

CAPÍTULO 2

CONCEITOS DA TELEFONIA CELULAR

2.1 SISTEMA DE COMUNICAÇÃO MÓVEL

O primeiros sistemas de comunicação por rádio móvel possuíam uma única estação base, com a antena em região elevada da cidade e alta potência de transmissão, cobrindo uma grande área contendo todo o espectro de frequências. Como a comunicação era restrita à área coberta por uma única antena, o tráfego oferecido era limitado ao espectro de frequências disponível, ou seja, ao número de canais disponíveis. Os sistemas deveriam estar geograficamente separados para evitar a interferência co-canal, mas isto gerava descontinuidade das chamadas em andamento sempre que o usuário necessitava de percorrer duas áreas de serviço distintas operando sua Estação Móvel (EM).

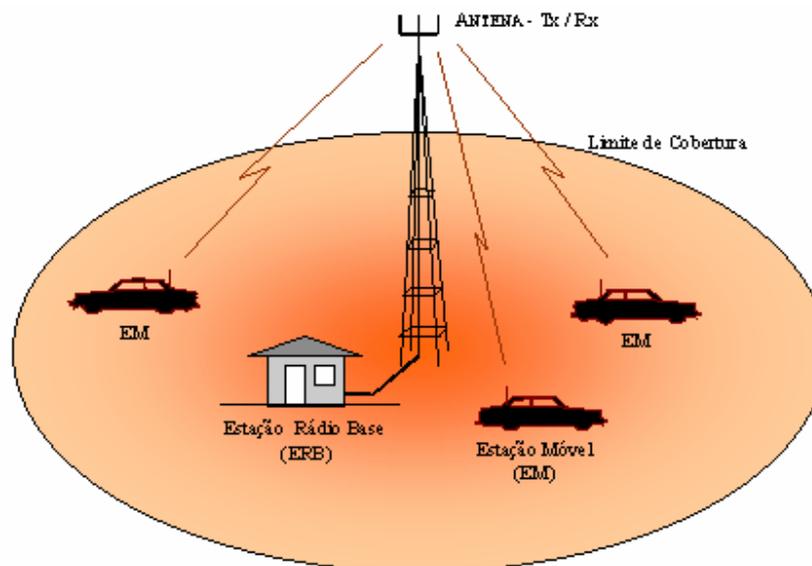


Figura 2.1: Sistema de rádio móvel convencional.

Um sistema de comunicação móvel celular utiliza o reuso de um mesmo conjunto de canais para conseguir atender ao tráfego pelo uso de um grande número de Estações Rádio Base (ERB). Chama-se *célula* a região iluminada por uma ERB e atendida por um grupo de

canais e *área celular* como aquela coberta pela potência mínima para comunicação adequada

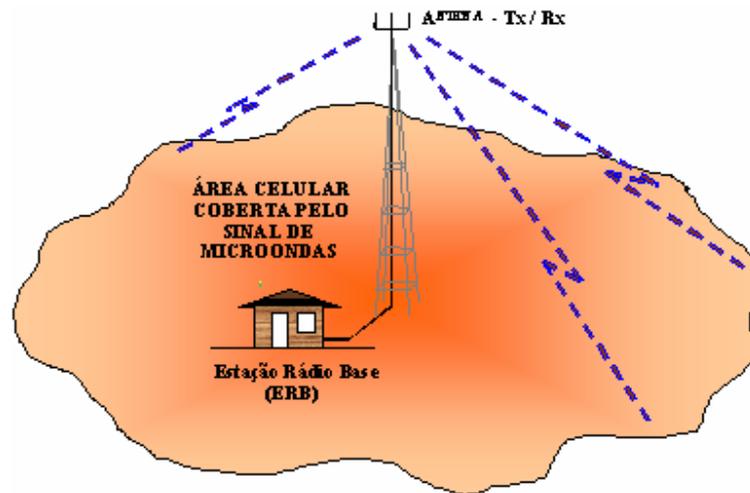


Figura 2.2: Conceito de célula.

O reuso de frequência é feito dividindo-se todo o espectro disponível em grupos de frequências. Estes grupos são utilizados em células separadas entre si o suficiente para não haver interferência. As células que contêm o mesmo grupo de canais são denominadas co-células ou células co-canais.

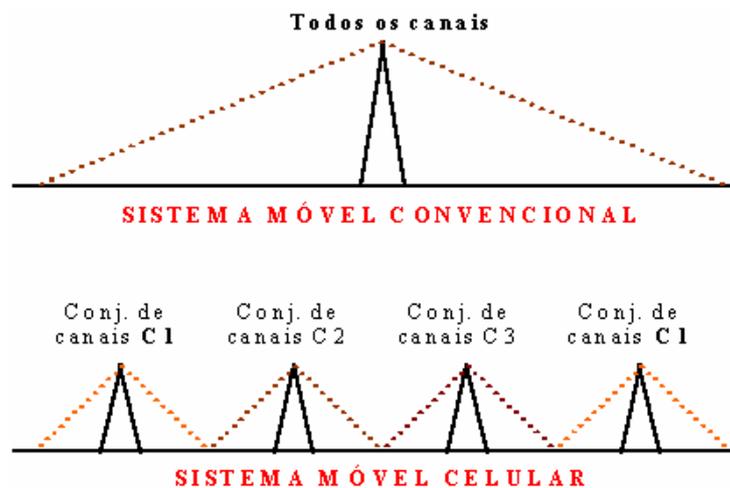


Figura 2.3: Conceito de reuso.

Define-se *padrão de reuso* como o número de células adjacentes que reagrupam todo o espectro original, ou seja, o número de grupos de frequência. Quanto menor o padrão de

reuso, maior o número de canais por grupo, portanto mais canais por célula e maior a quantidade de tráfego oferecido por cada célula.

Para que haja a reutilização de uma frequência em outra área é necessário garantir que o sinal transmitido por uma ERB não interfira na área celular coberta por outra. Para isto a área de serviço é dividida em *Clusters* contendo todo espectro disponível.

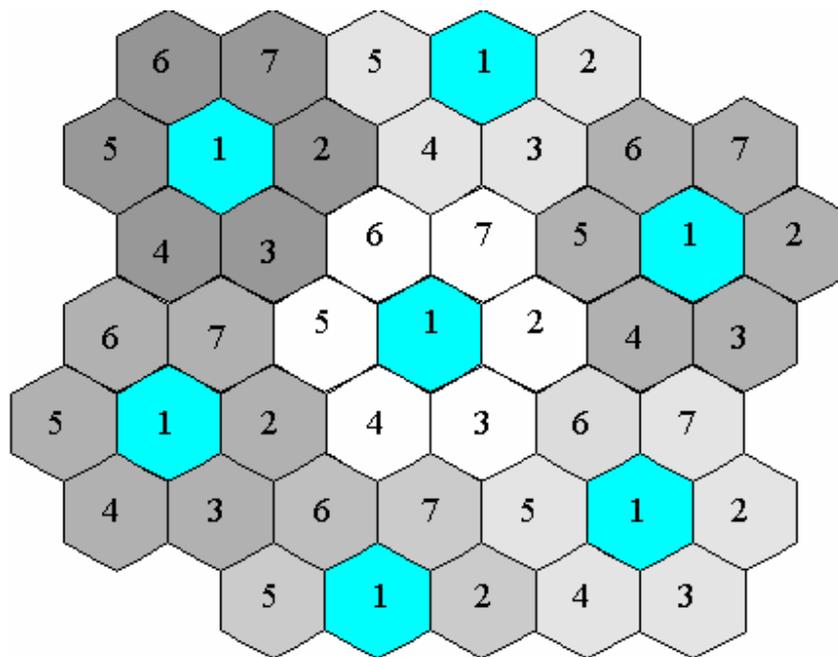


Figura 2.4: Conjunto de *Clusters*.

O padrão hexagonal é escolhido para a representação das células, mas sabemos que devido as condições de relevo do ambiente de propagação temos áreas celulares disformes, inclusive tendo seus contornos se sobrepondo como mostra a **Fig. 2.5**. A primeira vista isto pode parecer um inconveniente ao sistema. Na verdade estamos diante de uma grande "oportunidade de negócio".

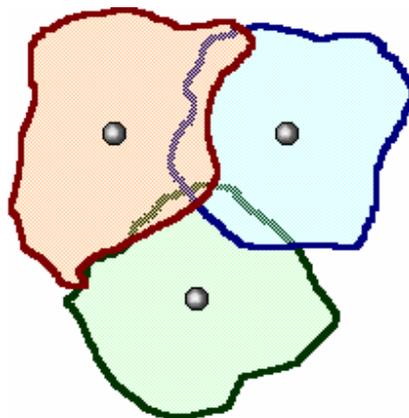


Figura 2.5: Sobreposição Celular.

Verifica-se nestas áreas de sobreposição uma maior oferta de tráfego, onde a EM pode ter comunicação adequada com mais de uma ERB. Técnicas de encaminhamento alternativo de tráfego fazem uso destas imperfeições, muitas das vezes até provocadas, para aumento do tráfego oferecido em regiões críticas.

2.2 ARQUITETURA DO SISTEMA

Um sistema celular é composto basicamente de:

- (a) Estações Móveis (EM ou UM)
- (b) Estações Rádio Base (ERB ou BTS),
- (c) Controladoras de Estações Rádio Base (CERB ou BSC),
- (d) Centrais de Comutação e Controle (CCC ou MSC),

Embora não conste entre os componentes da rede celular, pode-se também incluir a Rede de Telefonia Pública Comutada (PSTN), devido à sua interligação estreita com a rede de telefonia celular.

