

## Impacto da Técnica SDMA em Sistemas Celulares

Filipe Alves, Henrique Ribeiro e José Fernandes

**Resumo** – A necessidade de encontrar soluções que permitam aumentar o número de utilizadores tem levado muitos grupos de investigadores a explorar novas técnicas de acesso múltiplo capaz de aumentar a capacidade dos sistemas rádio móvel. Uma técnica que se tem revelado muita atractiva é a técnica SDMA (*Space Division Multiple Access*) e é o objecto central de estudo neste artigo.

Após uma breve introdução relativa ao sistema GSM (*Global System for Mobile communications*) e ao problema da interferência, tenta-se expôr de forma clara e resumida alguns conceitos base necessários à compreensão do estudo que foi feito. De seguida, são apresentadas várias técnicas, incluindo a técnica SDMA, para aumentar a capacidade dos sistemas que usam a técnica de acesso múltiplo FTDMA (*Frequency and Time Division Multiple Access*) e CDMA (*Code Division Multiple Access*).

**Abstract** - The need to find solutions that would support the increasing number of users, has been stimulating many research groups to explore new techniques to increase the capacity of the mobile radio systems. This technique is nominated as SDMA. After a short introduction about GSM, this article presents a resume of some essential concepts to understand the study that was made. Then, some techniques to increase the system capacity, including the SDMA, are presented for FTDMA- and CDMA-based type systems.

### I. INTRODUÇÃO

O sistema GSM tem tido uma grande aceitação no mercado das comunicações móveis e toma, cada vez mais, parte de muitos momentos do dia a dia das pessoas.

Esta popularidade foi fomentada pela liberalização do mercado e pela concorrência dos operadores destes serviços, com consequência na redução dos preços, permitindo o acesso desta tecnologia a um maior número de pessoas.

O aumento do número de utilizadores, a elevada concentração de utilizadores em alguns centros urbanos e a exigência cada vez maior na qualidade de serviço, obriga à implementação e inovação em várias técnicas de planeamento celular de modo a gerir eficientemente o escasso espectro rádio eléctrico disponível para o sistema rádio móvel.

Tradicionalmente utilizam-se antenas isotrópicas resultando numa cobertura omnidireccional em cada célula, conduzindo a uma utilização ineficiente da potência transmitida. Deste modo, torna-se difícil garantir o nível máximo de interferência adequado ao bom

funcionamento do sistema, poluição electromagnética e ainda exploração ineficiente da capacidade<sup>1</sup> do sistema.

As antenas adaptativas surgem como uma tecnologia que permite a difusão de sinais controlada através de processos adaptativos internos, capazes de orientar feixes mais directivos para as zonas desejáveis. Neste contexto, pode-se obter aumentos significativos na capacidade dos sistemas celulares explorando a separação espacial dos utilizadores, radiando a potência apenas na direcção dos terminais que estão activos, evitando deste modo a cobertura total da célula. Conseguem-se assim reduzir o nível de interferência entre sinais e melhorar o desempenho do sistema em geral. Esta técnica está a ganhar enorme popularidade entre os investigadores e fabricantes e denomina-se por SDMA. Um dos principais objectivos na implementação dos sistemas de comunicação rádio móvel é a combinação de forma adequada de três componentes de recurso escasso, espectro, tempo e espaço, de modo a permitir que vários utilizadores possam partilhar o mesmo canal físico [1].

### II. PLANEAMENTO CELULAR

Para permitir um uso eficiente do escasso espectro disponível aplica-se nos sistemas rádio móvel o conceito celular. Este conceito baseia-se numa distribuição de frequências, aproveitando o facto da potência dos sinais propagados no espaço decrescer com o aumento da distância à medida que se propagam, o que permite reutilizar canais com a mesma frequência em locais suficientemente espaçados. A célula é a área geográfica onde é atribuído um grupo de canais do número total disponível no sistema. Ao conjunto de células vizinhas que utilizam todos os canais disponíveis no sistema, uma única vez, é chamado *cluster*. Replicando o *cluster* as vezes que for necessário, é possível aumentar a área de cobertura total aumentando assim a capacidade do sistema. A eficiência será tanto melhor quanto maior for o reuso de frequências. Devido à estrutura celular dos sistemas rádio móvel, e portanto à cobertura limitada das estações base (BTS) de cada célula, há necessidade de mecanismos que permitam a transferência automática de chamadas quando um móvel se desloca entre células. A este mecanismo de transferência de chamadas entre células chama-se *handover*.

O reuso de frequências permite um aumento da capacidade dos sistemas rádio móvel, no entanto, tem a desvantagem de introduzir interferência, pelo que é um

---

<sup>1</sup> Entende-se aqui por capacidade do sistema como sendo a densidade de tráfego oferecida na área de cobertura.

factor limitativo da qualidade e capacidade destes sistemas.

Isto ocorre porque o reuso de frequências implica que para uma dada área de cobertura existam várias células que utilizam o mesmo grupo de frequências. Estas células são designadas por células co-canais, e a interferência entre os sinais destas células é designada por interferência co-canal.

Para reduzir a interferência co-canal, é necessário separar as células co-canais de uma distância mínima de reutilização, para garantir que a potência dos sinais propagados decresça para níveis tolerados pelo sistema.

