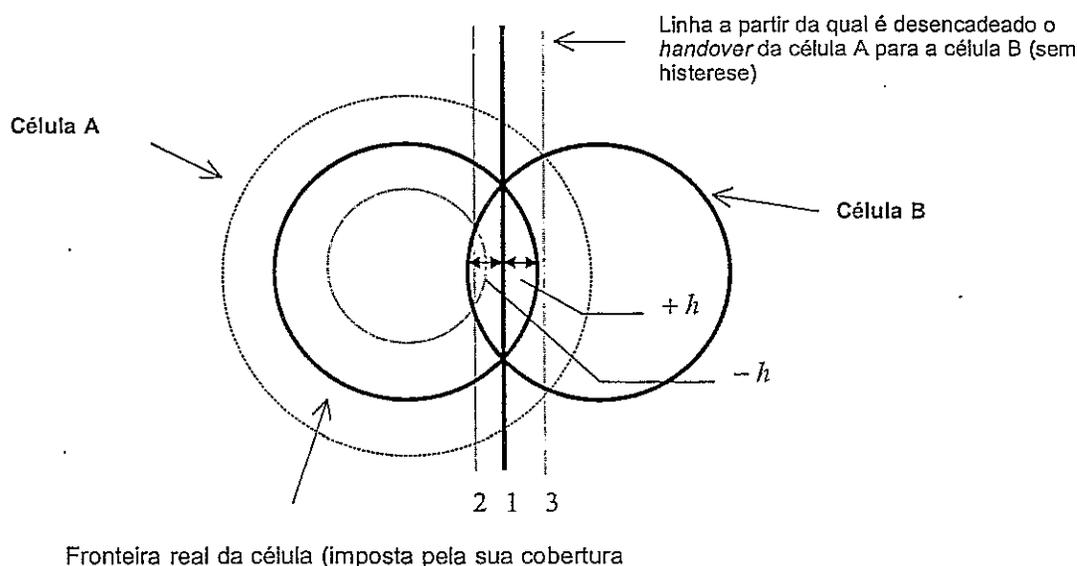


Figura 2.9— Ilustração do efeito conseguido com a definição da margem de histerese.

A figura 2.9 ilustra este raciocínio. Como se pode observar, com a definição de uma *margem de histerese* positiva ( $+h$ ) ocorre um aumento dinâmico da área de dominância da célula  $A$  relativamente à célula  $B$ . Isto resulta num deslocamento da linha 1 para a direita (linha 3). Esta linha representa o lugar geométrico dos pontos onde os níveis de sinal rádio emitidos por ambas as estações se equivalem (em condições ideais obviamente). Desta forma, os *handovers* para a célula  $B$  são dificultados, tendo os móveis que penetrar mais no seu interior para realizar o *handover*. O objectivo pretendido é, numa situação hipotética em que a célula  $B$  se encontra congestionada, tentar diminuir o tráfego que lhe é oferecido por *handover*. Numa situação real normalmente existem várias células cujas áreas de cobertura se sobrepõem à das células  $A$  e  $B$ . Porventura o tráfego por *handover* passaria a ser direccionado para uma célula vizinha menos carregada em termos de tráfego.

Simetricamente, com a introdução de uma *margem de histerese* negativa ( $-h$ ), ocorre uma diminuição dinâmica da área de dominância da célula  $A$  relativamente à célula  $B$ . Isto resulta num deslocamento da linha 1 para a esquerda (linha 2). Desta forma, os *handovers* para a célula  $B$  são facilitados, tendo os móveis que penetrar menos no seu interior para realizar o *handover*. Aqui, o objectivo pretendido é, numa situação hipotética em que a célula  $A$  se encontra congestionada, tentar aliviar o seu tráfego facilitando a sua transposição para a célula  $B$ . A margem de histerese é um parâmetro do sistema GSM que está associado à configuração de cada estação base para cada relação de vizinhança. Este parâmetro pode ser ajustado ao nível de cada BSC.

A programação do comprimento e formato do filtro baseia-se na seguinte relação de compromisso: Quanto maior o comprimento do filtro, menor o número de *handovers* desnecessários que venham a ocorrer (devido a variações bruscas no nível de sinal). No entanto, isto acarreta um aumento do atraso na finalização do processo de *handover* (o que pode originar terminação forçada de chamadas a decorrer devido a falhas na ligação rádio - *RF losses*).

### Controlo e execução do processo.

O método de controlo e execução do processo de *handover* implementado no sistema GSM denomina-se *hard handover*. Este método caracteriza-se pela interrupção momentânea da ligação rádio durante o processo de comutação entre os canais rádio

das duas estações base envolvidas neste processo. A partir do momento em que o processo de determinação da estação base de destino é finalizado, inicia-se o processo de selecção do novo canal rádio. Após a sua atribuição, inicia-se o processo de transição durante o qual a transmissão é interrompida. Quando esta é retomada novamente na nova célula o canal rádio atribuído na célula anterior é libertado.

Existe ainda um outro método de realização de *handovers* denominado *soft handover*. Neste método, em nenhum momento do processo existe interrupção da comunicação.

### 2.8.1 Mecanismos de atribuição de prioridades no processo de *handover*

Do ponto de vista da qualidade do processo de comunicação é desagradável a ocorrência de terminação forçada de chamadas a decorrer. Isto pode ser originado pelos seguintes factores (os factores enunciados abaixo dizem respeito apenas à interface ar).

- Falha na ligação rádio devido a um nível elevado de interferência co-canal e/ou por canal adjacente.
- Falha na execução de um *handover* devido à não disponibilidade de um recurso rádio na célula de destino.
- Problemas técnicos.

A primeira razão apontada está directamente associada à forma como o planeamento celular é realizado. A sua resolução passa pela utilização de distâncias de reutilização maiores ou pela utilização de técnicas de planeamento mais avançadas, cuja discussão não está incluída no âmbito deste capítulo.

A segunda razão apontada pode ser resolvida em parte através da utilização de técnicas que atribuam prioridades às chamadas em processo de *handover*, relativamente às novas chamadas que são estabelecidas. As técnicas normalmente utilizadas são as seguintes:

- Utilização de canais de guarda para a atribuição exclusiva às chamadas por *handover*.
- Utilização de filas de espera onde são colocadas as chamadas em processo de *handover* na falta de canais rádio para atribuição imediata.

O objectivo pretendido com a introdução destas técnicas é diminuir a probabilidade de ocorrência de falha no processo de *handover* e deste modo a probabilidade de terminação forçada de chamadas a decorrer. Esta questão é analisada em pormenor no capítulo 4.

### 2.8.2 Formas alternativas para o mecanismo de *handover*

Além do processo de *handover* tradicional, cujo objectivo é permitir a continuação de chamadas a decorrer, existem outras formas alternativas de *handover* com objectivos diferentes.

#### Handovers intra-celulares (intra-cell handovers).

Os *handovers* intra-celulares resumem-se a um processo de mudança na portadora e/ou intervalo de tempo que está a ser utilizado por uma chamada a decorrer. O objectivo principal deste tipo de *handovers* é melhorar a qualidade da ligação rádio quando a portadora e/ou intervalo de tempo utilizado está sujeita(o) a um nível elevado de interferência.

Com o *handover* intra-celular procura-se escolher uma portadora e/ou um intervalo de tempo que esteja sujeita(o) a um nível de interferência menor. Esta mudança é executada ao nível da própria célula sempre que o BER assume valores demasiado elevados, o que significa que a qualidade da ligação rádio degradou demasiado (o nível de *threshold* pode ser programado).

#### Directed handoff

Este método consiste num desvio de chamadas a decorrer numa célula (por *handover*) para células vizinhas que estejam menos congestionadas em termos de tráfego. Este método será analisado com mais pormenor no capítulo 5.

## 2.9 Planeamento em redes móveis celulares

O planeamento da arquitectura de uma rede móvel celular é um processo por etapas, que envolve vários graus de evolução. Cada etapa está directamente associada a densidade de tráfego oferecida a cada célula da rede.

Conforme descrito anteriormente, o aumento da capacidade da rede envolve a redução da distância de reutilização de frequências, conduzindo ao aumento da densidade de estações base. Esta diminuição está inevitavelmente associada a um aumento na interferência (co-canal e por canal adjacente) resultante. Desta forma, torna-se necessária uma actualização contínua no processo de implementação da arquitectura da rede, que permita absorver o aumento progressivo do tráfego oferecido, com a manutenção da qualidade do serviço prestado (GoS). A estratégia a seguir é portanto a seguinte:

- No arranque de uma rede móvel celular, a reduzida taxa de penetração por um lado e a necessidade de otimizar os custos associados à implantação da rede (minimização do número de estações base) por outro, levam cada operador a escolher padrões de reutilização adequados a menor densidade de estações base, com distâncias de reutilização maiores do que seria de esperar numa fase posterior do processo de evolução da rede. Nesta fase, o principal objectivo é o estabelecimento da cobertura da rede com o menor número de estações possível.
- • À medida que a taxa de penetração do serviço aumenta, e portanto a densidade de assinantes por célula a requerer acesso à rede também aumenta, torna-se necessário escolher outros padrões de reutilização de frequências que possibilitem o aumento da capacidade da rede para suportar o tráfego adicional que é criado. Normalmente são utilizados novos padrões de reutilização de frequências que estão associados a um número cada vez menor de células por *cluster*  $N_{cg}$  e que implicam um número de frequências por célula  $N_{fc}$  maior.
- Quanto se atinge o ponto de saturação no processo de diminuição do número de células por *cluster* (já que a interferência resultante passa a tomar valores inaceitáveis do ponto de vista da qualidade do processo de comunicação), há que proceder à escolha de novas estratégias para aumentar a capacidade da rede como forma de suportar o tráfego adicional. Este é justamente o ponto em que se encontram a maior parte das redes celulares de operadores GSM espalhados pelo globo. Recentemente foram implementadas novas técnicas que já tinham sido estudadas há alguns anos e que têm tornado possível a adaptação à explosão a que se tem assistido no serviço móvel celular.

As técnicas básicas de planeamento celular, normalmente implementadas na fase inicial de evolução da arquitectura da rede, são as seguintes:

- Decomposição - utilizada como forma de aumentar a capacidade da rede numa dada região, através da diminuição da distância de reutilização entre células co-canal (fraccionamento das células iniciais).
- Sectorização - utilizada com o objectivo de se confinar melhor o sinal emitido por cada estação, por forma a permitir a utilização de diferentes distâncias de reutilização.
- *Overlaid-Underlaid*- arquitectura em sub-camadas. Também implementada como forma de possibilitar a utilização de diferentes distâncias de reutilização.

### 2.9.1 Padrões de reutilização de frequências

No planeamento celular recorre-se normalmente a *padrões de reutilização de frequências* para determinar as portadoras que devem ser atribuídas a cada uma das células da rede. Cada padrão de reutilização de frequências está associado directamente a uma forma distinta de agrupar as células (formação dos *clusters*). Por sua vez, o número de células em cada um destes *clusters* está directamente associado ao nível de interferência co-canal admitido, e indirectamente à capacidade da rede.

As normas do GSM impõem os valores mínimos seguintes para as relações C/I e C/A [ERI96]:

$$C/I \geq 9dB \text{ e } C/A \geq -9dB \quad (28)$$

No entanto, na prática verifica-se que estes valores são demasiado optimistas. Ao invés são normalmente consideradas as seguintes figuras de mérito:

$$C/I \geq 15dB \text{ e } C/A \geq 0dB \quad (29)$$

Estes valores estão mais de acordo com um processo de comunicação com o mínimo de qualidade exigido. Alguns dos padrões de reutilização de frequências normalmente utilizados no planeamento celular são os seguintes:

- Padrão de reutilização  $N_{cg} = 9$  (sistemas de antenas omnidireccionais).

- Padrão de reutilização  $N_{cg} = 12$  (sistemas de antenas omnidireccionais).
- Padrão de reutilização  $N_{cg} = 3/9$  (sistemas de antenas directivas).
- Padrão de reutilização  $N_{cg} = 4/12$  (sistemas de antenas directivas).
- Padrão de reutilização  $N_{cg} = 7/21$  (sistemas de antenas directivas).

Os padrões de reutilização  $N_{cg} = 9$  e  $N_{cg} = 12$  são normalmente utilizados na fase inicial do planeamento da rede, quando não lhe é exigida uma grande capacidade de escoamento de tráfego. Estes padrões são utilizados para células na configuração omnidireccional (sistemas de antenas omnidireccionais). O padrão de reutilização  $N_{cg} = 12$  apresenta uma maior distância de reutilização relativamente ao padrão  $N_{cg} = 9$ . Por este motivo, as células estão menos sujeitas à interferência co-canal e por canal adjacente de células vizinhas.

Os padrões de reutilização  $N_{cg} = 7/21$ ,  $4/12$  e  $3/9$  são utilizados normalmente numa fase mais avançada do processo de evolução da rede, quando a capacidade de escoamento desta deve ser aumentada para suportar o tráfego adicional oferecido. Estes padrões são utilizados no processo de sectorização das células (normalmente numa fase seguinte do planeamento as células omnidireccionais são sectorizadas em três sectores de  $120^\circ$ ). O objectivo final é sempre maximizar a capacidade instalada enquanto se minimiza a interferência resultante.

Na secção seguinte analisa-se como exemplo o padrão  $N_{cg} = 9$ .

### 2.9.1.1 Padrão de reutilização $N_{cg} = 9$

Este padrão de reutilização de frequências pressupõe a associação das diferentes células em *clusters* de nove células. A distribuição de portadoras pelas células do *cluster* deve minimizar a interferência por canal adjacente, maximizando-se a separação entre portadoras de uma mesma célula.

Num sistema celular simples, a atribuição de portadoras às células dentro de cada *cluster* deve ser feita da seguinte forma:

$$P_{ij} = i + N_{cg}(j - 1) \quad (30)$$

em que:

- $P_{ij}$  representa a  $j$ -ésima portadora da  $i$ -ésima célula do *cluster*.
- $i = 1, \dots, N_{cg}$  é a  $i$ -ésima célula do *cluster*.
- $j = 1, \dots, N_{fc}$  é a  $j$ -ésima portadora atribuída a cada célula do *cluster*.

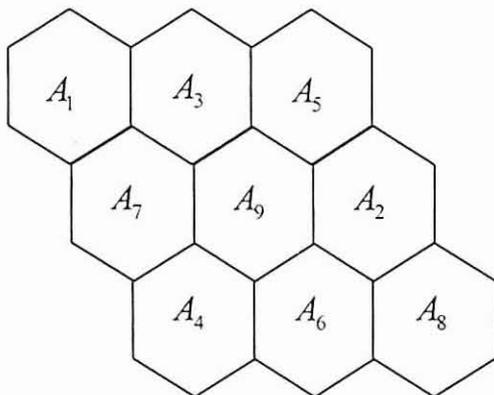


Figura 2.10 - Mapeamento dos grupos de frequências para o padrão de reutilização  $N_{cg} = 9$ .

Para um padrão de reutilização composto por *clusters* individuais de nove células, a tabela 2.6 ilustra a forma como esta equação determina a distribuição das 40 portadoras pelas suas nove células.

	$P_{1j}$ ( $A_1$ )	$P_{2j}$ ( $A_2$ )	$P_{3j}$ ( $A_3$ )	$P_{4j}$ ( $A_4$ )	$P_{5j}$ ( $A_5$ )	$P_{6j}$ ( $A_6$ )	$P_{7j}$ ( $A_7$ )	$P_{8j}$ ( $A_8$ )	$P_{9j}$ ( $A_9$ )
$P_{i1}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P_{i2}$	10	11	12	13	14	15	16	17	18
$P_{i3}$	19	20	21	22	23	24	25	26	27
$P_{i4}$	28	29	30	31	32	33	34	35	36
$P_{i5}$	37	38	39	40					

Tabela 2.6 – Esquema de atribuição de portadoras para o padrão  $N_{cg} = 9$

Na figura 2.10 é ilustrada a forma como é feito o mapeamento dos nove grupos de portadoras expressos na tabela 2.6 ( $A_1 \dots A_9$ ) pelas nove células do *cluster*. Como se pode observar, os nove grupos de portadoras são atribuídos de forma alternada, de maneira a limitar a interferência por canal adjacente entre células adjacentes entre si.

Na figura 2.11 está representado o padrão  $N_{cg} = 9$  obtido a partir da repetição do *cluster* individual de nove células da figura 2.10.

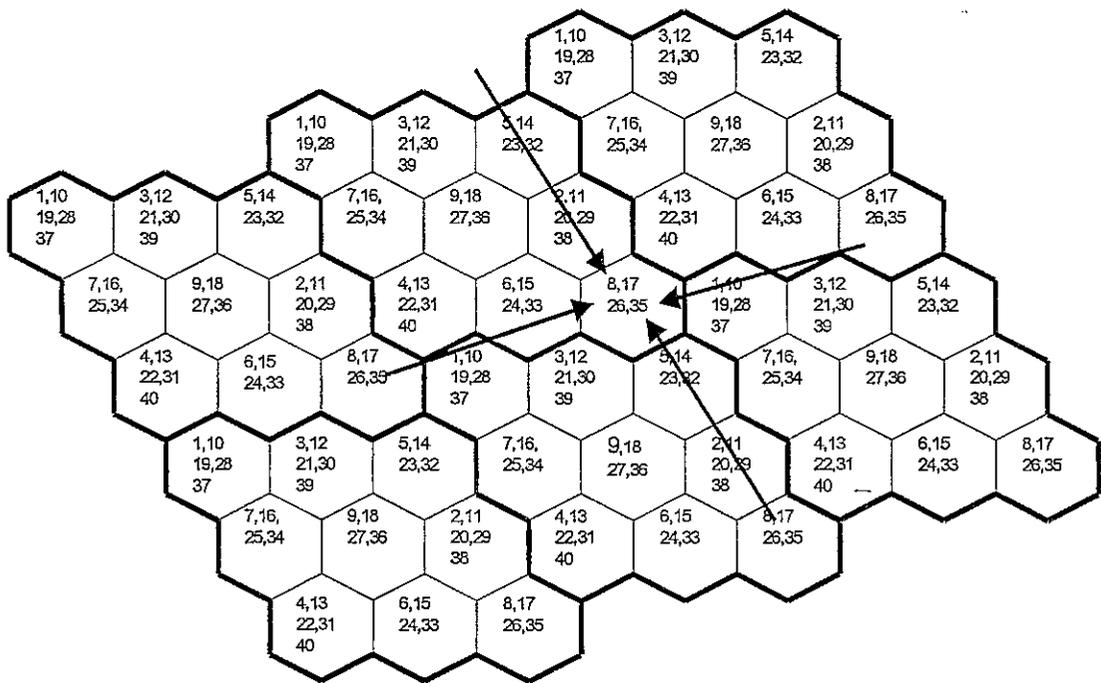


Figura 2.11 - Esquema de atribuição de frequências no padrão de reutilização  $N_{cg} = 9$ .

Para este padrão de reutilização de frequências verifica-se que o primeiro anel de células co-canais é composto por quatro células. O factor de interferência co-canal para este padrão é deste modo igual a:

$$C/I \cong 10 \log \left[ \frac{1}{a} \left( \sqrt{3N_{cg}} - 1 \right)^n \right] \approx 19 \text{ dB} \quad (31)$$

em que:

- $n = 4$  (coeficiente de atenuação no meio).
- $N_{cg} = 9$  (número de células por *cluster*).

- $a = 4$  (número de células interferentes do primeiro anel).

Conforme visto anteriormente, a atenuação imposta pelos filtros passa banda a portadoras adjacentes no espectro pode ser dada por:

$$ACI = 10n \log\left(\frac{d_c}{d_i}\right) + \text{Isolamento} \quad (32)$$

em que  $d_i$  e  $d_c$  correspondem respectivamente às distâncias à estação base de suporte da chamada e à estação base interferente,  $n$  é a constante de atenuação do meio e *Isolamento* representa a atenuação conseguida com o filtro passa-banda utilizado. Para este caso típico,  $d_i / d_c = 2$ . Para uma constante de propagação  $n$  igual a 4 e um filtro com uma característica de isolamento de 26dB, a estimativa para o factor de interferência por canal adjacente para este padrão é  $ACI = -38$  dB. O que é bastante bom tendo em vista os factores de mérito impostos para o sistema GSM.

### 2.9.2 Metodologia seguida para aumento da capacidade das redes móveis celulares

A utilização de diferentes padrões de reutilização de frequências prende-se, como foi demonstrado atrás, à necessidade de serem satisfeitos os dois objectivos fundamentais no planeamento das redes móveis celulares:

- Minimização do número de células por *cluster* por forma a maximizar a capacidade de escoamento de tráfego, através de uma melhor reutilização de frequências e uma limitação no factor de interferência co-canal.
- Utilização de algoritmos de atribuição de portadoras às diferentes células, por forma a minimizar o factor de interferência por canal adjacente.

Numa situação limite, o desejado seria a utilização de um padrão de reutilização de frequências constituído por *clusters* com uma única célula. Nesta situação, a distância de reutilização seria igual a um. No entanto, existe um ponto de saturação a partir do qual não é possível a utilização de um menor número de células por *cluster*. Por outro lado, a utilização de *clusters* menores impõe a implantação de novas estações base, com o custo que daí advém. Importa assim utilizar outras técnicas de planeamento

celular que permitam uma maior reutilização de frequências com minimização dos custos.

As técnicas básicas de planeamento celular vulgarmente utilizadas são as seguintes:

- Decomposição (*cell splitting*).
- Sectorização.

Ambas as técnicas são descritas em pormenor a seguir.

### 2.9.2.1 Decomposição (*cell splitting*)

A técnica da *decomposição* é um processo que corresponde à subdivisão das células originais em células com áreas de cobertura menores. Basicamente, o padrão de reutilização passa a ser composto por células de diferentes tamanhos. Como é natural, a densidade espacial de assinantes está longe de ser um processo uniforme. Existem áreas de cobertura da rede onde a concentração de assinantes é muito superior às restantes. Importa assim tornar disponível um maior número de portadoras nas células associadas a regiões de maior tráfego. Uma forma eficaz de satisfazer este requisito é utilizar células de diferentes tamanhos no processo de cobertura celular. A cada tipo de célula irá assim corresponder um padrão de reutilização de frequências diferente.

A figura 2.12 ilustra um processo de decomposição celular para o padrão de reutilização  $N_{cg} = 9$ , onde são considerados dois tipos de células: células de raio  $R$  e células de raio  $R/2$ . Deste modo é possível recorrer à utilização de dois padrões de reutilização de frequências, um para cada tipo de célula. Os grupos de frequências atribuídos a cada célula do *cluster* estão representados pelas letras  $A \dots H$ .

Como se pode observar pela figura, as três células de raio  $R/2$  foram adicionadas ao padrão de células de raio  $R$  por forma a que o padrão de reutilização de frequências fosse preservado. Por exemplo: a estação com o grupo de portadoras  $G$  do anel de células de raio  $R/2$  foi colocada no ponto correspondente sensivelmente à metade da distância entre as estações com o mesmo grupo de portadoras mas raio  $R$ , utilizando assim o mesmo grupo de frequências. Há assim uma espécie de redimensionamento da escala do grupo.

Devido ao facto de as células de raio  $R/2$  terem uma área menor do que as células de raio  $R$ , a potência do sinal emitido pelas suas estações base terá que ser obviamente menor por forma a confinar a área de cobertura aos limites geográficos da célula. No exemplo apresentado acima, a potência de transmissão das estações base das células de raio  $R$  terá de ser sensivelmente  $1/16$  inferior à potência de transmissão das estações base das células de raio  $R/2$ . Outra técnica normalmente utilizada com o objectivo de confinar a cobertura das células menores é a utilização de sistema de antenas com inclinação do feixe principal de radiação no plano vertical (*downtilt*).

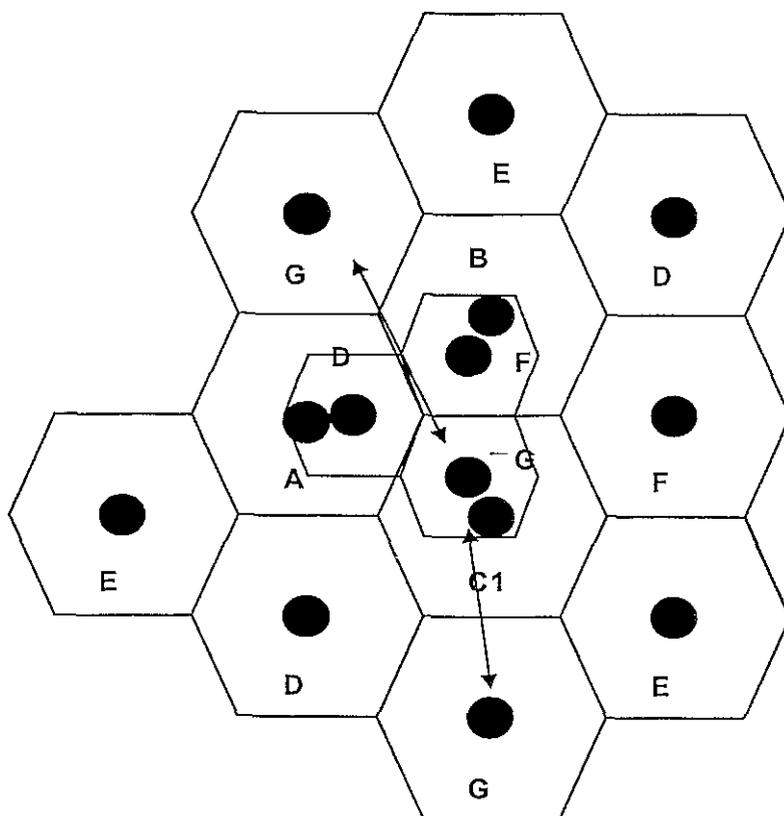


Figura 2.12 - Ilustração de um esquema de decomposição celular.

Existe no entanto um problema de índole prática associado a esta técnica que é o facto de a densidade de assinantes não seguir uma distribuição uniforme. Este facto leva à necessidade de se utilizarem diferentes níveis de decomposição celular (vários tamanhos de células associados a diferentes distâncias de reutilização) acarretando dificuldades acrescidas de implementação. Finalmente, o número de portadoras por grupo deverá ser reajustado sempre que a variação na densidade de assinantes em cada área o justifique.

### 2.9.2.2 Sectorização

Uma forma possível de aumentar o factor de reutilização de cada portadora e desta forma a capacidade da rede é utilizar a técnica da sectorização. De acordo com esta técnica uma célula é dividida em normalmente três sectores. Cada um dos quais é iluminado por antenas direccionais e utiliza um conjunto diferente de portadoras. Cada sector pode assim ser considerado como uma nova célula. O uso de antenas direccionais permite uma diminuição da interferência co-canal, o que através de uma diminuição da distância de reutilização conduz, como atrás se viu, a um aumento da capacidade. Cada um destes sistemas de antenas direccionais encarrega-se da cobertura de um dado sector (sub-área) da célula original.

Deste modo, cada célula apenas sofrerá (e causará interferência) numa (numa) fracção do *cluster* inicial de células co-canais, devido ao confinamento do sinal emitido por cada estação, graças à utilização de antenas direccionais.

O factor pelo qual a interferência co-canal é reduzida depende do grau de sectorização utilizado em cada célula. Normalmente são consideradas partições em sectores de  $120^\circ$ , podendo haver partições em sectores de  $90^\circ$  em casos especiais. Devido ao facto de serem utilizadas antenas direccionais em cada sector, a interferência co-canal é mínima segundo as respectivas direcções de sectorização (direcções desfasadas de  $120^\circ$  entre si para sectores de  $120^\circ$  por exemplo).

A atribuição das portadoras às células dentro de cada *cluster* deve ser feita da seguinte forma:

$$P_{ijk} = i + N_{cg}(k - 1) + N_{sc}N_{cg}(j - 1) \quad (33)$$

em que:

- $P_{ij}$  representa a  $j$ -ésima portadora da  $i$ -ésima célula do *cluster*.
- $i = 1, \dots, N_{cg}$  é a  $i$ -ésima célula do *cluster*.
- $j = 1, \dots, N_{fc}$  é a  $j$ -ésima portadora atribuída a cada célula do *cluster*.

	$P_{1,j1}$ ( $A_1$ )	$P_{2,j1}$ ( $A_2$ )	$P_{3,j1}$ ( $A_3$ )	$P_{4,j1}$ ( $A_4$ )	$P_{5,j1}$ ( $A_5$ )	$P_{6,j1}$ ( $A_6$ )	$P_{7,j1}$ ( $A_7$ )
$P_{i1k}$	1	2	3	4	5	6	7
$P_{i2k}$	22	23	24	25	26	27	28

Tabela 2.7 – Esquema de atribuição de portadoras para o padrão  $N_{cg} = 7/21$  – sector 1.

	$P_{1,j2}$ ( $B_1$ )	$P_{2,j2}$ ( $B_2$ )	$P_{3,j2}$ ( $B_3$ )	$P_{4,j2}$ ( $B_4$ )	$P_{5,j2}$ ( $B_5$ )	$P_{6,j2}$ ( $B_6$ )	$P_{7,j2}$ ( $B_7$ )
$P_{i1k}$	8	9	10	11	12	13	14
$P_{i2k}$	29	30	31	32	33	34	35

Tabela 2.8 – Esquema de atribuição de portadoras para o padrão  $N_{cg} = 7/21$  – sector 2.

	$P_{1,j3}$ ( $C_1$ )	$P_{2,j3}$ ( $C_2$ )	$P_{3,j3}$ ( $C_3$ )	$P_{4,j3}$ ( $C_4$ )	$P_{5,j3}$ ( $C_5$ )	$P_{6,j3}$ ( $C_6$ )	$P_{7,j3}$ ( $C_7$ )
$P_{i1k}$	15	16	17	18	19	20	21
$P_{i2k}$	36	37	38	39	40		

Tabela 2.9 – Esquema de atribuição de portadoras para o padrão  $N_{cg} = 7/21$  – sector 3.

### Padrão de reutilização 7/21

Este padrão de reutilização é construído a partir da repetição de *clusters* individuais compostos por 7 células sectorizadas em 3 sectores de  $120^\circ$ , resultando num total de 21 células por *cluster*. As tabelas 2.7, 2.8 e 2.9 ilustram a forma como esta equação determina a distribuição das 40 portadoras pelas suas 21 células.

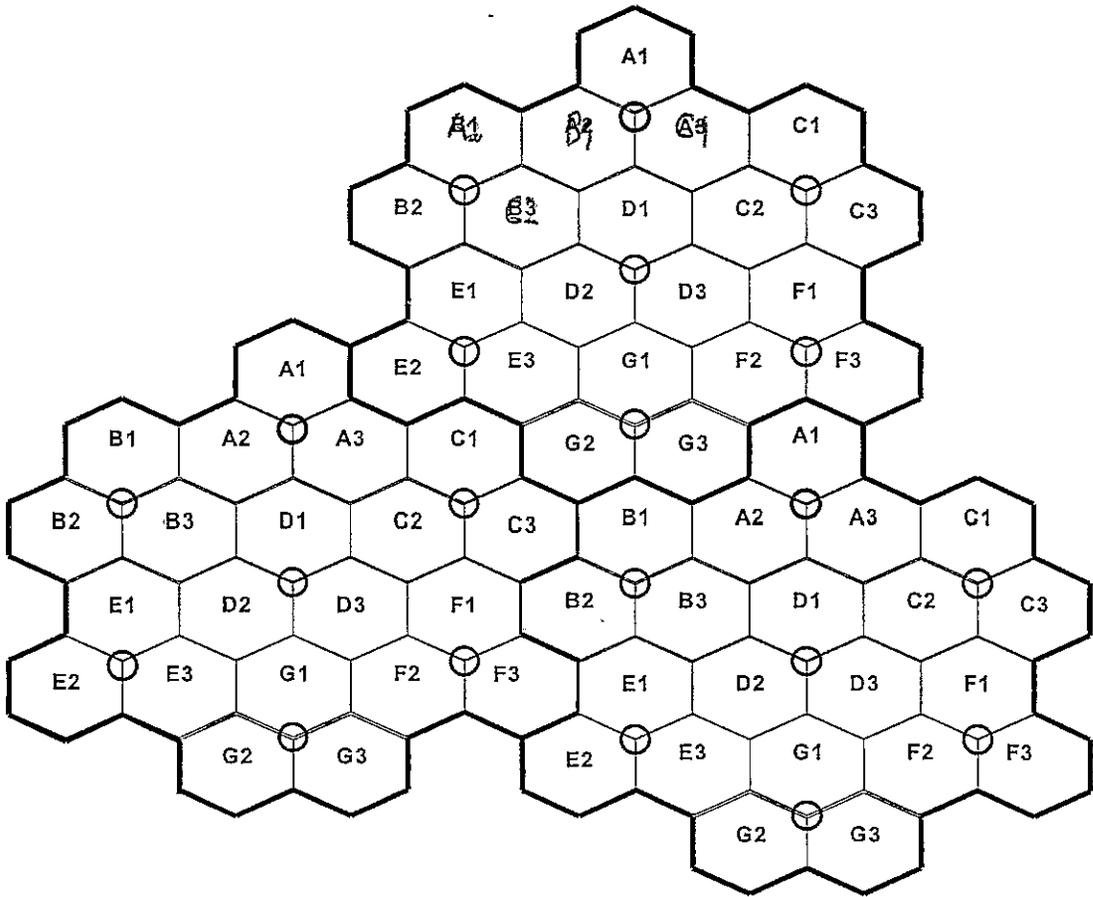


Figura 2.13 - Padrão de reutilização 7/21.

Como se pode ver pela figura 2.13 e pelas tabelas, de acordo com o modo como as células estão ordenadas e com o modo como as portadoras são atribuídas, o factor de interferência por canal adjacente pode ser desprezado para este padrão de reutilização de frequências. Finalmente importa salientar que este padrão de reutilização de frequências é normalmente utilizado em ambientes rurais, já que pelas suas características estes não são ambientes caracterizados pela geração de uma grande densidade de tráfego.

### 2.9.2.3 Overlaid/Underlaid

O processo de sectorização é apenas um ponto de partida na questão do aumento da capacidade em redes celulares. Outra técnica muito utilizada e que tem a vantagem adicional de aumentar a capacidade instalada sem haver necessidade de se proceder à instalação de novas estações é a técnica do *overlaid/underlaid* descrita a seguir. Esta técnica consiste numa reorganização da arquitectura da rede. A arquitectura passa a estar estruturada em duas camadas com diferentes padrões de reutilização de

frequências para cada uma. A camada *underlaid* é responsável pela cobertura contínua da rede e por este motivo o padrão de reutilização de frequências utilizado é um padrão menos compacto (por exemplo o padrão 4/12). A camada *overlaid* é responsável pela maior parte da capacidade instalada na rede, utilizando por este motivo padrões de reutilização mais agressivos (por exemplo o padrão 3/9). Desta forma, o número de portadoras atribuído à esta camada deve ser superior ao número de portadoras atribuído à camada *underlaid*.

Para ilustrar o ganho conseguido, em termos de capacidade, com a técnica *overlaid/underlaid* consideremos o exemplo seguinte: supondo um total de 48 portadoras, então para a camada *underlaid* com um padrão 4/12, se atribuirmos 1 portadora a cada uma das 12 células sobram 36 portadoras para serem atribuídas à camada *overlaid*. Desta forma, com um padrão 3/9 ficam disponíveis 4 portadoras para cada uma das 9 células desta camada. O total será de 5 portadoras por célula para cada *cluster*. Por outro lado, para um padrão inicial de 4/12 (sem implementação desta técnica), teremos um total de 4 portadoras por célula. O ganho é assim de 1 portadora por célula.

Para implementação desta técnica são necessárias funcionalidades adicionais por forma a delimitar os limites geográficos de cada camada, especialmente da camada *overlaid*. Algumas destas funcionalidades são por exemplo a utilização do ajuste automático da potência emitida por cada estação base (por este motivo os BCCHs são normalmente atribuídos a camada *underlaid*), ou ainda da sectorização destinada a camada *underlaid*, permitindo um melhor confinamento do sinal.

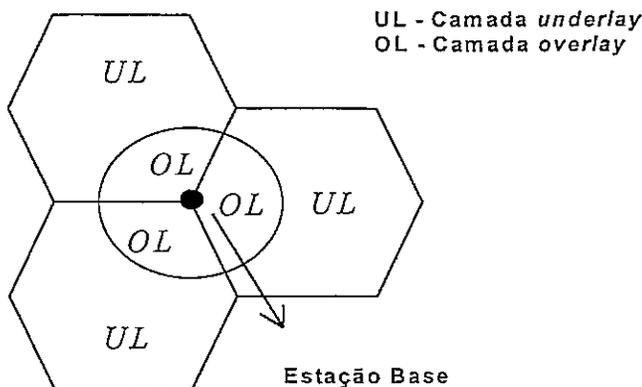


Figura 2.14 - Ilustração da organização em camadas *overlaid/underlaid*.

No projecto de uma arquitectura celular em camadas *overlaid/underlaid* há que ter em atenção os aspectos seguintes:

### Aspectos a considerar no planeamento de uma arquitectura overlaid/underlaid

- No processo de divisão das portadoras por ambas as camadas há que ter em atenção o tamanho da camada *underlaid* relativamente a camada *overlaid*. Isto porque há uma perda na eficiência da gestão dos recursos rádio, já que móveis localizados na área de dominância da camada *underlaid* não podem servir-se dos recursos rádio disponíveis na camada *overlaid*. Por este motivo, no projecto do número total de recursos rádio a atribuir à camada *overlaid* é considerado um maior nível de congestão permitido (menor GoS) do que à camada *underlaid*. Isto porque os móveis ancorados na camada *overlaid* também se podem servir dos recursos rádio existentes na camada *underlaid*.
- É preciso ter em atenção a forma como se distribui o tráfego oferecido à rede, por forma a co-localizar a camada *overlaid* com as zonas de maior densidade de tráfego.

Para alguns fabricantes, a portadora BCCH fica sempre associada à camada *underlaid*. No entanto, ambas as camadas podem ter a ela acesso. A principal desvantagem deste modo de associação é que para que um móvel localizado na área de dominância da camada *overlaid* possa realizar um *handover* para a camada *overlaid* vizinha é preciso primeiro haver uma mudança para a camada *underlaid*, após o qual se processa o *handover*. Uma vez na célula destino é preciso realizar uma nova mudança para a camada *overlaid*. Para outros fabricantes, o BCCH pode estar atribuído à camada *overlaid*. Deste modo já se torna possível efectuar o *handover* directamente entre camadas, sem haver necessidade na mudança de localização.

### Descrição do algoritmo de localização dos móveis pelas camadas overlaid/underlaid

O processo de localização dos móveis numa das duas camadas baseia-se em medições e comparações da atenuação do nível médio do sinal recebido com um nível de *threshold* pré-determinado, bem como na comparação do *timing advance* do terminal relativamente à sua estação base com outro nível de *threshold* também pré-

determinado. Estes níveis de *threshold* também definem a área de dominância da camada *overlaid*.

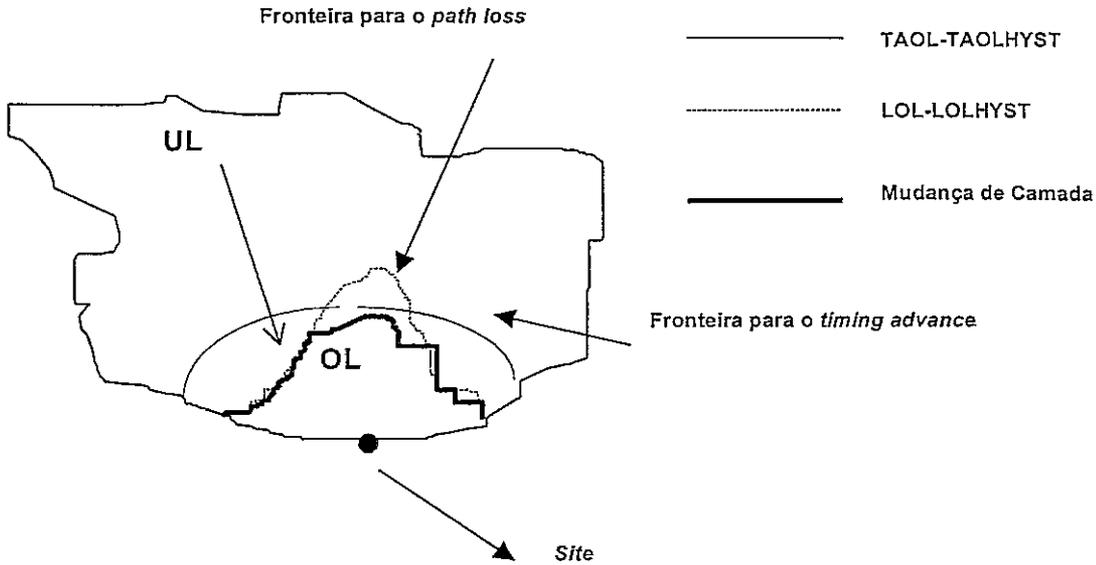


Figura 2.15 - Mudança de localização (da camada Underlaid para a camada Overlaid).

As condições que permitem a mudança da localização de um móvel são as seguintes:

#### Transição da camada underlaid para a camada overlaid

O *path loss*  $L$  na ligação descendente e o *timing advance*  $TA$  devem satisfazer simultaneamente as equações seguintes:

$$L \leq LOL - LOLHYST \quad (34)$$

$$TA < TAOL - TAOLHYST \quad (35)$$

Em que:  $L$ ,  $LOL$ ,  $LOLHYST$ ,  $TAOL$ ,  $TAOLHYST$  são parâmetros específicos do fabricante utilizados no processo de transição entre camadas. O parâmetro  $LOL$  representa o nível de *threshold* para o *path loss*, enquanto o parâmetro  $LOHYST$  é a margem de histerese a atribuir por forma a limitar o efeito *ping-pong* no processo de localização do móvel. O parâmetro  $TAOL$  representa o nível de *threshold* para o *timing advance*, enquanto o parâmetro  $TAOLHYST$  é também uma margem de histerese mas que diz respeito ao *timing advance*. O *path loss*  $L$  é dado pela diferença entre a potência emitida pela estação base e o nível médio do sinal recebido no móvel (em dBm). A figura 2.15 ilustra as duas camadas bem como as suas fronteiras definidas

por estes parâmetros. Conforme pode ser observado pela figura 2.15, para haver transição da camada *underlaid* para a camada *overlaid* ambas as condições expressas nas equações (34) e (35) devem ser satisfeitas.

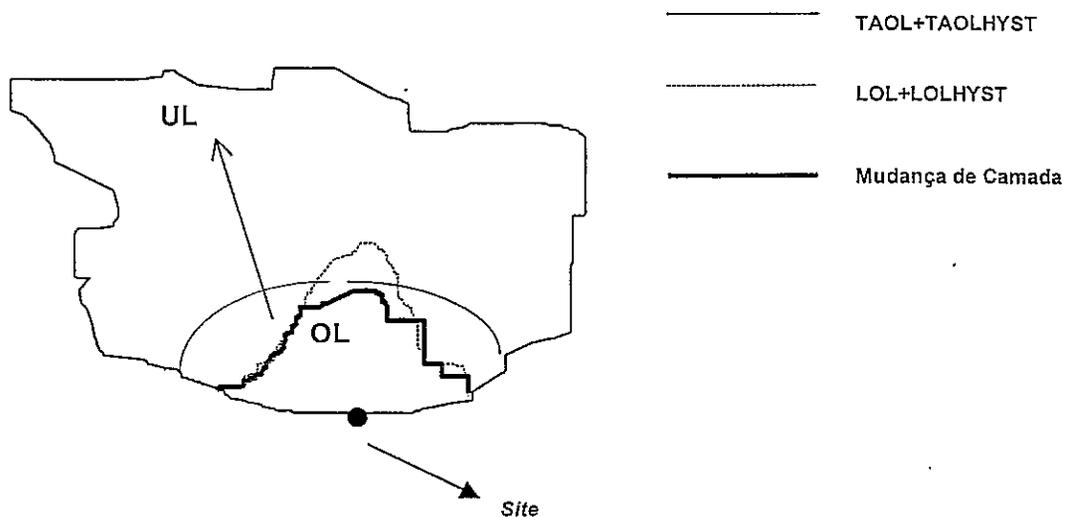


Figura 2.16 - Mudança de localização (da camada Overlaid para a camada Underlaid)

### Transição da camada overlaid para a camada underlaid

O *path loss*  $L$  na ligação descendente e o *timing advance*  $TA$  devem satisfazer pelo menos uma das equações seguintes.

$$L > LOL + LOLHYST \quad (36)$$

$$TA \geq TAOL + TAOLHYST \quad (37)$$

A figura 2.16 ilustra ambas as camadas bem como as suas fronteiras definidas por estes parâmetros.

A transição da camada *underlaid* para a camada *overlaid*, é facilitada enquanto que a transição em sentido contrário é dificultada pelas margens de histerese. Isto tem um sentido lógico na medida em que a camada *overlaid* é responsável pela absorção da maior fatia do tráfego, sendo preferível que os móveis se encontrem aí ancorados.

### Dimensionamento da camada overlaid

Com a diminuição da área de dominância da camada *overlaid*, a influência das células co-canais vizinhas, em termos de geração de interferência co-canal, diminui. Desta

forma, o termo  $I$  na expressão  $C/I$  é menor. Da mesma forma, o *path loss* da ligação entre os móveis ancorados na camada *overlaid* e a estação base diminui devido a redução da distância de separação entre estes. Isto traduz o aumento da relação  $C/I$  e os ganhos em termos de qualidade daí resultantes.

No entanto, a interferência causada em células co-canais vizinhas mantém-se. O processo normalmente seguido é diminuir a potência de emissão da estação base. Desta forma, o ganho na relação  $C/I$  é conseguido apenas à custa da diminuição no termo  $I$ . Naturalmente que a diminuição da potência de emissão também origina uma diminuição na relação  $C/I$  na camada *underlaid*. No entanto, devido ao facto de lhe serem atribuídas menos frequências (a sua função é essencialmente manter a continuidade da cobertura) conseguem-se distâncias de reutilização menos agressivas, que não imponham uma degradação na qualidade da comunicação devido ao aumento da interferência co-canal gerada.

O dimensionamento da camada *overlaid* deve ser feito inicialmente através de uma ferramenta de planeamento celular ou a partir de ensaios de propagação, bem como a partir de um valor pretendido para a relação  $C/I$ . Supondo por exemplo que os resultados das previsões teóricas através da ferramenta de planeamento celular indicam que a potência emitida pela estação base deve passar de 42dBm para 36dBm (uma redução de 6dB) e que a nova fronteira da camada *overlaid* deve distanciar da fronteira da célula cerca de 8dB, e supondo ainda que os resultados das medições de propagação indicam que o *handover* entre a camada *underlaid* e as células vizinhas se dá aos -90dBm, então o nível de *threshold* que delimita a fronteira entre as duas camadas será dado por:

$$LOL = 36 - (-90) - 8 = 118 \quad (38)$$

Este é o nível de *threshold* que determina em cada instante em qual camada estará localizado o móvel.

O segundo passo é localizar a camada *overlaid* em regiões de grande densidade de tráfego, bem como dimensionar o número de portadoras em função deste mesmo tráfego esperado.

Normalmente, a camada *overlaid* é dimensionada por forma a que esta fique congestionada em primeiro lugar relativamente à camada *underlaid*. Isto porque em caso de congestão podem ser utilizados recursos da camada *underlaid*.

Em certas situações também se deve ter algum cuidado no dimensionamento do *timing advance* (por exemplo em locais onde a propagação é muito boa mesmo que à distâncias consideráveis da estação base (tal como no caso da propagação na água). Este parâmetro pode ser dimensionado de uma forma pouco precisa a partir dos mapas topográficos e de uma forma mais precisa através de ensaios da cobertura da rede.

## 2.10 Conclusões

Neste capítulo foram abordados alguns princípios básicos das redes móveis celulares. Estes estão intrinsecamente ligados à forma como o planeamento deste tipo de redes deve ser realizado.

Inicialmente foi feita uma pequena descrição do sistema GSM, nomeadamente da sua arquitectura e da sua interface rádio (entre a estação móvel e a estação base). Foram ainda descritos em pormenor os diferentes canais de rádio implementados e as respectivas funções.

Abordou-se o princípio da reutilização de frequências como forma de maximizar e rentabilizar a utilização do espectro disponibilizado a cada operador. Demonstrou-se que a reutilização de frequências acarreta degradação na qualidade do processo de comunicação devido ao aparecimento de interferências: interferência co-canal e por canal adjacente. Por ser o factor limitativo do desempenho deste tipo de sistemas, abordou-se em pormenor a interferência co-canal, tendo-se procedido à sua análise estatística.

Os diferentes métodos de atribuição de recursos em redes celulares foi o tópico analisado a seguir. Dos vários métodos de atribuição possíveis, ressaltou-se que o método baseado na atribuição fixa de recursos rádio (FCA) é o método normalmente utilizado pelo sistema GSM.

O grau de serviço prestado é outro parâmetro fundamental no planeamento e medida do desempenho deste tipo de redes. Ressaltou-se a forma como é feito o dimensionamento

dos recursos rádio a atribuir a cada célula da rede, em função do tráfego oferecido que é esperado e do grau de serviço pretendido. Descreveu-se também um método prático e mais preciso de efectuar o dimensionamento da capacidade das redes móveis celulares.

A seguir abordou-se outro princípio fundamental das redes móveis celulares: o mecanismo de *handover*. Foi feita uma descrição dos principais parâmetros envolvidos no processo de determinação e realização de um *handover*.

Finalmente foram analisados os padrões de reutilização de frequências normalmente utilizados no planeamento celular, bem como algumas técnicas básicas de redimensionamento da arquitectura implementada como forma de aumentar a capacidade instalada e escoar o tráfego oferecido.

Até aqui considerou-se sempre a arquitectura de uma rede móvel celular como sendo composta por uma única camada. No capítulo 6 é apresentada uma nova forma de organização da arquitectura de uma rede móvel celular. A organização em estrutura hierárquica.

## **3. PROPAGAÇÃO EM SISTEMAS DE RÁDIO MÓVEL CELULAR**

### **3.1 Introdução**

Todo o processo de planeamento de uma rede móvel celular passa por um estudo pormenorizado das características de propagação das ondas de rádio no meio específico onde a rede é implementada.

O processo de planeamento celular envolve basicamente a determinação do local de implantação das estações base que estabelecem a comunicação via rádio com os terminais móveis. Neste processo é fundamental estimar a área geográfica coberta por cada estação base, ou seja, a área da célula que lhe fica associada. Para tal, é feito um estudo preliminar da área que se pretende cobrir em função dos objectivos pretendidos com a sua introdução na rede: expansão/melhoramento de cobertura ou aumento de capacidade da rede na região.

Importa aqui salientar que a área de dominância de uma estação base corresponde ao lugar geométrico dos pontos onde o nível médio do sinal rádio emitido pela sua estação base é superior ao nível médio do sinal rádio emitido pelas estações base que lhe são vizinhas. Sendo assim, depreende-se que a área de cobertura de uma célula é normalmente superior à sua área de dominância. Apenas em situações especiais de células isoladas é que a área de cobertura iguala a área de dominância. No entanto, na prática verifica-se que a área coberta por cada nova célula é superior à área inicialmente planeada, o que normalmente acarreta problemas de interferências. Isto porque em sistemas baseados na propagação de energia electromagnética torna-se difícil confinar a energia que é radiada para o meio.

Por outro lado as redes móveis celulares caracterizam-se fundamentalmente pela reutilização de frequências a partir de um padrão de reutilização imposto por uma distância de reutilização mínima. Sendo assim, a fim de se limitar a interferência

resultante desta reutilização, torna-se necessário confinar o mais possível a cobertura da nova célula à área inicialmente planeada.

Os parâmetros que podem ser controlados no projecto de uma nova estação base, tendo em vista adequar o mais possível a sua cobertura com aquilo que é planeado são os seguintes:

- **Altitude (cota) do local onde a estação base é implantada.** Este é um parâmetro fundamental na definição do seu local de instalação, uma vez que a altura efectiva da estação (definida a partir da sua cota) tem um peso muito significativo na definição da sua área de cobertura.
- **Altura da torre que suporta o sistema de antenas.** Normalmente a altura da torre é definida a partir da necessidade de se ultrapassar obstáculos envolventes tais como edifícios ou árvores. Tem um peso muito pouco significativo no valor da altura efectiva da estação quanto o terreno é muito acidentado (região montanhosa por exemplo).
- **Sistema de antenas (omnidireccionais ou directivas).** O sistema de antenas a escolher está normalmente relacionado com o tipo de ambiente a que se destina a estação e com o objectivo pretendido com a sua implantação na rede: cobertura ou capacidade. Normalmente as antenas omnidireccionais são utilizadas numa fase de arranque da rede, quando a densidade de estações ainda é relativamente baixa. Nesta fase pretende-se maximizar a área de cobertura de cada estação por forma a reduzir os custos inerentes à sua implementação, e uma vez que o tráfego gerado é ainda reduzido dada a pouca penetração do serviço. Por exemplo, em ambientes rurais caracterizados pela pouca penetração do serviço e por uma densidade reduzida de estações, são normalmente utilizadas antenas omnidireccionais. Quando o grau de evolução da rede em termos de tráfego gerado aumenta, torna-se necessário confinar melhor o sinal emitido. Nesta fase são normalmente utilizadas antenas directivas por forma a limitar a interferência resultante da maior concentração de estações. Ao contrário, em ambientes urbanos caracterizados pela grande densidade de tráfego gerado, normalmente são utilizadas células sectorizadas que necessitam de sistemas de antenas directivas.

- Abertura do feixe principal (largura de feixe a 3 dB) no plano vertical de radiação. Está relacionado directamente com aquilo que se pretende cobrir. Por exemplo, uma estrada necessita apenas de antenas com uma pequena abertura vertical no seu diagrama de radiação. Uma pequena localidade situada num vale já irá necessitar de sistemas de antenas com uma grande abertura no seu feixe principal de radiação no plano vertical.
- Abertura do feixe horizontal (largura de feixe a 3 dB) no plano horizontal de radiação (para as antenas directivas).
- Inclinação do feixe principal no plano vertical de radiação. Está relacionado com a necessidade de se confinar melhor o sinal emitido à medida que a rede evolui e são introduzidas novas estações.
- Escolha de antenas com atenuações adequadas para os lobos secundários e com uma boa relação frente-costas. O que se disse acima aplica-se neste caso.
- Ganho do sistema de antenas.
- Potência à saída dos amplificadores da estação base.

Devido ao carácter destrutivo do meio onde se dá a propagação das ondas electromagnéticas (canal de propagação rádio) este mecanismo de propagação assume um comportamento perfeitamente aleatório, impossível de se descrever através de expressões matemáticas bem definidas.

Na caracterização deste mecanismo de propagação, o processo normalmente seguido é a sua estimação por meio de distribuições estatísticas, através da média e da variância. Para tal, são utilizados modelos de propagação que procuram estimar o valor médio para a atenuação causada pelo meio de propagação no sinal radiado (*path loss* -  $L_p$ ). A variância é considerada através da introdução de diferentes margens de desvanecimento (*fading margins*), consoante o ambiente que é considerado [RAP, FAR, MEH, LEE, APIS, ERI].

Nas secções seguintes é feita uma descrição da forma como os diferentes ambientes e modelos de propagação podem ser classificados, bem como são apresentados de uma forma resumida alguns modelos de propagação normalmente utilizados no

planeamento celular. Na secção 2 são apresentados os diferentes tipos de estações base existentes na arquitectura duma rede móvel celular. Na secção 3 é feita uma análise dos diferentes tipos de ambiente onde se dá a propagação do sinal rádio, bem como dos fenómenos que influenciam esta propagação. Na secção 4 é apresentada a metodologia normalmente seguida no projecto de uma estação base, bem como são analisados os modelos de propagação normalmente utilizados no planeamento celular. Na secção 5 são apresentadas as conclusões.