A escolha da tecnologia adequada depende diretamente do serviço a ser oferecido. Do ponto de vista da operadora, a alternativa deve oferecer facilidade de planejamento, administração e gerenciamento da rede em contraste com os custos.

As soluções diferem na topologia básica, na frequência de rádio, na modulação, no protocolo de comunicação, no padrão tecnológico, na disponibilidade para o comércio em

massa, nos recursos de software, na área de serviço e na técnica de acesso ao meio, ou seja, na forma pela qual os usuários repartem o espectro de frequências.

2.2.1 Estação Móvel (EM ou UM)

A Estação Móvel é o terminal móvel do usuário composto por monofone, teclado, unidade de controle, bateria, unidade de rádio e antena. Sua função principal é fazer a interface eletromecânica entre o usuário e o sistema. Estes equipamentos podem ser classificados como portátil, veicular ou transportável, dependendo de suas dimensões e capacidade de potência e carga (bateria).



Figura 2.6– Unidade Móvel

Algumas características e funções variam dependendo do modelo oferecido pelos diversos fabricantes existentes.

As funções básicas são comuns a todos aparelhos:

- Realizar a interface entre o usuário e o sistema.
- Realizar a varredura dos canais de controle, escolhendo o melhor sinal para sintonia.
- Converter sinais de áudio em sinais de RF, e vice-versa.
- Responder a comandos enviados pelo sistema.
- Alertar usuário sobre chamadas recebidas
- Alertar o sistema sobre tentativas de realização de chamadas.

Alguns exemplos de mensagens de controle trocadas entre móvel e base são:

- pedido do móvel para acessar um canal e efetuar uma chamada;
- registro do móvel na área de serviço atual (outra CCC);
- mensagem de alocação de canal para o móvel, oriunda da estação base;

- mensagem de handoff oriunda da estação base, para que o móvel sintonize outro canal.

Ressalta-se nesse ponto que o que está sendo chamado de “canal” constitui-se na dupla link direto e reverso.

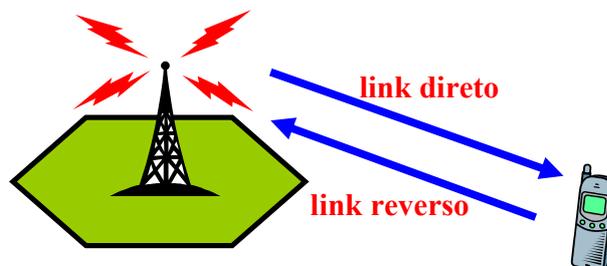


Figura 2.7 - Comunicação entre terminal móvel e base

Um fator importante com relação às unidades móveis é que estas devem seguir um determinado padrão para que haja uma independência e compatibilidade entre os equipamentos de diferentes fabricantes.

Toda Estação móvel é composta por três partes principais:

- Bloco de Lógico;
- Bloco de RF (Rádio);
- Bloco de Interação com o usuário (Handset).

O Bloco Lógico é composto pelos microprocessadores e memórias, que executam as seguintes funções:

- Sinalizar controle para Estação Rádio Base;
- Controlar os Blocos de RF e Handset.

O Bloco RF é utilizado para comunicação com a Estação Base. Dividi-se em:

- Circuito Transmissor (Tx);
- Circuito Receptor (Rx);
- Circuito Seletor de Canais.

2.2.2 - Estação Radio Base (ERB ou BTS)

A Estação Rádio Base é a repetidora da informação de voz e dados de controle em meio eletromagnético. Na verdade ela é responsável em fazer a interface entre uma única CCC e diversas Estações Móveis. Cada ERB pode suportar até 154 canais de voz

dependendo do fabricante, do sistema e de sua aplicação. (**obs: este é um valor médio, podendo ter mais ou menos**).

Cada ERB é composta de um sistema de rádio contendo receptores (Rx), transmissores (Tx), combinadores, divisores, filtros, antenas, um sistema de processamento e controle contendo o processador de controle, multiplexadores (MUX), cabos coaxiais, painel de controle e da interface com a CCC por um MUX a 2Mbps ou taxa maior.

A ERB é responsável por monitorar o sinal recebido de uma EM comunicando à CCC qualquer alteração indesejável em relação a potência ou a interferência no sinal recebido. Outras funções de sinalização também são agregadas à ERB, como o controle de potência das EM, e outros comandos recebidos da CCC.

A ERB desempenha diversas funções. São elas:

- Prover a interface de rádio entre as EMs e o sistema;
- Converter sinais de RF em áudio, e vice-versa;
- Controlar e informar as EMs em sua área de cobertura;
- Verificar e informar a qualidade de sinal das chamadas sobre o seu controle;
- Verificar e informar a entrada em operação de novas EMs sob seu controle;
- Responder a comandos recebidos da CCC.

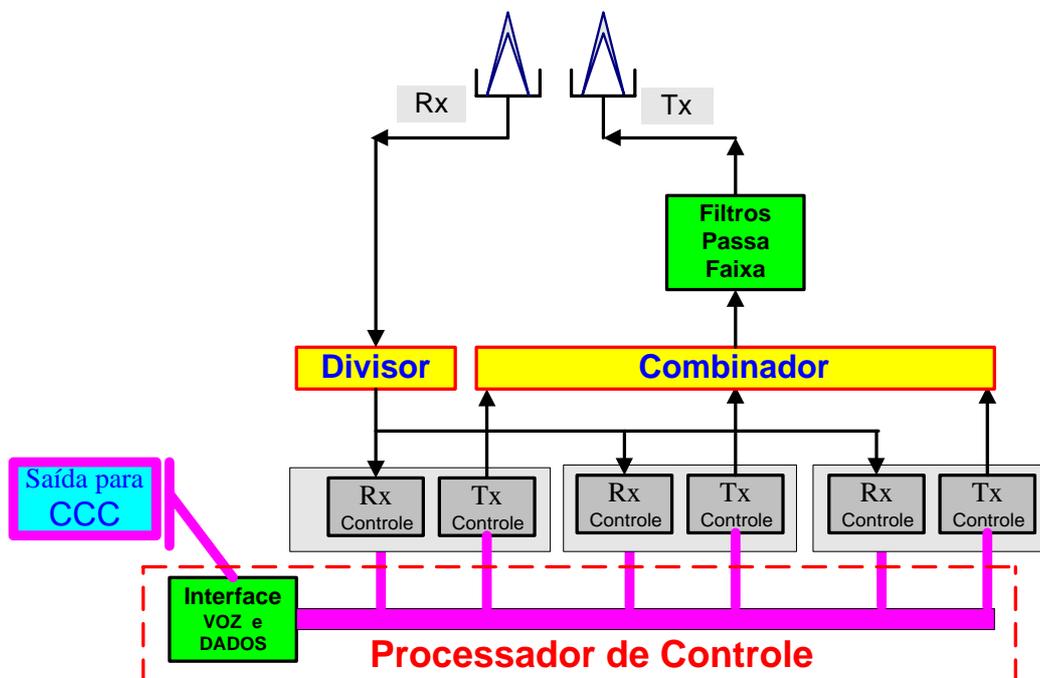


Figura 2.8: Estação Rádio Base

A Estação Rádio Base está basicamente dividida em quatro partes. São elas:

- Sistema de Controle de Potência;
- Circuitos de sinalização e alarme;
- Circuitos de Rádio Frequência (RF);
- Torre e antenas.

2.2.3 - Controladora de Estações Rádio Base (CERB ou BSC)

As Controladoras de Estações Rádio Base fazem apenas a interface entre um conjunto de ERBs na qual ela controla e uma CCC (MSC) em alguns sistemas. Na verdade a BSC executa algumas funções da CCC, o que descarrega o processamento centralizado nas CCCs. Algumas destas funções são a avaliação do nível de potência do sinal, o controle da relação sinal/ruído nos canais, a monitoria da Taxa de Erro de Bit (*BER*) dos canais, o Controle de várias ERBs, etc.

Normalmente o BSC é utilizada em redes GSM, onde sua estrutura de rede tem MSC e BSC que executam as mesmas funções que uma CCC no sistema CDMA (IS-95) ou TDMA (IS-136). Mas a frente estudaremos com mais profundidade estas redes.

2.2.4– Central de Comutação e Controle (CCC ou MSC).

A Central de Comutação e Controle faz a interface entre o Sistema Móvel e Rede Pública. Sua estrutura é parecida com a das centrais telefônicas de comutação automática (CPAs). Alguns fabricantes adaptaram suas CPAs ao sistema móvel sendo que em alguns casos apenas modificações a nível de software foram consideradas. Pelas características de modularidade, as CCCs podem ser expandidas gradualmente até atingir sua capacidade máxima de gerência de tráfego ou ERBs.

Dado que existem vários padrões, arquiteturas, serviços e sistemas, padronizou-se o protocolo de comunicação *IS-41* para interligar CCCs de fabricantes diferentes.

Na CCC (MSC) onde normalmente se encontra o *Home Location Register* (HLR), que é o registro de endereços e identifica cada móvel pertencente a esta área de localização;

do *Visit Location Register* (VLR) que é o registro de endereços de visitantes e identifica as EMs visitantes de outra área de localização ou área de serviço.