Para *clusters* de 7 células, a *CIR* (*Carrier Interference Ratio*) devida à interferência co-canal é expressa por [2]:

$$\frac{C}{I} = \frac{C}{\sum_{i=1}^6 I_i} = \frac{R^{-n}}{\sum_{i=1}^6 D_i^{-n}} \approx \frac{1}{6} \left( \frac{D}{R} \right)^n \approx \frac{1}{6} (\sqrt{3N})^n \quad (1)$$

sendo *C* o nível do sinal desejado e *I* a contribuição de todos os sinais interferentes. Desta expressão verifica-se que valores baixos de *D/R* oferecem uma maior capacidade, dado que o tamanho do *cluster* *N* é pequeno e poderá ser replicado mais vezes. *D* é a distância de reutilização de frequência e *R* é o raio da célula. Por outro lado, valores elevados de *D/R* permitem uma maior qualidade de transmissão devido a um menor nível de interferência co-canal. No planeamento de sistemas celulares deve-se assumir um compromisso entre estes dois objectivos, capacidade e uma interferência co-canal tolerável. Foi estabelecido que no planeamento destes sistemas deve-se providenciar um *C/I* superior a 18dB em mais de 90% da área da célula [3]. Da expressão (1), se se considerar um *C/I* de 18dB e um factor de propagação *n=4*, o *cluster size* exigível será *N=7*. Também se pode concluir, que se o nível de *C/I* mínimo exigido diminuir, o *cluster size* *N* pode ser reduzido, o que permite para a mesma área geográfica uma maior replicação do *cluster* e por consequência, maior capacidade de tráfego.

Para além da interferência co-canal, a interferência canal adjacente, o efeito *Near-End to Far-End* e a interferência multipercurso são também responsáveis pela limitação da qualidade e capacidade dos sistemas rádio móvel [3]. Este último tipo de interferência é uma consequência da natureza dinâmica do canal de propagação dos sistemas rádio móvel, o ar. Estes são caracterizados por terem um canal de propagação aleatório e variante no tempo, que se devem aos vários tipos de obstáculos entre o emissor e o receptor. Como consequência do meio de propagação, advêm diversos fenómenos físicos, como por exemplo, a reflexão e difracção, que são responsáveis pela formação de diversas “versões” do sinal transmitido que chegam ao receptor; a isto chama-se componentes multipercurso. Estas componentes multipercurso, formam uma dispersão temporal devido ao excesso de tempo de propagação das várias componentes. A interferência entre as várias componentes multipercurso no receptor originam variações rápidas na amplitude e fase do sinal recebido, pelo que é responsável pela limitação do desempenho dos

sistemas rádio móvel.

### III. MODELOS DE PROPAGAÇÃO

Existem vários modelos de propagação para diferentes meios de propagação [4,5]. Estes modelos são importantes para quantificar com algum realismo as perdas que o sinal sofre durante a propagação entre o emissor e o receptor. Neste trabalho admitiu-se um modelo muito simples, do tipo  $P_R(d) = P_O d^{-n}$ .

Para mostrar a importância do modelo de propagação no planeamento celular, varia-se o factor de perdas *n* mantendo-se um mesmo factor de reuso (*N=7*, neste caso). A consequente variação do *C/I* pode ser vista na Tab. 1.

Factor de Perdas	Nível Mínimo de C/I (dB)
2	5
3	11
4	18
5	24
6	31

Tab. 1 – Nível mínimo de *C/I* para vários factores de perdas

No dimensionamento de um sistema rádio móvel, as direcções *downlink* e *uplink* têm que estar balanceadas. No cálculo do *C/I* para o *uplink*, usando a expressão (2), em que *R* representa a distância entre o móvel da célula de trabalho e a estação base, *D<sub>K</sub>* é a distância entre essa mesma estação base e um móvel de uma célula interferente, como se pode observar na Fig. 1.

Os cenários para as simulações foram sempre do tipo da Fig. 1 em que apenas se altera o número de células por *clusters*, a distribuição de terminais móveis nas células e a forma de cálculo do *C/I*.

