Departamento
de Engenharia
Electrotécnica e
de Computadores

Trabalho Final de Curso

Avaliação de Métodos de Planeamento Celular em GSM

Pedro Assunção
Rui Estevinho

Lisboa, Novembro de 2000

Trabalho realizado sob orientação de

Prof. Luís M. Correia

Secção de Propagação e Radiação

Departamento de Engenharia Electrotécnica e Computadores
Instituto Superior Técnico

"- Senhor, interrogo-me como os peixes vivem no mar.

- Pois, como os homens na terra: os grandes comem os pequenos."

WILLIAM SHAKESPEARE, Ricardo III

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de expressar o nosso agradecimento a um conjunto de pessoas que nos ajudaram durante o longo percurso que foi este trabalho final de curso. A todas estas pessoas estamos muito gratos, pela sua colaboração directa ou indirecta no trabalho, pelo seu apoio, pela sua amizade.

O nosso primeiro agradecimento vai para o Prof. Luís Correia, que nos apoiou desde o primeiro dia em que este trabalho nos foi atribuído. Obrigado pelas reuniões semanais que fizeram o trabalho manter o rumo correcto, pelos conselhos, pela motivação, pela disponibilidade, por estar sempre do nosso lado e por nos saber compreender.

Agradecemos também à Telecel, nomeadamente ao Engº. Carlos Caseiro, à Engª. Sandra Ameida e ao Engº. Pedro Lourenço, pelas suas colaborações no esclarecimento de dúvidas e pela cedência de dados necessários à realização deste trabalho.

Agradecemos à D. Isabel e à D. Olivia pela sua disponibilidade e paciência.

Um especial agradecimento a todos os colegas de laboratório que connosco trabalharam arduamente durante este ano e sem os quais todo este trabalho teria sido menos divertido: Hugo, Zé, Eira, Miguel '*o espanhol*', Krzysztof, Teresa, Luca, Manolo. Agradecemos também a todo o grupo móvel, que nos permitiu ter uma visão mais abrangente do universo das telecomunicações.

Agradecemos também a todos os nossos colegas do IST, que nos ajudaram nesta longa caminhada que culminou no trabalho final de curso. É impossível mencioná-los a todos e para não esquecermos ninguém, desejamos a todos um grande bem haja.

Muito obrigado às nossas famílias, amigos e amigas, por nos terem sempre incentivado, pelo apoio e compreensão nos momentos mais difíceis.

RESUMO

O trabalho teve como objectivo comparar diferentes métodos de planeamento celular usados no sistema GSM, tendo em vista uma maximização da capacidade do sistema sem degradação da interferência co-canal.

Neste relatório está presente um estudo geral sobre o sistema GSM, bem como uma revisão dos principais modelos de propagação e de tráfego. Entre os vários modelos de optimização do planeamento celular estudados, procedeu-se à avaliação do desempenho dos seguintes: mudança do padrão de reutilização, uso de sectorização, implementação de *frequency hopping* e reutilização múltipla de padrões.

Para avaliar os métodos estudados, procedeu-se ao desenvolvimento de um programa em MATLAB, em que se pretende simular uma rede celular homogénea. Depois da sua implementação, efectuaram-se diversas simulações utilizando os métodos acima referidos, tendo como objectivo avaliar a relação portadora-interferência (C/I).

Recorrendo ao programa desenvolvido analisou-se o comportamento do sistema com o terminal móvel em várias posições da célula e estudaram-se diferentes tipos de antenas reais e ideais. Observou-se o que a alteração do padrão celular, de N_{cg}=4 para N_{cg}=3, provoca no C/I. Para o pior caso, com antenas ideais e o móvel no limite da célula, o C/I sofreu uma degradação de 3 dB. Estudou-se o uso de antenas sectorizadas de diferentes aberturas horizontais. Para o caso de antenas ideais, N_{cg}=4 e o móvel no limite da célula, o ganho que se obtém para o pior caso quando se usa sectorização é de 6.7 dB. Implementou-se também um método que provoca diversidade de frequência e de interferência: o *frequency hopping*. Por último, implementou-se a reutilização múltipla de padrões, que utiliza o *frequency hopping* para conseguir aumentar a capacidade do sistema, sem que haja uma degradação significativa do C/I. Para esta simulação, aumentou-se progressivamente a capacidade do sistema e acompanhou-se a evolução da relação C/I.

De entre os métodos estudados, o MRP foi aquele permitiu atingir maior capacidade, sem prejuízo excessivo do C/I.

Palavras chave :

Comunicações móveis, GSM, Planeamento celular, *Frequency hopping*, *Multiple Reuse Patterns*

ÍNDICE

Agradecimentos ..... **i**

Resumo ..... **iii**

Índice ..... **v**

Lista de Figuras ..... **vii**

Lista de Tabelas ..... **ix**

Lista de Siglas ..... **xi**

Lista de Símbolos ..... **xiii**

1. Introdução **1**

2. Aspectos Gerais **3**

2.1. Aspectos de Propagação 3

2.2. Aspectos de Tráfego 5

2.3. O Sistema GSM 7

2.3.1. Aspectos Gerais do Sistema 7

2.3.2. Estrutura do Sistema 10

2.3.3. Realização de Chamadas e *Handover* 12

2.4. Planeamento Celular 12

2.4.1. Introdução 12

2.4.2. Interferência de Canal Adjacente 15

2.4.3 Interferência Co-Canal 16

2.4.4. Expansão do Sistema 18

2.4.5. Formas de Melhorar a Qualidade de Sistema 18

2.4.5.1. *Frequency Hopping* 18

2.4.5.2. Transmissão Descontínua 20

2.4.5.3. Inclinação das Antenas 20

2.4.5.4. Controlo de Potência 21

2.4.5.5. Uso de Novos Padrões Celulares 21

2.4.5.5.1. Plano de Reutilização de Frequências 2x6 21

2.4.5.5.2. Plano de Reutilização Fraccional de Frequências 22

2.4.5.5.3. Planeamento de Frequências por Multi-Camada *'Underlay-Overlay'* 24

2.4.5.5.4. Reutilização Múltipla de Padrões 25

3. Análise de Métodos de Planeamento Celular ... 27
3.1. Introdução ... 27
3.2. Descrição do Programa ... 28
3.3. Mapa das Estações de Base ... 29
3.4. Modelos de Propagação ... 31
3.5. Antenas ... 31
3.6. Sectorização ... 32
3.7. Atribuição de Frequências e Canais ... 34
3.8. Descrição da Implementação do FH ... 35
3.9. Descrição da Implementação da Reutilização Múltipla de Padrões ... 35
4. Resultados Obtidos ... 37
4.1. Anéis de Interferência ... 37
4.2. Variação do C/I com o Número de Interferentes ... 37
4.3. Variação do C/I com as Antenas ... 38
4.4. *Frequency Hopping* ... 43
4.5. Reutilização Múltipla de Padrões ... 45
5. Conclusões ... 47
5.1. Análise do Trabalho Desenvolvido ... 47
5.2. Sugestões Para Desenvolvimento Futuro ... 49
Anexo A - Diagrama de Radiação das Antenas ... 51
Anexo B - Apresentação dos Resultados para N_{cg}=4 ... 55
Anexo C - Apresentação dos Resultados para N_{cg}=3 ... 59
Anexo D - Decaimento do C/I com a Distância ... 65
Anexo E - Apresentação dos Resultados para N_{cg}=4 com FH ... 69
Anexo F - Apresentação dos Resultados para N_{cg}=3 com FH ... 73
Anexo G - Apresentação dos Resultados para N_{cg}=1 com FH ... 77
Anexo H - Apresentação dos Resultados para MRP ... 81
Referências ... 87

LISTA DE FIGURAS

Fig. 2.1 – Estrutura de uma trama GSM. 8
Fig. 2.2 – Bandas de frequências do GSM. 8
Fig. 2.3 – Arquitectura de uma rede celular. 10
Fig. 2.4 – Rede GSM 11
Fig. 2.5 – Células usadas para cobertura celular. 13
Fig. 2.6 – Geometria celular com hexágonos. 14
Fig. 2.7 – Padrões celulares mais utilizados. 15
Fig. 2.8 – Interferência entre duas células co-canal 16
Fig. 2.9 – Sectorização 18
Fig. 2.10 – Exemplo de uma sequência de salto aleatório 19
Fig. 2.11 – Inclinação mecânica das antenas 20
Fig. 2.12 – Plano de reutilização de frequências 22
Fig. 2.13 – Plano de reutilização fraccional de frequências 23
Fig. 2.14 – Distribuição dos grupos de frequência 23
Fig. 2.15 – Atribuição de grupos de frequências a cada sector no plano de reutilização fraccional de frequências 24
Fig. 2.16 – Sistema '*Underlay-Overlay*' 25
Fig. 3.1 – Estrutura do programa de simulação 29
Fig. 3.2 – Mapa uniforme de estações de base, R=1km 30
Fig. 3.3 – Mapa de células hexagonais para o planeamento 30
Fig. 3.4 – Atenuação de propagação 31
Fig. 3.5 – Diagramas de radiação ideais 32
Fig. 3.6 – Diagramas de radiação reais 32
Fig. 3.7 – Orientação das células 33
Fig. 3.8 – Influência da orientação dos sectores no nº de interferentes 33
Fig. 3.9 – Sobreposição dos diagramas de radiação para várias aberturas horizontais 34
Fig. 3.10 – Atribuição das portadoras no método MRP para o terceiro caso 36
Fig. 4.1 – Influência dos anéis de interferência na relação C/I 37
Fig. 4.2 – C/I em função do número de estações interferentes activas 38
Fig. 4.3 – Relação C/I em função da distância 42

Fig. 5.1 – Resumo dos resultados para antenas omnidireccionais 47
Fig. 5.2 – Resumo dos resultados para antenas sectoriais..... 48

LISTA DE TABELAS

Tab. 2.1 – Canais lógicos em GSM 9
Tab. 2.2 – Comparação entre a capacidade e qualidade do sistema 17
Tab. 3.1 – Dados iniciais para o programa 28
Tab. 4.1 – Antenas omnidireccionais, N_{cg}=4 39
Tab. 4.2 – Antenas sectoriais, N_{cg}=4 39
Tab. 4.3 – Antenas omnidireccionais, N_{cg}=3 40
Tab. 4.4 – Antenas sectoriais, N_{cg}=3, com a orientação dos sectores da Fig. 3.7 (a) 40
Tab. 4.5 – Antenas sectoriais, N_{cg}=3, com a orientação dos sectores da Fig. 3.7 (b) 43
Tab. 4.6 – Média do C/I para Ncg=4 com FH e o respectivo ganho 44
Tab. 4.7 – Média do C/I para Ncg=3 com FH e o respectivo ganho 44
Tab. 4.8 – Média do C/I para Ncg=1 com FH 45
Tab. 4.9 – Resultados das simulações com MRP usando antenas omnidireccionais ideais 46
Tab. 4.10 – Resultados das simulações com MRP usando antenas sectoriais ideais 46

LISTA DE SIGLAS

ACI - *Adjacent Channel Interference*

AGCH - *Access Grant CHannel*

AUC - *Authentication Center*

BCCH - *Broadcast Control CHannel*

BS - *Base Station*

BSC - *Base Station Controller*

BTS - *Base Transceiver Station*

C/I - *Carrier-to-Interference ratio*

CCCH - *Common Control CHannel*

DB - *Distributed Balancing*

DTX - *Discontinous transmission*

FCCH - *Frequency-Correction CHannel*

FDMA - *Frequency Division Multiple Access*

FH - *Frequency Hopping*

GMSK - *Gaussian Minimum Shift Keying*

GP - *Guard Period*

GSM - *Global System for Mobile Communications*

HLR - *Home Location Register*

IMSI - *International Mobile Subscriber Identity*

MDB - *Modified Distributed Balancing*

MS - *Mobile Station*

MSC - *Mobile services Switching Center*

PCH - *Paging CHannel*

PSTN - *Public Switched Telephone Network*

RACH - *Random Access CHannel*

RF - *Radio Frequency*

RMP - Reutilização Múltipla de Padrões

RPE-LCP - *Regular Pulse Excited - Linear Predictive Coding*

SACCH - *Slow Associated Control CHannel*

SCH - *Synchronisation CHannel*

SDCCH - *Stand-alone Dedicated Control CHannel*

SFH - *Slow Frequency Hopping*

TCH - *Traffic CHannel*

TCH/F - *Traffic CHannel/Full rate*

TCH/H - *Traffic CHannel/Half rate*

TDMA - *Time Division Multiple Access*

UO - *Underlay-Overlay*

VLR - *Visitor Location Register*

CEPT - *Conference Européene des Postes et Telecommunications*

LISTA DE SÍMBOLOS

γ – índice de decaimento da potência

λ – taxa total de chamadas por unidade de tempo

μ – taxa das chamadas que acabam

τ – intervalo de tempo entre chamadas

A – tráfego oferecido

A_c – área de uma célula hexagonal

A_g – área de um grupo de células

d – distância

D – distância entre células co-canal

Dn – distância de reutilização normalizada

d_u – distância unitária

f – frequência

GoS – qualidade de serviço

H_b – altura dos edifícios

h_b – altura da BS

h_{be} – altura efectiva da antena da BS

h_m – altura do móvel

H_{mu} – factor de ganho do móvel

L_o – atenuação de espaço livre

L_p – atenuação de propagação

N – número total de canais

N_{cc} – número de canais de controlo

N_{cg} – número de células por grupo

N_{ct} – número de canais de tráfego por célula

N_f – número de portadoras disponíveis

N_{fc} – número de frequências por célula

P_{mA} – potência média da portadora

P_{mB} – potência média do sinal interferente

R – raio da célula

r_{cc} – razão de reutilização do canal

W_b – largura da rua e do edifício

W_s – largura da rua

O-I – antena omnidireccional ideal

O-R – antena omnidireccional real

S-I – antena sectorial ideal

S-R60 – antena sectorial real com abertura horizontal de 60º

S-R90 – antena sectorial real com abertura horizontal de 90º

S-R120 – antena sectorial real com abertura horizontal de 120º

S-R120d – antena sectorial real com abertura horizontal de 120º e inclinada

1. INTRODUÇÃO

Dos muitos milhões de homens e mulheres que habitaram a Terra, apenas alguns possuíram o talento para criar algo de verdadeiramente novo e útil. A sua inspiração fez muito mais do que elevar o nosso nível de vida.

Um desses homens, o cientista inglês James Maxwell, criou em 1864 a teoria geral da propagação de ondas electromagnéticas, que seria demonstrada experimentalmente em 1890 pelo físico alemão Heinrich Hertz. O italiano G. Marconi, ao ter conhecimento das ondas hertzianas, começou a fazer experiências de ligações rádio. Apareceu então a telegrafia sem fios, que tinha como vantagens o facto de não ser necessária a instalação de cabos e permitir a comunicação com sítios inacessíveis. Esta descoberta, juntamente com a invenção do telefone por Alexander Bell, em 1876, que permitia pela primeira vez a transmissão de voz através de impulsos eléctricos, está na base do nascimento dos primeiros sistemas móveis usados para fins militares, para serviços públicos (polícia, bombeiros, táxis) e alguns privados. Os terminais móveis eram então muito grandes e pesados, o que limitava o seu uso e impedia o uso comercial da ideia. Com a evolução da tecnologia os terminais móveis deixaram de ser apenas móveis e passaram também a ser portáteis. Nos anos mais recentes, os telemóveis passaram do tamanho de um tijolo para o de um pacote de cigarros e o seu peso baixou para uma centena de gramas, até chegar aos dias de hoje em que é possível falar para um relógio de pulso.

Como fruto desta evolução e de uma publicidade agressiva, as pessoas começaram a considerar o telefone móvel como indispensável na sua vida diária. Quer seja na rua ou em casa, quer seja de carro ou a pé, a generalidade das pessoas quer poder estar contactável na sua vida profissional ou social. O espectacular aumento do número de utilizadores destes sistemas e a consequente procura dos serviços das operadoras de rádio móvel, tornou necessário que estas procurassem novos métodos de aumentar a capacidade dos sistemas.

Com o aparecimento de problemas de capacidade e com os problemas já existentes de incompatibilidade entre os sistemas de primeira geração que foram surgindo, o CEPT (*Conference Européene des Postes et Telecommunications*) criou em 1982 o comité *Groupe Speciale Mobile* (GSM) com a missão de especificar um sistema de comunicações móveis celular pan-Europeu, a operar na banda dos 900 MHz, mais tarde designado por *Global System for Mobile communications*. Este sistema tinha a vantagem de ser digital e de permitir

um aumento de capacidade, maior segurança e imunidade ao ruído e disponibilizar serviços não só de voz mas também de dados.

O conceito de rede celular permite o uso de padrões celulares que são continuamente reutilizados, até que seja obtida a cobertura de uma área. Isto faz com que surjam problemas de interferência e exista a necessidade de optimizar o planeamento (aumentando a capacidade) sem sacrificar a qualidade (baixando a interferência). Além disso, para satisfazer a crescente procura de serviços, torna-se necessário expandir os sistemas actualmente existentes, mas sem que isso implique um aumento desmesurado dos custos. Nascem assim novos esquemas para reduzir a interferência e aumentar a capacidade sem piorar a interferência, como os de *frequency hopping*, controlo de potência, novos padrões celulares, etc.

Assim, neste trabalho, são avaliados métodos de planeamento celular em GSM tendo em vista o aumento de capacidade e a redução da interferência co-canal.

No capitulo 2 são estudados aspectos gerais do trabalho a realizar. Começa-se por estudar dois modelos de propagação (Okumura-Hata e COST 231-Walfish-Ikegami) e são depois apresentados conceitos gerais de tráfego. A seguir descreve-se os conceitos fundamentais de planeamento celular, de onde sobressai a necessidade de diminuir o mais possível a interferência co-canal. São apresentados vários métodos para a sua redução e também para o aumento da capacidade do sistema, tais como a Reutilização Múltipla de Padrões. No final descreve-se brevemente o sistema GSM e as suas características.

No capitulo 3 está presente a descrição do simulador criado para avaliar o desempenho de alguns métodos de planeamento celular, estudados no capítulo anterior. Começa-se por uma caracterização do simulador, descrevendo depois algumas suposições feitas na sua implementação e analisando os seus parâmetros de entrada e saída. Contém ainda uma descrição dos modelos de propagação e antenas usadas.

No capitulo 4 faz-se a avaliação do desempenho da rede, quando existe uma mudança do padrão celular e quando se usa sectorização das células. Faz-se também o estudo sobre o uso de diferentes tipos de antenas. Analisa-se o comportamento da qualidade do sinal para diferentes posições do móvel na célula. Por fim, estuda-se as vantagens do uso do *frequency hopping* e da reutilização múltipla de padrões nos métodos anteriores.

No capitulo 5 são apresentadas as conclusões do estudo efectuado e algumas sugestões para um possível trabalho a ser desenvolvido no futuro.

2. ASPECTOS GERAIS

2.1. Aspectos de Propagação

O sistema GSM foi planeado para ser usado em primeiro lugar ao ar livre. No entanto, o seu uso dentro de edifícios é inevitável. Como consequência, não se consegue arranjar um modelo exacto para descrever a propagação de sinais em GSM, utilizando-se antes modelos teóricos e empíricos de propagação.

A atenuação em espaço livre é dada por [1]:

$$L_{o[\mathrm{dB}]} = 32.44 + 20 \log(f_{[\mathrm{MHz}]}) + 20 \log(d_{[\mathrm{km}]}) \tag{2.1}$$

em que f é a frequência e d a distância. De uma maneira mais geral pode ainda escrever-se:

$$L_{o[\mathrm{dB}]} = 32.44 + 20 \log(f_{[\mathrm{MHz}]}) + 10\gamma \log(d_{[\mathrm{km}]}) \tag{2.2}$$

em que γ é o índice de decaimento da potência. O γ é característico do ambiente e é conhecido para espaço livre (γ=2), bem como para terra plana (γ=4).

A atenuação do sinal está ainda associada ao desvanecimento e este pode ser dividido em dois termos: um lento e um rápido. O desvanecimento lento é causado pela configuração do terreno (área aberta, terreno plano, terreno montanhoso) e por causas humanas (área rural, sub-urbana, urbana, densa-urbana). O desvanecimento rápido é essencialmente causado por reflexões em casas, edifícios, estruturas humanas ou obstáculos naturais, tais como florestas, que rodeiem o móvel.

O desvanecimento de Rayleigh é um desvanecimento rápido causado por reflexões multipercurso do sinal transmitido ao longo do caminho. A localização dos picos de desvanecimento depende do comprimento do percurso e, por isso, a picos diferentes correspondem frequências diferentes.

Para descrever o desvanescimento lento é usada a distribuição log-normal.