A Central de Controle e Comutação é o cérebro do sistema de comunicação móvel celular. A unidade de controle (Controlador) de uma CCC pode ser entendida como computador que controla funções específicas de uma sistema de comunicação móvel celular, tal como alocação de frequência, controle do nível de potência das EMs, procedimento de *handoff*, controle de tráfego, rastreamento, procedimentos de registro de EMs locais, localização e tarifação do sistema. Portanto, a capacidade de processamento da unidade de controle nas CCCs deve ser maior que a de sistemas de telefonia fixa.

A unidade de comutação é similar ao das centrais telefônicas fixas, mas seu processamento é diferente. Na comutação telefônica fixa, a duração da chamada não é fator relevante ao sistema, enquanto que em um sistema de comunicação móvel celular essa duração é função do gerenciamento dos canais e do número de *handoffs* processados.

Resumindo, a CCC é a parte fundamental no Sistema de Comunicação Móvel, responsável por coordenar todas as funções e ações ligadas ao estado das chamadas e ao sistema.

As principais funções de uma CCC são:

- Realizar o "Link" entre a rede telefônica e o sistema móvel celular;
- Comunicar-se com outros padrões de sistemas celulares;
- Controlar as ERBs;
- Monitorar e Controlar as chamadas;
- Interligar várias ERBs ao sistema;
- Supervisionar o estado do sistema;
- Comutar e controlar o "handoff" de sistemas;
- Administrar o sistema.

Todos estes sistemas ainda podem estar em arquiteturas centralizada ou descentralizada de acordo com as condições de contorno do projeto. Como uma CCC é capaz de controlar diversas áreas de serviço, podemos ter a arquitetura centralizada do

sistema como mostra a **Fig. 2.9**. Para áreas com alta densidade de tráfego ou grande número de ERBs, devido às limitações da CCC, podemos fazer uso da arquitetura descentralizada onde várias CCCs fazem a comutação e o controle de ERBs na mesma área de serviço como na **Fig. 2.10**.

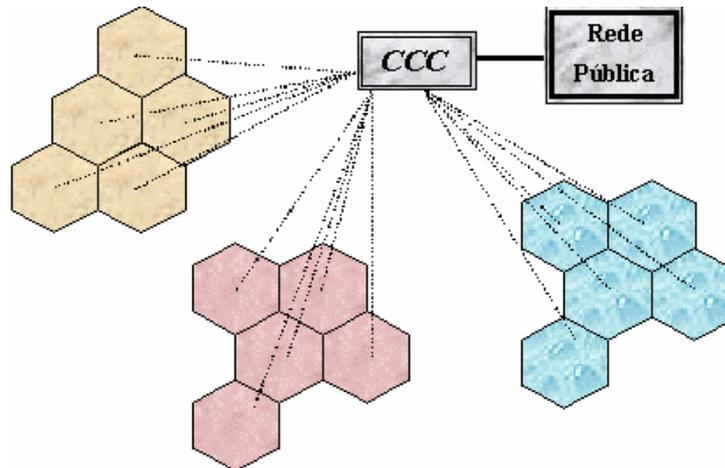


Figura 2.9: Arquitetura centralizada

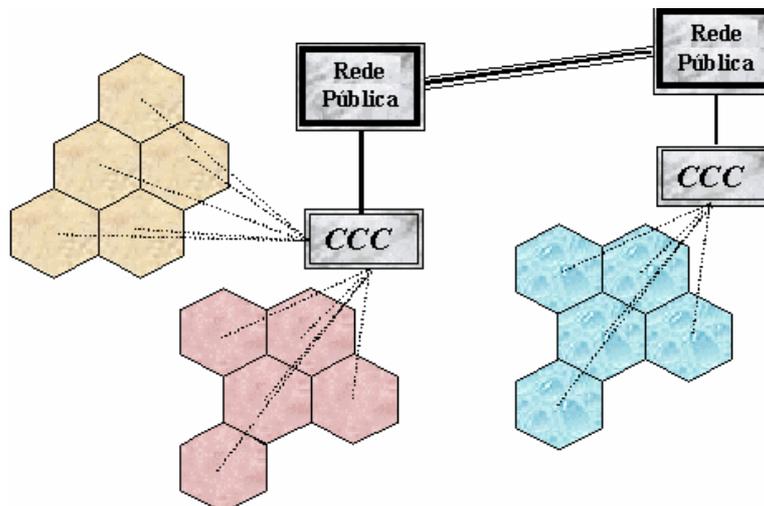


Figura 2.10: Arquitetura descentralizada

2.4 PADRÃO DE REUSO

A idéia básica do conceito de celular é o reuso de frequência, em que o mesmo subconjunto de canais pode ser reutilizado em diferentes áreas geográficas suficientemente distantes umas das outras, de forma que a *interferência co-canal* (canais de mesmo

número) esteja dentro de limites toleráveis. O conjunto de todos os canais disponíveis no sistema é alocado a um grupo de células, que constitui o *cluster*

. Para efeito de planejamento, as células assumem o formato hexagonal, sendo o hexágono a figura geométrica regular ladrilhável que mais se aproxima de um círculo.

2.4.1 Cluster e Co-células

Um *cluster* é um conjunto de células no qual são distribuídos todos os grupos de canais disponíveis, mantendo-se um padrão geométrico para que se respeite uma distância mínima de reuso (D) entre os canais.

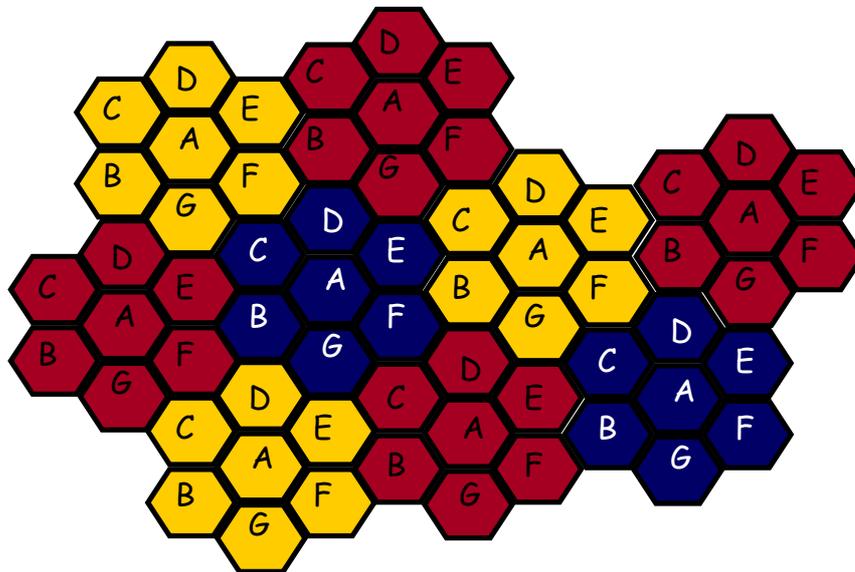


Fig.2.11: Cluster e co-células

Co-células são células que utilizam o mesmo grupo de canais.

2.3.2- Interferência

Em um sistema de comunicação via rádio, a interferência é um dos fatores mais críticos, definindo na maioria das vezes a capacidade do sistema.

Em um sistema celular existem basicamente dois tipos de interferência:

- **Interferência co-canal:** como os sistemas celulares utilizam os mesmos canais em localidades diferentes, existe a possibilidade de um canal interferir no outro. Portanto a distância entre células que utilizam os mesmos canais deve ser suficiente para que a atenuação sofrida por estes canais evite a interferência mútua.

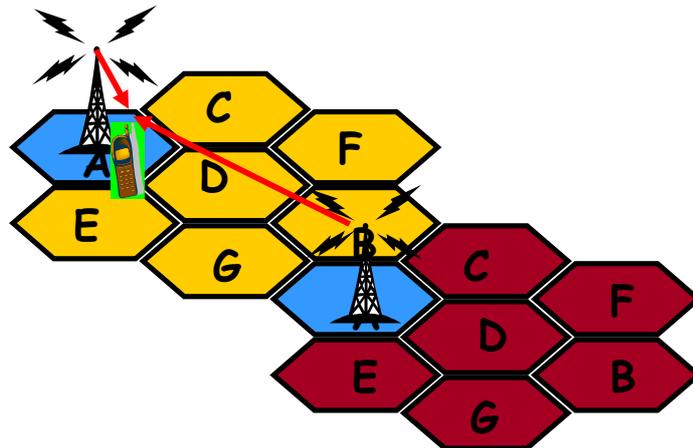


Fig.2.12 – Interferência co-canal

- **Interferência por canal adjacente:** na prática a região de cobertura de uma célula não é perfeitamente definida. Sendo assim, células vizinhas podem ter suas áreas de cobertura sobrepostas. Devido a imperfeições dos filtros receptores e/ou dos circuitos moduladores um canal vizinho pode interferir em outro, interferência denominada de canal adjacente. Uma maneira de minimizar a interferência por canal adjacente é evitar a utilização de canais próximos em frequência em células vizinhas.