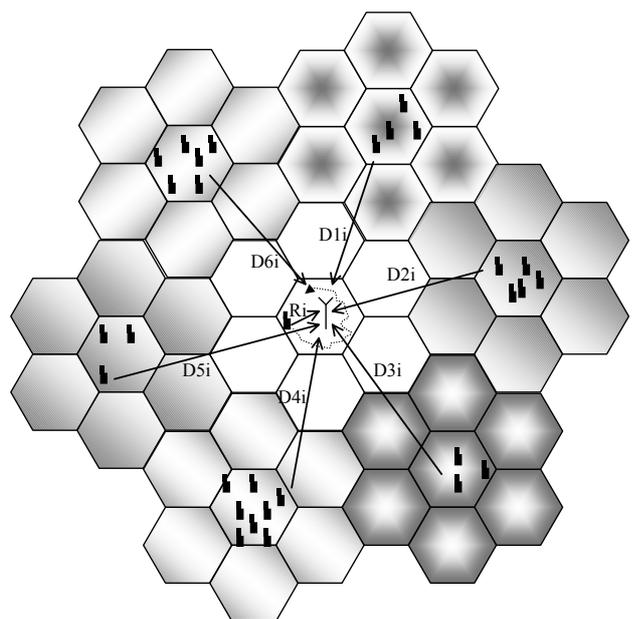


Fig.1 – Cenário utilizado para o up-link

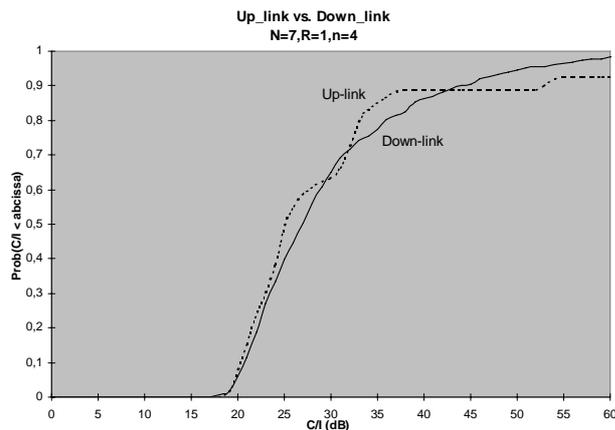


Fig. 2 – Perfil de C/I para o uplink e downlink

O resultado para 27 terminais móveis na célula de trabalho, com 30 móveis em cada célula interferente, está representado na Fig. 2. Desprezando o efeito de desvanecimento do sinal e tendo em conta o número reduzido de terminais móveis, pode-se dizer que o sistema é balanceado.

#### IV. TÉCNICAS PARA AUMENTAR A CAPACIDADE DOS SISTEMAS RÁDIO MÓVEL

O principal requisito para aumentar a capacidade de um sistema celular *FTDMA*, é conseguir reduzir suficientemente a distância de reuso de frequências mantendo um nível de interferência co-canal *C/I* acima de um valor mínimo aceitável.

A expressão *C/I* para o modelo de propagação  $P_R = P_O d^{-n}$  é:

$$C/I = \frac{P_R}{\sum_{k=1}^{I_0} P_{I_k}} = \frac{P_O R^{-n}}{\sum_{k=1}^{I_0} P_O D_k^{-n}} = \frac{R^{-n}}{\sum_{k=1}^{I_0} D_k^{-n}} \quad (2)$$

supondo que todas as *BTS* transmitem potências iguais  $P_T$ ,  $R$  é a distância do móvel à estação base da célula de trabalho (onde se pretende calcular o *C/I*),  $D_k$  é a distância do móvel a cada estação base interferente,  $n$  é o expoente de atenuação por perdas de propagação e  $I_0$  é o número de co-interferentes. Considerando apenas o primeiro anel de co-interferentes, para um sistema omnidireccional com *clusters* de 7 células, usa-se  $I_0=6$  [3].

Na Fig. 3, estão representados, para o *down-link*, os resultados para *clusters* de 3, 4 e 7 células, com factor de propagação  $n=4$ , células de 1Km de raio e uma distribuição de 380 terminais móveis em cada célula. Estas curvas representam a probabilidade do *C/I* ser menor do que um determinado valor, em qualquer posição na célula de trabalho.

Alterando o raio das células para 5Km e desprezando

mais uma vez o efeito de desvanecimento do sinal, não se verificaram alterações, o que prova que a relação  $Q=D/R$  é constante.

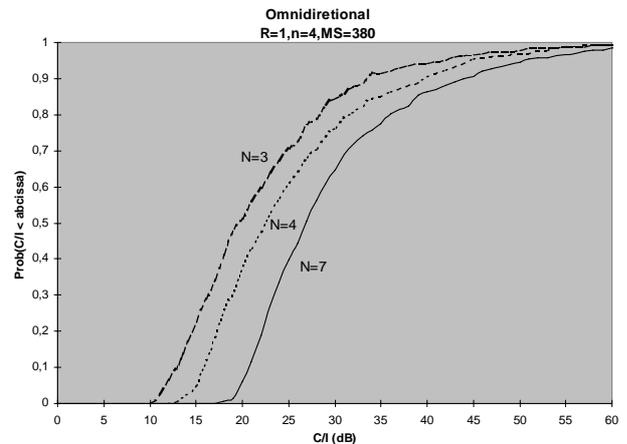


Fig. 3 - Perfis de C/I para um sistema omnidireccional

À medida que se aumenta o factor de reuso  $N$ , os sinais de interferência co-canal percorrem uma distância maior fazendo com que chegem mais atenuados à *BTS*, o que resulta num aumento da relação *C/I*, tal como se pode verificar na Fig. 3.

#### A. Sectorização

A sectorização é uma técnica que permite aumentar a capacidade dos sistemas rádio móvel através da redução do número de células co-canais. Com a diminuição do nível de interferência, a relação *C/I* aumenta, o que permite diminuir o número de células por *cluster* e assim aumentar o reuso de frequências até valores de *C/I* que permitam comunicações de qualidade.

Aplicando sectorização de 120°, para *clusters* de 4 e 7 células existem 2 co-interferentes; no caso do *cluster* de 3 células existem 3 interferentes. Com a sectorização de 60°, existe apenas uma estação base interferente para ambos factores de reuso de 4 e 7 células, e 2 co-interferentes para *clusters* de 3 células.

O cálculo do *C/I* em todos estes casos é feito para todos os móveis através da expressão (2) na qual se deve substituir convenientemente o valor  $I_0$ . Assim, não se tem em conta qualquer ganho devido à consequente alteração do diagrama de radiação, porque é suposto que se diminua a potência transmitida em relação a uma antena isotrópica que cobriria uma célula onde se possa “encaixar” o sector em questão.

Na Tab. 2, pode-se comparar os valores das simulações com os valores resultantes da aproximação:

$$\frac{C}{I} (dB) = 10 \log \left[ \frac{1}{I_0} (\sqrt{3N})^n \right] \quad (3)$$

As diferenças que se verificam devem-se ao facto dessa aproximação ter em conta apenas as distâncias entre estações base, e não base-móvel, assumindo-as todas

iguais e para o pior caso; essa aproximação foi desenvolvida exclusivamente para o caso de 6 co-interferentes [4].