### **3.2 Classificação das estações base da arquitectura de uma rede móvel celular**

Na arquitectura de uma rede móvel celular normalmente são considerados três tipos de estações: macrocelulares, microcelulares e picocelulares [RAP, APIS, ERI].

As estações macrocelulares são utilizadas quer em ambientes urbanos quer em ambientes rurais. Em ambientes rurais normalmente estão associadas à células com diâmetros da ordem dos 5 a 20Km e com potências de emissão da ordem dos 10 a 20W. Os sistemas de antenas são normalmente suportados no topo de torres com alturas compreendidas entre os 20 e 50m. Em ambientes urbanos estão associadas à células com diâmetros da ordem dos 2 a 5Km. Neste tipo de ambiente normalmente os sistemas de antenas encontram-se à uma altura situada acima da linha dos edifícios e a potência de emissão é da ordem dos 5 a 10W.

As estações microcelulares são utilizadas em ambientes urbanos (geradores de grande densidade de tráfego) ou na cobertura de espaços interiores. Em espaços exteriores, estão associadas à células com dimensões da ordem das poucas centenas de metros (o diâmetro da área de cobertura pode ir dos 100 aos 500 metros). Caracterizam-se ainda pelo facto de normalmente estarem em linha de vista (*line of sight* - LOS) com os terminais. Normalmente os sistemas de antenas são montados nas paredes dos edifícios (ao nível do primeiro ou segundo pisos) ou nos postes de iluminação pública. Tipicamente uma microcélula corresponde à área delimitada pelo cruzamento de duas ruas ou ainda uma praça por exemplo. A potência de emissão está normalmente compreendida entre os 1 a 2W. Em ambientes interiores correspondem à área

delimitada por um piso de um centro comercial por exemplo. Nesta situação a sua potência de emissão normalmente é da ordem dos 500mW a 1W.

As estações picocelulares são utilizadas na cobertura de compartimentos fechados tais como salas ou corredores em edifícios de escritórios por exemplo. Também podem ser utilizadas em projectos de cobertura de espaços interiores de reduzidas dimensões. As dimensões das picocélulas situam-se na ordem das dezenas de metros (10 a 100m) enquanto as estações picocelulares caracterizam-se por potências de emissão da ordem dos 100 a 500mW. A tabela 3.2 resume as ideias apresentadas acima:

<i>Estação</i>	<i>Diâmetro da célula</i>	<i>Potência de emissão</i>
Macro célula (rural)	5 – 20Km	10 – 20W
Macro célula (urbano)	2 – 5Km	5 – 10W
Micro célula (exteriores)	100 - 500m	1 – 2W
Micro células (interiores)	-	500mW – 1W
Picocélula	-	100 – 500mW

*Tabela 3.1 – Diferentes tipos de estações base utilizadas na arquitectura de uma rede móvel celular.*

### 3.3 Diferentes cenários para o rádio móvel terrestre

Antes de se proceder à descrição dos modelos de propagação vulgarmente utilizados no planeamento celular, faz sentido começar por identificar os diferentes tipos de ambientes de propagação do sinal rádio, bem como listar as suas propriedades básicas que influenciam o comportamento do sinal propagado.

Teoricamente a área de cobertura de cada estação base teria a forma de um círculo com o diâmetro  $D$ , caso fossem satisfeitas as condições seguintes:

- Utilização de antenas omnidireccionais.
- Superfície perfeitamente condutora (não haveriam reflexões no solo).

- Superfície perfeitamente plana, sem obstruções ou rugosidades (não haveriam mecanismos de difracção e dispersão).
- Existência de linha de vista (LOS) entre o sistema de antenas da estação base e o móvel.
- Na prática, a cobertura estabelecida por uma estação base não apresenta um aspecto regular como o imposto por este modelo. No entanto, interessa considerar este caso ideal como ponto de partida na derivação de modelos para estimação da atenuação por propagação no meio (*path loss* -  $L_p$ ).

Para as condições referenciadas acima, a propagação pode ser considerada como sendo em meio livre. Sendo assim, o *path loss* (que representa a diferença em dB entre a potência efectivamente radiada pela estação base e recebida pelo móvel) é dado por:

$$L_p = 10 \log \left[ \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \right] \tag{1}$$

Considera-se que as antenas quer da estação base quer do móvel são isotrópicas. Daí não se ter entrado com o valor do seu ganho. Aplicando logaritmos obtém-se:

$$L_p = 32.44 + 20 \log(f) + 20 \log(d) \tag{2}$$

Esta equação pode ser representada genericamente pela equação seguinte:

$$L_p = L_0 + 10n \log(d) \text{ (dB)} \tag{3}$$

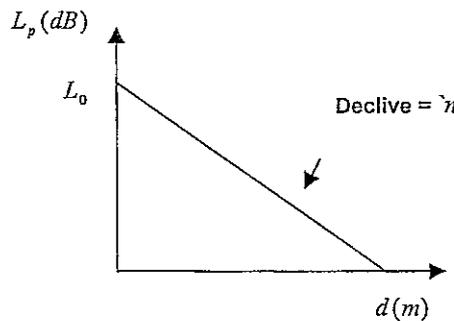


Figura 3.1 –Atenuação do sinal (em dB) para a propagação em meio livre.

Que corresponde à equação de uma recta com  $L_0$  sendo a abcissa na origem e  $n = 2$  o seu declive.  $n$  é o coeficiente de atenuação do meio, que em espaço livre é igual a 2.

Conclui-se assim que a atenuação do sinal (em dB) por propagação em meio livre (existe linha de vista entre a estação base e o móvel) pode ser expressa por uma recta com declive igual a 2, conforme ilustrado na figura 3.1. Caracteriza-se por um decaimento de 20dB/década.

No entanto, as condições ideais de propagação apresentadas não se verificam na prática. Normalmente a área de cobertura de cada estação base está directamente dependente de um conjunto de factores relacionados com a topografia e a morfologia do terreno que se pretende cobrir [RAP, FAR, MEH, LEE, APIS, ERI]:

- A topografia envolve todos os aspectos relacionados com as irregularidades do solo (obstáculos, rugosidade, conductividade, vegetação, existência de áreas cobertas por água).
- A morfologia tem a ver com o tipo de ambiente de propagação considerado (áreas urbanas densas ou pouco densas, áreas suburbanas, áreas abertas e ainda a questão da propagação e da penetração em edifícios).
- A seguir é feita uma análise dos parâmetros que estão relacionados com a topografia e a morfologia do terreno, bem como uma introdução aos modelos de propagação normalmente utilizados no planeamento celular.

### **3.3.1 Diferentes mecanismos de propagação: reflexão, difracção e dispersão**

As ondas electromagnéticas são caracterizadas por três fenómenos distintos de propagação: a reflexão, a difracção e a dispersão [RAP, MEH].

- O fenómeno da reflexão das ondas electromagnéticas ocorre quando encontram no seu percurso de propagação um ou mais obstáculos cujas dimensões são muito maiores quando comparadas com o seu comprimento de onda. Como exemplos de fenómenos de reflexão temos a reflexão das ondas electromagnéticas nas paredes dos edifícios e na superfície terrestre.
- O fenómeno da difracção das ondas electromagnéticas ocorre sempre que no percurso de propagação entre o emissor e o receptor se encontra um obstáculo impenetrável de dimensões muito superiores às do comprimento de onda. Estes

obstáculos normalmente apresentam arestas ou irregularidades acentuadas. A difracção das ondas electromagnéticas resulta num encurvamento do feixe de ondas que atinge o receptor mesmo quando não existe linha de vista com o emissor. Como exemplo típico temos a propagação em ambientes urbanos quando não existe linha de vista.

- O fenómeno da dispersão das ondas electromagnéticas ocorre sempre que o meio no qual se dá a propagação se encontra preenchido por objectos cujas dimensões são comparáveis às do comprimento de onda. A dispersão resulta num espalhamento do feixe de ondas electromagnéticas em todas as direcções a partir do obstáculo. Como exemplos de obstáculos geradores de ondas dispersas temos: a rugosidade da superfície terrestre, a vegetação, sinais de trânsito nas cidades e ainda as lâmpadas dos postes de iluminação pública.

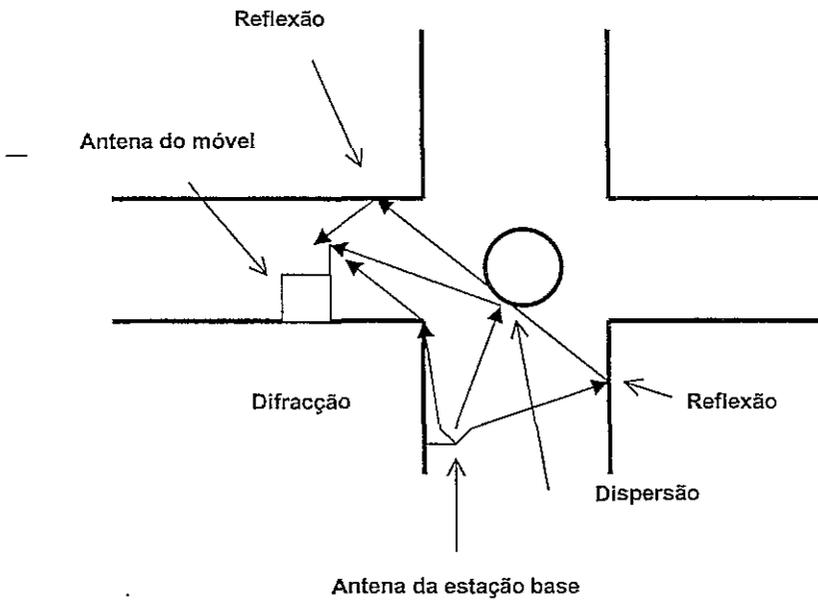


Figura 3.2 - Diferentes mecanismos de propagação.

A figura 3.2 ilustra os três mecanismos de propagação descritos acima. Nela está ilustrado um ambiente urbano de propagação entre a antena de uma estação microcelular e um móvel.

Apesar de a propagação não se dar em linha de vista, as componentes de onda atingem a antena do móvel devido às reflexões, difracções e dispersões nos obstáculos existentes no local. Estas componentes sobrepõem-se na antena do móvel. Esta

sobreposição pode ser positiva, através da sua soma (associada a um ganho) ou negativa, através da sua subtração (associada a uma perda).

De uma forma geral, como resultado directo da existência da reflexão, difracção e dispersão de ondas electromagnéticas, o sinal que atinge a antena da estação receptora resulta da sobreposição de todas as componentes que sofreram alguma alteração no seu percurso de propagação, com a componente directa que não sofre nenhuma alteração no seu percurso. O peso das componentes indirecta e da componente directa no resultado final tem a ver com o ambiente específico em que se dá a propagação. Assim, quando existe linha de vista entre o emissor e o receptor, a componente directa (considerada como sendo propagada em espaço livre) tem um peso determinante no sinal resultante. Quando por sua vez não existe linha de vista entre o emissor e o receptor, é a componente indirecta que predomina no resultado final (caso prático ilustrado na figura 3.1).

Como resultado deste processo complexo de propagação, resulta que a variação do nível do sinal recebido com a distância à estação base apresenta um comportamento perfeitamente aleatório com variações bruscas de sinal e com máximos e mínimos separados entre si por alguns comprimentos de onda. O processo de variação do nível de sinal recebido com a distância à estação base apresenta três escalas diferentes de variação no tempo (ou no espaço, uma vez que o móvel está a deslocar-se) [RAP, FAR, MEH, LEE]:

- O sinal apresenta oscilações muito rápidas, com nulos que podem ser bastante profundos (30 ou 40dB), espaçados tipicamente de meio comprimento de onda. Este comportamento é originado pela sobreposição das várias componentes do sinal no receptor, com amplitudes que podem ser da mesma ordem de grandeza e fases que se distribuem aleatoriamente no intervalo  $[0, 2\pi]$ . Esta sobreposição pode ser construtiva ou destrutiva (desvanecimento do sinal). Devido ao facto de o comportamento aleatório do sinal resultante aproximar-se de uma distribuição de *Rayleigh*, chama-se a este efeito *desvanecimento por Rayleigh*, efeito de multipercurso (*multipath*) ou ainda desvanecimento rápido (*fast fading*).
- As oscilações rápidas aparecem sobrepostas à uma flutuação mais lenta que o nível médio do sinal exhibe. O comprimento característico desta flutuação é da ordem das

dezenas de comprimentos de onda e tem origem na alteração das características globais do perfil entre antenas à medida que o móvel se desloca. Está pois relacionada directamente com as reflexões e ou difracções por obstáculos que se encontram no percurso de propagação entre o emissor e o receptor. Devido ao facto de o comportamento do sinal se assemelhar à uma distribuição normal, este efeito é conhecido por *desvanecimento do tipo normal*, efeito de sombra ou ainda desvanecimento lento (*slow fading*).

- Finalmente existe uma terceira escala de variação do sinal. Neste caso, esta é uma variação ainda mais lenta que a anterior, mas que é monotónica com a distância. Tem origem na dependência da amplitude do campo eléctrico com uma potência inversa da distância do móvel à estação base. O valor desta potência varia conforme o ambiente em que se está a dar a propagação. Por exemplo, conforme visto atrás, para a propagação em meio livre esta potência é igual a 2.

Ou seja, para além da dependência com uma potência inversa da distância, estão em jogo efeitos de sombra originados pelos obstáculos existentes no meio de propagação (edifícios, vegetação, etc.), bem como efeitos de multipercurso.

Verifica-se assim que esta variação do sinal com a distância está intrinsecamente relacionada com a topografia e morfologia do meio onde se dá a propagação.

### 3.3.1.1 Aspectos relacionados com a topografia

Existe um conjunto de parâmetros que são utilizados como descritores do tipo de terreno em que se pretende estimar a cobertura de uma estação base. De uma forma geral, considera-se uma dada área de cobertura como geograficamente plana. Nos casos em que tal não pode ser assumido, estes parâmetros funcionam como factores de correcção aos modelos normalmente utilizados. Estes parâmetros normalmente procuram contabilizar os seguintes aspectos relacionados com a topografia do terreno onde se dá a propagação: ondulação do terreno, atenuação causada por obstáculos do tipo lâmina, grau de declive do terreno, atenuação causada pela propagação em ambientes mistos tais como a água e a terra e ainda o grau de rugosidade do terreno [RAP, APIS, ERI].

### 3.3.1.2 Aspectos relacionados com o ambiente de propagação (morfologia)

Torna-se assim indispensável proceder a uma classificação dos vários tipos de ambientes de propagação quanto à sua morfologia. Deste modo, conseguem-se aplicar factores de correcção para o tipo de ambiente em que se dá a propagação. No entanto é virtualmente impossível classificar com detalhe todos os tipos de ambiente possíveis, uma vez que cada um tem a sua peculiaridade própria.

Os vários tipos de ambiente existentes são normalmente classificados em função dos valores assumidos pelos seguintes parâmetros: ondulação do terreno, densidade da vegetação existente no local, densidade e altura dos edifícios, existência de áreas abertas e ainda existência de áreas aquáticas. Outros parâmetros que normalmente são considerados na classificação dos diferentes tipos de ambientes são os seguintes: factor de ocupação do terreno e factor de urbanização.

A classificação para os vários tipos de ambientes de propagação existentes é a seguinte:

- Rural (áreas abertas) - tipo de ambiente caracterizado por alguns obstáculos tais como árvores e edifícios rústicos de poucos pisos, fazendas ou campos abertos.
- Áreas “quasi” abertas - tipo de ambiente associado à densidade urbanística de uma pequena vila do meio rural.
- Suburbano - tipo de ambiente caracterizado por casas, edifícios pequenos e árvores, ou estradas rodeadas por casas e árvores.
- Urbano - tipo de ambiente caracterizado por alguma concentração de casas ou edifícios de vários pisos, característico de uma cidade média.
- Urbano Denso - tipo de ambiente caracterizado por uma elevada densidade de casas ou edifícios de muitos pisos.

Cada tipo de ambiente está associado a um factor de correcção aplicado aos modelos de propagação normalmente utilizados na estimação da cobertura de uma estação base [RAP, LEE, APIS].

### 3.4 Metodologia a seguir no projecto de uma estação base

O planeamento da arquitectura de uma rede móvel envolve a estimação teórica da cobertura imposta por cada estação base. Para tal recorre-se à utilização dos chamados modelos de propagação que procuram estimar com alguma precisão a variação do nível de sinal recebido com a distância à estação base. Existem dois tipos de modelos que podem ser considerados nesta estimação: modelos determinísticos e modelos empíricos [RAP, MEH, LEE, APIS].

Os modelos determinísticos apresentam resultados satisfatórios apenas num número restrito de cenários, em que a geometria e a realidade electromagnética do cenário possam ser descritas numericamente com algum pormenor. Na maior parte dos casos não existe essa descrição e está fora de causa confeccionar uma base de dados para cada cenário novo que se analise. Por outro lado, o modelo determinístico não permite contabilizar a variabilidade do sinal. Os modelos comumente utilizados no planeamento celular são modelos empíricos, baseados num tratamento estatístico dos resultados de medições prévias do sinal recebido, para vários tipos de cenários. Estes modelos, sendo construídos sobre medidas reais, permitem abordar cenários mais complexos, pois contém em si a influência de todos os parâmetros (tanto os conhecidos como os desconhecidos). No entanto, somente é possível obter a informação da cobertura por áreas globais, perdendo-se a possibilidade de obter informação acerca do nível de cobertura para um local exacto. Por outro lado, a cobertura é estimada a partir de resultados experimentais obtidos em locais com realidades diferentes da zona em questão, sendo que nem sempre os factores correctivos empíricos que são utilizados para ultrapassar estas discrepâncias resolvem o problema [RAP, APIS].

#### 3.4.1 Modelos de propagação comumente utilizados no planeamento celular

A seguir são apresentados dois exemplos de modelos comumente utilizados no planeamento celular. Um modelo empírico vulgarmente utilizado e denominado modelo de *Okumura-Hata* e um modelo determinístico menos utilizado que o anterior e denominado modelo de *Walfish-Ikegami* ou COST 231.

Foram desenvolvidas várias ferramentas computacionais para o planeamento celular que implementam estes dois modelos de propagação, tornando mais simples esta tarefa, uma vez que permitem a estimação aproximada da área de cobertura de uma estação base, bem como a sua optimização através da variação dos seus parâmetros e visualização quase imediata dos resultados produzidos.

A aplicabilidade destes modelos, bem como a sua precisão, dependem do tipo de ambiente que se pretende analisar. Por exemplo, uma vez que o modelo de *Okumura-Hata* baseia-se em medições experimentais realizadas na região metropolitana de Tokyo [RAP, LEE, APIS], não poderá originar resultados muito precisos quando aplicado por exemplo ao tipo de relevo característico de cidades como Porto ou Lisboa. Para estes casos deverão ser utilizados factores de correcção do modelo original e ainda deverá ser feita uma aferição do mesmo, através de medições experimentais no terreno.

De uma forma genérica, normalmente o modelo de Okumura oferece resultados bastante aceitáveis quando aplicado a ambientes de propagação do tipo *urbano* ou *suburbano*. Por sua vez o modelo de *Walfish-Ikegami* é normalmente aplicado a ambientes com uma densidade urbana considerável como são os casos de Lisboa e Porto [RAP, LEE, APIS].

O modelo de *Okumura-Hata* é um exemplo de um modelo empírico, enquanto que o modelo de *Walfish-Ikegami* é um exemplo de um modelo determinístico.

#### 3.4.1.1 Modelo de Okumura-Hata

O modelo de *Okumura-Hata* é um modelo empírico que fornece o valor médio da intensidade do campo eléctrico da onda electromagnética propagada. Este valor depende dos parâmetros seguintes:

- Frequência ( $f$ ).
- Distância do terminal à estação base ( $d$ ).
- Alturas das antenas das estações base e do terminal ( $h_b, h_m$ ).
- Tipo de ambiente em que o terminal se desloca.
- Características do terreno entre o terminal e a estação base.

*Okumura* realizou uma série de medições na área metropolitana de Tokyo (ambiente urbano, sobre terreno quase plano). Os resultados destas medições são apresentados por *Okumura* sob a forma de curvas. *Hata* desenvolveu expressões analíticas que aproximam os resultados pressupostos nas curvas de *Okumura*.

A equação geral do modelo de *Okumura-Hata* que dá a atenuação do sinal emitido por uma estação base no meio de propagação com a distância (*path loss*) e tendo como base um ambiente do tipo urbano é a seguinte:

$$L_p(\text{dB}) = C_1 + C_2 \log(f) - 13.82 \log(h_b) - a(h_m) + [44.9 - 6.55 \log(h_b)] \log(d) + C_0 \quad (4)$$

em que:

- $L_p$  é a atenuação em dB.
- $f$  é a frequência em MHz.
- $d$  é a distância entre a estação base e o móvel em quilómetros ( $1\text{km} < d < 20\text{km}$ ).
- $h_b$  é a altura efectiva do sistema de antenas da estação base em metros ( $30\text{m} < h_b < 300\text{m}$ ).
- $h_m$  é a altura a que se encontra o móvel ( $1\text{m} < h_m < 10\text{m}$ ).
- $C_1 = 69,5$  para  $150\text{MHz} \leq f \leq 1000\text{MHz}$ .
- $C_1 = 46,3$  para  $1500\text{MHz} \leq f \leq 2000\text{MHz}$ .
- $C_2 = 26,16$  para  $150\text{MHz} \leq f \leq 1000\text{MHz}$ .
- $C_2 = 33,9$  para  $1500\text{MHz} \leq f \leq 2000\text{MHz}$ .
- $C_0 = 0$  para ambiente urbano.
- $C_0 = 3$  dB para ambiente densamente urbano.
- $a(h_m) = \{1.1 \log(f) - 0.7\} h_m - \{1.56 \log(f) - 0.8\}$  para ambientes urbanos.
- $a(h_m) = 3.2 [\log\{11.75 h_m\}]^2 - 4.97$  para ambientes do tipo urbano denso.

A equação (4) pode ainda ser expressa da seguinte forma:

$$L_p(dB) = L_0(dB) + [44.9 - 6.55 \log(h_b)] \log(d) \quad (5)$$

ou ainda por:

$$L_p(dB) = L_0(dB) + 10n \log(d) \quad (6)$$

Esta é a equação de uma recta em que:

$$L_0(dB) = C_1 + C_2 \log(f) - 13.82 \log(h_b) - a(h_m) \quad (7)$$

corresponde a ordenada na origem e onde:

$$n = [44.9 - 6.55 \log(h_b)] / 10 \quad (8)$$

corresponde ao declive da curva de atenuação.

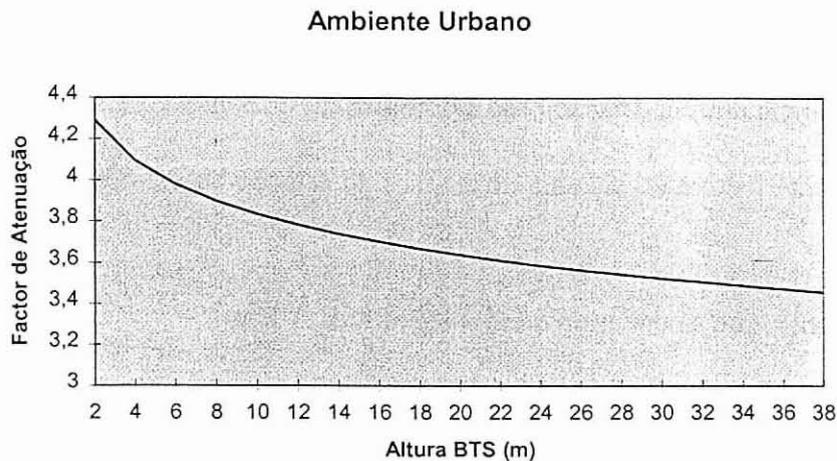


Figura 3.3 – Variação do coeficiente de atenuação com a altura do sistema de antenas.

O gráfico da figura 3.3 ilustra a variação do coeficiente de atenuação  $n$  com a altura do sistema de antenas da estação base em metros. Como se pode observar, para os valores normalmente utilizados como altura das antenas da estação base, o coeficiente de atenuação varia entre os valores 3,5 e 4.

Da equação (6) também se pode concluir que o modelo de *Okumura-Hata* apresenta um comportamento linear como função da distância do móvel à estação base. Para um factor  $L_0(f, h_b, h_m)$  que assume um valor fixo, temos que o factor de atenuação do meio (*path loss*) é directamente proporcional a  $10n \log(d)$

Finalmente, para os ambientes de propagação do tipo *suburbano* ou *rural*, as expressões da atenuação (*path loss*) são baseadas no modelo urbano original e são dadas por:

$$L_p(\textit{suburbano}) = L_p(\textit{urbano}) - 2[\log(f / 28)]^2 - 5.4 \quad (9)$$

$$L_p(\textit{rural}) = L_p(\textit{urbano}) - 4.78[\log(f)]^2 + 18.33\log(f) - 40.94 \quad (10)$$

### 3.4.1.2 Modelo de Walfish-Ikegami

O modelo de *Walfish-Ikegami* é normalmente utilizado no planeamento celular de regiões com grande densidade urbana. Este é um modelo determinístico que se baseia nos seguintes parâmetros de entrada (ver figura 3.4): densidade espacial e altura média dos edifícios e a largura média das ruas. O modelo considera duas situações distintas: as antenas da estação base estão situadas acima da linha de altura média dos edifícios (ambiente macrocelular), e ainda o caso em que as antenas da estação base estão situadas abaixo da linha de altura média dos edifícios (ambiente microcelular).

Para os casos em que existe linha de vista entre a estação base e o móvel, a atenuação (*path loss*) é dada pela expressão analítica seguinte:

$$L_p(LOS) = 42,6 + 20\log(f) + 26\log(d) \quad (11)$$

Esta é a equação de uma recta, em que a abcissa na origem  $L_0$  e o coeficiente de atenuação  $n$  são dados por:

$$\begin{aligned} L_0 &= 42.6 + 20\log(f) \\ n &= 2.6 \end{aligned} \quad (12)$$

Para os casos em que não existe linha de vista entre a estação base e o móvel, a atenuação (*path loss*) é dada pela expressão analítica seguinte:

$$L_p(NLOS) = 32.4 + 20\log(f) + 20\log(d) + L(\textit{diff}) + L(\textit{mult}) \quad (13)$$

onde  $L(\textit{diff})$  representa o factor de perdas por difracção nos telhados dos edifícios e  $L(\textit{mult})$  representa as perdas por difracções múltiplas devido aos edifícios envolventes:

$$L(\textit{diff}) = -16.9 - 10\log(\Delta W) + 10\log(f) + 20\log(\Delta h_m) + L(0) \quad (14)$$

em que:

- $\Delta W$  é a distância do móvel ao edifício onde o sinal é difractado:  $\Delta h_m = h_{telhado} - h_m$
- $L(0)$  é o factor de perdas associado ao ângulo de elevação.
- $L(mult) = k_0 + k_a + k_d \log(d) + k_f \log(f) - 9 \log(W)$  (15)

em que:

- $k_0 = -18 \log(1 + \Delta h_b)$
- $k_a = -54 - 0.8(\Delta h_b)$  para  $d \geq 0,5 \text{ km}$
- $k_a = 54 - 0.8(\Delta h_b)$  para  $d \leq 0,5 \text{ km}$
- $k_d = 18 - 15(\Delta h_b / h_{telhado})$
- $k_f = -4 + 0.7[(f / 925) - 1]$  para ambientes suburbanos
- $k_f = -4 + 1.5[(f / 925) - 1]$  para ambientes urbanos
- $W$  é a largura da rua onde se encontra o móvel.
- $h_b$  é a altura da antena do móvel.
- $h_{telhado}$  é a altura média dos edifícios vizinhos com altura inferior à altura das antenas da estação base (ver figura).
- $\Delta h_b = h_b - h_{telhado}$ .

Isto é ilustrado na figura 3.4.

Normalmente o modelo de *Walfish-Ikegami* é utilizado no planeamento celular de regiões de grande densidade urbana, onde a altura do sistema de antenas da estação base é inferior à altura média dos edifícios mais altos, mas é superior à altura média dos edifícios mais baixos.

Combinando as equações (11), (12) e (13) obtemos:

$$L_p(NLOS) = L_0 + (20 + k_d) \log(d) = L_0 + 10 \log(d) \quad (16)$$

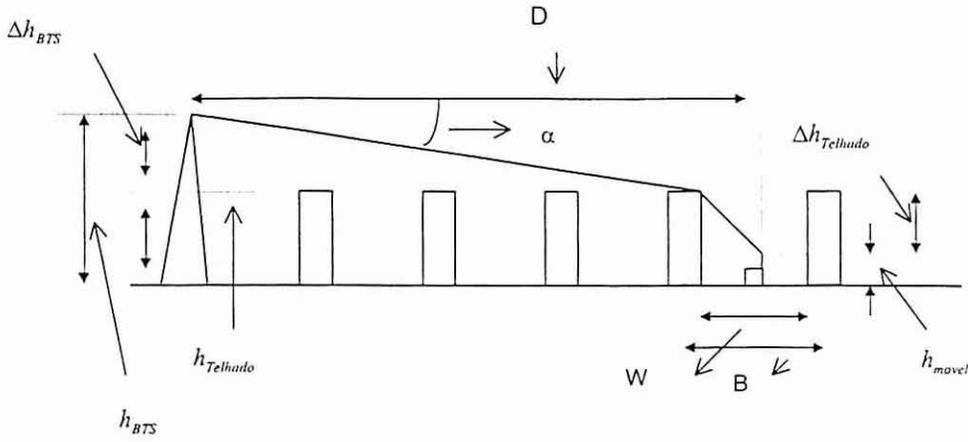


Figura 3.4 - Modelo de propagação em ambientes urbanos.

em que:

$$L_0 = 32.4 + (30 + k_f) \log(f) - 16.9 - 10 \log(w) + 20 \log(\Delta h_m) + L(0) + k_0 + k_a - 9 \log(w) \quad (17)$$

$$n = (20 + k_d) / 10 \quad (18)$$

respectivamente a ordenada na origem e o declive da equação de uma recta. Mais uma vez, o comportamento da atenuação do sinal emitido pela estação base segue a equação de uma recta.

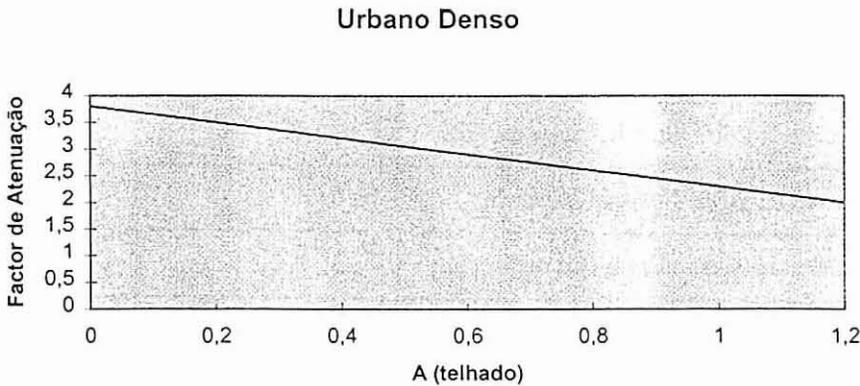


Figura 3.5 – Variação do coeficiente de atenuação com a altura dos edifícios.

O coeficiente de atenuação  $n$  depende da constante de difracção  $k_d$ , que por sua vez depende da altura dos edifícios vizinhos ao ponto considerado, logo varia conforme o ambiente urbano considerado. Tipicamente o coeficiente de atenuação varia entre 2 e 3,8, conforme indicado no gráfico da figura 3.5 [FAR].

### 3.4.2 Variação logarítmica da atenuação do sinal com a distância

Ambos os modelos analisados atrás levam à conclusão de que a potência média do sinal emitido por uma estação base decresce logaritmicamente com a distância. De recordar que já se tinha verificado que o valor médio do sinal emitido por uma estação base apresentava um decaimento que seguia uma distribuição logarítmica com a distância à estação base.

Deste modo vem para a atenuação do sinal no meio (*path loss*):

$$L_p(d) \propto (d)^n \quad (19)$$

Passando à escala logarítmica:

$$L_p(\text{dB}) = L_0 + 10n \log(d) \quad (20)$$

Em que  $n$  é o coeficiente de atenuação do meio e  $L_0$  é a ordenada na origem e correspondem como já se viu a equação de uma recta.

<i>Ambiente</i>	<i>Coefficiente de Atenuação</i>
Espaço Livre	2
Área Urbana	2,7 a 3,5
Área Urbana sem Linha de Vista	3 a 5
Interiores de Edifícios com Linha de Vista	1,6 a 1,8
Interiores de Edifícios com Obstrução	4 a 6
Interiores de Fábricas com Obstrução	2 a 3

Tabela 3.2 – Valores do coeficiente de atenuação com o tipo de ambiente de propagação considerado.

A tabela 3.2 apresenta valores possíveis do coeficiente de atenuação para diferentes tipos de ambientes.

O valor da atenuação por propagação no meio,  $L_p$  considerado anteriormente corresponde a um valor médio do sinal recebido pelo terminal. No entanto, conforme já

foi visto anteriormente, o sinal recebido varia aleatoriamente no tempo e no espaço, segundo uma distribuição normal com o desvio padrão  $\sigma$ . Ou seja [RAP]:

$$L_p(dB) = L_0 + 10\log(d) + X_\sigma \quad (21)$$

onde  $X_\sigma$  representa uma distribuição normal com o desvio padrão  $\sigma$ .

Ou seja, o nível do sinal emitido por uma estação base e recebido por um terminal num dado ponto à distância  $d$  daquela estação segue uma distribuição normal no tempo e no espaço. No entanto, para efeitos de análise da cobertura, só se consideram variações espaciais do nível do sinal. Medições efectuadas em ambientes tipo conduziram a estimativas do desvio padrão conforme apresentadas na tabela 3.3 [RAP]:

<i>Tipo de Ambiente</i>	<i>Desvio Padrão (dB)</i>
Urbano Denso	10
Urbano	8
Suburbano	6
Rural	6

Tabela 3.3 – Estimativas do desvio-padrão para o tipo de ambiente considerado.

### 3.5 Conclusões

Neste capítulo foi feito um estudo do mecanismo de propagação das ondas de rádio em sistemas de rádio móvel celular. Foram também analisados alguns modelos de propagação do sinal normalmente utilizados neste planeamento. Nomeadamente foram apresentados os modelos de *Okumura-Hata* e de *Walfish-Ikegami*.

Estes modelos encontram-se implementados como ferramentas computacionais que facilitam o planeamento celular, na medida em que permitem estimar com alguma precisão a cobertura de cada estação e a optimização das mesmas.

Importa salientar que não foram analisados os efeitos resultantes do processo de desvanecimento rápido do sinal (*fast fading*). Conforme foi salientado, as componentes resultantes dos processos de reflexão, difração e dispersão do sinal estão na origem do

efeito de desvanecimento rápido do sinal. No entanto, para as taxas de transmissão utilizadas e para as velocidades de deslocamento dos terminais móveis o efeito de desvanecimento rápido pode ser desprezado, uma vez que é compensado pelos equalizadores implementados. Numa primeira abordagem, devido ao seu carácter menos genérico e de menor peso no planeamento celular o desvanecimento rápido do sinal não será aqui considerado.

A estimação da área de cobertura e dominância de uma estação base é um aspecto fundamental a ter em conta no planeamento celular, uma vez que é partir daí que podem ser implementados os padrões de reutilização de frequências e estimados os factores de interferência co-canal e por canal adjacente da rede. Estes são os aspectos fundamentais a ter em conta no planeamento da interface rádio de uma rede móvel celular conforme se verá nos capítulos a seguir.

## 4. GESTÃO DO TRÁFEGO EM REDES MÓVEIS CELULARES

### 4.1 Introdução

No capítulo 2 foram apresentados e analisados em pormenor os princípios básicos inerentes às redes móveis celulares. Neste capítulo é abordada em pormenor a questão do planeamento da sua arquitectura.

Em primeiro lugar é preciso salientar que o planeamento das redes móveis celulares envolve duas componentes distintas da sua arquitectura de rede: a componente fixa e a componente rádio. Importa ainda realçar que neste trabalho apenas é abordado o planeamento da componente rádio da rede. Para uma arquitectura de rede celular que implementa o sistema GSM a componente rádio envolve, como se viu no capítulo 2, a interface rádio entre as estações base (BTSs) e os terminais móveis (MSs), designada por interface  $U_m$ .

Nos últimos anos tem-se assistido numa forma geral a um aumento explosivo no tráfego oferecido às redes móveis celulares de operadores espalhados pelos quatro cantos do mundo. As razões principais deste aumento são as seguintes:

- Avanços tecnológicos que permitiram o desenvolvimento e implementação de novas técnicas de processamento digital do sinal que, por sua vez, possibilitaram uma melhoria significativa na qualidade do sinal de voz transmitido.
- Os mesmos avanços tecnológicos permitiram a miniaturização dos terminais móveis com todas as vantagens em termos de comodidade e conforto.
- Crescimento no número de serviços tornados disponíveis ao assinante.
- Redução significativa das tarifas praticadas graças ao aumento da taxa de penetração do serviço e, mais uma vez, aos avanços tecnológicos que possibilitaram a redução no custo de aquisição dos terminais utilizados.

- Comodidade do seu uso. Em muitos casos os terminais estão a substituir o telefone fixo. A mobilidade adquirida da utilização do terminal móvel torna possível ter-se acesso à rede em qualquer local e por este motivo tem resultado na desistência da assinatura mensal de um telefone fixo por parte de um número cada vez maior de assinantes.

Tudo isto resultou na necessidade de se proceder a uma actualização contínua do projecto e planeamento das redes móveis celulares actuais (sistemas celulares de segunda geração). Este facto contrasta com os sistemas celulares analógicos de primeira geração.

Os sistemas celulares de primeira geração destinavam-se apenas a fornecer o serviço telefónico básico. Por outro lado os terminais utilizados eram dispendiosos e destinavam-se a ser utilizados no interior de viaturas. O tráfego gerado era desta forma invariavelmente de mobilidade, já que as chamadas eram efectuadas normalmente com as viaturas em movimento. Finalmente, devido ao facto de a taxa de penetração do serviço ser nesta altura ainda reduzida (pelo menos quando comparada com os valores actuais), o tráfego oferecido não implicava degradação do serviço prestado, dado que era invariavelmente absorvido pelos recursos disponíveis na rede (a capacidade instalada era suficiente para absorver ou escoar o tráfego oferecido).

A qualidade do serviço prestado pelas redes móveis celulares dos sistemas de primeira geração era influenciada quase exclusivamente pelo seu grau de cobertura. A falta de cobertura em muitos locais levava à impossibilidade de realização de chamadas por um lado e por outro à ocorrência de terminação forçada de chamadas que estivessem a decorrer, devido a mobilidade para regiões de sombra (de má ou nenhuma cobertura). Actualmente a cobertura já não é o factor fundamental na qualidade do serviço prestado.

Nos sistemas celulares digitais de segunda geração, o aumento explosivo do tráfego oferecido tem de ser acompanhado por um aumento da capacidade instalada na rede por forma a manter a qualidade do serviço prestado. Isto é conseguido à custa de um processo contínuo de desenvolvimento e planeamento da sua arquitectura.

A conclusão a que se chega é que as redes móveis celulares dos sistemas de segunda geração atingiram um grau de evolução tal que a qualidade do serviço prestado ao

assinante está directamente relacionada com a maior ou menor capacidade que esta tem de absorver o tráfego que lhe é oferecido, mantendo paralelamente a qualidade do processo de comunicação para cada chamada em curso. Ou seja, há que encontrar o compromisso ideal entre “capacidade e qualidade” já que ambos estão interligados entre si.

Por exemplo, para se aumentar a capacidade instalada numa rede móvel celular (e diminuir a probabilidade de bloqueio no estabelecimento de novas chamadas) o primeiro passo a dar é diminuir a área de dominância de cada célula, por forma a aumentar o número de portadoras disponíveis em cada uma. No entanto, isto é conseguido à custa de uma degradação nas relações C/I e C/A, originada por um aumento na interferência co-canal e por canal adjacente respectivamente. Se a degradação for significativa o número de chamadas que são forçadas a terminar por falha na ligação rádio (*RF losses*) aumenta, resultando numa degradação da qualidade do serviço prestado. Mesmo que a chamada não seja forçada a terminar, a qualidade audio da ligação rádio pode degradar-se a níveis que impeçam a correcta compreensão daquilo que está a ser dito.

Atendendo a tudo o que foi dito anteriormente, cada vez mais torna-se necessário o desenvolvimento de modelos de mobilidade que descrevam com uma razoável aproximação a natureza do movimento de cada assinante sob a área de cobertura da rede e de modelos de tráfego que caracterizem com uma boa precisão o processo de estabelecimento de chamadas. Estes modelos permitiriam, por uma lado, analisar o desempenho da rede, e por outro, proceder ao seu planeamento em função da satisfação dos objectivos que são propostos, em termos da manutenção da qualidade do serviço prestado ao assinante.

Conforme foi visto no capítulo 2, o grau de serviço (*grade of service* - GoS) é a figura de mérito normalmente tida em conta na análise do desempenho e projecto deste tipo de redes. Cada operador decide qual o grau de serviço permitido. Na prática, na fase de dimensionamento da rede muitos operadores admitem um máximo de 2% de chamadas bloqueadas na sua fase de estabelecimento (GoS = 2%).

Normalmente o processo de dimensionamento dos recursos rádio a atribuir a cada célula da rede baseia-se na utilização da fórmula de *Erlang B*. Através de estimativas

do tráfego oferecido a cada célula é do valor imposto para o GoS, esta fórmula determina o número de canais a atribuir a cada uma por forma a satisfazer o GoS imposto. A estimativa do tráfego que se espera venha ser oferecido a cada célula da rede é um processo fundamental no dimensionamento e planeamento da sua arquitectura. Normalmente são consideradas tabelas com a evolução do tráfego e do número de assinantes da rede nos últimos anos. Desta forma, são geradas curvas que permitem extrapolar o crescimento do número de assinantes e do tráfego a curto, médio ou longo prazo.

Quando o processo de atribuição dos recursos rádio às chamadas em fase de estabelecimento é baseado na comutação de circuitos (característica do sistema GSM cuja componente fixa da arquitectura deriva da rede PSTN analógica convencional), o desempenho da rede pode ser quantificado por meio de factores de mérito já utilizados na engenharia de tráfego das redes fixas de telecomunicações [JAB96]. Os factores de mérito que mais influenciam o grau de serviço prestado nas redes móveis celulares são os seguintes:

- $P_B$  - probabilidade de bloqueio no estabelecimento de novas chamadas devido à falta de recursos rádio para atribuição.
- $P_{fh}$  - probabilidade de ocorrência de falha num processo de *handover*. Durante o processo de comunicação o móvel pode vir a ter de realizar um ou mais *handovers* caso a chamada venha a terminar numa célula diferente daquela onde foi iniciada. Aquando da realização de um processo de *handover* para uma das células percorridas pelo móvel existe sempre uma possibilidade de não existência de recursos rádio disponíveis para atribuição. Nesta situação a chamada não pode ser continuada, sendo por isso forçada a terminar. Este parâmetro indica a probabilidade de ocorrência de bloqueio da chamada durante a realização de um *handover* tendo em conta o número de recursos rádio atribuídos a cada célula.
- $P_T$  - probabilidade de ocorrência de terminação forçada de chamadas a decorrer por falha na realização de um *handover*. Este parâmetro traduz a probabilidade de a chamada ser forçada a terminar devido a ocorrência de falha em qualquer um dos *handovers* que o móvel venha a ter de realizar até a sua finalização. O seu valor depende portanto do percurso ou caminho (*path*) seguido pelo móvel e desta forma

do número de *handovers* realizados, sendo por este motivo de difícil contabilização. Conforme foi visto anteriormente, uma outra razão para a ocorrência de terminação forçada de chamadas a decorrer é a degradação da qualidade da ligação rádio (*RF losses*), ocasionada por um aumento insustentável da interferência co-canal ou por canal adjacente. No entanto, neste capítulo a questão da qualidade não é considerada mas sim a análise do desempenho da rede em termos da gestão do tráfego oferecido (engenharia de teletráfego).

- $W_D$  atraso médio decorrido no processo de atribuição de um recurso rádio a uma chamada em fila de espera. A utilização de filas de espera pode ser utilizada para armazenamento de chamadas (quer em fase de estabelecimento quer em fase de *handover*) devido à inexistência de recursos rádio disponíveis para atribuição.
- $A_c = \lambda_n / \mu_c$  - intensidade de tráfego escoado por célula.  $\lambda_n$  é a taxa média de estabelecimento de novas chamadas.  $\mu_c$  é a taxa média de ocupação de um recurso rádio de cada célula.

Todo este processo de dimensionamento é bastante complexo uma vez que depende de diversos factores interligados entre si:

- O facto de (tal como foi analisado no capítulo 2) a maior parte dos sistemas utilizados na arquitectura deste tipo de redes utilizar o método de atribuição fixa de canais, FCA (o GSM é disso um exemplo) faz com que o dimensionamento tenha de ser feito para o pior caso possível (tráfego máximo esperado na hora mais carregada). A identificação dos pontos de maior densidade de tráfego e o desenvolvimento de padrões de mobilidade (separação do tráfego de mobilidade do tráfego estacionário, bem como a identificação dos percursos normalmente seguidos pelos assinantes) tornaria mais fácil o dimensionamento dos recursos e a sua rentabilização (medida através da taxa média de ocupação de cada recurso rádio). Os recursos poderiam ser atribuídos às células de uma forma dinâmica, consoante a localização da maior fatia do tráfego gerado ao longo do dia.
- O desenvolvimento de modelos de tráfego que permitam a análise teórica e por via de simulação do desempenho da rede em termos da gestão do tráfego oferecido, em função de diversos parâmetros de entrada tais como: tráfego oferecido, GoS

permitido, número de canais de rádio a atribuir, etc. Os resultados obtidos levariam ao desenvolvimento de estratégias de planeamento que uma vez implementadas poderiam conduzir a um melhor desempenho da rede.

- Analisar a possibilidade de evolução para métodos dinâmicos de atribuição de recursos.
- O facto de nos sistemas celulares de segunda geração (e de terceira geração que irão ser implementados muito em breve) ter-se evoluído de uma arquitectura de rede composta por uma única camada para uma arquitectura de rede composta por múltiplas camadas (redes hierárquicas). A introdução das redes hierárquicas veio acrescentar um grau de complexidade ainda maior no processo de elaboração de modelos de tráfego e de mobilidade para análise do desempenho e planeamento deste tipo de redes.

Nos últimos anos foram desenvolvidos modelos de tráfego para diferentes arquitecturas de redes móveis celulares [JAB96, THO88, GUE87, EVE94, EKL86, EVE90, HON86, MIL91, POS85, GUE88]. Estes modelos invariavelmente consideram uma série de aproximações que viabilizam a sua análise quantitativa e que ao mesmo tempo estão próximas da realidade. Nas secções que se seguem estes modelos são utilizados na análise do desempenho de diferentes arquitecturas de rede para diferentes parâmetros de entrada. As simplificações e aproximações utilizadas na elaboração dos modelos e das figuras de mérito alcançadas serão também analisadas.

Na secção 2 são descritos modelos de tráfego para uma arquitectura de rede base (e que serve de referência para os modelos de tráfego desenvolvidos para outras arquitecturas) bem como factores de mérito associados aos sistemas móveis celulares. Na secção 3 são apresentadas diferentes variantes para a arquitectura de uma rede móvel celular. São ainda descritos e analisados os modelos de tráfego elaborados para análise do seu desempenho. Na secção 4 são apresentadas as conclusões.

## 4.2 Modelos e factores de mérito das redes móveis celulares

A figura 4.1 ilustra um modelo funcional de uma célula da rede conforme proposto em [JAB96]. Do ponto de vista funcional cada célula é modelada por um “servidor”. Cada servidor dispõe de um número limitado de canais de rádio (“recursos do servidor”) para

serem atribuídos às chamadas que lhe são oferecidas (entradas 1 e 2). No modelo ilustrado na figura 4.1 estão representados dois tipos de entradas: “estabelecimento de novas chamadas” e “chamadas em curso provenientes de células vizinhas - chamadas por *handover*”; bem como três tipos de saídas: “chamadas terminadas normalmente”, “chamadas em processo de *handover*” para células vizinhas” e “chamadas forçadas a terminar - no seu estabelecimento ou durante o seu curso”.

No mesmo modelo são ainda consideradas duas filas de espera: uma para as chamadas em fase de estabelecimento e outra para as chamadas em processo de *handover*. Estas filas de espera são utilizadas para armazenamento de chamadas na falta de recursos rádio disponíveis, evitando o seu bloqueio na fase de estabelecimento e/ou a sua terminação forçada quando em processo de *handover*.

A compreensão do modo como se processa a mobilidade dos assinantes é um aspecto fundamental no processo de obtenção dos parâmetros descritores do desempenho e na avaliação do processo de planeamento da rede. Os parâmetros directamente relacionados com o processo de mobilidade dos assinantes são os seguintes: [JAB96]

- Intervalo de tempo total decorrido na ocupação de um recurso rádio da célula, desde a sua atribuição até a sua libertação devido à terminação natural da chamada ou à realização de um *handover* para uma outra célula (*channel holding time*),  $T_C$ .
- Probabilidade de ocorrência do acontecimento “atravessamento das fronteiras de uma célula por parte do móvel”, ou seja, de ocorrência de um *handover*,  $P_H$ .

Notar que estes parâmetros estão não apenas relacionados com o valor do tráfego que é oferecido a cada célula da rede, mas também com o tráfego de sinalização e controlo que é gerado. Por exemplo, quanto maior a probabilidade de ocorrência de *handovers*, maior a troca de informação de sinalização necessária a este processo e portanto maior o número de recursos rádio dedicados apenas à troca de sinalização que devem ser atribuídos a cada célula. Ou seja, além do tráfego de voz e/ou dados transportados nos canais de tráfego, existe também informação de sinalização e controlo transportada nos canais de sinalização. O aumento da informação de sinalização acarreta um aumento no número de canais necessários ao seu transporte, acarretando uma diminuição no número de canais de tráfego disponíveis e desta forma na capacidade máxima que a rede tem de transportar informação de voz e/ou dados.

Para derivação do parâmetro “probabilidade de ocorrência de *handover*”,  $P_H$  importa estimar a taxa média de atravessamento das fronteiras de uma célula por parte de um móvel, ou seja, o *cell cross-over rate*  $\eta$ . Em [THO88] é desenvolvida uma fórmula simples para obtenção deste parâmetro a partir das aproximações seguintes:

- Os móveis são considerados como se encontrando uniformemente distribuídos ao longo da área de dominância de cada célula.
- As direcções de movimento de cada móvel não estão correlacionadas entre si e seguem distribuições uniformes no intervalo  $[0, 2\pi]$ .
- Considera-se o valor médio  $V$  da velocidade de deslocamento de cada móvel.

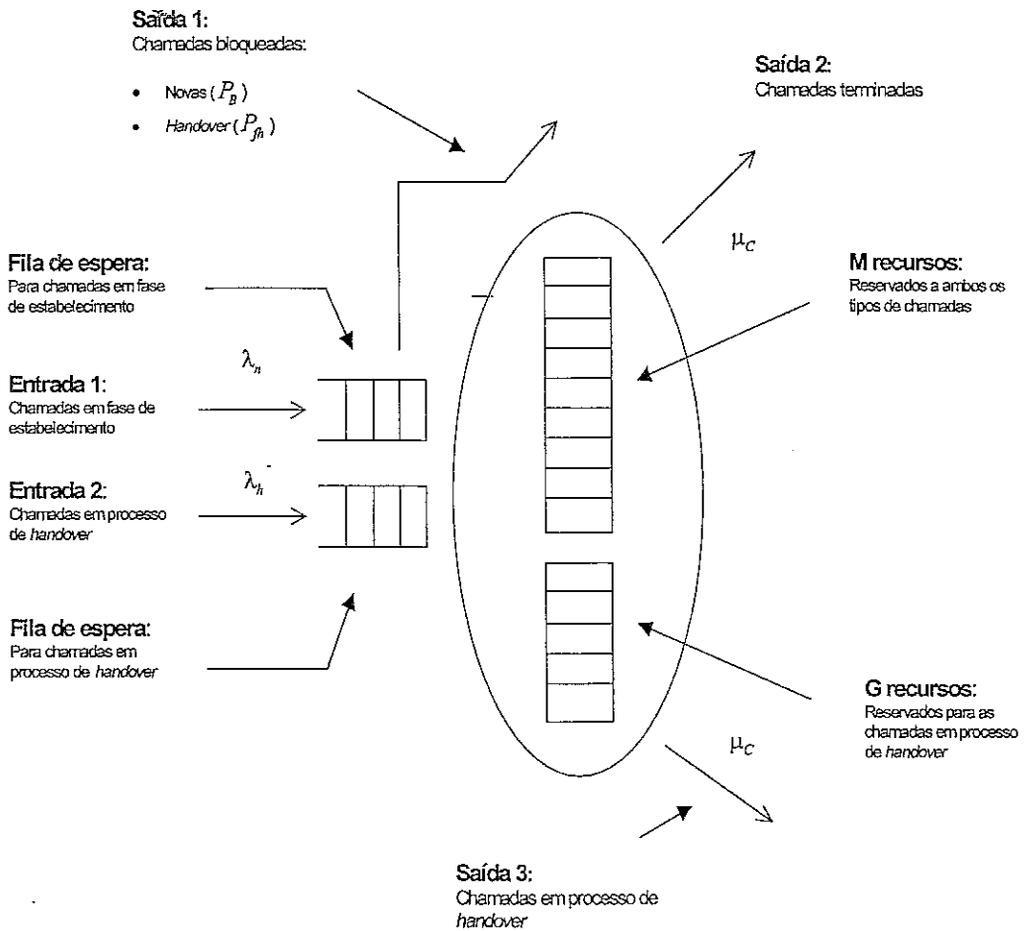


Figura 4.1 – Modelo funcional (gestão do tráfego oferecido) a uma célula.

Para estas aproximações o *cell cross-over rate*  $\eta$  é dado por: [THO88]

$$\eta = V \frac{L}{\pi S} \quad (1)$$

em que:

- $V$  é o valor médio para a velocidade de deslocamento de cada móvel.
- $L$  é o perímetro da fronteira de cada célula.
- $S$  é a área de dominância de cada célula.

A taxa média de atravessamento  $\eta$  das fronteiras de uma célula, juntamente com o tempo médio de ocupação de um recurso rádio por uma chamada a decorrer  $T_C$  são dois parâmetros determinantes no processo de estimação da taxa de ocorrência de chamadas em processo de *handover*  $\lambda_h$ .

Por sua vez, a taxa de estabelecimento de novas chamadas  $\lambda_n$  é um parâmetro obtido em função da estimativa da densidade média de utilizadores por célula.

Resta agora estimar o tempo médio de ocupação de um recurso rádio de cada célula por parte de uma chamada a decorrer (*channel holding time* -  $\bar{T}_C$ ).

A figura 4.2 ilustra o movimento de um móvel através da área de cobertura de uma rede celular quando em processo de chamada. O tempo total de duração de cada chamada pode ser decomposto em sucessivas fatias temporais (individualmente denominadas por  $\tau_i$  na figura 4.2). Cada uma destas fatias temporais é igual ao tempo total decorrido na ocupação de um recurso rádio em cada célula  $T_C$ .