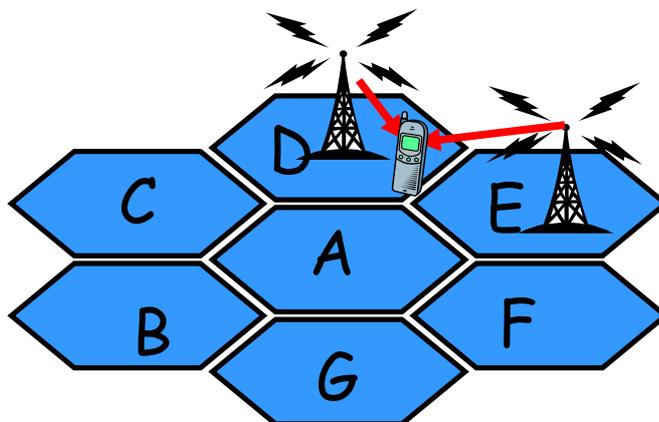


Fig.2.13 – Interferência por canal adjacente

2.3.3 Reuso de Freqüência

Para a realização do reuso de freqüências os canais disponíveis são agrupados em K grupos, onde K é o fator de reuso de freqüências e define o número de células dentro de um *cluster*. O fator K é calculado através da seguinte equação:

$$K = i^2 + i.j + j^2 \quad \text{Eq. 2.1}$$

Sendo necessário apenas garantir que i e j sejam inteiros.

I	J	K
1	0	1
0	1	1
1	1	3
2	0	4
2	1	7
2	2	12

Tabela 2.1

Na prática, todos os sistemas celulares utilizados têm o seu tamanho de cluster definido. Os mais comuns são *clusters* com K de 4 ou 7.

Um outro parâmetro importante no reuso de freqüências é a relação entre a distância de reuso e o raio das células, conhecida como *cochannel reuse ratio*, que leva em consideração a capacidade de tráfego e a qualidade do sinal.

A razão D/R , da distância de reuso e do raio da célula, pode ser calculada pela seguinte equação:

$$\frac{D}{R} = \sqrt{3.K} \quad \text{Eq. 2.2}$$

A razão D/R é apenas uma medida qualitativa da capacidade e do padrão de interferência do sistema celular. Os níveis de interferência serão efetivamente calculados, conhecendo-se o *layout* do sistema, as distâncias entre as células e as potências das estações rádio base.

O aumento no fator de reuso aumenta a distância entre as células que utilizam os mesmos canais, diminuindo a interferência (qualidade do sinal melhora). Porém, a

capacidade do sistema diminui, pois a região de cobertura fica maior para o mesmo número de canais.

Por outro lado, a redução do fator de reuso provoca um aumento da interferência (qualidade do sinal piora), mas aumenta a capacidade do sistema.

Fazendo uma análise superficial, podemos observar que a medida que aumentamos o fator de reuso K , ou seja, o número de células por *cluster*, estaremos diminuindo o número de canais por célula, diminuindo o tráfego oferecido por célula. Por outro lado, estaremos aumentando a relação D/R (*podemos entender que estamos aumentando a distância de reuso ou que estamos diminuindo o raio das células*). Isto implica na diminuição da interferência entre co-células, uma vez que a potência transmitida decresce com a distância.

Agora, considerando a diminuição do fator de reuso estaremos aumentando tráfego nas células pelo maior número de canais. A contraposição se dá na diminuição da relação D/R implicando em menor qualidade do sinal recebido. A Tabela 2.2 ilustra bem as relações do fator de reuso com o tráfego e qualidade do sinal recebido devida à interferência co-canal.

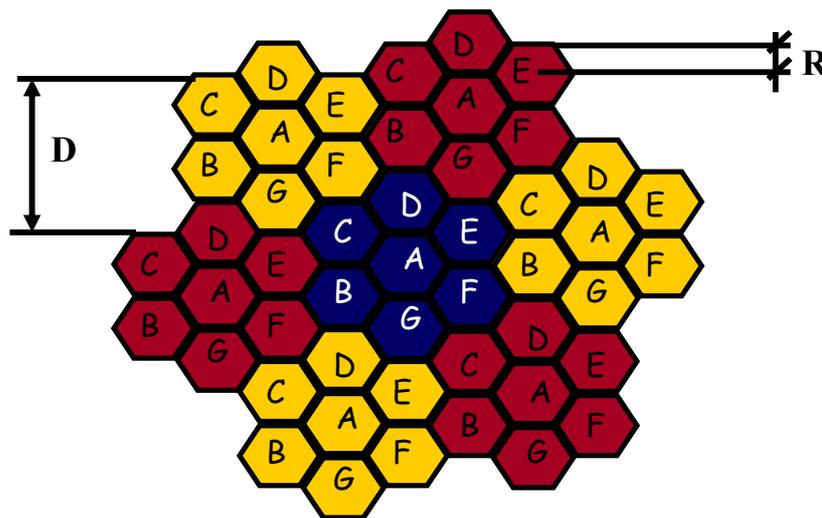


Fig.2.14: Distância de reuso

Padrão de Reuso (N)	Relação D/R	Canais por Célula	Tráfego por Célula	Qualidade na recepção
1	1.73	395	<i>alto</i>  <i>baixo</i>	<i>baixa</i>  <i>alta</i>
3	3.00	131		
4	3.46	98		
7	4.58	56		
12	6.00	32		

Tabela 2.2: Aspectos do Padrão de Reuso.

Na verdade podemos utilizar células de outro formato que não o hexagonal. Para o planejamento de microcélulas em região urbana, por exemplo, padrões triangular, quadrado ou até em forma de diamante podem ser utilizados. Assim, dependendo do polígono escolhido formamos nova geometria do sistema, podendo ter padrões de reuso diferentes daqueles dados pela **Equação 2.2**.

Assim quando o número de usuários é muito grande a substituição de uma única célula de alta potência por várias células de baixa potência, reutilizando as frequências se faz necessário.

Considere agora, um sistema celular com S canais full-duplex disponíveis. Se o sistema adota o padrão um padrão de K células por cluster, os S canais devem ser distribuídos entre as K células de acordo com:

$$S = K.N \quad \text{Eq. 2.3}$$

Onde N é o número de canais por célula. Se agora cobrirmos a região com M clusters idênticos, teremos um número total de canais “full-duplex” dado por:

$$C = M.K.N = M.S \quad \text{Eq. 2.4}$$

Onde C é a capacidade do sistema.

Exemplo:

Considere um sistema celular com:

- Largura de faixa de 33 MHz
- FDD
- Canais de voz e de controle full-duplex
- Canal simplex de 25 KHz

Determine o número de canais por cluster com :

- a) $K= 4$ células
- b) $K= 7$ células
- c) $K= 12$ células

Supondo que agora 1 MHz deste espectro seja alocado para canais de controle, determine uma distribuição equivalente de canais de controle e tráfego(voz) em cada célula para cada um dos três fatores de reuso acima.

2.3.4 Handoff (Handover)

Os telefones celulares móveis podem sair da área de cobertura de uma célula (BTS) e entrar na de outra. A pedido da BTS, todos os terminais estão constantemente enviando medidas das condições dos sinais que recebem. Essas medidas são retransmitidas pelas BTSs à CCC.

Um telefone envia, por exemplo, as medidas que indicam as condições dos sinais que está recebendo à BTS em que atualmente está. Se estas medidas começam a mostrar degradação, a BTS “*compreende*” que o telefone está afastando-se. Neste ponto a BTS envia à CCC um pedido de *handoff* para aquele telefone. A CCC, por sua vez, ordena a todas as BTS's da região, que informem a intensidade do sinal que estão recebendo do telefone em questão. O handoff pode acontecer também entre setores de uma mesma célula. Assim um handoff é uma função que permite manter a continuidade de uma conversação quando o usuário passa de uma célula para outra. No caso do sistema AMPS o handoff causava uma interrupção na comunicação, pelo fato da transmissão ser contínua e que deveria ser inferior a 0,5 segundos, já nos sistemas digitais o handoff é praticamente imperceptível, como será mostrado mais a frente.

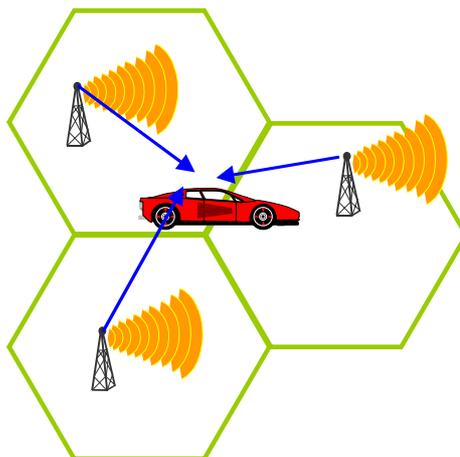


Fig.2.15: Exemplo de handoff

2.3.5 Roaming

Roaming significa “em locomoção”, indicando o processamento de uma chamada telefônica celular móvel em uma CCC, a qual não é a de origem do assinante celular móvel que está participando de ligação telefônica, ou seja, este celular está registrado em uma outra CCC.

Quando a estação móvel entra na área de controle de uma CCC que não é a sua domiciliar, essa central é conhecida como CCC “visitada” e o assinante, como visitante. As chamadas que são destinadas a este assinante em roaming serão roteadas e comutadas pela CCC-V. Quando um assinante está em *roaming* é feito um anúncio da chegada deste celular “visitante” a esta CCC visitada e esta lhe devolve a identificação da área visitada através do canal de controle, surgindo a mensagem “ROAM” no display do celular visitante.

Após o reconhecimento deste celular “visitante”, ao receber ou solicitar uma chamada telefônica a CCC “visitada” entra contato com a CCC de origem do celular “visitante” e recebe desta, os dados deste assinante, como por exemplo, número de série do celular, categoria do assinante, etc. e permite a realização da ligação telefônica.