Factor Reuso	Omni. (dB)		Sect. 120° (dB)		Sect. 60° (dB)	
	Simul.	Aprox.	Simul.	Aprox.	Simul.	Aprox.
N=3	10	11.3	16	14.3	19	16
N=4	12.5	13.8	21	18.6	25	21.6
N=7	17.5	18.6	24	23.4	29.5	26.4

Tab. 2 – Comparação entre os valores obtidos na simulação e os da aproximação para diferentes configurações celulares

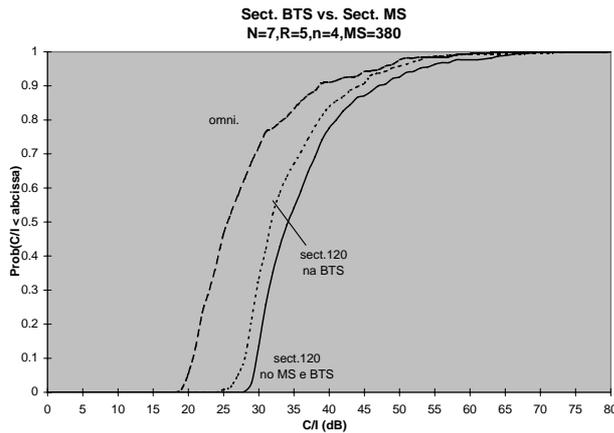


Fig. 5 – Comparação das sectorizações nas BTS e nos Móveis (MS)

Aplicando sectorização de 120° apenas na estação móvel, o nível mínimo de  $C/I$  mantém-se semelhante ao caso da sectorização das *BTS* visto o móvel em questão estar sujeito ao mesmo número de interferentes. Em *clusters* de 3 células poderá ocorrer, em poucas posições na célula, casos com 3 interferidores, logo o nível de  $C/I$  é ligeiramente inferior. No caso da sectorização no móvel e nas *BTS*, o número de interferentes que o móvel recebe varia entre 1 e 2, daí que o  $C/I$  seja superior. Ao aplicar sectorização de 60° nas estações base e o mesmo esquema de sectorização no móvel, existem posições na célula onde o móvel não recebe nenhum sinal interferente. Na Fig. 5, compara-se o  $C/I$  para um factor de reuso  $N=7$ .

**B. Agregados Adaptativas**

Uma antena adaptativa é, em geral, um agregado de antenas que consegue alterar o seu diagrama de radiação conforme o ambiente rádio eléctrico à sua volta, apontando os seus máximos e mínimos em direcções específicas segundo um determinado critério imposto ao formatador de feixe. Assim, há uma diminuição do nível de interferência (interferência co-canal e multipercurso) no sistema celular e uma consequente melhoria na qualidade de serviço, ou um aumento da capacidade se optarmos por uma redução do *cluster size*. Existe também a possibilidade de provocar, com as antenas adaptativas, a criação de múltiplos feixes independentes por forma a servir vários móveis com um único canal, esta técnica

denomina-se *SDMA*. Esta técnica, ao contrário das restantes, não necessita de um re-planeamento celular para se obter um aumento efectivo da capacidade.

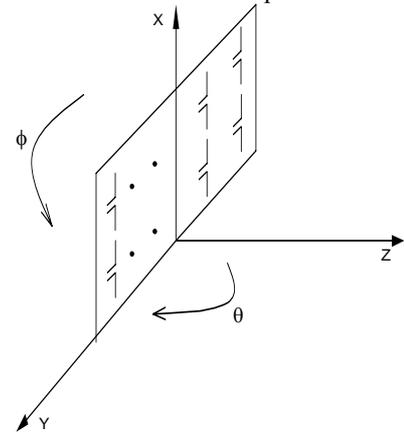


Fig. 6 – Agregado usado na simulação

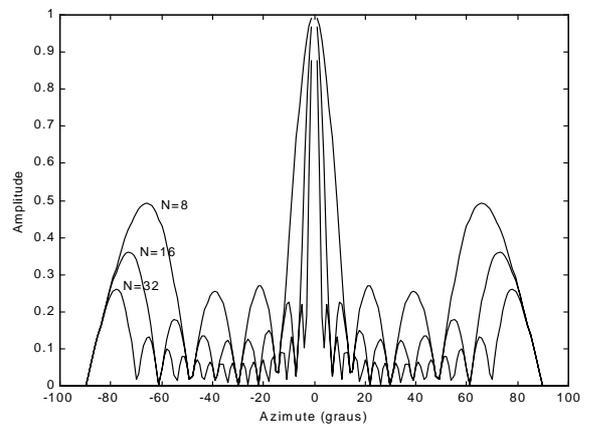


Fig. 7 – Diagramas de radiação do agregado estudado para diferentes números de elementos

O agregado planar utilizado nas simulações tem uma estrutura idêntica á representada na Fig. 6. Tratam-se de dipolos de comprimento  $\lambda/2$  com espaçamento entre dipolos de  $\lambda$  e de  $\lambda/4$  em relação ao plano reflector. Os respectivos diagramas de radiação para 8, 16 e 32 elementos<sup>2</sup> estão representados na Fig. 7.