Um dos modelos mais usados para a estimação de sinal é o de Okumura-Hata [2], que é um modelo empírico e pode ser usado para todas as zonas (urbana, suburbana densa-urbana e rural), resultando melhor para as duas primeiras zonas. A banda de utilização é [150, 1500] MHz. A atenuação de propagação é:

$$L_{p[\mathrm{dB}]} = 69.55 + 26.16 \log (f_{[\mathrm{MHz}]}) - 13.82 \log (h_{be}) + \\ + [\, 44.90 - 6.55 \log (h_{be}) \,] \log (d_{[\mathrm{km}]}) - H_{mu[\mathrm{dB}]} (h_m, f) \tag{2.3}$$

onde h_{be} é a altura efectiva da antena da estação base (BS) e H_{mu} o factor de ganho do móvel

$$H_{mu[\mathrm{dB}]} = \begin{cases} \left[1.10\log\left(f_{[\mathrm{MHz}]}\right) - 0.70\right]h_m - \left[1.56\log\left(f_{[\mathrm{MHz}]}\right) - 0.80\right], & \text{cidade pequena/média} \\ 8.29\log^2\left(1.54\,h_m\right) - 1.10 & , f \le 200\,\mathrm{MHz} \\ 3.20\log^2\left(11.75\,h_m\right) - 4.97 & , f \ge 400\,\mathrm{MHz} \quad \text{cidade grande} \end{cases} \tag{2.4}$$

para $f \in [150, 1500]$ MHz, $d \in [1, 20]$ km, $h_{be} \in [30, 200]$ m e a altura da antena do móvel em relação ao solo $h_m \in [1, 10]$ m

A expressão de Hata foi alargada para $f \in [1.5, 2.0]$ GHz pelo COST 231 [2]:

$$L_{p[\mathrm{dB}]} = 46.30 + 33.90 \log (f_{[\mathrm{MHz}]}) - 13.82 \log (h_{be}) +$$

$$+ [\, 44.90 - 6.55 \log (h_{be}) \,] \log (\mathrm{d}_{[\mathrm{km}]}) - H_{mu[\mathrm{dB}]}(h_m, f) + C_{m[\mathrm{dB}]} \tag{2.5}$$

onde

$$C_{m[dB]} = \begin{cases} 0, \text{cidades médias e centros suburbanos} \\ 3, \text{centros urbanos} \end{cases}$$

Outro modelo, desenvolvido pelo COST 231, conjuga os modelos teóricos de Ikegami, que é usado para estimar o campo em zonas densamente urbanas e Walfisch-Bertoni, que é usado em ambientes urbanos e tem em conta a difracção no topo dos edifícios, com resultados experimentais em cidades europeias. É um modelo usado para ambientes com uma estrutura tipicamente urbana e a banda de utilização é [800, 2000] MHz. Quando existe linha de vista, a atenuação de propagação é dada por [2]:

$$L_{p[\mathrm{dB}]} = 42.6 + 26 \log (d_{[\mathrm{km}]}) + 20 \log (f_{[\mathrm{MHz}]}) \quad , d > 0{,}02 \text{ km} \tag{2.6}$$

Nos restantes casos, tem-se:

$$L_{p[dB]} = \begin{cases} L_{O[dB]} + L_{tt[dB]} + L_{tm[dB]}, & L_{tt} + L_{tm} > 0 \\ L_{O[\mathrm{dB}]} & , L_{tt} + L_{tm} \le 0 \end{cases} \tag{2.7}$$

onde

$$L_{tm[\mathrm{dB}]} = -16.9 - 10 \log (W_s) + 10 \log (f_{[\mathrm{MHz}]}) + 20 \log (f_{[\mathrm{MHz}]})$$

$$+ 10 \log (H_B - h_m) + L_{ori[\mathrm{dB}]} \tag{2.8}$$

e W_s corresponde à largura da rua e H_b à altura dos edifícios, com

$$L_{ori[\mathrm{dB}]} = \begin{cases} -10.0 + 0.354\phi_{[0]} & , 0° \le \phi < 35° \\ 2.5 + 0.075\left(\phi_{[0]} - 35\right), & 35° \le \phi < 55° \\ 4.0 - 0.114\left(\phi_{[0]} - 55\right), & 55° \le \phi \le 90° \end{cases} \tag{2.9}$$

e onde

$$L_{tt[\mathrm{dB}]} = L_{bsh[\mathrm{dB}]} + k_a + k_d \log(d_{[\mathrm{km}]}) + k_f \log(f_{[\mathrm{MHz}]}) - 9 \log(W_B) \tag{2.10}$$

e W_B é a largura da rua e do edifício, com

$$L_{bsh[\mathrm{dB}]} = \begin{cases} -18 \log(h_b - H_B + 1), & h_b > H_B \\ 0 & , h_b \le H_B \end{cases} \tag{2.11}$$

e

$$k_a = \begin{cases} 54 & , h_b > H_B \\ \left.\begin{array}{ll} 54 - 0.8(h_b - H_B) & , d \ge 0.5\,\mathrm{km} \\ 54 - 1.6(h_b - H_B)\, d_{[\mathrm{km}]} & , d < 0.5\,\mathrm{km} \end{array}\right\}, & h_b \le H_B \end{cases} \tag{2.12}$$

e

$$k_d = \begin{cases} 18 & , h_b > H_B \\ 18 - 15 \dfrac{h_B - H_B}{H_B} & , h_b \le H_B \end{cases} \tag{2.13}$$

e

$$k_f = \begin{cases} -4 + 0.7\left(\dfrac{f_{[\mathrm{MHz}]}}{925} - 1\right), & \text{cidades médias e centros suburbanos} \\ -4 + 1.5\left(\dfrac{f_{[\mathrm{MHz}]}}{925} - 1\right), & \text{centros urbanos} \end{cases} \tag{2.14}$$

Este modelo é válido para $f \in [800, 2000]$ MHz, $d \in [0.02, 5]$ km, $h_b \in [4, 50]$ m e $h_m \in [1, 3]$ m.

2.2. Aspectos de Tráfego

A engenharia de tráfego tem como função atribuir circuitos de comunicação numa determinada área de serviço, para um dado número de utilizadores, com uma dada qualidade de serviço. A distribuição de tráfego tem variação no espaço e no tempo, mas tem um comportamento que pode ser caracterizado estatisticamente.

Admitindo que as chegadas de chamadas são independentes e são um processo aleatório, o cálculo do tráfego é feito usando a distribuição de Poisson. A probabilidade de chegarem k chamadas em t segundos é [3]:

$$\mathrm{P}(k;t) = \frac{(\lambda t)^k e^{-\lambda t}}{k!} \tag{2.15}$$

onde λ é a taxa total de chamadas chegadas por unidade de tempo.

O tempo τ entre chamadas tem uma distribuição exponencial negativa [3]:

$$\text{Prob}(\tau \leq t) = 1 - \exp(-\lambda t) \tag{2.16}$$

Usando a teoria de Markov, as chamadas que chegam e as chamadas que acabam, equilibram-se. Sendo assim, a intensidade de tráfego oferecido é medida em Erlang (1Erl=1 circuito em uso durante 1 hora) e é dada por [3]:

$$A = \frac{\lambda}{\mu} \tag{2.17}$$

onde μ é a taxa das chamadas que partem.

A qualidade de serviço (GoS) é definida como a probabilidade de bloqueio de uma chamada de um utilizador. O número de canais por célula pode ser estimada através do uso da fórmula de Erlang B. Assumindo que as chamadas bloqueadas são rejeitadas, que não existe *handovers* e que o número de utilizadores é infinito, o GoS é dado por [3]:

$$\text{GoS}^B = \frac{A^N / N!}{\sum_{i=0}^{N} A^i / i!} \tag{2.18}$$

onde N é o número total de canais e A o tráfego oferecido. Para uma determinada capacidade de tráfego (quantidade de tráfego que o sistema suporta) e um GoS, é possível calcular o número de canais necessários por célula no sistema.

Pode usar-se o modelo de Erlang C quando as chamadas bloqueadas são colocadas em lista de espera [3]:

$$\text{GoS}^C = \frac{A^N}{N!} \frac{1}{1 - A/N} po \tag{2.19}$$

com

$$po = \left[\sum_{K=0}^{N-1} \frac{A^K}{K!} + \frac{A^N}{N!} \frac{1}{1 - A/N} \right]^{-1} \tag{2.20}$$

Ao considerar-se uma população finita (M utilizadores) pode-se utilizar uma distribuição de Engset [3]:

$$Pk = \frac{\binom{M}{K} A^K}{\sum_{i=0}^{N} \binom{M}{i} A^i} \tag{2.21}$$

No entanto estes modelos não caracterizam fielmente um sistema móvel, pelo facto de não considerarem *handovers*. Mas a partir do modelo de Erlang B, foram desenvolvidos outros modelos de tráfego para caracterizar correctamente um sistema móvel.

Devido ao reduzido espectro de frequências são usadas várias técnicas na atribuição do canal, com vista a melhorar a eficiência espectral. O algoritmo mais simples é o da atribuição fixa de canal. Os canais são atribuídos usando sempre a distribuição de reutilização mínima, provocando uma eficiência espacial máxima de reutilização, mas existem problemas quando há uma alteração do padrão de tráfego. Existem outras técnicas de atribuição de canal mais flexíveis, que tem algoritmos de empréstimo, dinâmicos e híbridos, e que levam em conta fenómenos de *handovers*, interferência co-canal e interferência de canal adjacente [3].

2.3. O Sistema GSM

2.3.1. Aspectos Gerais do Sistema

O sistema GSM é o mais popular sistema de comunicações pessoais e móveis usado na Europa e mesmo a nível mundial. O GSM utiliza duas técnicas de acesso múltiplo: o FDMA (*Frequency Division Multiple Access*) e o TDMA. O FDMA é uma técnica de acesso múltiplo onde cada utilizador tem à sua disposição uma banda de frequências. O TDMA é também uma técnica de acesso múltiplo onde cada utilizador divide com outros, no tempo, uma portadora.

A Fig. 2.1 mostra a estrutura da trama usada em GSM, onde *TB* são os bits de cauda e *GP* os bits de guarda.

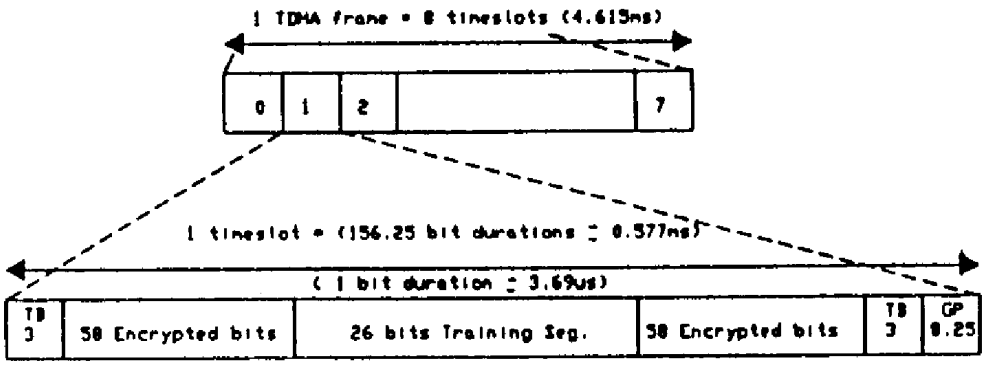


Fig. 2.1 – Estrutura de uma trama GSM (Extraído de [4]).

A duração de cada bit é 3.69 μs. O tempo de guarda é assim de aproximadamente 30 μs e é necessário para que os utilizadores que estão longe não se sobreponham aos que estão perto e vice-versa. Cada canal (*time-slot)* tem a duração de aproximadamente 0.577 ms, constituindo uma trama de 4.615 ms [4].

O sistema GSM possui 8 canais por cada portadora, com um espaçamento entre portadoras de 200 kHz (largura de banda de um canal rádio). A banda ascendente (MS → BS) é [890, 915] MHz e a banda descendente (BS → MS) é [935, 960] MHz, Fig. 2.2. No total, são 125 canais de 200 kHz para cada banda, sendo que um destes é um canal de guarda. Cada canal ascendente está separado do correspondente canal descendente por 45 MHz [4].

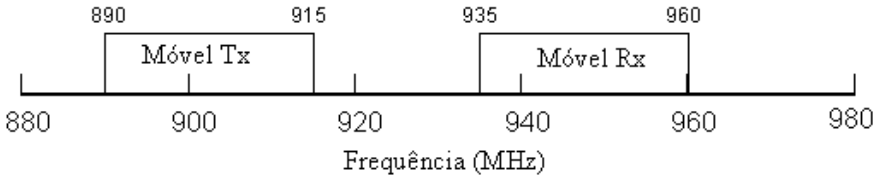


Fig. 2.2 – Banda de frequências do GSM.

Os canais em GSM podem ser divididos em:

⇒ canal rádio – é o canal associado a uma portadora

⇒ canal físico – canal que transporta a informação do sistema e está associado a uma frequência de portadora e a um *time-slot*.

⇒ canal lógico – canal que transporta um tipo específico de informação do sistema

Em relação ao conteúdo da informação, os canais dividem-se em canais de tráfego (TCH), que contêm os sinais de voz e dados dos utilizadores e em canais de controlo (CCH), que contêm a informação de sinalização, controlo e sincronismo do sistema.

Existem dois tipos de canais tráfego: TCH/F (*full rate traffic channels*) e TCH/H (*half rate traffic channels*). Os canais TCH/F para voz têm débitos de 22.8 kb/s e para dados podem ter débitos de 9.6, 4.8 ou 2.4 kb/s, enquanto que os TCH/H têm débitos de 11.4 kb/s para voz e para dados de 4.8 ou 2.4 kb/s.

Os canais de controlo estão agrupados em quatro categorias: BCCH (*broadcast control channel*), CCCH (*common control channel*), SDCCH (*stand-alone dedicated control channel*) e ACCH (*associated control channel*). Os BCCHs só são usados no sentido descendente, existindo 2 tipos: FCCH (*frequency correction channel*), para facilitar a sincronização da frequência da estação base para o terminal móvel; SSH (*synchronisation channel*), responsável pela sincronização de trama no terminal móvel e para identificar a estação base. Existem três tipos de CCCHs: o PCH (*paging channel*), que contém os sinais de *paging* da estação base para o móvel, o RACH (*random access channel*) que é usado só na comunicação ascendente quando o terminal móvel deseja um canal SDCCH, o AGCH que é usado na comunicação descendente para que seja atribuído um SDCCH ou um canal de tráfego para o terminal móvel. Os SDCCHs são canais bidireccionais usados para fornecer os serviços requeridos pelo utilizador. Os ACCHs são canais bidireccionais, que no sentido descendente contêm, por exemplo, comandos de controlo para ajustar o nível de potência do sinal transmitido, enquanto que no sentido ascendente contêm informação do terminal móvel, como o nível do sinal recebido das estações bases adjacentes.

Os canais lógicos podem estar associados a canais de tráfego ou de controlo, Tab. 2.1.

Logical Channels					
Duplex Traf. Chan.: TCH		Control Channels: CCH			
FEC-coded Speech	FEC-coded Data	Broadc. CCH BCCH $BS \rightarrow MS$	Common CCH CCCH	Stand-alone Dedicated CCH SDCCH $BS \leftrightarrow MS$	Associated CCH ACCH $BS \leftrightarrow MS$
TCH/F 22.8 kbit/s	TCH/F9.6 TCH/F4.8 TCH/F2.4 22.8 kbit/s	Freq.Corr.Ch: FCCH	Paging Ch: PCH $BS \rightarrow MS$	SDCCH/4	Fast ACCH: FACCH/F, FACCH/H
TCH/H 11.4 kbit/s	TCH/H4.8 TCH/H2.4 11.4 kbit/s	Synchron. Ch: SCH	Rand. Access Ch: RACH $MS \rightarrow BS$	SDCCH/8	Slow ACCH: SACCH/TF, SACCH/TH SACCH/C4, SACCH/C8
		General Inf.	Access Grant Ch: AGCH $BS \rightarrow MS$		

Tab. 2.1 – Canais lógicos em GSM (extraído de [4]).

No sistema GSM é usado um codificador e descodificador (codec) de voz RPE-LPC (*Regular Pulse Excited – Linear Predictive Coding*) operando a 13 kb/s e codecs convolucionais CC(2,1,5), R=1/2, K=5. Os codecs em conjunto com os equalizadores

reduzem os erros no canal. Com um débito de trama de 271 kb/s a propagação multi-percurso provoca o aparecimento de interferência inter-simbólica e desvanecimento rápido elevados, que é atenuado usando modulação GMSK (*Gaussian minimum shift Keying*) [4]. Foi escolhida esta modulação por garantir melhor eficiência espectral.

Em GSM, a relação portadora/interferência deve ser melhor que 9 dB.

Com este sistema, é permitido *roaming* com qualquer país que use o sistema GSM, ou seja, existe a possibilidade de o utilizador usar o seu terminal móvel para onde quer que viaje. Pode ser feito *roaming* em qualquer região ou país e usar os serviços de qualquer operadora de rede dessa região, com a qual exista acordo de *roaming*.

2.3.2. Estrutura do Sistema

Na Fig. 2.3 mostra-se a arquictectura geral de uma rede celular:

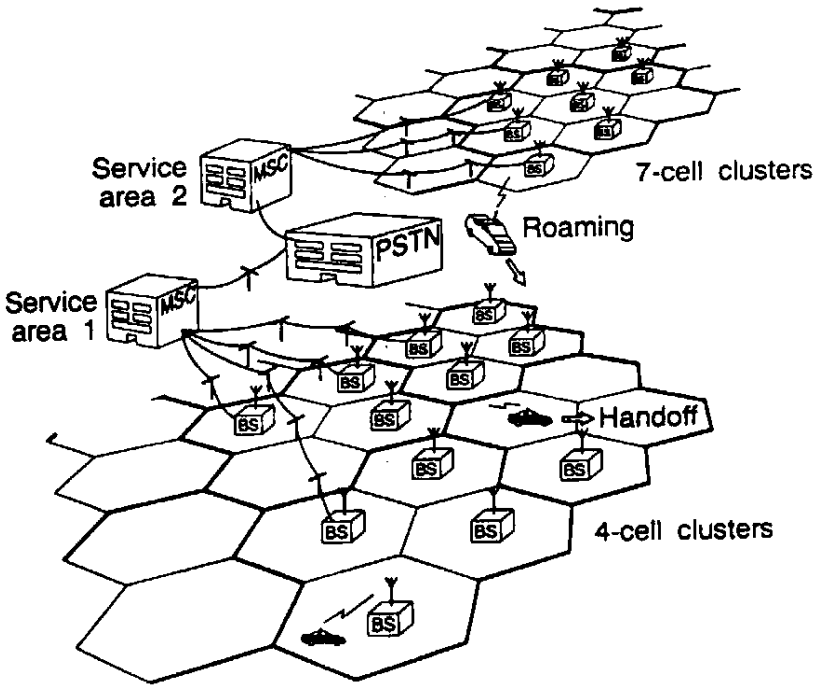


Fig. 2.3 – Arquitectura de uma rede celular (extraído de [2]).

Para se estabelecer uma ligação rádio, um móvel tem que ligar-se a uma estação de base, que por sua vez está ligada a um centro de comutação móvel (MSC - *Mobile Switching Centre*). Os MCS estão ligados aos centros de comutação da rede pública (PSTN – *Public Service Telephone Network*) que encaminham as chamadas para a rede fixa ou para outras redes. Apresenta-se em seguida o aspecto geral de uma rede GSM, Fig. 2.4:

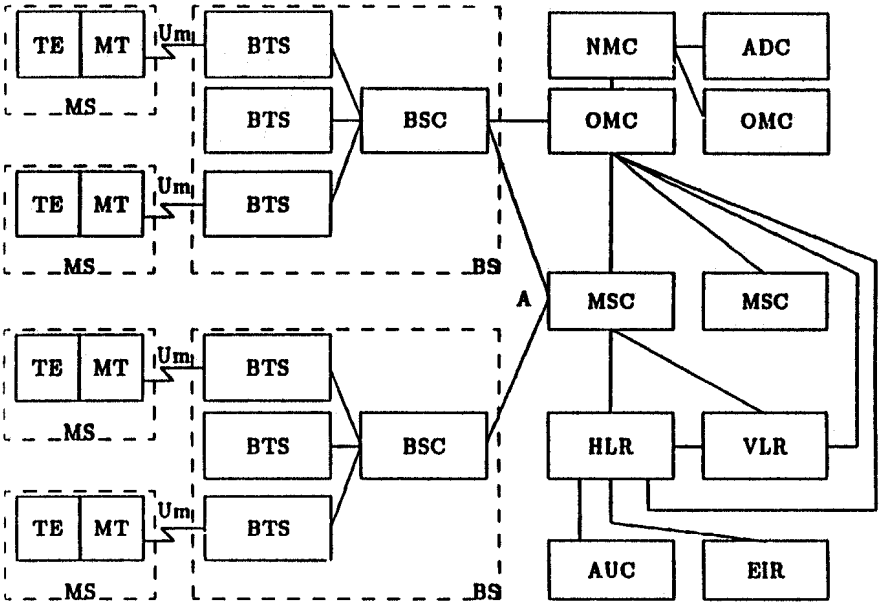


Fig. 2.4 – Rede GSM (extraído de [4]).

Para cada componente da rede são a seguir descritas as suas funções:

TE – '*Terminal equipament'* : telefone, DTE.

MT – '*Mobile termination'* : trata da transmissão rádio, codificador/descodificador de canal e voz, controlo dos canais.

BS – *'Base station'* : atribuição de canais, supervisão da qualidade, sinalização, difusão de mensagens, controlo de potência, codec, adaptação de débitos, *handovers* internos, encriptação.

BTS – *'Base transceiver station'* : Trata da cobertura da célula. Existe uma BTS por cada célula.

BSC – *'Base station controller'* : Funções de controlo da BS.

MSC – *'Mobile Switching Centre'* : Encaminhamento e controlo de chamadas, ligação a outras redes (fixa, RDIS), *paging* para recepção de uma chamada, actualização da localização do móvel, autorizações, *handovers*.

HLR – *'Home location register'* : Base de dados dos assinantes, onde está informação relativa à localização do móvel, ao utilizador e ao seu número (IMSI).

VLR – *'Visitor location register'* : Registo dos MS que operam fora da sua HLR.

AUC – '*Authentication centre'* : Autenticação do utilizador.

EIR – *'Equipament identity register'* : Onde está registada a "lista negra" de MS.

OMC – '*Operations and Maintenance Centre'* : Monitorização e controlo do sistema.

NMC – '*Network Management Centre'* : Gestão do sistema.

ADC – *'Administration Centre'* : Administração do sistema.

2.3.3. Realização de Chamadas e *Handover*

Quando o MS inicia uma chamada, procura nos BCCHs de cada BS o nível de sinal mais elevado e sincroniza-se com ele. A BS atribui um canal bidireccional de sinalização e liga-se ao MSC respectivo. O MSC recebe o IMSI do MS, confirma-o no HLR e envia-o para o VLR. O MS define o serviço que deseja e envia o número de destino da chamada, que é recebido pelo MSC. Em seguida, o MSC atribui um canal de tráfego ao MT e encaminha a chamada para o destino.

Quando a chamada é iniciada fora da rede móvel, o MSC recebe o número vindo de outra rede e emite-o através de todas as BS pelo canal de difusão. O MT selecciona um canal de controlo numa BS e seguidamente é atribuído um canal de voz ao MT pelo MSC. O MT recebe o sinal de sinalização de chamada, que também é enviado para o originador da chamada.

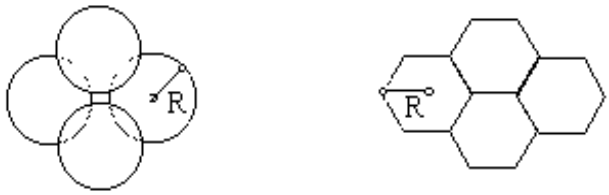
Durante a duração das chamadas é feita a supervisão do sinal para ver se é necessário realizar um *handover*. Um *handover* é o processo pelo qual o controlo da chamada é transferido de uma BS para outra adjacente. Quando o nível do sinal recebido desce abaixo de um limiar, a BS e o MS tentam aumentar as suas potências de emissão e se isto não resultar, a BS informa o MSC que trata de atribuir um novo canal na BS com melhor nível de sinal recebido. O nível de potência para o qual existe *handover* pode não ser rígido e normalmente existe uma histerese, de modo a permitir evitar um *handover* quando o nível de potência do móvel desce temporariamente um pouco abaixo do limiar definido. O GSM suporta também outro tipo de *handovers*, que se realizam dentro da célula. Neste caso, a chamada é transferida de um canal para outro, dentro da mesma célula, dado o canal não poder ser usado devido a problemas de interferência ou manutenção.

2.4. Planeamento Celular

2.4.1. Introdução

O funcionamento correcto de uma rede celular de telecomunicações, passa por um cuidadoso planeamento inicial de vários factores, entre eles o tipo de padrão celular a utilizar, o número de canais para satisfazer a procura numa determinada área, etc. O planeamento celular consiste na divisão geográfica da área que se pretende cobrir em células (áreas geográficas nas quais uma estação de base tem a preferê ncia do móvel, sobre as estações vizinhas) e a distribuição dos canais de frequência disponíveis pelas respectivas células. As células usadas para fazer o planeamento devem assemelhar-se ao diagrama de radiação das

antenas. Se as antenas usadas forem omnidireccionais, o seu diagrama de radiação é um círculo, Fig. 2.5 (a). Para projectar uma rede celular só com círculos, vão existir locais em que não há cobertura e locais onde existe sobreposição. Por isso usa-se o hexágono, Fig. 2.5 (b), para representar a cobertura geográfica de uma antena, por se assemelhar a um círculo e por um conjunto de hexágonos encaixarem perfeitamente uns nos outros, não deixando locais em branco, nem havendo sobreposições. No entanto, é necessário não esquecer que os hexágonos servem apenas para uma representação teórica, onde o que interessa do ponto de vista do planeamento é a localização das antenas no centro dos hexágonos, já que o diagrama de radiação da antena não é na realidade esse.