Para análise da figura 4.2 em primeiro lugar é preciso definir o parâmetro “*unencumbered call duration*”  $T_M$ . Este parâmetro corresponde ao tempo total decorrido na ocupação de um recurso rádio por uma chamada a decorrer desde o instante de realização do último *handover* até o instante da sua finalização. Na eventualidade da não ocorrência de *handovers* este parâmetro resume-se ao tempo total de duração da chamada. Vamos assumir que este também segue uma distribuição exponencial de parâmetro  $\mu_M = 1/T_M$ .

Pela análise da figura 4.2 é possível observar que:

- O acontecimento A corresponde ao tempo total decorrido desde o estabelecimento da chamada na célula  $i$  até o instante de realização do primeiro *handover* para a célula  $j$  (*cell dwell time* -  $T_D$ ), seguido pelo seu término sem ocorrência de mais nenhum *handover* nesta célula (*unencumbered call duration* -  $T_M$ ).
- O acontecimento B corresponde ao tempo total decorrido desde o estabelecimento da chamada na célula  $i$  até ao instante de realização do primeiro *handover* para a célula  $j$  (*cell dwell time* -  $T_D$ ), seguido da travessia da célula  $j$  com a continuação do processo de chamada até o instante de realização de um segundo *handover* (*cell dwell time* -  $T_D$ ) para a célula  $k$ , até o seu término sem ocorrência de mais nenhum *handover* nesta célula (*unencumbered call duration* -  $T_M$ ).

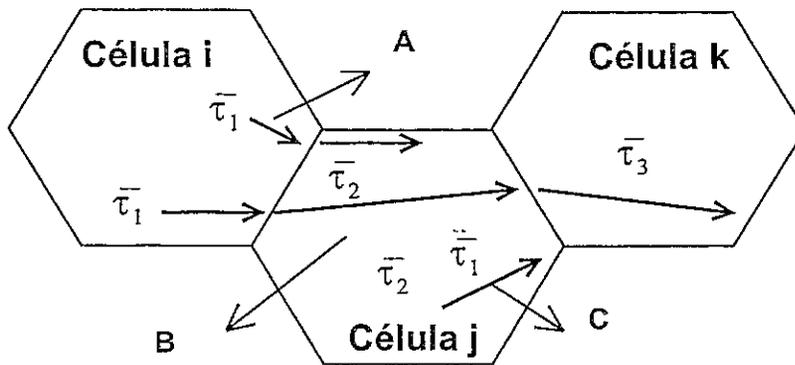


Figura 4.2 – Ilustração do *dwell time* e *channel holding time*.

- O acontecimento C corresponde ao tempo total decorrido na realização da chamada desde o seu estabelecimento na célula  $j$  até o seu término sem ocorrência de nenhum *handover* nesta célula (*unencumbered call duration* -  $T_M$ ).

Em [THO88] demonstra-se que o valor médio para o parâmetro "cell dwell time" pode ser estimado a partir do *cell cross-over rate*  $\eta$  :

$$\bar{T}_D = \frac{1}{\eta} \quad (2)$$

Pelo que é dito acima conclui-se que o tempo total decorrido desde o instante de ocupação de um recurso rádio até a sua libertação (*channel holding time* -  $T_C$ ) é função destes dois parâmetros e é dado por:

$$T_C = \min\{T_M, T_D\} \quad (3)$$

No entanto, como o mínimo de duas distribuições exponenciais é ainda uma distribuição exponencial, conclui-se que  $T_C$  segue uma distribuição exponencial com parâmetro:

$$\mu_C = \mu_D + \eta = 1/\bar{T}_C \quad (4)$$

A partir dos resultados anteriores, facilmente se conclui que a probabilidade de atravessamento das fronteiras de uma célula, ou seja da ocorrência de um *handover*, é dada por:

$$P_H = P\{\bar{T}_C > \bar{T}_D\} = \eta / (\eta + \mu_D) \quad (5)$$

que é o resultado a que pretendíamos chegar.

#### 4.2.1 Distribuição do tempo de ocupação de um recurso rádio em redes móveis celulares

Em [GUE87] Guérin desenvolveu um modelo de mobilidade e aplicou-o a uma arquitectura simplificada de uma rede móvel celular, por forma a caracterizar a distribuição seguida pelo parâmetro  $\bar{T}_C$ . A partir de um processo de simulação e de alguns pressupostos obteve uma estimativa para a distribuição deste parâmetro. Os pressupostos considerados no desenvolvimento deste modelo foram os seguintes:

- O tráfego gerado em cada célula foi considerado como que estando uniformemente distribuído ao longo da sua área de dominância. Considerou-se ainda que a taxa de estabelecimento de novas chamadas é a mesma para qualquer célula da rede.
- A geometria de cada célula foi considerada como sendo circular.
- O modelo baseia-se numa arquitectura de rede simplificada composta por uma única célula. Por forma a restringir o movimento de cada móvel à área de dominância desta célula recorreu-se ao seguinte artifício para simulação do processo de *handover*. Na iminência da ocorrência de um *handover* para uma célula vizinha, a direcção de movimento do móvel é reflectida para a célula de origem (ver figura 4.3) não havendo abandono por parte do móvel da sua área de dominância. Desta forma, consegue-se restringir o movimento de cada móvel a uma única célula da rede (a célula onde a chamada foi originada). O contador

utilizado na contabilização do tempo decorrido na utilização de cada recurso rádio da célula é reiniciado logo após a finalização deste processo de simulação do mecanismo de *handover*, ou no instante em que a chamada é terminada. Consegue-se assim modelar o facto de que cada recurso rádio de uma célula é libertado quando o móvel realiza um *handover* para uma célula vizinha.

Partindo dos pressupostos acima é possível considerar a rede como um sistema homogéneo em que as células são independentes e estatisticamente idênticas. Sendo assim, basta estudar o comportamento de uma única célula, o que permite simplificar o processo de simulação.

As aproximações consideradas no desenvolvimento do modelo são as seguintes:

- O intervalo de tempo decorrido durante a realização de cada chamada segue uma distribuição exponencial.
- A velocidade de deslocamento de cada móvel foi assumida como sendo constante.
- A direcção de deslocamento inicial de cada móvel (após o estabelecimento de uma chamada) segue uma distribuição uniforme no intervalo  $[0, 2\pi]$ .

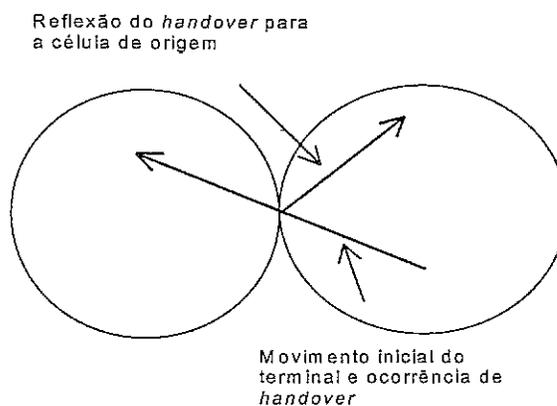


Figura 4.3– Ilustração do princípio da reflexão na ocorrência de um *handover*.

O intervalo de tempo decorrido até a ocorrência de uma nova mudança de direcção do movimento é determinado por uma variável aleatória que segue uma distribuição exponencial com parâmetro igual ao número médio de mudanças de direcção por unidade de tempo. Este resultado tem a sua lógica devido ao facto de as mudanças de direcção serem processos aleatórios sem memória, uma vez que a nova direcção a

seguir (na maior parte dos casos) é independente das direcções seguidas até então pelo móvel.

Após a geração de um número significativo de amostras a distribuição seguida por  $T_C$  pode ser estimada com alguma segurança. Por meio da simulação do modelo anteriormente descrito e para as aproximações consideradas, Guérin demonstrou que este parâmetro pode ser aproximado com alguma precisão por meio de uma distribuição exponencial. Este resultado vem confirmar as conclusões obtidas em [JAB86, HON86] acerca da distribuição do parâmetro  $T_C$ . Conforme foi visto anteriormente, para o modelo de mobilidade desenvolvido em [THO88] o valor médio da taxa de atravessamento das fronteiras de uma célula (*cell cross-over rate*  $\eta$ ) está relacionado com o tempo de residência de cada terminal na sua área de dominância (*cell dwell-time*  $T_D$ ), conforme indicado na equação (2). A partir deste resultado, Jabbari e Hong em [JAB86, HON86] verificaram que  $T_C$  pode ser aproximado com razoável precisão por uma distribuição exponencial.

No entanto, Guérin também verificou que nem sempre este resultado é válido, existindo situações concretas em que este parâmetro não pode ser aproximado por uma distribuição exponencial com o grau de precisão pretendido. Para exemplificar, Guérin considerou e simulou duas situações radicalmente opostas entre si:

- Como primeiro exemplo de situação limite para a taxa média de variação da direcção de movimento de cada móvel, assumiu-se um movimento constante, sem mudança de direcção. Para esta situação limite, a probabilidade de ocorrência de um *handover* depende directamente do intervalo de tempo decorrido anteriormente, desde o início da chamada ou do último *handover*. Deste modo não se pode considerar que estamos na presença de um processo estocástico sem memória e logo aproximar  $T_C$  por meio de uma distribuição exponencial.
- O segundo exemplo de situação limite é o oposto do anterior. Assume-se que a taxa de variação da direcção de movimento de cada móvel é tão elevada que o processo é do tipo *Random-Walk*. Pelo Teorema do Limite Central demonstra-se que para esta situação  $T_C$  segue uma distribuição Gaussiana e não exponencial.

Notar que para ambas as situações não são obedecidos os pressupostos seguidos em [THO88] para derivação de  $\eta$  e de  $T_C$  e que permitiram concluir que este parâmetro pode ser aproximado por meio de uma distribuição exponencial. No entanto, na maior parte das aplicações podemos assumir uma situação compreendida entre estes dois extremos.

O facto de  $T_C$  seguir uma distribuição exponencial já era esperado. Este parâmetro depende directamente da probabilidade de o móvel atravessar mais ou menos depressa as fronteiras de cada célula e deste modo está intrinsecamente ligado à ocorrência de um *handover* antes do término da chamada. Estamos assim perante um processo estocástico sem memória, uma vez que depende directamente das alterações da direcção do movimento seguido pelo móvel e estas alterações dependem apenas da posição actual em que este se encontra e não das posições anteriores. Sendo a distribuição exponencial a única que caracteriza os processos estocásticos sem memória é natural considerar-se que  $T_C$  segue uma distribuição exponencial.

#### 4.2.2 Derivação das expressões para a taxa de estabelecimento de novas chamadas $\lambda_n$ e de ocorrência de chamadas em processo de *handover* $\lambda_h$

A taxa de estabelecimento de novas chamadas depende da geometria de cada célula da rede. Considerando que o universo de assinantes do serviço se encontra uniformemente distribuído pela área de dominância de cada célula então, se  $\lambda_u$  é igual à taxa média de estabelecimento de novas chamadas por segundo e por unidade de área, a taxa de estabelecimento de novas chamadas é dada por [HON86]:

$$\lambda_n = \frac{3\sqrt{3}}{2} R^2 \lambda_u \quad (6)$$

em que  $R$  é o raio do hexágono.

Falta apenas caracterizar a taxa de ocorrência de chamadas em processo de *handover* oferecidas a cada célula da rede,  $\lambda_h$ . Para tal, basta verificar que  $\lambda_h$  é igual à soma de duas componentes:

- Taxa de chamadas que não são bloqueadas na sua fase de estabelecimento e que não são terminadas na sua célula de origem, realizando *handover* para uma célula vizinha:  $[(1 - P_B)\lambda_n]P_H$ .
- Taxa de chamadas em processo de *handover* a partir de células vizinhas, que não são forçadas a terminar devido à uma eventual falha neste processo de *handover* e que não são terminadas na célula de destino, realizando pelo menos mais um *handover* antes do seu término:  $[(1 - P_{fh})\lambda_n]P_H$ .

A taxa de ocorrência de chamadas em processo de *handover* que são oferecidas a cada célula da rede é dada pela soma das duas componentes descritas acima:

$$\lambda_h = P_H [(1 - P_B)\lambda_n + (1 - P_{fh})\lambda_n] \quad (7)$$

Resolvendo a equação (7) chega-se ao resultado final pretendido:

$$\lambda_h = \frac{P_H(1 - P_B)}{[1 - P_H(1 - P_{fh})]} \lambda_n \quad (8)$$

em que:

- $P_B$  é a probabilidade de bloqueio no estabelecimento de uma nova chamada.
- $P_H$  é a probabilidade de ocorrência de um *handover*.
- $P_{fh}$  é a probabilidade de falha num processo de *handover*.

É normal esperar que o bom desempenho da rede imponha valores muito reduzidos para  $P_B$  e  $P_{fh}$  pelo que podemos considerar que, para um bom desempenho,  $P_B \ll 1, P_{fh} \ll 1$ . Logo a equação (8) pode ser aproximada pela expressão seguinte:

$$\lambda_h \cong \frac{\eta}{\mu_D} \lambda_n \quad (9)$$

Esta equação é fundamental no processo de dimensionamento dos recursos rádio a atribuir a cada célula da rede. Isto porque permite que a taxa de ocorrência de chamadas em processo de *handover* possa ser estimada directamente a partir dos parâmetros assumidos para o modelo de mobilidade, bem como a partir do valor assumido para a taxa de estabelecimento de novas chamadas. Estes valores serão

utilizados, conforme se verá mais adiante, na obtenção das figuras de mérito descritoras do desempenho de diferentes arquitecturas de rede.

Em resumo, os parâmetros utilizados no processo de análise do desempenho de uma rede móvel celular são os seguintes:

- *Unencumbered call duration*  $T_M$ . Segue uma distribuição exponencial com parâmetro  $\mu_M = 1/T_M$ .
- *Cell dwell time*  $T_D$ . Segue uma distribuição exponencial com parâmetro  $\mu_D = 1/T_D = \eta$ .
- *Channel holding time*  $T_C$ . Segue uma distribuição exponencial com parâmetro:  $\mu_C = 1/T_C = \mu_D + \eta$ .
- Probabilidade de ocorrência de *handovers*  $P_H = \eta / (\eta + \mu_D)$ .

#### 4.2.3 Derivação dos parâmetros descritores do desempenho da rede

Para obtenção dos parâmetros descritores do desempenho da rede importa desenvolver um modelo de tráfego que caracterize o seu mecanismo ou dinâmica de funcionamento, e que possa ser traduzido essencialmente na capacidade que cada célula da rede tem em processar as chamadas que são oferecidas. O desenvolvimento deste modelo de tráfego baseia-se nas aproximações seguintes:

- No domínio espacial a taxa de estabelecimento de novas chamadas  $\lambda_n$  segue uma distribuição uniforme. A densidade de tráfego gerado é assim considerada como que estando uniformemente distribuída ao longo da área de dominância de cada célula.
- O número total de móveis localizados na área de dominância de uma célula e prontos para o estabelecimento de novas chamadas é muito superior ao número total de móveis em processo de chamada. Ou seja, a taxa de estabelecimento de novas chamadas é independente do número total de chamadas a decorrer.
- $\lambda_n$  e  $\lambda_h$  são processos de *Poisson*.

- O tempo decorrido na duração de uma chamada  $T$  segue uma distribuição exponencial com parâmetro  $\mu = \frac{1}{T}$ .
- Não são consideradas chamadas estabelecidas entre dois terminais.

Em [HOT93] Holtzman *et al* desenvolveram um modelo para análise do desempenho do processo de *handover* numa rede móvel celular. O modelo desenvolvido formula o processo de *handover* para o caso particular de duas estações base apenas,  $A$  e  $B$ , separadas entre si duma distância de  $d$  metros. Considera-se um móvel em deslocamento de  $A$  para  $B$  a uma velocidade constante. O algoritmo utilizado no processo de *handover* baseia-se em medições do nível médio de sinal recebido a partir das duas estações ( $RxLev$  - *received signal level*) e do número de bits de informação errados na recepção ( $BER$  -  $RxQual$  - *received signal quality*). Este algoritmo é basicamente o algoritmo utilizado no mecanismo de *handover* do sistema GSM, conforme foi descrito no capítulo 2. O nível médio de sinal recebido resulta da soma de duas componentes: a componente directa resultante da propagação no meio (*path loss*) e o desvanecimento tipo *log-normal* (*shadow*). As variações rápidas do nível de sinal recebido (desvanecimento rápido) são eliminadas pelo processo de amostragem e média do filtro utilizado. As medições do nível de sinal recebido pelo móvel são amostradas e é feita a sua média por meio de um filtro com uma característica exponencial e com decaimento  $d_{av}$ . O grau de decaimento da exponencial está directamente relacionado com o número de amostras necessárias para preenchimento do filtro e logo com a precisão do processo de cálculo da média do sinal recebido. Está desta forma relacionado directamente com o atraso decorrido na execução do processo de *handover* e logo com o número médio de *handovers* realizados por cada chamada. O algoritmo determina que um novo processo de *handover* deve ser desencadeado quando o nível médio do sinal recebido a partir da estação  $B$  é maior do que o nível médio do sinal recebido a partir da estação  $A$  por um nível de *histerese*  $h$ . Se a função do gráfico da figura 4.4 representa a diferença entre os níveis médios do sinal recebido pelo móvel a partir das duas estações  $A$  e  $B$  após o processo de amostragem e média do filtro ( $x(d) = \bar{a}(d) - \bar{b}(d)$ ) e o móvel se encontra em comunicação com a estação  $B$  no início do intervalo considerado, então os *handovers* devem ser desencadeados nos pontos indicados, ou seja, no cruzamento do nível de *histerese*  $h$ . O mesmo

raciocínio se aplica ao movimento em sentido contrário (a partir da estação  $A$ ). O processo de *handover* é assim definido como um processo estocástico associado ao seguinte acontecimento: cruzamento dos níveis definidos por  $h$  e  $-h$ . O desempenho do algoritmo utilizado no mecanismo de *handover* é avaliado pelo número médio de *handovers* decorridos e pelo atraso decorrido na execução de um processo de *handover*. Quanto mais lento for o decaimento do filtro (maior  $d_{av}$  - maior número de amostras necessárias) e maior for o nível de *histerese*  $h$  menor é o número de *handovers* a ocorrer. No entanto, o processo de *handover* não pode demorar demasiado a ser desencadeado sob pena que a chamada seja forçada a terminar devido à degradação no nível do sinal recebido.

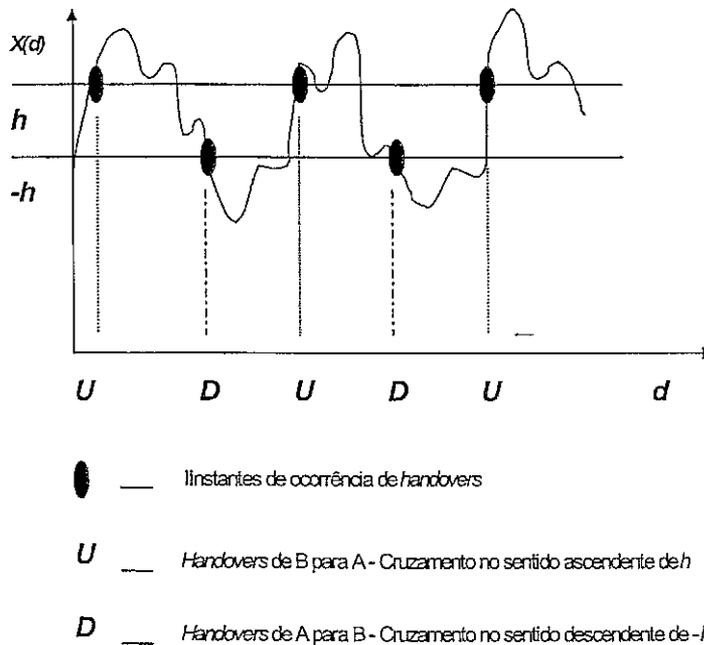


Figura 4.4— Instantes de desencadeamento do processo de *handover*.

Os autores demonstraram que, para certas aproximações ( $h \geq \sigma_s$ , onde  $\sigma_s$  é igual ao desvio padrão do processo de desvanecimento lento - *slow* ou *shadow fading* - do nível de sinal recebido), o processo de *handover* tal como é definido acima pode ser aproximado por um processo de *Poisson*. Isto é válido para os níveis normalmente assumidos para  $h$  e  $\sigma_s$ . Através de um processo de simulação, os autores verificaram que, para um desvio padrão  $\sigma_s$  de 6dB (o valor típico é 8dB) e para um nível de

*histerese*  $h$  superior a 4dB, o processo de *handover* pode ser estimado com grande precisão por um processo de *Poisson*.

Normalmente os modelos de tráfego desenvolvidos para diferentes arquitecturas de rede modelam o comportamento funcional de uma única célula, facilitando o seu processo de análise e a obtenção dos parâmetros descritores do seu desempenho. Por outro lado, atendendo ao facto de a taxa de chamadas oferecidas a cada célula da rede (quer devido ao estabelecimento de novas chamadas  $\lambda_n$ , quer devido às chamadas em processo de *handover*  $\lambda_h$ ) seguir um processo de *Poisson* e  $T_C$  seguir uma distribuição exponencial, a dinâmica da rede pode ser modelada por meio de uma cadeia de *Markov*, em que as transições entre estados adjacentes da cadeia é um processo contínuo no tempo e do tipo *nascimento e morte*. A cada célula é associado um estado  $E_j$  e uma probabilidade de estado  $P_j$ . Diz-se que uma célula encontra-se no estado  $E_j$  quando existe um total de  $j$  chamadas a decorrer num dado instante de tempo.  $P_j$  representa a probabilidade em regime estacionário de ocorrência do estado genérico  $j$  num dado instante de tempo. A figura 4.5 ilustra o diagrama de transição de estados (cadeia de *Markov*) relativo a uma arquitectura de rede genérica.

Os valores das probabilidades em regime estacionário  $P_j$  podem ser obtidos a partir das considerações normalmente efectuadas nos processos de *nascimento e morte*. A partir do diagrama de transições de estados expresso na figura 4.5 podemos escrever a equação de transição de estados da cadeia:

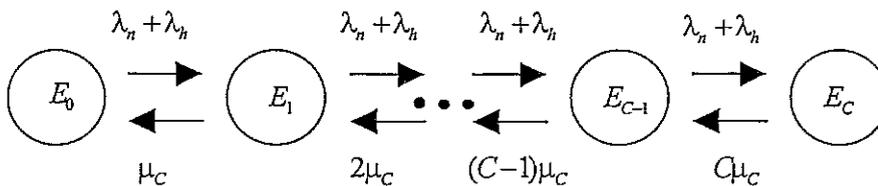


Figura 4.5- Diagrama de transição de estados (cadeia de *Markov*) relativo à uma arquitectura de rede móvel celular genérica.

$$P_j = \frac{\lambda_n + \lambda_h}{\mu_C} P_{j-1}, \text{ com } j = 1, 2, \dots, C \quad (10)$$

Conjugando a utilização recursiva da equação de transição de estados com a condição de normalização abaixo:

$$\sum_{j=0}^{\infty} P_j = 1 \quad (11)$$

chega-se à expressão genérica para a probabilidade de o sistema se encontrar num dado instante de tempo no estado  $E_j$  da cadeia:

$$P_j = \frac{(\lambda_n + \lambda_h)^j}{j! \mu_C^j} P_0, \text{ com } j = 1, 2, \dots, C \quad (12)$$

onde a probabilidade de o sistema se encontrar no estado inicial  $P_0$  é dada pela expressão:

$$P_0 = \left[ \sum_{k=0}^C \frac{(\lambda_n + \lambda_h)^k}{k! \mu_C^k} \right]^{-1} \quad (13)$$

em que:

- $P_0$  é o valor da probabilidade em regime estacionário correspondente ao primeiro estado da cadeia.
- $j$  é o número total de recursos rádio da célula ocupados por chamadas a decorrer num dado instante de tempo.

A probabilidade de bloqueio no estabelecimento de novas chamadas  $P_B$  ou de falha no processo de *handover*  $P_{fh}$  é igual à probabilidade em regime estacionário de todos os recursos rádio estarem ocupados por chamadas a decorrer  $P_C$ , que por sua vez é dada pela fórmula de *Erlang B*:

$$P_B = P_{fh} = P_C = \frac{A_n^C}{C!} \bigg/ \sum_{i=0}^C \frac{A_n^i}{i!} \quad (14)$$

em que  $A_n = \lambda_n / \mu_C$  é a intensidade do tráfego associado ao estabelecimento de novas chamadas.

Para terminar, resta salientar que na realidade o estado genérico  $E_j$  por onde passa a cadeia num dado instante de tempo é função do vector  $\vec{n} = (n_1, n_2, n_3, \dots, n_i, \dots, n_{m-1}, n_m)$ , onde  $n_i$  é igual ao número total de chamadas a decorrer na  $i$ -ésima célula. Nesta situação, a *cadeia de Markov* é uma cadeia multi-dimensional composta por  $M$  células. As aproximações enunciadas acima permitem reduzir esta cadeia de *Markov* multi-dimensional a uma cadeia de uma só dimensão, facilitando o seu processo de análise.

Nas secções seguintes são estudadas e analisadas diferentes arquitecturas de rede. Para cada uma são elaborados modelos de tráfego que levam à extracção dos parâmetros descritores do seu desempenho, em termos da gestão do tráfego oferecido (“engenharia de teletráfego”).

### 4.3 Implementação de diferentes arquitecturas para uma rede móvel celular

Conforme foi visto anteriormente, os factores que influenciam a qualidade do serviço prestado (GoS) por um operador são essencialmente os seguintes:

- Qualidade do processo de comunicação (medida através do número de *bits* de informação errados na recepção - *bit error rate* BER). A qualidade do processo de comunicação está directamente associada aos valores mínimos admissíveis para as relações C/I e C/A, que por sua vez estão directamente relacionados com o padrão de reutilização de frequências utilizado. As interferências por canal adjacente e co-canal que afectam a qualidade da comunicação, além de poderem ocasionar cortes na transmissão (degradação da transmissão de voz ou dados), podem mesmo originar terminação forçada de chamadas a decorrer.
- *Grau de serviço* (GoS) prestado (relacionado com a maior ou menor disponibilidade de recursos para atribuição às chamadas que são oferecidas a cada célula). O GoS é influenciado essencialmente por dois parâmetros: probabilidade de bloqueio no estabelecimento de novas chamadas  $P_B$  e probabilidade de terminação forçada de chamadas a decorrer  $P_T$ .

A qualidade do processo de comunicação depende da forma como é feito o planeamento da rede. Depende do tipo de padrão utilizado e da arquitectura adoptada. À medida que o tráfego oferecido aumenta, torna-se necessário efectuar um redimensionamento da sua arquitectura por forma a aumentar a capacidade, mantendo a qualidade dentro dos mínimos impostos.

Normalmente os operadores assumem um GoS de 2% neste processo de dimensionamento. Isto significa que 2% do tráfego total associado ao estabelecimento de novas chamadas é rejeitado por falta de recursos disponíveis. Este valor é considerado um bom índice de dimensionamento. Uma rede mal dimensionada pode apresentar valores elevados para  $P_B$  (acima de 8% já se considera que o dimensionamento é manifestamente insuficiente). Nesta situação torna-se necessário re-dimensionar a rede por forma a aumentar o número de recursos rádio disponíveis por célula e desta forma melhorar o GoS. No entanto, o tráfego por *handover* normalmente não é considerado neste dimensionamento, não sendo contabilizados os canais de tráfego necessários para o absorver. Para uma rede bem dimensionada, com uma taxa de bloqueio no estabelecimento de novas chamadas reduzida, o GoS é fortemente influenciado pela probabilidade de terminação forçada de chamadas a decorrer  $P_T$ , ou seja, pela falta de recursos rádio disponíveis para atribuição às chamadas em processo de *handover* nas células de destino.

Por este motivo foram estudadas diversas alternativas para uma arquitectura de rede móvel celular, que resulte na redução do valor deste parâmetro em detrimento de um aumento (pouco significativo conforme se verá) do valor de  $P_B$  [JAB96, EVE94, EKL86, EVE90, HON86, MIL91, POS85, GUE88, ERI/AC]. Estas alternativas são descritas e analisadas nos pontos a seguir.

#### 4.3.1 Utilização de canais de guarda

Apesar do tráfego por *handover* não ser considerado no processo de dimensionamento do número de recursos rádio a atribuir a cada célula da rede, o valor para a probabilidade de terminação forçada de chamadas a decorrer  $P_T$  pode ser influenciado através da reserva de um subconjunto destes recursos, dedicado para atribuição exclusiva às chamadas em processo de *handover*. Estes recursos são denominados

canais de guarda (*guard channels* ou *cut-off channels*). Ao reservar um número de canais de guarda para atribuição exclusiva às chamadas em processo de *handover*, a probabilidade de bloqueio no estabelecimento de novas chamadas  $P_B$  aumenta. No entanto, conforme se verá a seguir, este aumento é pouco significativo quando comparado com o ganho conseguido na diminuição do valor de  $P_T$ .

Em [JAB96, HON86] foram desenvolvidos modelos de tráfego baseados na teoria das cadeias de *Markov* para análise do desempenho numa arquitectura de rede baseada neste princípio. As aproximações são as mesmas que foram consideradas anteriormente no processo de análise do desempenho de uma rede móvel celular genérica. A figura 4.6 ilustra a cadeia de *Markov* para esta arquitectura.

Conforme pode ser observado, são reservados  $C_h$  recursos (do universo de  $C$  recursos rádio atribuídos a cada célula) como canais de guarda. Quando o número de recursos rádio ocupados é superior a  $C - C_h$  somente o tráfego por *handover* é processado. A partir do estabelecimento das equações de transição de estado (obtidas directamente do diagrama da figura 4.6), chega-se às expressões para  $P_B$  e  $P_{fh}$  [HON86].

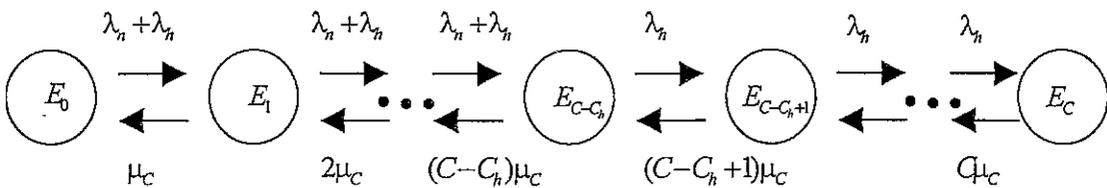


Figura 4.6 - Diagrama de transição de estados da cadeia de *Markov* para a arquitectura considerada.

A probabilidade de bloqueio no estabelecimento de novas chamadas  $P_B$  é igual à soma das probabilidades correspondentes aos estados em que o número de recursos rádio ocupados é igual ou superior a  $C - C_h$ .

$$P_B = \sum_{j=C-C_h}^C P_j = \frac{(A_n + A_h)^{C+C_h} \sum_{k=C}^{C+C_h} \frac{A_h^{k-C}}{k!}}{\sum_{k=0}^{C-1} \frac{(A_n + A_h)^k}{k!} + (A_n + A_h)^{C+C_h} \sum_{k=C}^{C+C_h} \frac{A_h^{k-C}}{k!}} \tag{15}$$

em que  $A_h = \lambda_h / \mu_c$  e a intensidade do tráfego associado às chamadas em processo de *handover*.

A probabilidade de falha num processo de *handover*  $P_{fh}$  é igual a probabilidade do sistema se encontrar no estado em que todos os canais de rádio estão ocupados ( $P_C$ ).

$$P_{fh} = P_C = \frac{(A_n + A_h)^C \frac{A_h^{C_h}}{(C + C_h)!}}{\sum_{k=0}^{C-1} \frac{(A_n + A_h)^k}{k!} + (A_n + A_h)^C \sum_{K=C}^{C+C_h} \frac{A_h^{k-C}}{k!}} \quad (16)$$

Para  $C_h = 0$  o sistema resume-se à arquitectura básica (sem canais de guarda) considerada anteriormente. Nesta situação  $P_B = P_{fh}$

A determinação da probabilidade de terminação forçada de chamadas a decorrer é um processo mais complexo, conforme foi visto anteriormente, e está directamente associada ao percurso escolhido pelo assinante durante a fase de realização da chamada. Durante o seu movimento pela área de dominância de cada célula, aspectos tais como a densidade de utilizadores, a velocidade de movimento e o tipo de chamada a realizar influenciam directamente a maior ou menor probabilidade de haver uma falha num processo de *handover*  $P_{fh}$ , para o percurso escolhido e logo para a terminação forçada da chamada a decorrer  $P_T$ . Para uma arquitectura de rede homogénea (todas as células são independentes e identicamente distribuídas) e composta por uma única camada,  $P_T$  pode ser estimado tendo em conta que uma chamada que não é bloqueada no seu estabelecimento e que é bem sucedida nos primeiros  $(l-1)$  *handovers* é forçada a terminar se ocorrer falha no  $l$ -ésimo *handover* (média dos *handovers* executados por cada chamada durante o período da sua realização [JAB96]). Sendo assim:

$$\begin{aligned} P_T &= P_H P_{fh} \left\{ 1 + P_H (1 - P_{fh}) + P_H^2 (1 - P_{fh}^2) + \dots \right\} \\ &= P_H P_{fh} \sum_{l=0}^{\infty} P_H^l (1 - P_{fh})^l \\ &= \frac{P_H P_{fh}}{1 - P_H (1 - P_{fh})} \end{aligned} \quad (17)$$

em que  $P_H$  é a probabilidade de ocorrência de *handovers*.

Da mesma forma, uma vez que a rede está a ser modelada por uma única célula, a mobilidade de cada assinante não pode ser modelada, logo só é possível estimar  $P_T$  através da sua média.

Em [HON86] Hong *et al* analisaram o comportamento dos parâmetros  $P_B$  e  $P_T$  para um número variável de canais de guarda  $C_h$ . Nomeadamente, foi analisado o comportamento de  $P_B$  e  $P_T$  em função da taxa de estabelecimento de novas chamadas  $\lambda_h$  para diferentes números de canais de guarda  $C_h$ . A principal conclusão a tirar é que para um pequeno aumento no número de canais de guarda utilizados, a diminuição de  $P_T$  é muito mais significativa do que o aumento resultante para  $P_B$ . A título de exemplo: quando o número de canais de guarda passa de 3 para 4, para uma taxa de estabelecimento de novas chamadas igual a  $0.1 \text{ Erl}/m^2$ , a diminuição no valor de  $P_T$  é da ordem dos 10%, enquanto que o aumento no valor de  $P_B$  é insignificante. Verificou-se ainda que para um número total de canais de guarda  $C_h$  igual a 4 e para um número total de recursos rádio  $C$  por célula igual a 20 (cerca de três portadoras, o que já é bastante razoável na prática) a probabilidade de bloqueio no estabelecimento de novas chamadas  $P_B$  começa a ter valores próximos dos 4%. Sendo assim, na prática 4 canais de guarda deve ser considerado como o limite máximo a utilizar.

#### 4.3.2 Utilização de canais de guarda e de filas de espera para atribuição às chamadas em processo de *handover*

Nesta secção aborda-se uma nova estratégia de planeamento em redes móveis celulares que atribui um grau de protecção adicional às chamadas em processo de *handover*. Baseia-se na utilização conjunta de canais de guarda e filas de espera. O objectivo da introdução das filas de espera é reduzir ainda mais a probabilidade de terminação forçada de chamadas a decorrer  $P_T$ . As chamadas em processo de *handover* são colocadas em fila de espera sempre que não existam recursos rádio disponíveis na célula de destino (incluindo os canais de guarda). Quando houver novamente um recurso rádio disponível para atribuição, a chamada é retirada da fila de espera e o processo de *handover* é finalizado, dando assim continuidade à realização da chamada.

De notar que não se está a considerar o armazenamento de chamadas em fase de estabelecimento.

A utilização de filas de espera para armazenamento de chamadas em processo de *handover* é um processo fisicamente realizável, dado existir um intervalo de tempo entre o instante em que processo de *handover* é desencadeado (conforme se viu no capítulo 2, quando o nível médio do sinal recebido a partir da estação base de origem passa a ser inferior ao nível de *threshold* programado), e o limite mínimo para a sensibilidade do móvel (abaixo do qual a ligação rádio com a estação base não pode ser suportada). Este intervalo de tempo corresponde à área de *handover* do móvel. Se houver novamente um recurso rádio disponível enquanto o móvel se encontra nesta área de *handover*, o processo é finalizado com sucesso, caso contrário a chamada é forçada a terminar.

Caso exista mais do que uma chamada em processo de *handover* em fila de espera é necessário implementar um mecanismo de gestão interna da fila e de atribuição dos recursos rádio que vão sendo libertados. Um dos mecanismos mais utilizados neste processo de gestão é a organização da fila como um FIFO (*first in - first out*), em que a primeira chamada a entrar na fila é também a primeira à qual é atribuído um recurso rádio. A organização como FIFO está associada a ideia de que quanto maior for o tempo de espera na fila maior é a probabilidade de a chamada ser forçada a terminar.

No entanto, isto não é sempre verdade, uma vez que o que importa é a rapidez com que se processa a degradação do nível médio do sinal rádio, e este aspecto depende, entre outros factores, da velocidade de deslocamento do móvel, da sua direcção de movimento e do tamanho da célula de origem. Existem assim outros métodos (conforme se verá mas adiante) que se baseiam em medições contínuas do nível médio do sinal rádio recebido no processo de organização interna da fila de espera.

O custo resultante da utilização de filas de espera para armazenamento de chamadas em processo de *handover* é a degradação na ligação rádio ocorrida durante o processo de espera, ou seja, do atraso decorrido para conclusão do processo de *handover*. Quanto maior o intervalo de espera, maior a degradação na qualidade da comunicação. Por este motivo, quando são utilizadas filas de espera na arquitectura de uma rede móvel

celular, considera-se um novo parâmetro descritor do seu desempenho, “atraso médio decorrido na fila de espera”  $W_D$ .

Em [HON86, POS85] foram desenvolvidos modelos de tráfego baseados na teoria das cadeias de Markov para análise do desempenho deste tipo de arquitectura. Além das aproximações já consideradas no modelo desenvolvido para uma arquitectura com utilização exclusiva de canais de guarda, considerou-se a seguinte aproximação adicional: o tempo de residência de uma chamada em processo de *handover* em fila de espera (*queue dwell time*  $T_Q$ ), ao fim do qual, na falta de um recurso rádio disponível para atribuição é forçada a terminar, foi considerado como que seguindo uma distribuição exponencial com parâmetro  $\mu_Q = 1/T_Q$  [HON86]. A aproximação seguida foi a seguinte: quando uma chamada entra em fila de espera o tempo de residência (ao fim do qual é forçada a terminar) é dado por  $T_Q$ . Se  $T_i$  corresponder ao tempo de residência que resta (antes de ser forçada a terminar) para a chamada que está na  $i$ -ésima posição da fila, quando uma nova chamada entra em processo de espera, então (pelo facto de a distribuição exponencial ser um processo sem memória)  $T_i$  segue uma distribuição exponencial tal como  $T_Q$ . Se  $N(t)$  representa o estado do sistema no instante de tempo  $t$ , a partir das aproximações anteriores e das propriedades da distribuição exponencial segue que:

$$\begin{aligned}
 P\{N(t+h) = C+k-1 | N(t) = C+k\} &= \\
 P\{X \leq h \text{ ou } T_1 \leq h \text{ ou } \dots T_i \leq h \text{ ou } \dots T_k \leq h\} &= \\
 1 - P\{X > h \text{ e } T_1 > h \text{ e } \dots T_i > h \text{ e } \dots T_k > h\} &= \quad (18) \\
 1 - P\{X > h\}P\{T_1 > h\} \dots P\{T_i > h\} \dots P\{T_k > h\} &= \\
 1 - \exp[-(C\mu_h + k\mu_Q)h] &
 \end{aligned}$$

em que as variáveis  $X, T_1, T_2, \dots, T_k$  são processos aleatórios independentes e identicamente distribuídos. As desigualdades  $X \leq h$  e  $T_i \leq h$  correspondem respectivamente à libertação de um recurso rádio e ao facto de haver progressão das chamadas em fila de espera devido a este processo de libertação de recursos. Demonstra-se assim que este processo é do tipo *nascimento e morte*, podendo ser modelado por uma cadeia de Markov. A figura 4.7 ilustra a cadeia de Markov para esta

arquitectura. Para o estado  $E_j$  da cadeia,  $j$  representa o conjunto dos recursos rádio ocupados por chamadas a decorrer e pelas chamadas que estão em fila de espera. Conforme se pode observar, quando o número de recursos rádio ocupados é superior a  $C$  (número total de recursos rádio disponíveis em cada célula) as chamadas em processo de *handover* são colocadas em fila de espera. Esta é assumida como tendo um comprimento infinito. A probabilidade de estado  $P_j$  é dada por [HON86]:

$$P_j = \begin{cases} \frac{(\lambda_n + \lambda_h)^j}{j! \mu_C^j} P_0 & \text{com: } 0 \leq j \leq C - C_h \\ \frac{(\lambda_n + \lambda_h)^{(C-C_h)} \lambda_h^{j-(C-C_h)}}{j! \mu_C^j} P_0 & \text{com: } C - C_h + 1 \leq j \leq C \\ \frac{(\lambda_n + \lambda_h)^{(C-C_h)} \lambda_h^{j-(C-C_h)}}{C! \mu_C^C \prod_{i=1}^{j-C} (C\mu_C + i\mu_Q)} P_0 & \text{com: } j \geq C + 1 \end{cases} \quad (19)$$

onde:

$$P_0 = \left[ \sum_{k=0}^{C-C_h} \frac{(\lambda_n + \lambda_h)^k}{k! \mu_C^k} + \sum_{k=C-C_h+1}^C \frac{(\lambda_n + \lambda_h)^{C-C_h} \lambda_h^{k-(C-C_h)}}{k! \mu_C^k} + \sum_{k=C+1}^{\infty} \frac{(\lambda_n + \lambda_h)^{C-C_h} \lambda_h^{k-(C-C_h)}}{C! \mu_C^C \prod_{i=1}^{k-C} (C\mu_C + i\mu_Q)} \right]^{-1} \quad (20)$$

A partir do estabelecimento das equações de transição de estado (obtidas directamente do diagrama da figura 4.7) chega-se às expressões para a probabilidade de bloqueio no estabelecimento de novas chamadas  $P_B$  e de falha no processo de *handover*  $P_{fh}$  [HON86, POS85].

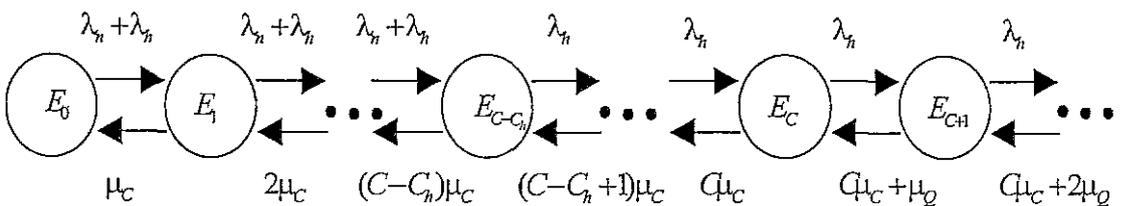


Figura 4.7 - Diagrama de transição de estados da cadeia de Markov para a arquitectura considerada.

A probabilidade de bloqueio no estabelecimento de novas chamadas  $P_B$  é igual à soma das probabilidades associadas aos estados em que o número de recursos rádio ocupados é igual ou superior a  $C - C_h$ .

$$P_B = \sum_{j=C-C_h}^{\infty} P_j \quad (21)$$

A probabilidade de ocorrência de falha no processo de *handover*  $P_{fh}$  pode ser estimada pela fracção média de chamadas que uma vez armazenadas em fila de espera são forçadas a abandonar a mesma antes de serem servidas, devido à degradação insustentável da qualidade da ligação rádio e ao atraso excessivo em espera. Este acontecimento pode ser matematicamente traduzido pela equação seguinte:

$$P_{fh} = \sum_{k=0}^{\infty} P_{C+k} P_{fh|k} \quad (22)$$

em que  $P_{fh|k}$  representa a probabilidade de ocorrência de falha no processo de *handover* por parte de uma chamada que se encontra armazenada na posição  $k+1$  da fila, ou seja, de uma chamada que quando chega à fila encontra  $k$  chamadas à espera de atribuição de um recurso rádio para finalização do processo de *handover*. Para finalização com sucesso do processo de *handover* importa que a chamada seja encaminhada progressivamente para a primeira posição da fila e que lhe seja atribuído um recurso antes de abandonar a área de *handover* em tempo útil. Para tal importa que as  $k$  chamadas que lhe estão à frente sejam atendidas ou terminadas.

Considerando que  $P(i|i+1)$  representa a probabilidade de que uma chamada armazenada na posição  $i+1$  da fila possa mover-se para a posição  $i$  antes de abandonar a área de *handover* em tempo útil, para as aproximações anteriores tem-se que:

$$1 - P_{fh|k} = \left[ \prod_{i=1}^k P(i|i+1) \right] \cdot P_s \quad (23)$$

$P_s$  é igual a probabilidade de que seja atribuído um recurso rádio ao móvel quando a chamada atinge a primeira posição da fila.

Para uma chamada que se encontra na posição  $i + 1$  da fila de espera existem duas alternativas: é forçada a avançar em direcção à posição inicial ou a terminar. É forçada a avançar se o tempo de residência que resta na área de *handover*  $T_{i+1}$  for superior a (1) pelo menos um dos tempos de residência na área de *handover* das chamadas que estão à sua frente  $T_j, j = 1, 2, \dots, i$ , ou (2) ao tempo  $X$  que resta na ocupação de um recurso rádio por parte de chamadas a decorrer na célula:

$$1 - P(i | i + 1) = P\left\{T_{i+1} \leq X \text{ ou } T_{i+1} \leq T_j, j = 1, 2, \dots, i\right\}, i = 1, 2, \dots \quad (24)$$

Uma vez que o processo de movimento de cada móvel é independente dos demais e que a distribuição exponencial é um processo sem memória temos que:

$$1 - P(i | i + 1) = \left(\frac{\mu_o}{C\mu_h + \mu_o}\right) \left(\frac{1}{2}\right)^i, i = 1, 2, \dots \quad (25)$$

Finalmente, a probabilidade de atribuição de um recurso rádio ao móvel quando a chamada atinge a primeira posição da fila  $P_s$  é dada por:

$$P\{T_1 > X\} = \frac{\mu_o}{C\mu_h + \mu_o} \quad - \quad (26)$$

A obtenção da probabilidade de falha no processo de *handover*  $P_{fh}$  é obtida a partir da resolução iterativa do sistema composto pelas equações (19), (20) e (23)-(26).

Para as aproximações consideradas anteriormente, em que não são considerados os efeitos resultantes do caminho seguido pelo móvel durante o processo de comunicação, a probabilidade de terminação forçada de chamadas a decorrer  $P_T$  é novamente dada pela equação (17).

Conforme foi salientado anteriormente, o atraso médio decorrido por parte de uma chamada em processo de *handover* armazenada em fila de espera,  $W_D$  é um parâmetro importante na análise do desempenho deste tipo de estratégia. Em [POS85] obtiveram-se estimativas para este parâmetro. Assim, verificou-se que o atraso médio sofrido por uma chamada em processo de *handover* posta em fila de espera devido ao facto de não haver recursos rádio disponíveis é dado por:

$$W_D = \frac{1}{\mu_c + \mu_h} \frac{1}{C - \frac{\lambda_h}{\mu_c + \mu_h}} \quad (27)$$

Como se pode verificar, este atraso não depende do número de canais de guarda utilizados, mas sim do tempo restante na utilização de cada recurso rádio por parte de chamadas a decorrer. Isto tem a ver com o facto de que, uma vez a decorrer, não se pode determinar a origem da chamada (se é do tipo *handover* ou se acabou de ser estabelecida, não tendo realizado nenhum *handover*). Desta forma, uma vez posta em fila de espera o número de canais de guarda não influencia o atraso decorrido.

Em [HON86], Hong *et al* analisaram o comportamento dos parâmetros  $P_B$  e  $P_T$  em função da taxa de estabelecimento de novas chamadas  $\lambda_h$ , para diferentes números de canais de guarda  $C_h$ . Como era de se esperar, a principal conclusão obtida é que o ganho conseguido na diminuição de  $P_T$  com o aumento do número de canais de guarda utilizados é ainda mais significativo quando se utilizam filas de espera. A título de exemplo, quando o número de canais de guarda passa de 3 para 4, para um valor de tráfego oferecido de  $0.1 \text{ Erl/Km}^2$ , a diminuição no valor de  $P_T$  (quando se passa a utilizar canais de guarda em conjunto com a fila de espera para chamadas em processo de *handover*) é da ordem dos 30 %, enquanto que a variação no valor de  $P_B$  é insignificante.

Em [POS85] Posner *et al* verificaram que a utilização de uma fila de espera com comprimento finito  $L$  igual a 3 correspondia a uma probabilidade de bloqueio no estabelecimento de novas chamadas igual a  $\approx 9,6510^{-5}$ , enquanto que o valor obtido utilizando apenas canais de guarda correspondia a um valor igual a  $\approx 6,4610^{-2}$  (ganho bastante significativo). Verificaram também que o atraso médio sofrido pelas chamadas em processo de *handover* postas em fila de espera era de cerca de 2,3 segundos, o que já é um valor considerável para o atraso máximo permitido. No entanto, verificaram que o valor obtido para a probabilidade de uma chamada em processo de *handover* ser posta em fila de espera era de cerca de  $\approx 3.510^{-3}$  o que é um valor bastante baixo. A conclusão a que se chega é que a introdução da fila de espera pode trazer mais benefícios do que prejuízos, uma vez que resulta numa diminuição acentuada na probabilidade de ocorrência de falha por parte de chamadas em processo de *handover*

$P_{jh}$  à custa de uma variação pouco significativa na probabilidade de bloqueio no estabelecimento de novas chamadas  $P_B$ . No entanto, o comprimento da fila de espera deve ser limitado a um valor baixo (3 é uma boa aproximação), por forma a que o atraso sofrido pelas chamadas em processo de *handover* que lá são postas não seja superior ao tempo decorrido enquanto o móvel se encontra na área de *handover*, ocasionando a terminação forçada da chamada por falha na ligação rádio.

#### 4.3.3 Utilização de filas de espera com ordenação dinâmica para chamadas em processo de *handover*

Em [TEK92] Tekinay *et al* propuseram e analisaram uma arquitectura de rede semelhante àquela que foi descrita na secção anterior, mas no entanto com duas diferenças:

- Não são utilizados canais de guarda para atribuição às chamadas em processo de *handover*.
- É novamente utilizada uma fila de espera para armazenamento temporário de chamadas em processo de *handover*, devido à inexistência de recursos rádio disponíveis para atribuição. No entanto, ao contrário do método anterior, esta fila de espera não é organizada como um FIFO. Ao invés, está continuamente a ser reorganizada com base em prioridades dinâmicas de atendimento. Estas prioridades são estabelecidas a partir de medições do nível médio do sinal rádio recebido a partir da respectiva estação base.

Conforme foi descrito na secção anterior, o intervalo de tempo máximo permitido a cada chamada em fila de espera está directamente associado à rapidez com que se dá a degradação da ligação rádio com a estação base de origem, ou seja, com o tempo máximo permitido para residência na área de *handover*. Esta degradação está por sua vez associada a diversos factores tais como a velocidade e direcção de deslocamento do móvel bem como a área de cobertura da célula de origem. Sendo assim, a organização da fila de espera como um FIFO pode não ser a melhor solução, uma vez que existem chamadas com maior urgência de finalização do processo de *handover* do que outras, sob pena de serem forçadas a terminar devido a maior rapidez com que se dá a degradação na ligação rádio com a estação base de origem. O objectivo foi desenvolver

um novo método de organização e gestão interna da fila de espera que desse prioridade às chamadas com maior rapidez de degradação da ligação rádio, ou seja, aos móveis cujos níveis médios de sinal na ligação rádio estivessem mais próximos do limiar mínimo de sensibilidade e desta forma mais próximos da ocorrência da terminação forçada da chamada.

O custo associado a introdução deste método na arquitectura da rede será uma vez mais um pequeno aumento na probabilidade de bloqueio no estabelecimento de novas chamadas  $P_b$ , uma vez que o método impõe que não sejam atribuídos recursos rádio às novas chamadas em fase de estabelecimento enquanto houver chamadas em processo de *handover* em fila de espera. Este método também pode incluir o esquema de atribuição de canais de guarda às chamadas em processo de *handover*. O resultado é uma diminuição na probabilidade de uma chamada ser posta em fila de espera e consequente aumento na probabilidade de bloqueio no estabelecimento de uma nova chamada. O algoritmo proposto é o seguinte:

- O nível médio do sinal rádio é monitorado periodicamente para cada chamada em fila de espera.
- A seguir é preenchida uma tabela de prioridades de acesso com base nos resultados obtidos. À medida que a degradação na ligação rádio com a estação base de origem aumenta (o que quer dizer que o nível médio do sinal rádio está a aproximar-se do limiar inferior de sensibilidade - *receiver threshold*), a prioridade de atendimento da chamada aumenta.
- A chamada com maior prioridade de atendimento será aquela à qual será atribuído um recurso rádio quando houver um novamente disponível.

Uma vez que o algoritmo define as prioridades de atendimento com base nas medições do nível médio de sinal, foi designado pelos seus autores como “algoritmo de estabelecimento de prioridades no atendimento baseado em medições contínuas do nível médio do sinal recebido” (*Measurement-Based Prioritization Scheme - MBPS*). Por forma a avaliar o seu desempenho no que respeita à gestão do tráfego oferecido, os autores desenvolveram um modelo de tráfego que foi utilizado num processo de simulação. Além das aproximações consideradas nos modelos de tráfego

desenvolvidos para as arquitecturas anteriores, foram ainda consideradas as seguintes aproximações:

- O tráfego associado às chamadas em processo de *handover* foi mantido constante, enquanto se variava o tráfego total oferecido. Foram considerados dois casos para o peso da componente do tráfego por *handover* relativamente ao tráfego total: 20% e 50%.
- O tempo total decorrido na ocupação de um recurso rádio (*channel holding time*,  $T_C$ ) foi considerado como seguindo uma distribuição exponencial com média igual a 60s. O tempo total de duração de uma chamada foi considerado como seguindo uma distribuição exponencial com média igual a 100s.
- A taxa de decaimento do nível médio de sinal na ligação rádio com a estação base de origem foi aproximada por uma função linear constante e directamente relacionada com a distribuição assumida para a velocidade de deslocamento de cada móvel  $V$ , que por sua vez foi aproximada por uma distribuição normal.
- O intervalo de tempo máximo permitido para permanência em fila de espera, sem haver queda de chamada, foi relacionado com a distribuição normal assumida para a velocidade de deslocamento do móvel. Quanto maior a velocidade menor o tempo máximo permitido para permanência em fila de espera, devido à maior degradação na ligação rádio com a estação base. Por este motivo, na prática a fila de espera tem um comprimento finito.

As curvas produzidas a partir dos resultados do processo de simulação permitem avaliar o desempenho do algoritmo através dos parâmetros seguintes:

- Probabilidade de bloqueio no estabelecimento de novas chamadas  $P_B$ .
- Probabilidade de terminação forçada de chamadas a decorrer  $P_T$ .
- Fracção do tráfego oferecido que é rejeitado devido à inexistência de recursos rádio.
- Atraso médio sofrido em fila de espera  $W_D$ .