**B.1. HSR (High Sensitivity Reception)**

A técnica *HSR* é o primeiro passo na implementação da técnica *SDMA*. O principal objectivo do *HSR* é utilizar o ganho da antena para expandir a cobertura da célula na recepção (*uplink*), com consequência na redução do número de *BTS* necessárias para cobrir uma determinada área e uma consequente redução no custo de implementação do sistema, como se pode verificar na Fig. 8. No caso de não se expandir a cobertura, pode-se optar pela diminuição da potência de transmissão dos móveis, o que terá um impacto considerável na autonomia dos

<sup>2</sup> Entende-se aqui como elemento, o agregado de 2 dipolos segundo o eixo  $xx'$ .

mesmos [1].

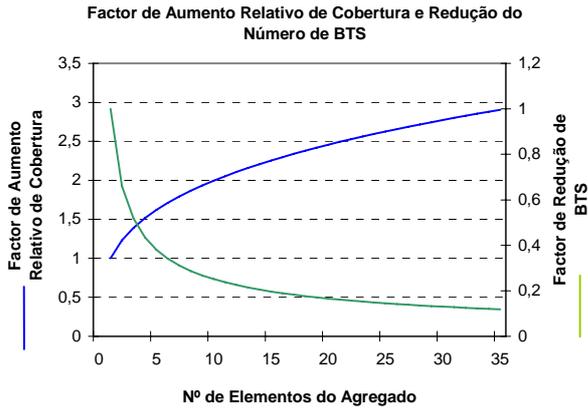


Fig. 8 – Factor de aumento relativo de cobertura e redução do número de estações base

**B.2. SFIR (Spatial Filtering for Interference Reduction)**

A técnica *SFIR* explora as potencialidades das antenas adaptativas no domínio espacial, tanto nas direcções de *uplink* como *downlink*.

O principal objectivo com este sistema balanceado é a redução da interferência co-canal como consequência da radiação da energia apenas na direcção do móvel activo, provocando uma diminuição de interferência nas células vizinhas e uma captação de sinal também direccionada ao móvel, com uma consequente redução de móveis interferentes.

Ao pressupor que a técnica é utilizada nos *clusters* adjacentes, a ocorrência de interferência dá-se apenas quando ambos feixes de trabalho e interferentes intersectam-se. Assim, a introdução desta técnica nos *clusters* adjacentes resulta na redução de interferência co-canal reduzindo o número efectivo de interferidores.

Neste caso, a interferência co-canal ocorre com uma probabilidade que depende da largura do feixe  $\Delta\theta_k$  formatado. Portanto, a probabilidade de existirem  $N_i$  interferidores efectivos é ( $1 \leq N_i \leq 6$ ):

$$PROB = \prod_{k=1}^{N_i} \frac{\Delta\theta_k}{2\pi} \tag{4}$$

**B.3. SDMA**

A técnica *SDMA* corresponde à replicação da técnica *SFIR* para o mesmo canal *FTDMA*, distinguindo os utilizadores móveis pelas suas posições angulares relativamente à estação base. Isto permite uma replicação dos canais na própria célula, com consequência nos sistemas celulares através de uma maior eficiência espectral e uma maior capacidade.

A probabilidade de ocorrer em simultâneo, para um mesmo canal replicado *SMG* vezes, interferência proveniente de  $N_i$  interferidores é:

$$\left( \prod_{k=1}^{N_i} \frac{\Delta\theta_k}{2\pi} m_k \right)^{SMG} \tag{5}$$

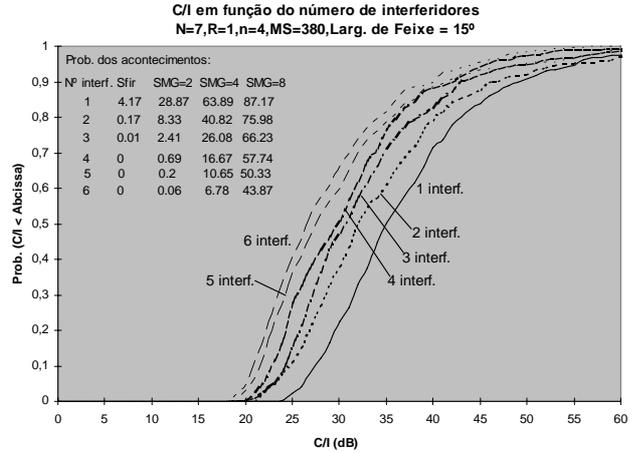


Fig. 9 – Perfis de C/I e suas probabilidades

Na Fig. 9 estão representados os perfis de *C/I* para cada número de interferidores efectivos assim como as suas probabilidades de acontecimento.

Trata-se de um cenário em que a largura de feixe é 15°, o número *m* de feixes em cada célula interferidora é igual ao número de feixes *SMG* na célula de trabalho e assume-se uma situação de *full traffic*.

Pela análise da Fig. 9 e da expressão (4) verifica-se que a probabilidade de ocorrência de interferência acompanha a variação do número de feixes na célula assim como a variação da largura de feixe. Note-se que o *SFIR* é um caso particular do *SDMA* em que *SMG=1*.

A tabela apresentada no gráfico indica as probabilidades de acontecimento de cada curva (CDF para cada número de interferidores co-canais) em função do número de feixes *SMG* do agregado.