(a) Diagrama real (b) Diagrama ideal para planeamento

Fig. 2.5 – Células usadas para cobertura celular.

O planeamento é condicionado, entre outros, pela morfologia do terreno e pelo tráfego existente, sendo a interferência co-canal um dos factores mais limitativos da qualidade do sistema.

Para cobrir uma área de terreno muito extensa, como por exemplo um país, não é possível, dividindo essa área em células muito grandes, satisfazer todo o tráfego gerado pelos utilizadores. As células têm que ser pequenas, tanto mais quanto maior for o tráfego nessa zona. Assim, como o espectro radioeléctrico disponível para cada operadora é limitado, é necessário reutilizar as frequências.

Na realização da cobertura usam-se padrões de células, que depois se repetem até toda a área desejada estar coberta. Cada padrão celular ou '*cluster*' contém todas as portadoras disponíveis, estando estas agrupadas em grupos de frequências que são distribuídos pelas células do padrão celular. O número de células por grupo define o padrão de reutilização.

Definindo-se um sistema de eixos (u,v) com células hexagonais, Fig. 2.6, que formam entre si um ângulo de 60º, a distância unitária, d_u, que corresponde à distância entre o centro de duas células hexagonais de raio R, é [2]:

$$d_u = \sqrt{3}\,R \tag{2.22}$$

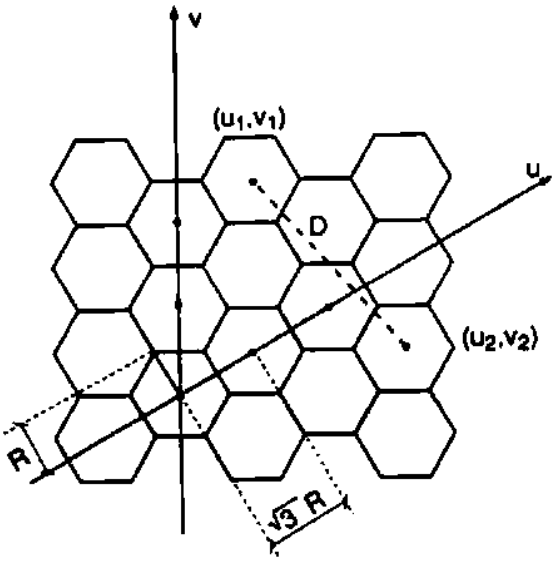


Fig. 2.6 – Geometria celular com hexágonos (extraído de [2]).

A área da célula hexagonal, A_c, é dada por:

$$A_c = \frac{\sqrt{3}}{2}.d_u^2 \tag{2.23}$$

resultando para a área de um grupo de células, A_g:

$$A_g = \frac{\sqrt{3}}{2} D_n^2 d_u^2 \tag{2.24}$$

em que D_n é a distância de reutilização normalizada:

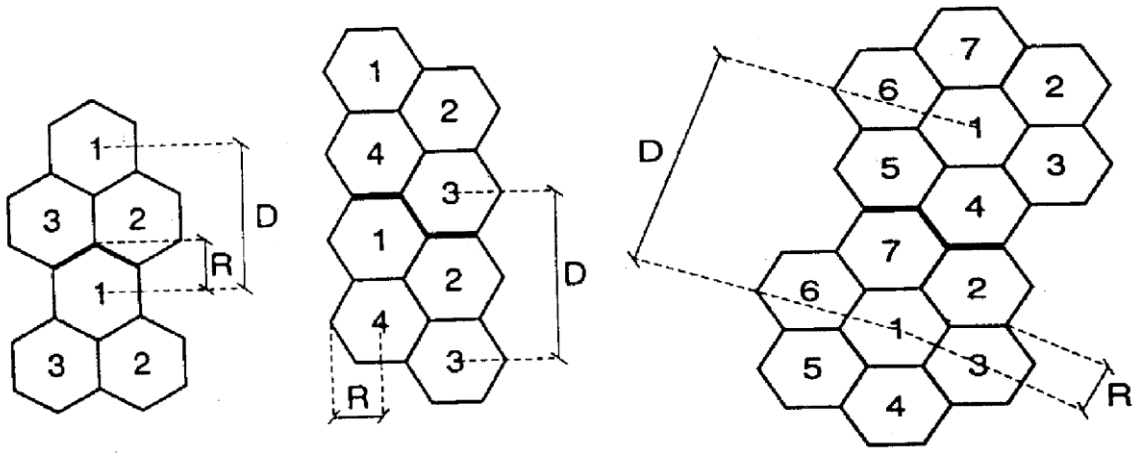
$$D_n^2 = i^2 + ij + j^2 \tag{2.25}$$

resultando da geometria analítica espacial, que só pode ser usado um determinado número de células por grupo, N_{cg}:

$$N_{cg} = D_n^2 = i^2 + ij + j^2 \tag{2.26}$$

com i e j inteiros positivos, pelo que N_{cg} = 1,3,4,7,9,12,13,... Os padrões celulares mais usados têm N_{cg} = 3,4,7 e estão representados na Fig. 2.7. Outros padrões de reutilização, para redes de microcélulas usando configurações quadradas, tiveram bons desempenhos [5].

O padrão de N_{cg} = 12, por exemplo, pode ser realizado com quatro células tri-sectorizadas em vez de doze células individuais, cada uma com a sua BS. Devido ao uso de padrões celulares e à reutilização de frequências, surgem dois problemas de interferência: interferência de canal adjacente e interferência co-canal, que vão limitar a capacidade do sistema.



(a) $N_{cg} = 3$ (b) $N_{cg} = 4$ (c) $N_{cg} = 7$

Fig. 2.7 – Padrões celulares mais utilizados (extraído de [2]).

O número de frequências, N_{fc}, atribuídas a cada célula é dado por [2]:

$$N_{fc} = N_f / N_{cg} \tag{2.27}$$

sendo N_f o número total de portadoras disponíveis no sistema.

Um planeamento óptimo resulta de um compromisso entre a capacidade de tráfego e o número de canais por célula. Em GSM, o número de canais de tráfego por célula é [2]:

$$N_{ct} = 8N_{fc} - N_{cc} \tag{2.28}$$

sendo N_{cc} os canais de controlo por estação base. Uma descrição do GSM pode ser encontrada em [6].

2.4.2. Interferência de Canal Adjacente

A distribuição dos canais rádio pelas células do padrão celular tem que ter em conta a interferência de canal adjacente (ACI). Esta interferência resulta do facto de o isolamento dos canais não ser perfeito, havendo '*slipover*' de energia entre canais contíguos. No planeamento, de forma a reduzir esta interferência, não se colocam canais rádio contíguos na mesma célula ou em células adjacentes.

A ACI é dada por [1]:

$$\mathrm{ACI} = -10\log\left[\left(\frac{d_i}{d_c}\right)^{\gamma}\right] + \mathrm{Isolamento\,do\,canal\,adjacente} \tag{2.29}$$

onde $\frac{d_i}{d_c}$ depende do movimento do móvel para dentro ou fora das células. Devido à evolução da tecnologia e do melhoramento dos filtros, a interferência de canal adjacente não é um dos aspectos mais limitativos do planeamento.

2.4.3. Interferência Co-Canal

A interferência co-canal resulta da interferência provocada pela atribuição da mesma frequência a células de grupos diferentes e é dada pela razão entre a potência da portadora recebida e o ruído térmico mais interferência [2],

$$\frac{\mathrm{C}}{\mathrm{N}+\mathrm{I}}$$

e em que normalmente se despreza o ruído térmico. A interferência co-canal é medida por,

$$\frac{\mathrm{C}}{\mathrm{I}}$$

pressupondo que todas as células são iguais.

Duas células A e B a operar na mesma frequência vão colocar sinal no utilizador X, Fig 2.8:

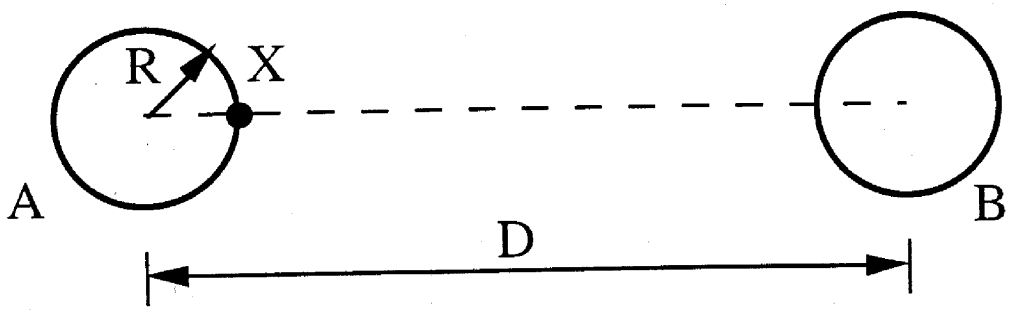


Fig. 2.8 – Interferência entre duas células co-canal (extraído de [2]).

Para calcular a interferência co-canal considera-se o pior caso, ou seja, quando um móvel se encontra na orla da célula. Considerando P_{mA} a potência média da portadora e P_{mB} a potência média do sinal interferente, tem-se [2]:

$$\begin{cases} P_{mA} \propto R^{-\gamma} \\ P_{mB} \propto (D-R)^{-\gamma} \end{cases} \tag{2.30}$$

logo,

$$\frac{C}{I} = \frac{P_{mA}}{P_{mB}} = \frac{R^{-\gamma}}{(D-R)^{-\gamma}} = (r_{cc}-1)^{\gamma} \tag{2.31}$$

em que D é a distância entre células co-canal ou de reutilização e r_{cc} a razão de reutilização co-canal, que relaciona a distância co-canal com o número de células por grupo [2],

$$r_{cc} = \frac{D}{R} = \sqrt{3N_{cg}} \tag{2.32}$$

Quanto mais células tiver um padrão celular, maior será D e maior será r_{cc} e menor será a interferência co-canal, Tab. 2.2. No entanto, haverá menos canais por célula o que implica uma menor capacidade do sistema. Por isso, tem que haver um compromisso entre a qualidade (C/I) e a capacidade do sistema.

N_{cg}	r_{cc}	**Capacidade do sistema**	**Qualidade do sistema**
1	1.73	Alta	Baixa
3	3.00	↑	↓
4	3.46		
7	4.58		
12	6.00	Baixa	Alta

Tab. 2.2 - Comparação entre a capacidade e a qualidade do sistema

No caso de uma rede completa, a interferência co-canal pode ser estimada considerando apenas os interferentes co-canal do primeiro anel de proximidade e desprezando os interferentes dos anéis superiores [2]:

$$\frac{C}{I} \cong \frac{C}{\sum_{n=1}^{j} I_n} \tag{2.33}$$

em que j é o número de interferentes co-canal activos do primeiro anel de proximidade. Num sistema de células hexagonais tem-se no pior caso seis interferentes, obtendo-se então [2]:

$$\frac{C}{I} \cong \frac{(r_{cc}-1)^{\gamma}}{6} \tag{2.34}$$

Para um caso médio, a interferência co-canal é dada pela expressão [1]:

$$\frac{C}{I} = 10\log\left[\frac{1}{j} r_{cc}^{\gamma}\right] \tag{2.35}$$

Conclui-se portanto que a qualidade da transmissão depende do padrão celular escolhido. Quanto maior for a distância co-canal e menor for o raio das células, maior vai ser a relação sinal-interferência.

Uma das maneiras mais eficazes de reduzir a interferência co-canal é usar sectorização, que utiliza antenas directivas permitindo uma maior reutilização dos canais. Outros aspectos que se têm de levar em conta são por exemplo a localização das estações de base, a localização do móvel, as características das antenas, a existência de edifícios, desvanecimentos lento e rápido.

2.4.4. Expansão do Sistema

Quando existe um número crescente de utilizadores a requerer serviços, vai existir uma degradação da qualidade de serviço. Por isso tem que se expandir o sistema inicial e ao mesmo tempo tentar manter uma boa qualidade de serviço:

- **Adição de novos canais**: técnica de fácil implementação mas condicionada pelos canais disponíveis.
- **Mudança do padrão celular**: A capacidade de tráfego aumenta com um N_{fc} menor, provocando uma degradação da qualidade. É uma técnica muito dispendiosa.
- **Sectorização das células**: É conseguida através da divisão das células em sectores (normalmente três), Fig. 2.9. Assim, consegue-se reutilizar mais vezes os canais e reduzir o número de interferentes, reduzindo a interferência co-canal.

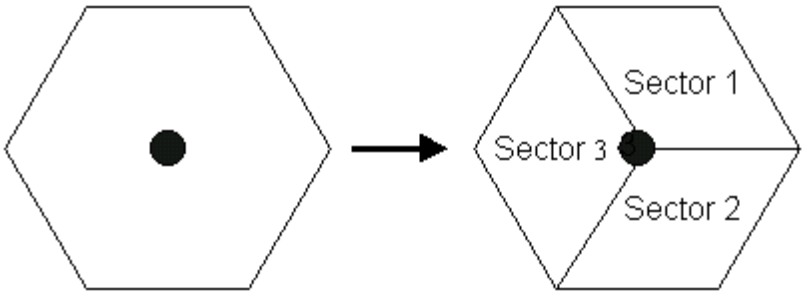


Fig. 2.9 – Sectorização.

- **Divisão das células**: Consiste em dividir células grandes em células pequenas, conforme as necessidades de tráfego. Tem que ter-se em conta a interferência co-canal entre células de tamanho diferentes.

As técnicas mais usadas são a sectorização e a divisão de células. Para aumentar a capacidade do sistema pode recorrer-se à implementação de micro-células, em que a restante cobertura é assegurada por macro-células. As micro-células são células com um raio pequeno [100, 1000] m e por isso são usadas em zonas de elevado tráfego.

Todo este planeamento serve como um primeiro passo até ao planeamento final e definitivo. Posteriormente terão de ser realizadas medidas no terreno, para que possam ser feitos os ajustes necessários e para que em toda a área coberta exista a qualidade necessária à comunicação.

2.4.5. Formas de Melhorar a Qualidade do Sistema

2.4.5.1. *Frequency hopping*

No acesso múltiplo por saltos na frequência (*frequency hopping* (FH)), cada utilizador salta em frequência, de canal em canal, ao longo da banda disponível. Ao permitir que as frequências sejam reutilizadas intensivamente, o *frequency hopping* aumenta a eficiência espectral. Se juntamente com o FH for usado um processo de entrelaçamento, a eficiência do processo de correcção de erros aumenta.

O FH pode ser lento (SFH) ou rápido (FFH). Em GSM é usado o SFH com 217 saltos por segundo [4], em que cada utilizador quando muda de portadora conserva o seu *time-slot*.

O FH é uma técnica que melhora a imunidade a interferências. Assim, o FH é usado para reduzir a influência do desvanecimento de Rayleigh e para criar diversidade de frequência [7]. O móvel, ao saltar de frequência, não permanece no mesmo pico de desvanecimento por muito tempo, reduzindo assim os efeitos do desvanecimento. O FH usa diferentes frequências, que têm diferentes níveis de interferência em diferentes locais e em instantes temporais diferentes. Quando se emprega FH, os efeitos da interferência estão distribuídos pelos canais disponíveis (diversidade de frequência), e consequentemente diminuindo a probabilidade de um utilizador experimentar uma interferência que se torne inaceitável. A qualidade da ligação melhora para móveis a baixa velocidade, mas para velocidades mais elevadas o FH já não é eficiente, pois os picos de desvanecimento também variam mais rapidamente.

Do ponto de vista do melhoramento da interferência co-canal o FH é bastante vantajoso, porque o salto na frequência implica interferências co-canal diferentes em cada salto. Logo, a interferência co-canal não é constante ao longo da ligação.

O SFH pode ser implementado com saltos na frequência de modo cíclico ou aleatório, Fig. 2.10.

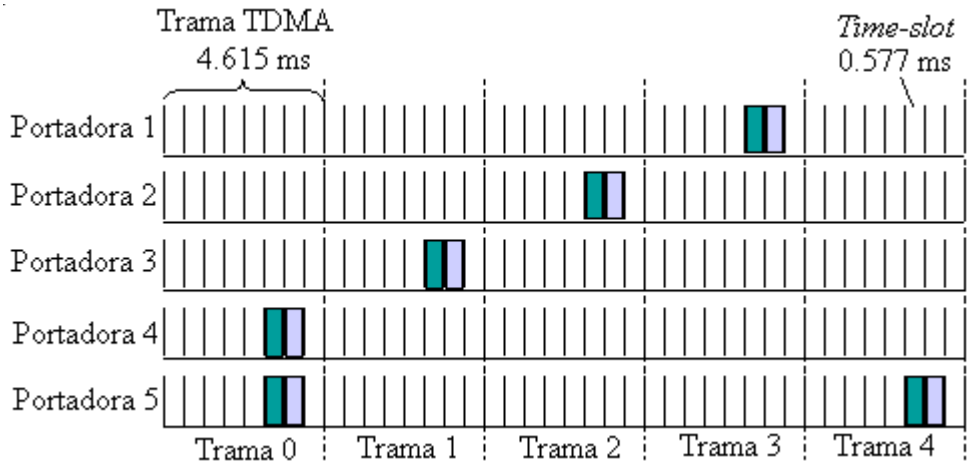


Fig. 2.10 - Exemplo de uma sequência de salto aleatória.

Ao usar o modo cíclico, os saltos são feitos de modo ordenado, ao invés que no modo aleatório a frequência do próximo salto é escolhida aleatoriamente de entre um grupo de frequências disponíveis, usando uma sequência pseudo-aleatória. Uma sequência de saltos aleatória é mais vantajosa, pois evita que dois co-canais interfiram de modo cíclico. Quanto maior for o número de frequências disponíveis para os saltos, melhor será o desempenho do FH. O SFH melhora o C/I, mas não o C/N.

2.4.5.2. Transmissão Descontínua

No uso de transmissão descontínua (DTX) é utilizado um activador de voz no móvel. Quando um utilizador está a falar no seu terminal móvel, o fluxo de palavras não é contínuo e por isso o amplificador de RF do emissor é desligado durante as pausas de conversação. O tempo em que o móvel está realmente a transmitir é diminuído, o que implica que haja uma poupança na potência usada para fazer a transmissão e também que a interferência co-canal seja reduzida. No receptor é introduzido 'ruído suave' para preencher as pausas no discurso do emissor. O factor de activação de voz é geralmente 0.5, o que diminui a carga do sistema para metade [8]. O uso de DTX juntamente com FH melhora significativamente a eficiência espectral em GSM.

2.4.5.3. Inclinação das Antenas

A inclinação da antena (*downtilt*) é útil para controlar o *footprint* (área de terreno coberta pela antena), mas demasiada inclinação degrada a potência recebida pelo móvel. A inclinação do diagrama de radiação permite controlar o alcance de uma estação de base, influenciando assim a interferência co-canal. Uma inclinação para baixo diminui o alcance do diagrama, o que implica que a interferência entre células co-canal é reduzida. A inclinação dos diagramas de radiação pode ser mecânica, através da inclinação da antena, Fig. 2.11, ou eléctrica, através da modificação na fase ou amplitude da corrente que alimenta a antena.

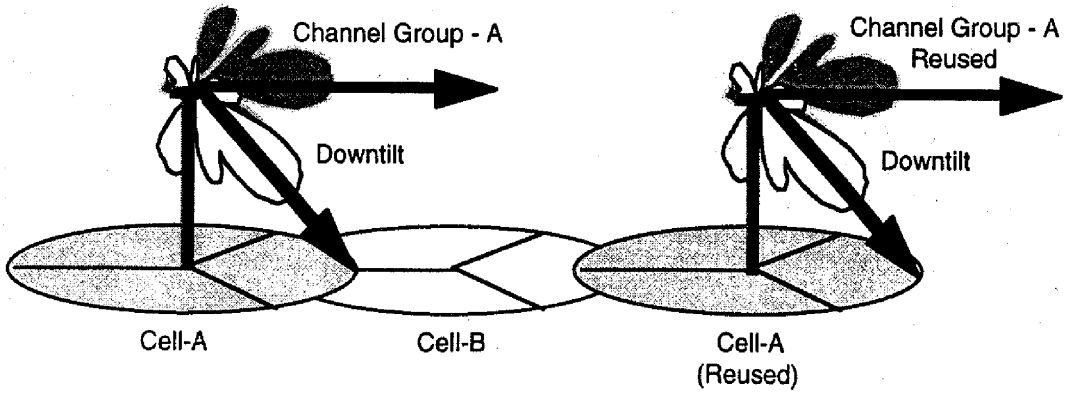


Fig. 2.11 – Inclinação mecânica das antenas (extraído de [1]).

Está também a ser estudado o uso de antenas adaptativas ou inteligentes em redes celulares. Neste caso, o lobo principal de radiação segue o deslocamento do móvel [9].

2.4.5.4. Controlo de Potência

O controlo de potência é usado para controlar a interferência co-canal, reduzindo o nível de potência de saída com o objectivo de atingir uma maior capacidade e melhor qualidade do sistema, para além de reduzir o consumo de energia. Os algoritmos de controlo de potência classificam-se como centralizados e distribuídos. O controlo de potência centralizado é bastante complexo de implementar na prática, porque precisa de ter toda a informação das ligações rádio, como sejam os níveis de potência no sistema. O controlo de potência distribuído usa a informação local para ajustar os níveis de potência. Os esquemas de controlo de potência distribuídos são implementados através de vários algoritmos, entre eles [10] o *distributed balancing (DB)* e *modified distribuited balancing (MDB)*. No algoritmo *DB*, os ajustes de potência feitos pela i-ésima base no instante temporal (k+1) é dado por [10]:

$$P_i^{k+1} = c^k \left(P_i^k + \frac{P_i^k}{\gamma_i^k} \right) \tag{2.36}$$

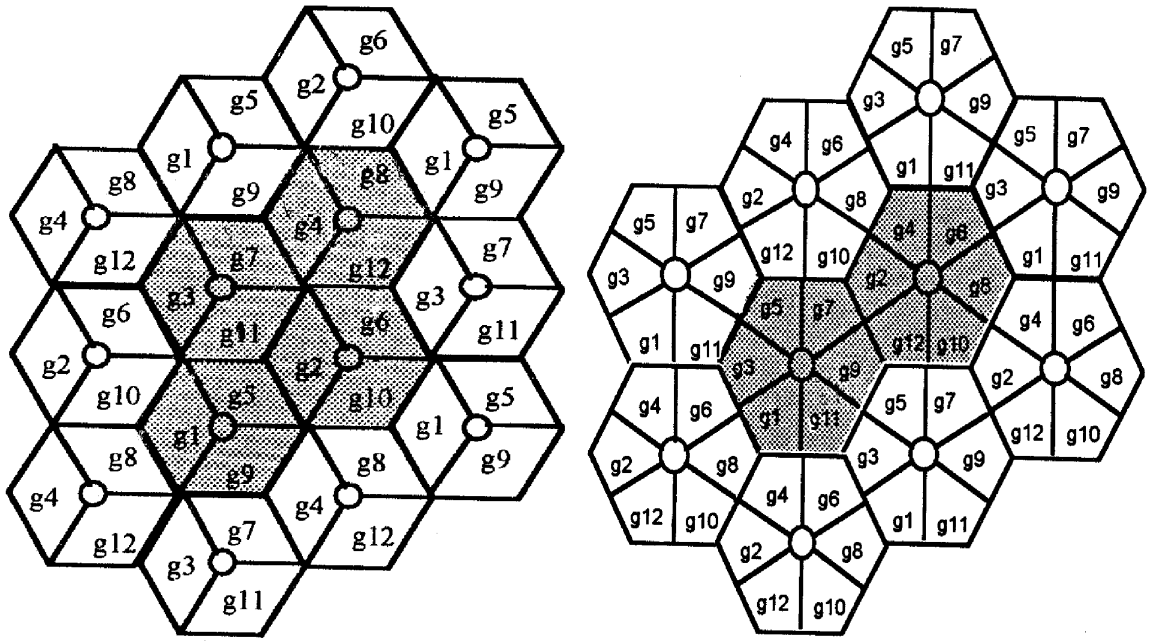
em que P_i^k é a potência transmitida pela estação de base da célula *i* no instante temporal *k*, sendo γ_i^k o correspondente C/I e *c* um factor de proporcionalidade positivo. O algoritmo *MDB* é uma versão melhorada do algoritmo *DB*, em que as potências transmitidas são adaptadas de acordo com a interferência observada.