Os resultados obtidos pelo processo de simulação são os seguintes:

- O aumento na probabilidade de terminação forçada de chamadas a decorrer  $P_T$  com o aumento do tráfego oferecido é menor quando comparado com o método FIFO. Esta diminuição é ainda mais acentuada se o peso do tráfego oferecido pelas chamadas em processo de *handover* relativamente ao tráfego total aumenta.
- O custo da utilização deste algoritmo (no que respeita ao aumento de  $P_B$ ) relativamente ao método FIFO é menor, já que se conseguem valores inferiores para  $P_B$  (para a gama de variação do tráfego oferecido que foi considerada no processo de simulação).
- A fracção do tráfego oferecido que é rejeitada devido à inexistência de recursos rádio é menor para este algoritmo. Uma vez que o método de atribuição de prioridades MBPS não utiliza canais de guarda destinados exclusivamente à atribuição às chamadas em processo de *handover*, o valor desta figura de mérito é menor quando comparado com o método FIFO anteriormente analisado.
- Uma vez que este algoritmo procede à reordenação contínua das chamadas em fila de espera não é de estranhar que os resultados do processo de simulação indiquem que o atraso médio sofrido pelas chamadas em fila de espera  $W_D$  para o método MBPS seja menor que o obtido para as chamadas em fila de espera através do método FIFO.

A conclusão final é que este algoritmo permite obter melhorias consideráveis no desempenho da rede relativamente aos algoritmos anteriores. Nomeadamente, consegue-se uma redução ainda mais significativa na probabilidade de terminação forçada de chamadas a decorrer  $P_T$ , bem como uma redução no valor da probabilidade de bloqueio no estabelecimento de novas chamadas  $P_B$  relativamente aos métodos anteriores, devido ao facto de não serem utilizados canais de guarda para atribuição exclusiva às chamadas em processo de *handover*.

#### 4.3.4 Utilização de canais de guarda para chamadas em processo de *handover* e de filas de espera para chamadas em fase de estabelecimento

Quando o grau de congestão de uma rede celular atinge valores muito elevados, torna-se bastante desagradável do ponto de vista do utilizador a impossibilidade da realização de chamadas. Em [GUE88], Guérin descreveu e analisou uma terceira variante para a arquitectura de uma rede móvel celular. A arquitectura descrita por Guérin utiliza novamente um número finito de canais de guarda para serem atribuídos às chamadas em processo de *handover*. A diferença relativamente aos métodos anteriores é a implementação de uma fila de espera onde são colocadas as chamadas em fase de estabelecimento que não podem ser atendidas. Os objectivos desta variante são obviamente os seguintes:

- Aumentar a capacidade efectiva da rede através da utilização da fila de espera para chamadas em fase de estabelecimento, diminuindo a probabilidade de bloqueio no seu estabelecimento  $P_B$ .
- Diminuir a probabilidade de terminação forçada de chamadas a decorrer  $P_T$ .

O modelo de tráfego para esta arquitectura de rede é uma *cadeia de Markov* bidimensional. Cada estado da cadeia é caracterizado pelo par  $(i_1, i_2)$  em que  $i_1$  representa o número total de novas chamadas em fila de espera e  $i_2$  representa o número total de recursos rádio ocupados por ambos os tipos de chamada. O diagrama de transição de estados bem como as equações de transição de estados resultam num processo bastante complexo de análise matemática e por este motivo não são aqui considerados em pormenor [GUE88]. Guérin obteve expressões fechadas para  $P_B$  e  $P_T$  que possibilitaram (a exemplo do que foi feito anteriormente) estudar as variações destes parâmetros com diversos parâmetros de entrada tais como o número de canais de guarda  $C_h$  e a taxa de estabelecimento de novas chamadas  $\lambda_n$ . Guérin verificou que:

- A probabilidade de bloqueio de chamadas em processo de *handover*  $P_{fh}$  diminui a uma taxa muito maior (a medida que o número de canais de guarda aumenta) que a taxa relativa ao aumento do atraso sofrido por novas chamadas.

- O tráfego total escoado por cada célula da rede é maior quando é utilizada uma fila de espera para o tráfego relativo às novas chamadas que não podem ser atendidas devido à falta de recursos. Guérin verificou que o ganho conseguido relativamente a um sistema com canais de guarda e sem filas de espera era de cerca de 2,4 Erl para 44 canais de tráfego atribuídos por célula e um tráfego total oferecido de 38 Erl.
- A utilização de filas de espera para atribuição às novas chamadas em fase de estabelecimento tem uma influência muito pequena no aumento da probabilidade de terminação forçada de chamadas a decorrer.

#### 4.3.5 Repetição continuada de tentativas de estabelecimento de chamadas e número limitado de assinantes registados por célula

Em [PHU97] Phuoc analisou o efeito resultante da repetição continuada de tentativas de estabelecimento de uma nova chamada (*retrial attempts*). Este processo tem como consequência directa uma degradação da qualidade do serviço prestado, uma vez que, resultando num efeito de bola de neve, aumenta o tráfego oferecido a cada célula da rede.

Outro aspecto que também é estudado é o facto de, na prática, o número de assinantes registados em cada célula da rede e a gerar novas chamadas ser limitado. É de notar que nos modelos de tráfego considerados até aqui considerou-se sempre que o universo de assinantes era infinito, o que na prática é falso. Este efeito resulta em valores inferiores para a probabilidade de bloqueio no estabelecimento de novas chamadas  $P_B$  relativamente aos modelos de tráfego que consideram um universo infinito de assinantes registados em cada célula da rede. No entanto, o mecanismo de *retrial* contribui para um aumento da probabilidade de falha no processo de *handover* por parte de chamadas a decorrer  $P_{jh}$ , uma vez que aumenta a taxa de reutilização dos recursos rádio de cada célula. Uma forma de solucionar este problema é a utilização de canais de guarda para atribuição exclusiva às chamadas em processo de *handover*.

Foram consideradas as mesmas aproximações já abordadas em modelos de tráfego anteriores, pelo que o comportamento da rede pode ser avaliado por uma única célula.

A figura 4.8 ilustra os três estados pelos quais passa cada assinante do serviço para o modelo de tráfego considerado.

A probabilidade de ocorrência de uma nova tentativa no estabelecimento de uma chamada é dada por  $\theta$ . Em cada instante de tempo cada assinante é considerado como que estando num dos três estados seguintes:

- Estado livre (*idle*) - O tempo de permanência  $I$  neste estado por parte de um assinante é considerado como que seguindo uma distribuição exponencial com parâmetro  $1/\alpha$ . Durante a fase de estabelecimento de uma nova chamada a taxa de estabelecimento de chamadas com sucesso à primeira tentativa é igual a  $\alpha(1-\theta)$ . Por outro lado, a probabilidade de rejeição (primeira tentativa) e portanto de passagem para o estado *retrial* é dada por  $\theta$ . A taxa de chamadas que passam para o estado *retrial* é dada por  $\alpha\theta$ .

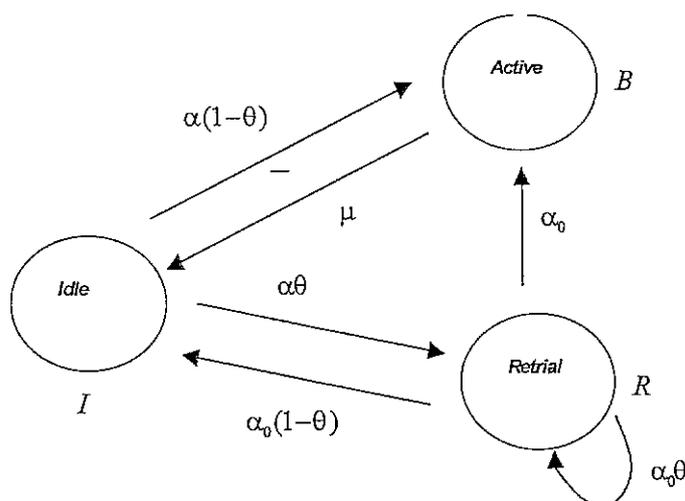


Figura 4.8 - Comportamento do assinante.

- Estado de nova tentativa (*retrial*) - O tempo de permanência  $R$  neste estado por parte de um assinante é considerado como que seguindo uma distribuição exponencial com parâmetro  $1/\alpha_0$ . A taxa de estabelecimento de chamadas com sucesso a partir deste estado e de passagem para o estado *active* é dada por  $\alpha_0$ . Caso a chamada volte a ser novamente rejeitada existem duas alternativas. A primeira é o assinante retornar para o estado livre, abandonado a chamada com probabilidade  $1-\theta$ , sendo que a taxa de passagem de chamadas para o estado *idle*

é dada por  $\alpha_0(1-\theta)$ . A outra é continuar no estado de *retrial* com probabilidade  $\theta$  (taxa de passagem igual a  $\alpha_0\theta$ ).

- Estado activo (*active*) - O tempo de permanência  $B$  neste estado por parte de um assinante (tempo decorrido na realização de uma chamada) é considerado como que seguindo uma distribuição exponencial com parâmetro  $1/\mu$ . Desta forma, a taxa de finalização de chamadas a decorrer (em processo normal) e de passagem para o estado *idle* é igual a  $\mu$ .

É importante notar que o valor para a probabilidade de ocorrência de novas tentativas de estabelecimento de chamadas  $\theta$  é independente do número de tentativas que já tenham sido realizadas anteriormente. Por outro lado, não são permitidas repetições de tentativas de atribuição de recursos rádio por parte de chamadas em processo de *handover*.

Segundo o modelo de tráfego desenvolvido, o processo de evolução de uma chamada ao longo do tempo constitui um processo estacionário sem memória e contínuo no tempo, podendo ser representado por uma cadeia de Markov. Cada estado  $E_{Y,Z}$  da cadeia (ao qual está associado uma probabilidade de ocorrência  $P_{Y,Z}$ ) indica o estado de evolução de uma chamada num dado instante de tempo e é descrito por meio de duas variáveis aleatórias  $Y$  e  $Z$ , que representam respectivamente o número total de recursos rádio ocupados em cada instante por chamadas a decorrer e o número total de assinantes à espera de uma nova tentativa. A partir do diagrama de transição de estado foram derivadas as equações de transição de estado que por sua vez levaram à obtenção das probabilidades de ocorrência de cada estado.

A partir das respectivas probabilidades de estado os autores obtiveram uma expressão para a probabilidade de bloqueio no estabelecimento de novas chamadas:

$$P_B = \frac{\lambda_U + \lambda_B}{\lambda_n} \quad (28)$$

em que:

- $\lambda_U$  é a taxa média de passagem de chamadas do estado *active* para o estado *retrial*, ou seja, chamadas rejeitadas à primeira tentativa e que tentam novamente o seu estabelecimento. Segue uma distribuição de *Poisson*.
- $\lambda_B$  é a taxa média de passagem de chamadas do estado *retrial* para o estado *idle*, ou seja, de chamadas definitivamente rejeitadas. Segue uma distribuição de *Poisson*.
- $\lambda_n$  é a taxa média de estabelecimento de novas chamadas. Segue uma distribuição de *Poisson*.

Outro parâmetro que importa considerar é o número médio de ocorrência de repetições na tentativa de atribuição de um recurso rádio por parte de cada assinante:

$$\eta = \frac{\lambda_R + \lambda_F}{\lambda_F} \quad (29)$$

em que:

- $\lambda_R$  é a taxa média de ocorrência de repetições na tentativa de estabelecimento de novas chamadas.
- $\lambda_F$  é a taxa média de estabelecimento de novas chamadas à primeira tentativa.

Para avaliação do desempenho da rede sob o efeito do mecanismo de *retrial* e do facto de o universo de assinantes ser finito, os autores estudaram o processo de variação do parâmetro  $\eta$  em função do tráfego total oferecido para diferentes valores de  $\theta$ . Como era de se esperar, o mecanismo de *retrial* acarreta um aumento no número de tentativas de estabelecimento de novas chamadas bem como na probabilidade de bloqueio à primeira tentativa. Observou-se que para valores de  $\theta$  superiores a 0,9,  $\eta$  cresce exponencialmente com o tráfego oferecido. Por outro lado, para diferentes valores de  $\theta$ , a diferença entre os valores de  $\eta$  obtidos com o aumento do tráfego oferecido é significativa.

Conforme salientado atrás, com o objectivo de melhorar a qualidade do serviço prestado, os autores analisaram o impacto da utilização de canais de guarda reservados às chamadas em processo de *handover* na arquitectura de rede celular aqui considerada. Para derivação do modelo de tráfego considerou-se que a taxa média de estabelecimento de novas chamadas é dada por  $\lambda_n$  enquanto a taxa média de chamadas

em processo de *handover* é dada por  $\lambda_n$ . O comportamento de cada assinante continua a ser descrito pelo diagrama de três estados ilustrado na figura 4.8. Esta arquitectura de rede pode novamente ser modelada por uma cadeia de Markov semelhante à anterior.

As figuras de mérito descritoras do desempenho desta arquitectura que foram consideradas pelos autores são as seguintes: probabilidade de bloqueio no estabelecimento de novas chamadas à primeira tentativa  $P_{B1}$  e probabilidade de falha durante a realização do processo de *handover*  $P_{fh}$ .

Como era de se esperar, verificou-se um aumento em  $P_B$  e  $P_{fh}$  com o aumento no tráfego oferecido para diferentes valores de  $\theta$ . Verificou-se também um aumento em  $P_{B1}$  e  $P_{fh}$  com o aumento da percentagem do tráfego oferecido por *handover* relativamente ao tráfego associado ao estabelecimento de novas chamadas, no tráfego total oferecido (quociente  $\frac{\lambda_n}{\lambda_n + \lambda_n}$  com a soma  $\lambda_n + \lambda_n$ ). Finalmente, verificou-se que a probabilidade de bloqueio no estabelecimento de novas chamadas à primeira tentativa  $P_{B1}$  é praticamente insensível ao aumento deste quociente, como já era de esperar. No entanto, a probabilidade de falha durante a realização do processo de *handover*  $P_{fh}$  aumenta com o aumento deste quociente como também era de esperar, já que este efeito está associado a um aumento na contribuição de  $\lambda_n$  relativamente a  $\lambda_n$ .

#### 4.3.6 Utilização do método *directed retry* - DR

O método *directed retry* (DR) [EKL86, EVE90] baseia-se no facto de, na prática, normalmente existir uma sobreposição das áreas de dominância das diferentes células que compõem a arquitectura de rede. Este efeito traduz-se na possibilidade de realização de chamadas por uma outra estação base que não aquela que apresenta o nível médio de sinal mais forte na ligação rádio. A condição fundamental é que a qualidade da ligação rádio esteja dentro dos níveis necessários à manutenção da qualidade da comunicação. O método DR baseia-se assim neste efeito, possibilitando a utilização de um recurso rádio de uma célula vizinha àquela onde se encontra ancorado, quando não existam recursos rádio disponíveis durante a fase de estabelecimento de uma chamada e sem prejuízo da qualidade da ligação. As vantagens conseguidas com a utilização do método DR são as seguintes:

- Por um lado diminuir a probabilidade de bloqueio no estabelecimento de novas chamadas  $P_B$ .
- Por outro rentabilizar a utilização dos recursos rádio atribuídos a cada célula da rede (em termos do aumento do tráfego escoado quando comparado com os métodos FCA clássicos). Esta rentabilização está associada a uma melhor distribuição no tráfego transportado por cada uma das células, conforme se verá mais adiante.

O algoritmo genérico de implementação do método DR resume-se no seguinte:

- Sempre que se dá início ao processo de estabelecimento de uma nova chamada, a estação base da célula de residência do móvel executa o procedimento necessário à atribuição de um recurso rádio disponível.
- Na eventualidade da inexistência de recursos rádio disponíveis, a estação base envia ao móvel um relatório contendo uma lista de estações base vizinhas que poderiam suportar a chamada com a qualidade mínima exigida.
- O móvel escolhe a estação base vizinha cujo nível do sinal por ela emitido corresponda ao valor mais elevado na recepção. Caso o nível de sinal na ligação rádio não seja adequado ao processo de transmissão a chamada é bloqueada.
- Caso o nível do sinal recebido seja adequado é enviada uma mensagem a partir do móvel para a estação base alvo solicitando a atribuição de um recurso rádio. Na eventualidade da existência de um recurso rádio disponível a chamada é estabelecida, caso contrário é bloqueada.

Importa salientar que o método DR permite no máximo duas tentativas de estabelecimento de cada chamada. A primeira na célula de residência do móvel e a segunda na célula escolhida pelo algoritmo. Caso não seja possível a atribuição de um recurso rádio nesta célula, a chamada é definitivamente rejeitada, já que não é permitida uma segunda tentativa de DR para outra célula. Os objectivos desta restrição são os seguintes:

- Impedir que a chamada seja suportada por uma ligação rádio de má qualidade.

- Impedir que sejam utilizados recursos rádio de estações base distantes, o que originaria um aumento na degradação da qualidade de chamadas que estivessem a decorrer na sua área de dominância, devido à interferência co-canal e por canal adjacente.
- O atraso decorrido no estabelecimento de uma chamada poderia ser demasiado longo se fosse permitida uma terceira tentativa (segunda re-tentativa).

O método DR não utiliza o princípio da atribuição fixa de recursos (FCA). Isto porque podem ser utilizados recursos de células vizinhas à célula de residência do móvel. Também não é um método baseado na atribuição dinâmica de recursos (DCA). Ou seja, o DR situa-se numa posição intermédia.

Em [EKL86] Eklundh desenvolveu um modelo de tráfego para uma rede móvel celular que utiliza o método DR. No desenvolvimento deste modelo, além das aproximações normalmente consideradas nos modelos anteriormente descritos (modelos baseados no método de atribuição FCA), foi ainda considerada a seguinte aproximação: assumiu-se que um móvel tem a probabilidade  $p_o$  de poder auscultar estações base vizinhas e deste modo realizar DR. Este parâmetro está directamente relacionado com a maior ou menor influência que o tráfego gerado em cada célula tem naquelas que lhe são vizinhas. Quanto maior for o seu valor maior será a probabilidade de ocorrência de *overflow* por DR do tráfego não absorvido numa célula para células vizinhas. É importante salientar que o tráfego por *overflow* não pode ser considerado como que seguindo uma distribuição de *Poisson*, ao contrário daquilo que é assumido para o tráfego associado ao estabelecimento de novas chamadas ou associado às chamadas em processo de *handover*. O modelo desenvolvido pelo autor baseia-se numa arquitectura de rede composta por grupos ou *clusters* de sete células (padrão de reutilização  $N_{cg} = 7$ ). Cada célula é um servidor ao qual é atribuído um número fixo de recursos rádio (método de atribuição FCA). O tráfego oferecido a cada célula pode ser de um dos três tipos seguintes:

- Tráfego associado ao estabelecimento de novas chamadas que, na eventualidade da inexistência de recursos rádio disponíveis na célula de residência, e podendo manter uma ligação rádio com a qualidade mínima necessária com pelo menos uma

das suas estações base vizinhas, podem realizar DR (estão a realizar a primeira tentativa). Este tráfego segue uma distribuição de *Poisson*.

- Tráfego associado ao estabelecimento de novas chamadas que, ao contrário do anterior, não podem manter uma ligação rádio com a qualidade mínima necessária com nenhuma das suas estações base vizinhas, não podendo realizar DR. Por este motivo, as chamadas associadas a este tipo de tráfego somente dispõem de uma tentativa de estabelecimento. Caso não existam recursos disponíveis na célula de residência o tráfego é bloqueado. Este tráfego segue uma distribuição de *Poisson*.
- Tráfego por *overflow*. Este tráfego está associado a chamadas em fase de estabelecimento, provenientes por DR de células vizinhas e que por este motivo estão na sua segunda tentativa. Este tipo de tráfego não segue a distribuição de *Poisson*, sendo por este motivo caracterizado pela sua média  $m$  e variância  $v$ .

Cada uma das seis células do primeiro anel de células vizinhas à célula central do *cluster* funciona como um servidor secundário do tráfego por *overflow* proveniente da célula central (ver figura 4.9) ou de qualquer uma das células envolventes. Se a taxa de estabelecimento de novas chamadas é igual a  $\lambda_n$  e se a probabilidade de um móvel poder realizar DR é igual a  $p_0$ , então a taxa de chamadas que não podem realizar DR, e que por este motivo devem ser absorvidas na célula para a qual são dirigidas sob pena de serem bloqueadas é dada por:

$$\lambda_{n1} = \lambda_0 + (1 - p_0)\lambda_n \quad (30)$$

em que:

- O termo  $\lambda_0$  corresponde ao tráfego associado às chamadas que já procederam a primeira tentativa de DR e que não foi absorvido devido à falta de recursos rádio disponíveis.
- O termo  $(1 - p_0)\lambda_n$  corresponde ao tráfego associado às chamadas que não podem realizar DR.

A taxa de chamadas que podem realizar DR, constituindo tráfego por *overflow* para células vizinhas é dada por:

$$\lambda_{n2} = p_0\lambda_n \quad (31)$$

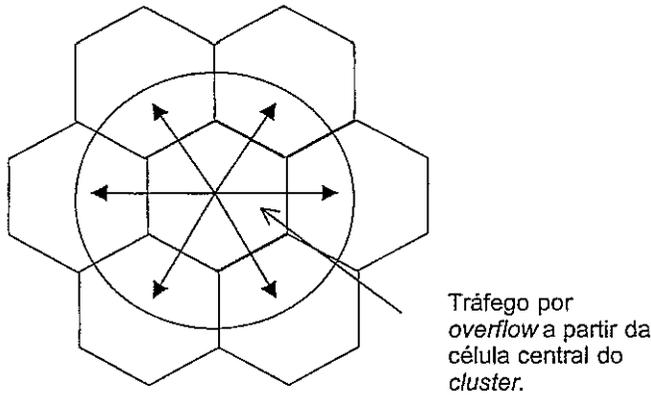


Figura 4.9 - Cluster de células para o modelo de tráfego associado ao DR.

Eklundh desenvolveu um modelo analítico simples para estudar o desempenho deste método. O seu objectivo foi obter expressões fechadas para a probabilidade de bloqueio no estabelecimento de novas chamadas  $P_B$ . Esta resulta da soma de duas componentes:

- Bloqueio no estabelecimento de chamadas que não podem realizar DR, por não haver sobreposição de cobertura com células vizinhas:  $(1 - p_0)P_{B1}$ .
- Bloqueio no estabelecimento de chamadas que realizam *overflow* por DR para células vizinhas:  $p_0 P_{B1} P_{B2}$ .

em que:

- $P_{B1}$  representa o valor da probabilidade de bloqueio à primeira tentativa.
- $P_{B2}$  representa o valor da probabilidade de bloqueio à segunda tentativa (bloqueio do tráfego por *overflow*).

Sendo assim, resulta para a probabilidade de bloqueio no estabelecimento de chamadas em redes com implementação do método DR:

$$P_B = (1 - p_0)P_{B1} + p_0 P_{B1} P_{B2} \quad (32)$$

Para analisar os efeitos resultantes da aplicação do método DR e a eficácia da sua aplicação numa arquitectura de rede celular, de acordo com os dois tópicos apresentados anteriormente, Eklundh considerou duas situações distintas:

- Numa primeira análise considerou o tráfego uniformemente distribuído ao longo das sete células do *cluster*. Os resultados obtidos permitiram ao autor quantificar o ganho obtido com a utilização do DR relativamente ao FCA básico.
- Numa segunda análise considerou que o tráfego gerado na célula central do *cluster* tinha uma densidade média superior à densidade média do tráfego gerado nas seis células vizinhas (cerca de três vezes). Considerou ainda o tráfego gerado em cada uma das células vizinhas como uniformemente distribuído. Os resultados obtidos permitiram quantificar a influência do tráfego por *overflow* das chamadas que podem realizar DR relativamente às chamadas que não podem realizar DR, na partilha de recursos de cada célula.

### Tráfego uniformemente distribuído

Os resultados obtidos foram os seguintes:

- À medida que o tráfego oferecido aumenta,  $P_b$  e  $P_{b1}$  aumentam. No entanto, a probabilidade total de bloqueio no estabelecimento de novas chamadas  $P_b$  é sempre menor do que a probabilidade de bloqueio no estabelecimento de chamadas à primeira tentativa, ou seja, de chamadas que não podem realizar DR,  $P_{b1}$ . Concluiu-se ainda que o ganho na utilização do método DR relativamente ao método FCA é tanto maior quanto maior a probabilidade de *overlap* ou, o que é dizer o mesmo, quanto maior for a probabilidade de uma chamada realizar DR. Este ganho é expresso na diferença entre ambos os parâmetros. A título de exemplo: para uma probabilidade de sobreposição  $p_0$  igual a 0,1 e para um tráfego de 8,5 Erl, a probabilidade de bloqueio no estabelecimento de novas chamadas é igual a  $\approx 12\%$ . No entanto, para uma probabilidade de sobreposição  $p_0$  igual a 0,9 e para o mesmo valor para o tráfego oferecido a probabilidade de bloqueio no estabelecimento de novas chamadas reduz-se a  $\approx 6\%$ .
- Concluiu-se também que, à medida que a probabilidade de ocorrência de sobreposição  $p_0$  aumenta, aumenta também o valor da taxa média de utilização de um recurso rádio da célula. Este aumento é, no entanto, cada vez menos pronunciado à medida que a probabilidade de bloqueio no estabelecimento de novas chamadas  $P_b$  aumenta (como era de se esperar, uma vez que com este

aumento passa a haver mais tráfego absorvido, rentabilizando ainda mais a utilização de cada recurso rádio da célula).

A conclusão a que se chegou é que para situações atípicas, em que o tráfego se encontra uniformemente distribuído ao longo das células da rede, a implementação do DR origina um aumento na rentabilização dos recursos rádio atribuídos a cada célula, bem como diminui a probabilidade de bloqueio no estabelecimento de novas chamadas  $P_B$ . Portanto, nestas condições, o método DR pode constituir uma boa alternativa relativamente à utilização do FCA básico.

### Tráfego não uniformemente distribuído

Importa analisar a situação mais geral, que é aquela em que o tráfego não é gerado de uma forma uniforme ao longo de todas as células da rede. Isto pode influenciar negativamente o acesso dos móveis que não podem realizar DR a um recurso rádio disponível. Para este estudo, o autor efectuou uma modificação relativamente ao modelo utilizado na análise anterior. Passou a considerar o tráfego médio gerado na célula central do *cluster* como sendo cerca de três vezes superior ao tráfego gerado nas restantes células. Os resultados alcançados foram os seguintes:

- A diferença relativa entre  $P_B$  e  $P_{B1}$  é maior quando o tráfego gerado não está distribuído de uma forma uniforme ao longo de todas as células da rede e aumenta com o aumento de  $p_0$ . Este resultado já era esperado.
- A forma como  $p_0$  varia influencia directamente a probabilidade de bloqueio de chamadas associadas a terminais que não podem realizar DR,  $(1 - p_0)$ . O aumento deste parâmetro está directamente associado ao aumento da probabilidade de bloqueio no estabelecimento de novas chamadas associadas a terminais que não podem realizar DR,  $P_{B1}$ . Para valores baixos de  $p_0$ , o aumento do tráfego na célula central do *cluster* tem um pequeno impacto na variação de  $P_B$  e  $P_{B1}$  (isto já era esperado uma vez que nesta situação poucos móveis vão ter oportunidade de realizar DR para as células envolventes). Inversamente (para valores elevados de  $p_0$ ) a influência na variação destes parâmetros já é significativa. É importante notar que a diferença entre  $P_B$  e  $P_{B1}$  é ainda maior devido ao maior volume de tráfego que é gerado.

- Relativamente a  $P_B$ , o aumento do tráfego por *overflow* devido ao aumento do tráfego gerado em células vizinhas cujas áreas de cobertura se sobrepõem e a móveis que podem realizar DR, é compensado pelo aumento no número de móveis que podem fazer uma segunda tentativa de atribuição de um recurso disponível. No entanto, relativamente a  $P_{B1}$ , este mesmo aumento influencia negativamente o seu comportamento. A título de exemplo: para uma probabilidade de sobreposição  $p_0$  igual a 70 % e para um tráfego oferecido igual a 6,2 Erl,  $P_{B1} \approx 10\%$  e  $P_B \approx 5\%$ . No entanto, para um aumento no tráfego oferecido de 6,2 para 7,5 Erl, e para o mesmo valor de  $p_0$ ,  $P_{B1}$  aumenta para  $\approx 19\%$  e  $P_B$  aumenta para  $\approx 9\%$ . Observa-se assim que o efeito é muito mais significativo para os móveis que não podem realizar DR.

A conclusão final é que quando o tráfego não é gerado de uma forma uniforme ao longo da rede, o sistema pode perder mais do que aquilo que ganha com a utilização do DR. Isto porque as células em que o tráfego gerado é substancialmente maior podem sobrecarregar os recursos disponíveis nas suas vizinhas, fazendo com que não existam recursos disponíveis para atribuição aos móveis ali residentes e que não podem realizar DR. Apesar de  $P_B$  diminuir, a probabilidade de bloqueio de novas chamadas associadas a terminais que não podem realizar DR,  $P_{B1}$  aumenta. O fosso é desta forma maior. No entanto, para células cuja área de sobreposição é apenas marginal, o ganho resultante da aplicação do DR é significativo. Uma forma de controlar este processo é impedir que haja DR quando o número de recursos rádio ocupados na célula alvo é superior a um certo nível de *threshold* e torná-lo novamente possível quando esse número for novamente inferior a este nível.

#### 4.3.6.1 Exemplo de implementação prática do método *directed retry* - "assignment to another cell"

O método DR foi já implementado como *feature* anexa ao GSM por alguns fabricantes de equipamento. Por exemplo, em [ERI/AC] é descrita a *feature* "assignment to another cell" que mais não é do que uma implementação prática do DR. Esta *feature* pode ser decomposta em duas formas distintas de atribuição de recursos rádio:

- *Assignment to a better cell.*
- *Assignment to a worse cell.*

Das duas, a variante que mais se aproxima do método DR aqui analisado é a “*assignment to a worse cell*”. Esta *feature* atribui um canal de tráfego (TCH) de uma das células vizinhas àquela em que o móvel se encontra ancorado sempre que não existam recursos disponíveis nesta. Para impedir uma eventual utilização de um recurso rádio de uma célula distante, que poderia originar uma degradação na qualidade da ligação rádio estabelecida, encontra-se implementado um parâmetro que determina a distância (em termos da atenuação do sinal em dB) da célula original a partir da qual o método não pode ser aplicado. Para controlar o tempo máximo de utilização do canal TCH atribuído, encontra-se implementado um *timer* que ao expirar força a terminação da chamada em curso.

#### 4.3.7 Utilização da técnica denominada *directed handoff* - DH

O método designado por *directed handoff* (DH) consiste numa outra extensão do método FCA básico. O objectivo pretendido com a introdução deste método na arquitectura de uma rede móvel celular é mais uma vez rentabilizar ao máximo a utilização dos recursos rádio atribuídos a cada célula da rede, bem como diminuir a probabilidade de bloqueio no estabelecimento de novas chamadas  $P_b$ . O DH pode ser considerado como uma extensão do DR [EVE90]. O algoritmo implementado neste método resume-se basicamente no seguinte:

- Para atribuição de um recurso rádio na fase de estabelecimento de uma nova chamada é seguido o algoritmo implementado para o método DR.
- Caso não existam recursos rádio disponíveis, quer à primeira e única tentativa (para terminais que não podem realizar DR), quer à segunda tentativa (para terminais que podem realizar DR), escolher a célula vizinha que disponha do maior número de recursos rádio disponíveis (relativamente às demais). A seguir, avaliar de entre todas as chamadas a decorrer na célula original qual ou quais estão associadas a móveis que se encontram na área de sobreposição desta e da célula vizinha seleccionada. Caso exista uma chamada que satisfaça esta condição então esta chamada passa a ser suportada pela nova estação base, libertando o recurso rádio que lhe tinha sido atribuído. Caso não exista nenhuma chamada que satisfaça esta condição, a nova chamada é bloqueada.

Em [EVE90], Everitt procedeu à simulação de uma rede móvel celular com o método DH implementado. Duma forma qualitativa, o resultado alcançado permitiu concluir que a utilização do método DH combinado com o método DR resulta em níveis de desempenho excelentes, com valores para o GoS superiores aos obtidos com a utilização do FCA e até mesmo superiores aos obtidos com a utilização do método de atribuição dinâmica de recursos, quando a percentagem de sobreposição da área de cobertura das estações base da rede é significativa. Everitt concluiu ainda que este método responde bem às variações no tráfego oferecido (tanto no domínio do espaço quanto no domínio do tempo). A re-distribuição de chamadas que estejam a decorrer pelas células da rede que possuam mais recursos disponíveis (que estejam pouco carregadas em termos de tráfego oferecido) permite o aumento do valor médio da sua taxa de utilização.

#### 4.3.7.1 Exemplo de implementação prática do método *directed handoff* - “*cell load sharing*”

O método DH foi também já implementado como *feature* anexa ao GSM por alguns fabricantes de equipamento. Por exemplo, em [ERI/LS] é descrita a *feature* “*cell loading sharing*” que mais não é do que uma implementação prática do DH. Esta *feature* procede à re-distribuição do tráfego transportado numa dada célula que esteja muito “carregada” em termos de tráfego, pelas células que lhe são vizinhas na eventualidade de uma ou mais destas células estar menos “carregada”. Sendo assim, os picos que ocorrem normalmente nas horas de maior tráfego são eliminados, e na fase de dimensionamento podem ser admitidos valores médios de tráfego superiores aos valores permitidos quando esta *feature* não é implementada. O custo acrescido da utilização do “*cell load sharing*” é o aumento no número de *handovers* que são executados para a re-distribuição do tráfego nas áreas onde a sua densidade é menos uniforme. O “*cell load sharing*” é limitado aos canais de tráfego apenas. O algoritmo implementado consiste basicamente no seguinte:

- O tráfego oferecido às células da rede onde a *feature* se encontra activada é monitorado periodicamente.
- Se o tráfego oferecido a uma dada célula for superior a um certo nível de *threshold* máximo permitido (medido no número de canais de tráfego TCH disponíveis num

dado instante), os móveis que estejam a realizar chamadas numa área próxima das fronteiras da célula ficam sujeitos a um eventual *handover* para células vizinhas e menos carregadas. A forma como isto é implementado na prática é a seguinte: procede-se a um novo mecanismo de actualização (*locating*) com níveis de histerese mais reduzidos do que os definidos durante a fase inicial de localização do móvel em *idle mode* (*location update*). O objectivo é minimizar os níveis mínimos de sinal admissíveis para manter a ligação numa célula vizinha.

- Se uma ou mais das células vizinhas (seleccionadas pela nova actualização de localização que no entanto foi feita) estiver menos carregada em termos de tráfego oferecido (também medido pelo número de canais de tráfego, TCH disponíveis num dado instante), poderá receber as chamadas da célula mais carregada por meio da execução de *handovers*.

#### 4.4 Conclusões

Nas secções anteriores foram analisados os princípios fundamentais inerentes ao dimensionamento da arquitectura de uma rede móvel celular em termos do número de recursos rádio a atribuir a cada célula.

Conforme se verificou, o dimensionamento para uma rede que implementa o sistema GSM é feito para o pior caso possível, uma vez que o método de atribuição de recursos utilizado pelo GSM é o FCA. Este dimensionamento é normalmente realizado com base na tabela de *Erlang B*, a partir de estimavas para o tráfego máximo oferecido a cada célula da rede e do grau de serviço GoS permitido.

Com o objectivo de diminuir a probabilidade de terminação forçada de chamadas a decorrer  $P_r$ , à custa de um pequeno aumento na probabilidade de bloqueio no seu estabelecimento  $P_b$  e de uma pequena diminuição no tráfego escoado pela rede, foram descritas e analisadas diversas variantes da arquitectura de rede básica elaboradas nos últimos anos. Para a análise do desempenho de cada uma foram descritos modelos de tráfego que conduziram à obtenção dos parâmetros descritores do seu desempenho.

Por último, importa salientar que toda a análise que foi desenvolvida neste capítulo diz respeito apenas à questão da gestão do tráfego e do grau de serviço prestado. Questões

relacionadas com a qualidade da transmissão do sinal rádio e aumento da capacidade da rede são analisadas nos restantes capítulos.

## 5. TÉCNICAS AVANÇADAS DE PLANEAMENTO CELULAR

### 5.1 Introdução

No capítulo 2 foram analisadas as técnicas básicas de planeamento da arquitectura de uma rede celular: implementação dos padrões de reutilização de frequências, sectorização e implementação da arquitectura em camadas *overlaid/underlaid*. Estas técnicas baseiam-se no princípio fundamental e inerente às redes móveis celulares: *a reutilização de frequências*.

Conforme se verificou, o método seguido no aumento da capacidade instalada na rede é a diminuição da distância de reutilização de frequências entre células co-canais (utilização de padrões de reutilização mais compactos). No entanto, foi também demonstrado que esta diminuição acarreta um aumento na interferência co-canal resultante do processo de reutilização de frequências. Resulta daí que a utilização de padrões de reutilização mais compactos, com distâncias menores entre células co-canais é um processo que não pode ser continuado indefinidamente. Existe um ponto de paragem a partir do qual a continuidade desde processo acarretaria uma degradação insustentável na qualidade da comunicação.

Importa assim desenvolver e implementar outras técnicas de planeamento celular que permitam continuar o processo evolutivo da rede, em termos do aumento da capacidade instalada e manutenção da qualidade do processo de comunicação. Além destas técnicas básicas de planeamento, foram desenvolvidas e adicionadas às normas do GSM um conjunto de *features* que vão de encontro a este objectivo. Basicamente estas *features* procuram limitar a interferência resultante da utilização de padrões de reutilização ainda mais compactos que os descritos anteriormente, possibilitando aumentos consideráveis na capacidade instalada. As *features* aqui analisadas são as seguintes:

- Implementação de *frequency hopping* (saltos de frequência) - FH.

- Implementação de ajuste dinâmico da potência. - DPT.
- Implementação de transmissão descontinuada de voz e/ou dados - DTX.

Estas técnicas têm como objectivo: a limitação no nível da energia electromagnética que é radiada para o meio em cada instante (DPT e DTX) ou a distribuição dos efeitos nocivos da interferência numa única ligação rádio pelas demais ligações rádio estabelecidas no mesmo instante (FH). Podem mesmo ser utilizadas em conjunto na implementação de padrões de reutilização com um grau de compactação elevado (por exemplo os *multiple reuse patterns* - MRP, que são analisados no capítulo 6).

Nas secções seguintes estas *features* são apresentadas em pormenor bem como as vantagens e desvantagens decorrentes da sua implementação. Na secção 2 é abordado o *frequency hopping*, a secção 3 aborda o método do ajuste dinâmico da potência, enquanto a secção 4 aborda o método da transmissão descontinuada de voz e/ou dados. Na secção 5 são apresentadas as conclusões.

## 5.2 Implementação do *frequency hopping* (saltos de frequência) em redes móveis celulares. –

Conforme foi salientado anteriormente, o GSM utiliza o método de atribuição fixa de portadoras a cada célula da rede. Para um conjunto de  $N$  transmissores/receptores (TRXs) por estação base é atribuído, de uma forma permanente, um conjunto de  $N$  portadoras. Sendo assim, na fase de estabelecimento de uma nova chamada é atribuído um canal de tráfego (TCH) de uma das portadoras associadas à célula, que passa a estar dedicado à nova ligação até ao instante da sua libertação. Existem três possibilidades distintas de libertação normal do canal:

- Terminação normal da chamada na célula onde foi iniciada.
- Ocorrência de um *handover* intercelular para uma célula vizinha.
- Ocorrência de um *handover* intracelular, ou seja, mudança na portadora e/ou intervalo de tempo utilizado ao nível da célula.

No entanto, este método de atribuição de portadoras faz com que possam ocorrer chamadas cuja qualidade da comunicação seja inferior ao nível mínimo desejado. Basta

que a portadora utilizada esteja sujeita à interferência de uma outra estação que a reutilize e cuja distância mínima de reutilização não seja satisfeita. Caso o intervalo temporal de ocorrência da interferência seja significativo, poderá mesmo haver terminação forçada da chamada devido a falhas na ligação rádio (*RF Losses*).

Surge assim a ideia de alterar periodicamente a portadora utilizada por cada chamada a decorrer, por forma a limitar a duração temporal de uma eventual interferência causada por uma estação co-canal ou canal adjacente. Este é o princípio básico do *frequency hopping* - FH.

As normas do GSM respeitantes ao FH [GSM/05.02] especificam que a alteração da portadora utilizada no processo de transmissão ocorre após o envio de cada rajada (*burst*) de dados (4.615ms), mantendo-se fixa no intervalo de tempo correspondente à sua transmissão. No total são 217 saltos de frequência por segundo. Por este motivo, o FH utilizado no sistema GSM é classificado como sendo do tipo lento (*slow FH*).

O FH faz com que sinais provenientes de fontes diversas interfiram com a portadora que está a ser utilizada em instantes de tempo distintos. Esta propriedade é denominada “diversidade na interferência” (*interference diversity*). O facto de a portadora utilizada estar a saltar a cada rajada de dados que é enviada tem como consequência o fazer com que o padrão de interferências não se mantenha constante durante a sua realização. Mesmo que uma rajada sofra uma degradação significativa devido à interferência co-canal de uma ou mais estações próximas, os mecanismos de *interleaving* e de codificação presentes no GSM possibilitam a recuperação e descodificação da informação transmitida. A utilização do FH permite assim que os efeitos nocivos da interferência co-canal, suportados por uma única chamada, sejam distribuídos pelas demais chamadas a decorrer no mesmo instante (também denominado *interference averaging*). [ERI/FH, OLO93].

Outra consequência da implementação do FH é a atenuação dos mínimos pronunciados do sinal rádio (*fading dips*). Conforme foi visto anteriormente, o efeito multipercurso da propagação do sinal rádio acarreta um efeito de desvanecimento rápido no sinal transmitido (*fast fading*) e segue uma distribuição de *Rayleigh* que depende da frequência utilizada no processo de transmissão. Como são utilizadas frequências distintas após a transmissão de cada rajada, a localização espacial dos *fading dips* está

continuamente a ser alterada, impedindo que um móvel esteja localizado num destes mínimos pronunciados por um intervalo de tempo superior ao período de tempo necessário ao envio de uma única rajada. Este efeito é tanto mais benéfico quanto menor for a velocidade de deslocamento do móvel e resulta num processo de suavização (ou *averaging*) do processo de variação brusca do sinal. Diz-se assim que o FH também realiza diversidade na frequência (*frequency diversity*) [OLO93]. A figura 5.1 ilustra este efeito.

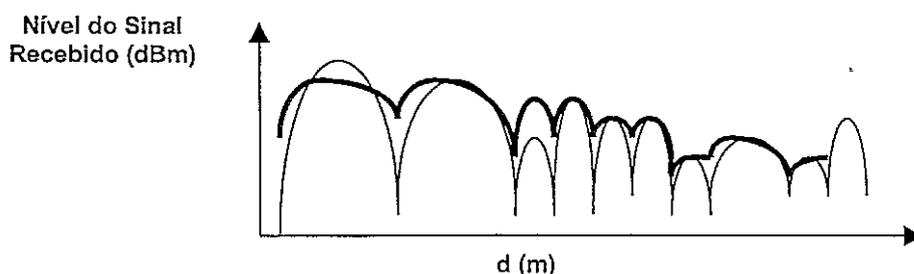


Figura 5.1— Atenuação dos fading dips através do frequency hopping.

Do ponto de vista do assinante, a implementação do FH permite aumentar significativamente o grau de satisfação pelo serviço prestado, uma vez que acarreta um aumento na qualidade da comunicação.

Do ponto de vista do operador, a implementação do FH acarreta as seguintes vantagens:

- Um meio de propagação mais previsível e dependente do processo de transmissão.
- A possibilidade de fornecer ao universo de assinantes uma qualidade de comunicação mais uniformemente distribuída.
- A possibilidade de diminuir as margens de planeamento celular (nomeadamente o C/I e C/A) e desta forma utilizar padrões de reutilização de frequências mais compactos com os ganhos em termos de capacidade daí resultante [FRU96].

### 5.2.1 Análise do ganho na qualidade da ligação rádio conseguido com a introdução do FH

Para que se possa avaliar o ganho conseguido com a introdução do FH na qualidade da ligação rádio, há que determinar o valor da relação C/I. No entanto, a interferência a

que cada ligação rádio está sujeita varia após o envio de cada rajada, devido ao facto de as fontes de interferência estarem a variar quer no tempo quer no espaço. Por esta razão, estima-se um valor médio para esta relação. Para obtenção deste valor consideram-se  $n$  células co-canais (que utilizam o mesmo grupo de portadoras de salto - *hopping channel group* constituído por  $f$  portadoras). Qualquer uma das portadoras associadas a cada uma destas células pode interferir num dado instante de tempo com a frequência do sinal desejado. Vamos representar o sinal desejado por  $C$  enquanto o sinal interferente é representado por  $I$ . Sendo assim, o valor médio da relação  $C/I$  numa arquitectura de rede que implementa o FH é dado por [OLO93]:

$$\left(\frac{C}{I}\right)_{mean} = \frac{C}{\frac{1}{f} \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^f I_{ki}} \quad (1)$$

em que  $I_{ki}$  corresponde à interferência co-canal causada pelo sinal interferente  $i$  na célula  $k$  num dado instante de tempo.

Como se pode depreender da equação (1), a relação  $C/I$  aumenta com o aumento do número de portadoras  $f$  consideradas na sequência de salto. Este resultado já era esperado uma vez que, com este aumento, ocorre uma diminuição na probabilidade de ocorrência de colisões entre portadoras, que é o mesmo que dizer que ocorre um aumento no ganho da diversidade na interferência.

O intervalo de tempo de amostragem considerado para a relação  $C/I$  é tal que permite desprezar o desvanecimento rápido do sinal rádio (*fast fading*). Finalmente, importa salientar que a expressão (1) não quantifica o ganho de diversidade na frequência conseguido com a introdução do FH. Apenas o efeito de *averaging* da interferência é contabilizado nesta expressão.

Em [OLO93, CAR94] foram desenvolvidos modelos para a simulação do desempenho de uma rede móvel celular na qual é implementado o FH. O objectivo pretendido com este processo de simulação era demonstrar os ganhos conseguidos em termos de qualidade da ligação rádio (quer no sentido ascendente quer no sentido descendente), que possibilitam a utilização de padrões de reutilização mais compactos que os anteriormente analisados, com os ganhos em termos de capacidade daí resultante.

Em [OLO93] foi implementado um simulador dum equipamento genérico de transmissão utilizado no sistema GSM em cada estação base (modulador, codificador, *interleaving*, etc.), bem como do mecanismo de propagação do sinal rádio. Foram feitas simulações ao nível da transmissão de cada *bit* de informação pelo canal rádio, por forma a estimar o número de *bits* errados na recepção (BER - *bit error rate*) ou de tramas corrompidas (FER - *frame easure rate*). A partir destes resultados foi possível estimar a relação C/I.

Para a simulação do efeito da diversidade na interferência, conseguida com a introdução do FH, foi considerado o efeito resultante (em termos de interferência co-canal) na qualidade da ligação rádio causado por nove células a utilizar o mesmo grupo de salto. Importa salientar que foi simulada apenas a ligação rádio no sentido descendente. Os autores argumentam que o ganho por diversidade no sistema de antenas de cada estação base torna a ligação ascendente menos sensível às interferências e ruídos no canal de propagação. Finalmente, foi também simulado o método de ajuste dinâmico da potência emitida por cada estação base. Este ponto será analisado em detalhe na secção 5.3.

<i>Modelo de propagação</i>	Okumura Hata
<i>Declive do Path Loss (n)</i>	3,5
<i>Desvio padrão da distribuição Log-Normal (<math>\sigma</math>)</i>	6dB
<i>Número de frequências de salto por célula</i>	3 e 12
<i>Padrão de reutilização</i>	1/3
<i>Ajuste automático da potência emitida</i>	50% do <i>path loss</i>
<i>Sistemas de antenas</i>	Sectores de 120°
<i>Carga do sistema (tráfego)</i>	25% e 75%

Tabela 5.1 – Modelo de simulação considerado.

Os objectivos pretendidos com esta simulação foram os seguintes:

- Avaliar o comportamento da figura de mérito FER em função da relação C/I conseguida com a introdução do FH, à medida que se varia o número total de portadoras da sequência de salto. Foram considerados dois tipos de sequências de salto: sequências de 3 e 12 portadoras.
- Com o aumento do tráfego oferecido é de esperar uma diminuição do ganho da diversidade na interferência, conseguido com a introdução do FH. Pretendeu-se desta forma avaliar o efeito resultante do aumento do tráfego para duas situações distintas: 25% e 75% da capacidade máxima instalada por célula.

A tabela 5.1 resume o modelo de simulação considerado.

### Resultados obtidos

- Os resultados obtidos no processo de simulação deixam transparecer uma dependência clara entre a fracção do tráfego oferecido e o ganho da diversidade na interferência. À medida que o tráfego oferecido aumenta, o ganho de diversidade diminui. Como exemplo, temos que para uma FER de 2% (utilizada como critério da qualidade da comunicação) e com uma fracção de tráfego igual a 25%, a relação C/I necessária para manter a qualidade varia entre 5 e 5,8dB. Já para uma fracção igual a 75%, a relação C/I necessária anda à volta dos 7dB. Como termo de comparação, foi simulado um sistema sem ganho de diversidade por interferência, tendo-se obtido um resultado para a relação C/I de 7,5dB. A variação no ganho é de aproximadamente 1,5dB se considerarmos uma fracção de tráfego igual a 25%.
- Os resultados obtidos também comprovam o que já se esperava: o aumento do ganho da diversidade na interferência com o aumento do número de portadoras da sequência de salto. Para um conjunto de 3 frequências de salto conseguem-se ganhos de 1,5dB, enquanto que para um conjunto de 12 frequências de salto conseguem-se ganhos de 2,5dB na relação C/I.

Uma vez que o FH é um processo pseudo-aleatório, em que as frequências utilizadas estão a ser periodicamente alteradas, a relação C/I está a variar numa forma aleatória (dependendo do padrão de interferências em cada instante). Por este motivo apenas pode ser estimada pelo seu valor médio. O FER é um parâmetro que indica a taxa de tramas que não podem ser recuperadas devido à ocorrência de rajadas de dados

corrompidas pelo meio de transmissão. O seu valor resulta portanto de um processo de medição. Como a relação C/I é um processo aleatório, não pode ser estabelecida uma relação directa entre estes dois parâmetros quando se utiliza o FH. Para o mesmo valor médio da relação C/I podem ser obtidos diferentes valores para o parâmetro FER. Por este motivo, a melhor forma de se estimar a qualidade da rede quando é implementado o FH é recorrer à leitura do parâmetro.

Através do trabalho desenvolvido em [CAR94] conclui-se que para se retirar o máximo partido da introdução do FH, devem-se utilizar padrões de reutilização o mais compactos possíveis por forma a maximizar o número de portadoras por grupo de salto e minimizar a fracção do tráfego oferecido a cada célula.

Em [CAR94] recorreu-se novamente a um processo de simulação do desempenho de uma rede móvel em que foi implementado o FH, para diferentes padrões de reutilização de frequências. O objectivo final era estudar a qualidade da ligação rádio (em termos da relação C/I) para diferentes padrões de reutilização e comparar a capacidade instalada resultante para os diferentes casos. Além do FH também foi simulado o método do ajuste dinâmico da potência emitida (foram considerados diferentes níveis de compensação quer para o nível de sinal rádio quer para a qualidade da ligação), bem como o método de transmissão descontinuada de voz e/ou dados (DTX). Importa salientar mais uma vez que estes métodos são analisados em pormenor nas secções 5.3 e 5.4 respectivamente.

### Simulação do FH

O método seguido na simulação do FH baseia-se no valor médio da interferência co-canal resultante.

$$I = \beta \frac{1}{N} \sum_{k=1}^K I_k \quad (2)$$

em que:

- I é a interferência resultante numa célula da rede.
- $\beta$  é o factor de descontinuidade na transmissão de voz e/ou dados.
- N é o número de portadoras por grupo de salto.

- $I_k$  é o sinal interferente originado pela  $i$ -ésima célula do grupo de células onde o mesmo grupo de salto é implementado (células co-canais da referida célula).

#### Simulação do mecanismo de ajuste dinâmico da potência emitida

O mecanismo de ajuste dinâmico da potência emitida foi simulado de acordo com as especificações do GSM [GSM/05.05], ou seja, a potência emitida é ajustada em passos de 2dB. O mecanismo baseia-se em medições do nível médio do sinal e da qualidade da ligação rádio em ambos os sentidos da comunicação (*uplink* e *downlink*).

A compensação das perdas por atenuação no meio de propagação (*path loss*) é conseguida através da utilização de graus de compensação, sendo realizada fisicamente através do parâmetro  $gComp$  que varia entre 0 e 1.  $gComp = 1$  significa que é realizada compensação total da atenuação para atingir um nível médio do sinal desejado. Por outro lado,  $gComp = 0$  significa que não é realizada nenhuma compensação, sendo a transmissão efectuada sempre à potência máxima em todos os instantes de tempo. Finalmente,  $gComp = 0,5$  significa que a compensação é efectuada para metade do valor total da atenuação do sinal no meio de propagação.

A compensação da degradação da qualidade da ligação rádio é realizada através da estimação do valor da relação C/I. O seu valor é inferido directamente a partir do parâmetro RXQUAL do sistema GSM [GSM/05.05].

A equação de ajuste dinâmico da potência é as seguinte:

$$P_o = K - gComp * G + qComp * \left[ \left( \frac{C}{I} \right)_{des} - \left( \frac{C}{I} \right)_{RXQUAL} \right] \quad (3)$$

em que:

- $P_o$  é a ordem de ajuste da potência emitida (em passos de 2dB).
- K é um nível de potência que serve de referência e que deve ser previamente calibrado.
- G é a diferença entre as potências emitida e efectivamente medida no receptor (determina a atenuação por propagação).

- $\left(\frac{C}{I}\right)_{des}$  corresponde ao valor pretendido para a relação C/I. Este valor deve ser calibrado em função de outros parâmetros tais como o tempo máximo permitido para convergência do algoritmo sem que haja queda de chamada, devido a alguma falha na ligação rádio (*RF Losses*).

### Simulação do mecanismo de transmissão descontinuada de voz e/ou dados

O mecanismo de transmissão descontinuada de voz e/ou dados é contemplado na expressão (2) através do parâmetro  $\beta$ . No processo de simulação os autores consideram um factor de descontinuidade de 50% ( $\beta = 0,5$ ).

Os objectivos pretendidos com esta simulação foram os seguintes:

- Avaliar o comportamento da função de distribuição da relação C/I (CDF) para diferentes valores de  $gComp$  e  $qComp$ . Avaliar o comportamento da função de distribuição da relação C/I para diferentes padrões de reutilização de frequências, com um GoS de 2% e com os parâmetros  $gComp$  e  $qComp$  fixos.

A tabela 5.2 resume o modelo de simulação considerado.

<i>Call mean holding time</i>	100s
<i>Path Loss (n)</i>	$315 + 35 \cdot \log(d)$ , d em metros
<i>Desvio padrão da distribuição Log-Normal (<math>\sigma</math>)</i>	6dB
<i>Frequências</i>	12 BCCH + 72 TCH
<i>Time slots por portadora</i>	1
<i>Velocidade média do terminal móvel</i>	50 Km/h
<i>Sistemas de antenas</i>	Sectores de 120°
<i>Período decorrido entre o envio de duas ordens de ajuste da potência (período duma trama SACCH)</i>	480 ms

Tabela 5.2 – Modelo de simulação considerado.