**V. EFICIÊNCIA ESPECTRAL**

A eficiência espectral é importante visto os sistemas rádio móvel necessitarem para o seu funcionamento de um recurso escasso, o espectro. As técnicas até agora mencionadas permitem satisfazer um maior número de utilizadores por MHz por Km<sup>2</sup> em relação a um sistema omnidireccional, isto porque permitem que vários utilizadores possam partilhar o mesmo canal fisico.

A expressão utilizada para exprimir o ganho de utilizadores de uma técnica em relação à omnidireccional é [1]:

$$G = \sqrt{\frac{N}{\beta}} \frac{m}{\sqrt{h} \cdot m_h} \tag{6}$$

em que *N* é o *cluster size*,  $\beta$  a largura dos feixes, *m* o número de canais e *h* o número de sectores em que foi dividida a célula.

Na Fig. 10 encontram-se as curvas de eficiência espectral das várias técnicas em estudo. Verifica-se que ao diminuir

a largura de feixe e ao aumentar o número de feixes numa célula, a eficiência espectral aumenta significativamente, mesmo tendo em conta as perdas de eficiência de *trunking* resultantes da sectorização.

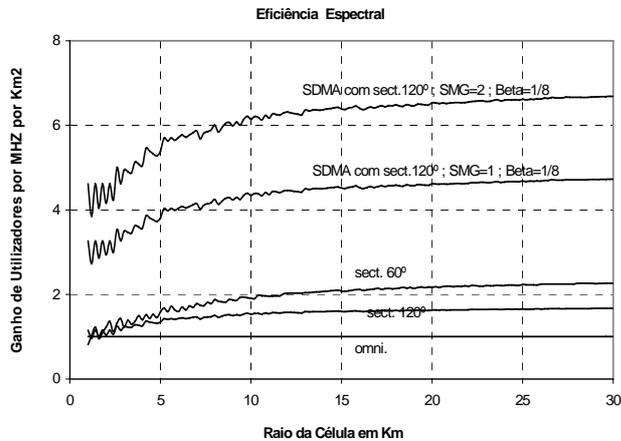


Fig. 10 – Eficiência espectral das várias técnicas

Estes ganhos devem-se a uma maior reutilização dos canais para uma mesma área geográfica com um consequente aumento no número de utilizadores que o sistema pode suportar.

VI. SISTEMAS RÁDIO MÓVEL CDMA

Num sistema *CDMA*, a cada utilizador é atribuído um código que é usado para codificar os seus sinais de informação. No sistema norte americano *IS-95*, cada utilizador codifica a sua informação a um ritmo de 9,6Kbps. A taxa de sinal espalhada final é 1,2288Mcps, resultando num sinal com largura de banda de 1,25MHz. No futuro sistema *UMTS*, essa largura de banda será de 5MHz. Como nesses sistemas, o uso desse espectro é efectuado simultaneamente durante todo o tempo, então não é necessário planeamento celular como nos sistemas *FDMA* [6].

A capacidade de uma célula *CDMA* depende de vários factores tais como desmodulação no receptor, exactidão do controlo de potência, interferência introduzida no canal por outros utilizadores de uma mesma célula ou células vizinhas.

Neste tipo sistema, o factor de reuso é  $N=1$ , o que implica que todos os terminais móveis em qualquer posição são interferidores efectivos. Daí, a necessidade de distingui-los em duas categorias: interferidores intracelulares e intercelulares. Os primeiros, correspondem aos móveis interferentes da própria célula de trabalho. Os segundos correspondem aos móveis interferentes localizados nas células vizinhas.

Para efeitos de simulação, apenas se consideram 2 anéis de células à volta da célula de trabalho, o que corresponde a 18 células, e com distribuição idêntica de móveis  $N$ . O respectivo nível  $C/I$  para tal sistema é então expresso por[6]:

$$\frac{C}{I} = \frac{P_R}{\underbrace{\sum_{i=1}^{N-1} P_i}_{\text{Interf.intra-celular}} + \underbrace{\sum_{j=1}^{N \times 18} P_j}_{\text{Interf.inter-celular}}} \quad (7)$$

No caso do *uplink*, se for assumido que em todas as células o controlo de potência é o mesmo, usando o modelo de propagação  $P_R = P_O d^{-n}$  e considerando a Fig. 11, o  $C/I$  resulta em:

$$\frac{C}{I} = \frac{1}{(N-1) + \sum_{j=1}^{N \times 18} (d_{j0}^n d_{j1}^{-n})} \quad (8)$$

onde  $d_{0j}$  é a distância entre um móvel inter-interferente e a sua estação base, e  $d_{1j}$  é a distância entre esse móvel e a estação base de trabalho.

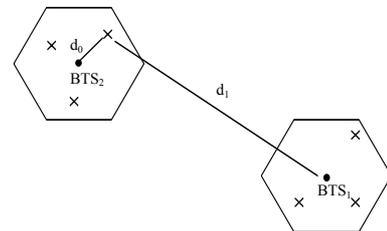


Fig. 11 – Cenário para determinar o  $C/I$  para o up-link

Considerando um cenário macro-celular com células de 1Km de raio, os resultados para sistemas omnidireccionais e com sectorizações de 120°, para meios de propagação rural ( $n=3$ ) e urbano ( $n=5$ ), estão apresentados na Fig. 12 e Fig. 13.