2.4.5.5. Uso de Novos Padrões Celulares

2.4.5.5.1. Plano de Reutilização de Frequências 2x6

Um novo plano de reutilização de frequências 2x6 [11] (padrão de duas células com seis sectores cada) apresenta vantagens, no que diz respeito à interferência, em relação ao tradicional plano 4x3 (padrão de quatro células de três sectores cada) usado no sistema GSM. Isso é conseguido através de uma atribuição óptima de frequências, com uso de sectorização e de antenas com um diagrama de radiação bem definida.

Este padrão celular é composto por duas células com seis sectores cada, Fig. 2.12, o que reduz bastante a ACI. Contudo, a distância de reutilização diminui de 3R para $\sqrt{3}$ R, o que pode ser ultrapassado se forem usadas antenas com largura de feixe estreita, inclinação eléctrica do feixe e redução dos lobos secundários.



(a) Plano tradicional 4x3 (b) Plano 2x6

Fig. 2.12 – Plano de reutilização de frequências (extraído de [11]).

Com este padrão de 2x6 é possível aumentar teoricamente em 100% a capacidade, quando comparando com o padrão de 4x3. Estudos já efectuados [11] demonstram que existe um aumento da capacidade e uma redução da ACI, quer devido ao uso de sectorização, quer também ao uso de antenas anteriormente já descritas.

2.4.5.5.2. Plano de Reutilização Fraccional de Frequências

O modelo de planeamento celular clássico assegura uma distância de reutilização onde a interferência co-canal é aceitável, mantendo a capacidade do sistema elevada. Através da sectorização o desempenho do sistema é melhorado. O modelo de plano de reutilização fraccional de frequências proposto [12] permite optimizar o desempenho da sectorização, conseguindo melhorar ainda mais a relação C/I com aumento da capacidade.

Considera-se como exemplo padrão sectorizado N_{cg}=7 (embora este não seja o sistema usado em GSM, o sistema proposto permite tirar algumas conclusões). Este plano consiste em agrupar as frequências disponíveis em 16 grupos ou múltiplos de 16 grupos de frequências, atribuindo frequências diferentes a cada sector do grupo. Os grupos de frequências são reutilizados, de tal forma que a primeira utilização de um grupo de frequências e a sua segunda e terceira reutilização, apontam cada uma costas com costas, formando uma estrutura em triângulo, Fig.2.13.

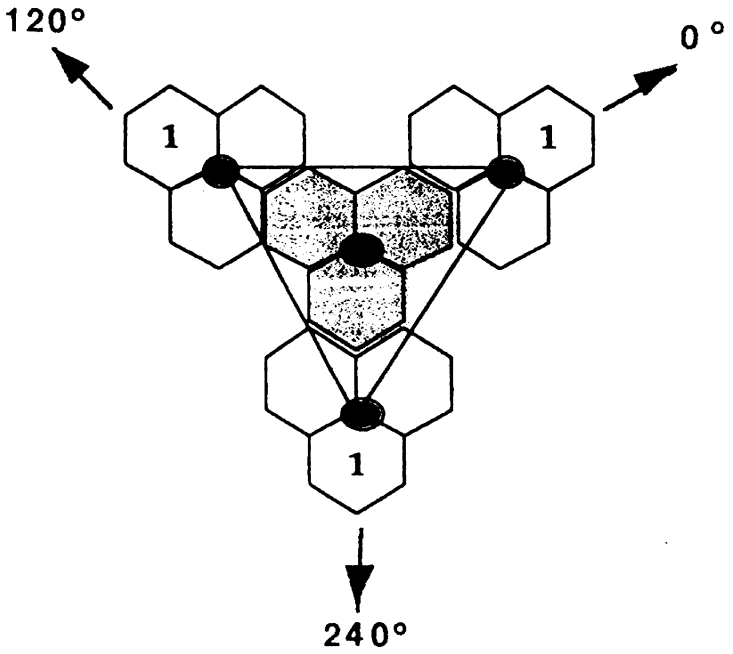


Fig. 2.13 - Plano de reutilização fraccional de frequências (Extraído de [12]).

Com a utilização de antenas directivas em cada sector, a reutilização da frequência adjacente do triângulo aponta numa direcção diferente. Eventualmente, esta configuração permite reduzir os interferentes a dois.

O padrão celular resultante consiste num padrão N_{cg}=5.333, onde os grupos de frequências são distribuídos igualmente pelos sectores numa matriz 4×4, através da sequência mostrada na Fig. 2.14. Nas duas primeiras linhas de cada matriz alternam grupos de frequências ímpar, enquanto que nas duas últimas linhas alternam grupos de frequência pares.

1	3	5	7
18	11	13	15
2	4	6	8
10	12	14	16

1	3	5	7
18	11	13	15
2	4	6	8
10	12	14	16

1	3	5	7
18	11	13	15
2	4	6	8
10	12	14	16

1	3	5	7
18	11	13	15
2	4	6	8
10	12	14	16

Fig. 2.14 – Distribuição dos grupos de frequência (Extraído de [12]).

A atribuição dos grupos de frequências a cada sector é de acordo com a Fig. 2.15.

Nesta figura pode visualizar-se que a reutilização de um grupo de frequências gera uma formação triangular costas com costas, reduzindo assim a interferência.

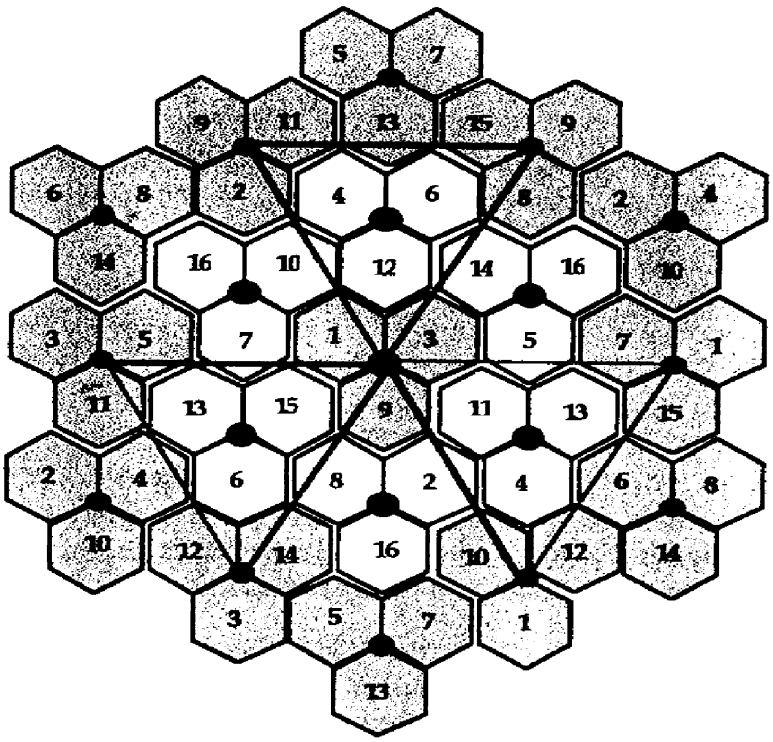


Fig. 2.15 - Atribuição de grupos de frequências a cada sector no plano de Reutilização Fraccional de Frequências (Extraído de [12])

Obtém-se para a relação C/I um valor de [12]:

$$\frac{C}{I} \approx 10\log\left[\frac{1}{2}\left(\frac{D}{R}\right)^{\gamma}\right] + \Delta dB \approx 21dB \tag{2.37}$$

em que ΔdB é devido ao uso de antenas costas com costas. Tem-se, então, para a distância de reutilização entre canais adjacentes interferentes [12]:

$$\frac{D}{R} = \sqrt{3 \cdot 5.333} \approx 4 \tag{2.38}$$

A interferência co-canal pode ainda ser reduzida usando antenas com ganho elevados, de forma a aumentar a sua relação frente-trás.

2.4.5.5.3. Planeamento de frequências por multi-camada *'Underlay-Overlay'*

As técnicas convencionais de planeamento de frequências, permitem apenas que seja utilizado um único factor de reutilização de frequências em todo o sistema. Este factor de reutilização é determinado com base no desempenho de um utilizador na fronteira da célula. Portanto, este esquema não aproveita o facto de os utilizadores mais próximos da estação de

base terem um nível de sinal mais forte. Os sistemas *'Underlay-Overlay'* (UO) para TDMA (*Time Division Multiple Access*) aproveitam este facto.

No UO, os canais de frequência são divididos em dois grupos a que correspondem duas camadas de células, umas mais pequenas e outras maiores, Fig. 2.16.

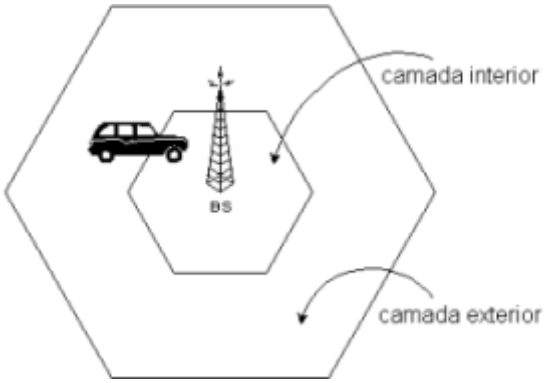


Fig. 2.16 - Sistema *'Underlay-Overlay'* .

Vão existir diferentes distâncias de reutilização, a que correspondem limiares de interferência co-canal diferentes. A divisão de células é feita com base na relação C/I média recebida pelos móveis. Às células mais pequenas são atribuídos canais de frequência mais apertados, onde a relação C/I é assegurada. Ao ter reutilizações diferentes, a distância de reutilização média diminui e a capacidade do sistema pode aumentar. O uso de FH com UO é desenvolvido em [13].

Em GSM, os móveis têm disponíveis os seis sinais recebidos de maior potência, que correspondem provavelmente às seis estações de base mais próximas. Portanto, no UO, a camada interior (células mais pequenas) apenas pode ter uma razão de reutilização de 1 [14]. Assim sendo, pode servir-se adequadamente 63% do tráfego nestas camadas. É demonstrado que se consegue um melhoramento da capacidade do sistema em 25-40%.

2.4.5.5.4. Reutilização Múltipla de Padrões

A reutilização múltipla de padrões (MRP) é utilizada para atingir maiores capacidades, através de uma reutilização apertada de frequências em combinação com FH. O MRP utiliza padrões de reutilização diferentes, com distâncias de reutilização distintas, usando o FH para combinar esses padrões num padrão de reutilização intermédio, alcançando assim um equilíbrio entre a capacidade desejada para satisfazer o crescente número de utilizadores e a qualidade necessária para manter uma boa ligação .

As portadoras existentes vão ser distribuídas pelos planos de reutilização desejados. É muito importante que as frequências do BCCH sejam planeadas de forma a estarem

protegidas da interferência, que iria influenciar negativamente a decisão na escolha das células, acesso e *paging*. Por isso, o planeamento dos BCCHs deve ser feito num padrão de reutilização mais elevado.

Se, por exemplo, forem utilizados dois padrões de reutilização diferentes, N e $(N-1)$, o número de canais de tráfego por célula, N_{ct} é [15]:

$$N_{ct} = N_N + N_{N-1} \tag{2.39}$$

onde N_N e N_{N-1} são respectivamente o número de canais com razão de reutilização N e $(N-1)$.

O número total de canais disponíveis é:

$$M = NN_N + (N-1)N_{N-1} \tag{2.40}$$

Assim, a probabilidade de usar canais de um padrão de reutilização, N ou N-1, é dado por:

$$P(N) = \frac{N_N}{N_N + N_{N-1}} = 1 - P(N-1) \tag{2.41}$$

A vantagem do MRP é que pode ser implementado com um plano de frequências mais apertado e ter assim mais portadoras disponíveis (mais capacidade), ao mesmo tempo que o C/I se mantém em níveis aceitáveis.

É de notar que o MRP não precisa de ser aplicada a toda a rede. Pode ser aplicado apenas nas zonas em que se pretende aumentar a capacidade do sistema.

3. ANÁLISE DE MÉTODOS DE PLANEAMENTO CELULAR

3.1. Introdução

Pretende-se implementar a nível de programação alguns dos métodos de planeamento celular estudados no capítulo anterior, tais como: mudança de padrão de reutilização, uso de sectorização, *frequency hopping* (FH) e reutilização múltipla de padrões (MRP). Optou-se por não avaliar o desempenho dos seguintes métodos:

- Plano de reutilização de frequências 2×6; é uma técnica que não é utilizada em redes reais, porque implica o uso de antenas muito directivas.

- Plano de reutilização fraccional de frequências; é uma técnica que apenas pode ser utilizada com o padrão de reutilização 7, que não é usado no GSM. É um método que pretende optimizar o desempenho da sectorização e consiste em criar um conjunto de grupos de tricélulas, em que 7 dos grupos de tricélulas são formados num padrão celular, em que é explorada uma boa relação frente-trás das antenas, de forma a isolar uma frequência repetida. Com o padrão 4×3 não é possível distribuir as frequências de modo a garantir esse isolamento.

- O planeamento de frequências por multi-camada também não vai ser simulado, por ser uma técnica não muito utilizada em redes reais e de difícil implementação. As operadoras preferem utilizar micro-células em zonas onde existe muito tráfego.

Para fazer a análise dos métodos referidos criou-se um simulador em MATLAB que simula de maneira simples uma rede celular, usando em alguns casos dados da operadora Telecel. Nesta simulação assume-se que os utilizadores estão estáticos, sem evolução da sua posição ou estado, o que implica que não se contabilizam os efeitos do deslocamento e da velocidade no sinal recebido pelo móvel, tendo este um nível constante durante a ligação. Como consequência de não haver movimento, não existem *handovers* e o tráfego na célula é constante. Escolheu analisar-se a interferência na ligação descendente, pois esta é mais limitativa que a ligação ascendente, onde existe a possibilidade de usar diversidade espacial e assim melhorar o sinal recebido. Considerou-se que o sistema é limitado pela interferência co-canal, desprezando-se a influência da interferência de canal adjacente e de ruído. Para o cálculo da interferência co-canal assumiu-se também que as estações de base estão sincronizadas. Estando todas as tramas transmitidas pelas estações de base em sincronismo, pode-se desprezar o atraso de propagação entre as estações de base e o móvel. Assim, um

utilizador que use um determinado *time-slot* de uma trama, apenas possa interferir com um utilizador de outra estação no mesmo *time-slot*, na mesma frequência. Também se considera que todas as antenas estão no mesmo plano horizontal e que não existe variação do ganho da antena no plano vertical, evitando assim tri-dimensionalizar o mapa.

3.2. Descrição do Programa

Antes de começar a simulação existe um conjunto de dados iniciais que é preciso definir, Tab. 3.1. Como se vai considerar um ambiente urbano, escolheu-se para o raio das células, R, o valor de 1 km, que é típico para grandes micro-células. Para a altura da estação de base, h_{be}, altura do móvel, h_m, potência de emissão da estação de base, P_E, ganho de recepção do móvel, G_R, escolheram-se também valores típicos. Para o número de células por grupo, N_{cg}, pode optar-se por 3 ou 4 células, enquanto que o número de sectores na célula, N_{sc}, é de 3 quando se está a usar células sectorizadas. Considerou-se ainda uma densidade de 30 utilizadores por célula, distribuídos uniformemente por toda a área da célula e também um total de 40 frequências disponíveis no sistema, N_{fs}, que é o valor usado em Portugal por cada operadora. Assim, no padrão N_{cg}=4, a cada célula são atribuídas 10 frequências. No padrão N_{cg}=3, para fazer a distribuição de todas as portadoras disponíveis existem 2 células com 13 frequências e uma célula com 14 frequências. Quando se usa sectorização no padrão N_{cg}=4, dois sectores ficam com 3 frequências e um com 4. No padrão N_{cg}=3, a distribuição das frequências é: 4, 4, 5 ou 4, 5, 5 consoante o número de portadoras disponíveis na célula. Em relação ao número de anéis de interferência, N_{ai}, pode escolher-se entre um, dois ou três anéis para o cálculo da relação C/I. Existe também, a possibilidade de escolher o número de padrões celulares da rede. O padrão inicial é repetido na horizontal e na vertical formando a área de análise desejada, sendo N_h e N_v respectivamente o número de padrões na horizontal e na vertical.

R [km]	h_{be} [m]	h_m [m]	P_E [dBW]	G_R [dBi]	N_{cg}	N_{sc}	N_u / célula	N_{fs}	N_{ai}	N_h x N_v
1	30	1.8	10	0	3 ou 4	3	30	40	1, 2, 3	5 x 5

Tab. 3.1 - Dados iniciais para o programa.

O programa tem como parâmetro de saída a relação C/I para a condição actual do móvel no sistema e para o pior caso (onde existem seis células interferentes activas).

Para o cálculo da relação C/I é preciso determinar a potência recebida [2]:

$$P_{R\,[\mathrm{dBm}]} = P_{E\,[\mathrm{dBm}]} + G_{E\,[\mathrm{dBi}]} + G_{R\,[\mathrm{dBi}]} - L_{p\,[\mathrm{dB}]}$$

(3.1)

em que G_E é o ganho da antena de emissão na direcção do móvel e L_p a atenuação de propagação. A relação portadora-interferência é calculada através do valor da potência recebida pelo móvel da estação de base a que está ligado e das potências das estações co-canal activas, N_{act}:

$$(C/I)_{[\mathrm{dB}]} = C_{[\mathrm{dBm}]} - \left(\sum_{n=1}^{N_{act}} I_n \right)_{[\mathrm{dBm}]} \tag{3.2}$$

com N_{act} = 0,1,...,6.

A estrutura do programa está ilustrada na Fig. 3.1. A partir de um conjunto de dados iniciais é construído um mapa de estações de base e é feita a distribuição dos utilizadores pelas células. A seguir é feita a escolha das antenas e a atribuição de frequências para o cálculo da potência recebida e do respectivo C/I, com base nos interferentes co-canal activos.

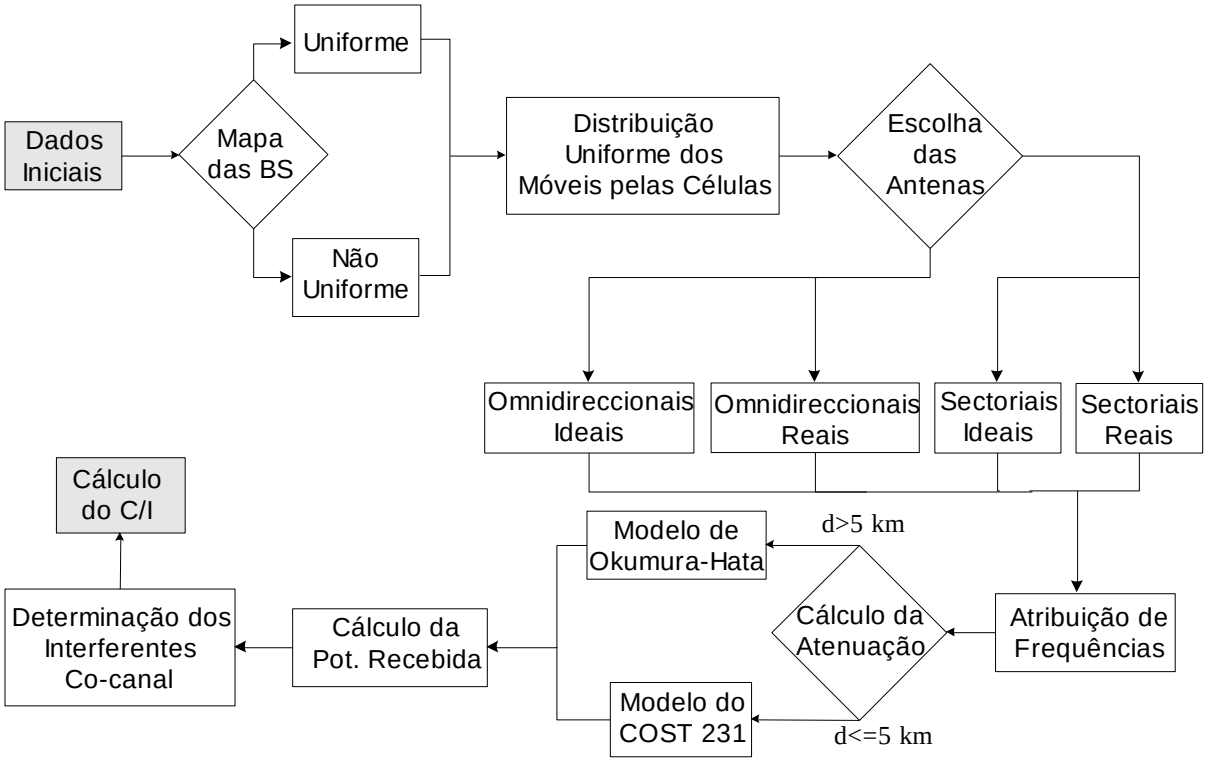


Fig. 3.1 - Estrutura do programa de simulação.

3.3. Mapa das Estações de Base

O mapa com as estações de base pode ser gerado uniformemente, Fig. 3.2, ou ser carregado de um ficheiro, em que as posições das estações de base podem não ser uniformes.

Como o objectivo é analisar e comparar vários modelos de planeamento, há a necessidade de criar uma rede uniforme em que a qualidade do sinal recebido não depende da estação de base a que o móvel está ligado. Assim, pode comparar-se os resultados obtidos de diferentes simulações para as mesmas condições.

