

# **Comunicação de Dados em Redes Celulares de Telefonia Móvel (RCTM).**

**Juergen Rochol, Marcelo Boeira Barcelos e Henrique Pufal**

**Universidade Federal do Rio Grande do Sul**

Instituto de Informática - Departamento de Informática Aplicada

Curso de Pós-Graduação em Ciência da Computação - UFRGS

Av. Bento Gonçalves, 9500 - Campus do Vale, Bloco IV

CEP 91501-970 - Porto Alegre - RS - Brasil

FAX: +55-51-336 5576 E mail: juergen @ inf.ufrgs.br.

## **Sumário**

O trabalho apresenta uma abordagem comparativa em relação às principais características técnicas das tecnologias de telefonia celular FDMA, TDMA e CDMA para Redes Celulares de Telefonia Móvel (RCTM). São analisados e justificados alguns critérios importantes de comparação tais como: capacidade máxima por célula, imunidade a ruído, robustez quanto a caminhos múltiplos de recepção, interferência e "fading", segurança e sigilo, capacidade de atualização tecnológica, eficiência de utilização de banda e principalmente sua adequação para suportar os atuais serviços de Comunicação de Dados e os novos serviços de Computação Móvel. São mostradas também as principais características da Rede Celular de Telefonia Móvel (RCTM) Brasileira e suas tendências de atualização tecnológica. Finalmente são projetados algumas aplicações e novos serviços que poderão vir a ser implementados com Computação Móvel suportada por RCTM.

## **Abstract**

The work presents a comparative analysis of the main characteristics of FDMA, TDMA and CDMA techniques for Cellular Mobile Telephone Systems. We present and justify the criteria used in such a comparison, like: maximum capacity per cell, immunity to noise, multi-path reception, interference and fading, security and privacy, capability for introducing new features, band efficiency and, mainly, the capability to support existing Data Communication Services and the new Mobile Computing Services. We present also the main characteristics of the Brazilian Mobile Cellular Telephony Network (MCTN) and its tendency for technological updating. Finally we look for some new applications and services that may be eventually implemented with Mobile Computing supported by the MCTN.

## 1. Introdução

Estamos assistindo a uma nova era nas Comunicações Pessoais (Personal Communications-PC), a da chamada Telefonia Móvel Celular. Dos 42 milhões de pontos de acesso telefônico instalados mundialmente em 1993, mais de 26% foram celulares [SIQ94a]. Surgida no início da década de oitenta, hoje representa uma fatia considerável do mercado mundial de telefonia, com projeções de que ao final da corrente década, por exemplo só nos EUA, deverá representar mais de 30% dos terminais telefônicos instalados. As características marcantes desta nova tecnologia de comunicações são a de: ser pessoal, ser móvel, sem fio ("Wireless Communication") e ser concebida essencialmente para uso de voz.

Esta última característica tem preocupado as Concessionárias de Serviços Telefônicos já que uma parcela significativa do tráfego telefônico é hoje representado por serviços de Comunicação de Dados. Em 1993 a receita mundial de serviços telefônicos representavam 82% de telefonia, 7% de tráfego de dados e 6% de telefonia móvel [SIQ94a]. A parcela de tráfego de dados tende a aumentar à medida que aumenta o número de usuários de Computadores Pessoais e a proliferação de Redes de Computadores. Estima-se que este percentual deverá chegar a 20% até o final da década corrente.

As Redes Celulares de Telefonia Móvel (RCTM), foram projetadas na década de oitenta visando atender, principalmente, serviços de comunicações móveis de voz, sem maior preocupação com o tráfego de dados. A tendência que se verifica atualmente é a de tornar as RCTM também adequadas à Comunicação de Dados, visando atender preferencialmente a um novo conceito de serviços telemáticos, genericamente chamado de Computação Móvel.

Neste trabalho são analisadas as principais características técnicas das diversas tecnologias de telefonia celular com um enfoque especial sobre a sua adequação para Comunicação de Dados. Os critérios de comparação que foram utilizados estão relacionados com: capacidade máxima por célula, imunidade a ruído, robustez quanto a caminhos múltiplos de recepção e "fading", segurança e sigilo, capacidade de atualização tecnológica, eficiência de utilização de banda e principalmente sua capacidade de suportar os atuais serviços de Comunicação de Dados e os novos serviços de Computação Móvel.