A sinalização entre as CCCs pode ser implementada, por exemplo, de acordo com o protocolo de sinalização por canal comum número 7 (SS7) do ITU-T, ou ainda por um protocolo IS-41, definido do especificamente para comunicação direta entre CCCs, ou ainda através da RTPC.

A mudança de uma BTS ligada a uma CCC a outra BTS ligada à outra CCC, durante uma chamada em progresso é chamado de handoff entre centrais. Em alguns sistemas, as áreas de controle podem ainda ser subdivididas em áreas de localização e quando a EM passa de uma área de localização para outra, ela deve informar a CCC sobre sua nova localização. Esta tarefa é conhecida como registro forçado ou como registro de área de localização e, no caso, a busca da EM é executada somente nas células que compõem a área de localização.

O registro forçado implica na atualização dos arquivos da CCC a cada intervalo de tempo predefinido. Os celulares executam esta rotina a partir de uma semente enviada pela BTS, para o envio da informação de localização. O período para envio dos dados é definido pelo operador da central. É importante salientar, que nestes procedimentos de atualização periódica pode sobrecarregar o processador da CC e elevar o grau de serviço. O registro por área de localização é feito toda vez que o usuário cruza um limite preestabelecido pelo operador do sistema.

2.3.6 - Configuração do Sistema Móvel Celular

A estação radiobase é conectada com a CCC por intermédio de circuitos ponto a ponto. A estação tem como atividade principal trabalhar como repetidora da informação de voz e de dados, bem como supervisionar a qualidade de enlace de transmissão durante a conversação.

As conexões entre a ERB e a CCC são feitas normalmente por troncos de linhas físicas (PCM), normalmente E1 ou múltiplos deste, sendo também possíveis conexões por rádio e fibras ópticas. As CCCs são geralmente conectadas as centrais da rede fixa (RTPC) por fibra óptica.

2.4 ASPECTOS DE TRÁFEGO

Os sistemas de comunicação móvel celular são projetados para que as chamadas realizadas tenham boa probabilidade de sucesso nas horas de maior movimento do sistema. Para isto define-se o Grau de Serviço (GOS), também conhecido como de Probabilidade de Bloqueio (P_B), e que representa o percentual de tentativas de comunicação mal sucedidas pelo usuário devido ao congestionamento do sistema, ou seja, é a relação entre o tráfego perdido e o tráfego oferecido. Valores típicos de GOS em sistemas de telefonia celular atingem de 2% a 5%.

A Hora de Maior Movimento (HMM) é definida como o período de 60 minutos do dia nos quais a intensidade de tráfego de um grupo de canais atinge o seu valor máximo, tomada a média dos valores nos dias da semana. O GOS determina a quantidade de troncos e equipamentos de comutação necessários para atender adequadamente o tráfego telefônico durante as horas de maior movimento. Podemos em certas condições, considerar a HMM do sistema, de uma *Cluster* ou da célula mais congestionada

A Intensidade de Tráfego é uma medida de densidade, portanto adimensional, representada pela unidade *Erlang*. A Intensidade de Tráfego indica o número médio canais ocupados ao mesmo tempo, ou seja, é calculado pela relação entre a somatória dos tempos de ocupação de N canais e o tempo de observação. Um canal ocupado continuamente corresponde 1 *Erlang*.

Algumas definições:

- **Tempo de “Set-up” (Alocação)**: Tempo necessário para alocar um canal de rádio disponível para o usuário que solicitou a chamada.
- **Chamada Bloqueada ou Perdida**: Chamada que não pode ser completada devido a congestionamento.
- **Tempo de Holdind**: Duração média de uma chamada (denotado por μ em segundos).
- **Intensidade de tráfego**: Ocupação média de um único canal ou de múltiplos canais (denotado por A e medida em Erlang).
- **Erlang**: Quantidade de intensidade de tráfego em um canal completamente ocupado.

1 Erlang (Erl) significa:

- 1 hora de chamada/hora;
- 1 min de chamada/min.

Por exemplo: um canal de rádio que é ocupado 30 min durante 1 hora possui um tráfego de 0,5 Erl.

- **Carga:** Intensidade de tráfego de todo Sistema. Assim, um sistema com 100 canais idênticos ao do exemplo anterior tem uma carga de 50 Erl.
- **Taxa de solicitação:** Número médio de solicitações de chamadas por unidade de tempo. (denotada por Q chamadas x segundos⁻¹). Podendo este tempo ser minutos ou horas.

Ex: $Q = 0,2 \text{ s}^{-1} \rightarrow$ significa 0,2 chamada a cada segundo, em média.

Várias equações tem sido sugeridas para o estudo do tráfego móvel celular. Um modelo bem aceito, é conhecido como fórmula *Erlang-B*. Esta fórmula relaciona o GOS com o número de canais em um grupo (N) e o tráfego oferecido por este grupo (A). Um estudo mais aprofundado sobre tráfego será descrito mais adiante onde se apresenta também a fórmula *Erlang-B*.

O objetivo de qualquer sistema é atender o maior número de assinantes possível mantendo um aceitável GOS. No caso de dimensionamento prático de um sistema deve-se observar a Acessibilidade e Graduação, o perfil do tráfego, suas propriedades estatísticas e GOS exigido.

Apresentamos a seguir algumas definições básicas que envolvem o estudo de tráfego:

a) Tempo de Ocupação (t)

Tempo total em que uma dada chamada ocupa um canal.

b) Volume de Tráfego (V)

Soma dos Tempos de Ocupação de todos os canais de um sistema dada pela expressão,

$$V = \sum_{i=1}^N t_i \quad \text{Eq.2.5}$$

onde N é o número total de canais do sistema e t_i é o tempo de duração da chamada i .

c) Intensidade de Chamadas (I)

Número de chamadas que ocorrem em um conjunto de canais em um dado intervalo de tempo.

$$I = n/T \text{ [chamadas por hora] ,} \quad \text{Eq.2.6}$$

onde n é o número de chamadas e T é o período de observação

d) Tempo Médio de Chamada (t_m)

A média dos tempos de ocupação por um dado intervalo de tempo, neste caso,

$$t_m = V/n. \quad \text{Eq.2.7}$$

e) Hora de Maior Movimento (HMM)

O período de uma hora do dia no qual a Intensidade de Tráfego de um grupo de canais atinge o seu valor máximo.

Os sistemas de comunicação móvel celular são projetados para que as chamadas realizadas tenham boa probabilidade de sucesso na Horas de Maior Movimento. Neste caso podemos considerar a HMM do sistema, de uma *Cluster* ou da célula mais congestionada.

f) Probabilidade de Bloqueio (P_B)

Percentual de tentativas de comunicação mal sucedidas pelo usuário devido ao congestionamento do sistema, ou seja, é razão entre o número de chamadas entrantes mal sucedidas pelo número total de chamadas entrantes.

g) Tráfego Escoado (A_e)

Porção da Intensidade de Tráfego equivalente às chamadas entrantes ao sistema e que foram atendidas.

h) Tráfego Oferecido (A_o)

Intensidade de Tráfego máxima suportada pelo sistema.

i) Tráfego Requerido (A_r)

Intensidade de Tráfego gerada (requerida) pelos usuários.

j) Tráfego Perdido (A_p)

Intensidade de Tráfego não atendida pelo sistema devido ao congestionamento dos canais no instante da geração da chamada.

l) Grau de Serviço (GOS)

Como dito anteriormente o Grau de serviço pode ser definido como a relação entre o Tráfego Perdido e o Tráfego Oferecido. Na verdade é igual à Probabilidade de Bloqueio. Valores típicos de GOS em sistemas de telefonia celular atingem de 2% a 5%.

O GOS determina a quantidade de troncos e equipamentos de comutação necessários para atender adequadamente o tráfego telefônico durante a Hora de Maior Movimento.

m) Intensidade de Tráfego (A)

Densidade do Volume de Tráfego no tempo. A unidade de Intensidade de Tráfego é o Erlang e representa exatamente uma hora de sistema ocupado em uma hora de observação. A Intensidade de Tráfego pode ser interpretada de três formas:

- *número médio de canais ocupados em uma hora de observação;*
- *tempo necessário para escoamento de todo o tráfego por um único canal e;*
- *número médio de chamadas originadas durante um intervalo igual ao Tempo Médio de Chamada.*

Exemplo 2.1

Considere um sistema com 15 canais. Dado que 2 canais estiveram ocupados por 4 horas cada, 4 canais por 6 horas cada, 4 canais por 10 horas cada e 5 canais por 12 horas cada, tudo isto em um período de um dia de observação. Logo temos:

$$A = \frac{(2 \times 4hs + 4 \times 6hs + 4 \times 10hs + 5 \times 12hs)}{24hs} \rightarrow A = 5,5 \text{ Erl}$$

A definição de volume de tráfego não especifica, entretanto, durante quanto tempo se observa a duração de uma chamada. Para permitir comparações homogêneas é importante ter uma referência de tempo. Para isto divide-se o volume de tráfego V pelo tempo de

observação T. Esta razão denomina-se INTENSIDADE DE TRÁFEGO (A), às vezes chamada apenas de TRÁFEGO, também pode ser definida como:

$$A = V/T \quad \text{Eq.2.8}$$

Cada usuário produz em média uma intensidade de tráfego A_μ dado por:

$$A_\mu = \mu \cdot Q / T \quad \text{Eq.2.9}$$

Onde: Onde Q é o número de chamadas por hora, T é o tempo de observação e μ é o tempo médio de duração de uma chamada realizada por um assinante.