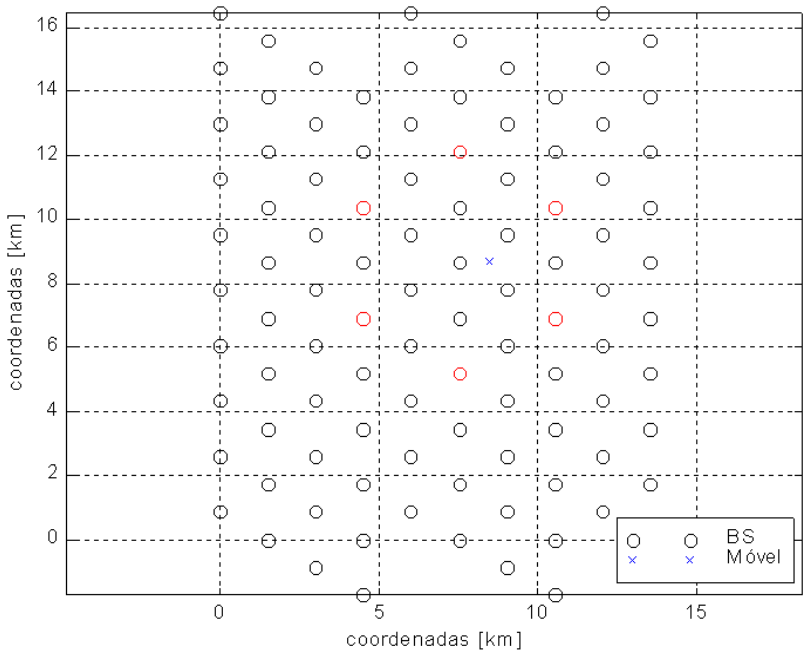
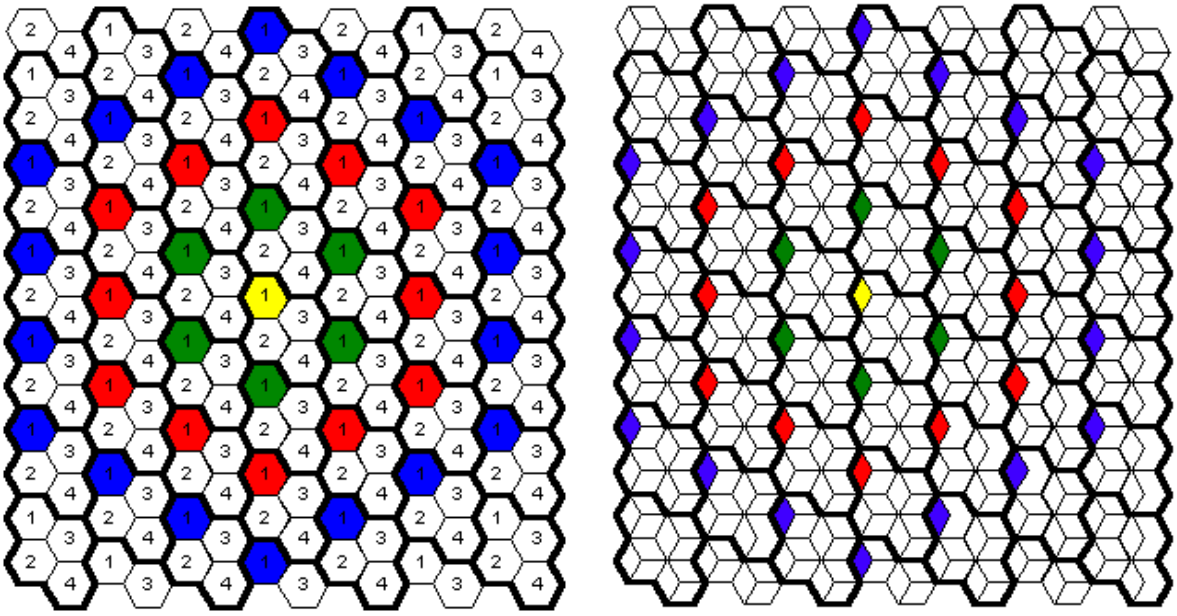


Fig. 3.2 - Mapa uniforme de estações de base, R=1km.

Na rede uniforme gerada, todas as estações de base têm as mesmas características e estão colocadas à mesma distância umas das outras. As células têm todas a mesma dimensão. A distribuição das estações de base, Fig. 3.2, é feita com base numa grelha de hexágonos, habitualmente usada para fazer o planeamento celular inicial, Fig. 3.3.



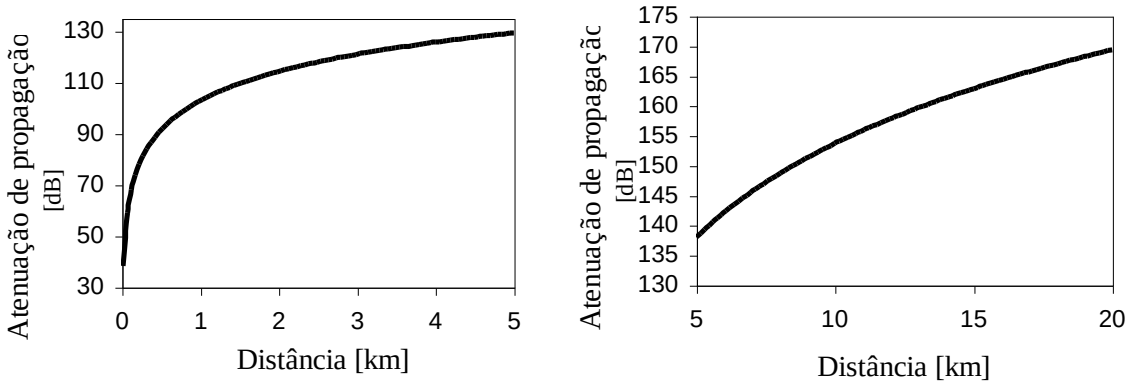
(a) omnidireccionais (b) sectoriais

Fig. 3.3 - Mapa de células hexagonais para o planeamento.

Na Fig. 3.3 pode ver-se a localização dos três anéis de interferência co-canal (cada um com cor diferente) que vão influenciar a relação C/I.

3.4. Modelos de Propagação

Para o cálculo da atenuação de propagação é usado o modelo do COST 231-Walfisch-Ikegami [2] para distâncias base-móvel no intervalo [0.02, 5] km e o modelo de Okumura-Hata para distâncias em [5, 20] km, usando respectivamente (2.8) e (2.4). A Fig. 3.4 mostra os valores da atenuação de propagação em função da distância.



(a) COST231 (b) Okumura-Hata

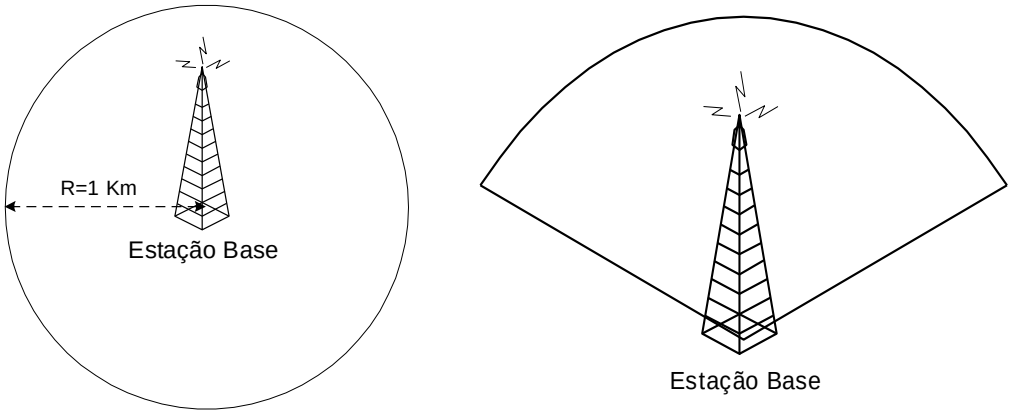
Fig. 3.4 - Atenuação de propagação.

No modelo de Okumura-Hata considerou-se o caso de cidades grandes para uma banda de frequências de [400, 1500] MHz e o caso de centros urbanos na banda dos [1500, 2000] MHz. No modelo do COST 231 considerou-se não haver linha de vista na banda de [800, 2000] MHz. Admitiu-se o caso típico de centros urbanos, com a antena acima do topo dos edifícios e também w_B=30m, H_B=3, Φ=90º. Sendo assim, o índice de decaimento de potência tem o valor de 3.8. Para o cálculo da atenuação de propagação do móvel e dos interferentes do primeiro anel, o modelo usado foi o do COST 231, pois as distâncias são inferiores a 5 km. Se escolhesse-mos mais que um anel de interferência era usado o modelo de Okumura-Hata para o cálculo da atenuação de propagação dos interferentes.

3.5. Antenas

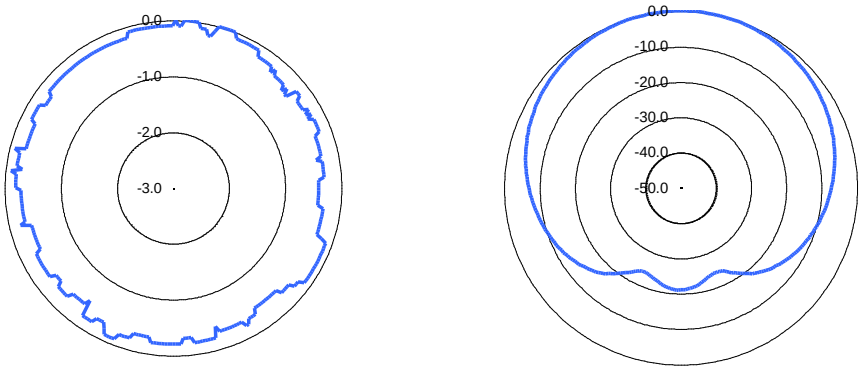
Numa rede real, as antenas têm diagramas de radiação que se afastam dos diagramas ideais, o que vai influenciar os resultados. No caso das antenas sectoriais este aspecto é mais

problemático, pois o diagrama de radiação do sector não se confina à cobertura prevista e consequentemente a interferência aumenta. Por isso, é interessante simular os casos ideais e reais e compará-los. Foram efectuadas simulações com diferentes tipos de antenas omnidireccionais e sectoriais. As antenas ideais usadas têm os diagramas de radiação da Fig. 3.5 e para as antenas reais os diagramas de radiação foram fornecidos pela Telecel, Fig. 3.6 e Anexo A. As antenas BCD8707 (O-R1) e DB58E-YY (O-R2) são omnidireccionais e têm um ganho de 9 e 6 dBd respectivamente. As antenas 739623 (S-R60), 739655 (S-R90) e 730374 (S-R120) têm respectivamente 60º, 90º e 120º de abertura horizontal e 14.9, 13.4 e 11 dBd de ganho. A antena 130941.0025 (S-R120d) tem 120º de abertura horizontal e *downtilt* eléctrico no plano vertical, com ganho de 14.5 dBd. As antenas são válidas para a banda dos 900MHz.



(a) Omnidireccionais (b) Sectoriais

Fig. 3.5 - Diagramas de radiação ideais.



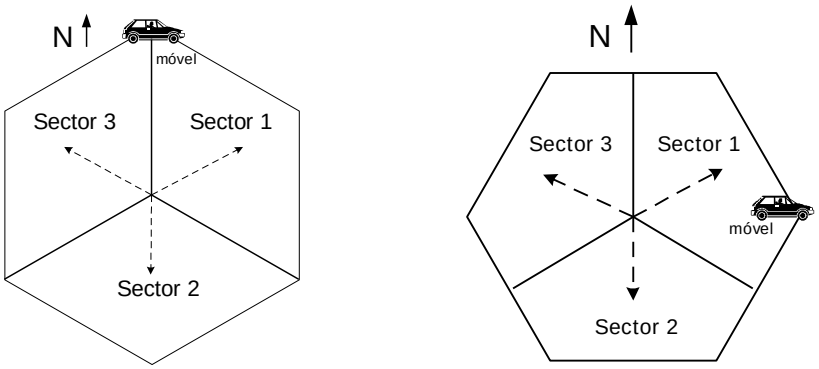
(a) O-R1 (b) S-R120

Fig. 3.6 - Diagramas de radiação reais.

3.6. Sectorização

Quando é usada a sectorização com as antenas e diagramas de radiação das Figs. 3.5 (b) e 3.6 (b) a orientação das células é feita como indicado na Fig. 3.7.

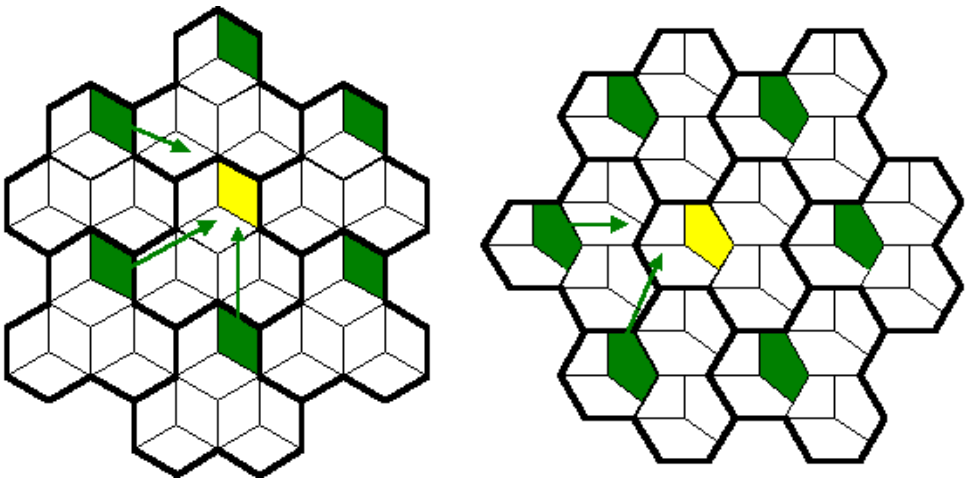
Os máximos de radiação dos sectores 1, 2 e 3 estão orientados segundo as direcções de 60º, 180º e 300º respectivamente. No plano teórico, estas duas configurações têm diferentes número de interferentes.



(a) móvel a 0º (b) móvel a 90º

Fig. 3.7 - Orientação das células.

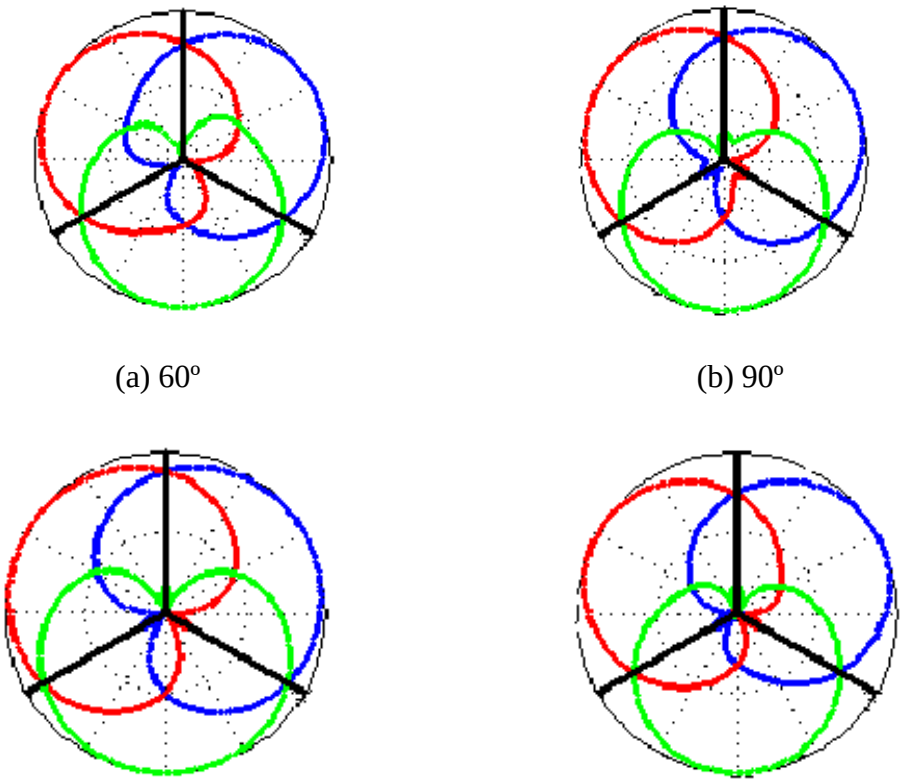
No primeiro caso (Fig. 3.8 (a)) o número máximo de interferentes é três, enquanto que no segundo caso (Fig. 3.8 (b)) tem-se uma diferente orientação das células, o número máximo de interferentes é dois. Com antenas reais, não se pode fazer esta análise já que o diagrama de radiação não é nulo fora dos 120º do sector e todos os interferentes são contabilizados.



(a) 3 interferentes (b) 2 interferentes

Fig. 3.8 - Influência da orientação dos sectores no nº de interferentes.

O uso de sectorização provoca sobreposição dos diagramas de radiação entre os sectores, causando problemas de interferência que não existem com diagramas ideais, Fig. 3.9.



(a) 60º (b) 90º

(c) 120º (d) 120º c/ *downtilt*

Fig. 3.9 - Sobreposição dos diagramas de radiação para várias aberturas horizontais.

Além disso, se o sistema não estiver bem dimensionado, quando o móvel se encontra numa zona onde existe uma grande sobreposição dos diagramas, vai receber um sinal forte de ambos os sectores, provocando *handovers* com muita frequência, o que carrega o sistema. Como se pode ver, Fig. 3.9, a maior sobreposição dos diagramas ocorre para a antena de 120º, mas em contrapartida existe uma melhor cobertura na fronteira dos sectores em zonas afastadas da BS. As antenas de 60º e 120º c/*downtilt* têm uma área de cobertura pior que as de 90º e 120º, mas também provocam menor interferência.

3.7. Atribuição de Frequências e Canais

Para distribuir as portadoras disponíveis por um grupo de células, no caso de antenas omnidireccionais, usa-se a expressão [2]:

$$f_{ij} = i + N_{cg}\,(j\text{-}1) \tag{3.3}$$

com i=1,..., N_{cg} e j=1,..., N_{fc} . Para o caso das antenas sectoriais a expressão altera-se [2]:

$$f_{ij} = i + N_{cg}\,(k\text{-}1) + N_{sc}\,N_{cg}\,(j\text{-}1) \tag{3.4}$$

com i=1,..., N_{cg}; j=1,..., N_{fc} e k=1,..., N_{sc}. As portadoras vão sendo distribuídas uma por cada célula ou uma por cada sector, no caso de existir sectorização. A banda utilizada é a dos 900 MHz, estando a primeira portadora atribuída em 935 MHz (banda descendente) e as outras deslocadas de 200 kHz (largura de banda de um canal em GSM). A cada móvel será atribuída uma portadora e um *time-slot*. Esta atribuição é feita de modo aleatório, com distribuição uniforme, tanto para a portadora como para o *time-slot*.

3.8. Descrição da implementação do FH

Pretende-se nesta subsecção introduzir o método do *slow frequency hopping* no modelo de simulação desenvolvido anteriormente. Nas condições das simulações anteriores o utilizador conserva sempre a mesma portadora e o mesmo *time-slot* ao longo de toda a chamada. Com a introdução do FH no sistema vai haver uma mudança de frequência em cada 4.615 ms (duração da trama em GSM) por cada utilizador, provocando a variação do valor da interferência co-canal durante a duração de cada chamada. Na implementação do FH admite-se que a sequência de saltos de frequência é efectuada de uma forma aleatória. Na simulação considera-se que o *time-slot* permanece constante durante a chamada, enquanto o móvel salta entre as portadoras disponíveis.

Tal como no caso anterior, continua-se a admitir que todos os móveis em todas as células do sistema iniciam e finalizam as suas chamadas no mesmo instante, com um tráfego médio de cada móvel de 25 mErl, o que corresponde a ter um tempo médio por cada chamada de 90 s. Assim, cada utilizador irá experimentar um total de 19530 saltos de frequência durante uma chamada.

3.9. Descrição da Implementação da Reutilização Múltipla de Padrões

O objectivo ao implementar a reutilização múltipla de padrões, é o de aproveitar os benefícios das técnicas implementadas anteriormente. Em cada célula vão existir dois padrões de reutilização diferentes: N_{cg}=4 e N_{cg}=3, sendo estes combinados de forma a criar um padrão de reutilização intermédio, através de FH. Pretende-se assim aumentar o número de canais do sistema sem provocar uma grande degradação do sinal. O FH é implementado da mesma forma, como descrito anteriormente.

Na implementação do MRP, fez-se a atribuição das 40 portadoras disponíveis aos planos de reutilização de N_{cg}=4 e N_{cg}=3, sendo estas distribuídas do seguinte modo:

1. 40 portadoras para N_{cg}=4 e 0 portadoras para N_{cg}=3

2. 28 portadoras para N_{cg}=4 e 12 portadoras para N_{cg}=3

3. 16 portadoras para N_{cg}=4 e 24 portadoras para N_{cg}=3

4. 0 portadoras para N_{cg}=4 e 40 portadoras para N_{cg}=3

A Fig. 3.10 representa a distribuição dos canais para o terceiro caso. A atribuição das portadoras pelas células é feita como anteriormente descrito. Cada célula fica com um total de 12 portadoras: 4 para o plano N_{cg}=4, que corresponde a 16 portadoras disponíveis para este plano, a dividir por 4 células; 8 para o plano N_{cg}=3, que corresponde a 24 portadoras disponíveis para este plano, a dividir por 3 células.

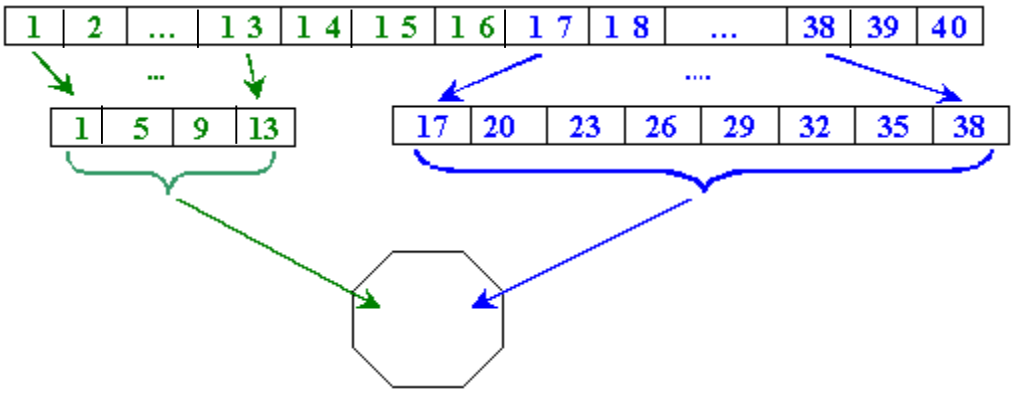


Fig. 3.10 - Atribuição das portadoras no método MRP para o terceiro caso.

4. RESULTADOS OBTIDOS

4.1. Anéis de Interferência

Começou-se por estudar a influência dos vários anéis de interferência co-canal na relação C/I, Fig. 4.1. Os resultados correspondem ao C/I para antenas omnidireccionais, N_{cg}=4, com o móvel na fronteira da célula. O primeiro anel de interferência contribui com seis possíveis interferentes, o segundo anel com doze e o terceiro com dezoito, Fig. 3.3.