Por último serão mostradas também as principais características da Rede Celular de Telefonia Móvel (RCTM) Brasileira e seu planejamento estratégico em relação à atualização tecnológica e às atuais tendências de aplicações na área de Computação Móvel.

## 2. Princípios Básicos de Telefonia Móvel Celular

Basicamente a telefonia celular móvel está estruturada sobre um conjunto de canais de rádio-freqüência (canais RF) definidos para uma área geográfica limitada chamada célula, que podem ser acessados por demanda para estabelecer um enlace de comunicação do tipo duplex com uma estação base fixa, integrada à rede telefônica pública fixa (Fig. 1).

Atualmente o tamanho médio de uma célula é da ordem de 2 a 3 quilômetros de diâmetro. Com o crescimento explosivo de novos usuários, principalmente em regiões urbanas, a tendência é diminuir o tamanho das células para micro-células, com abrangência de um quarteirão e, mesmo, pico-células, com a abrangência de um edifício, por exemplo. Através deste esquema pode-se aumentar a capacidade do sistema em regiões com alta densidade de usuários.

A extensão geográfica da RCTM é obtida através da repetição das células (ou micro-células), mas de tal forma que, os canais adjacentes a uma célula, contêm conjuntos de canais de frequência distintos, para evitar interferência mútua. Esta técnica é chamada de re-uso da frequência, procurando-se desta forma economizar banda de frequência, que é cada vez mais preciosa nas comunicações.

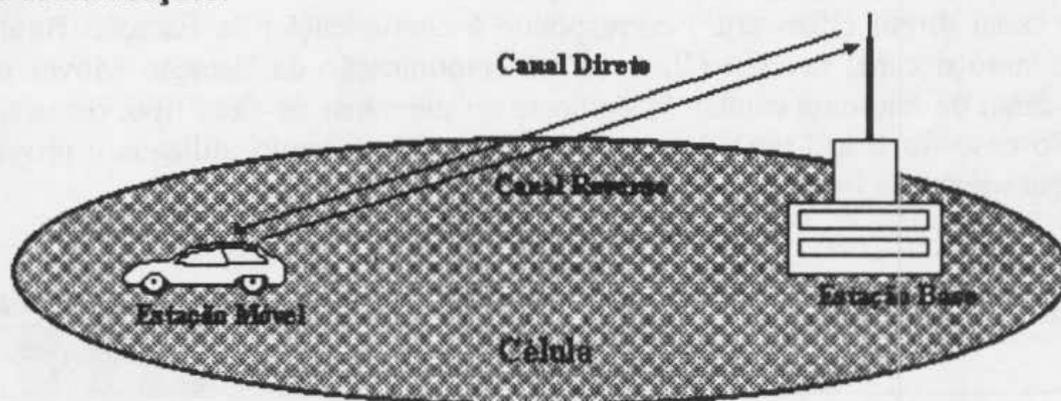


Fig. 1 Estrutura básica de uma RCTM

Na figura 2 é mostrado uma rede celular, na qual por conveniência, as células são apresentadas por hexágonos, enquanto o conjunto de canais em cada célula é representado por um número. O esquema de re-uso de frequência neste caso é de 1/7 pois são definidos ao todo 7 conjuntos distintos de canais que são distribuídos pelas células segundo um padrão de repetição.