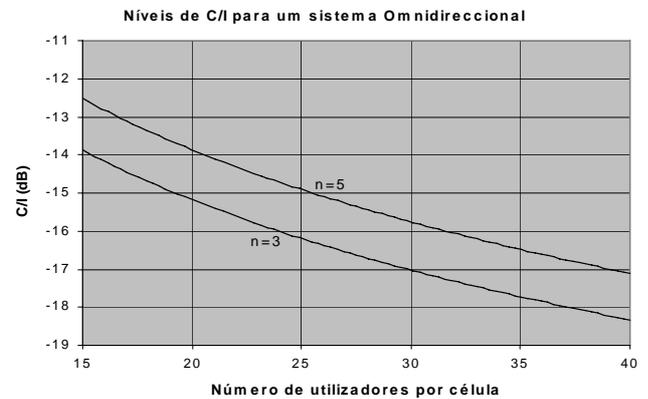


Fig. 12 – Níveis de  $C/I$  para um sistema omnidireccional

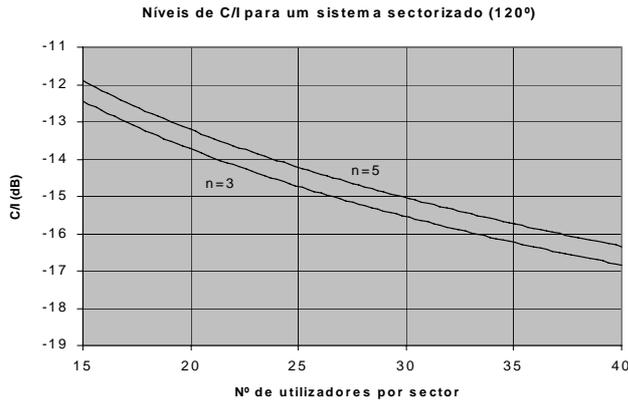


Fig. 13 – Níveis de C/I para um sistema sectorizado

Estes cálculos foram efectuadas no receptor, para o *uplink*, antes de ser aplicado o ganho de processamento.

Ao contrário dos sistemas *FTDMA*, no *CDMA* todos os utilizadores são interferentes. Assim, aplicando a técnica *SDMA* neste sistema, não existe a preocupação de eliminar interferentes com nulos, pois tornaria o sistema muito complexo.

Na simulação desta técnica, o agregado utilizado tem a estrutura descrita na secção IV.B.

A expressão do *C/I*, tendo em conta o ganho do agregado apresentado na Fig. 7, é:

$$\frac{C}{I} = \frac{1}{(N-1) + \sum_{j=1}^{N \times 18} (d_{j0}^n d_{j1}^{-n}) \cdot G_j} \quad (9)$$

Nesta expressão, o factor *N* é o número de utilizadores que se encontram em frente do plano reflector do agregado. Para simplificar a simulação, considerou-se que todos os móveis intracelulares nestas condições eram interferentes efectivos. Na realidade, poderão existir móveis intracelulares nas direcções de nulos que não contribuem para a interferência. O ganho  $G_j$  é o ganho normalizado do agregado e é sempre menor do que 1. Ou seja, este ganho maximiza o sinal numa direcção de interesse atenuando os sinais provenientes das restantes direcções. Desta forma, consegue-se aumentar a relação *C/I*. Os resultados estão representados na Fig. 14.

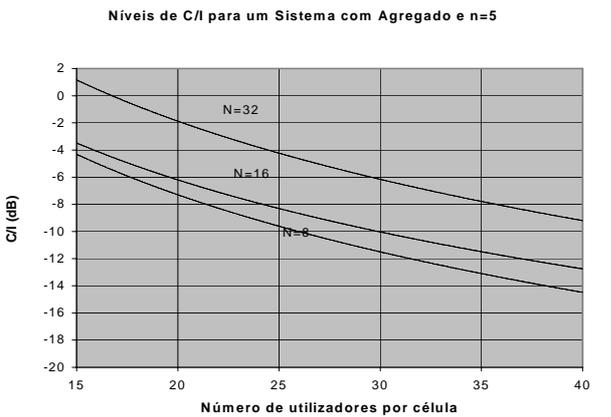
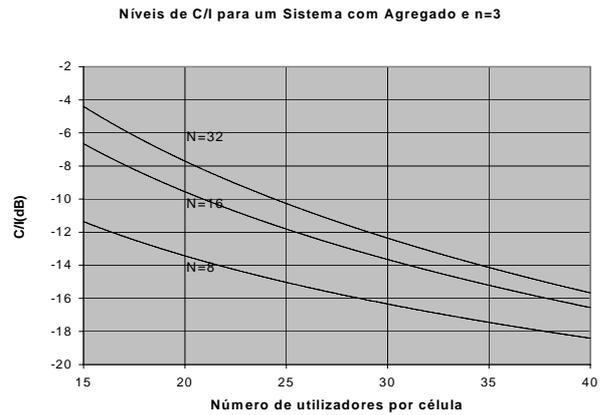


Fig. 14 – Níveis de C/I para diferentes factores de propagação e número de elementos do agregado