Sem especificar o número de canais, pode-se através do número de usuários (U) estimar o tráfego oferecido total do sistema, por:

$$A = A_\mu \cdot U \quad \text{Eq.2.10}$$

Se especificarmos que o sistema tem C canais e supusermos que o tráfego oferecido é igualmente distribuído entre os C canais, então a intensidade de tráfego por canal, A_c , pode ser dada por:

$$A_c = (U \cdot A_\mu) / C \quad \text{Eq.2.11}$$

Obs: Quando o **tráfego oferecido** for maior que a capacidade máxima do sistema, o **tráfego transportado** será limitado em **C Erlangs**. Neste caso os C canais estarão totalmente ocupados durante todo o tempo.

Os Sistemas de alocação de canais pode ser classificado em :

1. Sistemas sem Fila – Erlang B
2. Sistemas com Fila – Erlang C

2.4.1 Tráfego em um Sistema Celular Sem Fila – Erlang B

Uma maneira simplificada de avaliar a capacidade de tráfego de um sistema celular sem fila deriva da fórmula de *Erlang-B*. A fórmula de *Erlang-B* determina a probabilidade de bloqueio de uma chamada (P_B), sendo uma medida de Grau de Serviço (GOS) de um sistema entroncado que não oferece nenhum tipo de fila de espera aos usuários requisitantes

de chamadas. Esta fórmula considera um número de usuários bem maior que o número de canais e as antes chamadas consideradas perdidas ainda podem ser encaminhadas em rotas alternativas (outras células).

Neste sistema o tempo de *set-up* é zero. A probabilidade de uma chamada ser bloqueada pode ser dada por:

$$GOS = P_B = \frac{A^C}{C! \sum_{i=0}^C \frac{A^i}{i!}} \quad \text{Eq. 2.12}$$

Onde C é o número de canais do sistema, P_B é a probabilidade de bloqueio e A é o tráfego oferecido. O tráfego é expresso em *Erlangs* e significa quantas chamadas o sistema consegue atender dentro de um intervalo normalizado de tempo. Por exemplo, um tráfego de 1 *Erlang* significa uma chamada de 1 unidade de tempo em 1 unidade de tempo (o canal está ocupado durante todo o tempo de observação).

O tráfego em um sistema celular pode ser considerado como o número de assinantes que este sistema pode habilitar.

Uma maneira simplificada de avaliar a capacidade de tráfego de um sistema celular deriva da fórmula de *Erlang-B*. A fórmula de *Erlang-B* determina a probabilidade de bloqueio de uma chamada (P_B), sendo uma medida de Grau de Serviço (GOS) de um sistema entroncado que não oferece nenhum tipo de fila de espera aos usuários requisitantes de chamadas. Esta fórmula considera um número de usuários bem maior que o número de canais e as antes chamadas consideradas perdidas ainda podem ser encaminhadas em rotas alternativas (outras células).

Sendo conhecido o tráfego oferecido por um sistema, que vai depender do número de canais disponível e da taxa de bloqueio considerada, pode-se calcular o número de chamadas por hora que o sistema pode atender, como já descrito anteriormente na Eq. 2.9

$$Q = \frac{A.T}{\mu}$$

Onde Q é o número de chamadas por hora, T é o tempo de observação e μ é o tempo médio de duração de uma chamada realizada por um assinante.

O valor de A é encontrado em tabelas derivadas da fórmula de *Erlang-B*.

Exercício 01

Calcular o número de assinantes para um sistema com 100 células e as seguintes características:

- 1) Cada célula possui 45 canais de voz.
- 2) O tempo médio de duração das chamadas é 1,65 minutos.
- 3) Cada assinante gera em média 1,68 chamadas na hora de maior movimento(HMM).
- 4) A taxa de bloqueio é de 5%.

<i>N (número de canais)</i>	$P_B=1\%$	$P_B=2\%$	$P_B=5\%$	$P_B=10\%$	$P_B=50\%$
1	0,0101	0,0204	0,0526	0,111	1,00
2	0,153	0,223	0,381	0,595	2,73
3	0,455	0,602	0,899	1,27	4,59
4	0,869	1,09	1,52	2,05	6,50
5	1,36	1,66	2,22	2,88	8,44
6	1,91	2,28	2,96	3,76	10,4
7	2,50	2,94	3,74	4,67	12,4
8	3,13	3,63	4,54	5,60	14,3
9	3,78	4,34	5,37	6,55	16,3
10	4,46	5,08	6,22	7,51	18,3
11	5,16	5,84	7,08	8,49	20,3
12	5,88	6,61	7,95	9,47	22,2
13	6,61	7,40	8,83	10,5	24,2
14	7,35	8,20	9,73	11,5	26,2
15	8,11	9,01	10,6	12,5	28,2
16	8,88	9,83	11,5	13,5	30,2
17	9,65	10,7	12,5	14,5	32,2
18	10,4	11,5	13,45	15,5	34,2
19	11,2	12,3	14,3	16,6	36,2
20	12,0	13,2	15,2	17,6	38,2
21	12,8	14,0	16,2	18,7	40,2
22	13,7	14,9	17,1	19,6	42,1
23	14,5	15,8	18,1	20,7	44,1
24	15,3	16,6	19,0	21,8	46,1
25	16,1	17,5	20,0	22,8	48,1
30	20,3	21,9	24,8	28,1	58,1
35	24,6	26,4	29,7	33,4	68,1
40	29,0	31,0	34,6	38,8	78,1
45	33,4	35,6	39,6	44,2	88,1
50	37,9	40,3	44,5	49,6	108,1
60	46,9	49,6	54,6	60,4	118,1
70	56,1	59,1	64,7	71,3	138,1
80	65,4	68,7	74,8	82,2	158,0
90	74,7	78,3	85,0	93,1	178,0
100	84,1	88,0	95,2	104,1	198,0

Tabela 2.3 - Valores de A

Pode-se tirar também os valores desta Tabela por meio de um gráfico, que é apresentado a seguir:

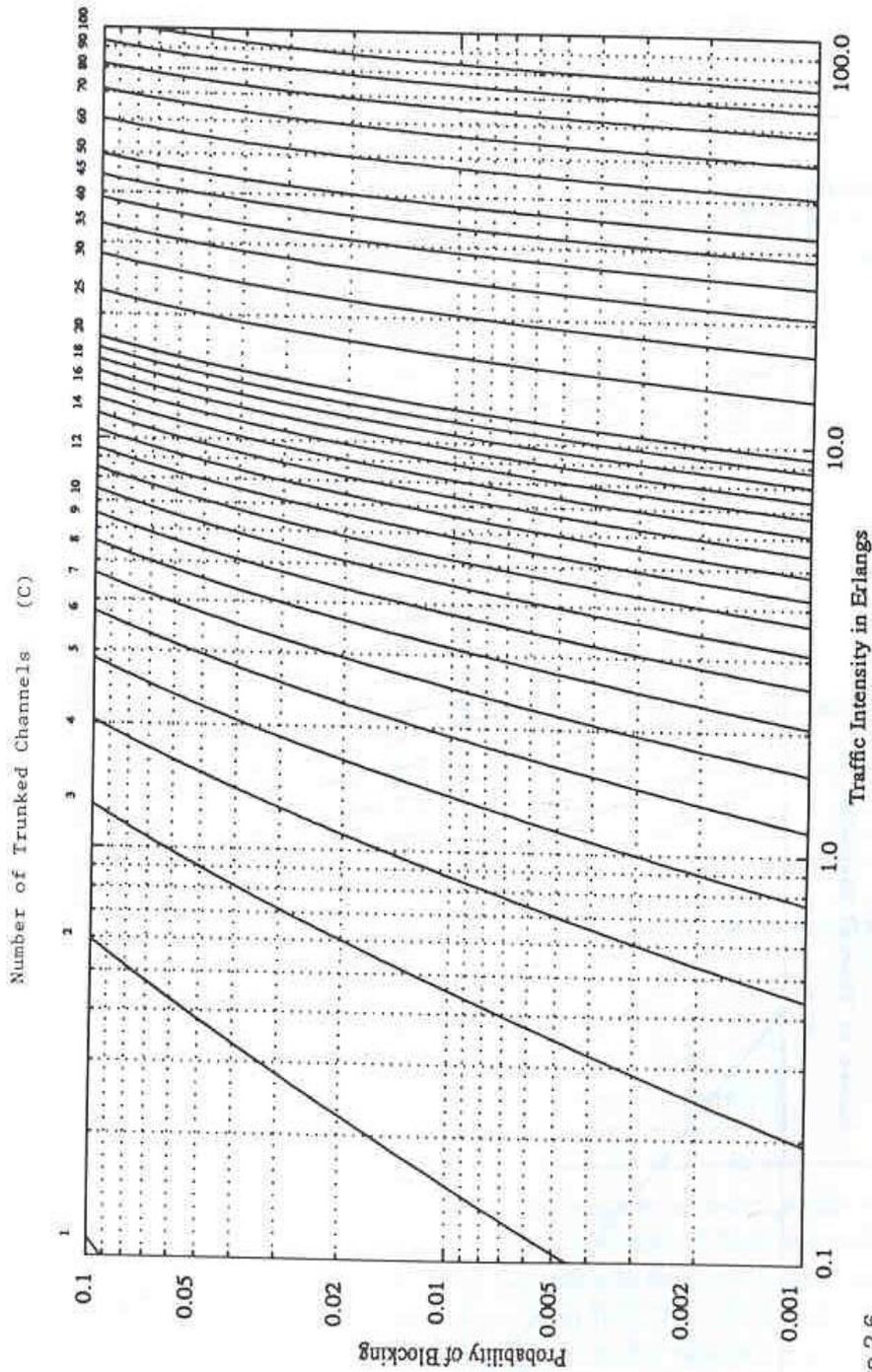


Figure 2.6
The Erlang B chart showing the probability of blocking as functions of the number of channels and traffic intensity in Erlangs.