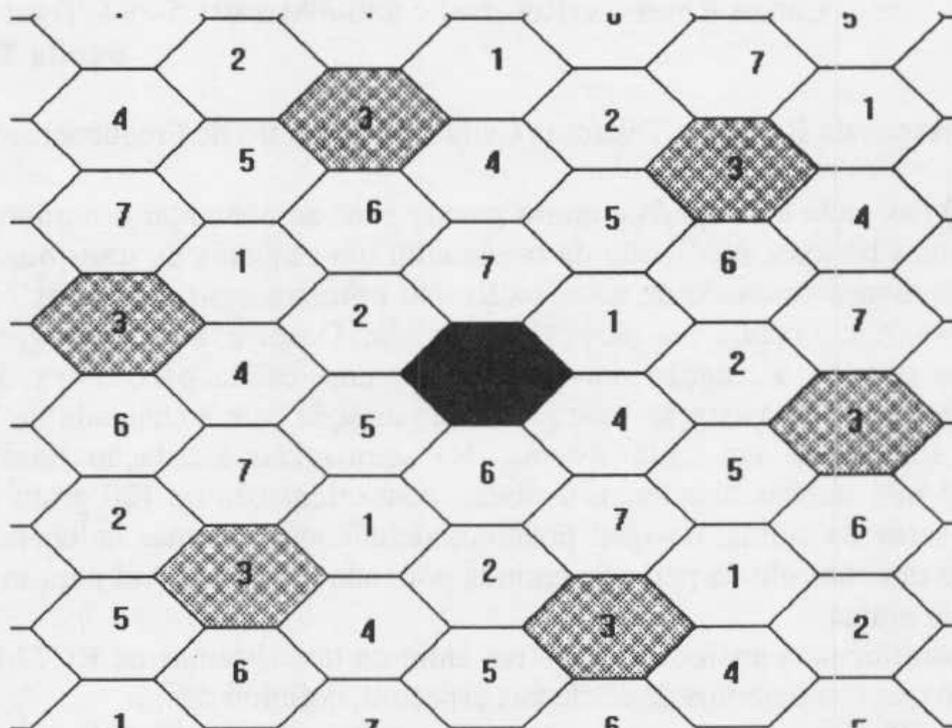


Fig. 2 Esquema de reutilização de frequências 1/7. Cada número representa um conjunto distinto de canais de rádio frequência dentro da banda de Telefonia Celular Móvel.

A banda de frequência alocada para a RCTM possui uma largura de 50 MHz, dividido em duas faixas A e B, com 25 MHz cada e subdivisões como mostra a fig 3. A faixa A foi reservada às Concessionárias Públicas de Serviços Telefônicos enquanto a faixa B está reservada às Companhias de Telefonia Celular Privadas. Desta forma pretende-se conseguir uma certa competitividade neste setor das telecomunicações.

O canal direto ("forward") corresponde à comunicação da Estação Base para Estação Móvel enquanto o canal reverso ("reverse") à comunicação da Estação Móvel para a Estação Base. Um canal de telefonia celular é composto de um canal de cada tipo, ou seja, comunicação duplex. No caso do Brasil uma das faixas ainda não está sendo utilizada e provavelmente está reservada para serviços Privativos de Telecomunicações.



**Faixa A: Companhias de Telefonia Celular Independentes**

Canais Diretos (Forward) : 824-835 e 845-846.5, Total : 12,5 MHz

Canais Reversos (Reverse) : 869-880 e 890-891.5, Total : 12,5 MHz

**Faixa B: Concessionárias de Serviço Telefônico Públicas**

Canais Diretos (Forward) : 835-845 e 846.5-849, Total : 12,5 MHz

Canais Reversos (Reverse) : 880-890 e 891.5-894, Total : 12,5 MHz

**Banda Total: 50 MHz**

Fig. 3 Localização da Banda de Telefonia Celular no Espectro de Frequências Eletromagnéticas

Em células onde a demanda é muito grande pode-se aumentar o número de canais através de dois esquemas básicos; subdivisão da célula e/ou um esquema de transmissão dirigida através de antenas direcionais chamado de setorização. No primeiro caso dobramos o número de canais com cada nova micro-célula ou pico-célula gerada. Decorre a desvantagem do aumento de processamento quando a estação móvel passa de uma célula para outra. Esta passagem do controle da ligação de uma estação base para outra estação base é chamada de "hand-off" e é uma característica importante em cada sistema. Na setorização a estação base da célula possui geralmente até três antenas direcionais distintas, com orientação de 120 graus entre si, cada uma cobrindo um setor da célula, no qual podemos definir um conjunto independente de canais. O esquema exige um controle da potência emitida por cada estação móvel para minimizar problemas de interferência mútua.