### Resultados obtidos

Os autores estimaram o desempenho da qualidade da ligação rádio através do percentil 10 da função de distribuição da relação  $C/I$ . Consideraram como nível de referência para  $C/I$  o valor padrão assumido pelo GSM quando não é implementado o FH - 9dB. Sendo assim, assumem que se não mais de 10% dos valores medidos para a relação  $C/I$  estiverem abaixo dos 9dB, então a qualidade da comunicação é aceitável (nível de *soft blocking*). Os resultados obtidos permitiram concluir que quando é feita uma compensação das perdas por atenuação no meio de 50% ( $gComp = 0,5$ ), conseguem-se ganhos de aproximadamente 1,5dB relativamente à linha definida pelos 9dB para o percentil 10. Mais, concluiu-se que para uma compensação da qualidade da ligação rádio também de 50% ( $qComp = 0,5$ ), consegue-se um ganho adicional de 1dB, totalizando um ganho total de 2,5dB. Este ganho na relação  $C/I$  resulta na possibilidade de se poderem implementar padrões de reutilização mais compactos com os ganhos em termos de capacidade daí resultantes.

	1/1	1/3 (para o limite imposto pelo <i>soft blocking</i> )	1/3 (para o limite imposto pelo <i>hard blocking</i> )	3/9	4/12	4/12 (sem FH)
Fracção máxima do tráfego que é absorvida (Erl/Km <sup>2</sup> )	0,50	1,0	0,23	0,3	0,23	0,23
% $C/I < 9dB$	10%	10%	1%	0,2%	0,2%	0,7%
% no bloqueio de novas chamadas	0%	0%	0%	1%	2%	2%

Tabela 5.3 – Resultados obtidos a partir do processo de simulação

Além do critério de *soft blocking* descrito acima, os autores também impuseram o critério dos 2% para o GoS (denominado nível de *hard blocking*). Foram simulados diferentes padrões de reutilização para determinação da fracção do tráfego oferecido que é necessária para se atingir esta situação limite. Os autores verificaram que os padrões 1/1 e 1/3 atingem primeiro o limite imposto pelo critério de *soft blocking*, antes de se atingir o limite imposto pelo critério de *hard blocking* (2% de chamadas

bloqueadas). No entanto, com os padrões 3/9 e 4/12 verificou-se precisamente o contrário. Para estes padrões, atingiu-se o nível dos 2% de chamadas bloqueadas antes que a qualidade tivesse deteriorado abaixo da linha dos 9dB para o primeiro percentil 10. Os autores verificaram que o padrão 1/3 é o que satisfaz melhor esta relação de compromisso. Isto pode ser verificado na tabela 5.3.

A conclusão final é a seguinte: com a introdução do FH e um padrão de reutilização 1/3 conseguem-se ganhos na capacidade instalada de 2 a 4 vezes relativamente à implementação de um padrão fixo 4/12 (como se pode observar na tabela 5.3). Com a introdução do ajuste dinâmico de potência a 50% conseguem-se ganhos de 2,5dB relativamente à linha dos 9dB para o primeiro percentil 10, o que permite a utilização de padrões de reutilização compactos tais como o 1/3. De notar ainda que o simulador considerou a implementação do método de transmissão descontinuada de voz e/ou dados com o factor de descontinuidade  $\beta$  igual a 0,5 (50% por cento do tempo total ocupado por silêncio).

### 5.2.2 Métodos de implementação do *frequency hopping*

Em primeiro lugar importa salientar que a portadora denominada BCCH (por transportar o canal lógico BCCH no canal físico  $c_0$  (*time slot* 0 da portadora  $f_0$ ) não pode estar a saltar, devendo estar associada a uma portadora fixa. Esta portadora também não pode realizar ajuste dinâmico de potência (deve estar a ser emitida à potência máxima), nem pode estar em modo de transmissão descontinuada (deve estar permanentemente no ar mesmo que não estejam a ser utilizados nenhum dos canais de tráfego para realização de chamadas). No entanto, os demais canais de tráfego (TCH) e de sinalização (SDCCH) transportados fisicamente nos *time slots* das demais portadoras que não o BCCH podem estar saltar.

Existem duas formas distintas de implementação do FH no sistema GSM.

- Implementação em *baseband hopping*.
- Implementação em *synthesized hopping*.

### 5.2.2.1 Implementação em baseband hopping

No modo *baseband* as rajadas transmitidas por cada canal de tráfego (TCH) ou de sinalização (SDCCH) são encaminhadas por meio de controladores a partir do respectivo TRX para o equipamento transmissor, sem haver alteração no *time slot* que lhes é atribuído quando a chamada é estabelecida. A função destes controladores é determinar em cada instante de tempo qual o transmissor (e portanto qual a portadora) que será utilizada no processo de transmissão. O encaminhamento da informação a partir do controlador é realizado através do barramento interno auxiliar, conforme indicado na figura 5.2. Neste método de implementação, o número total de portadoras consideradas na sequência de salto (*hopping group*) é igual ao número de TRXs instaladas em cada estação. No exemplo da figura 5.2 são utilizadas sequências de salto compostas por 3 portadoras ( $f_0, f_1, f_2$ ).

A grande vantagem deste modo de implementação do FH é a possibilidade de se utilizarem filtros ajustáveis de banda estreita (filtros de cavidades ressonantes) que podem combinar até um máximo de 16 entradas distintas, minimizando as perdas por inserção. A principal desvantagem é não poder ser utilizado um número de portadoras por grupo de salto superior ao número de TRXs existentes, limitando o valor para a probabilidade de haver colisões que é possível atingir.

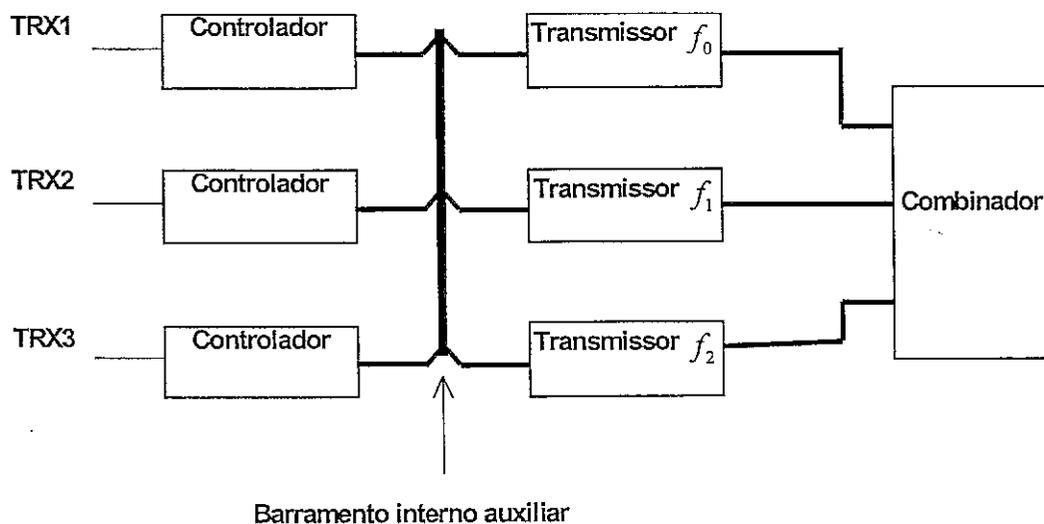


Figura 5.2– Arquitectura necessária para o baseband hopping.

### 5.2.2.2 Implementação em *synthesized hopping*

No modo *synthesized* o equipamento transmissor para onde são encaminhadas as rajadas transmitidas por cada canal de tráfego (TCH) ou de sinalização (SDCCH) é mantido fixo. Neste modo de implementação não há encaminhamento da informação transmitida pelos diferentes transmissores da estação base. Os controladores são responsáveis pela alteração da portadora utilizada no processo de transmissão de cada rajada. Sendo assim, cada TRX é sintonizado numa das portadoras da sequência de salto e esta é mantida fixa durante a fase de transmissão de cada rajada. No exemplo da figura 5.3 são utilizados grupos de salto compostos por 6 portadoras ( $f_0, f_1, f_2, f_3, f_4, f_5$ ). O processo de atribuição da portadora a ser utilizada por cada TRX para transmissão/envio de uma rajada de dados é controlado por um algoritmo interno a cada estação base, por forma a que em cada instante as portadoras utilizadas por cada TRX sejam perfeitamente ortogonais (não colidam entre si). A figura 5.3 ilustra a arquitectura de implementação do *synthesized hopping*.

A vantagem deste modo de implementação é poderem ser utilizadas sequências de salto com um número total de portadoras superior ao número de TRXs de cada estação base. Desta forma, pode-se limitar a probabilidade de haver colisões a um valor bastante inferior ao conseguido com o método *baseband*. A principal desvantagem é só poderem ser utilizados combinadores híbridos (filtros selectivos na frequência) que apresentam um factor de perdas por inserção de 3dB. Desta forma, não podem ser utilizados mais do que dois combinadores híbridos em cascata, limitando o número de TRXs instalados a um número máximo de 4. Um combinador é um dispositivo que combina fontes de sinal rádio nas suas entradas numa saída comum. É o dispositivo de interface entre os TRXs e a antena de emissão. O número de TRXs por estação base está directamente ligado à capacidade de escoamento de tráfego pretendida. O número de portadoras na sequência de salto, por sua vez, é imposto pelo valor pretendido para probabilidade de ocorrência de colisões, uma vez que este parâmetro está directamente associado à qualidade obtida durante a realização de cada chamada. No entanto, conforme se viu, no *baseband hopping* este número é limitado ao número de TRXs instaladas em cada estação base.

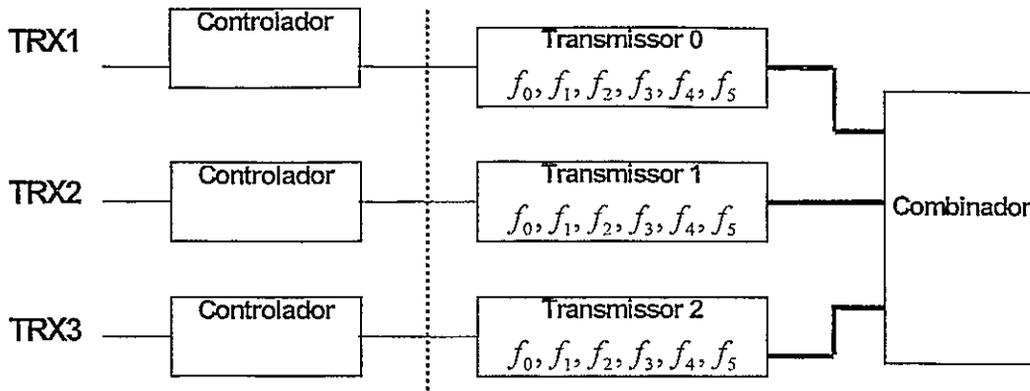


Figura 5.3—Arquitetura necessária para o synthesized hopping.

### 5.2.3 Configuração

Há que dar especial atenção ao processo de configuração de uma estação base a funcionar em *hopping*, devido ao facto de o canal lógico BCCH não poder estar fisicamente a saltar entre as portadoras do grupo de salto. Na configuração de uma estação base a funcionar em *hopping* é necessário proceder-se à definição do número de grupos de salto (*hopping groups*) e do número de portadoras por grupo de salto a considerar. Normalmente são utilizados dois métodos distintos de planeamento com a introdução do FH:

- Bandas dedicadas - utiliza uma banda de portadoras dedicada exclusivamente aos canais BCCH e outra banda de portadoras destinada exclusivamente aos canais de tráfego e de sinalização TCH e SDCCH (representados aqui pela nomenclatura TCH). São assim definidos dois padrões de reutilização de frequências: um para os BCCHs e outro para os TCHs. O padrão de reutilização definido para os BCCHs é obviamente de menor compactação (por exemplo é muito utilizado o padrão 4/12) do que o padrão definido para os TCHs (por exemplo o padrão 3/9). Nesta situação, as interferências resultantes numa portadora BCCH ou TCH são devidas exclusivamente às demais portadoras BCCH ou TCH respectivamente.
- Banda comum - utiliza uma banda de portadoras comum quer às portadoras BCCH quer às portadoras TCH. Nesta situação, uma portadora utilizada como BCCH numa célula também pode ser utilizada como TCH noutra e vice-versa. As interferências resultantes numa portadora BCCH ou TCH são devidas a reutilização de ambos os tipos de portadoras noutras células da rede.

O facto de a banda de BCCHs ser uma banda fixa, sem ajuste dinâmico de potência para cada portadora e onde estas estão permanentemente no ar, impõe que as distâncias de reutilização consideradas sejam superiores relativamente às distâncias de reutilização consideradas na banda de TCHs. Por outro lado, pretende-se que as portadoras que transportam os canais BCCH estejam o mais limpas possível (sem interferências) já que transportam informação vital a ser decodificada por cada móvel.

Em [KRO97] foi implementado um processo de simulação semelhante aos descritos anteriormente, para uma arquitectura de rede celular onde foi implementado o FH. O objectivo pretendido era avaliar qual dos métodos descritos acima apresenta melhor desempenho em termos de uma maior imunidade à interferência co-canal. Os resultados obtidos consistiram em medições do primeiro percentil 10 da função de distribuição da relação C/I.

Para a estratégia de bandas dedicadas foi considerada a seguinte configuração para as bandas de BCCHs e de TCHs (ver tabela 5.4): (i) 12 portadoras para a banda de BCCHs (factor de reutilização 12); (ii) 15 portadoras ( $27-12=15$ ) para a banda de TCHs atribuídas a um total de 3 a 5 TRXs por célula. O objectivo do aumento do número de TRXs por célula era avaliar a degradação do desempenho da rede com o aumento do grau de compactação do padrão de TCHs.

Para a estratégia de banda comum (ver tabela 5.4) foi considerado um padrão de reutilização para os BCCHs igual a 27, sendo que este padrão foi mantido fixo. Na elaboração do padrão de reutilização para os TCHs, as interferências resultantes da banda de BCCHs foram tidas em conta sem no entanto se alterar o padrão de BCCHs.

Os resultados obtidos foram os seguintes:

### **Ligação rádio no sentido ascendente (uplink)**

Os resultados obtidos a partir do processo de simulação demonstram que se consegue um ganho de 1 a 2dB para a relação C/I, quando se implementa a estratégia de banda comum. A explicação é que um padrão de reutilização uniforme para todas as portadoras é mais eficiente na ligação ascendente já que o processo de transmissão contínua dos canais BCCHs somente ocorre na ligação descendente. Sendo assim, a utilização de padrões mais compactos para as portadoras TCH não tem nenhum efeito

na ligação ascendente. No entanto, a ligação rádio no sentido ascendente não é a ligação limitativa do ponto de vista da qualidade nos sistemas de rádio móvel celular, graças ao ganho por diversidade espacial conseguido no sistema de antenas de cada estação base.

### Ligação rádio no sentido descendente (downlink)

Os resultados obtidos a partir do processo de simulação demonstram que se consegue um ganho de 1 a 5dB para a relação C/I (dependendo da fracção do tráfego oferecido), quando se implementa a estratégia de banda dedicada. Por outro lado, verifica-se também que a variação da degradação da relação C/I com o aumento do tráfego oferecido, a partir do instante em se passa a utilizar canais de tráfego da segunda portadora (a portadora BCCH já se encontra cheia) é de apenas 1dB. Esta observação leva à conclusão de que a banda de BCCHs constitui a fonte de interferência dominante.

A estratégia de banda comum impõe uma fonte de interferência de base causada pela banda de BCCHs que somente pode ser corrigida a partir da utilização de padrões de reutilização menos compactos. A utilização dos métodos de ajuste dinâmico de potência e transmissão descontinuada não trazem nenhum valor acrescentado devido ao facto de a banda ser comum. Verifica-se também que se considerarmos apenas as portadoras BCCH, a degradação da relação C/I com o aumento do tráfego oferecido é insignificante dado que estas portadoras estão sempre no ar.

Os resultados obtidos confirmam os ganhos conseguidos com a utilização de bandas de frequências separadas para as portadoras BCCH e TCH, pelo que é a estratégia normalmente utilizada pelos operadores.

### 5.2.4 Algoritmos implementados para as sequências de salto

Em função dos resultados apresentados na secção anterior, e tendo sempre como referência as técnicas de planeamento normalmente utilizadas, no que se segue é considerado o método de decomposição do padrão inicial em dois padrões de reutilização de frequências, como estratégia de implementação do FH. Para este método a estratégia implementada é a seguinte:

- Definição de um grupo de portadoras composto apenas pela portadora BCCH. Este grupo é programado por forma a não estar a saltar.
- Definição de um grupo com as portadoras de salto para cada estação. Este grupo é programado por forma a estar a saltar. A definição do número de portadoras a utilizar na sequência de salto está directamente associada aos seguintes factores:
  1. Número de portadoras disponíveis no espectro atribuído ao operador.
  2. Probabilidade máxima admissível para a ocorrência de colisões.
  3. Grupos de salto a considerar no total.

Uma vez escolhidas as portadoras de cada grupo, há que definir o modo como se processa o salto. O GSM especifica dois modos diferentes de salto: o modo cíclico (*cyclic mode*) e o modo aleatório (*random mode*).

No modo cíclico as portadoras saltam numa forma sequencial, desde a portadora mais baixa até a portadora mais alta no espectro. Por exemplo: se forem definidas quatro portadoras para um grupo de salto, respectivamente  $f_1, f_2, f_3, f_4$ , a sequência de salto para as portadoras deste grupo será a seguinte:

$\dots, f_4, f_1, f_2, f_3, f_4, f_1, f_2, f_3, f_4, f_1, f_2, \dots$

Unidades TRX por célula	Estratégia de Planeamento	de Padrão de BCCHs	de Padrão de TCHs	Distância média de reutilização
4	Dedicado	12	15/3=5	27/4=6,75
5	Dedicado	12	15/4=3,75	27/5=5,4
6	Dedicado	12	15/5=3	27/6=4,5
4	Comum	27	3 de 26	27/4=6,75
5	Comum	27	4 de 26	27/5=5,4
6	Comum	27	5 de 26	27/6=4,5

Tabela 5.4 – Configurações de frequências utilizadas no processo de simulação.

No modo aleatório as portadoras saltam segundo uma sequência pseudo-aleatória. Novamente, se forem definidas quatro portadoras para um grupo de salto, respectivamente  $f_1, f_2, f_3, f_4$ , a sequência de salto para as portadoras deste grupo poderá ser, por exemplo, a seguinte:

$$\dots, f_1, f_4, f_4, f_3, f_1, f_2, f_4, f_1, f_3, f_3, f_2, \dots$$

O GSM especifica 63 sequências pseudo-aleatórias. Estas sequências são armazenadas em *look-up-tables* em cada móvel e em cada estação base. O parâmetro definido no sistema GSM que determina o modo a ser implementado, bem como a sequência de salto a ser considerada (para o modo aleatório apenas) é o HSN (*hopping sequence number*). O modo cíclico é seleccionado igualando o HSN a zero ( $HSN = 0$ ). O modo aleatório é seleccionado igualando o HSN a um número inteiro compreendido entre 1 e 63 ( $HSN = 1-63$ ), que determina a sequência pseudo-aleatória a utilizar.

O modo cíclico é utilizado apenas nas situações em que o que se pretende é atenuar os mínimos pronunciados no nível do sinal rádio (*fading dips*), ocasionados pelo efeito da propagação multipercurso. Conforme se viu, uma das vantagens da implementação do FH é a possibilidade de se poder realizar diversidade por frequência, resultando na atenuação desses *fading dips*. No entanto, no caso mais geral, em que o FH é implementado com o objectivo de tornar possível a diminuição das margens de planeamento, por forma a tornar possível a utilização de padrões de reutilização de frequências mais compactos, o modo cíclico é pouco prático dada a sua limitação quanto ao número de sequências de salto e de portadoras a utilizar por sequência. Sendo assim, normalmente o modo de salto implementado é o modo aleatório.

Tendo em conta que em cada estação base são instalados  $N$  TRXs e que é definido um grupo de portadoras pelas quais estas devem saltar é necessário que o algoritmo a implementar no controlador responsável por esse mecanismo de salto impeça que, num mesmo instante, dois ou mais TRXs estejam a emitir com a mesma frequência, ou seja, que ocorram colisões. As portadoras escolhidas na composição do grupo de salto a atribuir a cada TRX não podem ser adjacentes entre si.

No sistema GSM o FH foi implementado por forma a tornar impossível a existência de colisões [GSM/05.05] entre os sectores adjacentes de uma mesma estação base. Para tal, o algoritmo serve-se da atribuição de um *offset* à portadora a atribuir relativamente

à portadora utilizada noutros sectores. Este *offset* é um parâmetro denominado MAIO (*Mobile Allocation Index Offset*). O *offset* é gerado automaticamente pelo controlador da estação, por forma a que não sejam utilizadas portadoras iguais ou adjacentes na sequência de salto, por mais do que um sector em cada estação base.

O MAIO pode ser também utilizado na definição de sequências ortogonais (sequências em que não há ocorrência de colisões) entre as células de uma mesma estação base (estação composta por três sectores por exemplo). Para tal, pode ser atribuída a mesma sequência de salto às diferentes células, bem como o mesmo HSN, e por meio da definição dos respectivos MAIOs impede-se a ocorrência de colisões. Desta forma, apesar da sequência de salto e o HSN utilizados serem os mesmos, a forma como ela é percorrida em cada instante por cada um dos sectores é diferente.

A correcta definição dos MAIOs a atribuir a cada um dos sectores de cada estação base permite mesmo evitar que sejam atribuídas num mesmo instante de tempo frequências adjacentes no espectro, limitando a interferência por canal adjacente total na rede.

Por exemplo, para a sequência composta pelas portadoras  $\{f_1, f_2, f_3, f_4\}$ , implementada em modo aleatório e com o mesmo HSN em cada um dos três sectores da mesma estação base, a forma como se processa o salto das portadoras desta sequência para cada um destes sectores pode ser a seguinte:

$$\dots, f_1, f_4, f_4, f_3, f_1, f_2, f_4, f_1, f_3, f_3, f_2, \dots \text{ MAIO} = 0 \text{ (sector1)}$$

$$\dots, f_4, f_3, f_3, f_2, f_4, f_1, f_3, f_4, f_2, f_2, f_1, \dots \text{ MAIO} = 3 \text{ (sector2)}$$

$$\dots, f_3, f_2, f_2, f_1, f_3, f_4, f_2, f_3, f_1, f_1, f_4, \dots \text{ MAIO} = 6 \text{ (sector3)}$$

No processo de definição dos *offsets* são realizadas operações em MOD(4). Como se pode observar, as sequências de salto para cada sector são ortogonais entre si, não havendo colisões.

Importa salientar que, para que todo este processo funcione correctamente, é necessário que os diferentes sectores que compõem cada estação base estejam sincronizados entre si, quer no modo como são atribuídas as portadoras da sequência de salto, quer no modo como estas são percorridas para cada sector. Caso não exista sincronismo, naturalmente a programação atempada dos MAIOs é um processo que se revela inútil já que não existe controlo no processo de definição da portadora que em cada instante

vai para o ar para cada sector. Em alguns fabricantes de equipamento este sincronismo é conseguido utilizando como referência o relógio da ligação a 2 Mbps (interface Abis) com os BSCs. No entanto, para outros, tal sincronismo é inexistente, não sendo permitida a manipulação dos valores a atribuir aos respectivos MAIOSs (tal situação não traria nenhum valor acrescentado de qualquer maneira, no que respeita a eliminação ou limitação de colisões). Nesta situação, torna-se necessária uma definição atempada das sequências de salto a atribuir a cada sector de cada estação base, por forma a eliminar as colisões entre sectores adjacentes.

Para que o mecanismo de diversidade na interferência funcione adequadamente, a sequência de salto nas células co-canais (com a implementação do mecanismo de *hopping* são as células às quais são atribuídas as mesmas sequências de salto) devem ser independentes entre si, ou seja, a correlação entre as frequências de salto em cada célula em cada instante deve ser mínima por forma a minimizar o número de colisões entre células co-canais e maximizar a relação C/I total na rede.

Para o modo cíclico não podem ser obtidas sequências independentes (apenas sequências ortogonais quando é possível manipular o MAIO), dado que apenas se encontra implementada uma única sequência deste tipo. Por este motivo, o modo cíclico não produz uma diversidade na interferência eficaz.

Para o modo aleatório podem ser obtidas sequências independentes desde que sejam programados HSNs diferentes nas células co-canais. O modo aleatório produz melhores resultados em termos de diversidade na interferência e desta forma está directamente associado a relações C/I e C/A totais na rede superiores àquelas obtidas com o modo cíclico [ERI/FH].

### **5.2.5 Aspectos de planeamento celular a ter em conta com a implementação do FH**

A escolha do método de implementação a considerar para o FH (*baseband ou synthesized*) está directamente ligada às vantagens e desvantagens de cada um e que foram já enunciadas anteriormente.

Na implementação do FH em estações microcelulares normalmente é considerado o *synthesized hopping*. Isto porque normalmente estas estações estão limitadas à

capacidade máxima de dois TRXs. Deste modo o *baseband hopping* não seria eficaz já que implicaria a utilização de sequências de salto compostas por duas portadoras apenas.

### 5.2.5.1 Aspectos a ter em conta na definição do padrão de reutilização para a banda de BCCHs

As especificações do GSM determinam os níveis de *threshold* para os factores C/I e C/A indicados na tabela 5.5.

	Sem hopping	Com hopping
C/I	12dB	9dB
C/A	-3dB	- 9dB

Tabela 5.5 – Especificações do GSM para o factor de interferência co-canal.

No entanto, na prática estes resultados revelam-se demasiado optimistas.

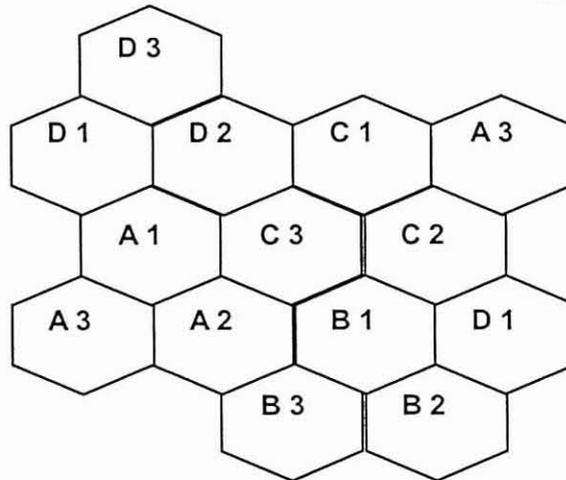


Figura 5.4- Cluster de células para o padrão de reutilização 4/12.

A definição dos níveis a considerar para a banda de BCCHs deve ser conseguida a partir de testes efectuados para diferentes distâncias de reutilização, em função da qualidade conseguida. Para a banda de BCCHs normalmente são considerados os seguintes níveis:

- $C/I > 15\text{dB}$

- $C/A > 3\text{dB}$

O padrão de reutilização de frequências normalmente considerado é o padrão 4/12, ilustrado na figura 5.4.

Assumimos que a banda de BCCHs é composta pelas portadoras  $f_1$  a  $f_{12}$ . Para *clusters* de 12 células ficam deste modo reservadas as 12 primeiras portadoras das 40 disponíveis para a banda de BCCHs (assumiu-se um espectro de 40 portadoras atribuído ao operador).

Para este padrão de reutilização teríamos o esquema de atribuição de portadoras indicado na tabela 5.6.

<i>A1</i>	<i>B1</i>	<i>C1</i>	<i>D1</i>	<i>A2</i>	<i>B2</i>	<i>C2</i>	<i>D2</i>	<i>A3</i>	<i>B3</i>	<i>C3</i>	<i>D3</i>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Tabela 5.6 – Esquema de atribuição de portadoras para o padrão 4/12.

### 5.2.5.2 Definição do padrão de reutilização para a banda de TCHs

O padrão de reutilização para a banda de TCHs deve ser estabelecido a partir de testes que determinem os factores  $C/I$  e  $C/A$  mais adequados à qualidade pretendida. Estes factores estão directamente relacionados com a distância de reutilização implementada, pelo que devem ser realizados testes para diferentes distâncias de reutilização (padrões de reutilização) por forma a aferir a qualidade do processo de transmissão conseguida.

Grupo A	Grupo B	Grupo C	Grupo D	Grupo E
14	15	16	17	18
19	20	21	22	23
24	25	26	27	28
29	30	31	32	33
34	35	36	37	38
39	40	*	*	*

Tabela 5.7 – Definição dos grupos de salto para o padrão 4/12.

Com 12 portadoras dedicadas exclusivamente à banda de BCCHs restam 28 portadoras para atribuição. A portadora número 13 não será atribuída numa primeira fase a nenhuma das bandas, funcionando como uma portadora de guarda entre as duas.

### 5.2.5.3 Exemplo de um processo de escolha do padrão de reutilização para a banda de TCHs

Com cinco grupos de salto definidos, a maior distância de reutilização é conseguida para um factor de reutilização igual a 5. A menor distância de reutilização é conseguida para um factor de reutilização igual a 1 (apenas um grupo de salto).

Uma forma de planeamento possível (para quando é permitida a programação atempada dos valores dos MAIOs a atribuir a cada estação base) é atribuir o mesmo grupo de salto (bem como o mesmo HSN) a cada um dos sectores de cada uma das quatro estações base contempladas no padrão 4/12. Desta forma conseguem-se eliminar as colisões entre os sectores de uma mesma estação base. Para serem obtidas seqüências ortogonais deverão ser implementados MAIOs iguais a 0, 5 e 10 em cada sector de uma mesma estação base respectivamente. O grupo de salto restante fica disponível para ser utilizado sempre que for necessário utilizar uma distância de reutilização maior que a inicialmente planeada.

A tabela 5.8 ilustra dois modos de atribuição dos grupos de salto a cada estação base do padrão 4/12.

### 5.2.6 Exemplo de um processo de validação do FH numa rede celular operacional

Em [HUH96] são apresentados os resultados obtidos relativos à validação do FH na rede móvel celular de um operador alemão. Devido a alguns imprevistos relativamente à implementação da *feature*, foi implementado o *baseband hopping* sem ajuste dinâmico de potência e transmissão descontinuada de voz e/ou dados. Foram realizados ensaios para vários níveis *threshold* dos critérios C/I e C/A. Em cada ensaio foram recolhidos dados relativos a várias estatísticas da rede que pudessem levar à aferição da sua qualidade.

Estas estatísticas foram as seguintes:

- Qualidade do nível de sinal recebido (RXQUAL).
- Nível do sinal recebido (RXLEV).
- *Timing Advance* (TA).
- Taxa de quedas de chamadas.
- Taxa de insucesso e de pedido de *intra-cell handovers*.

	<i>Grupo</i>	<i>HSN-MAIO</i>	<i>Grupo</i>	<i>HSN-MAIO</i>
Estação A				
<i>Célula 1</i>	A	1/0	A	1/0
<i>Célula 2</i>	A	1/5	A	1/5
<i>Célula 3</i>	A	1/10	A	1/10
Estação B				
<i>Célula 1</i>	B	2/0	B	2/0
<i>Célula 2</i>	B	2/5	B	2/5
<i>Célula 3</i>	B	2/10	B	2/10
Estação C				
<i>Célula 1</i>	C	3/0	A	3/0
<i>Célula 2</i>	C	3/5	A	3/5
<i>Célula 3</i>	C	3/10	A	3/10
Estação D				
<i>Célula 1</i>	D	4/0	B	4/0
<i>Célula 2</i>	D	4/5	B	4/5
<i>Célula 3</i>	D	4/10	B	4/10
<i>Factor de reutilização</i>	4			3

• Tabela 5.8 – Diferentes modos de atribuição dos grupos de salto.

Os resultados alcançados levaram à obtenção de algumas figuras de mérito relativas aos níveis de *threshold* para os critérios C/I e C/A. Concluiu-se que a utilização de níveis de *threshold* iguais a -8dB para o critério C/A e 10dB para o critério C/I não comprometia a qualidade do processo de comunicação.

### 5.2.7 Conclusões

Nas secções anteriores foram analisadas as vantagens provenientes da introdução do FH. Conforme se viu, os ganhos conseguidos são:

- Diminuição dos efeitos nocivos do desvanecimento rápido (*fast fading*) através da atenuação dos mínimos de sinal nos chamados *fading dips* (diversidade na frequência).
- Aumento nos valores médios para as relações C/I e C/A.

Estes ganhos traduzem-se numa melhoria da qualidade do processo de comunicação e proporcionam uma distribuição mais uniforme dos efeitos nocivos de uma fonte de interferência por todos os utilizadores do serviço.

O aumento nos valores médios para as relações C/I e C/A possibilita uma diminuição nas margens de planeamento anteriormente utilizadas (sem FH). Passa a ser possível a implementação de padrões de reutilização de frequências mais compactos. O resultado é um aumento na capacidade instalada na rede com todos os benefícios daí provenientes em termos do grau de serviço prestado GoS. Consegue-se assim uma maior rentabilização da capacidade instalada na medida em que se passa a dimensionar a rede para uma situação de limite por capacidade, condicionada pelo número de TRXs utilizados por estação base (*hard blocking*) e não mais para uma situação de limite por interferência (*soft blocking*).

Nas secções seguintes são abordadas duas *features* normalmente implementadas em conjunto com o FH. Estas *features* possibilitam um acréscimo ainda mais significativo nos ganhos conseguidos em termos de qualidade e de capacidade da rede, conforme se verá.

### 5.3 Ajuste dinâmico da potência (*dynamic power transmission*)

Conforme foi já salientado, o nível médio do sinal rádio recebido quer por um terminal móvel, quer por uma estação base, apresenta um comportamento caracterizado por um decaimento à medida que a distância entre ambos aumenta, e cuja pdf segue uma distribuição tipo *log-normal*. Isto é válido qualquer que seja o sentido da ligação considerado (ascendente ou descendente). Desta forma, e tendo em atenção apenas a ligação descendente, à medida que o terminal se aproxima da estação base, o nível médio do sinal recebido,  $C$ , aumenta. Inversamente, a soma do nível médio dos sinais interferentes recebidos a partir de estações base co-canal vizinhas,  $I$ , diminui. Este efeito conjugado traduz-se num aumento da relação  $C/I$  à medida que o terminal se aproxima da sua estação base. Inversamente, à medida que o terminal se afasta da sua estação base, o nível médio do sinal recebido,  $C$ , diminui, enquanto a resultante da soma do nível médio dos sinais interferentes de estações base co-canal vizinhas aumenta. Este efeito conjugado traduz-se numa diminuição da relação  $C/I$  à medida que o terminal se afasta da sua estação base. —

Outra consequência da mobilidade de cada terminal na área de dominância de uma estação base é o chamado “efeito perto-longe”. Este efeito resulta de um mascaramento por parte de terminais localizados numa posição próxima da estação base relativamente aqueles que estão mais distantes e que utilizam um *time slot* da mesma frequência. O nível de sinal emitido pelo primeiro pode inibir o nível de sinal emitido pelo segundo na recepção na BTS, devido à relação de níveis de sinal envolvidas.

Finalmente, a reduzida atenuação do sinal emitido por cada terminal quando este se encontra localizado numa região próxima da estação base, pode originar uma saturação no respectivo receptor, ocasionando uma diminuição na sua sensibilidade, particularmente na recepção de sinais mais fracos de terminais localizados nas fronteiras da célula.

O ajuste dinâmico da potência emitida por cada estação base e por cada terminal toma partido desta variação do nível médio do sinal recebido na ligação ascendente (MS -> BTS) e na ligação descendente (BTS -> MS), com a distância do terminal à respectiva estação base. O objectivo do algoritmo implementado é ajustar a potência emitida por

cada estação base e por cada terminal por forma a que o nível médio do sinal recebido nos respectivos receptores se aproxime o mais possível de um nível *threshold* pré-determinado [OLO93, FRU96, CAR94, ERI/PC]. Deste modo, consegue-se amenizar de uma forma significativa os efeitos nocivos do mecanismo de propagação que foram descritos acima:

- Diminuição da potência efectivamente radiada para o meio, com o conseqüente aumento das relações C/I e C/A.
- Diminuição do efeito perto-longe, através da utilização de potências de emissão inferiores para os terminais localizados próximo das respectivas estações base e diminuição do efeito de saturação dos respectivos receptores.

Existem dois algoritmos de ajuste dinâmico de potência: um implementado para as estações base e outro implementado para os móveis. O princípio de funcionamento destes algoritmos é sensivelmente o mesmo quer para as estações base quer para os móveis e apresentam as seguintes características:

- A gama de variação da potência depende da potência máxima que pode ser emitida. Desta forma o mecanismo de ajuste dinâmico apenas pode ser implementado numa sub-região da área de dominância de cada célula (denominada área de regulação - ver figura 5.5).
- A portadora que transporta o canal BCCH não pode sofrer ajuste dinâmico de potência.
- Os canais de tráfego (TCH) e de sinalização (SDCCH) das demais frequências podem sofrer ajuste dinâmico de potência
- Os algoritmos de ajuste de potência implementados, na prática, apenas permitem o ajuste incremental da potência (*steps* de 2dB) por exemplo.
- Para o ajuste da potência emitida pelo móvel o algoritmo serve-se das medições realizadas pela respectiva estação base do nível médio do sinal recebido, bem como da qualidade da ligação rádio no sentido ascendente. Estas medições são utilizadas no cálculo da ordem da potência a ser emitida pelo móvel.

- Para o ajuste da potência emitida pela estação base o algoritmo serve-se das medições realizadas pelo móvel do nível médio do sinal recebido, bem como da qualidade da ligação rádio no sentido descendente. Estas medições são reportadas à estação base por forma a proceder ao cálculo da respectiva ordem da potência a ser emitida.
- O ajuste de potência é efectuado ao nível de cada *time slot*, uma vez que a ligação rádio BTS-MS é efectuada através de canais lógicos mapeados fisicamente naqueles.

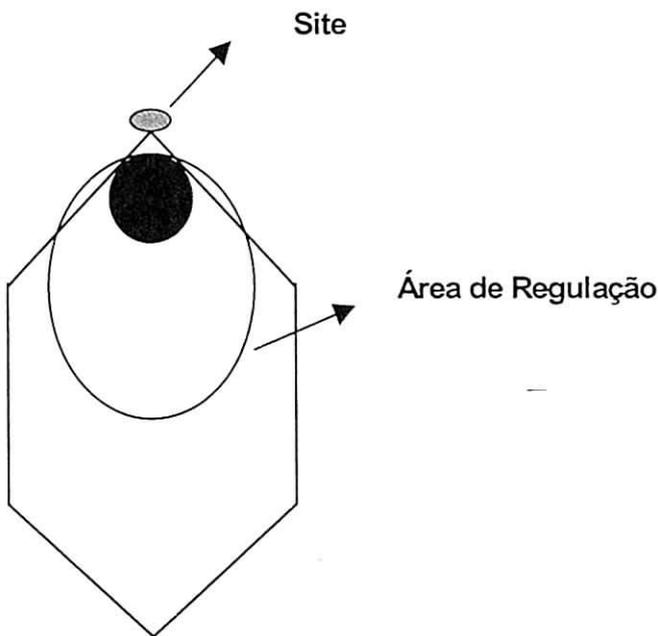


Figura 5.5- Representação da sub-área de regulação da área de dominância de uma célula.

A figura número 5.5 representa a área de dominância de uma célula bem como a sub-região correspondente à sua área de regulação.

A figura 5.6 ilustra o gráfico de variação da potência emitida pelo móvel ou estação base (conforme o algoritmo implementado) com a atenuação do meio de propagação (*path loss*). Conforme pode ser observado, a potência emitida varia desde um valor mínimo (móvel próximo da estação base) até um valor máximo (móvel próximo das fronteiras da célula). Na área de regulação, o nível de potência emitido é incrementado ou decrementado em intervalos discretos (passos) de 2dBs.

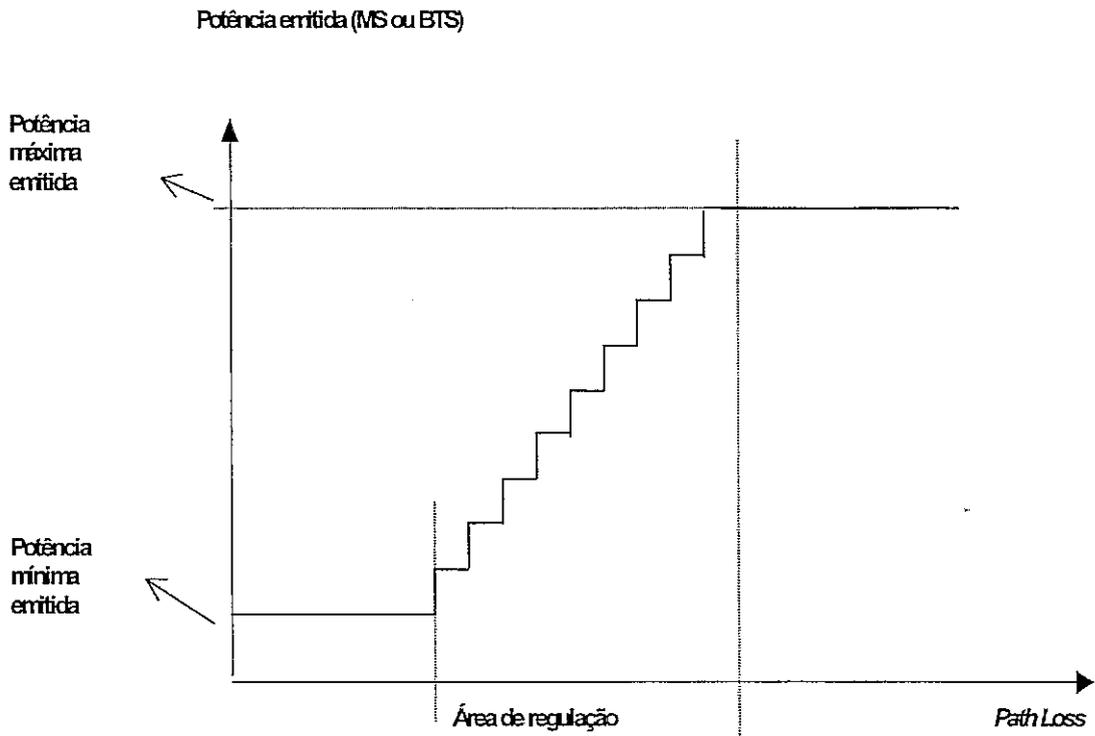


Figura 5.6- Variação da potência emitida.

Após a aplicação de logaritmos, o gráfico da figura 5.7 ilustra a variação do nível médio do sinal recebido no receptor do móvel ou estação base (conforme o algoritmo implementado), com a atenuação do meio de propagação (*path loss*). Neste gráfico pode ser observado que, a partir do momento em que o móvel entra na área de regulação, o processo de variação do nível médio do sinal recebido (na estação base ou no próprio móvel) é menos acentuado (recta com o declive 2). Isto é devido à compensação pela diminuição do nível de potência emitido. Caso não houvesse ajuste dinâmico de potência, a variação do nível médio do sinal recebido processar-se-ia numa forma linear, segundo a recta a tracejado (declive 1).

Ambos os gráficos ilustram a forma de actuação dos dois algoritmos. Ambos podem ser subdivididos em três áreas distintas:

- A área da esquerda (recta com o declive 3) corresponde à região mais próxima da estação base, onde os níveis de sinal emitidos são os mais baixos.
- A área do meio (recta com o declive 2) corresponde à área de regulação ou de actuação do algoritmo propriamente dita. Pode ser observado no gráfico da figura 5.6 que a regulação é feita em *steps* de potência.

- A área da direita (recta com o declive 1) corresponde à região mais afastada da estação base, onde os níveis de sinal emitidos são os mais elevados.

O objectivo do algoritmo de ajuste dinâmico da potência emitida é limitar a energia electromagnética que é radiada para o meio e deste modo a interferência gerada. A ideia é aumentar a potência sempre que a qualidade da ligação rádio diminua, por forma a manter a qualidade. Por outro lado, o algoritmo procura convergir para um valor da potência emitida que conduza a um nível de sinal óptimo na recepção, ou seja, que permita que a qualidade da ligação rádio se mantenha com o mínimo de energia radiada para o meio possível. O ponto de convergência é representado no gráfico da figura 5.7 pelo nível de *threshold* SSDESUL (*signal strength desired uplink* - na ligação ascendente) ou por SSDES DL (*signal strength desired downlink* - na ligação descendente). Estes níveis são parâmetros de entrada do algoritmo.

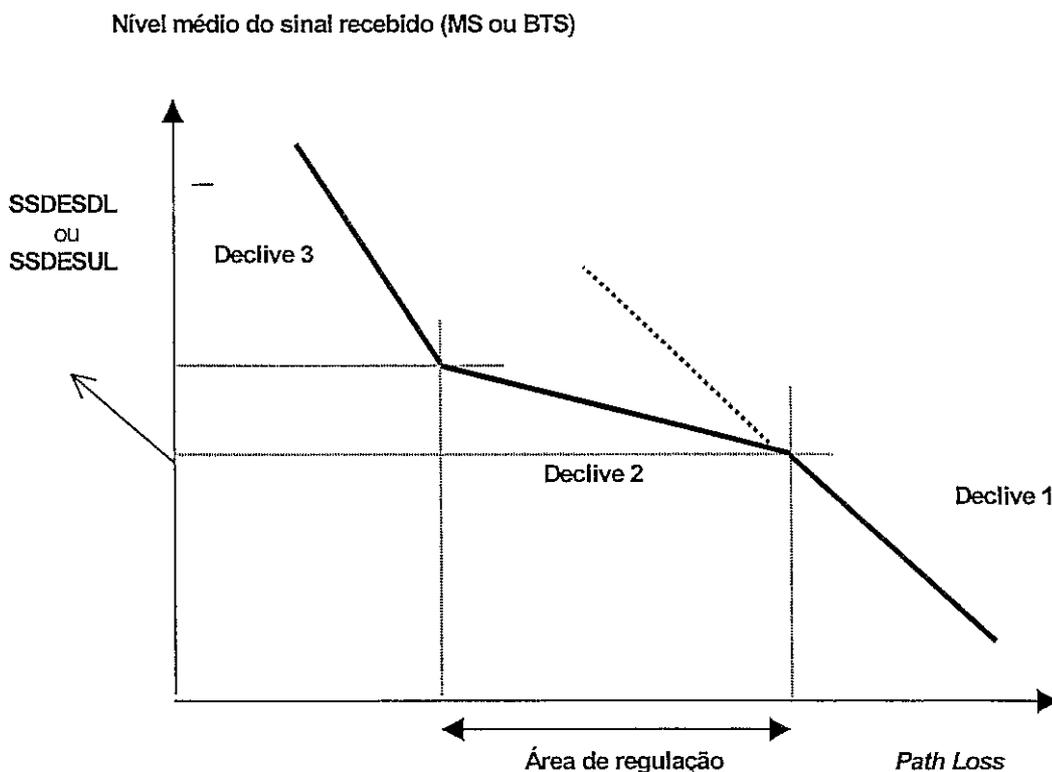


Figura 5.7- Variação do nível médio do sinal recebido.

### 5.3.1 Descrição do algoritmo de ajuste dinâmico de potência

O algoritmo de ajuste dinâmico de potência consiste de três etapas distintas:

### **Preparo das medições a serem realizadas**

Conforme foi afirmado anteriormente, os algoritmos de ajuste dinâmico de potência para os terminais móveis e estações base baseiam-se em medições do nível médio do sinal recebido e da qualidade da ligação rádio no sentido ascendente e descendente respectivamente. Estas medições são reportadas para cada estação base através da própria interface rádio. Sempre que, por qualquer motivo, houver perda de informação referente a estas medições, há que fazer uma estimativa das medições que faltam.

Nesta fase também é tomada a decisão acerca do conjunto de medições a ser analisado (parcial - *sub set* ou total *full set*). Isto prende-se com a utilização ou não da *feature* “transmissão descontinuada de voz e/ou dados” - DTX - *discontinuous transmission*, conforme se verá mais adiante.

### **Filtragem das medições realizadas**

Após a recepção do relatório com as medições realizadas, estas passam por um filtro por forma a serem eliminadas as variações bruscas de sinal de carácter temporário. Desta forma, evita-se que o algoritmo se torne instável.

### **Cálculo da ordem de ajuste de potência**

Finalmente, procede-se ao cálculo da ordem de ajuste de potência. O valor calculado está sujeito às restrições já mencionadas anteriormente e referentes às potências máxima e mínima de emissão bem como aos *steps* discretos de potência permitidos.

## **5.3.2 Implementação do algoritmo de ajuste dinâmico da potência em conjunto com o *frequency hopping***

Normalmente os algoritmos de ajuste dinâmico da potência são implementados em conjunto com o FH. Nesta situação conseguem-se ganhos ainda maiores para as relações C/I e C/A do que os obtidos anteriormente, devido à diminuição da energia radiada pela soma das estações base e terminais móveis em conjunto. Isto traduz-se, na prática, numa diminuição das distâncias de reutilização necessárias à manutenção da qualidade do processo de comunicação e deste modo num aumento da capacidade de absorção do tráfego por parte da rede.

Na prática torna-se difícil exprimir teoricamente este ganho em termos de capacidade adquirida. Sendo assim, a aproximação normalmente seguida é fazer uma série de testes com e sem a *feature* activada para vários padrões de reutilização de frequências e para várias distâncias de reutilização entre células co-canais. A análise das estatísticas da rede permite derivar os valores obtidos para as relações C/I e C/A para os vários padrões de reutilização de frequências considerados nestes testes e, desta forma, é possível calcular o ganho em termos de capacidade de absorção do tráfego oferecido.

Os fabricantes de equipamento normalmente fornecem directivas baseadas na sua própria experiência em planeamento de redes móveis celulares. No entanto, estas apenas são tomadas como ponto de partida e não como índices óptimos de planeamento.

### 5.3.3 Conclusões

Nos pontos anteriores foram analisados em pormenor as vantagens e características de implementação do ajuste dinâmico da potência emitida por cada estação base e terminal móvel.

Conforme se viu, a principal vantagem é a limitação da potência total que é radiada, com as vantagens daí inerentes em termos da diminuição das interferências por canal adjacente e co-canal, resultando num aumento das relações C/I e C/A e na possibilidade de utilização de margens de planeamento mais “agressivas”. O resultado final é um aumento na capacidade de escoamento do tráfego oferecido e na melhoria do grau de serviço prestado (GoS).

## 5.4 Transmissão descontinuada de voz e/ou dados (DTX - *discontinuous transmission*)

Durante o processo normal de comunicação os participantes alternam entre a fala e o silêncio. Em termos estatísticos 50% do tempo total de duração de uma chamada é gasto sem haver comunicação oral, ou seja, ocorre silêncio [FRU96].

Se não há transmissão de informação de voz e/ou dados, não há em princípio necessidade de haver emissão de energia para o canal de transmissão. Esta emissão poderia estar a afectar a qualidade de outras chamadas que estivessem a decorrer no

mesmo instante, causando interferência co-canal ou por canal adjacente. Se não for emitida energia electromagnética durante os períodos de silêncio, consegue-se limitar esta interferência pelo menos durante estes períodos [OLO93, CAR94, ERI/DTX].

A *feature* DTX - *discontinuous transmission* (transmissão descontinuada) controla o processo de emissão de sinal para o meio. Os TRXs de cada estação base e/ou móvel são activados apenas quando há emissão de voz e/ou dados. Para tal é utilizado nos TRXs respectivos um dispositivo electrónico denominado por VAD (*voice activity detector*). Este dispositivo separa as tramas TDMA com respeito ao seu conteúdo: voz, dados não transparente ou ruído de fundo. Sempre que uma trama esteja a transportar informação correspondente ao ruído de fundo, o VAD procede ao envio de uma trama especial denominada por SID (*silence descriptor*), ao invés da trama TDMA normal. Após o envio desta trama, o processo de transmissão é interrompido até que o VAD detecte à sua entrada informação correspondente à transmissão de voz ou dados não transparentes.

A cada período (correspondente à transmissão de uma trama SACCH) é enviada uma nova trama SID. O objectivo deste envio é actualizar a informação correspondente ao ruído de fundo, bem como enviar as medições do nível médio do sinal recebido pela estação base ou terminal e ainda os resultados da medição da qualidade da ligação rádio, necessárias ao funcionamento de *features* tais como: execução de *handovers*, ajuste dinâmico de potência, etc. Na recepção está instalado um detector de tramas SID que procede à separação das tramas com informação de voz e/ou dados das restantes tramas (ruído de fundo).

A principal desvantagem do DTX é o facto de *features* que necessitam dos relatórios com as medições do nível médio do sinal recebido, bem como da qualidade da ligação rádio, ficarem afectadas devido à limitação no envio desta informação, causada pela ausência de transmissão durante um certo intervalo de tempo.

Com a implementação do DTX existem dois tipos de relatórios que são normalmente produzidos e enviados:

- Relatório com medições parciais do nível médio do sinal e da qualidade da ligação rádio (*sub-set*), uma vez que é enviado durante a transmissão de cada trama SID,

correspondente ao envio de 12 tramas TDMA (período de envio de uma trama SACCH).

- Relatório com medições completas correspondente ao envio das 104 tramas TDMA (*full-set*).

A selecção de um ou outro relatório ocorre através do envio de uma *flag* indicadora do uso ou não do DTX durante um certo período de tempo. A activação desta *flag* impõe a escolha do relatório parcial.

Finalmente, resta salientar que o DTX apenas pode ser aplicado aos canais de tráfego (como aliás seria de se esperar). No entanto, nenhum dos canais de tráfego disponíveis na frequência que transposta o canal lógico BCCH pode estar a emitir em transmissão descontinuada.

#### 5.4.1 Resultados práticos da aplicação do DTX

O DTX é normalmente implementado em conjunto com o FH. Em [FRU96], baseados na sua experiência, um dos fabricantes de equipamento afirma que a implementação do DTX somente é vantajosa quando aplicada em conjunto com o FH. É afirmado ainda que, nesta situação, conseguem-se ganhos na relação C/I de aproximadamente 3dB. Desta forma, é possível implementar padrões de reutilização mais compactos, possibilitando um aumento na capacidade de escoamento do tráfego oferecido.

É reportado que a implementação do DTX não é por si só vantajosa (antes pelo contrário). Quando usado em conjunto com o FH, o DTX auxilia a função de diversificação das fontes de interferência a cada rajada que é enviada para o meio, diminuindo a probabilidade de haver colisões devido aos períodos de inactividade dos TRXs. O DTX por si só faz com que os períodos de silêncio imponham uma variação demasiado lenta da relação C/I para que esta possa ser compensada pelo mecanismo de *interleaving* e *coding* do GSM (ao contrário do FH). Sendo assim, os fabricantes de equipamento apenas recomendam a implementação do DTX quando utilizado em conjunto com o FH.

### 5.4.2 Caso prático da implementação do FH em conjunto com o ajuste dinâmico da potência e do DTX

Em [NIE98] são apresentados os resultados de uma experiência de campo realizado por um operador GSM Dinamarquês tendo como suporte a sua rede móvel celular. Esta envolveu a implementação faseada das seguintes *features*:

- *Baseband frequency hopping*.
- Ajuste dinâmico da potência emitida.
- Transmissão descontinuada de voz e/ou dados (*discontinuous transmission* -DTX).

bem como a monitorização e análise de um conjunto de estatísticas da rede como forma de verificação do desempenho da mesma após a introdução desta *features*:

- Taxa de *bits* errados na recepção antes da descodificação (*bit error rate* - BER) através do parâmetro GSM denominado RXQUAL.
- Taxa de tramas não decifráveis ou apagadas (*frame easure rate* - FER).
- Taxa de quedas de chamadas (*dropped call rate*).

Esta experiência envolveu, numa primeira fase, a implementação do mecanismo de FH na arquitectura de rede celular do operador, com as modificações necessárias no mecanismo de *handover* por forma a otimizar o seu desempenho após a implementação do FH. Numa segunda fase envolveu a implementação conjunta do FH com o DTX. Numa terceira fase envolveu a implementação conjunta do FH com o ajuste dinâmico da potência emitida bem como as alterações necessárias no algoritmo, com o objectivo de otimizar o desempenho da rede após a sua implementação. Finalmente, numa quarta fase envolveu a implementação conjunta do FH com DTX e o ajuste dinâmico da potência.