Fig.2.16: Gráfico de Erlang B, mostrando as Probabilidades de Bloqueio (GOS) em função do número de canais (U) e da Intensidade de Tráfego (A).

2.4.2 Tráfego em um Sistema Celular Com Fila – Erlang C

Uma segunda abordagem na análise de tráfego no Sistema celular, se trata dos sistemas de fila. Neste caso, a chamada entra numa fila de espera, pois esta não pode ser oferecida imediatamente devido a não disponibilidade de um canal naquele momento. Estes sistemas são conhecidos sistemas de espera de chamada ou sistemas de fila. Neste caso, Erlang usou a teoria de filas para chegar a sua segunda fórmula, que é conhecida como *fórmula Erlang C* ou *fórmula de atraso de Erlang*.

A probabilidade de uma chamada sofrer um atraso maior que t segundos é dada por:

$$\begin{aligned} Pa[atraso > t] &= Pr[atraso > t / \text{haver atraso}] \cdot Pr[\text{haver atraso}] \\ &= Pr[atraso > t / atraso > 0] \cdot Pr[atraso > 0] \end{aligned} \quad \text{Eq. 2.13}$$

Da teoria, essas probabilidades são dadas por:

$$Pr[atraso > t / atraso > 0] = e^{\left[\frac{-(C-A)t}{\mu} \right]} \quad \text{Eq. 2.14}$$

E pela Fórmula de Erlang C:

$$Pr[atraso > 0] = \frac{A^C}{A^C + C! \left(1 - \frac{A}{C}\right) \sum_{k=0}^{C-1} \frac{A^k}{k!}} \quad \text{Eq. 2.15}$$

Substituindo a (Eq. 2.14) e (Eq. 2.15) em (Eq. 2.13), determina-se $Pr[atraso > t]$.

O atraso médio (D) para todas as chamadas em um sistema de filas é dado por:

$$D = Pr[atraso > 0] \cdot \frac{\mu}{C - A} \quad \text{Eq. 2.16}$$

Onde o atraso médio para as chamadas que estão na fila é $\frac{\mu}{C - A}$, uma vez que elas estão na fila, onde $Pr[atraso > 0] = 1$

Da mesma forma que na fórmula Erlang B, podemos recursivamente obter os valores deste atraso médio através de gráficos ou tabelas (tabelas em anexo).

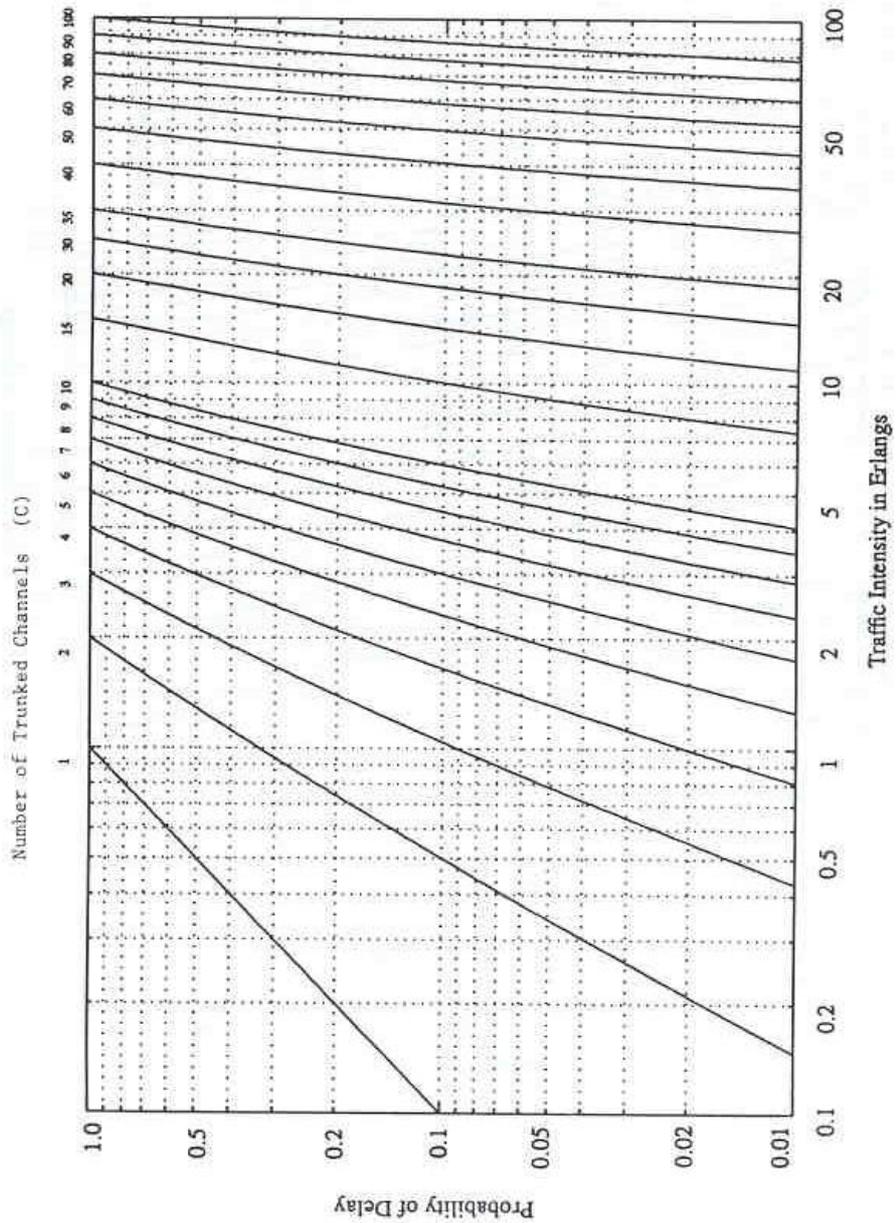


Figure 2.7
The Erlang C chart showing the probability of a call being delayed as a function of the number of channels and traffic intensity in Erlangs.

Fig.2.17: Gráfico de Erlang C, mostrando as Probabilidades de Atraso (Pr) em função do número de canais (U) e da Intensidade de Tráfego (A).

2.5 AUMENTO DA CAPACIDADE DE UM SISTEMA CELULAR

A maneira mais óbvia e mais comum de se admitir mais assinantes na rede é permitir uma degradação do desempenho do sistema. A questão é a definição de “tolerável”. Sistemas operando com níveis muito distantes dos requisitos inicialmente especificados são comuns. As técnicas mais triviais de expansão da capacidade do sistema são descritas a seguir.

2.5.1 Degradação do Grau de Serviço (Aumento da Taxa de Bloqueio)

A degradação do Grau de Serviço é a primeira investida das operadoras para acomodar novos assinantes. É fácil perceber pelos modelos de tráfego, que quando o número de usuários de um sistema aumenta, para um mesmo número de canais disponíveis, a consequência é o aumento da taxa de bloqueio.

Mas observe que esta atitude deve ser apenas temporária, pois a degradação da qualidade do serviço prestado, detectada pelo usuário pelo aumento da ocorrência de insucessos ao tentar acessar o sistema (aumento da probabilidade de bloqueio), é fator de desânimo e que muitas vezes faz o usuário trocar de operadora em busca de um serviço melhor.

2.5.2 Adicionando Novos Canais

Em geral, na concepção inicial do sistema, quando a demanda de tráfego é ainda baixa, algumas estações rádio base são equipadas com um número de canais menor que o máximo possível. À medida que a demanda vai aumentando, novos canais podem ser adicionados. Logo, a adição de novos canais nas células de um sistema só pode ser feita se o projeto inicial não contemplou todos os possíveis canais de um subgrupo em um certo Padrão de Reuso.

Infelizmente, são raras as situações em que existem canais disponíveis, tornando esta solução pouco prática.

2.5.3 Mudança no Padrão de Reuso

Clusters com menos células operam com mais canais por célula e , portanto, com uma maior eficiência de troncalização. Por outro lado, devido à menor separação entre

océlulas, a qualidade de transmissão poderá ficar comprometida, isto é, um controle mais rigoroso da interferência deve ser exercitado.

A diminuição do tamanho do *cluster* utilizado, por exemplo de 12 para 7 células, ou de 7 para 4 células, dá ao sistema uma maior capacidade de atender ao tráfego, porém aumenta os níveis de interferência.

Para se conseguir a diminuição do fator de reuso é necessário todo um replanejamento, levando em conta o problema de tráfego e interferência e a necessidade de muitas alterações de *hardware*, cujo custo pode ser elevado.