Para permitir uma análise comparativa entre os três sistemas de RCTM vamos definir um fator de mérito que chamaremos de eficiência espectral, definido como:

$$\text{Eficiência Espectral } E = \text{Número máximo de usuários/Célula/MHz}$$

Este fator nos permitirá quantificar a eficiência de aproveitamento pelo sistema da banda de frequência disponível. Finalmente, analisaremos cada sistema quanto a sua adequação para serviços de Comunicação de Dados e Computação Móvel.

### 3. Principais Tecnologias utilizadas em Redes Celulares de Telefonia Móvel (RCTM)

Existem atualmente três tecnologias distintas para RCTM, cada uma adotada por algum sistema e já implantado em vários países e capazes de se imporem, portanto, como padrões a nível mundial.

- A tecnologia baseada em FDMA ("Frequency Division Multiple Access"), foi adotada pelo sistema AMPS ("Advanced Mobile Phone Service") americano. É essencialmente analógico e foi implantado nos EUA e em quase todos os países Sul-Americanos, inclusive no Brasil.
- A tecnologia de segunda geração chamada TDMA ("Time Division Multiple Access"). Foi desenvolvida nos EUA e está sendo adotada no sistema AMPS de segunda geração com o nome de D-AMPS (Digital AMPS). Baseado nesta tecnologia foi desenvolvido também um sistema europeu chamado GSM ("Global System for Mobile Telecommunications"). O sistema GSM possui atualmente larga aceitação em quase todos os países europeus.
- Por último a tecnologia de CDMA ("Code Division Multiple Access") baseada na técnica de transmissão SST ("Spread Spectrum Technology"). Foi adotado em um sistema desenvolvido pela Qualcomm americana e atualmente está em fase experimental. Este sistema é considerado de terceira geração e possui características de desempenho excepcionais em relação aos anteriores, sendo por isso cogitado como um dos futuros padrões para RCTM. A Telebrás preconiza a sua utilização na RCTM brasileira de segunda geração [SIQ94b].

Muitos outros sistemas de RCTM, de abrangência limitada, estão fadados ao desaparecimento, tendo em vista que, a mobilidade internacional é cada vez mais uma realidade, exigindo, por isso, sistemas de abrangência, no mínimo, continental. Vamos apresentar a seguir as principais características dos três sistemas, ou seja : AMPS com tecnologia FDMA, D-AMPS e GSM com tecnologia TDMA e por último o sistema Qualcomm CDMA com tecnologia SST.

Para fins de análise e comparação entre os três sistemas, foram estabelecidos critérios que levam em conta as características tecnológicas de cada sistema e, principalmente, a sua conveniência para serviços de Comunicação de Dados. Os critérios adotados foram; capacidade máxima de canais por célula, robustez quanto a ruído, interferência e "fading", sigilo e segurança, eficiência na utilização da banda, capacidade de atualização tecnológica e um enfoque especial sobre as facilidades oferecidas por cada sistema para serviços de Comunicação de Dados e/ou suporte dos novos serviços de Computação Móvel e PCS (Personal Communication Services).

### 4. O Sistema AMPS ("Advanced Mobile Phone System")

Desenvolvido pela Bell Labs, é o sistema de RCTM mais antigo e largamente difundido nos EUA e em quase todos os países Sul-Americanos. Baseado em multiplexação de frequência (FDM) de canais de RF (rádio frequência) de 30 kHz, na banda celular, é totalmente analógico, voltado para o tráfego de sinais de áudio com banda de 300 - 3400 Hz, típico dos canais de voz da rede telefônica fixa. O sinal de áudio é modulado em frequência no canal de 30 kHz. É atualmente o sistema de RCTM mais difundido no mundo, sendo também adotado no Brasil pela Telebrás,

onde ocupa por enquanto somente uma das faixas de 25 MHz, enquanto a outra aguarda regulamentação para exploração privativa (ver figura 3).