Para cada uma das fases de teste foi observado o comportamento de cada uma das estatísticas descritas acima. É importante observar no entanto que o parâmetro RXQUAL não é o mais indicado no processo de análise da qualidade de uma ligação rádio, numa arquitectura de rede à qual foi implementado o mecanismo de FH. Isto porque o RXQUAL, estando directamente relacionado com a taxa de *bits* errados na recepção antes do processo de descodificação e *deinterleaving*, resulta numa média do

BER de todas as frequências do grupo de salto utilizadas pelo móvel no processo de transmissão. Desta forma, o RXQUAL não reflecte o ganho conseguido com a introdução do FH.

O parâmetro mais indicado neste processo de análise é o FER, que traduz a taxa de tramas que estando demasiado corrompidas não podem ser correctamente recuperadas pelo equalizador e decodificadas. O problema relacionado com a utilização do FER é que este parâmetro não é reportado directamente aos respectivos OMC (*operations and maintenance center*) da rede, ao contrário do RXQUAL.

No entanto, a utilização do parâmetro RXQUAL revela-se útil na medida em que permite a elaboração de distribuições estatísticas do seu valor que permitem aferir com alguma precisão a qualidade da ligação rádio obtida com a implementação do FH.

### **Introdução do mecanismo de FH**

Na prática, observou-se que imediatamente após a introdução do *baseband frequency hopping*, a taxa média de quedas de chamadas foi reduzida cerca de 3% a 2,5%, mesmo sem a realização de nenhuma acção de optimização na rede.

A comparação dos valores obtidos para o parâmetro RXQUAL antes e depois da introdução do FH leva à conclusão de que o ganho conseguido com a introdução do FH permite um RXQUAL igual a 5, o que noutras circunstâncias seria um sinal indicador de má qualidade.

Por outro lado, uma vez que a introdução do FH impõe uma pequena degradação na qualidade da ligação rádio (ainda que durante breves instantes de tempo), verificou-se um aumento no número médio de *handovers* realizados devido à qualidade (verificou-se um aumento de cerca de 25%). Tornou-se assim necessária uma modificação no mecanismo de *handover* por forma a reduzir a sua taxa de realização, já que em grande parte revelam-se desnecessários. A modificação resultou basicamente na alteração dos níveis de *threshold* do índice de qualidade (baseados no RXQUAL), tolerando-se níveis baixos para a qualidade.

O valor médio para a probabilidade de ocorrência de tramas não decifráveis (FER) foi estimado através da seguinte expressão:

$$P(FER) = \sum_{i=0}^7 P(FER | RXQUAL_i) \cdot P(RXQUAL_i) \quad (4)$$

em que:

- $P(FER)$  é o valor médio da probabilidade do parâmetro FER.
- $P(FER | RXQUAL_i)$  é o valor da probabilidade do parâmetro FER para um dado valor do parâmetro RXQUAL (varia de 0 a 7).
- $P(RXQUAL_i)$  é a probabilidade de ocorrência de cada valor discreto assumido pelo parâmetro RXQUAL.

$P(FER | RXQUAL_i)$  e  $P(RXQUAL_i)$  são obtidos a partir da realização de ensaios na área da rede onde o FH se encontra implementado.

Observe-se que o ganho conseguido com a introdução do FH (reflectido directamente no valor do parâmetro FER) está directamente relacionado com a velocidade de cada terminal. Por este motivo, as medições foram realizadas para dois tipos de terminais (consoante a velocidade imprimida): um terminal lento que se deslocava a velocidade de 0 a 5 Km/h e um terminal rápido que se deslocava à velocidade de 50 a 75 Km/h.

Observa-se pela tabela 5.9 como o valor de  $P(FER)$  apresenta melhores resultados com a implementação do FH para terminais lentos. Este resultado já era de se esperar já que a introdução do FH para terminais lentos resulta num aumento da qualidade da rede devido ao acréscimo do ganho por diversidade. Para terminais rápidos este ganho não se faz sentir já que a própria velocidade de deslocamento do terminal resulta num ganho por diversidade.

### **Introdução do mecanismo de FH em conjunto com o mecanismo de DTX**

A implementação do DTX por si só traduz-se numa diminuição da precisão com que é medido o RXQUAL de cada ligação rádio estabelecida. Isto porque, conforme já foi descrito anteriormente, com a utilização do DTX a estimativa do valor do parâmetro RXQUAL é feita com base em 12 das 104 tramas TDMA enviadas durante o período de envio de duas tramas SACCH consecutivas, ao passo que se não for utilizado o DTX a estimativa é feita com base em 100 das 104 tramas TDMA. Este efeito traduz-se num aumento da probabilidade de medir valores elevados para o BER.

	$P(FER)$ sem FH	$P(FER)$ com FH
<i>Terminais rápidos</i>	0,62%	0,95%
<i>Terminais lentos</i>	1,34%	1,01%

Tabela 5.9 – Resultados do processo de simulação.

Cálculos analíticos para as funções densidade de probabilidade de cada um dos valores que o RXQUAL pode assumir indicaram que a introdução do mecanismo de DTX em conjunto com o FH resultou num aumento da probabilidade do parâmetro RXQUAL assumir valores iguais a 6 e 7 de cerca de 20%, o que, com a introdução do mecanismo de FH não se traduz directamente numa degradação da qualidade da ligação rádio, conforme se viu anteriormente.

Os resultados obtidos com a introdução do FH em conjunto com o DTX revelaram que não houve alterações na taxa de queda de chamadas por um lado, enquanto por outro revelou um aumento de cerca de 30% na probabilidade de ocorrência de níveis de RXQUAL superiores ou iguais a 6.

#### **Introdução do mecanismo de FH em conjunto com o mecanismo de ajuste dinâmico de potência**

Os resultados obtidos revelaram não haver nenhuma variação na taxa de queda de chamadas a decorrer, apesar de se ter verificado uma diminuição de cerca de 3,5 a 4dB na potência emitida por cada estação base. No entanto, verificou-se um aumento na qualidade da rede devido à diminuição da energia radiada para o meio como era de se esperar.

#### **5.4.3 Conclusões**

Nos pontos anteriores foram analisadas as vantagens e desvantagens da implementação do DTX na arquitectura de uma rede móvel celular.

A principal conclusão a retirar é que o DTX apenas apresenta vantagens quando implementado em conjunto com o FH. Nesta situação foi reportado (com base na experiência dos fabricantes de equipamentos) que se conseguem ganhos de 3dB na

relação C/I, possibilitando desta forma a implementação de padrões de reutilização mais compactos. O DTX por si só não traz vantagens em termos da limitação da interferência co-canal e por canal adjacente que compensem as desvantagens da sua implementação e que foram apontadas anteriormente.

## 6. REDES MÓVEIS HIERÁRQUICAS

### 6.1 Introdução

Conforme foi já salientado repetidas vezes, nos últimos anos assistiu-se a uma explosão do serviço de rádio móvel celular. Hoje em dia os assinantes querem ter acesso aos serviços disponibilizados virtualmente em qualquer lugar e em qualquer instante, o que implica todo um repensar da estratégia de ataque de cada operador ao mercado, com o objectivo de os fidelizar e deste modo vencer a concorrência. O cumprimento do objectivo “ter acesso aos serviços disponibilizados em qualquer lugar e em qualquer instante” tem como consequências básicas:

- Por um lado implementar estratégias de planeamento que permitam assegurar a cobertura da rede não só em ambientes abertos tais como as ruas de uma qualquer cidade (cobertura *outdoor*), mas também em ambientes fechados como por exemplo o interior das residências dos assinantes ou o interior de espaços públicos tais como centros comerciais, edifícios de escritórios, metropolitanos, etc. (cobertura *indoor*).
- Por outro lado organizar a arquitectura da rede por forma a maximizar o número de canais ou recursos rádio disponíveis a cada assinante em cada instante de tempo, nos pontos da rede geradores de maior densidade de tráfego. O objectivo último é limitar a probabilidade de bloqueio no estabelecimento de novas chamadas  $P_B$  aos valores condizentes com um grau de prestação de serviço (GoS) o mais elevado possível.

A instalação de estações no topo de edifícios em ambientes urbanos dificulta a cobertura de espaços fechados, à medida que nos aproximamos do nível do R/C. Isto é tanto mais verdade quanto mais densa for a morfologia urbana do espaço em questão e quanto menor for a densidade de estações. Para melhorar a cobertura em espaços interiores (cobertura *indoor*) torna-se necessária uma maior densidade de estações,

acarretando problemas de qualidade devido às dificuldades de encontrar padrões de reutilização de frequências adequados. Por outro lado, a cobertura de espaços fechados tais como parques de estacionamento em centros comerciais, edifícios de escritórios em caves ou mesmo dos metropolitanos é virtualmente impossível a partir de estações exteriores. Surge assim o conceito de *microcélula*. Uma microcélula é uma célula de dimensões e características de propagação do sinal rádio significativamente diferentes das demais células da rede (que passam a ser designadas por macrocélulas) [SAR93, MAD97, LAR92, GRE90]. Enquanto uma macrocélula tem um raio de cobertura que em ambientes urbanos varia entre 1 a 3 Km, uma microcélula tem um raio de cobertura que varia entre 100 a 500 metros. Além disso, normalmente as estações microcelulares encontram-se instaladas nas paredes dos edifícios, ao nível do segundo piso e a uma altura compreendida entre 3 a 6 metros. Isto faz com que a propagação do sinal rádio num ambiente microcelular acarrete ganhos decorrentes em termos de penetração do sinal rádio no interior dos edifícios (garantindo assim a cobertura *indoor* pretendida).

Finalmente, o equipamento rádio (TRX) utilizado numa estação microcelular têm potências de emissão significativamente inferiores às potências de emissão do TRX de uma estação macrocelular (entre 100 mW a 1 W para as estações microcelulares e cerca de 10 W para as outras - cerca de 10 dB menos) e estão limitados normalmente a um número máximo de 2 (2 portadoras no máximo por estação). Estas características fazem com que o equipamento rádio de uma estação microcelular seja bastante compacto, sendo de fácil instalação em locais de reduzidas dimensões tais como espaços interiores.

As reduzidas potências de emissão utilizadas pelas estações microcelulares e o seu grau de compactação tornam-nas ideais para a cobertura de espaços interiores tais como centros comerciais e parque de automóveis, tornando possível a reutilização de frequências utilizadas por estações macrocelulares no exterior, sem degradação da qualidade (devido ao confinamento do sinal emitido sem espalhamento para o exterior). As estações microcelulares são também o tipo de solução ideal para a cobertura de espaços interiores tais como edifícios de escritórios, centros comerciais e terminais de aeroportos. As potências de emissão utilizadas neste tipo de ambientes são ainda menores (da ordem dos mW). Por este motivo, as estações microcelulares para este tipo de ambiente são designadas por estações picocelulares.

As microcélulas aumentam o grau de cobertura de uma rede móvel celular e acarretam um aumento significativo na capacidade instalada. Devido ao facto de serem células de reduzidas dimensões e maior facilidade no processo de confinamento do sinal rádio, facilitam o processo de reutilização de frequências, aumentando a qualidade do processo de comunicação graças a um menor nível de interferência na ligação rádio [SAR93; MAD97, LAR92, GRE90, FRU96].

O aparecimento das estações microcelulares possibilitou a evolução da arquitectura de rede celular composta por uma única camada para uma organização em arquitectura hierárquica em que a rede é estruturada em duas, três ou mais camadas (*Hierarchical Cell Structures - HCS*) [MAD97, ERI/HCS].

Atendendo aos pressupostos acima salientados, conclui-se facilmente que a camada microcelular deve ser responsável pela absorção da maior fatia do tráfego oferecido à rede, por forma a aliviar a camada macrocelular. Sendo assim, deve ser dada prioridade no atendimento das novas chamadas que são estabelecidas ou em processo de *handover* à camada microcelular. Nas situações em que a camada microcelular se encontra congestionada, ou nos pontos da rede em que a sua cobertura é deficiente, então o tráfego oferecido deve ser escoado pela camada macrocelular. Para tal é definido um mecanismo de atribuição de prioridades para cada célula da rede no atendimento, quer às novas chamadas que são estabelecidas, quer às chamadas em processo de *handover*. A prioridade define a camada à qual a célula pertence. Para garantir o correcto funcionamento deste mecanismo, mesmo que o nível médio de sinal rádio recebido a partir da camada de menor prioridade (camada macrocelular) seja superior, foi definido um parâmetro que estabelece o nível médio mínimo de sinal rádio (nível de *threshold*) a partir do qual a prioridade de atendimento deixa de existir. A escolha deste nível de *threshold* deve ser um processo iterativo e executado com cuidado, pois afecta quer a dimensão de cada microcélula quer a qualidade da ligação rádio. Conclui-se assim que o princípio que está subjacente à HCS é distribuir o tráfego total oferecido pelas diferentes camadas da rede, de acordo com o grau de prioridade programado para o seu atendimento e conforme o fim a que se destinam.

No entanto, a organização da arquitectura numa estrutura hierárquica não implica a definição exclusiva de um número máximo de 2 camadas. Também não implica que a

camada de maior prioridade seja composta exclusivamente por estações microcelulares. Recentemente começaram a ser atribuídas licenças de utilização na banda dos 1800 MHz [ERI/DB]. As estações base nesta banda de frequências são em tudo idênticas às estações de 900 MHz, apenas a banda de utilização é diferente (o sistema continua a ser o GSM). Devido ao facto de a taxa de penetração dos terminais duais (que podem operar nas duas bandas de frequências - 900 e 1800 MHz) ser ainda reduzida, o tráfego gerado por este tipo de terminais é relativamente baixo nesta fase de evolução da rede. Por este motivo, a capacidade disponível numa camada de estações de 1800 MHz é normalmente bastante elevada. Esta é a razão pela qual estas estações são utilizadas por forma a aliviar o tráfego escoado pela camada de estações base a operar na banda de 900 MHz. Isto implica que as primeiras tenham prioridade no atendimento de chamadas associadas a terminais duais, devendo ser atribuído o nível de prioridade mais elevado. A camada de estações a operar na banda dos 1800 MHz está normalmente ao mesmo nível de prioridade da camada de estações microcelulares (nível 1), estando a camada de estações a operar na banda dos 900 MHz no nível 2 de prioridade.

Finalmente, o processo normal de evolução de uma rede móvel celular leva a que na fase de arranque, o reduzido tráfego oferecido por um lado e a necessidade de rentabilizar os custos da implantação de novas estações por outro, as estações base sejam instaladas em locais relativamente elevados (os edificios mais altos de uma cidade por exemplo). Mais tarde estas estações revelam-se desajustadas face a evolução da arquitectura da rede e constituem obstáculos à elaboração de novos planos de frequências para instalação de novas estações e aumento da capacidade. A estratégia normalmente seguida é a implantação de novas estações (de substituição) à volta das estações mais elevadas, nos locais que se supõe sejam geradores de parte do tráfego gerado. No entanto, este processo além de complexo do ponto de vista da engenharia de tráfego é também demorado. O facto de serem estações situadas a cotas relativamente elevadas, torna o processo de elaboração de novos planos de frequências, sem degradação significativa do GoS, um processo de difícil solução.

A atribuição do nível 3 de prioridade a este tipo de estações base (passam a constituir a terceira camada da arquitectura de rede) permite aliviar o tráfego por elas escoado através do seu encaminhamento para as camadas inferiores. Consegue-se assim manter

o GoS prestado sem adicionar tantas portadoras quantas seriam necessárias, contribuindo para uma melhor qualidade da ligação rádio na rede. A ideia é semelhante à seguida na separação do tráfego oferecido pelas camadas micro e macrocelulares. A terceira camada de estações é responsável pelo processamento de chamadas cujo nível médio de sinal rádio recebido é inferior a um nível de *threshold* preestabelecido. Nas situações em que o nível médio do sinal da ligação rádio com uma estação desta camada é superior ao nível médio do sinal da ligação rádio com uma estação da camada macrocelular, o tráfego é sempre escoado por esta camada, desde que o nível médio do sinal da ligação rádio não seja inferior a este limite. A camada macrocelular alivia assim algum do tráfego escoado por aquela camada.

A camada composta por estações demasiado altas (pelo menos do ponto de vista de evolução da rede neste momento) é normalmente designada por *umbrella*. Este termo provém do facto de estas estações, estando normalmente localizadas no alto de montes ou colinas situadas fora dos aglomerados urbanos, garantirem a cobertura da rede em pontos onde a densidade de estações macrocelulares é menor (normalmente em zonas rurais).

Em resumo, uma possível organização para a arquitectura de uma rede móvel celular em avançado grau de evolução é a seguinte:

- Primeira camada - estações microcelulares de 900 MHz e estações macrocelulares de 1800 MHz.
- Segunda camada - estações macrocelulares de 900 MHz.
- Terceira camada - estações de 900 MHz tipo *umbrella*.

Nas secções seguintes são abordados em detalhe os princípios básicos da organização em arquitectura hierárquica. Na secção 2 começa-se pela abordagem dos princípios básicos inerentes a este tipo de redes. Na secção 3 são descritos os princípios básicos da propagação em ambientes microcelulares. Na secção 4 são analisadas as técnicas disponíveis para atribuição do espectro rádio às diferentes camadas da rede. Na secção 5 é abordada a problemática do *handover* em redes hierárquicas. Na secção 6 são apresentados e analisados alguns modelos de tráfego desenvolvidos para aferição do seu desempenho. A análise é desencadeada quer por meio da simulação quer por meio

de modelos teóricos desenvolvidos para este efeito. Finalmente, na secção 7 são apresentadas as conclusões.

## 6.2 Redes móveis hierárquicas - princípios básicos

Nesta secção são descritos com maior grau de detalhe os princípios básicos subjacentes à organização da arquitectura de uma rede móvel celular no formato hierárquico.

### 6.2.1 Estabelecimento de prioridades na gestão do tráfego oferecido

A figura 6.1 ilustra a arquitectura de uma rede móvel celular organizada em três camadas hierárquicas.

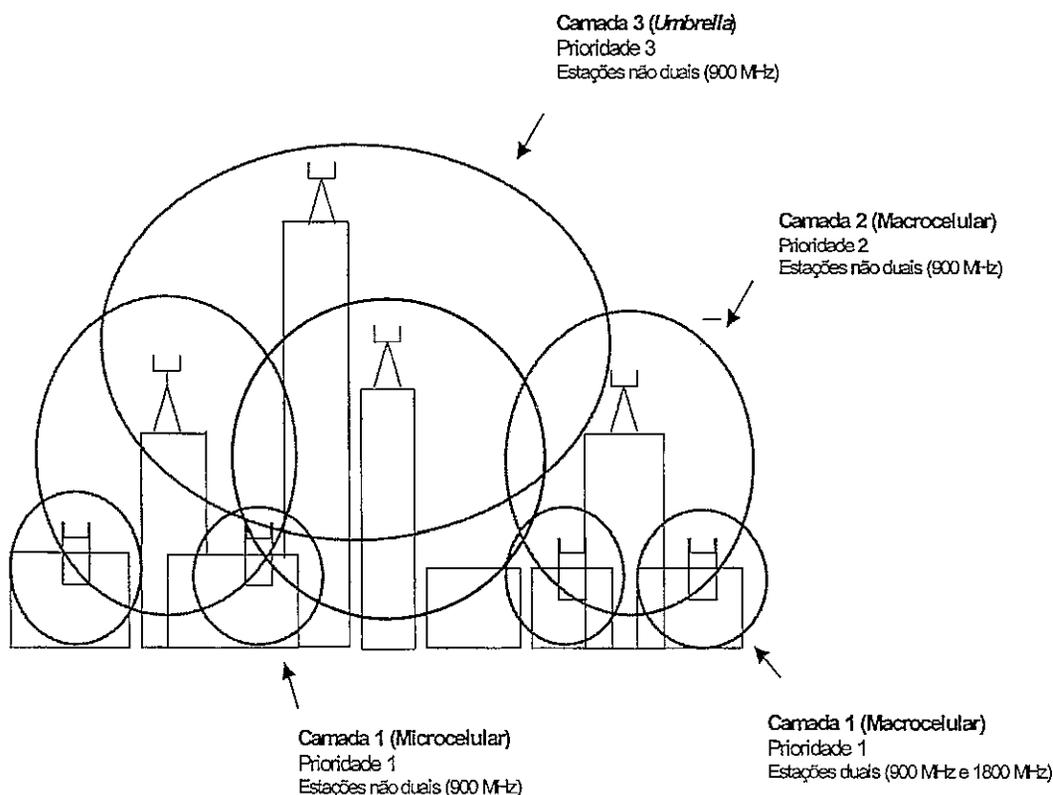


Figura 6.1– Arquitectura de uma rede celular hierárquica.

Nesta figura estão ilustrados todos os elementos constituintes de uma rede hierárquica:

- Camada 1 - composta por microcélulas e macrocélulas associadas a estações de 1800 MHz. Camada responsável pela maior parte da capacidade instalada na rede.

- Camada 2 - composta por macrocélulas associadas a estações de 900 MHz apenas. Impede a queda de chamadas a decorrer por meio da realização de *handovers* (*overflows*) a partir da primeira camada, sempre que o móvel atinja uma zona de sombra por falta de cobertura. Funciona ainda como uma capacidade de reserva, absorvendo o tráfego em excesso que não é absorvido pela primeira camada. O objectivo é minimizar a probabilidade de bloqueio na fase de estabelecimento de novas chamadas  $P_B$ , bem como a probabilidade de terminação forçada de chamadas a decorrer  $P_T$ , através da diminuição da probabilidade de falha no processo de *handover*  $P_{fh}$ . Finalmente, serve como camada de resgate para situações de degradação da qualidade da ligação rádio, para as chamadas inicialmente estabelecidas na primeira camada.
- Camada 3 - composta por macrocélulas associadas a estações de 900 MHz. Esta camada tem como objectivo fundamental o continuar de chamadas a decorrer nas zonas de sombra da cobertura da segunda camada. Auxilia ainda a transição das áreas de cobertura urbana (com maior densidade de estações) para as áreas de cobertura rurais (menor densidade de estações).

Para que este tipo de organização hierárquica pudesse ser estabelecido, foram criados mecanismos especiais de atribuição de prioridades, no processamento do tráfego oferecido através das diferentes camadas da rede. Uma forma prática e eficaz de implementação deste mecanismo de prioridades é a metodologia seguida pelo fornecedor Ericsson. O equipamento Ericsson utiliza três parâmetros, definidos ao nível de cada célula da rede, que permite proceder à esta estruturação em camadas: LEVEL, LEVTHR e LEVHYST [ERI/HCS].

- LEVEL – Determina o nível de prioridade atribuído a cada célula da rede. Determina implicitamente a camada à qual a célula passa a pertencer na arquitectura. Este parâmetro é utilizado na elaboração da lista das melhores células para o processo de actualização de localização (*location updating*) e de *handover*.
- LEVTHR – A cada uma das células das camadas 1 e 2 está associado um nível de *threshold* mínimo para o nível médio do sinal recebido em cada móvel. Este parâmetro é utilizado no processo de decisão da necessidade de ocorrência de um *handover* de/para uma camada superior. Um *handover* é desencadeado para uma

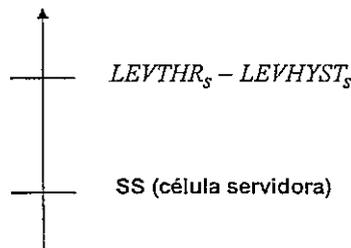
célula de uma camada superior (da camada 1 para a camada 2 ou da camada 2 para a camada 3) sempre que o nível médio do sinal rádio numa camada inferior (respectivamente 1 ou 2) passa a ser inferior a esse nível de *threshold*, enquanto ao mesmo tempo nenhuma célula existente na mesma camada pode assegurar a ligação com um nível médio de sinal igual ou superior. Nenhum *handover* para a camada inferior (respectivamente 1 ou 2) é realizado enquanto não houver pelo menos uma célula dessa mesma camada que possa assegurar a ligação rádio com um nível médio de sinal igual ou superior.

- LEVHYST - Este parâmetro define um nível de histerese a somar ao valor definido pelo parâmetro LEVTHR, por forma a limitar o efeito *ping-pong* entre as camadas da rede.

Os parâmetros LEVTHR e LEVHYST são definidos ao nível de cada célula das camadas 1 e 2. As condições necessárias à transição de chamadas entre níveis são portanto as seguintes:

#### Sentido ascendente

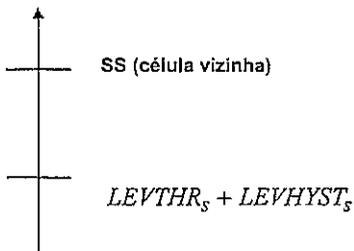
SS (célula servidora), camada 1



A célula servidora pertence à camada 1 ou 2. Se o nível médio de sinal relativo à célula servidora (SS no gráfico abaixo) passa a ser inferior a  $LEVTHR_s - LEVHYST_s$  (o subscrito “S” denomina a célula servidora) então o algoritmo de localização da melhor vizinha, para realização de um eventual *handover*, passa a considerar células de uma camada superior (respectivamente 2 ou 3) na lista de melhores vizinhas. Esta é a condição ilustrada no gráfico seguinte. No entanto, células vizinhas localizadas na mesma camada e com níveis médios de sinal superiores a  $LEVTHR_s + LEVHST_s$  terão sempre uma prioridade de atendimento superior para realização de um eventual *handover*, procurando manter a chamada na mesma camada.

## Sentido descendente

SS (célula vizinha), camada 2



A célula servidora pertence à camada 2 ou 3. Se o nível médio de sinal relativo a uma célula de uma camada inferior (respectivamente 2 ou 1) passa a ser superior a  $LEVTHR_N - LEVHYST_N$  (o subscrito “N” denomina a célula vizinha da camada inferior), a referida célula será adicionada à lista de melhores vizinhas pelo algoritmo de localização. Esta é a condição ilustrada no gráfico seguinte. Qualquer célula pertencente à uma camada inferior (respectivamente 1 ou 2) nestas condições têm uma prioridade de atendimento superior para realização de um eventual *handover*, procurando transpor a chamada para a camada imediatamente inferior.

### 6.2.2 Distinção entre tráfego “lento” e tráfego “rápido”

Conforme foi salientado anteriormente, a organização da arquitectura de uma rede móvel celular no formato hierárquico é uma ideia recente, decorrente da evolução da taxa de penetração do serviço de rádio móvel celular. Nos sistemas analógicos de primeira geração, as chamadas eram realizadas a partir de terminais montados no interior de viaturas. No entanto, nos sistemas digitais de segunda geração, a evolução tecnológica conduziu a um grau de miniaturização dos terminais, o que faz com que seja possível a realização de chamadas por assinantes que se deslocam a pé (assinantes pedestres). Ou seja, o tráfego de mobilidade das rede analógicas dos sistemas de primeira geração deu origem a dois tipos de tráfego nas redes digitais dos sistemas de segunda geração:

- Tráfego “lento” associado a assinantes que se deslocam a pé enquanto comunicam.
- Tráfego “rápido” associado a assinantes em movimento (comunicam a partir do interior de viaturas).

Os mapas de distribuição do tráfego oferecido às redes digitais dos sistemas de segunda geração revelam que a maior fatia do tráfego é gerada em ambientes do tipo urbano (tráfego “lento”). O tráfego do tipo “lento” está mais de acordo com a estrutura básica das microcélulas da primeira camada de uma rede hierárquica:

- Por serem de tamanho reduzido (pelo menos quando comparado com as macrocélulas da segunda camada), são responsáveis pela maior parte da capacidade instalada na rede (aumentam a eficiência espectral devido à maior disponibilização de recursos rádio).
- Uma vez que a velocidade de deslocamento dos móveis é reduzida, a taxa de atravessamento das fronteiras de cada célula é bastante baixa, contribuindo para uma menor probabilidade de terminação forçada de chamadas a decorrer por falha de *handover*  $P_{fh}$ . Este facto está de acordo com as dimensões normais de uma microcélula da primeira camada.

Já o tráfego do tipo “rápido” está mais de acordo com a estrutura básica das macrocélulas da segunda camada:

- As chamadas geradas por móveis rápidos estão associadas a maiores taxas de atravessamento das fronteiras de uma célula. Deste modo devem ser atendidas prioritariamente pelas macrocélulas da segunda camada, por forma a reduzir a taxa de realização de *handovers* e deste modo o valor para a probabilidade de terminação forçada de chamadas a decorrer devido a falhas por *handover*,  $P_{fh}$ .
- As chamadas associadas a móveis rápidos são responsáveis por um aumento na sinalização imposta à rede para execução de *handovers*. Por outro lado, devido às características de propagação num ambiente microcelular, o tempo de execução de cada *handover* deve ser muito reduzido, por forma a evitar degradações muito rápidas na qualidade de uma chamada a decorrer que porventura possa levar à sua terminação forçada.

Existem actualmente mecanismos de identificação do tipo de tráfego oferecido, por forma a encaminhá-lo para a camada de rede mais apropriada às suas características. Estes baseiam-se normalmente na estimação da velocidade de deslocamento de cada móvel. Este ponto será analisado em pormenor mais adiante [LAG96, IVA95, JAB97].

### 6.2.3 Implementação em arquitecturas multi-banda (GSM 900 e 1800 MHz)

Conforme foi salientado anteriormente, a organização da arquitectura de uma rede móvel celular num formato hierárquico não pressupõe uma organização do ponto de vista físico, composta por microcélulas na primeira camada e macrocélulas nas segunda e terceira camadas. Pressupõe antes uma organização baseada em critérios lógicos e funcionais, através da introdução de parâmetros. Um exemplo típico é a utilização conjunta de estações macrocelulares de 1800 MHz e microcelulares na primeira camada. As estações de 1800 MHz são em tudo semelhantes as estações de 900 MHz, sendo que a única diferença é utilizarem uma gama de frequências superior. Por este motivo, a atenuação devido à propagação no meio (*path loss*) é maior, sendo necessário um maior número de estações base para cobrir a mesma área geográfica coberta pela rede GSM 900 MHz. No entanto, normalmente o objectivo pretendido com a sua introdução na rede é aumentar a capacidade instalada e aliviar o tráfego escoado pelas estações de 900 MHz. Sendo assim, normalmente as estações de 1800 MHz estão co-localizadas com as estações de 900 MHz mais carregadas em termos de tráfego escoado (mesmo *site*). Para tal, é necessário proceder à correcta parametrização por forma a que o tráfego oferecido seja atribuído prioritariamente à camada de estações de 1800 MHz.

Uma vez que a atribuição de frequências na banda dos 1800 MHz é um processo ainda recente, a penetração de terminais duais (que podem emitir nas duas bandas de frequências) ainda é bastante pequena. Quando essa taxa de penetração aumentar (e em decorrência o tráfego dual), tornar-se-á necessário proceder a ajustamentos da parametrização por forma a proceder a um maior equilíbrio no tráfego escoado por ambas as camadas (estações de 900 MHz e estações de 1800 MHz).

### 6.2.4 Evolução para a cobertura de espaços públicos interiores (cobertura *indoor*)

Foi salientado na introdução que a evolução tecnológica das redes móveis celulares criou nas pessoas a necessidade e o hábito de terem acesso ao serviço em qualquer lugar e em qualquer instante. Se antes o objectivo era a cobertura dos espaços exteriores, tais como as vias de comunicação e ruas das cidades (cobertura *outdoor*),

tornou-se também necessário estabelecer a cobertura dos espaços públicos interiores (cobertura *indoor*). Exemplos típicos de cobertura de espaços públicos interiores são os centros comerciais e terminais de aeroportos. Em particular são ambientes geradores de grande densidade de tráfego. Como tal são normalmente alvo de projectos especiais de cobertura de interiores. Estes projectos têm como objectivo não só garantir e melhorar a cobertura da rede nestes espaços (cobertura *indoor*) mas também absorver o tráfego aí gerado e que antes era oferecido à camada exterior. Estes dois aspectos são considerados nas secções seguintes.

### **Aspectos de cobertura [AND95, RAP96]**

As estações base instaladas no topo dos edifícios não asseguram uma cobertura eficaz dos seus interiores devido à grande atenuação sofrida pelo sinal rádio nas suas paredes externas e divisões internas. Normalmente os andares superiores apresentam uma cobertura superior à dos andares inferiores e mais próximos do nível do R/C. Isto deve-se essencialmente ao facto de os andares superiores normalmente estarem em linha de vista com as estações base instaladas no topo dos edifícios vizinhos. Deste modo, a atenuação imposta pelas paredes externas é menor. No entanto, uma vez que os andares inferiores (mais próximos do nível do R/C) não estão em linha de vista com estas estações base, a propagação dá-se por reflexões e difracções nas paredes dos edifícios vizinhos. A atenuação do sinal rádio é assim bastante superior, ocasionando uma cobertura interior bastante incipiente.

Além da atenuação causada pelas paredes externas dos edifícios, existe uma componente de atenuação causada pelas paredes delimitadoras de cada piso. À medida que o sinal emitido por uma estação base atravessa cada piso em direcção ao R\C, sofre uma atenuação cada vez maior. Por outro lado, em empreendimentos localizados no subsolo é totalmente impossível assegurar a cobertura a partir de estações base exteriores. A introdução das microcélulas atenua um pouco este problema, uma vez que facilita a cobertura dos pisos inferiores que passam a estar em linha de vista com estas estações. No entanto este auxílio é apenas relativo dado os níveis de potência utilizados na emissão.

### **Capacidade**

Normalmente estes espaços públicos constituem ambientes geradores de grande densidade de tráfego. Por este motivo, para evitar a congestão das estações base torna-se necessário o seu sobre-dimensionamento. Os projectos de cobertura *indoor* de espaços públicos são implementados tendo em vista os dois objectivos seguintes:

- Em primeiro lugar é feita uma estimativa do tráfego que se espera venha a ser gerado no interior do empreendimento. Esta estimativa é conseguida recorrendo-se a alguns dados estatísticos. Para o exemplo dos centros comerciais estes dados referem-se normalmente a: número médio de visitantes, número de lojas, número de lugares no estacionamento, tráfego esperado por assinante, etc... Através da estimativa do tráfego que se espera venha a ser oferecido, determina-se o número de estações base necessárias.
- A seguir dá-se início ao projecto de cobertura propriamente dito. Para tal são normalmente realizados ensaios de propagação, recorrendo-se a terminais de teste, por forma a calibrar o nível de potência necessário à emissão. O objectivo é garantir níveis elevados de sinal no interior, enquanto se minimizam as fugas para o exterior. Estes ensaios têm também como objectivo determinar os pontos exactos de instalação das antenas interiores. Por forma a minimizar os efeitos negativos da dispersão do sinal (*delay spread* causado pelas múltiplas reflexões em espaços interiores), bem como os efeitos nocivos da atenuação do sinal nas divisões internas de cada espaço público, são normalmente utilizados sistemas de antenas distribuídos, ou seja, várias antenas ligadas por meio de *splitters* de potência a cada estação base [CHO4, SAL,87].

Devido ao facto de serem utilizadas potências de emissão bastante reduzidas (da ordem dos 200 a 500 mW) as estações utilizadas na cobertura de espaços interiores são normalmente denominadas picocélulas. Estas podem ser entendidas como que formando uma quarta camada da arquitectura da rede móvel celular.

### **6.2.5 Aspectos a considerar no projecto e implementação de uma rede móvel celular hierárquica**

No projecto e implementação de uma rede móvel celular hierárquica há sempre que considerar os aspectos seguintes [SAR93]:

- Identificação das áreas geradoras de maior densidade de tráfego (conhecidas como *hot spots*). Definição da localização exacta de cada estação. Determinação do nível de potência à saída de cada estação como forma de dimensionar a área de cobertura da mesma. Aplicação de modelos de propagação e simulação para definição teórica da área de cobertura de cada célula.
- Definição da forma como deve ser distribuído o espectro disponível pelas camadas da rede. Relativamente a esta questão importa salientar que existem duas formas básicas de partilhar o espectro: a utilização de bandas separadas para cada camada ou a reutilização de portadoras em ambas as camadas.
- Implementar os mecanismos de encaminhamento do tráfego oferecido pelas várias camadas da rede (mecanismos de atribuição de recursos rádio e de controle de *handovers*). Importa estudar e avaliar as situações específicas em que deve haver transferência de chamadas a decorrer entre as camadas da rede, como forma de rentabilizar o espectro disponível e assegurar a manutenção do grau de serviço mínimo exigido.
- Analisar os mecanismos de propagação no ambiente microcelular. A propagação do sinal rádio neste tipo de ambiente é radicalmente diferente do mecanismo de propagação num ambiente macrocelular conforme se verá mais adiante.

Estes aspectos serão descritos em pormenor nas secções que se seguem.

### **6.3 Redes móveis hierárquicas - propagação em ambientes microcelulares**

A propagação do sinal rádio num ambiente microcelular é radicalmente diferente da propagação em ambientes macrocelulares. Os edifícios à volta de cada microcélula confinam a energia propagada, funcionando como uma espécie de guia de ondas. O sinal que chega à antena de um móvel situado ao nível da rua (plano inferior cerca de 2 a 5 metros do plano vulgar de instalação de uma microcélula) é resultado da sobreposição de várias componentes do sinal emitido, originadas quer por reflexões nas paredes dos edifícios quer por difracções nas esquinas dos cruzamentos das ruas.

As características específicas de propagação, aliadas ao facto de se utilizarem baixos níveis de potência na emissão, fazem com que os níveis de interferência co-canal e por canal adjacente resultantes do processo de reutilização de frequências, quer nas microcélulas vizinhas quer nas macrocélulas das camadas superiores, apresente valores tais que permita distâncias de reutilização de frequências menores.

Num ambiente microcelular a propagação do sinal rádio dá-se de duas formas distintas [AND95, RAP SAL87, XIA93]:

- Propagação em linha de vista entre o móvel e a estação microcelular - LOS (*line of site propagation*).
- Propagação sem linha de vista entre o móvel e a estação microcelular - NLOS (*non line of site propagation*).

A figura 6.2 ilustra o mecanismo de propagação típico dum ambiente microcelular:

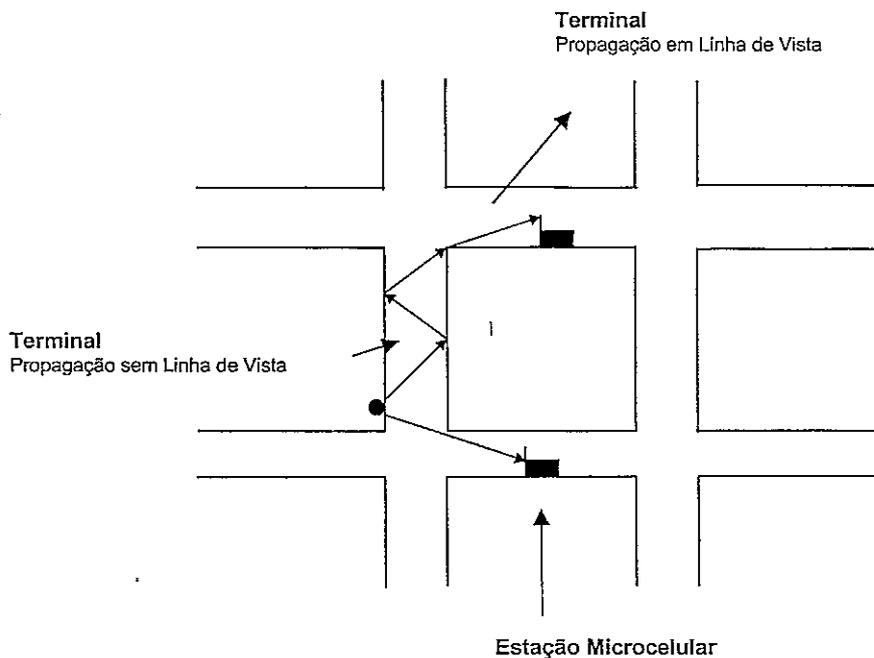


Figura 6.2– Diferentes mecanismos de propagação em ambientes microcelulares.

As condições em que se dá a propagação do sinal rádio no cenário microcelular são altamente dependentes do tipo de ambiente considerado: (i) largura das ruas, (ii) obstáculos em movimento, (iii) materiais constituintes das paredes dos edifícios que influenciam o coeficiente de reflexão nas suas paredes, bem como a penetração nos

seus interiores e ainda (iv) obstáculos existentes à volta dos edifícios que possam ocasionar dispersão (e conseqüente atenuação das componentes reflectidas nas paredes dos edifícios).

Em [XIA94] são apresentados os resultados obtidos a partir de medições de propagação efectuadas na banda dos 900 MHz num ambiente microcelular. São apresentados também modelos para o mecanismo de propagação. A obtenção de modelos teóricos de propagação é um aspecto muito importante do ponto de vista da simulação e planeamento teórico da cobertura imposta neste tipo de ambiente por estações microcelulares. Os resultados apresentados provêm de medições efectuadas na cidade de Manhattan às frequências de 900 MHz e 11 GHz, e consistiram em registos das medições do nível de sinal recebido ao longo do percurso de um terminal de teste em movimento relativamente à uma estação microcelular. Através destes registos foi possível elaborar um gráfico da atenuação do sinal emitido pela estação microcelular em função da distância (*power loss factor*). Para eliminar a influência do desvanecimento rápido (*fast fading*) procedeu-se à uma amostragem dos valores recebidos numa janela temporal com a largura de 10 a 20 comprimentos de onda. Desta forma, os resultados obtidos apenas deixam transparecer o efeito do desvanecimento lento (*slow fading*). Os resultados obtidos demonstram que o nível médio do sinal rádio recebido sofre um decaimento com a distância  $d$  à estação base da ordem de  $d^{-2}$  (lei de propagação em espaço livre) a  $d^{-4}$ , para ambas as bandas de frequência, quando a propagação se dá em linha de vista (LOS).

Segundo [LAR92], a atenuação do sinal rádio com a distância à estação microcelular para a propagação em linha de vista (LOS) segue uma lei de declive duplo.

- O primeiro declive é normalmente um declive suave. Resultados obtidos a partir de medições na banda dos 900 MHz demonstram que o valor deste declive é da ordem  $d^{-2}$ , ou seja, segue a lei de propagação em espaço livre (está de acordo com os resultados obtidos em [XIA94]).
- A partir dos 200 a 300 metros (ponto de *breakdown*) a variação do sinal médio recebido já segue um segundo declive, normalmente mais acentuado que o primeiro. Os resultados obtidos a partir de medições na banda dos 900 MHz

demonstram que o valor deste declive é da ordem de  $d^{-4}$ , podendo mesmo em alguns casos alcançar o declive  $d^{-9}$  [LAR92], (mais uma vez está de acordo com os resultados obtidos em [XIA94]).

Estes valores são altamente dependentes da geometria das ruas do ambiente urbano considerado, bem como das propriedades electromagnéticas dos edifícios e ruas. Por este motivo, para efeitos de utilização de modelos para simulação em ferramentas computacionais, torna-se necessária a realização de ensaios de propagação para aferição dos modelos e determinação do valor exacto de ambos os declives, bem como do ponto de *breakdown*.

Quando a propagação se dá sem ser em linha de vista (ao atravessar uma esquina por exemplo), ocorre um decaimento da ordem dos 20 a 25dB no nível médio do sinal recebido [FRU96].

## 6.4 Redes móveis hierárquicas - planeamento celular

Uma vez analisados os aspectos relacionados com a propagação em ambientes microcelulares, importa analisar a forma como deve ser efectuado o planeamento das redes móveis celulares hierárquicas. Sendo o espectro disponibilizado a cada operador limitado, importa estudar formas eficientes de repartição entre as diferentes camadas da rede. Esta partilha deve ser realizada tendo sempre em vista a necessidade de se rentabilizar ao máximo a taxa média de ocupação de cada recurso rádio disponível em qualquer camada da rede.

Nas secções seguintes são analisadas as técnicas de planeamento celular normalmente utilizadas nas redes hierárquicas.

### 6.4.1 Diferentes formas de organização da camada microcelular

Basicamente existem duas formas distintas de organização da camada microcelular em redes hierárquicas:

- Uma camada composta por microcélulas isoladas, destinadas à cobertura de áreas geradoras de grande densidade de tráfego (*hot spots*). O objectivo desta organização será apenas o de descongestionar macrocélulas que cubram áreas

geográficas que são casos típicos de grande densidade de tráfego gerado. Como exemplos podemos citar: praças com bares e esplanadas, ruas com grande concentração de comércio e mesmo coberturas em centros comerciais.

- Uma camada composta por uma distribuição contínua de microcélulas. O objectivo desta organização será não só o de gerar capacidade mas também estabelecer cobertura, diminuindo assim o número total de macrocélulas necessárias para cobrir o espaço urbano pretendido. Este tipo de opção é seguido em redes que já atingiram um grau de evolução elevado, onde os baixos custos inerentes ao tipo de equipamento microcelular por um lado e as maiores facilidades conseguidas no processo de contratação para instalação de estações microcelulares por outro (pelo menos quando comparado com os custos de contratação de locais para instalação de macrocélulas), tornam este tipo de alternativa o caminho a seguir.

O planeamento celular em redes hierárquicas está directamente associado ao tipo de organização utilizada para a camada microcelular, conforme se verá adiante.

#### **6.4.2 Métodos utilizados na partilha do espectro disponível entre as camadas da rede**

Existem basicamente duas formas distintas de se proceder à partilha do espectro disponível entre as diferentes camadas de uma rede móvel hierárquica [LAG97, MAD97]:

- O espectro disponível é partido em bandas separadas de frequências pelas diferentes camadas da arquitectura de rede.
- Uma parte do espectro disponível é comum às diferentes camadas da arquitectura de rede.

A primeira alternativa impõe a utilização de padrões de reutilização de frequências distintos para as camadas microcelular e macrocelular. Apesar de evitar a complexidade do processo de escolha das portadoras (que impliquem o menor nível de interferência) devido à sobreposição das coberturas entre as diferentes camadas, resulta num mau aproveitamento do espectro disponível.

A segunda alternativa conduz a uma melhor rentabilização do espectro rádio disponível. No entanto, deve ser utilizada em conjunto com outras técnicas de planeamento (*frequency hopping*, ajuste dinâmico da potência emitida, etc.) por forma a limitar o efeito negativo do aumento da interferência co-canal e por canal adjacente daí resultante na qualidade do processo de comunicação.

Relativamente à organização microcelular, constituída por uma distribuição contínua de microcélulas, normalmente utiliza-se uma técnica híbrida. É utilizada uma banda dedicada exclusivamente à camada microcelular e outra banda partilhada por ambas as camadas.

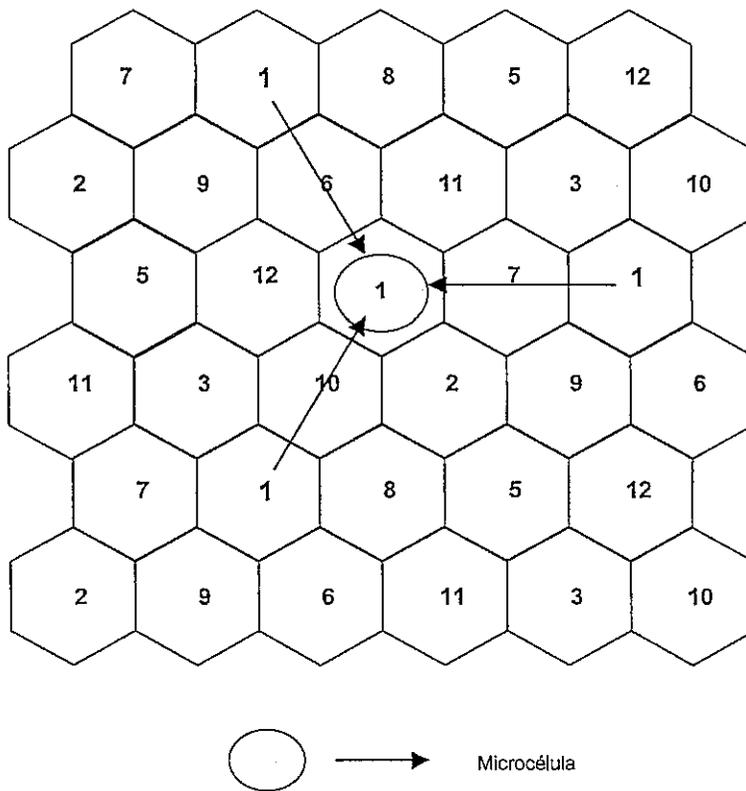


Figura 6.3– Microcélula isolada num cluster de macrocélulas.

#### 6.4.2.1 Reutilização do espectro disponível entre microcélulas isoladas para cobertura de áreas tipo hot spot

Em [LAG97] são descritos os efeitos resultantes da reutilização de portadoras da camada macrocelular em microcélulas isoladas da camada microcelular destinadas à cobertura de *hot spots*. A título de exemplo é considerado um padrão de reutilização

$N_{cg} = 12$  na camada macrocelular e uma microcélula por cada *cluster* de 12 macrocélulas, conforme ilustrado na figura 6.3. O espectro disponível é organizado em 12 grupos de portadoras (grupos 1 a 12). Conforme pode ser observado, e devido à forma como é feita a atribuição de portadoras a cada célula da rede, para cada microcélula existem três possíveis estações interferentes no primeiro anel de células co-canais.

A figura 6.4 ilustra os diferentes elementos intervenientes no processo de comunicação e serve como auxílio na obtenção das relações  $C/I$  para cada macrocélula e microcélula.

São considerados dois tipos de terminais móveis. Um terminal portátil utilizado por um assinante pedestre ( $T_m$ ) e um terminal móvel utilizado por um assinante que se desloca dentro de um veículo ( $T_M$ ). Atendendo àquilo que já foi descrito anteriormente acerca da partilha de tráfego entre as diferentes camadas da rede, o terminal ( $T_m$ ) estabelece chamadas servindo-se dos recursos rádio da camada microcelular (sempre que exista cobertura), enquanto que o segundo terminal ( $T_M$ ) estabelece chamadas servindo-se dos recursos rádio da camada macrocelular.

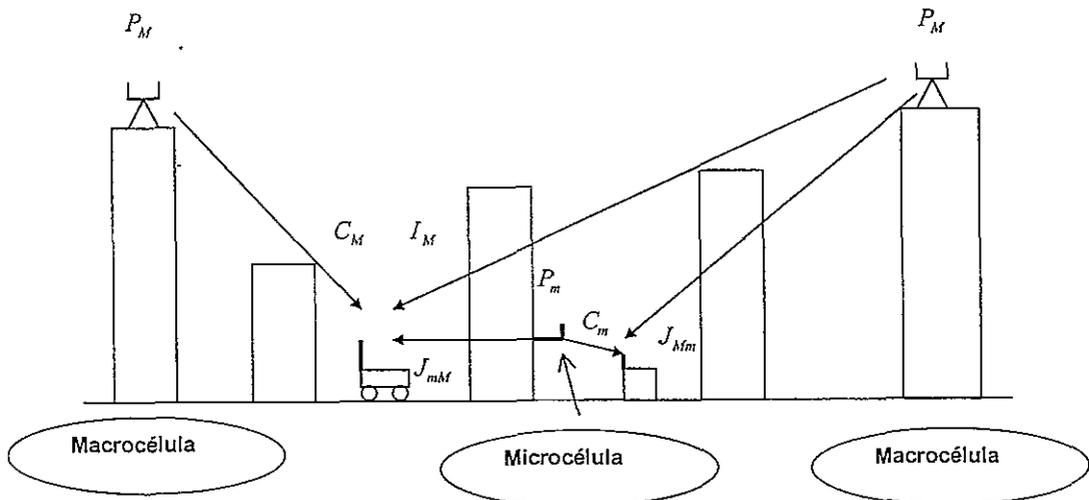


Figura 6.4—Interferências entre camadas.

A relação  $(C/I)_M$  para o terminal  $T_M$  é dada por:

$$\left(\frac{C}{I}\right)_M = \frac{C_M}{I_M + J_{mM}} \quad (1)$$

em que:

- $I_M$  é a soma do nível médio de todos os sinais interferentes das seis células vizinhas do primeiro anel de células co-canais.
- $J_{mM}$  é o nível médio do sinal interferente da microcélula co-canal com a macrocélula que domina na área onde se encontra  $T_M$ .
- $C_M$  é o nível médio do sinal desejado a partir da macrocélula de serviço recebido pelo terminal  $T_M$ .

Uma vez que a probabilidade de o terminal  $T_M$  se encontrar em linha de vista com a estação microcelular é muito reduzida, podemos considerar que na maioria dos casos a propagação do sinal  $J_{mM}$  dá-se sem ser em linha de vista. Logo a sua influência pode ser desprezada. Nas situações em que  $T_M$  se encontra em linha de vista com a estação microcelular, o mais provável é que efectue um *handover* para a macrocélula cuja área de cobertura se sobrepõe à da microcélula em questão e que já não é co-canal com a estação microcelular.

A relação  $(C/I)_m$  para o terminal  $T_m$  é dada por:

$$\left(\frac{C}{I}\right)_m = \frac{C_m}{J_{Mm}} \quad (2)$$

em que:

- $J_{Mm}$  é a soma do nível médio dos sinais interferentes emitidos pelas três macrocélulas co-canais à microcélula em questão (ver figura 6.4).
- $C_m$  é o nível médio do sinal desejado a partir da microcélula de serviço e recebido pelo terminal  $T_m$ .

Na maior parte das vezes o terminal  $T_m$  encontra-se em linha de vista com a sua estação microcelular, desta forma a propagação dá-se em linha de vista, podendo aplicar-se o modelo descrito no ponto anterior. A interferência  $I_m$  causada pelas demais microcélulas que reutilizam as mesmas portadoras pode ser desprezada uma vez que: (i) não se encontram em linha de vista umas com as outras e (ii) os níveis de potência emitidos pelas microcélulas são muito inferiores aos utilizados nas macrocélulas.

Desta forma a equação (2) reduz-se à equação seguinte:

$$\left(\frac{C}{I}\right)_m = \frac{P_m}{P_M} \frac{L_{Mm}}{L_m} \quad (3)$$

em que:

- $L_m$  representa a atenuação em espaço livre do sinal emitido pela microcélula e que é recebido pelo terminal  $T_m$ .
- $L_{Mm}$  representa a atenuação em espaço livre do sinal emitido pela macrocélula e que é recebido pelo terminal  $T_m$ .

Devido ao facto de  $L_m \ll L_{Mm}$ , há uma compensação para o desnível das potências emitidas por cada macrocélula e microcélula. Desta forma, o valor obtido para a relação  $(C/I)_m$  é elevado o suficiente para que a comunicação se processe com o mínimo de qualidade necessário.

Demonstra-se assim que a ligação descendente entre as estações microcelulares e os terminais móveis a elas atribuídos é a que está mais sujeita a interferências originadas pela ligação descendente entre as estações macrocelulares e os terminais a elas atribuídos. Quanto mais pequena for a área de cobertura da macrocélula maior é este nível de interferência.

Em [ALM96] são novamente analisadas as consequências da reutilização de portadoras da camada macrocelular na camada microcelular. Para tal é considerada uma camada macrocelular composta por 108 macrocélulas agrupadas em 9 *clusters* de 12 células cada um. O padrão de reutilização utilizado é o padrão 4/12 para um universo de 60 portadoras, podendo ser atribuídas 5 portadoras por célula. No modelo de rede considerado é sobreposta uma camada microcelular com um padrão regular (tipo Manhattan). A camada microcelular está sobreposta a uma área correspondente a 3 macrocélulas. Considerando que não podem ser utilizadas nenhuma das portadoras utilizadas nos três grupos de portadoras atribuídos a estas três macrocélulas, nem nenhuma das portadoras utilizadas nos seis grupos de frequências atribuídos às células do primeiro anel de células vizinhas, sobram 15 portadoras para poderem ser reutilizadas na camada microcelular. Foram realizadas simulações do processo de degradação da relação C/I na ligação ascendente para ambos os tipos de estações, em

função do aumento da potência de emissão do móvel quando atribuído a uma estação microcelular. Foram realizadas também simulações para a degradação da relação  $C/I$  na ligação descendente para ambos os tipos de estações, em função do aumento da potência de emissão de uma estação microcelular.