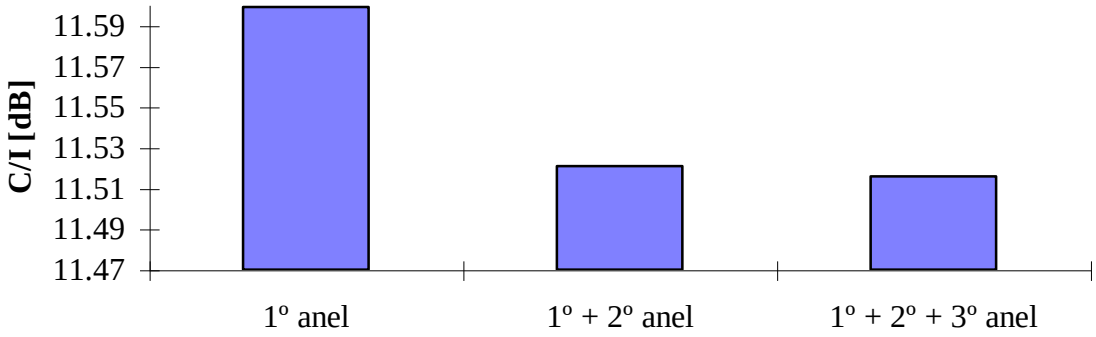


Fig. 4.1 - Influência dos anéis de interferência na relação C/I.

Como se pode visualizar na Fig. 4.1, o segundo e terceiro anel não contribuem significativamente para a interferência total, pois a degradação no C/I é de apenas 0.05 dB. Isto deve-se ao facto de os interferentes estarem tão afastados do móvel que a sua contribuição para a interferência total é desprezável. Por isso optou-se em fazer as simulações contabilizando apenas o primeiro anel de interferência co-canal.

4.2. Variação do C/I com o Número de Interferentes

O C/I varia com o número de interferentes co-canal activos, Fig. 4.2. Os resultados apresentados são para antenas omnidireccionais, N_{cg}=4, com o móvel na fronteira da célula.

Com o aumento do número de interferentes activos o C/I vai ser menor e no caso de não haver nenhum interferente activo a relação C/I é infinita, pois a soma da potência dos interferentes é nula. Durante as simulações houve casos em que o resultado obtido para a relação C/I foi infinito. Esses casos não foram contabilizados para o cálculo do C/I médio.

Como se pode ver na Fig. 4.2., o C/I sofre uma degradação de aproximadamente 4.2 dB, desde o caso em que existe apenas um interferente activos, até ao caso em que todos os seis interferentes estão activos.

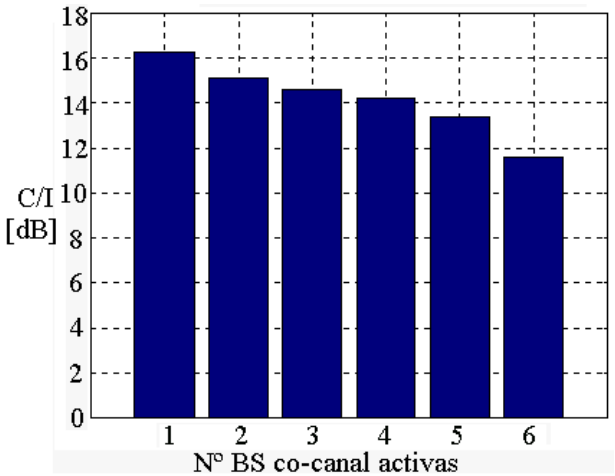


Fig. 4.2 - C/I em função do número de estações interferentes activas.

4.3. Variação do C/I com as Antenas

Para as simulações consideraram-se dois tipos de antenas: omnidireccionais (ideais e reais) e sectoriais (ideais e reais). Foram simulados dois padrões celulares: N_{cg}=4 e N_{cg}=3. Os resultados obtidos para o plano de N_{cg}=4, para antenas omnidireccionais são mostrados na Tab. 4.1 e para antenas sectoriais na Tab. 4.2. Para o plano N_{cg}=3 são mostrados os resultados na Tab. 4.3 para antenas omnidireccionais e na Tab. 4.4 para antenas sectoriais. Foram feitas várias simulações para diferentes posições do móvel. Considerou-se o móvel em quatro posições: no limite da célula, numa distância média entre o centro e o limite da célula, junto à estação de base e aparecendo aleatoriamente em qualquer posição da célula, com distribuição uniforme.

Nas Tabs. 4.1 a 4.4 são indicados o C/I médio que corresponde à média aritmética dos resultados de cem simulações, o desvio padrão (σ) e os resultados para o pior caso de estarem seis interferentes activos. Nestas simulações as células têm a orientação indicada na Fig. 3.7 (a), estando o móvel fixo a 0º (centro, distância média e limite da célula) ou em qualquer posição da célula (aleatório). Os resultados completos das simulações para N_{cg}=4 e N_{cg}=3 encontram-se nos Anexos B e C, versão 1. Em anexo são também apresentados os valores de máximo e mínimo do C/I para todos estes casos.

	Centro	Meio	Limite	Aleatório
$\overline{C/I}$ [dB]	68.41	27.88	16.65	30.98
σ [dB]	2.09	2.43	3.34	12.30
$\overline{C/I}$ [dB] pior caso	64.04	23.33	11.60	27.40

(a) O-I

	Centro	Meio	Limite	Aleatório		Centro	Meio	Limite	Aleatório
$\overline{C/I}$ [dB]	68.25	27.57	16.28	32.22		68.46	27.78	16.30	32.35
σ [dB]	2.01	2.29	3.14	12.67		2.03	2.30	3.16	13.82
$\overline{C/I}$ [dB] pior caso	63.99	23.14	11.41	27.32		64.04	23.33	11.60	28.08

(b) O-R1 (c) O-R2

Tab. 4.1 - Antenas omnidireccionais, N_{cg}=4.

	Centro	Meio	Limite	Aleatório
$\overline{C/I}$ [dB]	70.65	31.84	22.45	37.98
σ [dB]	1.67	1.99	2.33	14.22
$\overline{C/I}$ [dB] pior caso	67.20	28.01	18.36	33.18

(a) S-I

	Centro	Meio	Limite	Aleatório		Centro	Meio	Limite	Aleatório
$\overline{C/I}$ [dB]	80.27	37.37	26.56	42.55		79.38	37.39	26.29	39.18
σ [dB]	9.96	8.74	7.54	19.14		7.93	6.51	5.30	14.48
$\overline{C/I}$ [dB] pior caso	71.06	29.29	19.32	34.13		69.91	29.04	18.85	32.13

(b) S-R60 (c) S-R90

	Centro	Meio	Limite	Aleatório		Centro	Meio	Limite	Aleatório
$\overline{C/I}$ [dB]	76.26	35.10	24.15	36.54		80.92	37.83	26.98	45.40
σ [dB]	6.22	5.17	4.50	14.02		9.41	8.17	7.072	20.99
$\overline{C/I}$ [dB] pior caso	68.66	28.31	17.85	30.48		70.98	29.14	19.20	36.61

(d) S-R120 (e) S-R120d

Tab. 4.2 - Antenas sectoriais, N_{cg}=4.

	Centro	Meio	Limite	Aleatório
$\overline{C/I}$ [dB]	66.78	26.42	14.05	30.84
σ [dB]	1.97	2.53	4.01	13.10
$\overline{C/I}$ [dB] pior caso	61.52	21.35	8.69	24.98

(a) O-I

	Centro	Meio	Limite	Aleatório		Centro	Meio	Limite	Aleatório
$\overline{C/I}$ [dB]	66.71	26.80	15.00	29.31		66.78	26.85	15.02	32.42
σ [dB]	1.92	2.41	3.84	12.75		2.12	2.62	4.04	15.31
$\overline{C/I}$ [dB] pior caso	61.62	21.46	8.83	23.52		61.52	21.35	8.69	26.25

(b) O-R1 (c) O-R2

Tab. 4.3 - Antenas omnidireccionais, N_{cg}=3

	Centro	Meio	Limite	Aleatório
$\overline{C/I}$ [dB]	68.13	29.10	18.54	34.45
σ [dB]	1.66	2.20	3.18	12.67
$\overline{C/I}$ [dB] pior caso	64.62	25.42	14.41	29.85

(a) S-I

	Centro	Meio	Limite	Aleatório		Centro	Meio	Limite	Aleatório
$\overline{C/I}$ [dB]	69.46	29.63	17.92	41.40		69.79	30.09	18.73	40.83
σ [dB]	11.24	10.53	9.85	19.37		7.03	6.42	6.32	17.61
$\overline{C/I}$ [dB] pior caso	58.62	19.59	8.23	30.60		61.89	25.52	11.01	31.94

(b) S-R60 (c) S-R90

	Centro	Meio	Limite	Aleatório		Centro	Meio	Limite	Aleatório
$\overline{C/I}$ [dB]	70.02	30.14	18.56	37.03		70.12	30.13	18.62	40.75
σ [dB]	5.78	5.42	5.70	15.93		9.94	9.37	9.54	15.59
$\overline{C/I}$ [dB] pior caso	63.12	23.62	11.99	30.53		59.64	20.58	9.24	30.89

(d) S-R120 (e) S-R120d

Tab. 4.4 - Antenas sectoriais, N_{cg}=3, com a orientação dos sectores da Fig. 3.7 (a).

Faz-se a seguir uma análise comparativa dos resultados:

- Antenas omnidireccionais e sectoriais: observa-se que para diagramas ideais se obtém melhores resultados com antenas sectoriais. Isto acontece pois o número de número de possíveis interferentes é menor e por isso o C/I é maior. Para diagramas reais, isto não acontece apenas para o pior caso do C/I usando o plano N_{cg}=3, com as antenas S-R60 e S-

R120d. Neste caso, o móvel está posicionado a 0º, na fronteira da célula, que é uma zona onde existe problemas de cobertura, devido ao diagrama de radiação das antenas ser estreito de modo a cobrir todo o sector de 120º. Assim, o ganho da antena nessa direcção é baixo, enquanto que os interferentes podem ter um ganho maior na direcção do móvel. Mas, para o caso do C/I médio os resultados voltam a ser melhores, pois os piores interferentes nem sempre estão activos.

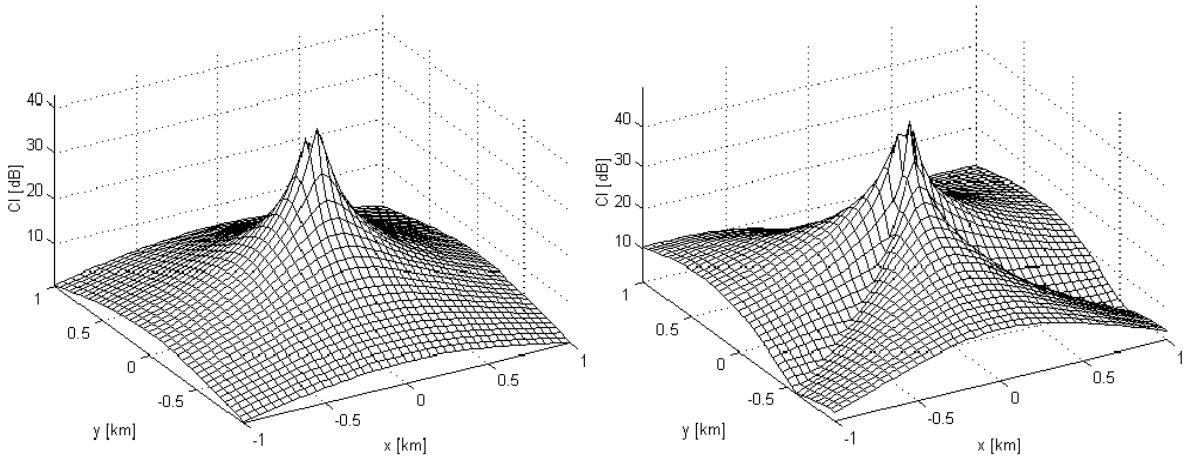
- N_{cg}=4 e N_{cg}=3: quando se compara os dois planos de reutilização de frequências testados, verifica-se que para o padrão de quatro células se obtêm melhores resultados, dado que a razão de reutilização é maior e por isso as células co-canal estão mais afastadas.
- Diagramas de radiação ideais e reais: é de esperar que o C/I fosse mais baixo para antenas reais do que para ideais. No caso de antenas omnidireccionais a diferença é pequena, já que o ganho da antena real não varia muito com a direcção. Para antenas sectoriais, no plano N_{cg}=4, os resultados para antenas reais são melhores. Isto acontece porque as antenas ideais têm um ganho uniforme em todo sector. Assim, quer os interferentes, quer a BS do móvel, têm o mesmo ganho na direcção do móvel. Para as antenas reais, algumas direcções têm um ganho menor que outras e assim, o móvel está a receber uma potência menor de alguns interferentes. No plano N_{cg}=3, para o pior caso, os resultados para antenas ideais são melhores, mas para o caso do C/I médio os resultados são semelhantes aos das antenas reais. O facto de os resultados serem melhores para antenas ideais, deve-se ao facto de existir ganho noutras direcções que não os 120º do sector, o que provoca a existência de seis possíveis interferentes, contra os três do caso ideal.
- Comparação das antenas sectoriais reais: Olhando para o plano N_{cg}=4, a antena que de um modo geral, e considerando todas as hipótese, conseguiu melhores resultados foi a antena S-R60, quer no pior caso, quer no caso médio. No entanto, se for tomado em consideração o problema da cobertura, opta-se pela antena S-R120d. O diagrama de radiação desta antena está inclinado para baixo, diminuindo assim a interferência. Para o plano N_{cg}=3, as antenas que melhores resultados apresentam para o pior caso, são a S-R90 e a S-R120. Para o caso médio são as antenas S-R90 e S-R120d. Escolhe-se como melhor antena a S-R90, pois apresenta também melhores resultados no caso aleatório.

De entre as antenas sectoriais reais testadas, a antena S-R90 apresenta melhores resultados para os dois planos considerados.

De notar, por exemplo, que o C/I obtido para antenas omnidireccionais ideais, para a fronteira da célula, no plano N_{cg}=3, é de 8.69 dB. Este valor é inferior ao valor nominal de GSM (9 dB). Para aumentar o C/I, pode recorrer-se a alguns dos métodos já anteriormente

apresentados para diminuir a interferência, como seja o uso de sectorização, inclinação da antena, o controlo de potência, transmissão descontínua, esconder a antena atrás de edifícios, *frequency hopping*, entre outros. Os resultados na fronteira da célula para antenas sectoriais, são em geral bastante superiores ao C/I nominal. Estes valores podem ser aproximados dos 9 dB, reduzindo a potência de emissão e assim poupar energia e diminuir a interferência.

Dos resultados obtidos, observa-se que o C/I diminui com o aumento da distância do móvel à BS, Fig. 4.3. Para os restantes casos, os gráficos encontram-se no Anexo D.



(a) O-I (b) S-R60

Fig. 4.3 - Relação C/I em função da distância.

Optou-se também por alterar a orientação das células, para ver a sua influência nos resultados do C/I. As células foram orientadas como mostra a Fig. 3.7 (b) e o móvel está fixo a 90º. Embora o número de interferentes não seja o mesmo (três no caso (a) e dois no caso (b)), os resultados apenas diferem no plano teórico. Isto acontece porque se usam antenas sectoriais com um diagrama de radiação limitado a 120º e com o mesmo ganho em todos os pontos do sector que estão à mesma distância do centro. Já com antenas reais os resultados deveriam ser mais semelhantes, devido a haver radiação para além da fronteira do sector, Tab. 4.5. No entanto isto não acontece porque o móvel fixo encontra-se a 0º no caso (a), na fronteira do sector, havendo problemas de cobertura para as antenas de lobo mais estreito, dado que o máximo de radiação é a 60º. No caso (b) o móvel fixo está a 90º, sendo a distância para o máximo de radiação de 30º e portanto este problema já não se põe. Como para antenas omnidireccionais o número máximo de interferentes é seis, em qualquer das configurações de 3.7 (a) e (b), não se justifica qualquer simulação, pois os resultados iriam coincidir com os da Tab. 4.1 (a) e 4.3 (a). Os resultados completos encontram-se no Anexo C, referidos como versão 2.

	Centro	Meio	Limite	Aleatório
$\overline{C/I}$ [dB]	69.06	31.17	21.76	33.52
σ [dB]	1.08	2.21	1.38	10.14
$\overline{C/I}$ [dB] pior caso	66.48	28.53	19.06	31.17

(a) S-I

	Centro	Meio	Limite	Aleatório		Centro	Meio	Limite	Aleatório
$\overline{C/I}$ [dB]	79.34	39.15	27.53	40.88		73.73	34.23	23.11	38.22
σ [dB]	13.87	12.10	10.30	15.94		7.87	6.62	5.39	14.75
$\overline{C/I}$ [dB] pior caso	66.19	27.5	17.12	30.84		65.99	27.26	16.56	29.22

(b) S-R60 (c) S-R90

	Centro	Meio	Limite	Aleatório		Centro	Meio	Limite	Aleatório
$\overline{C/I}$ [dB]	74.53	34.50	22.72	38.23		77.07	37.06	25.49	40.69
σ [dB]	8.37	6.65	5.13	15.72		10.81	8.85	7.13	16.02
$\overline{C/I}$ [dB] pior caso	65.54	26.62	15.61	31.28		66.24	27.55	17.08	31.20

(d) S-R120 (e) S-R120d

Tab. 4.5 - Antenas sectoriais, N_{cg}=3, com a orientação dos sectores da Fig. 3.7 (b).

Como se constata dos resultados apresentados, os valores de C/I são em geral melhores do que os da Tab. 4.4, pois no plano teórico existe menos um potencial interferente co-canal. Como era de esperar, no caso de o móvel ter uma posição aleatória no sector, os resultados tornam-se mais semelhantes, já que o móvel pode aparecer em qualquer posição da célula e reduzir assim as diferenças causadas pelo posicionamento do móvel na fronteira da célula. Os resultados com antenas reais são piores do que para antenas ideais e de entre as reais, a antena S-R60 obteve melhores C/I para o C/I médio, sendo necessário contabilizar os problemas de cobertura. Para o pior caso, os melhores resultados foram obtidos com a antena S-R120d, já que baixar o lobo principal de radiação faz diminuir a influência dos interferentes co-canal no C/I.

4.4. *Frequency Hopping*

Pelas razões mencionadas no capítulo anterior, no estudo das antenas disponíveis, optou-se por fazer somente as simulações do FH utilizando as seguintes antenas: omnidirecionais ideais, sectoriais ideais e sectoriais reais de 90º e 120º de abertura horizontal. Optou-se também por fazer a simulação apenas para o pior caso, na situação em que o móvel se encontra na fronteira da célula.

De forma a conseguir avaliar o desempenho do FH existe a necessidade de efectuar a comparação dos resultados agora obtidos com os resultados obtidos anteriormente. Para isso tem-se que efectuar a média do C/I em cada salto de frequência. Devido ao elevado tempo de processamento que cada simulação obriga, optou-se fazer para cada técnica estudada apenas dez simulações. Em cada uma das dez linha das tabelas apresentadas nos Anexos E, F e G está representado o valor médio do C/I nos 19530 saltos de frequência, o correspondente desvio padrão, o valor máximo e mínimo do C/I de cada. Nas tabelas seguintes está representado o $\overline{C/I}$ total de todos os saltos, o desvio padrão médio ($\bar{\sigma}$) e o ganho em relação ao caso em que não existia FH.

Apresenta-se em seguida os resultados para FH, com N_{cg}=4, Tab. 4.6.

	Antenas			
	O-I	**S-I**	**S-R90**	**S-R120**
$\overline{C/I}$ [dB]	16.41	22.35	26.23	23.68
$\bar{\sigma}$ [dB]	3.21	1.65	4.78	3.73
Ganho [dB]	-0.24	-0.10	-0.06	-0.47

Tab. 4.6 – Média do C/I para N_{cg}=4 com FH e o respectivo ganho.

Concluí-se dos resultados obtidos que não existe vantagens em utilizar FH, dado que o valor médio do C/I permanece praticamente igual ao caso simulado sem FH. Isto deve-se ao facto de não existirem frequências suficientes para obter um ganho de qualidade.

A redução do padrão de reutilização do sistema para N_{cg}=3 permite aumentar o número de portadoras disponíveis em cada célula.

	Antenas						
	O-I	**S-I**		**S-R90**		**S-R120**	
		Versão 1	Versão 2	Versão 1	Versão 2	Versão 1	Versão 2
$\overline{C/I}$ [dB]	15.13	17.87	21.53	18.64	24.94	18.01	22.78
$\bar{\sigma}$ [dB]	3.89	2.44	1.11	6.52	5.57	4.73	4.42
Ganho [dB]	+ 1.09	- 0.67	- 0.23	- 0.09	+ 1.83	- 0.55	+ 0.06

Tab. 4.7 – Média do C/I para N_{cg}=3 com FH e o respectivo ganho.

Consegue-se assim com o uso de antenas omnidireccionais, uma melhoria da relação C/I de 1.09 dB em relação ao caso sem FH, Tab. 4.7. Com antenas sectoriais continua-se a não obter um ganho significativo.

Para a simulação do sistema com N_{cg}=1 consideraram-se dois anéis de interferência. Com a utilização deste padrão consegue-se um grande aumento da capacidade do sistema porque se utilizam todas as portadoras disponíveis na mesma célula. Como se pode verificar

na Tab. 4.8 a utilização deste padrão com *frequency hopping* é bastante problemática pois a qualidade da rede pode ficar seriamente afectada.

	Antenas			
	O-I	**S-I**	**S-R90**	**S-R120**
C/I pior [dB]	-3.02	8.89	6.33	4.66
$\overline{C/I}$ **[dB]**	11.93	17.93	19.94	18.13
$\bar{\sigma}$ **[dB]**	7.19	4.59	7.16	7.54

Tab. 4.8 – Média do C/I para N_{cg}=1 com FH.

Os resultados obtidos demonstram que o plano N_{cg}=1 com o uso de antenas omnidireccionais não é admissível numa rede celular porque existem situações em que o valor C/I atinge o valor mínimo de -3.02 dB. Verifica-se também que o valor do desvio padrão é muito elevado em cada simulação, o que corresponde a ter uma grande gama de valores de C/I. Mas, com introdução da sectorização no padrão de N_{cg}=1 obteve-se valores C/I bastante mais aceitáveis. Através dos resultados obtidos pode-se concluir que do ponto de vista teórico é possível reduzir o tradicional padrão celular de 4×3 da rede utilizado no sistema GSM para um padrão de 1×3 utilizando antenas sectoriais ideais, porque a relação C/I mínima (8.89 dB) aproxima-se do limite mínimo utilizado como referência no GSM (9 dB). No ponto de vista prático esta solução não é possível pois não existem antenas ideais. Da tabela anterior regista-se que o uso de antenas sectoriais reais conduz a uma relação C/I média muito boa mas existindo casos em que há uma grave degradação do sinal (C/I mínimo igual a 4.66 dB).

Comprova-se pelos resultados obtidos nas simulações anteriores, que o uso de antenas sectoriais reais com uma abertura horizontal de 90º conduz a desempenhos melhores do $\overline{C/I}$ em relação ao uso de antenas reais de 120º.

Pode-se concluir que o desempenho do sistema com *frequency hopping* depende fortemente do número de portadoras disponíveis para saltar. Outro aspecto que pode ser avaliado é o estudo do comportamento do FH quando existe uma variação da ocupação do canal. Segundo estudos efectuados anteriormente [7] existe vantagem em utilizar o FH quando a ocupação do canal é baixa, que também seria de prever já que existe uma menor probalidade de haver interferência durante os saltos.