### Capacidade máxima do Sistema:

O sistema AMPS utiliza uma divisão da faixa A ou B em canais de RF com largura de banda nominal de 30 kHz. O número total N de canais em uma faixa será então:

$$N = \frac{25\text{MHz}}{30\text{kHz}} = 833 \text{ canais}$$

Um canal telefônico duplex utiliza dois canais (reverso e direto). Além disto o sistema adota o esquema de re-utilização de frequência 1/7, conforme mostrado na figura 2, e como sete canais duplex são utilizados para fins de controle, então o número máximo Nc de canais/célula será dado por:

$$N_c = \frac{(416-7)}{7} = 58 \text{ canais duplex por célula}$$

Este número de canais pode ser aumentado através de um esquema de transmissão por setores, também conhecido como setorização espacial. São utilizadas 3 antenas direcionais, com orientação de 120 graus entre elas. Com isto, a capacidade Nc será multiplicada por um fator S, de valor aproximadamente igual a 2,55 [QUA92], uma vez que a setorização não é ideal. Temos então que:

$$N_{\text{max}} = N_c \times S = 58 \times 2,55 = 147,9 \text{ canais/célula}$$

### Eficiência Espectral do Sistema

A eficiência espectral E do sistema será por definição igual ao número máximo de canais por célula por MHz.

$$E = 147,9/25 = 5,92$$

### Sigilo e Segurança.

É um dos pontos fracos deste sistema. O sinal de audio, modulado em frequência e transmitido em um canal celular qualquer, pode ser facilmente escutado utilizando-se um simples receptor de rádio amador. Tendo em vista a natureza analógica do sistema, torna-se difícil aumentar o sigilo e a segurança do mesmo.

### Robustez quanto a ruído interferência e "fading"

No sistema AMPS uma portadora do canal de RF é modulado em frequência por um sinal analógico de voz. Este tipo de modulação está sujeito a interferências devido as transmissões em canais de células adjacentes, assim como, pela transmissões em canais da própria célula. O mecanismo adotado pelo sistema para minimizar o problema da interferência se resume unicamente a um controle rígido da potência de transmissão em cada canal.

Quanto a imunidade a ruído, é aquela própria da modulação em FM, ou seja, um ganho de 3dB em relação a mesma relação sinal ruído de um sistema com modulação AM.

Um problema sério na transmissão via RF em áreas urbanas, ou terrenos muito acidentados, é o chamado "multi-path". Ele reside no fato de que teoricamente existe apenas um caminho entre o móvel e a estação base. Porém, devido a reflexões, o sinal chega ao receptor com diferentes atrasos, provocando uma soma vetorial que por vezes pode causar atenuação significativa do sinal, o chamado "fading". Para minimizar este efeito é utilizada a diversidade espacial, que consiste na recepção e processamento dos múltiplos sinais, comparar as respostas e assim compensar possíveis desvanecimentos. Contudo esta técnica não elimina totalmente o problema.

### Capacidade de atualização tecnológica

A estrutura geral do sistema AMPS segue o antigo sistema analógico de telefonia fixa. A sinalização é do tipo mista ou seja o controle de chamada é dentro da própria banda do canal enquanto o processamento de handoff (passagem do controle de uma chamada ao passar de uma célula para outra) é em canal de sinalização à parte. O controle geral do sistema é do tipo fixo não utilizando o moderno conceito de CPA (Central de Programa Armazenado) ou rede inteligente flexível. A tecnologia, como um todo do sistema AMPS, é obsoleta e pouco adequada para se adaptar às novas exigências, aplicações e serviços de uma RCTM.

### Facilidades próprias do Sistema para Comunicação de Dados.

Sendo o sistema AMPS por natureza para tráfego de sinais analógicos de áudio ele não é adequado para a transmissão de dados digitais. Para adequá-lo ao tráfego de dados (sinais digitais), deverá ser utilizado um modem com características próprias para RCTM. Devido a vulnerabilidade da comunicação móvel, são necessários, além disto, protocolos de comunicação especiais que garantam e protejam os dados do enlace. O próprio processo de "hand-off" envolve uma interrupção momentânea do sinal, pois é baseado na técnica "break-before-make". Estes intervalos de interrupção podem ser da ordem de 100ms [MIL94]. Além disso, as células são dimensionadas para que na suas fronteiras a relação sinal/ruído (C/I) seja em torno de 18 dB. Comparando-se este fator com o de linhas fixas convencionais, nas quais no pior caso temos uma relação por volta de 26 dB, consegue-se imaginar as dificuldades de transmissão de dados através dos canais de RF.