2.5.4 Empréstimo de Frequências (Canais)

O empréstimo de frequências é feito quando um ERB precisa oferecer um tráfego maior que o oferecido pelo número de canais máximo definido pelo Padrão de Reuso. Neste caso o projetista do sistema atropela o Padrão de Reuso e aloca frequências a esta ERB fora de seu subgrupo original. Logo as células co-canais cedentes mais próximas desta ERB não pode utilizá-las.

Perceba que não há grandes alterações de hardware. Basta a ERB possuir rádio disponível para sintonizar as novas portadoras. Na verdade o projetista pode fazer isto com quantas células quiser dependendo da distribuição geográfica do tráfego. Perceba que o empréstimo atende apenas a uma determinada região do sistema de maior tráfego, por isto constitui uma alternativa temporária aguardando expansão a física do sistema.

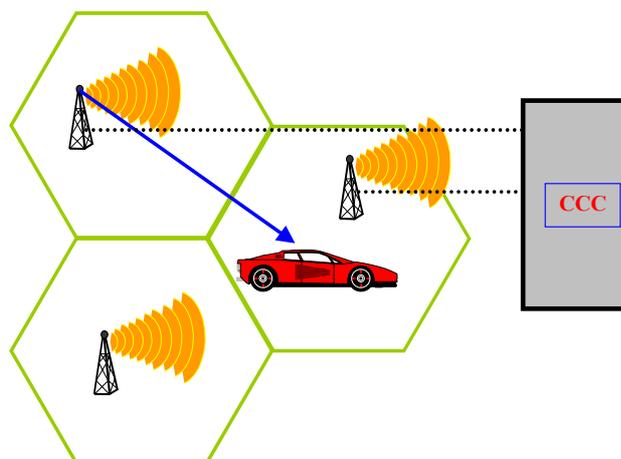


Figura 2.18 – Empréstimo de canais

2.5.5 Divisão Celular (Cell Splitting)

Quando é detectado um aumento inesperado de tráfego em determinada região do sistema já implantado, por exemplo, pela inauguração de um shopping center não prevista para a região, o projetista pode fazer da técnica de Cell Splitting.

Esta técnica consiste em dividir um pequeno grupo de e células em células bem menores mas ainda obedecendo o Padrão de Reuso. Assim, para novas células de raio k vezes menor que as originais teremos uma redução da área coberta e aumento de ERBs de ambos de k^2 , Fig. 2.17.

Na verdade temos alguns fatores que limitam a aplicação desta técnica como: a distância mínima de reuso em função da degradação da qualidade de voz, a possibilidade de locação das novas ERBs e os aspectos econômicos envolvidos.

A divisão celular normalmente é feita a partir do centro da área congestionada e é planejada de tal forma a manter as estações base existentes.

Em geral, a divisão de células é uma solução cara, pois implica na mudança da localização de ERB's e/ou instalação de novas ERB's e antenas. Existe ainda o problema da distância de reuso dos canais.

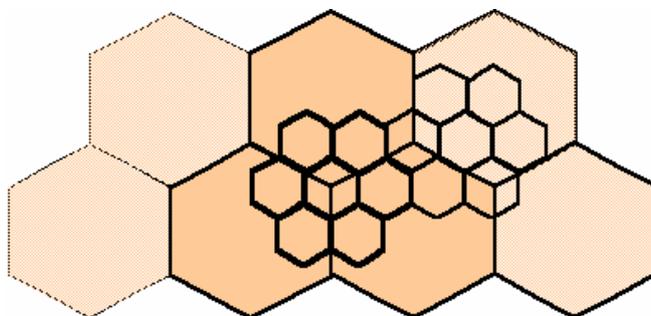


Figura 2.19 - Cell Splitting

2.5.6. Setorização

Nesta técnica a área celular é dividida em setores servidos por diferentes frequências. Tipicamente temos 3 ou 6 setores (120° ou 60°), sendo os arranjos mais comuns, com cada setor iluminado por uma antena direcional e servido por um conjunto distinto de canais. Efetivamente cada setor se comporta como uma célula. A divisão de células leva a um aumento da capacidade através de um reescalonamento do sistema. Diminuindo o raio da

célula R e mantendo a razão de reuso D/R , aumenta-se o número de canais por unidade de área.

O uso de antenas direcionais diminui a interferência co-canal, permitindo que as co-células (células utilizando o mesmo conjunto de canais) possam ser espaçadas com distâncias menores, aumentando, assim, a eficiência espectral.

A técnica de redução da interferência co-canal e aumento da capacidade do sistema utilizando antenas direcionais é chamada *setorização*. O quanto a interferência será reduzida vai depender da quantidade de setores implementados e a quantidade de setores 3 ou 6.

Note que com a setorização podem-se ter duas situações. Na primeira considera-se que o grupo original de canais de uma célula é redistribuído nos novos setores da célula configurando uma mudança no Padrão de Reuso. Na segunda situação considera-se que cada setor torna-se uma nova célula do sistema mantendo o Padrão de Reuso original e o mesmo número dos canais das células originais. Em ambos os casos não há despesas de infra-estrutura, pois se mantêm as mesmas ERBs. A expansão é muito facilitada pela característica modular das ERBs e da CCC. Desta forma esta técnica se apresenta com custo bem mais baixo que o Cell Splitting.

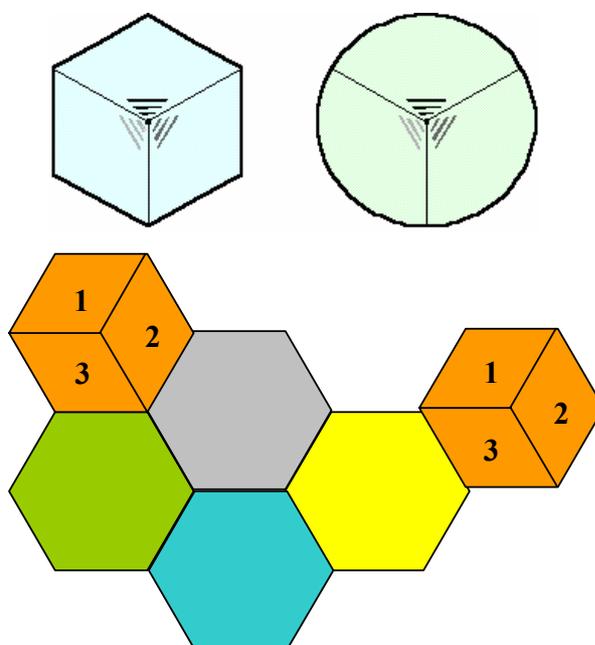


Figura 2.20 - Setorização Celular (120°)

2.5.7 Algoritmos de Alocação de Canais

Com a aplicação apropriada de algoritmos de alocação de canais, um ganho substancial de desempenho pode ser obtido. Os sistemas celulares em uso utilizam Alocação Fixa de Canais (AFC) em que, dada uma distribuição esperada de tráfego, dimensiona-se os recursos do sistema de forma fixa. Nesta condição, cada estação rádio base é equipada com um número suficiente de canais para prover o grau de serviço estipulado pelas especificações, se a distribuição de tráfego for exatamente como prevista este esquema provê a melhor eficiência de utilização de canais. É sabido, no entanto, que dada à característica mais peculiar dos sistemas móveis – a mobilidade dos usuários -, a distribuição de tráfego poderá mudar repentinamente levando certas células ao congestionamento, enquanto os recursos de outras experimentam a ociosidade. Neste caso o desempenho do sistema fica severamente comprometido. Uma alocação adequada de canais poderá otimizar melhores os recursos, levando o sistema a oferecer melhores serviços e, por conseqüência, auferir melhores retornos financeiros.

O desempenho da AFC poderá ser melhorado com o uso de uma técnica conhecida como Alocação de Canais por Empréstimo (ACE). Em ACE, uma célula sobrecarregada empresta canais de células menos sobrecarregadas. É óbvio que isto implica a mudança momentânea do Padrão de Reuso adotado, requerendo um controle rigoroso da interferência. Neste caso, os canais emprestados deverão ser impedidos de uso em outras células para se manter a distância mínima de reuso. Uma vez utilizados, os canais emprestados deverão voltar às células de origem.

Uma alternativa comumente utilizada para a melhoria do desempenho do sistema, mantendo-se o padrão de reuso, utiliza o tráfego da fronteira entre células com acesso rádio a mais de uma estação rádio base. A técnica mais conhecida utilizando este recurso é chamada *Directed Retry* (DRY). Em DRY, uma chamada que não encontra canais livres em sua própria célula é direcionada à célula vizinha em busca de recursos livres. Uma generalização desta técnica, conhecida como *Blocking Threshold Variation* (BTV), direciona as chamadas da fronteira a partir do instante em que o número de canais ocupados na célula de primeira opção (a própria célula) atinge um dado limiar. Este limiar é um parâmetro ajustável de acordo com os requisitos do sistema. Note que se este parâmetro for dimensionado para assumir o valor do próprio número de canais da célula, então BTV

passa a coincidir com DRY. Por outro lado, se este parâmetro for dimensionado para assumir o valor zero, então as chamadas das fronteiras serão sempre direcionadas à célula com menor número de canais ocupados.

As técnicas mais complexas de alocação de canais utilizam a Alocação Dinâmica de Canais (ADC). Existe uma infinidade de técnicas ADC.

A utilização das técnicas DRY ou BTV implica o aumento do nível de interferência co-canal e canal adjacente, uma vez que o uso de canais fora da sua área de melhor atendimento, de certa forma, estende a fronteira da própria célula.