4.5 Reutilização Múltipla de Padrões

Apresenta-se os resultados para os quatro casos referidos em 3.9, com antenas omnidireccionais, Tab. 4.9. A distribuição dos 30 utilizadores pela célula, foi feita de maneira a que eles fossem distribuídos pelos dois padrões de reutilização, de maneira proporcional ao

número de portadoras existentes para cada padrão. Em cada salto, o móvel escolhe aleatoriamente uma portadora, que pode pertencer ao padrão N_{cg}=4 ou ao padrão N_{cg}=3. A partir daí é calculado o C/I para esse salto. O $\overline{C/I}$ e o $\bar{\sigma}$ são a média de quinze simulações efectuadas. Apresenta-se também a distribuição das portadoras pelos dois padrões.

Ncg	4/3	4/3	4/3	4/3
Portadoras por Padrão	40/0	28/12	16/24	0/40
Portadoras por Célula	10	11	12	13
$\overline{C/I}$ [dB]	**16.74**	**15.93**	**15.42**	**14.97**
$\bar{\sigma}$ [dB]	3.28	3.74	3.64	3.67
C/I min [dB]	11.60	8.69	8.69	8.70
C/I máx [dB]	24.43	24.43	24.43	23.00

Tab. 4.9 – Resultados das simulações com MRP usando antenas omnidireccionais ideais.

A partir dos resultados obtidos, verifica-se que o C/I diminui à medida se passa gradualmente do padrão N_{cg}=4 para o N_{cg}=3. Quanto mais portadoras vão sendo atribuídas ao padrão N_{cg}=3, maior é a probabilidade de o móvel ir parar a esse padrão. Em contrapartida, o número de portadoras na célula aumenta, já que a razão de reutilização diminui. Foram também efectuadas simulações para antenas sectoriais ideais, com a versão 2, Tab. 4.10.

Ncg	4/3	4/3	4/3	4/3
Portadoras por Padrão	40/0	28/12	16/24	0/40
Portadoras por Célula	10	11	12	13
$\overline{C/I}$ [dB]	**22.23**	**21.92**	**21.57**	**21.05**
$\bar{\sigma}$ [dB]	1.78	1.76	1.74	1.44
C/I min [dB]	18.36	17.02	17.02	17.03
C/I máx [dB]	24.43	23.85	24.43	19.06

Tab. 4.10 – Resultados das simulações com MRP usando antenas sectoriais ideais.

O comportamento do sistema com antenas sectoriais ideais é semelhante ao caso de antenas omnidireccionais. Os resultados completos das simulações efectuadas para ambas as antenas encontram-se no Anexo H.

Concluí-se dos resultados obtidos que o valor do $\overline{C/I}$ para os casos estudados está compreendido entre o valores resultantes das simulações para N_{cg}=3 e N_{cg}=4 com FH. Tal como era esperado à medida que se aumenta a capacidade do sistema (aumento do número de portadoras), a qualidade piora. Dos resultados obtidos concluí-se que com a técnica de reutilização múltipla de padrões consegue-se um aumento da capacidade sem comprometer em muito a qualidade do sistema.

5. CONCLUSÕES

5.1. Análise do Trabalho Desenvolvido

O planeamento celular inclui previsões de modelos de propagação e de tráfego.

Depois de um estudo teórico dos modelos de planeamento celular, conclui-se que é importante fazer uma optimização dos métodos existentes. Entre vários métodos de planeamento celular estudados, escolheram-se os seguintes para serem avaliados:

- Mudança do padrão celular
- Uso de sectorização das células e consequente avaliação das antenas
- *Frequency hopping*
- Reutilização múltipla de padrões

No sentido de avaliar estes métodos de planeamento celular, desenvolveu-se um simulador capaz de avaliar o desempenho da rede em termos do C/I, para um ambiente típico urbano. Para tal considerou-se uma distribuição uniforme do tráfego e das estações de base. Admitiu-se que os utilizadores conservam a sua posição e estado durante a duração da chamada e por isso não se consideram *handovers*. A atribuição da frequência e do *time-slot* é feita de modo aleatório.

Na Fig. 5.1 estão presentes os resultados obtidos para antenas omnidireccionais, com o terminal móvel situado na fronteira da célula, indicando-se para cada método o C/I médio e a gama de valores entre o valor máximo e mínimo.

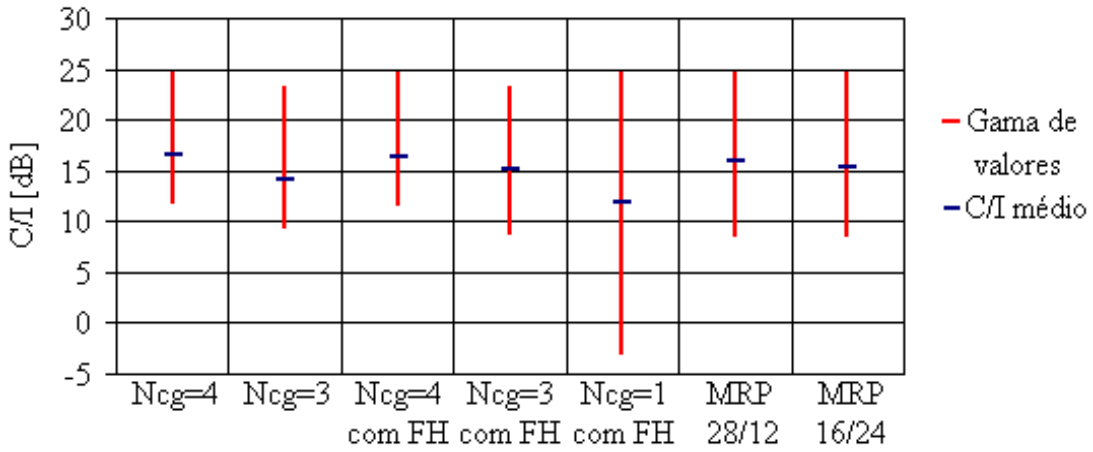


Fig. 5.1 - Resumo dos resultados para antenas omnidireccionais.

A diminuição do padrão celular de N_{cg}=4 para N_{cg}=3, vai permitir aumentar a capacidade, mas como se vê na figura anterior o valor de C/I pode ir abaixo do limiar utilizado em GSM. A diminuição do C/I acontece porque a distância de reutilização é menor.

A sectorização constitui uma boa solução para melhorar a qualidade do sistema. Com este método, é possível diminuir o número de interferentes co-canal do primeiro anel de interferência para três ou dois, dependendo da orientação das células. Com sectorização já é possível utilizar o padrão de reutilização N_{cg}=3. A Fig. 5.2. resume os resultados para antenas sectoriais.

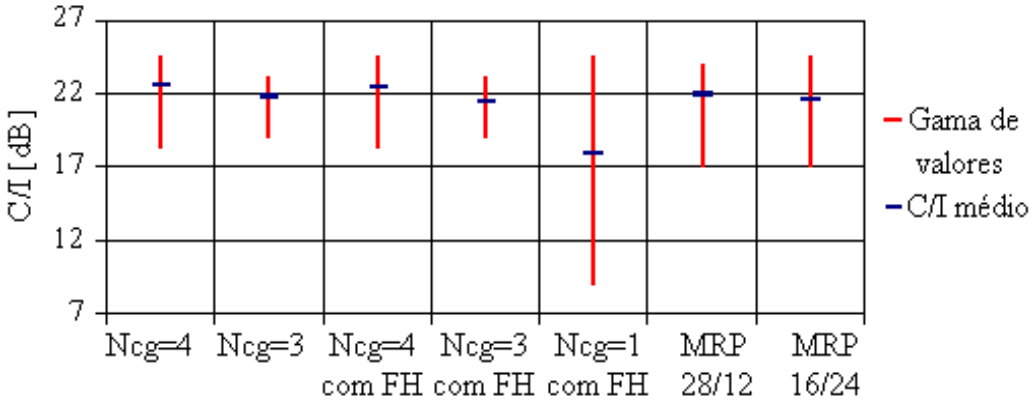


Fig. 5.2 - Resumo dos resultados para antenas sectoriais.

De entre as antenas sectoriais reais testadas a que apresentou melhores resultados foi a antena com abertura horizontal de 90 º (S-R90). Se esta antena for usada em sectores de 120º, a interferência provocada nos sectores adjacentes é bastante menor do que se forem usadas antenas de 120º nos mesmos sectores.

Para a simulação do FH considerou-se que a portadora é atribuída aleatoriamente e que durante os saltos de frequência o utilizador conserva o seu *time-slot*. O padrão de N_{cg}=4 não apresenta vantagens em relação ao caso sem FH. Para N_{cg}=3 existe um ganho de aproximadamente 1 dB. No padrão de N_{cg}=1 o C/I médio tem valores aceitáveis, mas o seu valor mínimo é muito baixo (inferior a 9 dB), o que impede a sua utilização. Verificou-se que o desempenho do sistema depende do número de portadoras disponíveis para saltar. Quanto mais portadoras estiverem disponíveis, melhor será o desempenho do FH. Os benefícios do FH poderiam ser mais visíveis nos resultados, se tivesse sido acrescentado o facto de existir desvanecimento rápido.

Para o MRP foram simulados quatro casos, que demonstram a progressiva passagem de um plano de reutilização N_{cg}=4 para um plano de N_{cg}=3. À medida que se tem mais

portadoras no plano N_{cg}=3 e menos no plano N_{cg}=4, a capacidade aumenta e o C/I diminui. Esta diminuição é aceitável, mesmo no plano 16/24 (caso mais próximo do plano N_{cg}=3).

De entre os métodos estudados, o MRP foi aquele permite maior capacidade, sem prejuízo excessivo do C/I.

O simulador criado para fazer as simulações dos métodos de planeamento estudados, apresenta algumas limitações que já foram descritas anteriormente. Por isso, os resultados obtidos nas simulações não devem ser vistos como absolutos. A utilidade do simulador está em poder comparar os vários métodos de planeamento, sob as mesmas condições, o que permite tirar conclusões válidas sobre os estudos efectuados.

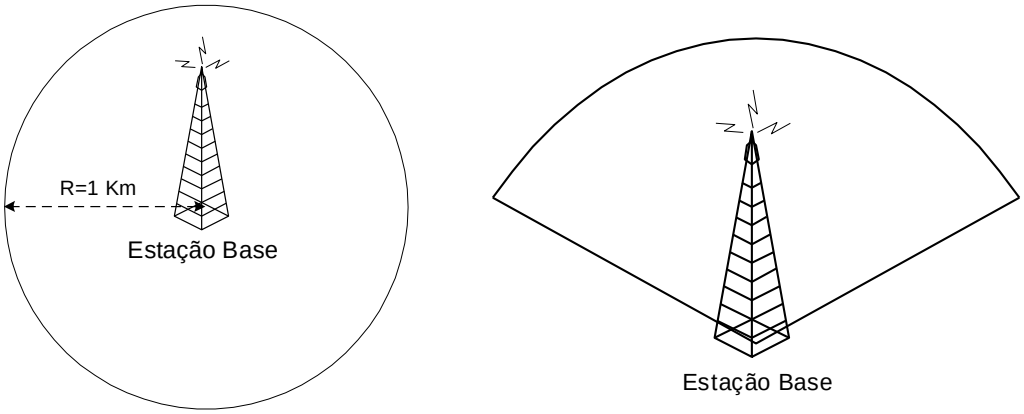
5.2. Sugestões Para Desenvolvimento Futuro

Depois de terem sido estudados e comparados alguns métodos de planeamento celular, seria interessante aproximar o simulador a uma rede real. Para tal, sugerem-se as seguintes alterações ao simulador:

- Variar dinamicamente a carga do sistema, de modo a que o número de utilizadores varie no tempo, permitindo incluir também a possibilidade de existirem *handovers*.
- Considerar uma estrutura da rede não uniforme, onde se possa variar os parâmetros de cada estação de base (raio da célula, potência de emissão, altura das antenas,etc.) independentes umas das outras.
- Estudar a influência da morfologia do terreno.
- Para FH, estudar os casos em que não se utilizem todas as portadoras disponíveis para saltar [7].

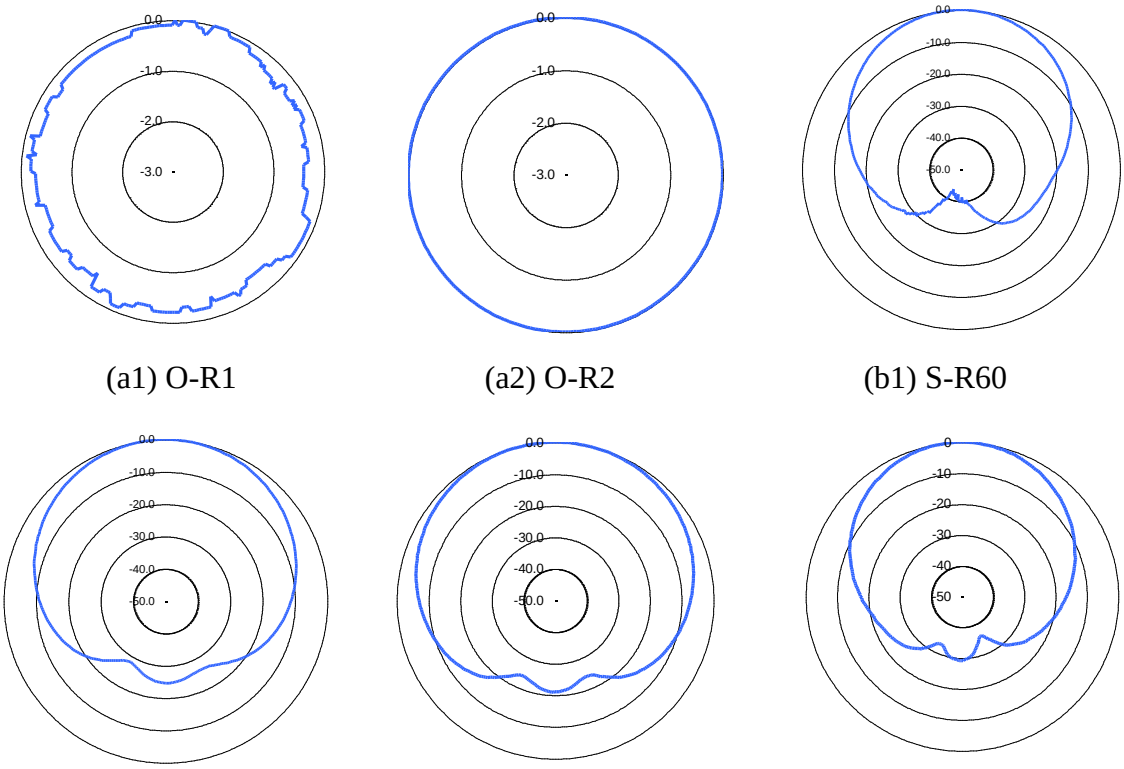
Anexo A

Diagrama de Radiação
das Antenas



(a) Omnidireccionais (b) Sectoriais

Fig. A.1 - Diagramas de radiação ideais.



(a1) O-R1 (a2) O-R2 (b1) S-R60

(b2) S-R90 (b3) S-R120 (b4) S-R120d

Fig. A.2 - Diagramas de radiação reais.

Anexo B

Apresentação dos Resultados para N_{cg}=4

	Centro	Meio	Limite	Aleatório
$\overline{C/I}$ [dB]	68.41	27.88	16.65	30.98
σ [dB]	2.09	2.43	3.34	12.30
Máx [dB]	72.04	33.49	24.43	79.88
Min [dB]	64.79	23.76	11.83	15.47
Pior Caso				
$\overline{C/I}$ [dB]	64.04	23.33	11.60	27.40
σ [dB]	-	-	-	12.78
Máx [dB]	-	-	-	75.05
Min [dB]	-	-	-	12.57

(a) O-I

	Centro	Meio	Limite	Aleatório		Centro	Meio	Limite	Aleatório
$\overline{C/I}$ [dB]	68.25	27.57	16.28	32.22		68.46	27.78	16.30	32.35
σ [dB]	2.01	2.29	3.14	12.67		2.03	2.30	3.16	13.82
Máx [dB]	72.01	33.31	24.28	72.04		72.04	33.49	24.43	73.70
Min [dB]	64.79	23.83	11.90	14.11		64.81	24.02	12.08	15.04
Pior Caso									
$\overline{C/I}$ [dB]	63.99	23.14	11.41	27.32		64.04	23.33	11.60	28.08
σ [dB]	-	-	-	12.66		-	-	-	13.50
Máx [dB]	-	-	-	67.23		-	-	-	70.78
Min [dB]	-	-	-	12.84		-	-	-	12.01

(b) O-R1 (c) O-R2

Tab. B.1 - Antenas omnidireccionais, N_{cg}=4.

	Centro	Meio	Limite	Aleatório
$\overline{C/I}$ [dB]	70.65	31.84	22.45	37.98
σ [dB]	1.67	1.99	2.33	14.22
Máx [dB]	72.01	33.49	24.43	81.71
Min [dB]	67.20	28.01	18.36	20.33
Pior Caso				
$\overline{C/I}$ [dB]	67.20	28.01	18.36	33.18
σ [dB]	-	-	-	13.45
Máx [dB]	-	-	-	78.14
Min [dB]	-	-	-	18.94

(a) S-I

	Centro	Meio	Limite	Aleatório		Centro	Meio	Limite	Aleatório
$\overline{C/I}$ [dB]	80.27	37.37	26.56	42.55		79.38	37.399	26.29	39.18
σ [dB]	9.96	8.74	7.54	19.14		7.93	6.51	5.30	14.48
Máx [dB]	111.16	66.55	53.04	110.61		96.21	52.53	39.85	80.61
Min [dB]	71.06	29.29	19.32	14.57		69.95	29.13	18.98	19.90
Pior Caso									
$\overline{C/I}$ [dB]	71.06	29.29	19.32	34.13		69.91	29.04	18.85	32.13
σ [dB]	-	-	-	15.40		-	-	-	12.32
Máx [dB]	-	-	-	83.09		-	-	-	76.08
Min [dB]	-	-	-	13.75		-	-	-	16.19

(b) S-R60 (c) S-R90

	Centro	Meio	Limite	Aleatório		Centro	Meio	Limite	Aleatório
$\overline{C/I}$ [dB]	76.26	35.10	24.15	36.54		80.92	37.83	26.98	45.40
σ [dB]	6.22	5.17	4.50	14.02		9.41	8.17	7.072	20.99
Máx [dB]	92.71	49.83	37.66	85.14		100.72	56.33	44.52	110.62
Min [dB]	68.68	28.34	17.90	18.96		71.00	29.18	19.27	14.732
Pior Caso									
$\overline{C/I}$ [dB]	68.66	28.31	17.85	30.48		70.98	29.14	19.20	36.61
σ [dB]	-	-	-	13.05		-	-	-	17.21
Máx [dB]	-	-	-	69.46		-	-	-	80.69
Min [dB]	-	-	-	17.71		-	-	-	14.47

(d) S-R120 (e) S-R120d

Tab. B.2 - Antenas sectoriais, N_{cg}=4.

Anexo C

Apresentação dos Resultados para N_{cg}=3

	Centro	Meio	Limite	Aleatório
$\overline{C/I}$ [dB]	66.78	26.42	14.05	30.84
σ [dB]	1.97	2.53	4.01	13.10
Máx [dB]	69.55	32.11	23.00	74.43
Min [dB]	63.28	22.89	9.38	13.09
Pior Caso				
$\overline{C/I}$ [dB]	61.52	21.35	8.69	24.98
σ [dB]	-	-	-	13.38
Máx [dB]	-	-	-	71.37
Min [dB]	-	-	-	10.16

(a) O-I

	Centro	Meio	Limite	Aleatório		Centro	Meio	Limite	Aleatório
$\overline{C/I}$ [dB]	66.71	26.80	15.00	29.31		66.78	26.85	15.02	32.42
σ [dB]	1.92	2.41	3.84	12.75		2.12	2.62	4.04	15.31
Máx [dB]	69.61	32.11	23.00	71.42		69.55	32.11	23.00	79.67
Min [dB]	63.31	22.39	9.25	12.96		62.29	21.84	8.93	12.82
Pior Caso									
$\overline{C/I}$ [dB]	61.62	21.46	8.83	23.52		61.52	21.35	8.69	26.25
σ [dB]	-	-	-	12.61		-	-	-	14.88
Máx [dB]	-	-	-	66.62		-	-	-	74.89
Min [dB]	-	-	-	9.57		-	-	-	9.91

(b) O-R1 (c) O-R2

Tab. C.1 - Antenas omnidireccionais, N_{cg}=3 versão 1.

	Centro	Meio	Limite	Aleatório
$\overline{C/I}$ [dB]	68.13	29.10	18.54	34.45
σ [dB]	1.66	2.20	3.18	12.67
Máx [dB]	69.55	32.11	23.00	72.41
Min [dB]	64.62	25.42	14.41	19.55
Pior Caso				
$\overline{C/I}$ [dB]	64.62	25.42	14.41	29.85
σ [dB]	-	-	-	11.95
Máx [dB]	-	-	-	70.64
Min [dB]	-	-	-	15.33

(a) S-I

	Centro	Meio	Limite	Aleatório		Centro	Meio	Limite	Aleatório
$\overline{C/I}$ [dB]	69.46	29.63	17.92	41.40		69.79	30.09	18.73	40.83
σ [dB]	11.24	10.53	9.85	19.37		7.03	6.42	6.32	17.61
Máx [dB]	99.23	57.72	42.40	98.76		88.33	47.73	36.42	97.49
Min [dB]	58.62	19.59	8.23	13.48		61.93	22.58	11.07	18.30
Pior Caso									
$\overline{C/I}$ [dB]	58.62	19.59	8.23	30.60		61.89	25.52	11.01	31.94
σ [dB]	-	-	-	14.11		-	-	-	14.99
Máx [dB]	-	-	-	77.90		-	-	-	72.30
Min [dB]	-	-	-	11.69		-	-	-	13.69

(b) S-R60 (c) S-R90

	Centro	Meio	Limite	Aleatório		Centro	Meio	Limite	Aleatório
$\overline{C/I}$ [dB]	70.02	30.14	18.56	37.03		70.12	30.13	18.62	40.75
σ [dB]	5.78	5.42	5.70	15.93		9.94	9.37	9.54	15.59
Máx [dB]	87.31	47.13	36.92	92.67		89.60	49.93	41.21	86.49
Min [dB]	63.25	23.77	12.11	19.72		59.66	20.60	9.26	16.50
Pior Caso									
$\overline{C/I}$ [dB]	63.12	23.62	11.99	30.53		59.64	20.58	9.24	30.89
σ [dB]	-	-	-	13.45		-	-	-	13.33
Máx [dB]	-	-	-	76.99		-	-	-	70.41
Min [dB]	-	-	-	13.69		-	-	-	11.71

(d) S-R120 (e) S-R120d

Tab. C.2 - Antenas sectoriais, N_{cg}=3 versão 1.