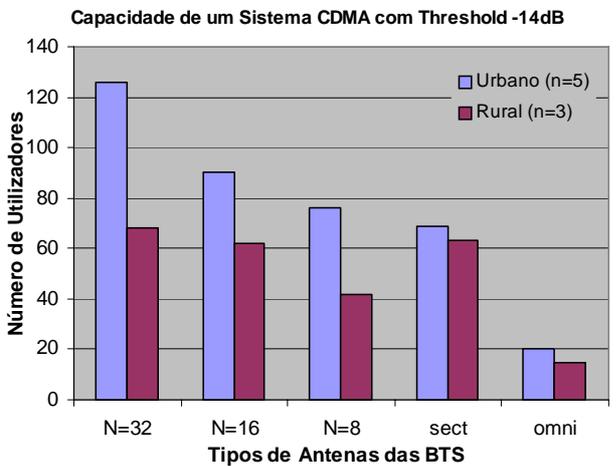


Fig. 15 – Capacidade do sistema CDMA

A capacidade do sistema é caracterizada segundo um valor mínimo de *C/I*. Este valores obtém-se a partir da expressão [7]:

$$\frac{E_b}{N_o} = \frac{C}{I} G_p \frac{1}{v} \quad (10)$$

Considerando um factor de actividade de 100%, que corresponde à percentagem de utilizadores activos na célula, controlo de potência ideal,  $G_p = 128$  e modulação *QPSK*, para um  $E_b/N_o = 7dB$  (tal como no sistema *IS-95*)

obtém-se um  $BER$  de  $10^{-3}$ , portanto o valor de  $C/I$  é -14dB. Para estas especificações obtém-se os resultados apresentados na Fig. 15.

Todos os resultados apresentados nesta secção têm em conta parâmetros ideais, mas na realidade, o controlo de potência é imperfeito pelo que os valores poderão sofrer uma variação segundo a Tab. 3 [6].

Desvio Padrão do controlo de Potência (dB)	Redução na Capacidade (%)
0	0
1.0	3
1.5	8
2.0	13
2.5	20

Tab. 3 – Influência do controlo de potência na capacidade

Com antenas inteligentes pode-se aumentar a capacidade do sistema, célula a célula, apenas onde é necessário. Essa facilidade permite responder às características de cada sector com diferentes cargas de tráfego (cargas não balanceadas). Variando o tamanho e orientação de cada sector, este tipo de sistema permite redistribuir o tráfego pelos vários sectores, reduzindo assim a probabilidade de bloqueio, na qual se traduz no aumento directo da capacidade, ver Fig. 16 [7].

Estas antenas são controladas por *software* e permitem responder às variações de tráfego em tempo real [8].

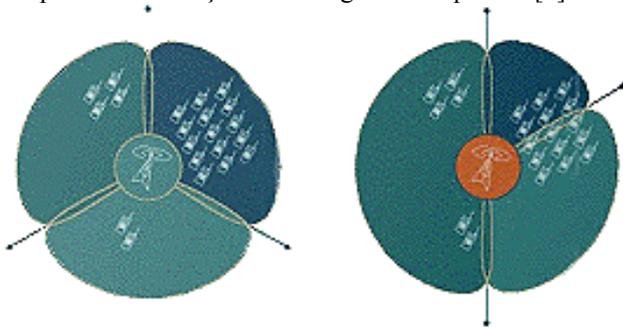


Fig. 16 – Ilustração do funcionamento das antenas inteligentes

## VII. CONCLUSÃO

Para sistemas  $FTDMA$ , alterando um cluster de 3 células para 4 e 7 células, verifica-se um aumento do nível de  $C/I$  da ordem dos 3dB e 5dB respectivamente. Tais aumentos devem-se ao facto de que aumentando o número de células do *cluster*, aumenta-se a distância de reuso fazendo com que os sinais de co-interferência sejam mais atenuados ao longo do seu percurso. Isto conduz a uma melhoria da qualidade das comunicações, e eventualmente um aumento da capacidade. Viu-se ainda que sectorizando essas células em 3 e 6 sectores, há um aumento de  $C/I$  cerca de 6dB e 11dB respectivamente. Sectorizando o móvel com o mesmo esquema de sectorização das BTS, melhora-se entre 1 e 2dB o  $C/I$ . Aplicando a técnica de formatação adaptativa de feixe  $SDMA$ , viu-se que o nível

de interferência obedece a uma determinada probabilidade, ou seja, existem zonas na célula e instantes de tempo em que o móvel não recebe nenhum sinal de interferência co-canal, além de se poder replicar o mesmo canal físico, o que aumenta ainda mais a capacidade do sistema; a eficiência espectral pode duplicar ou quadruplicar em certos casos. Em sistemas  $CDMA$ , esta técnica pode chegar a multiplicar por 6 o número de utilizadores suportados numa única célula. Todos estes aumentos são, claro está, em relação a um sistema omnidireccional.

## VIII. REFERÊNCIAS

- [1] ERA Technology, "Report on the Benefits of Adaptive Antennas for Cells Architectures", September 1995
- [2] William C. Y. Lee, "Mobile Communications Design Fundamentals", Wiley-Interscience, 1993
- [3] Asha Mehrotra, "Cellular Radio Performance Engineering", Artech House, 1994
- [4] Theodore S. Rappaport, "Wireless Communications Principles and Practice", Prentice Hall, 1996
- [5] D. Parsons, "Land Mobile Radio Channel", Prentech Press, 1992.
- [6] Ramjee Prasad, Tero Ojanpera, "Wideband CDMA for 3<sup>rd</sup> Generation Mobile Communications", Artech House, 1998
- [7] Samuel C. Yang, "CDMA RF System Engineering", Artech House, 1998
- [8] Martin Feuerstein, "Phased-Array Smart Antennas Increase Capacity in CDMA Networks", Metawave Communications, June 1, 1999. <http://news.wirelessdesignonline.com/design-features/19990106-9711.html>
- [9] Lowell Anderson, "A Smart Solution", Wireless Review, March 15, 1999 <http://www.wirelessreview.com/90315/feat22.htm>