A conclusão obtida deste processo (que corrobora aquilo que foi afirmado acima) é que a ligação descendente para uma estação microcelular é a que está mais sujeita a interferências originadas pela camada macrocelular. À medida que a potência emitida pela estação microcelular aumenta, a relação  $C/I$  na ligação descendente para a estação microcelular aumenta também. Esta variação chega mesmo a ser linear. Enquanto isso, a ligação descendente para cada estação macrocelular é insensível a variações no nível de potência à saída de cada estação microcelular. Estes resultados são ilustrados na figura 6.5.

Conforme pode ser observado, a relação  $C/I$  na ligação descendente com a camada macrocelular é independente da potência emitida na camada microcelular. Os resultados obtidos demonstram a possibilidade de haver reutilização de frequências em macrocélulas com o raio de 500 m e microcélulas distanciadas entre si de 300 m, para potências de emissão por macrocélula da ordem dos 33 dBm e por microcélula da ordem dos 13 dBm, sem haver degradação significativa da qualidade do processo de comunicação.

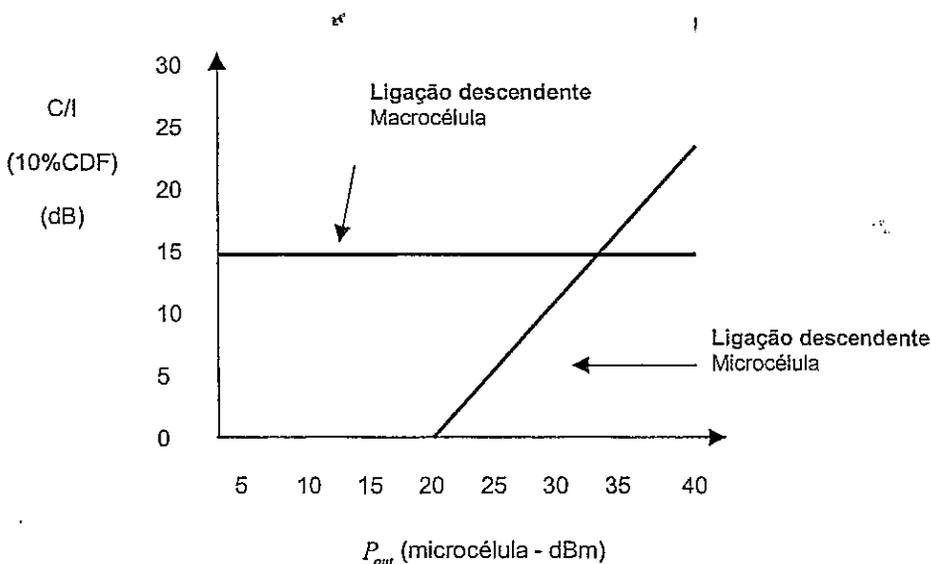


Figura 6.5– Variação na relação  $C/I$  com a potência emitida na camada microcelular.

#### 6.4.2.2 Separação do espectro disponível entre as diferentes camadas da rede

Quando a camada microcelular é constituída por uma distribuição contínua de microcélulas a reutilização de frequências da forma como foi indicada no esquema anterior já não é viável. Isto porque a interacção entre as diferentes camadas da rede é um processo complexo que faz com que a não utilização de bandas de frequências dedicadas torne difícil a escolha de portadoras livres de interferências. Numa organização microcelular deste tipo a técnica de planeamento celular normalmente utilizada resulta de uma combinação das duas técnicas descritas anteriormente: utilização de uma banda de portadoras dedicada e utilização de uma banda de portadoras comum.

Em [MAD97] é apresentada esta técnica híbrida de planeamento celular. Conforme é salientado, o dimensionamento (que envolve a determinação do número de portadoras necessárias bem como a sua escolha) da banda de frequências destinada exclusivamente a ser utilizada na camada microcelular é um processo complexo. A melhor forma de se proceder a este dimensionamento é através da realização de medidas de propagação para cada área específica, por forma a determinar o conjunto de portadoras que implique a menor degradação possível devido à interferência co-canal e por canal adjacente.

Como resultado de medições realizadas nas cidades de Hong-Kong e Munique, os autores apontam para um factor de reutilização de frequências mínimo na camada microcelular compreendido entre 5 e 8. Para microcélulas equipadas com duas unidades do equipamento rádio (TRX) isto implica a necessidade de uma banda de frequências dedicada compreendida entre 10 a 16 portadoras no total. Este número pode ser considerado como elevado se tivermos em conta o facto de o número de portadoras atribuído a cada operador ser bastante limitado. A título de exemplo refira-se que os 3 operadores móveis portugueses têm disponíveis 40 portadoras na banda GSM 900 MHz. Para um padrão de reutilização 4/12, com três portadoras atribuídas à cada célula, seriam necessárias 36 portadoras por cada *cluster* de células, sobrando apenas 4 portadoras para uso exclusivo na camada microcelular.

Uma forma possível de resolver este problema é recorrer à utilização de uma técnica avançada de planeamento celular designada por “padrão de reutilização múltiplo de frequências” - MRP (*multiple reuse pattern*). O princípio básico do MRP é o seguinte:

- Dividir o espectro total disponível em sub-bandas. Cada sub-banda contém uma fracção do grupo de portadoras disponíveis. Normalmente as sub-bandas são de dois tipos: sub-banda composta pelas portadoras BCCH e sub-banda composta pelas portadoras que não transportam os canais lógicos BCCH (sendo normalmente designadas por portadoras TCH). Conforme foi já verificado no capítulo 5, as portadoras BCCH não podem realizar FH, DTX nem “ajuste dinâmico da potência”. Por este motivo, o processo de escolha das portadoras deste grupo é normalmente executado com bastante cuidado, por forma a que esta banda esteja o mais limpa possível de interferências. As sub-bandas compostas pelas portadoras TCH estão normalmente associadas a padrões de reutilização de frequências mais agressivos. Sendo assim, são implementadas em conjunto com as técnicas FH, DTX e “ajuste dinâmico da potência”.
- Cada sub-banda é planeada separadamente das demais. Como consequência deste procedimento a rede passa a utilizar diferentes padrões de reutilização de frequências em simultâneo (um padrão para cada sub-banda).
- Devido ao facto de serem utilizadas distâncias de reutilização diferentes entre si, a interferência co-canal pode variar de portadora para portadora, conforme a sub-banda à qual pertence. Desta forma, torna-se necessária a utilização das técnicas de planeamento referenciadas acima: FH, DTX e “ajuste dinâmico da potência”.

Uma técnica muito utilizada por operadores móveis cujas redes apresentam já um certo grau de evolução está esquematizada na figura 6.6. Esta técnica implica a utilização de uma banda de BCCHs para uso exclusivo na camada macrocelular e outra banda de BCCHs para uso exclusivo na camada microcelular. Implica também a utilização de três grupos de portadoras por cada camada (além do grupo de BCCHs são definidos ainda dois grupos de portadoras TCHs para utilização conjunta em ambas as camadas). Como são atribuídas três portadoras a cada célula das duas camadas, são utilizadas três unidades de equipamento rádio por cada uma (3 TRXs por cada macrocélula e 3 trxs

por cada microcélula). A forma como é feita a atribuição das portadoras por ambas as camadas é a seguinte:

- A cada macrocélula é atribuída uma primeira portadora da banda de BCCHs exclusiva da camada macrocelular ao primeiro TRX; uma segunda portadora da primeira banda de TCHs ao segundo TRX e uma terceira portadora da segunda banda de TCHs ao terceiro TRX.
- A cada microcélula é atribuída uma primeira portadora da banda de BCCHs exclusiva da camada microcelular ao primeiro trx, uma segunda portadora da primeira banda de TCHs ao segundo trx e uma terceira portadora da segunda banda de TCHs ao terceiro trx.

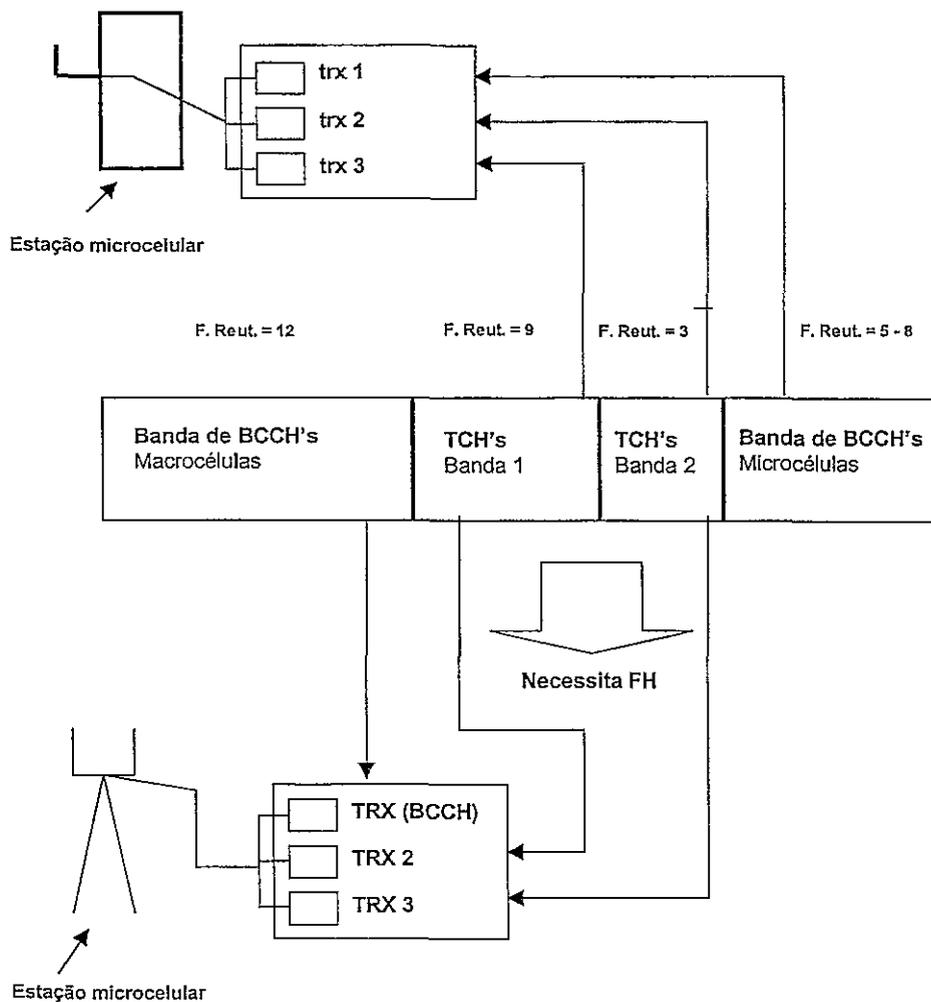


Figura 6.6- Padrão de reutilização múltipla de frequências - MRP.

O número de portadoras destinadas à banda de BCCHs exclusiva da camada macrocelular depende do padrão de reutilização de frequências aí utilizado. Para o padrão 4/12 (normalmente utilizado no planeamento celular), a banda de BCCHs da camada macrocelular será composta por 12 portadoras. O dimensionamento da banda de BCCHs é um processo que normalmente é executado com muito cuidado utilizando, na medida do possível, medidas de propagação que são utilizadas na aferição dos modelos teóricos de cobertura. Após a sua implementação são realizados ensaios que permitam aferir a qualidade resultante e proceder a ajustamentos na escolha das portadoras.

O número de portadoras destinadas à banda de BCCHs exclusiva da camada microcelular depende também do padrão de reutilização de frequências aí utilizado. Conforme foi salientado atrás, baseando-se nos resultados obtidos com a introdução deste padrão nas cidades de Hong-Kong e Munique (através de medidas de propagação), normalmente é seguido um padrão de reutilização compreendido entre 5 e 8 portadoras.

As portadoras TCH são normalmente agrupadas em duas bandas de frequências. A primeira banda é composta por 9 portadoras (factor de reutilização igual a 9 - 3x3) enquanto que a segunda banda é composta por 3 portadoras (factor de reutilização igual a 3 - 1x3). A utilização de factores de reutilização iguais a 3 e mesmo a 9 por si só seria inaceitável do ponto de vista do nível da interferência co-canal e por canal adjacente daí resultante. Sendo assim, torna-se necessária a utilização das técnicas já descritas anteriormente por forma a reduzir estes efeitos: FH, DTX e ajuste dinâmico da potência.

Normalmente o segundo grupo de portadoras TCH é atribuído ao último equipamento rádio de cada estação (terceiro TRX na camada macrocelular e terceiro trx na camada microcelular). Este método somente é eficaz se for utilizado em conjunto com o seguinte esquema de prioridades no processo de atribuição dos recursos rádio: em primeiro lugar procurar utilizar os recursos rádio disponíveis na primeira portadora (BCCH), a seguir procurar utilizar os recursos rádio disponíveis na segunda portadora e só então recorrer aos recursos rádio disponíveis na terceira portadora. O objectivo é limitar o número de portadoras do segundo grupo de portadoras TCH que estejam

simultaneamente no ar. Este aspecto é fundamental se tivermos em conta o factor de reutilização bastante agressivo para este grupo e daí a interferência resultante. Em situações de pouco tráfego ou tráfego médio, poucas estações recorrem à utilização simultânea de portadoras da segunda banda de TCHs, fazendo com que na realidade o nível de interferência co-canal e por canal adjacente gerado seja menor.

#### 6.4.2.3 Controlo da potência emitida em redes hierárquicas

Uma vez que as camadas macro e microcelulares partilham as bandas de portadoras TCH entre si torna-se necessário implementar técnicas que possibilitem a diminuição da interferência entre camadas daí resultante. Conforme foi salientado na secção 6.4.2.1, a ligação descendente para as estações microcelulares é a que está mais sujeita a interferências. Por forma a atenuar este efeito existem duas técnicas distintas baseadas no nível de potência emitido por cada estação microcelular.

- Aumentar a potência de emissão por parte de cada estação microcelular.
- Aplicar ajuste dinâmico de potência no sinal emitido por cada estação microcelular (*downlink power adjust*).

A primeira técnica (apresentada na secção 6.4.2.1) foi estudada em [AND95]. Conforme se verificou, à medida que a potência emitida pela estação microcelular aumenta, a relação C/I na ligação descendente aumenta também, enquanto que a qualidade da ligação descendente para a camada macrocelular é insensível a variações no nível da potência à saída de cada estação microcelular. Este método permite atenuar a interferência causada pela reutilização de portadoras em ambas as camadas. No entanto, pode originar alguma degradação na ligação ascendente para cada estação microcelular devido ao aumento da potência de emissão. Por outro lado, o aumento da potência de emissão na camada microcelular implica um aumento da área de dominância de cada microcélula. Este efeito acarreta um aumento no tráfego escoado por esta camada, podendo aumentar os níveis de congestão.

A segunda técnica foi também estudada em ensaios de campo realizados em áreas de grande densidade de tráfego, portanto ambientes caracterizados por uma degradação significativa da qualidade por aumento da interferência co-canal e por canal adjacente. O método de ajuste dinâmico da potência foi já descrito no capítulo 5. Basicamente, o

algoritmo de ajuste dinâmico da potência emitida por cada estação microcelular procura forçar um nível de sinal constante na recepção para cada móvel, por forma a manter a qualidade da ligação rádio (“nível pretendido” na figura 6.7). O parâmetro *threshold* ilustrado na figura 6.7 é o parâmetro LEVTHR descrito na secção 6.2.1.

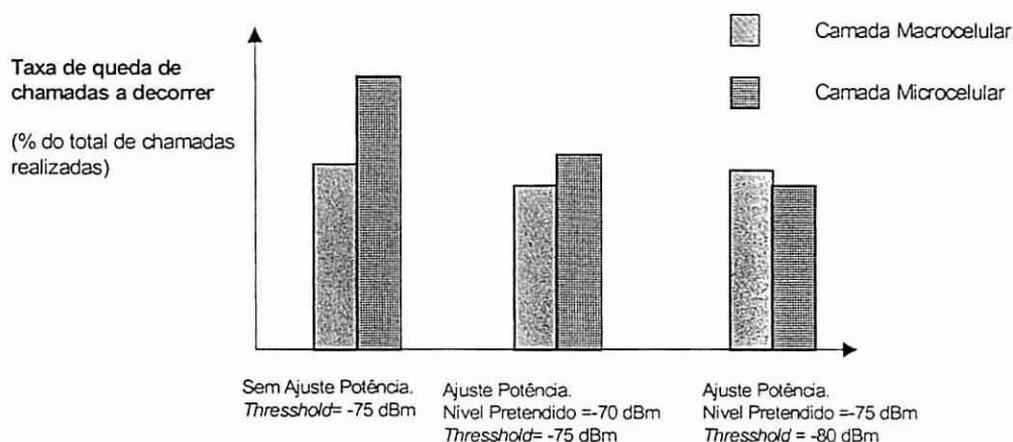


Figura 6.7— Influência do ajuste de potência na taxa de terminação forçada de chamadas a decorrer em redes hierárquicas.

O gráfico da figura 6.7 ilustra a variação da taxa de terminação forçada de chamadas a decorrer por falha na ligação rádio (*RF losses*), com a implementação do ajuste dinâmico da potência emitida na camada microcelular e para diferentes valores do nível de *threshold* (LEVTHR) e do “nível de sinal pretendido” no algoritmo. Conforme pode ser observado pelo gráfico, para o mesmo nível de *threshold* (LEVTHR = -75dBm), a utilização de ajuste dinâmico da potência na ligação descendente de cada estação microcelular, acarreta uma diminuição acentuada na taxa de terminação forçada de chamadas a decorrer por falha na ligação rádio, para ambos os tipos de estação. A variação na taxa de terminação forçada de chamadas a decorrer na camada macrocelular é pouco significativa como já seria de se esperar dado à insensibilidade da ligação descendente na camada macrocelular ao processo de variação da potência emitida por cada estação microcelular e ao facto de LEVTHR ter se mantido constante. Conforme pode ser também observado, este método facilita o ajuste do nível de *threshold* (que nas redes hierárquicas permite definir o tamanho da área de dominância de cada microcélula). A diminuição do nível de *threshold* (LEVTHR passa de -75dBm para -80dBm) origina um aumento na área de dominância de cada microcélula. No

entanto, seria de esperar que acarretasse também um aumento na taxa de terminação forçada de chamadas a decorrer por falha na ligação rádio (*RF losses*), ocasionada por uma degradação na qualidade da ligação rádio, devido ao facto de passar a haver chamadas com nível de sinal mais baixos. No entanto, a utilização de “ajuste dinâmico da potência” na ligação descendente permite contrabalançar este efeito uma vez que permite “forçar” um nível de sinal rádio na ligação descendente de cada estação microcelular mais baixo (“nível pretendido” passa de -70dBm para -80dBm), diminuindo a interferência gerada pelas estações microcelulares e desta forma a taxa de terminação forçada de chamadas a decorrer.

A variação na taxa de terminação forçada de chamadas a decorrer na camada macrocelular é pouco significativa, conforme seria de esperar. O relativo aumento quando se passa para níveis de *threshold* mais agressivos tem a ver com o aumento do número de chamadas a decorrer com um nível de sinal rádio mais baixo e deste modo mais sujeito a interferências e degradação da qualidade.

## 6.5 Redes móveis hierárquicas - gestão do mecanismo de *handover*

Um dos aspectos a considerar com a introdução das redes móveis hierárquicas, nomeadamente com a utilização de microcélulas, é a questão da gestão do mecanismo de *handover* entre microcélulas ou entre macrocélulas (intra-camadas) e entre microcélulas e macrocélulas (inter-camadas). Conforme foi salientado anteriormente, a organização em rede hierárquica pressupõe a existência de dois tipos de tráfego distintos: (i) tráfego “lento” e (ii) tráfego “rápido”. Foi também salientado que com a introdução das microcélulas é de esperar um aumento na probabilidade de ocorrência de *handovers* dentro da camada microcelular. Este aumento é devido a maior probabilidade de ocorrência do atravessamento das fronteiras de cada microcélula, originada pela sua reduzida área de dominância relativamente a das macrocélulas.

Conforme foi descrito no capítulo 4, por meio de considerações geométricas demonstra-se que a taxa média de atravessamento  $\eta$  das fronteiras de uma célula é directamente proporcional à velocidade de deslocamento  $V$  do móvel e ao perímetro  $L$  definido pelas suas fronteiras, sendo inversamente proporcional à sua área de

dominância  $S$ . Sendo assim, é de esperar que o tráfego “rápido” seja responsável pela maior parte dos *handovers* efectuados numa rede hierárquica, nomeadamente ao nível da camada microcelular. Já o tráfego “lento” origina um menor número de ocorrência de *handovers*, uma vez que a probabilidade de atravessamento das fronteiras de cada célula é menor.

Por outro lado, foi também salientado anteriormente que a utilização de velocidades elevadas durante o processo de comunicação, pode originar um aumento no número de chamadas que são forçadas a terminar, ocasionadas por variações bruscas no nível de sinal recebido. Este efeito é particularmente importante quando o móvel está atribuído à camada microcelular. Sendo as características particulares de propagação num ambiente microcelular propícias a variações bruscas no nível de sinal (especialmente devido ao “efeito esquina”), há um aumento na tendência de queda forçada de chamadas a decorrer devido a falhas na ligação rádio, antes de haver tempo para ocorrência de um *handover* que mantenha a continuidade da ligação.

As consequências do tráfego “rápido” são portanto as seguintes:

- Aumento na taxa de pedido de *handovers* ocasionando um aumento no tráfego de sinalização na rede.
- Degradação da qualidade da ligação rádio devido a variações bruscas no nível de sinal recebido pelo móvel.

Ambos os factores são responsáveis pelo aumento do número de chamadas forçadas a terminar. Como forma de se limitar este efeito negativo na qualidade do serviço prestado, e tendo em conta as características específicas de cada camada da rede hierárquica, normalmente procede-se à seguinte divisão do tráfego oferecido à rede:

- O tráfego “rápido” é normalmente escoado para as camadas superiores da rede. Para tal são utilizadas técnicas de aferição da velocidade de deslocamento de cada móvel.
- O tráfego “lento” é normalmente absorvido pela camada microcelular.

Nas secções seguintes são apresentadas algumas estratégias utilizadas neste processo de distribuição.

### 6.5.1 Métodos de distribuição do tráfego “rápido” e “lento” pelas camadas de uma rede hierárquica

Em [IVA95] é apresentada uma técnica muito utilizada actualmente na gestão dos *handovers* em redes hierárquicas. A técnica é denominada “critério de pedido de *handover* sensível à velocidade de deslocamento de um móvel” (MSSHO - *Mobile Speed Sensitive Handover Criterion*). Os autores afirmam que esta técnica leva a uma melhoria significativa no desempenho das redes móveis hierárquicas, no que respeita à taxa de terminação forçada de chamadas a decorrer e ainda no que respeita à carga de sinalização imposta à rede. Esta técnica baseia-se numa extensão do método clássico de activação de *handovers* por *power budget*. Conforme se viu anteriormente, o *power budget* é um parâmetro que permite averiguar de entre as células vizinhas aquela que apresenta melhor nível de sinal para a eventual realização de um *handover*. Para a  $n$ -ésima célula vizinha, o *power budget*  $pbgt(n)$  é dado por:

$$pbgt(n) = rxlev\_ncell(n) - rxlev\_dl + ms\_txpwr\_max - ms\_txpwr\_max(n) \quad (4)$$

em que:

- $rxlev\_ncell(n)$  é o nível médio de sinal (dBm) medido pelo móvel e proveniente de uma célula vizinha aquela onde ele se encontra num dado instante.
- $rxlev\_dl$  é o nível médio de sinal na ligação descendente entre o móvel e a sua estação base.
- $ms\_txpwr\_max$  e  $ms\_txpwr\_max(n)$  são respectivamente o valor máximo permitido para a potência emitida pelo móvel (dBm) na célula actual e o valor máximo permitido para a potência emitida pelo móvel (dBm) na  $n$ -ésima célula vizinha.

O critério de *handover* por *power budget* é dado por:

$$rxlev\_ncell(n) > rxlev\_min(n) \quad e \quad pbgt(n) > ho\_margin(n) \quad (5)$$

em que o parâmetro  $ho\_margin(n)$  é um parâmetro atribuído a cada célula da lista de vizinhas da célula do móvel e que determina a diferença necessária entre os níveis médio de sinal de ambas as estações (de origem e destino) para que seja desencadeado o processo de *handover*. O nível médio de sinal recebido a partir da estação vizinha

deve ser superior ao nível médio de sinal da estação actual pelo menos por este valor. A primeira condição impõe que o nível médio do sinal recebido a partir da estação base de uma célula vizinha seja superior a um nível mínimo de *threshold* ( $rxlev\_min(n)$  em dBm) impedindo que o estabelecimento da nova ligação seja conseguido à custa de uma degradação não suportada da mesma. A margem de *handover* da segunda condição impõe um nível de histerese delimitador do efeito *ping-pong* conforme foi já analisado anteriormente.

O método apresentado em [IVA95] utiliza o parâmetro  $ho\_margin(n)$  no processo de identificação do tipo de tráfego que é oferecido à rede em cada instante (“lento” ou “rápido”) bem como no seu correcto encaminhamento. Neste processo, o parâmetro  $ho\_margin(n)$  deixa de ser um parâmetro fixo (pré-programado) passando a ser função da estimativa que é feita para a velocidade de deslocamento de cada móvel. Ou seja, o mecanismo de *handover* passa a poder ser também activado em função da velocidade de deslocamento de cada móvel num dado instante de tempo. Em [IVA95] aconselha-se a utilização do “tempo de residência na área de dominância de cada célula” (*cell dwell time*) como uma boa aproximação para estimativa do parâmetro  $ho\_margin(n)$ :

$$ho\_margin\_time(n) = ho\_margin(n) + sos(n) - dos(n)(H[t(n) - dtime(n)]) \quad (6)$$

$$\text{em que } H[x] = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 0 \\ 1 & \text{para } x \geq 0, x = t(n) - dtime(n) \end{cases} \quad (7)$$

Como se pode observar pela equação (6), para se poder contabilizar o efeito da velocidade de deslocamento do móvel na separação entre tráfego “rápido” e “lento”, a margem de *handover* passa a ser variável no tempo e é determinada pelos parâmetros seguintes:

- Um *offset* estático denominado  $sos(n)$  em dB.
- Um *offset* dinâmico denominado  $dos(n)$  em dB.
- Um intervalo de tempo de atraso denominado  $dtime(n)$  em segundos.

O critério de *handover* por *power budget* para as redes hierárquicas passa a ser dado pela satisfação simultânea das duas condições seguintes:

$$rxlev\_ncell(n) > rxlev\_min(n) \quad (8)$$

$$pbgt(n) > ho\_margin\_time(n) \quad (9)$$

Através deste critério dinâmico consegue-se evitar os *handovers* de macrocélulas para microcélulas e entre microcélulas para móveis “rápidos”. Por sua vez, os móveis “lentos” permanecem na camada microcelular. Para tal, é utilizado um temporizador ( $T(n)$ ) para cada chamada em curso e para cada célula vizinha para onde possa ser efectuado um *handover*. A seguir é descrito o processo de gestão dos *handovers* intra e inter camadas.

#### 6.5.1.1 Handover da camada macrocelular para a camada microcelular.

Consideremos os dois tipos de móveis em processo de comunicação: um “lento” e outro “rápido”. Consideremos ainda que estão ambos atribuídos à camada macrocelular mas sob a influência da área de cobertura da camada microcelular. Consideremos ainda que as condições (5) e (6) são satisfeitas para uma microcélula cuja área de cobertura se sobrepõe à área de cobertura da macrocélula de origem. Isto significa que o critério de *handover* por *power budget* é satisfeito, fazendo com que a referida microcélula seja incluída na lista de melhores vizinhas para realização de um *handover*.

No instante de tempo imediatamente a seguir àquele em que o critério de *handover* por *power budget* passou a ser satisfeito o contador  $T(n)$  é iniciado, dando início ao processo de contagem. Enquanto o referido critério continuar a ser satisfeito este contador é incrementado, voltando a ser iniciado sempre que o critério de *handover* por *power budget* deixa de ser satisfeito (o que neste caso significa que o móvel abandonou a área de dominância da microcélula em questão).

À margem de *handover* dinâmica (equação 6) é adicionado um *offset* estático  $sos(n)$ . Este parâmetro, definido ao nível de cada célula da rede, tem como objectivo dificultar a realização de *handovers* enquanto o contador  $T(n)$  não atingir o seu máximo ou não for reiniciado (o critério deixou de ser satisfeito). A técnica utilizada é programar o referido contador por forma a que durante os períodos de tempo em que os terminais “rápidos” estão a atravessar a área de influência de uma dada microcélula da rede, o critério de *handover* por *power budget* não seja satisfeito. Isto é conseguido à custa do *offset* estático ( $sos(n)$ ). Impede-se assim que o móvel “rápido” abandone a camada macrocelular em direcção à camada microcelular

Relativamente aos móveis “lentos”, a probabilidade de se encontrarem sob a área de influência da referida microcélula após o máximo do contador  $T(n)$  é elevada. Nesta situação, o *offset* estático  $sos(n)$  é compensado pelo *offset* dinâmico  $dos(n)$ , facilitando o *handover* para a camada microcelular por parte do móvel “lento”.

#### 6.5.1.2 Handover dentro da camada microcelular.

Consideremos novamente ambos os tipos de móveis em processo de comunicação: um “rápido” e um “lento”. Consideremos ainda que ambos estão atribuídos à camada microcelular.

Para o móvel “lento”, a probabilidade de o contador  $T(n)$  atingir o máximo enquanto o critério de *handover* por *power budget* para uma microcélula vizinha se mantém é elevada. Desta forma, mais uma vez o *offset* estático  $sos(n)$  é compensado pelo *offset* dinâmico, facilitando-se o *handover* dentro da camada microcelular.

Para o móvel “rápido”, a probabilidade de o contador  $T(n)$  atingir o máximo antes do móvel deixar de estar sob a influência da área de dominância da melhor microcélula vizinha é reduzida. Consegue-se assim que o *offset* estático dificulte o *handover* dentro da camada microcelular, forçando-se o *handover* para a camada macrocelular devido à degradação da qualidade da ligação rádio.

A diferenciação entre móveis “rápidos” e “lentos” é conseguida à custa do parâmetro  $dtime(n)$ . Este parâmetro pode ser estimado da seguinte forma:

$$dtime(n) = L / V_{th} \quad (10)$$

onde  $V_{th}$  é o valor por defeito assumido para a velocidade de cada móvel, enquanto  $L$  é o valor por defeito assumido para a distância percorrida, sendo estimado pelo diâmetro da área de dominância de uma microcélula (caso da ocorrência de *handovers* da camada macrocelular para a camada microcelular), ou pelo diâmetro da área de dominância de cada macrocélula (caso da ocorrência de *handovers* dentro da camada microcelular).

Em [CHO94] são apresentadas as conclusões obtidas a partir da realização de simulações com os resultados provenientes de medidas de propagação em ambientes urbanos. Estas simulações deixam transparecer que este algoritmo permite

efectivamente reduzir drasticamente a taxa de realização de *handovers* e desta forma a carga de sinalização imposta à rede. Deixam transparecer ainda que a utilização deste algoritmo permite diminuir o número de chamadas que são forçadas a terminar devido a degradação da qualidade no processo de comunicação (causada por variações bruscas no nível de sinal).

## 6.6 Redes móveis hierárquicas - engenharia de teletráfego

Conforme salientado anteriormente, e tendo em conta a gestão do tráfego oferecido, uma das principais vantagens da organização de uma rede móvel celular em arquitectura hierárquica é o aumento da capacidade instalada devido a introdução da camada microcelular. Foi afirmado então que esta camada passa a ser responsável pela maior parte da capacidade instalada na rede, enquanto as camadas superiores passam a funcionar como camadas de reserva, responsáveis pela absorção do tráfego em excesso que não é absorvido pela camada microcelular (tráfego por *overflow*). O resultado é um aumento da qualidade do serviço prestado, medido pela diminuição da probabilidade de bloqueio no estabelecimento de novas chamadas  $P_B$  e na diminuição da probabilidade de terminação forçada de chamadas a decorrer  $P_T$  devido a falhas no processo de *handover*.

No entanto, importa fazer uma análise quantitativa do processo de gestão do tráfego e da melhoria do desempenho de uma rede móvel com este formato, ou seja, importa fazer uma análise da engenharia de teletráfego em redes hierárquicas através do desenvolvimento e análise de modelos de tráfego.

Nas secções seguintes são descritos e analisados alguns modelos de tráfego para diferentes organizações em arquitectura de rede hierárquica. A partir destes modelos são obtidos os parâmetros descritores do seu desempenho.

### 6.6.1 Modelos de tráfego para redes móveis hierárquicas - primeiro exemplo

Um primeiro exemplo de organização da arquitectura de uma rede móvel celular no formato hierárquico é proposto por Steele em [STE92]. A arquitectura de rede

desenvolvida é composta por duas camadas. O seu princípio de funcionamento é o seguinte:

- Considera-se que o tráfego gerado provém apenas de terminais “lentos”, ou seja, que todo o tráfego processado é do tipo “lento”.
- De acordo com a organização tradicional da arquitectura numa estrutura hierárquica, a primeira camada é constituída exclusivamente por microcélulas. Sendo assim, qualquer chamada em fase de estabelecimento é “oferecida” inicialmente a esta camada. Na falta de recursos rádio disponíveis qualquer chamada em fase de estabelecimento é bloqueada.
- Seguindo a mesma linha de raciocínio, a segunda camada é constituída exclusivamente por macrocélulas. Uma vez que apenas é processado tráfego do tipo “lento” nenhuma chamada em fase de estabelecimento é inicialmente “oferecida” à camada macrocelular. O seu papel é no entanto o de funcionar como uma camada de reserva responsável pela absorção de todo o tráfego por *handover* escoado a partir da camada microcelular, ou seja, que não pode ser atendido num processo de *handover* entre microcélulas (tráfego por *overflow*). O papel da camada macrocelular aqui é apenas o de minimizar a probabilidade de terminação forçada de chamadas,  $P_T$  a decorrer por falha de *handover*.

Por forma a simplificar o processo de elaboração e análise do modelo de tráfego para este tipo de arquitectura, considerou-se que a morfologia do ambiente a cobrir é do tipo urbano denso, sendo composta por ruas perpendiculares entre si e formando um padrão uniforme (*padrão de Manhatam*). As microcélulas são instaladas por forma a que a área de dominância de cada uma seja limitada ao espaço geográfico definido por dois cruzamentos consecutivos, conforme demonstrado na figura 6.8. O objectivo principal deste tipo de arquitectura de rede é minimizar a probabilidade de terminação forçada de chamadas a decorrer  $P_T$ . Para tal são considerados dois esquemas de atribuição de prioridades:

- O primeiro esquema baseia-se no princípio da utilização de canais de guarda para as chamadas em processo de *handover*. Este princípio foi já analisado anteriormente. Neste esquema não são permitidos *handovers* para a camada

superior (não processa tráfego). Sendo assim, o princípio de funcionamento resume-se ao de uma rede do tipo não hierárquica (composta por uma única camada). Este tipo de arquitectura foi já exaustivamente estudado em termos de engenharia de teletráfego no capítulo 4.

- O segundo esquema baseia-se na utilização conjunta dos canais de guarda e dos recursos da camada superior para atribuição exclusiva às chamadas em processo de *handover*.
- Como referência é considerado o caso particular em que não é atribuído nenhum esquema de prioridades às chamadas em processo de *handover*.

For forma a tornar viável o processo de análise deste modelo e seguindo o mesmo raciocínio utilizado na elaboração e análise de modelos de tráfego para as redes não hierárquicas, no seu desenvolvimento foram consideradas as seguintes aproximações:

- A distribuição de assinantes em cada microcélula é um processo uniforme ( $D$  assinantes por metro quadrado). Sendo assim, o estabelecimento de novas chamadas segue uma distribuição espacial uniforme ao longo da área de dominância de cada microcélula. Se o seu comprimento e largura são iguais a  $L$  e  $W$  metros respectivamente, então o número médio de assinantes em cada microcélula é dado por  $M_u = WLD$ .
- A taxa de estabelecimento de novas chamadas  $\lambda_n$  segue uma distribuição de *Poisson*.
- O tempo total decorrido durante a realização de uma chamada  $T$  segue uma distribuição exponencial de parâmetro  $\mu = 1/\bar{T}$ .
- O tempo total decorrido durante a ocupação de um recurso rádio  $T_c$  segue uma distribuição exponencial de parâmetro  $\mu_c = 1/\bar{T}_c$ .

O tráfego total oferecido a cada microcélula resulta da soma do tráfego devido ao estabelecimento de novas chamadas com o tráfego devido às chamadas em processo de *handover*. Sendo assim, se  $\lambda_n$  é igual à taxa de estabelecimento de novas chamadas e

$\lambda_h$  é igual à taxa de chamadas em processo de *handover*, a taxa total de chamadas  $\lambda_t$  que são oferecidas a cada microcélula é dada por:

$$\lambda_t = \lambda_n + \lambda_h \quad (11)$$

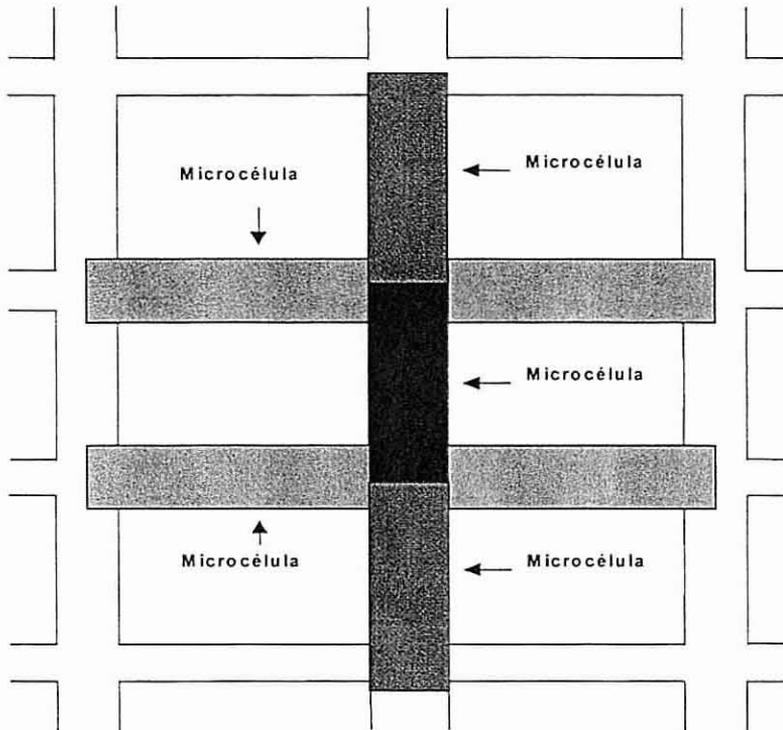


Figura 6.8– Padrão de Manatan com a indicação da área de dominância das microcélulas.

Importa deste modo estimar  $\lambda_n$  e  $\lambda_h$ . Estimando que a taxa de estabelecimento de novas chamadas por parte de cada assinante é dada por  $\lambda_u$ , então:

$$\lambda_n = M_u \lambda_u \quad (12)$$

Resta portanto proceder à estimação de  $\lambda_h$ . A figura 6.9 é uma outra representação da figura 6.8, sendo utilizada neste processo. Nesta figura estão representadas 7 microcélulas da rede ( $M_1$  a  $M_6$  e  $m$ ). A aproximação seguida pelos autores foi derivar a expressão para a taxa de chamadas em processo de *handover* oferecidas à microcélula  $m$  a partir das 6 microcélulas vizinhas ( $M_1$  a  $M_6$ ). Por questões de simplificação, considerou-se que qualquer chamada deve ser finalizada antes de que sejam completados mais do que três *handovers* seguidos.

Para obtenção do tráfego por *handover* oferecido à microcélula  $m$  inicia-se o processo a partir da estimativa do tráfego por *handover* oferecido à qualquer das suas

microcélulas vizinhas. Consideremos por exemplo a microcélula  $M_2$ . A taxa de chamadas em processo de *handover* oferecidas a microcélula  $M_2$  a partir das três microcélulas vizinhas  $(M_1^2, M_2^2, M_3^2)$  é dada por (ver figura 6.9):

$$\lambda_h^{M_2} = 3\lambda_n(1 - P_B)P_I\beta \quad (13)$$

em que:

- $\lambda_n$  é igual à taxa de estabelecimento de novas chamadas (considera-se uniforme ao longo de toda a camada microcelular).
- $P_B$  é a probabilidade de bloqueio no estabelecimento de novas chamadas.
- Para cada uma das microcélulas  $(M_1^2, M_2^2, M_3^2)$ ,  $P_I$  é a probabilidade de que uma nova chamada iniciada com sucesso necessite de realizar um *handover*, ou seja, que a chamada não seja terminada na microcélula onde foi estabelecida.
- Para cada uma das microcélulas  $(M_1^2, M_2^2, M_3^2)$ ,  $\beta$  é a fracção das chamadas (do universo de chamadas que necessitam de realizar *handover*) destinadas à microcélula  $M_2$ . Por questões de simplificação, considera-se que é constante, ou seja, as três microcélulas vizinhas de  $M_2$ ,  $(M_1^2, M_2^2, M_3^2)$  estão associadas à taxas iguais de ocorrência de chamadas em processo de *handover* para  $M_2$ .

Por sua vez, a taxa de chamadas que efectivamente realizam *handover* para  $M_2$  é dada por  $\lambda_h^{M_2} P_I \beta (1 - P_{f_{hm}})$  onde  $P_{f_{hm}}$  é a probabilidade de falha na realização de um *handover* na camada microcelular. Se  $P_H$  é a probabilidade de ocorrência de um novo *handover* a partir de  $M_2$  para cada uma das microcélulas vizinhas  $(M_1, M_2, M_3, M_1^2, M_2^2, M_3^2)$  e  $\beta$  é a fracção das chamadas em processo de *handover* a partir desta microcélula para a microcélula  $m$ , então a taxa de chamadas que realizaram um *handover* para  $M_2$  e que realizam um novo *handover* para  $m$  é dada por  $\lambda_h^{M_2} P_I \beta (1 - P_{f_{hm}}) P_H \beta$ .

Finalmente, a taxa total das chamadas que realizam *handover* de  $M_2$  para  $m$  é dada por:

$$\lambda_{h, M_2}^m = \lambda_n(1 - P_B)P_I\beta + \lambda_h^{M_2}(1 - P_{f_{hm}})P_H\beta \quad (14)$$

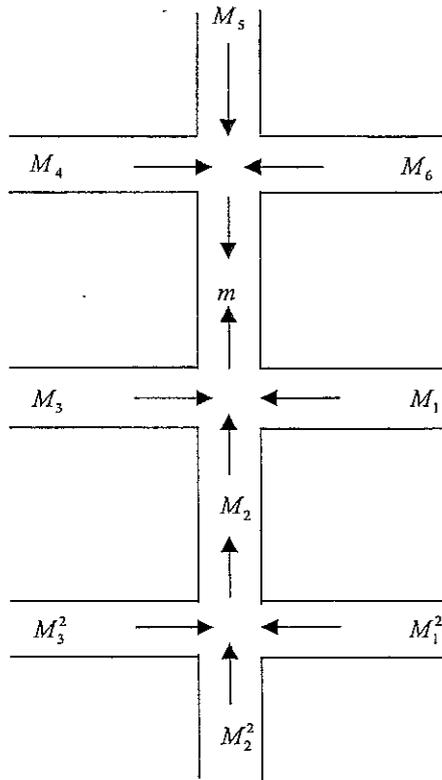


Figura 6.9– Aproximação para o tráfego por handover

Uma vez que  $\lambda_{h,M_2}^m = \lambda_{h,M_1}^m = \lambda_{h,M_3}^m = \lambda_{h,M_4}^m = \lambda_{h,M_5}^m = \lambda_{h,M_6}^m$ , temos que a taxa total de chamadas que realizam *handover* para  $m$  é dada por:

$$\lambda_h^m = \sum_{m=1}^6 \lambda_{h,M_i}^m \tag{15}$$

A estimativa para a taxa de chamadas em processo de *handover*  $\lambda_h$  é dada assim por  $\lambda_h^m$ .

Para estimar o tráfego total oferecido a cada microcélula falta estimar o tempo médio de ocupação de um recurso rádio por uma chamada a decorrer  $\bar{T}_C$ . Este parâmetro deve ser estimado para cada tipo de chamada que é oferecida a uma microcélula, nova ou em processo de *handover*, uma vez que os recursos rádio de cada uma são ocupados por ambos os tipos de chamada.

O tempo decorrido na ocupação de um recurso rádio por uma nova chamada, antes da ocorrência de um eventual primeiro *handover*, é dado por:

$$T_{Hn} = \min(T, T_n) \tag{16}$$

Ou seja, é igual ao tempo total  $T$  decorrido durante a realização da chamada (não são realizados *handovers*) ou ao tempo total decorrido desde o seu início até o instante de realização do primeiro *handover*  $T_n$  (tempo de residência numa microcélula - *microcell dwell time*). Para estimação do seu valor médio  $\overline{T}_{Hn}$  consideremos as seguintes aproximações:

- O tempo de residência  $T_i$  de um móvel na área de dominância de uma microcélula antes de se proceder ao primeiro *handover* é considerado como seguindo uma distribuição exponencial de parâmetro  $\mu_i = 1/\overline{T}_i$
- O tempo de espera  $T_d$  para atravessar um cruzamento (e deste modo efectuar um *handover*) por parte de um móvel é também considerado como seguindo uma distribuição exponencial de parâmetro  $\mu_d = 1/\overline{T}_d$

Sendo assim, o valor médio de  $T_{Hn}$  é dado por:

$$\overline{T}_{Hn} = \left[ \frac{1 + \alpha_i}{\mu_i + \mu} \right] - \left[ \frac{\alpha_i}{\mu_d + \mu} \right] \quad (17)$$

em que  $\alpha_i = \frac{\mu_i P_{delay}}{\mu_d - \mu_i}$ .

$P_{delay}$  representa a proporção de assinantes que sofrem atraso no processo de *handover*, ou seja, no cruzamento entre ruas. Este atraso pode ser originado por sinalização luminosa ou pode ser condicionado pela densidade de tráfego automóvel, no caso de não haver sinalização luminosa de controlo no local. É dado por:  $P_{delay} = P_{cross} * P_d$ , em que  $P_{cross}$  representa a fracção do universo de assinantes em cada microcélula que realizam *handover*, enquanto que  $P_d$  é a probabilidade de ocorrência de atraso.

A probabilidade de ocorrência de um primeiro *handover*  $P_T$  é igual à probabilidade de o tempo de residência numa microcélula  $T_n$  ser inferior ao tempo total de duração da chamada  $T$ :

$$P_T = P\{T_n < T\} = \left[ \frac{\mu_i}{\mu_i + \mu} \right] - \alpha_i \left[ \frac{\mu_d}{\mu_d + \mu} - \frac{\mu_i}{\mu_i + \mu} \right] \quad (18)$$

O tempo total decorrido na ocupação de um recurso rádio por uma chamada em processo de *handover* é dado por:

$$T_{Hh} = \min\left[(T - T_n | T_n), T_h\right] \quad (19)$$

Ou seja, é igual ao tempo total que resta para finalização da chamada desde o instante de realização do último *handover* ( $T - T_n$ ) ou ao tempo total decorrido desde o instante de realização do último *handover* até o instante de realização do seguinte  $T_h$ .

Para estimação do seu valor médio  $\bar{T}_{Hh}$ , consideremos a seguinte aproximação: o tempo de residência de um móvel na área de dominância de uma microcélula após a ocorrência de um *handover* é considerado como seguindo uma distribuição exponencial de parâmetro  $\mu_o = 1/T_o$ . De acordo com esta aproximação, o tempo médio decorrido na ocupação de um recurso rádio por parte de uma chamada em processo de *handover*,  $\bar{T}_{Hh}$  é dado por:

$$\bar{T}_{Hh} = \left[ \frac{1 + \alpha_2}{\mu_o + \mu} \right] - \left[ \frac{\alpha_2}{\mu_d + \mu} \right] \quad (20)$$

em que  $\alpha_2 = \frac{\mu_o P_{delay}}{\mu_d - \mu_o}$

A probabilidade de ocorrência de um novo *handover*  $P_H$  é igual à probabilidade de o tempo de residência numa microcélula após a realização de um ou mais *handovers*  $T_h$  ser inferior ao tempo total que resta decorrer até à finalização da chamada  $T$ :

$$P\{T_h < T\}$$

$$P_h = P\{T_h < T\} = \left[ \frac{\mu_o}{\mu_o + \mu} \right] - \alpha_2 \left[ \frac{\mu_d}{\mu_d + \mu} - \frac{\mu_o}{\mu_o + \mu} \right] \quad (21)$$

Finalmente, para estimar o tempo médio decorrido na ocupação de um recurso rádio por ambos os tipos de chamadas  $\bar{T}_C$  é preciso calcular a fracção de chamadas a decorrer que são devidas a chamadas em processo de *handover*  $\gamma$ , bem como a fracção das chamadas a decorrer que foram recentemente estabelecidas e que ainda não realizaram *handover*  $1 - \gamma$ :

$$\gamma = \frac{\lambda_h(1 - P_{fhm})}{\lambda_h(1 - P_{fhm}) + \lambda_n(1 - P_B)} \quad (22)$$

$$(1 - \gamma) = \frac{\lambda_n(1 - P_B)}{\lambda_n(1 - P_B) + \lambda_h(1 - P_{fhm})} \quad (23)$$

Finalmente, vem para o valor de  $\overline{T_C}$ :

$$\overline{T_C} = \overline{T_{Hn}}(1 - \gamma) + \overline{T_{Hh}}\gamma \quad (24)$$

Ficam assim determinados os dois parâmetros necessários ao cálculo do tráfego oferecido a cada microcélula da rede em cada instante:  $\lambda_t$  (taxa total de chamadas que são geradas) e  $\overline{T_C}$  (tempo médio decorrido na ocupação de um recurso rádio de cada microcélula da rede. A intensidade de tráfego total oferecido é assim dada, por:

$$A = \lambda_t \overline{T_C} = \frac{\lambda_t}{\mu_C} \quad (25)$$

#### 6.6.1.1 Desenvolvimento do modelo de tráfego utilizado.

Tendo sido determinado o tráfego total oferecido a cada microcélula da rede resta agora desenvolver o modelo de tráfego para este tipo de arquitectura. Tal como no processo de análise da engenharia de teletráfego em redes móveis não hierárquicas, este tipo de arquitectura é considerado como sendo do tipo homogéneo em que todas as células da rede são processos independentes e identicamente distribuídos pelo que basta analisar o desempenho de uma única célula de cada camada. Considera-se também que o número de assinantes do serviço em cada célula é muito superior ao número total de recursos disponíveis  $C$ . Por outro lado, mais uma vez o princípio de funcionamento deste tipo de arquitectura constitui um processo do tipo *nascimento e morte*, podendo ser descrito por uma cadeia de *Markov*, em que cada estado  $j$  da cadeia representa o número de chamadas a decorrer em cada célula num dado instante de tempo. Em equilíbrio,  $P_j$  (com  $j = 1, 2, \dots, C$ ) é a probabilidade de a cadeia se encontrar no estado  $j$  num dado instante de tempo.  $N$  é o número total de recursos rádio de cada célula:

$$P_j = \frac{\lambda_{j-1} \lambda_{j-2} \cdots \lambda_0}{\mu_j \mu_{j-1} \cdots \mu_1} P_0 \quad (26)$$

em que:

- $\lambda_j$  é a taxa total de chamadas que são oferecidas a uma célula da rede durante o estado  $j$  da cadeia (estão  $j$  recursos ocupados por chamadas a decorrer). Para as aproximações enunciadas acima:  $\begin{cases} \lambda_j, j = 0, 1, \dots, C-1 \\ 0, j = C \end{cases}$ , sendo que  $\lambda_j$  é igual à taxa total de chamadas oferecidas a cada célula no estado  $j$  da cadeia, sendo dado pela equação (11).
- $\mu_j$  é a taxa de partida de chamadas de uma célula da rede durante o estado  $j$ . A taxa de libertação de canais é proporcional ao número de canais ocupados:  $\mu_j = j\mu_c, j = 1, 2, \dots, C$ , com  $\mu_c = 1/\bar{T}_c$ , sendo  $\bar{T}_c$  dado pela equação (24).

A partir do modelo de tráfego é possível obter as expressões para os parâmetros descritores do seu desempenho:

- Probabilidade de bloqueio no estabelecimento de novas chamadas -  $P_B$ .
- Probabilidade de falha na realização de um *handover* (camada microcelular) -  $P_{f_{hm}}$ .
- Probabilidade de terminação forçada de uma chamada a decorrer -  $P_T$ .
- Grau de Serviço prestado - GoS.

Nos pontos a seguir, estes parâmetros serão estimados para cada um dos dois esquemas de atribuição de prioridades às chamadas em processo de *handover* citados anteriormente.

Em primeiro lugar, se considerarmos que não há prioridade para as chamadas em processo de *handover*, a arquitectura de rede considerada resume-se à arquitectura básica de uma só camada considerada anteriormente. Conforme foi já verificado, a probabilidade de bloqueio no estabelecimento de novas chamadas é dada pela fórmula de *Erlang B* e é igual à probabilidade de falha na realização de um *handover*:

$$P_B = P_{f_{hm}} = \frac{(A_t)^N / N!}{\sum_{k=0}^N (A_t)^k / k!} \quad (27)$$

em que  $A = \lambda_t / \mu_c$  é a intensidade de tráfego total oferecido a cada microcélula.

Para o esquema de reserva de canais de guarda para as chamadas em processo de *handover*, a arquitectura de rede considerada resume-se novamente à arquitectura básica de uma só camada considerada anteriormente. Conforme foi já verificado, a reserva de um pequeno número de recursos rádio para serem atribuídos exclusivamente às chamadas em processo de *handover* ( $C_h$  canais de guarda) possibilita uma diminuição na probabilidade de terminação forçada de chamadas a decorrer  $P_T$ . Mesmo que isto seja conseguido à custa de um pequeno aumento na probabilidade de bloqueio no estabelecimento de novas chamadas  $P_B$ , o resultado final é uma melhoria significativa no grau de serviço prestado devido à diminuição na probabilidade de terminação forçada de chamadas a decorrer  $P_T$ .

Uma vez que  $C_h$  canais são reservados para atribuição exclusiva às chamadas em processo de *handover*,  $C - C_h$  canais são destinados à atribuição a ambos os tipos de chamadas. Sendo assim, a taxa total de chamadas oferecidas a cada microcélula da rede é agora dada por:

$$\lambda_j = \begin{cases} \lambda_t & j = 0, 1, \dots, C - C_h \\ \lambda_h & j = (C - C_h) + 1, \dots, C \end{cases} \quad (28)$$

Em equilíbrio, a probabilidade  $P_j$  (com  $j = 1, 2, C$ ) de a cadeia se encontrar no estado  $j$  num dado instante de tempo passa a ser agora dada por:

$$P_j = \begin{cases} \frac{(A_t)^j}{j!} P_0 & j = 0, 1, \dots, (C - C_h) - 1 \\ \left(\frac{A_t}{A_h}\right)^{N - N_h} \frac{(A_h)^j}{j!} P_0 & j = C - C_h, \dots, C \end{cases} \quad (29)$$

A probabilidade de bloqueio no estabelecimento de novas chamadas  $P_B$  é igual a probabilidade de que o número de recursos ocupados  $j$  seja igual ou superior a  $C - C_h$ :

$$P_B = \left(\frac{A_t}{A_h}\right)^{C - C_h} \sum_{j=C - C_h}^C \frac{A_h^j}{j!} P_0 \quad (30)$$

Enquanto a probabilidade de falha na realização de um *handover* é igual à probabilidade de todos os canais estarem ocupados:

$$P_{f_{hm}} = \frac{(A_t)^{C-C_h} A_h^{C_h}}{C!} P_o \quad (31)$$

em que:

- $A_h = \lambda_h / \mu_h$  é a intensidade de tráfego oferecido por chamadas em processo de *handover* a cada microcélula.
- $A_t = \lambda_t / \mu_t$  é a intensidade de tráfego total oferecida à cada microcélula da rede.