	Centro	Meio	Limite	Aleatório
$\overline{C/I}$ [dB]	69.06	31.17	21.76	33.52
σ [dB]	1.08	2.21	1.38	10.14
Máx [dB]	69.55	32.11	23.00	60.17
Min [dB]	66.48	28.53	19.06	22.96
Pior Caso				
$\overline{C/I}$ [dB]	66.48	28.53	19.06	31.17
σ [dB]	-	-	-	11.61
Máx [dB]	-	-	-	78.31
Min [dB]	-	-	-	19.55

(a) S-I

	Centro	Meio	Limite	Aleatório		Centro	Meio	Limite	Aleatório
$\overline{C/I}$ [dB]	79.34	39.15	27.53	40.88		73.73	34.23	23.11	38.22
σ [dB]	13.87	12.10	10.30	15.94		7.87	6.62	5.39	14.75
Máx [dB]	105.61	63.15	48.28	96.15		95.94	53.46	38.59	93.09
Min [dB]	66.26	27.70	17.71	13.80		65.99	27.27	16.59	18.59
Pior Caso									
$\overline{C/I}$ [dB]	66.19	27.5	17.12	30.84		65.99	27.26	16.56	29.22
σ [dB]	-	-	-	13.04		-	-	-	12.68
Máx [dB]	-	-	-	71.03		-	-	-	67.22
Min [dB]	-	-	-	11.51		-	-	-	15.65

(b) S-R60 (c) S-R90

	Centro	Meio	Limite	Aleatório		Centro	Meio	Limite	Aleatório
$\overline{C/I}$ [dB]	74.53	34.50	22.72	38.23		77.07	37.06	25.49	40.69
σ [dB]	8.37	6.65	5.13	15.72		10.81	8.85	7.13	16.02
Máx [dB]	90.76	48.26	33.39	81.66		100.64	55.86	40.89	97.61
Min [dB]	65.56	26.65	15.68	14.77		66.24	27.56	17.12	18.08
Pior Caso									
$\overline{C/I}$ [dB]	65.54	26.62	15.61	31.28		66.24	27.55	17.08	31.20
σ [dB]	-	-	-	13.31		-	-	-	13.04
Máx [dB]	-	-	-	71.46		-	-	-	77.46
Min [dB]	-	-	-	14.74		-	-	-	12.98

(d) S-120 (e) S-120d

Tab. C.3 - Antenas sectoriais, N_{cg}=3 versão 2.

Anexo D

Decaimento do C/I
com a Distância

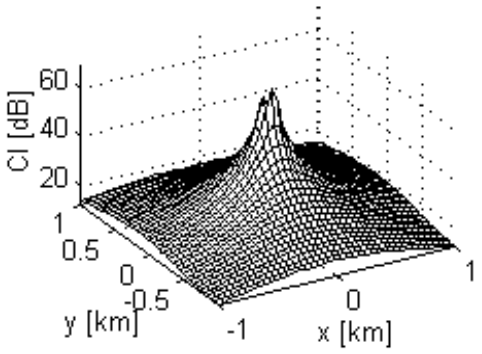


Fig. D.1 - Relação C/I em função da distância utilizando antenas omnidireccionais.

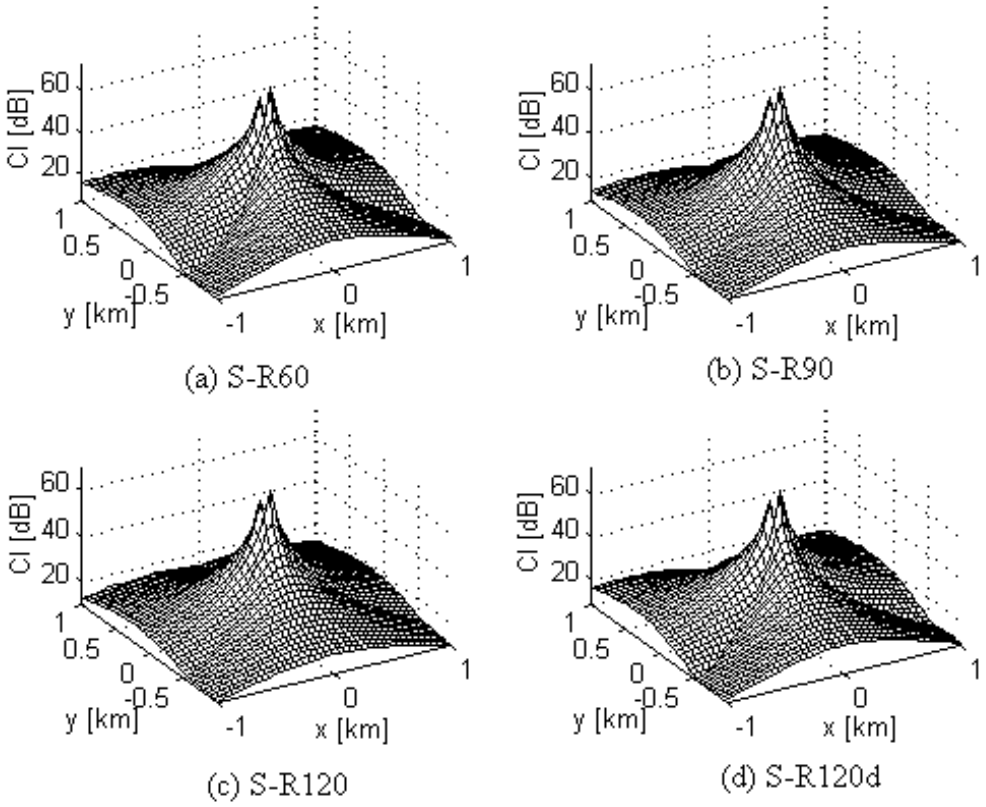


Fig. D.2 - Relação C/I em função da distância utilizando antenas sectoriais.

Anexo E

Apresentação dos Resultados para N_{cg}=4 com FH

$\overline{C/I}$ [dB]	σ [dB]	Máx [dB]	Min [dB]
17.23	3.19	24.43	11.60
16.71	3.40	24.43	11.60
16.84	3.35	24.43	11.60
15.93	3.47	24.43	11.60
16.87	3.39	24.43	11.60
14.58	2.34	24.43	11.60
16.48	3.25	24.43	11.60
16.34	3.40	24.43	11.60
16.94	3.32	24.43	11.60
16.19	3.10	24.43	11.60

Tab. E.1 - Antena omnidireccional Ideal, N_{cg}=4 com FH.

$\overline{C/I}$ [dB]	σ [dB]	Máx [dB]	Min [dB]
21.77	2.00	24.43	19.59
22.42	1.82	24.43	19.59
21.32	0	21.32	21.32
22.30	2.16	24.43	18.36
20.90	1.53	24.43	18.36
22.51	2.12	24.43	18.36
23.40	1.43	24.43	21.42
23.82	1.20	24.43	21.42
22.50	2.12	24.43	18.36
22.51	2.12	24.43	18.36

(a) S-I

$\overline{C/I}$ [dB]	σ [dB]	Máx [dB]	Min [dB]		$\overline{C/I}$ [dB]	σ [dB]	Máx [dB]	Min [dB]
26.57	4.82	34.23	19.53		22.36	3.67	37.62	18.12
24.51	4.52	39.85	18.85		26.83	6.60	37.62	19.44
25.31	4.86	39.85	21.08		23.15	3.99	37.62	17.85
27.47	4.24	34.23	20.93		22.80	3.10	37.62	19.15
24.11	4.25	39.85	21.40		22.91	2.44	37.62	21.05
26.53	6.07	39.85	19.16		2327	4.08	37.62	17.85
24.87	5.05	39.85	18.85		21.75	2.96	37.62	21.75
31.19	4.59	39.85	24.98		24.61	3.13	30.13	19.21
24.19	3.91	34.23	18.86		25.14	3.29	30.13	20.25
27.60	5.53	34.23	19.53		24.79	4.08	37.62	19.83

(b) S-R90 (c) S-R120

Tab. E.2. - Antenas sectoriais, N_{cg}=4 com FH.

Anexo F

Apresentação dos Resultados para N_{cg}=3 com FH

$\overline{C/I}$ [dB]	σ [dB]	Máx [dB]	Min [dB]
14.15	4.27	23.00	8.69
16.08	3.77	23.00	8.69
14.17	4.06	23.00	8.69
15.07	3.67	21.30	8.69
14.53	3.32	23.00	8.69
16.29	4.66	23.00	8.69
14.23	3.04	23.00	13.60
15.21	4.37	23.00	8.69
15.48	3.96	23.00	8.69
15.93	3.48	23.00	8.85

Tab. F.1 - Antena omnidireccional Ideal, N_{cg}=3 (versão 1) com FH.

$\overline{C/I}$ [dB]	σ [dB]	Máx [dB]	Min [dB]
16.35	1.49	21.30	15.06
19.26	2.78	23.00	14.41
17.70	2.94	23.00	14.41
19.29	3.06	23.00	14.41
19.09	3.14	23.00	14.41
16.24	0	16.24	16.24
17.94	3.26	23.00	14.41
18.22	2.68	21.30	15.06
17.01	2.18	21.30	15.06
17.58	2.90	23.00	14.41

(a) S-I

$\overline{C/I}$ [dB]	σ [dB]	Máx [dB]	Min [dB]		$\overline{C/I}$ [dB]	σ [dB]	Máx [dB]	Min [dB]
20.19	6.39	36.43	14.68		17.47	4.47	36.93	13.92
16.23	6.02	36.43	11.01		19.49	5.31	36.93	11.99
19.18	4.95	30.64	14.71		15.51	4.11	36.93	11.99
18.73	7.05	36.43	11.01		19.51	5.60	36.93	11.99
22.48	7.42	30.64	12.92		18.80	5.38	36.93	11.99
15.41	5.81	36.43	13.11		17.62	4.35	36.93	11.99
15.51	5.43	36.43	11.06		17.80	4.12	28.24	12.36
23.06	10.05	36.43	23.06		17.37	5.22	36.93	11.99
14.97	3.93	24.61	11.07		15.30	3.49	28.24	12.00
20.68	8.18	36.43	11.29		21.15	5.24	36.93	13.87

(b) S-R90 (c) S-R120

Tab. F.2 - Antenas sectoriais, N_{cg}=3 (versão 1) com FH.

$\overline{C/I}$ [dB]	σ [dB]	Máx [dB]	Min [dB]
21.30	0	21.30	21.30
22.02	1.43	23.00	19.06
21.80	1.26	23.00	19.06
21.32	1.18	23.00	19.06
21.34	1.20	23.00	19.06
21.99	1.43	23.00	19.06
21.30	0	21.30	21.30
21.81	1.26	23.00	19.06
20.97	1.44	23.00	19.06
21.44	1.84	23.00	19.06

(a) S-I

$\overline{C/I}$ [dB]	σ [dB]	Máx [dB]	Min [dB]		$\overline{C/I}$ [dB]	σ [dB]	Máx [dB]	Min [dB]
21.01	2.74	28.24	16.63		20.79	3.79	33.39	15.61
23.70	6.54	38.59	17.96		21.32	3.47	33.39	17.31
20.28	3.55	36.67	16.90		21.26	3.95	33.39	15.61
21.91	4.33	36.67	16.59		25.96	4.65	33.39	18.43
26.22	7.31	38.59	16.56		26.42	5.95	33.39	18.66
24.29	5.79	38.59	16.60		23.86	4.82	33.86	17.66
21.87	5.28	38.59	17.96		22.21	4.31	33.86	15.61
29.12	8.12	38.59	19.49		23.07	4.83	33.86	17.31
25.29	7.12	38.59	17.68		19.93	3.36	33.86	15.61
23.66	4.93	38.59	16.56		23.04	4.96	33.86	15.61

(b) S-R90 (c) S-R120

Tab. F.3 - Antenas sectoriais, N_{cg}=3 (versão 2) com FH.

Anexo G

Apresentação dos Resultados para N_{cg}=1 com FH

$\overline{C/I}$ [dB]	σ [dB]	Máx [dB]	Min [dB]
11.58	7.29	24.43	-3.22
12.13	8.01	24.43	-3.13
13.57	6.16	24.43	-3.02
11.06	7.54	24.43	-3.21
12.99	6.65	24.43	-3.07
10.74	7.86	24.43	-3.17
13.82	5.976	24.43	-3.00
11.07	8.03	24.43	-3.18
12.22	6.87	24.43	-3.12
10.11	7.52	24.43	-3.17

Tab. G.1 - Antena omnidireccional Ideal, N_{cg}=1 com FH.

$\overline{C/I}$ [dB]	σ [dB]	Máx [dB]	Min [dB]
17.78	4.67	24.43	9.44
17.55	5.01	24.43	8.88
16.62	4.76	23.00	9.64
18.72	3.81	24.43	11.66
18.17	4.08	24.43	9.64
17.46	4.05	23.00	9.64
19.26	5.12	24.43	9.24
16.56	5.30	24.43	10.11
18.89	4.83	24.43	9.58
18.29	4.26	24.43	9.58

(a) S-I

$\overline{C/I}$ [dB]	σ [dB]	Máx [dB]	Min [dB]		$\overline{C/I}$ [dB]	σ [dB]	Máx [dB]	Min [dB]
16.66	7.52	33.39	5.34		21.17	6.01	39.84	11.77
18.24	6.26	37.622	4.72		23.07	6.84	39.84	9.01
21.65	8.19	37.62	5.75		22.51	7.98	39.84	7.31
17.22	7.41	37.62	4.90		18.60	7.22	39.84	7.83
16.73	7.05	37.62	4.89		17.46	7.39	39.84	6.33
17.54	6.46	30.96	4.73		19.47	8.53	39.84	6.61
19.5	7.94	37.62	5.98		16.47	7.65	38.59	6.99
19.16	5.96	37.62	9.17		18.80	9.52	39.84	7.19
16.71	8.44	37.62	4.66		18.39	6.25	38.59	7.81
17.93	6.63	37.62	4.68		23.37	7.95	39.84	8.24

(b) S-R90 (c) S-R120

Tab. G.2 - Antenas sectoriais, N_{cg}=1 com FH.

Anexo H

Apresentação dos Resultados para MRP

$\overline{C/I}$ [dB]	σ [dB]	Máx [dB]	Min [dB]
17.13	3.59	24.43	11.60
15.72	3.18	24.43	11.60
14.99	2.92	24.43	11.60
14.85	2.67	24.43	11.60
16.92	3.57	24.43	11.60
16.69	3.36	24.43	11.60
15.90	3.37	24.43	11.60
18.44	3.47	24.43	11.60
17.74	3.51	24.43	11.60
16.81	3.18	24.43	11.60
16.65	3.16	24.43	11.60
19.88	3.83	24.43	11.60
17.16	3.34	24.43	11.60
15.16	2.83	24.43	11.60
16.99	3.25	24.43	11.60

Tab. H.1 - Antena omnidireccional Ideal, N_{cg}=4/3 (com respectivamente 40/0 canais).

$\overline{C/I}$ [dB]	σ [dB]	Máx [dB]	Min [dB]
17.46	4.14	24.43	8.69
16.27	3.32	24.43	8.69
14.86	3.36	24.43	8.69
17.84	3.56	24.43	9.53
14.53	3.34	24.43	8.69
14.38	3.45	24.43	9.53
16.49	3.23	24.43	9.83
15.63	4.34	24.43	8.69
15.53	4.24	24.43	8.83
16.53	3.85	24.43	8.94
15.69	4.14	24.43	8.69
15.13	4.13	24.43	8.94
17.27	4.05	24.43	9.53
14.99	3.59	24.43	8.69
16.34	3.50	24.43	8.69

Tab. H.2 - Antena omnidireccional Ideal, N_{cg}=4/3 (com respectivamente 28/12 canais).

$\overline{C/I}$ [dB]	σ [dB]	Máx [dB]	Min [dB]
15.74	3.97	24.43	8.93
14.25	3.76	24.43	8.93
15.13	4.38	24.43	8.69
14.01	4.07	24.43	8.69
16.25	4.17	24.43	9.53
16.62	4.45	24.43	8.69
15.18	3.88	24.43	8.69
16.66	4.35	24.43	8.69
15.46	3.75	24.43	8.69
16.51	3.77	24.43	8.93
15.73	3.77	24.43	8.93
15.71	3.74	24.43	8.93
15.41	3.27	24.43	8.93
14.22	3.60	23.00	8.93
14.40	4.05	24.43	8.93

Tab. H.3 - Antena omnidireccional Ideal, N_{cg}=4/3 (com respectivamente 16/24 canais).

$\overline{C/I}$ [dB]	σ [dB]	Máx [dB]	Min [dB]
15.15	4.36	23.00	8.69
14.53	4.25	23.00	8.69
14.44	3.71	23.00	8.69
16.24	3.49	23.00	8.69
15.83	3.68	23.00	8.69
12.90	3.61	23.00	8.69
15.79	3.71	23.00	8.69
14.21	4.19	23.00	8.69
15.02	3.65	23.00	8.69
14.71	4.04	23.00	8.69
15.29	4.21	23.00	8.69
14.03	4.18	23.00	8.69
15.63	4.32	23.00	8.69
14.67	3.63	23.00	8.69
16.10	4.08	23.00	8.69

Tab. H.4 - Antena omnidireccional Ideal, N_{cg}=4/3 (com respectivamente 0/40 canais).

$\overline{C/I}$ [dB]	σ [dB]	Máx [dB]	Min [dB]
21.56	1.92	24.43	18.36
22.51	2.12	24.43	18.36
20.19	1.92	24.43	18.36
22.49	2.01	24.43	18.36
23.81	1.21	24.43	21.42
23.99	1.05	24.43	21.12
20.72	1.76	24.43	18.36
21.58	1.57	24.43	19.59
21.92	2.57	24.43	19.59
22.85	2.01	24.43	19.59
21.01	1.60	24.43	19.59
24.01	1.04	24.43	21.42
22.47	2.01	24.43	18.36
22.83	2.02	24.43	19.59
21.53	2.13	24.43	18.36

Tab. H.5 - Antena sectorial Ideal, N_{cg}=4/3 (com respectivamente 40/0 canais).

$\overline{C/I}$ [dB]	σ [dB]	Máx [dB]	Min [dB]
23.77	0.71	24.43	23.00
21.92	1.62	24.43	19.59
22.81	2.28	24.43	19.59
20.82	1.39	23.00	19.59
20.22	1.04	21.32	18.32
22.25	1.90	24.26	19.59
22.36	1.52	24.26	18.36
20.99	1.83	24.26	18.36
22.07	2.25	24.26	18.36
20.76	2.06	19.59	18.36
22.26	1.95	17.02	19.59
21.26	2.37	18.29	17.02
21.39	2.09	18.29	18.29
23.84	1.19	21.42	21.42
22.04	2.26	18.35	18.36

Tab. H.6 - Antena sectorial Ideal, N_{cg}=4/3 (com respectivamente 28/12 canais).

$\overline{C/I}$ [dB]	σ [dB]	Máx [dB]	Min [dB]
22.29	0.83	23.00	21.32
21.52	1.45	23.00	19.06
20.74	2.56	24.43	17.02
20.97	1.75	24.43	17.02
20.34	1.59	23.00	17.02
20.05	1.73	23.00	17.02
21.36	2.07	23.00	17.02
21.18	2.33	24.43	19.06
22.42	1.86	24.43	19.06
21.73	1.74	24.43	19.06
21.67	1.83	24.43	19.06
22.62	1.54	24.43	21.30
20.59	1.97	24.43	17.02
22.43	1.80	22.44	19.06
23.605	0.73	23.61	23.00

Tab. H.7 - Antena sectorial Ideal, N_{cg}=4/3 (com respectivamente 16/24 canais).

$\overline{C/I}$ [dB]	σ [dB]	Máx [dB]	Min [dB]
21.38	1.53	23.00	19.06
20.29	1.51	23.00	17.02
20.79	1.78	23.00	17.02
20.23	1.44	21.30	18.28
21.35	1.39	21.30	18.28
20.42	1.08	21.30	18.28
21.18	1.50	23.00	17.02
21.13	1.65	23.00	17.02
20.42	1.72	23.00	17.02
20.83	1.09	21.30	18.28
21.35	1.09	23.00	19.05
21.78	1.26	23.00	19.05
20.84	1.08	21.30	18.29
22.04	1.42	23.00	19.06
21.34	1.19	21.34	19.06

Tab. H.8 - Antena sectorial Ideal, N_{cg}=4/3 (com respectivamente 0/40 canais).

REFERÊNCIAS

[1] Faruque,S., *Cellular Mobile Systems Engeneering*, Artech House, London, UK, 1996

[2] Correia,L.M., *Comunicações* Móveis – *Cópias de Acetatos e problemas*, AEIST, Lisboa, 1993

[3] Yacoub,M.D., *Foundations of Mobile Radio* Engeneering, CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, 1993

[4] Steele,R. (ed.), *Mobile Radio Communications*, Pentech Press, London, UK, 1992

[5] Yacoub,M.D., Toledo,A.F., Gomez,P.R.C., Jeszensky,P.J.E. and Féris,P.J.E., *"Micro Cellular Reuse Pattern in an Urban Environment"*, in Proc. of PIMRC'98 – 9th IEEE Personal Indoor and Mobile Radio Communications, Boston, Mass., USA, Sep. 1998

[6] Mouly,M. and Paulet,M.B., *The GSM System for Mobile Communications*, Palaiseau, France, 1992

[7] Tunnicliffe,G.W., Sathyendram,A. and Murch,A.R., *"Performance Improvement in GSM Networks Due to Slow Frequency Hopping*", in Proc. of VTC'97 – 47th IEEE Vehicular Technology Conference, Phoenix, Arizona, USA , May 1997

[8] Olofsson,H., Naslund,J. and Skold,J., *"Interference Diversity Gain in Frequency Hopping in GSM"*, in Proc of VTC´95 - 45th IEEE Vehicular Technology Conference, Chicago, Illinois, USA, Apr. 1995

[9] Frullone,M., Riva,G., Grazioso,P. and Falciasecca,G., *"Advanced planning Criteria for Cellular Systems",* IEEE Personal Communications, Vol.3, No. 6, Dec. 1996, pp. 10-15

[10] Mohammed,A. and Sali,S., *"Co-channel Interference Management in Cellular Networks"*, in Proc. of ACTS Mobile Communications Summit'97 Aalborg, Denmark, Oct. 1997

[11] Xiang,J. , "*A Novel Two Site Frequency Reuse Plan*", in Proc. of VTC'96 – 46th IEEE Vehicular Technology Conference, Atlanta, Georgia, USA, May 1996

[12] Faruque,S. , *"High Capacity Cell Planning Based on Fractional Frequency Reuse with Trunking Efficiency"*, in Proc of VTC´98 - 48th IEEE Vehicular Technology Conference, Ottawa, Canada, May 1998

[13] Wigard,J., Nielsen,T.T., Michaelsen,P.H. and Mogensen,P. , *"Improved Intelligent Underlay-Overlay Combined with Frequency Hopping in GSM*", in Proc. of PIMRC'97 – 8th IEEE Personal Indoor and Mobile Radio Communications, Helsinki, Finland, Sep. 1997

[14] Sathyendran,A., Tunnicliffe,G.W. and Murch,A.R., *"Multi-Layered Underlay Overlay Frequency Planning Scheme for Celular Networks"* in Proc of VTC´97 - 47th IEEE Vehicular Technology Conference, Phoenix, Arizona, USA, May 1997

[15] Cruz-Pérez.,F.A., Lara-Rodríques,D. and Lara,M., *"Multiple Reuse Patterns in Urban Microcellular Environments"*, in Proc of VTC´99 - 49th IEEE Vehicular Technology Conference, Houston, Texas, USA, May 1999

[16] Engstrom,S., Johansson,T., Kronestedt,F., Larsson,M., Lidbrink,S. and Olofsson,H., *"Multiple Reuse Patterns for Frequency Planning in GSM Networks"*, in Proc of VTC´98 - 48th IEEE Vehicular Technology Conference, Ottawa, Canada, Apr. 1998