Consideremos agora o segundo esquema de atribuição de prioridades as chamadas em processo de *handover*. Este esquema envolve a utilização de canais de guarda em conjunto com os recursos disponíveis na camada macrocelular e que são destinados para atribuição exclusiva a este tipo de chamadas, na falta de recursos disponíveis na camada microcelular.

Cada macrocélula sobrepõe a sua área de cobertura às áreas de cobertura de um conjunto de  $M$  microcélulas. Cada uma destas macrocélulas dispõe de um total de  $C_o$  recursos para atendimento exclusivo das chamadas em processo de *handover* escoadas a partir da camada microcelular (constitui tráfego por *overflow* portanto). O atendimento de ambos os tipos de chamadas processa-se como anteriormente, uma vez que são reservados  $C_h$  canais de guarda para atribuição exclusiva às chamadas em processo de *handover*. No entanto, todas as chamadas em processo de *handover* às quais não podem ser atribuídos recursos rádio são desviadas para a camada macrocelular. A figura 6.10 ilustra o modo como é feita a gestão do tráfego oferecido.

- A fracção das chamadas que, em fase de estabelecimento, são bloqueadas em cada microcélula é dada por  $\lambda_h P_B$ .
- A fracção das chamadas que em processo de *handover* são oferecidas à camada macrocelular devido à falta de recursos em cada microcélula é dada por:  $\lambda_h P_{f_{hm}}$ .  $P_{f_{hm}}$  é a probabilidade de ocorrência de falha de *handover* em qualquer uma das microcélulas (supõe-se constante).
- A fracção total das chamadas em processo de *handover* a partir das  $M$  microcélulas que é oferecida à camada macrocelular, devido à falta de recursos rádio disponíveis nesta camada é dada por:  $\lambda_M = \sum_M \lambda_h P_{f_{hm}}$ .

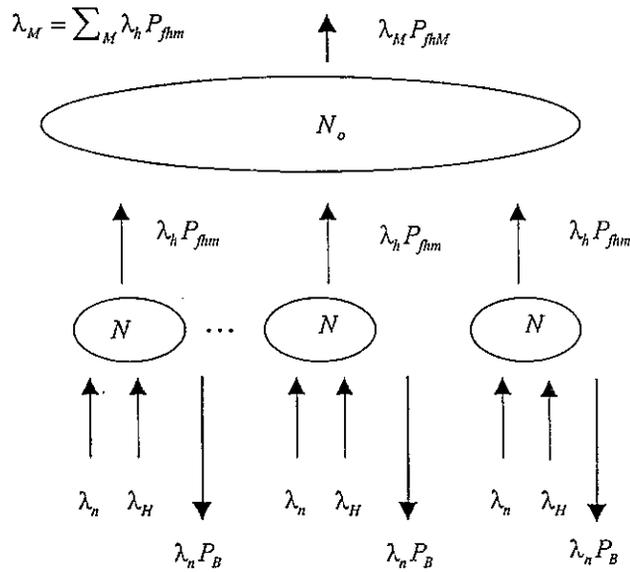


Figura 6.10– Ilustração dos diferentes tipos de fluxos de chamadas e das probabilidades de bloqueio para um grupo de microcélulas a qual são atribuídos  $C$  recursos rádio e uma única macrocélula a qual são atribuídos  $C_0$  recursos rádio.

- A fracção das chamadas que realizam *overflow* para a camada macrocelular e que são forçadas a terminar devido à falta de recursos disponíveis nesta camada é dada por:  $\lambda_M P_{fhM} \cdot P_{fhM}$  é a probabilidade de bloqueio na atribuição de um recurso a uma chamada em processo de *handover* proveniente da camada microcelular.
- No modelo desenvolvido a camada macrocelular apenas é constituída por uma única macrocélula. Uma chamada que tenha realizado um *handover* para a camada macrocelular permanece na sua área de dominância até que seja terminada normalmente.
- Uma vez que o tempo de duração de uma chamada  $T$  segue uma distribuição exponencial, e devido ao facto de os processos aleatórios que seguem este tipo de distribuição serem processos sem memória, podemos dizer que o tempo de residência na camada macrocelular (*macrocelular dwell time*) após a realização de um *handover* também segue uma distribuição exponencial de parâmetro

$$\mu_M = \frac{1}{\overline{T}_M}.$$

- A intensidade do tráfego total oferecido à camada macrocelular é dada por:

$$A_M = \lambda_M \overline{T}_M.$$

Considerando que o tráfego por *overflow* oferecido à camada macrocelular segue uma distribuição de *Poisson* (o que não é de toda verdade mas pode ser considerado como uma boa aproximação), a probabilidade de falha por *handover* para esta camada é dada por:

$$P_{fhM} = \frac{(A_M)^{N_o} / C_o!}{\sum_{k=0}^{N_o} (A_M)^k / k!} \quad (32)$$

A probabilidade de que uma chamada por *handover* seja atendida é igual à probabilidade de que a chamada seja atendida por uma microcélula ( $1 - P_{fhm}$ ), ou que não seja atendida pela microcélula mas o seja pela macrocélula ( $P_{fhm}(1 - P_{fhM})$ ). Desta forma, se  $P_{fh}$  é igual a probabilidade conjunta de ocorrência de falha num processo de *handover* temos que:

$$1 - P_{fh} = (1 - P_{fhm}) + P_{fhm}(1 - P_{fhM}) = 1 - P_{fhm}P_{fhM} \quad (33)$$

resultando:

$$P_{fh} = P_{fhm}P_{fhM} \quad (34)$$

### 6.6.1.2 Obtenção dos parâmetros descritores do desempenho.

#### Grau de Serviço GoS prestado

Através do modelo de tráfego desenvolvido na secção anterior é possível estimar o grau de serviço (GoS) prestado para este tipo de arquitectura de rede. O GoS é estimado como sendo a fracção das chamadas que são forçadas a terminar em qualquer instante do seu processo de execução: na sua fase de estabelecimento com probabilidade  $P_B$  ou ainda durante a realização de um *handover* com probabilidade  $P_{fh}$ .

$$GoS = P_B + (1 - P_B)P_T \quad (35)$$

em que  $P_T$  é a probabilidade de terminação forçada de chamadas a decorrer.

A probabilidade de terminação forçada de chamadas a decorrer na camada microcelular é dada por:

$$P_{Tm} = P_I P_{f_{hm}} \quad (36)$$

em que  $P_I$  (probabilidade de realização de pelo menos um *handover* antes do seu término, por parte de uma chamada em fase de estabelecimento) é dada pela equação (18).

Por sua vez, a probabilidade de terminação forçada de chamadas a decorrer na camada macrocelular é dada por:

$$P_{TM} = P_I P_{f_{hM}} \quad (37)$$

Sendo assim, a probabilidade de terminação forçada de chamadas a decorrer na rede,  $P_T$  é dada por:

$$P_{Tm} P_{TM} \quad (38)$$

### Intensidade do tráfego total transportado

A intensidade do tráfego total que é transportado é uma medida da utilização da capacidade disponível na rede. Permite estudar os ganhos conseguidos para um determinado tipo de arquitectura. A intensidade do tráfego total transportado por cada microcélula  $A_{cm}$  é dada pelo número médio de recursos rádio ocupados por chamadas a decorrer num dado instante. Ou seja, é igual à diferença entre a intensidade do tráfego total que é oferecido,  $A_T$  e a intensidade do tráfego total que é perdido devido a falta de recursos rádio disponíveis.

$$A_{cm} = [\lambda_n(1 - P_B) + \lambda_n(1 - P_{f_{hm}})] \overline{T_{Cm}} \quad (39)$$

Considerando que no total existem  $M$  microcélulas e que o tráfego oferecido está uniformemente distribuído, a intensidade do tráfego total por elas absorvido é dada por:

$$A_{mT} = M A_{cm} \quad (40)$$

A intensidade do tráfego total transportado na camada macrocelular é dado por:

$$A_{MT} = \lambda_M [(1 - P_{f_{hM}})] \overline{T_{CM}} \quad (41)$$

Como consequência, a intensidade do tráfego total transportado pela rede é dado por:

$$A_T = A_{mT} + A_{MT} \quad (42)$$

### Factor de utilização dos recursos rádio

Uma vez que ambos os esquemas de atribuição de prioridades às chamadas em processo de *handover* utilizam canais de guarda, a probabilidade de bloqueio no estabelecimento de novas chamadas será naturalmente maior do que o valor obtido para um esquema em que não há canais de guarda.

Embora o factor determinante no GoS prestado seja a probabilidade de terminação forçada de chamadas a decorrer importa salientar que a definição de um conjunto de canais de guarda faz com que a percentagem de utilização dos recursos se degrade um pouco, já que os  $C_h$  canais de guarda apenas serão utilizados quando os restantes  $C - C_h$  canais já estiverem ocupados. Importa assim obter expressões para a taxa média de utilização de cada recurso. A taxa média de utilização dos recursos rádio da camada microcelular é dada por:

$$\rho_{mi} = \frac{C_m}{K} \frac{A_{cm}}{N} \quad (43)$$

em que:

- $A_{cm}/N$  é o factor de reutilização dos recursos rádio de uma microcélula da rede.
- $C_m$  é igual ao número de microcélulas que estão sob a área de cobertura de cada macrocélula (*cluster*) e  $K$  é igual ao número total de portadoras disponíveis para atribuição a camada microcelular. Sendo assim, o parâmetro  $C_m/K$  representa o seu factor de reutilização.

A taxa média de utilização dos recursos rádio da camada macrocelular é dada por:

$$\rho_M = \frac{A_{cM}}{N_o} \quad (44)$$

Finalmente a taxa média de utilização dos recursos rádio de toda a rede é dada por:

$$\bar{\rho} = \frac{(A_{cm} + A_{cM})}{N + N_o} \quad (45)$$

### 6.6.1.3 Análise do desempenho da arquitectura de rede e apresentação dos resultados.

Importa agora analisar o desempenho deste tipo de arquitectura a partir dos parâmetros descritos anteriormente. Por forma a validar a precisão dos resultados obtidos a partir da via analítica, estes foram comparados em [STE92] com os resultados obtidos a partir de simulações do modelo de tráfego e da arquitectura considerada.

O modelo de simulação considerado foi o seguinte:

- Considerou-se a camada microcelular como sendo composta por uma matriz de 20x20 microcélulas.
- O comprimento  $L$  de cada microcélula é igual a 300 m.
- O período de fecho e abertura dos semáforos que controlam o fluxo de tráfego nos cruzamentos é igual a 30s.
- O número total de recursos atribuídos a cada estação microcelular é igual a 12. Destes, 0 ou 2 são utilizados como canais de guarda.
- O número total de recursos atribuídos à estação macrocelular é igual a 0, 4 ou 8.
- O tempo total decorrido na duração de cada chamada segue uma distribuição exponencial com média 120s.

No processo de análise do desempenho desta arquitectura os parâmetros considerados foram os seguintes: probabilidade de bloqueio no estabelecimento de novas chamadas  $P_B$ , probabilidade de ocorrência de falha por *handover*  $P_{fh}$ , probabilidade de terminação forçada de chamadas a decorrer  $P_T$  e taxa média de utilização dos recursos rádio disponíveis na rede  $\bar{\rho}$ .

Verificou-se que os resultados obtidos a partir do processo de simulação estão muito próximos dos resultados obtidos por via analítica, reforçando o grau de precisão do modelo de tráfego considerado.

As conclusões obtidas foram as seguintes:

- Como era de se esperar, com a inclusão dos canais de guarda registou-se uma diminuição nos valores de  $P_{fh}$  e  $P_T$ , com um pequeno aumento em  $P_B$ . Este efeito

já tinha sido observado anteriormente no processo de análise da engenharia de teletráfego em redes cuja arquitectura é constituída por uma única camada.

- No entanto, quando se considera o segundo esquema de prioridades, ou seja, os recursos disponíveis na camada macrocelular, conseguem-se reduções mais significativas nos valores de  $P_{fh}$  e  $P_T$  com um número ainda menor de canais de guarda na camada microcelular relativamente ao esquema anterior, e sem haver alterações significativas no valor de  $P_B$ . A título de exemplo verificou-se que, mantendo constante o número de canais disponíveis na camada microcelular e adicionando-se 4 canais à rede para atribuição à macrocélula (aumento de apenas 4% nos recursos da rede: de  $8 \times 12 = 96$  para  $8 \times 12 + 4 = 100$ ), conseguem-se valores menores para  $P_{fh}$  e  $P_T$  com  $N_h = 2$  do que com  $N_h = 3$  e sem recorrer aos recursos da camada macrocelular. Por outro lado o valor de  $P_B$  mantém-se inalterado.
- À medida que se aumenta o número de canais de guarda  $C_h$ , a taxa média de utilização dos recursos da rede  $\bar{\rho}$  diminui como é natural. Para que os recursos sejam rentáveis, ou seja,  $\bar{\rho}$  aumente, é necessário que o tráfego oferecido aumente para valores tais que impliquem a sua utilização por chamadas em processo de *handover*.

Conclui-se assim que a utilização de uma camada macrocelular é altamente vantajosa em termos da melhoria do serviço prestado ao cliente (medido através da diminuição na probabilidade de terminação forçada de chamadas a decorrer  $P_T$ ) relativamente as arquitecturas de uma só camada.

A camada macrocelular funciona assim como uma camada de reserva responsável pela absorção de todo o tráfego por *handover* escoado a partir da camada microcelular. A não utilização ou utilização de um número reduzido de canais de guarda faz com que as perdas em termos da probabilidade de bloqueio no estabelecimento de novas chamadas  $P_B$  sejam desprezáveis. Por outro lado, conseguem-se ganhos mais elevados no que respeita à taxa média de utilização de cada recurso rádio  $\bar{\rho}$ .

### 6.6.2 Modelos de tráfego para redes hierárquicas - segundo exemplo.

A arquitectura em rede hierárquica apresentada no ponto anterior é limitada no seu desempenho, uma vez que não permite a atribuição dos recursos rádio disponíveis na camada macrocelular às chamadas em fase de estabelecimento. O processo de utilização dos recursos rádio disponíveis na rede é assim ineficiente.

Em [RAP94] é apresentado um novo esquema de organização em arquitectura hierárquica. Mais uma vez, a arquitectura de rede considerada é composta por duas camadas. Uma camada microcelular e uma camada macrocelular. A camada macrocelular, no entanto, é composta por mais do que uma macrocélula, sendo permitidos *handovers* entre elas. No entanto, para efeitos de análise, considera-se apenas uma macrocélula cuja área de cobertura se sobrepõe à área de cobertura de um conjunto de  $N$  microcélulas. Esta variante de organização em arquitectura hierárquica constitui uma extensão relativamente à anterior. O seu princípio de funcionamento pode ser resumido da seguinte forma:

- A camada microcelular é responsável pela maior parte da capacidade instalada na rede. Tal como no modelo anterior estão reservados  $C_{hi}$  ( $i = 1, \dots, N$ ) canais de guarda por microcélula para atribuição exclusiva às chamadas em processo de *handover*.
- A camada macrocelular é responsável pela cobertura em regiões de sombra para a camada microcelular. Tal como na camada microcelular estão reservados  $C - C_{h0}$  canais de guarda para atribuição exclusiva às chamadas em processo de *handover*, quer originadas na própria camada macrocelular quer provenientes por *overflow* da camada microcelular, devido à falta de recursos rádio nela disponíveis.
- Sempre que o número de recursos rádio disponíveis numa microcélula é inferior a  $C_{hi}$  ( $i = 1, \dots, N$ ) uma chamada em fase de estabelecimento é escoada para a macrocélula que sobrepõe à microcélula à qual foi oferecida. Se o número de recursos aí disponíveis for inferior a  $C - C_{h0}$  a chamada é definitivamente bloqueada.
- Sempre que não existam recursos rádio disponíveis numa microcélula, uma chamada em processo de *handover* é escoada para a camada macrocelular. Se não

existirem recursos disponíveis na respectiva macrocélula a chamada é forçada a terminar.

- Sempre que um terminal em movimento na área de dominância de uma microcélula atinge uma área de sombra para a camada microcelular realiza um *handover* para a camada macrocelular caso exista pelo menos um recurso rádio disponível. No entanto, não são permitidos *handovers* da camada macrocelular para a camada microcelular mesmo que exista essa possibilidade.

A figura 6.11 ilustra graficamente a arquitectura de rede considerada. Como pode ser observado, a área de cobertura de uma macrocélula sobrepõe-se às áreas de cobertura de várias microcélulas.

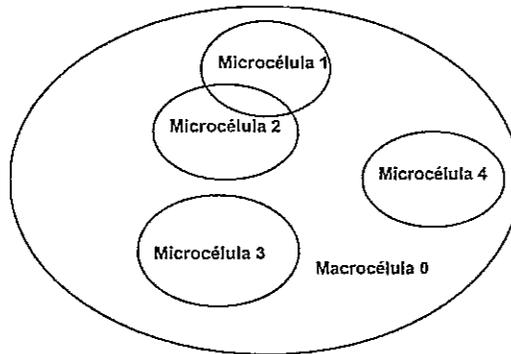


Figura 6.11– Variante da organização em arquitectura hierárquica

O princípio de funcionamento deste tipo de arquitectura é caracterizado por um conjunto de variáveis de estado. A partir da análise da dinâmica do sistema são escritas as equações de estado em regime estacionário. Estas equações são resolvidas para o conjunto de variáveis de estado e a partir daí são derivados os parâmetros descritores do desempenho da arquitectura de rede.

#### 6.6.2.1 Desenvolvimento do modelo de tráfego utilizado.

O sistema é considerado como homogéneo. Sendo assim, no seu processo de análise basta considerar uma única macrocélula (e as microcélulas cuja área de cobertura sobrepõe) independentemente das demais, uma vez que todas as macrocélulas da rede apresentam um comportamento estatístico idêntico. Passamos a designar o conjunto definido por uma macrocélula e as  $N$  microcélulas cuja área de cobertura sobrepõe pelo termo *macro-area* MA. Uma vez que o comportamento estatístico de todas as

*macro-areas* é o mesmo, no desenvolvimento do modelo basta considerar uma única *macro-area* MA da rede.

No processo de elaboração do modelo de tráfego para esta arquitectura de rede, consideraram-se as seguintes aproximações:

- O processo de estabelecimento de novas chamadas em qualquer das células da rede segue uma distribuição de *Poisson*. A taxa média de estabelecimento de novas chamadas para a célula  $0, 1, \dots, N$  é dada respectivamente por:  $\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_N$ .
- O processo de realização de chamadas por *handover* segue também uma distribuição de *Poisson*.
- O tempo de residência numa célula da rede (*cell dwell time*  $T_{Di}$  ( $i = 0, 1, \dots, N$ )) segue uma distribuição exponencial de parâmetro:  $\mu_{Di} = \frac{1}{T_{Di}}$ .
- O tempo total decorrido durante a realização de uma chamada, sem ocorrência de uma terminação forçada por falha durante a realização de um *handover* segue também uma distribuição exponencial  $T$  de parâmetro  $\mu = \frac{1}{T}$ .

As aproximações acima enunciadas permitem que este sistema possa ser classificado como sendo um processo do tipo *nascimento e morte* multidimensional. O processo de transição entre estados adjacentes da cadeia é contínuo no tempo, sendo que estas transições são devidas à ocorrência de eventos aos quais damos o nome de “processos de activação de transição” (*driving processes* DP).

A cada estado da cadeia é atribuído um índice  $s$  ( $s = 0, 1, \dots, s_{\max}$ ), sendo que o número total de estados é dado por  $s_{\max}$ .  $P_i$  ( $i = 0, 2, \dots, s_{\max}$ ) é a probabilidade de o sistema se encontrar num estado genérico da cadeia num dado instante de tempo. Cada estado é caracterizado por uma sequência do tipo:  $v_0(s), v_1(s), v_2(s) \dots, v_N(s)$ , onde  $v_i(s)$  representa o número de chamadas a decorrer na célula  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) quando a cadeia se encontra no estado genérico  $s$  ( $s = 0, 1, \dots, s_{\max}$ ). Como o número de canais ou recursos rádio disponíveis em cada célula é dado por  $C_i$  ( $i = 0, 1, \dots, N$ ), apenas são válidas as sequências para as quais  $0 \leq v_i(s) \leq C_i$ . As transições entre estados

adjacentes da cadeia são devidas aos seguintes acontecimentos (“processos de activação de transição”, DP):

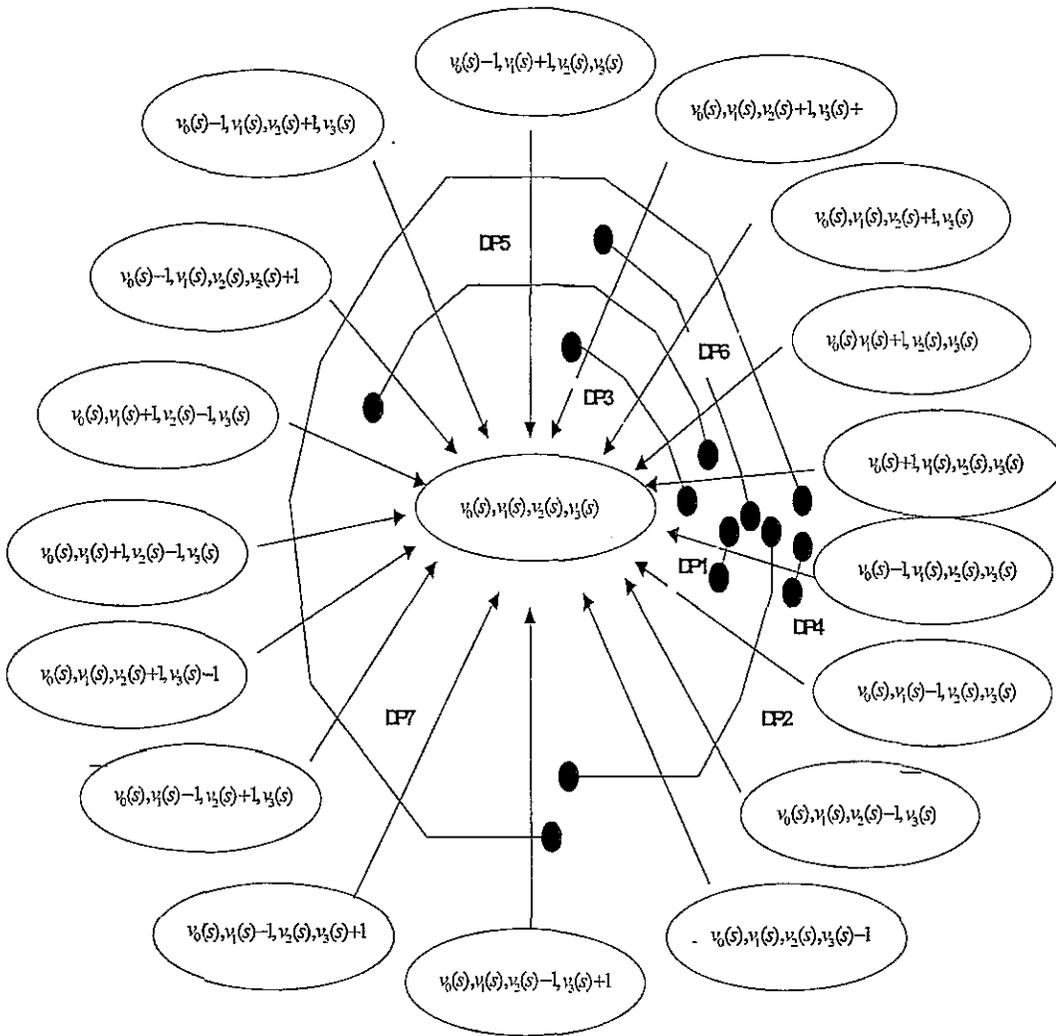


Figura 6.12– Diagrama de transição de estados para o estado genérico  $s$ , para uma estrutura em rede hierárquica formada por MAs compostas por uma macrocélula cuja área de cobertura sobrepõe a área de cobertura de tres microcélulas.

- Estabelecimento de novas chamadas na macrocélula da MA - *nascimento* (DP1).
- Estabelecimento de novas chamadas em qualquer das microcélulas da MA - *nascimento* (DP2).
- Término de chamadas a decorrer na MA - *morte* (DP3).
- Estabelecimento de chamadas em processo de *handover* a partir de macrocélulas adjacentes a MA - *nascimento* (DP4).

- Partida de chamadas por *handover* para macrocélulas adjacentes da MA - *morte* (DP5).
- Estabelecimento de chamadas em processo de *handover* a partir da camada microcelular para a macrocélula da MA - *nascimento* (DP6).
- Estabelecimento de chamadas em processo de *handover* entre microcélulas adjacentes na MA - *nascimento* (DP7).

Na figura 6.12 estão representadas todas as possíveis transições de estados da cadeia de Markov para um caso particular de uma arquitectura de rede celular com uma MA composta por uma macrocélula cuja área de cobertura sobrepõe a área de cobertura de tres microcélulas.

Para que possam ser calculados os parâmetros descritores do desempenho é necessário determinar as probabilidades de estado em regime estacionário  $p(s)$  da cadeia. As probabilidades de estado em regime estacionário são derivadas a partir da resolução de um sistema de  $s_{\max} + 1$  equações simultâneas obtidas a partir das equações de transição de estados do sistema:

$$\sum_{j=0}^{s_{\max}} q(i, j) p(j) = 0, \quad i = 0, 1, \dots, s_{\max} \quad (46)$$

$$\sum_{j=0}^{s_{\max}} p(j) = 1$$

em que os coeficientes  $q(i, j)$  representam a taxa de ocorrência de transições para o estado  $i$  a partir do estado  $j$  da cadeia. Em [RAP94] é apresentado em detalhe a forma como os coeficientes  $q(i, j)$  são derivados a partir de cada um dos 7 processos de activação de transição descritos acima. No total são 7 tipos de coeficientes distintos:  $q_1(i, j), q_2(i, j), \dots, q_7(i, j)$ .

A partir das taxas de transição de estados relativas a cada um dos sete processos é possível obter o valor da probabilidade de ocorrência de uma transição para um estado genérico  $s$  da cadeia ( $P_{in}$ ).

$$P_{in} = \sum_{j=0, j \neq s}^{s_{\max}} q(s, j) p(j) \quad (47)$$

Uma vez que para sistemas em equilíbrio o que entra é igual ao que sai, podemos escrever:

$$q(s,s) = - \sum_{k=0, k \neq s}^{s_{\max}} q(k,s) \quad (48)$$

Chegamos assim ao sistema de  $s_{\max} + 1$  equações descrito por (46), a partir do qual podem ser derivadas as probabilidades de estado  $p(s)$ .

### 6.6.2.2 Análise do desempenho da arquitectura de rede e apresentação dos resultados.

Para avaliar o desempenho deste tipo de organização em arquitectura hierárquica, foi considerado como caso prático uma MA composta por duas microcélulas e uma macrocélula com os seguintes parâmetros:

- O número total de recursos atribuídos por MA foi considerado como sendo igual a 60.
- A taxa de estabelecimento de novas chamadas foi considerada como sendo igual para as três células.
- O tempo médio de duração de cada chamada foi considerado igual a 100s.
- O tempo médio de residência na macrocélula e em cada microcélula foi considerado como sendo igual a 225 e 150s, respectivamente.
- 20% dos *handovers* de saída de cada microcélula foram considerados como sendo em direcção à macrocélula. 50% dos *handovers* foram considerados como sendo em direcção à microcélula adjacente. Os restantes 30% dos *handovers* foram considerados como sendo em direcção às MAs adjacentes.
- Foram considerados três padrões distintos de distribuição dos 60 recursos: padrão 1 -  $\{20,20,20\}$  (distribuição uniforme dos recursos pelas três células; padrão 2 -  $\{26,17,17\}$  (26 canais para a macrocélula e 17 canais para cada microcélula; padrão 3 -  $\{32,14,14\}$  (32 canais para a macrocélula e 14 canais para cada microcélula.

- Foram considerados três padrões distintos de definição de canais de guarda: - padrão 1 -  $\{0,0,0\}$  (não foram definidos canais de guarda); padrão 2  $\{2,1,1\}$  (2 canais de guarda para a macrocélula e 1 canal de guarda por microcélula); padrão 3  $\{4,2,2\}$  (4 canais de guarda para a macrocélula e 2 canais de guarda por microcélula).

Como era de se esperar, os resultados obtidos demonstram que a probabilidade de bloqueio no estabelecimento de novas chamadas  $P_b$  ao nível da camada macrocelular diminui com o aumento do número de recursos rádio atribuídos à mesma (do padrão 1 para o padrão 2 e a seguir para o padrão 3). Concluiu-se ainda, ao contrário do que seria de esperar, que esta diminuição não ocasiona um aumento em  $P_b$  ao nível da camada microcelular. Isto é devido ao facto de a camada macrocelular absorver o tráfego escoado a partir da camada microcelular que não é atendido. Desta forma, os recursos que são canalizados para a camada macrocelular acomodam o tráfego escoado, evitando a degradação de  $P_b$  ao nível da camada microcelular. Quando o tráfego oferecido apresenta valores elevados tal já não é verdade devido à saturação dos recursos rádio da camada macrocelular.

Os mesmos resultados foram obtidos para a probabilidade de falha por *handover*  $P_{fh}$ . Aliás outra coisa não seria de se esperar uma vez que ambos os tipos de chamadas (novas e por *handover*) são atendidos da mesma forma na inexistência de canais de guarda destinados exclusivamente às chamadas por *handover*.

Por outro lado, a utilização de canais de guarda resulta na diminuição da probabilidade de terminação forçada de chamadas a decorrer, ocasionando um ligeiro aumento na probabilidade de bloqueio no estabelecimento de novas chamadas. O preço a pagar é a diminuição na taxa média de utilização de cada recurso, bem como na capacidade da rede. Este resultado era já esperado tendo em vista análises de arquitecturas anteriores.

## 6.7 Conclusões

Neste capítulo procurou-se fazer uma abordagem da organização da arquitectura de uma rede móvel celular em estrutura hierárquica. Os princípios básicos inerentes a este tipo de arquitectura foram analisados em pormenor, nomeadamente:

- Aspectos relacionados com a cobertura.
- Aspectos relacionados com a gestão do tráfego oferecido.
- Elementos constituintes de cada camada e objectivos da sua introdução na arquitectura de rede.
- Aspectos relacionados com o planeamento celular em redes hierárquicas.
- Gestão do mecanismo de *handover* em redes hierárquicas.
- Engenharia de teletráfego em redes hierárquicas.

Deu-se particular ênfase ao aspecto da cobertura imposta pela camada microcelular, nomeadamente os ganhos conseguidos em termos da penetração do sinal para os espaços interiores (cobertura *indoor*) e no processo de confinamento do sinal rádio emitido, tornando possível a utilização de padrões de reutilização mais compactos.

No que respeita à gestão do tráfego oferecido, verificou-se que este tipo de organização traz vantagens uma vez que resulta numa melhor utilização dos recursos disponíveis na rede. Conforme se verificou, isto é conseguido através da implementação de mecanismos de *overflow* para a camada macrocelular, do tráfego associado ao estabelecimento de novas chamadas que não pode ser absorvido na camada microcelular devido à falta de recursos disponíveis.

Foi também realçado que a implementação em estrutura hierárquica não implica necessariamente um número mínimo de camadas igual a 3. Outro aspecto realçado é que a camada de maior prioridade (camada 1) pode ser composta por estações de 1800 MHz para além das estações microcelulares.

Foi também abordada a questão dos *handovers* em redes móveis hierárquicas. Nomeadamente foi analisado um algoritmo que procede à distinção do tráfego total oferecido em dois tipos, tráfego lento e tráfego de mobilidade, baseando-se em estimativas da velocidade de deslocamento de cada móvel. Conforme foi descrito, o objectivo é minimizar a taxa de terminação forçada de chamadas a decorrer na camada microcelular devido à degradação brusca do sinal, ocasionando falhas na ligação rádio (*RF losses*).

Uma boa parte do capítulo focou a questão da engenharia de teletráfego em redes hierárquicas. Nomeadamente foram descritos dois modelos de tráfego para uma rede hierárquica composta por duas camadas, uma camada microcelular e uma camada macrocelular. Este modelo conduziu à obtenção dos parâmetros descritores do seu desempenho. Recorreu-se a um processo de simulação para validar os resultados obtidos por via analítica. Os resultados obtidos demonstram os ganhos conseguidos com a introdução deste tipo de arquitectura, nomeadamente a redução da probabilidade de terminação forçada de chamadas a decorrer  $P_T$  devido aos recursos disponíveis na camada macrocelular e a melhor rentabilização dos recursos disponíveis na rede com o melhoramento do grau de serviço prestado. Demonstrou-se ainda que são conseguidas taxas de falha no processo de *handover* menores para um número de canais de guarda ainda menor do que o utilizado em redes de uma só camada, e a custa de um pequeno aumento na probabilidade de bloqueio no estabelecimento de novas chamadas.

## 7. CONCLUSÕES

A implantação do serviço de rádio móvel celular é hoje um dado perfeitamente adquirido. O crescimento explosivo deste sector nos últimos 4 anos vulgarizou a utilização deste tipo de serviços, acarretando um aumento na taxa de penetração do número de assinantes. Sem dúvida, o sucesso da implantação do GSM contribuiu significativamente para este processo. O GSM, como sistema robusto, seguro e que permite a disponibilização do serviço fora das fronteiras da rede do assinante, foi o grande motor destes resultados.

Neste trabalho foram apontadas as principais razões que contribuíram para este desenvolvimento acentuado. Conforme salientado, o desenvolvimento de novas tecnologias que permitiram a miniaturização do terminal utilizado e o aumento da sua autonomia, bem como os desenvolvimentos na área do processamento digital do sinal, possibilitaram a vulgarização do serviço. Por outro lado, o aparecimento de novos operadores, num cenário de globalização do sector das telecomunicações, levou ao aumento da concorrência e ao desenvolvimento de novos serviços como forma de cativar o consumidor. Sem dúvida que um dos factores responsáveis por esta explosão na utilização do serviço é o embaratecimento quer dos terminais utilizados quer dos preços na realização de chamadas.

A consequência natural deste processo foi o aumento cada vez mais acentuado no tráfego oferecido às redes móveis celulares. Apesar da tecnologia digital utilizada no GSM possibilitar, através das novas técnicas de processamento digital do sinal, uma melhor rentabilização do espectro disponível a cada operador, passou a haver a necessidade de repensar o planeamento da arquitectura da rede, por forma a manter a qualidade do serviço prestado pelo operador e desta forma responder adequadamente à concorrência. Se nas redes analógicas de primeira geração e no início do processo evolutivo das redes digitais de segunda geração, o objectivo era o estabelecimento da cobertura da rede, nos últimos anos, o objectivo passou a ser a disponibilização de capacidade de absorção de tráfego. Verificou-se que o grau de serviço (GoS) prestado

por um operador celular está directamente associado a dois factores essenciais: à probabilidade de bloqueio no estabelecimento de novas chamadas, devido à falta de recursos rádio (canais de tráfego) em cada célula da rede e à probabilidade de terminação forçada de chamadas a decorrer devido a falha durante a realização de um dos *handovers* que a chamada venha a realizar durante o seu decurso. O processo de falha durante a realização de um *handover* está associado à indisponibilidade de recursos rádio na célula de destino para atribuição à chamada em processo de *handover*. A manutenção da qualidade do serviço prestado está assim directamente ligada ao aumento dos recursos disponíveis em cada célula, quer para atendimento às novas chamadas que são estabelecidas, quer às chamadas em processo de *handover*.

Conforme se viu, o princípio básico das redes móveis celulares é o *princípio da reutilização de frequências*. Desta forma, o aumento da capacidade instalada está associado à compactação da malha celular, ou seja, à utilização de padrões de reutilização compostos por um número cada vez menor de células, por forma a diminuir a distância de reutilização entre células co-canal e desta forma aumentar a reutilização de frequências. Este processo resulta no aumento da capacidade instalada que é o objectivo final. No entanto, a utilização de padrões de reutilização cada vez mais compactos, torna cada vez mais difícil a manutenção da qualidade da ligação rádio entre cada terminal móvel e a respectiva estação base, devido à interferência gerada na rede pelo processo de reutilização de frequências (interferência co-canal e por canal adjacente). Este processo pode assim conduzir a uma degradação da qualidade do serviço prestado, quer por falhas na ligação rádio, quer por terminação forçada de chamadas a decorrer quando o nível de interferência não permite a continuação da chamada (*RF Losses*).

Com este trabalho procurou-se fazer um estudo do planeamento e da engenharia de teletráfego em redes móveis celulares. Partindo do caso prático de uma rede móvel celular que utiliza o GSM como sistema base, este estudo foi iniciado no capítulo 2 com uma pequena abordagem da arquitectura do sistema GSM, em particular da sua interface rádio entre a estação base e o terminal móvel, bem como dos canais nela suportados (canais de tráfego e de sinalização). A seguir, foram abordados os princípios básicos inerentes às redes móveis celulares, bem como algumas técnicas de planeamento normalmente utilizadas numa primeira fase do processo de evolução deste

tipo de redes: a decomposição, a sectorização e a implementação em arquitectura *overlaid/underlaid*.

O estabelecimento da cobertura da rede é também um processo fundamental no planeamento das redes celulares, na medida em que está directamente associado aos custos da sua implantação. Para tal, devem ser utilizados modelos de propagação do sinal ajustados à realidade do ambiente que se pretende cobrir, por forma a estimar com o maior grau de precisão possível a cobertura real da rede. Este processo é fundamental na definição quer do número de estações base necessárias para estabelecimento da cobertura, quer para o desenvolvimento de padrões de reutilização de frequências e obtenção de valores para a interferência co-canal e por canal adjacente gerada na rede. O processo de dimensionamento do aumento da capacidade da rede toma como base a sua cobertura teórica, sendo tanto mais preciso quanto mais preciso for esta. No capítulo 3 foram abordados dois modelos de propagação normalmente utilizados no planeamento celular: o modelo de *Okumura-Hata* e o modelo de *Walfish-Ikegami*.

O estabelecimento da cobertura da rede é a primeira etapa no processo de implantação e estabelecimento da rede celular de um novo operador. Com o aumento da taxa de penetração do serviço torna-se necessário manter o grau de serviço prestado através da minimização dos parâmetros directamente associados a sua degradação. No capítulo 4 abordou-se em detalhe a engenharia de teletráfego em redes móveis celulares. Foram apresentados vários modelos de tráfego para diferentes tipos de arquitectura de rede, com o objectivo de minimizar aqueles parâmetros. Através do estudo do seu processo de variação, procedeu-se a uma análise do desempenho das diferentes arquitecturas. Foi salientado que a probabilidade de terminação forçada de chamadas a decorrer, por falha na realização de um eventual *handover*, é o parâmetro directamente ligado à qualidade do serviço prestado. Por este motivo, as técnicas apresentadas procuram minimizar a percentagem de chamadas terminadas por falha na realização de um *handover*: utilização de canais de guarda para atribuição exclusiva às chamadas em processo de *handover* e de filas de espera para armazenamento deste tipo de chamadas, na indisponibilidade de recursos na célula de destino. Para diminuição da taxa de chamadas bloqueadas no seu estabelecimento um dos métodos apresentados e analisados foi o método *directed retry*, DR.

No entanto, o processo de aumento do número de recursos rádio em cada célula está associado ao aumento do número de portadoras atribuídas a cada uma, e que conforme se viu, está directamente ligado ao aumento da interferência gerada na rede, à degradação da qualidade e ao término forçado de chamadas a decorrer. No capítulo 5 foram apresentadas algumas técnicas mais avançadas de planeamento celular que são actualmente utilizadas. Para cada uma destas técnicas foram apresentadas as vantagens e desvantagens da sua implementação e introdução na rede. As técnicas estudadas foram as seguintes: introdução dos saltos de frequência (*frequency hopping* - FH), do ajuste dinâmico da potência emitida por cada móvel e/ou estação base (*dynamic power transmission* - DPT) e da transmissão descontinuada de voz e/ou dados (*discontinuous transmission* - DTX). Foram ainda abordadas outras técnicas de planeamento para utilização em conjunto com estas técnicas: a utilização de padrões múltiplos de reutilização de frequências (*multiple reuse patterns* - MRP) e a utilização de bandas de frequências separadas para as portadoras BCCH e TCH.

No capítulo 6 foi salientado que a vulgarização do serviço e o aumento do grau de compactação dos terminais utilizados tornaram possível a disponibilização do serviço por parte do assinante virtualmente em qualquer lugar. O desenvolvimento de novos tipos de estações base e as suas características específicas de propagação, tais como as estações microcelulares, possibilitaram o desenvolvimento de estruturas de rede hierárquicas compostas por 2, 3 ou mais camadas. A introdução das estações microcelulares na arquitectura da rede permitiu a utilização de padrões extremamente compactos devido ao grau de confinamento do sinal emitido, com o aumento da capacidade instalada na rede daí resultante. A utilização deste tipo de estações em espaços interiores (devido ao nível de potência emitido ser muito inferior ao nível de potência emitido pelas estações base normais, conforme se viu) possibilitou um novo degrau no processo de evolução deste tipo de redes: o estabelecimento da cobertura em espaços interiores (cobertura *indoor*). Este facto está naturalmente associado ao crescimento ainda mais acentuado da taxa de penetração do serviço, e conduziu a um novo conceito de planeamento em redes móveis celulares: o planeamento diferenciado consoante o tipo de ambiente que se pretende atingir, através do fornecimento de capacidade (ou largura de banda).

O próximo passo no processo de desenvolvimento das redes móveis celulares é a evolução para as chamadas redes de terceira geração. A característica fundamental das redes móveis celulares dos sistemas de terceira geração será a disponibilidade da largura de banda necessária ao fornecimento de serviços de dados a elevadas taxas de transmissão. A evolução deverá permitir a disponibilização de largura de banda para acesso à *internet* e tecnologias *multimédia*. Outro conceito que será revisto será o grau de serviço (GoS) prestado. Passar-se-á a falar de diferentes graus de serviço consoante a largura de banda disponibilizada ao assinante.

O primeiro passo em direcção aos sistemas de terceira geração está a ser dado actualmente com a introdução da tecnologia GPRS (*general packet radio system*) nas redes móveis celulares que utilizam o sistema GSM. O GPRS é uma rede paralela à rede GSM, na qual a interface rádio é mantida. No entanto, implementa uma rede de comutação de pacotes para transporte de dados em paralelo com a rede de comutação de circuitos do sistema GSM original. O GPRS será um primeiro passo na evolução para os sistemas de terceira geração: as redes UMTS (*universal mobile terminal system*).

## 8. REFERÊNCIAS

- [NIE98] *Nielsen et al, "Enhancing network quality using baseband frequency hopping, downlink power control and DTX in a live GSM network", PMIRC, 1998"*
- [ALM96] *M. Almgreen et al., "Channel allocation and power settings in a cellular system with macro and micro cells using the same frequency spectrum", Proc. Of the IEEE Vehic. Techn. Conf., Atlanta, 1996.*
- [AND95] *J. B. Andersen et al, "Propagation measurements and models for wireless communications channels", IEEE Communications magazine, janeiro 1995.*
- [APIS] *APIS technical training, "GSM Cell Planning", Junho 97.*
- [BAI97] *Alfred Baier and Karin Bandelow, "Traffic engineering and realistic network capacity in cellular radio networks with inhomogeneous traffic distribution", Proc IEEE, 1997.*
- [CAR 94] *C. Carneheim et al, "FH-GSM frequency hopping GSM", IEEE VTC, 1994.*
- [CHO94] *P. Chow et al "Performance advantages of distributed antennas in indoor wireless communications systems", IEEE VTC, 1994.*
- [EKL86] *B. Eklundh, "Channel utilization and blocking probability in a cellular mobile telephone system with directed retry", IEEE Trans. Commun.", vol 34, 1986.*
- [ERI] *Ericsson, "Cell planning principles- CME 20 R6/CME 40 R2", 97.*
- [ERI/AC] *Ericsson, "User description, assignment to another cell", 10/1551-FCU 101 201 UenRevB 1996.*

- [ERI/DB] *Ericsson, "Dual band networks", 11/1562 FCU 101202 UenRevB 1996.*
- [ERI/DTX] *Ericsson User Description "DTX", 7/1551 - FCU 101 201 UenRevB 1996-10-24.*
- [ERI/FH] *User Description "Frequency hopping", 8/1551 - FCU 101 1201 UenRevB 1996-11-01.*
- [ERI/HCS] *Ericsson, "User description hierarchical cell structures", 12/1551-FCU 101 201 UenRevB 1996.*
- [ERI/LS] *Ericsson, "Cell load sharing", 17/1551-FCU 101 201 UenRevB 1996.*
- [ERI/PC] *Ericsson User Description "Dynamic BTS power control", 6/1551 – FCU 101 201 UenRevB 1996-10-29. User Description "Dynamic MS power control", 5/1551 - FCU 101 201 UenRevB 1997-06-27.*
- [ERI96] *Ericsson, "System Survey CME 20 R.6.0/CMS 40 R2 Manual", 1996.*
- [EVE90] *D. Everitt, "Traffic capacity of cellular mobile communications systems," Comp. Networks and ISDN Sys., vol. 20, Dezembro 1990.*
- [EVE94] *D. Everitt, "Traffic engineering of the radio interface for cellular mobile networks", Proc IEEE, vol 82, no. 9, Setembro 1994.*
- [FAR] *Saleh Faruque, "Cellular mobile systems engineering", Artech House Publishers.*
- [FRU96] *Mario Frullone et al, "Advanced planning criteria for cellular systems", IEEE Personal Communications Magazine, Dezembro 1996.*
- [GRE90] *E. Green, "Radio link design for microcellular systems", Br. Telecom J., Vol 8, no. 1 janeiro 1990.*
- [GSM/05.05] *GSM 05.05, Radio Transmission and reception, ETSI ver 4.00, January, 1992.*

- [GUE87] R. Guérin, "Channel occupancy time distribution in a cellular radio system", *IEEE Trans. Vehic Tech.*, vol. VT-36, no 3, Agosto 1987.
- [GUE88] R. Guérin, "Queuing-blocking system with two arrival streams and guard channel", *IEEE Trans. Commun.*, vol. 36, no. 2, Fevereiro 1988.
- [HON86] D. Hong e S. S. Rappaport, "Traffic model and performance analysis for cellular mobile radio telephone systems with prioritized and non-prioritized hand-off procedures," *IEEE Trans. Vehicular Tech.*, vol VT-35, no. 3, Agosto 1986.
- [HOT93] R. Vijayan e J. M. Hotzman, "A model for analysing handoff algorithms", *IEEE Trans. Vehic. Tech.*, vol. VT-42, no 4, Novembro 1993.
- [JAB91] Jabbari et al "Handover and channel assignment in mobile cellular networks", *IEEE Communications Magazine*, Novembro 1991.
- [JAB95] Jabbari et al "Network issues for wireless communications", *IEEE Communications Magazine*, Janeiro 1995.
- [JAB96] B. Jabbari, "Teletraffic aspects of evolving and next generation wireless communication networks", *IEEE, Personal Communication*, pp 4-9, Dezembro de 1996.
- [JAB97] B. Jabbari, "Teletraffic modeling and analysis of flexible hierarquical cellular networks with speed-sensitive handoff strategy", *IEEE JSAC*, Vol 15, No. 8, Outubro de 1997.
- [JAB98] B. Jabbari et al, "Performance modeling and analysis of hierarquical wireless communications networks with overflow and take-back traffic", *Proc. PMIRC*, 1998.
- [KAT96] I Katzela e M. Naghshineh, "Channel assignment schemes for cellular mobile telecommunication systems: a comprehensive survey", *IEEE Personal Communications Magazine*, Junho 1996.

- [KRO97] *F. Kronestedt et al, "Frequency planning strategies for frequency hopping GSM", IEEE VTC, 1997.*
- [LAG96] *X. Lagrange and P. Godlewski, "Performance of a hierarchical cellular network with mobility dependent hand-over strategies.", IEEE VTC, 1996.*
- [LAG97] *Xavier Lagrange, "Multitier cell design", IEEE Comm. Mag., Agosto 1997.*
- [LAR92] *Larry J. Greenstein et al., "Microcells in personal communications systems", IEEE Comm. Mag., Dezembro de 1992.*
- [LEE] *Lee W. C. Y., "Mobile cellular telecommunications systems", Mc Graw- Hill.*
- [MEH] *Asha M.ehrotra, "cellular radio performance engineering", Artech House Publishers.*
- [MIL91] *D. Mc Millan, "Traffic modelling and analysis for cellular mobile networks," teletraffic and data traffic in a period of change, ITC-13, 1991.*
- [OLO93] *H. Olofsson et al, "Interference diversity gain in frequency hopping GSM", IEEE VTC, 1993.*
- [PHU97] *Phuoc et al, "Modeling of customer retrial phenomenon in cellular mobile networks", IEEE JSAC., vol. 15, no. 8, Outubro 1997.*
- [POL96] *Gregory P. Pollini, "Trends in handover design", IEEE Communications Magazine, Março 1996.*
- [POS85] *Edward C. Posner and Roch Guérin, "Traffic policies in cellular radio that minimize blocking of handoff calls", ITC-11, 1985*
- [PRA91] *R. Prasad et al, "Improved assessment of interference limits in cellular radio performance", IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol 40 no. 2, maio 1991.*
- [RAP96] *Theodore S. Rappaport, "Wireless communications - Principles and Practice", Prentice-Hall.*

- [RAP94] S. S. Rappaport, "Microcellular communication systems with hierarquical macrocell overlays: traffic performance models and analysis", *Proc. IEEE*, Vol 82, No. 9, Setembro de 1994.
- [SAL87] A. M. Saleh et al "Distributed antennas for indoor radio communications", *IEEE Transactions on communications*, vol COM-35, n° 12, dezembro 1987.
- [SAR93] Joseph Sarnecki, et al, "Microcell design principles", *IEEE Comm. Mag.*, Abril de 1993.
- [STE92] R. Steele and M.Nofal, "Teletraffic performance of microcellular personal communications networks, *IEE Proc.*, Vol. 139, No. 4, Agosto de 1992.
- [STE95] Steele et al "Systems aspects of cellular radio", *IEEE Communications Magazine*, Janeiro 1995.
- [TEK92] S. Tekinay e B. Jabbari, "A measurement-based prioritization scheme for handovers in mobile cellular networks", *IEEE JSAC*, Outubro 1992.
- [THO88] R. Thomas, H.Gilbert e G. Maziotto, "Influence of the moving of the mobile stations on the performance of a radio mobile cellular network", *Proc. 3<sup>rd</sup> Nordic Seminar on Digital Land Mobile Radio Commun*, Setembro 1988.
- [XIA93] H. H. Xia et al "Radio propagation characteristics for line-of-site microcellular and personal communications", *IEEE Transactions on antennas and propagation*, vol 41, n° 10, dezembro 1993.
- [XIA94] H. H. Xia et al, "Microcellular propagation characteristics for personal communications in urban and suburban environments", *IEEE Transactions on vehicular technology*, vol 41, n° 3, agosto 1994.

## 9. GLOSSÁRIO

<i>AGCH</i>	<i>Access granted channel</i>
<i>AUC</i>	<i>Authentication unit</i>
<i>BCC</i>	<i>Base station color code</i>
<i>BCCH</i>	<i>Broadcast control channel</i>
<i>BCH</i>	<i>Broadcast control channels</i>
<i>BER</i>	<i>Bit error rate</i>
<i>BSC</i>	<i>Base station controller</i>
<i>BSIC</i>	<i>Base station identity code</i>
<i>BSS</i>	<i>Base station sub-system</i>
<i>BTS</i>	<i>Base transceiver station</i>
<i>CCCH</i>	<i>Common control channel</i>
<i>CEPT</i>	<i>Dynamic channel allocation</i>
<i>DCA</i>	<i>Dynamic channel allocation</i>
<i>DCCH</i>	<i>Dedicated control channel</i>
<i>DP</i>	<i>Driving process</i>
<i>DPT</i>	<i>Dynamic power transmission</i>
<i>DR</i>	<i>Directed retry</i>
<i>DTX</i>	<i>Discontinuous transmission</i>
<i>EIR</i>	<i>Equipment identity register</i>
<i>FACCH</i>	<i>Fast associated channel</i>
<i>FCA</i>	<i>Fixed channel allocation</i>
<i>FCCH</i>	<i>Frequency correction channel</i>
<i>FDMA</i>	<i>Frequency division multiple access</i>
<i>FER</i>	<i>Frame error rate</i>
<i>FH</i>	<i>Frequency hopping</i>
<i>FIFO</i>	<i>First in-First out</i>

<i>GoS</i>	<i>Grade of Service</i>
<i>GSM</i>	<i>Global system for mobile communications</i>
<i>HCA</i>	<i>Hybrid channel allocation</i>
<i>HCS</i>	<i>Hierarchical cell structures</i>
<i>HLR</i>	<i>Home location register</i>
<i>HSN</i>	<i>Hopping sequence number</i>
<i>ICP</i>	<i>Instituto das comunicações de Portugal</i>
<i>IMSI</i>	<i>International mobile subscriber number</i>
<i>IN</i>	<i>Intelligent networks</i>
<i>ISDN</i>	<i>Integrated services digital network</i>
<i>ITU</i>	<i>International telecommunications unit</i>
<i>LOS</i>	<i>Line of site</i>
<i>MA</i>	<i>Macro-Area</i>
<i>MAHO</i>	<i>Mobile assisted handover</i>
<i>MAIO</i>	<i>Mobile allocation index offset</i>
<i>MBPS</i>	<i>Mobile based prioritization system</i>
<i>MCC</i>	<i>Mobile country code</i>
<i>MRP</i>	<i>Multiple reuse pattern</i>
<i>MS</i>	<i>Mobile station</i>
<i>MSC</i>	<i>Mobile switching controller</i>
<i>MSSHO</i>	<i>Mobile speed sensitive handover criteria</i>
<i>NLOS</i>	<i>Non line of site</i>
<i>NSS</i>	<i>Network switching system</i>
<i>OMC</i>	<i>Operations and maintenance center</i>
<i>OSS</i>	<i>Operations and support system</i>
<i>PCH</i>	<i>Paging channel</i>
<i>PCM</i>	<i>Pulse code modulation</i>
<i>PSTN</i>	<i>Public switched telephone network</i>
<i>RACH</i>	<i>Random access channel</i>
<i>RSSI</i>	<i>Received signal strength indicator</i>
<i>RXQUAL</i>	<i>Received signal quality</i>
<i>SACCH</i>	<i>Slow associated control channel</i>

<i>SCH</i>	<i>Synchronization channel</i>
<i>SIM</i>	<i>Subscriber identity module</i>
<i>SS7</i>	<i>Signaling system #7</i>
<i>TCH</i>	<i>Traffic channel</i>
<i>TDMA</i>	<i>Time division multiple access</i>
<i>TRX</i>	<i>Transmission unit</i>
<i>VLR</i>	<i>Visitor location register</i>