Devido a todos estes fatores a taxa de erros pode facilmente chegar a valores da ordem de  $10^{-2}$  a  $10^{-3}$  [WEI93], ou seja, 1000 vezes pior do que na rede telefônica fixa. Tendo em vista esta alta taxa de erro, é necessário que um protocolo especial de nível de enlace, com atuação fim a fim, se encarregue da detecção e correção dos erros.

A Microcom Inc. lançou em 1990 o protocolo MNP 10, enquanto a AT&T lançou o protocolo ETC (Enhanced Throughput Cellular) e a Motorola o protocolo ECC (Enhanced Cellular Control). Todos são protocolos especiais para comunicação de dados pela rede celular e possuem facilidades de correção de erros, sendo normalmente embutidos nos próprios modems celulares [JOH94].

No MNP 10 a inicialização é feita a uma taxa de 1,2 kbit/s e após são feitas sucessivas tentativas para aumentar a taxa. A prática mostra que o MNP 10 é eficiente para taxas baixas, não conseguindo prover a mesma confiabilidade a medida que sobe a taxa de transmissão. No protocolo ETC é feito o contrário. Começa com uma taxa elevada, decrescendo a medida que verifica uma taxa de erros inaceitável.

Os mais de dez fabricantes de modems celulares dos EUA oferecem modems segundo o padrão V.32 bis da ITU-T de 14,4 kbit/s, para o tráfego de dados, e o padrão V.17 para FAX. A interface do lado do micro, laptop, palmtop, notebook ou pen-computer pode ser desde a porta serial EIA RS 232 e/ou PCMCIA (Personal Computer Memory Card International Association), até interfaces especiais proprietárias. A interface do lado do telefone celular normalmente é o mesmo da telefonia fixa, ou seja, o jack do tipo RJ-11. Os preços destes modems variam entre US\$ 400 a 800 [JOH94].

Concluindo, podemos afirmar que a Comunicação de Dados em RCTM's do tipo AMPS (atual Rede Celular Brasileira), é em grande parte muito parecida com a Transmissão de Dados por canal de voz da Rede Telefônica. Devido a sua facilidade de instalação e operação, pode ser

considerada como uma solução barata e simples para ligações do tipo ponto a ponto ou como porta de acesso remota para outras redes de dados.

## 5. O Sistema TDMA ("Time Division Multiple Access")

O TDMA é uma técnica de telefonia celular de segunda geração e alta capacidade. A técnica foi escolhida para o GSM Europeu, assim como para o sistema celular americano, chamado US Digital Cellular Technology (USDC).

### Robustez quanto a ruído, interferência e "fading"

Ambos os sistemas trabalham com a digitalização da voz através de um vocoder. A digitalização traz consigo facilidades inerentes ao controle do sistema. A detecção e correção de erros através de poderosos algoritmos pode ser implementada, visando melhorar a qualidade do serviço. O "interleaving", ou seja, o espalhamento dos bits no tempo segundo uma sequência conhecida, a fim de não manter uma continuidade da mensagem, é útil contra o "fading", uma vez que os bits perdidos não são contínuos, facilitando a recuperação da mensagem. Além disso, é possível a utilização da diversidade espacial, de forma semelhante aos sistemas analógicos.

### Sigilo e Segurança

Em termos de segurança a digitalização é um forte aliado, já que a encriptação dos dados é facilmente oferecida como um serviço pela RCTM.

### 5.1 A situação Norte-Americana

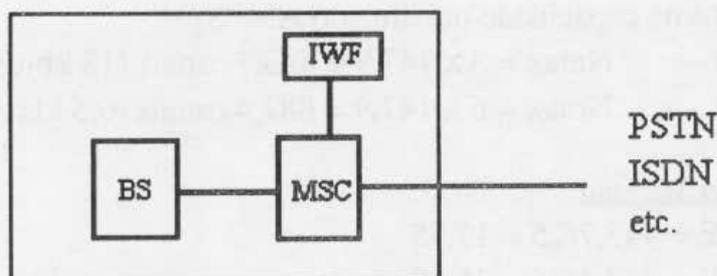
Um fator essencial na mudança do sistema AMPS para o sistema TDMA Digital nos Estados Unidos, e por conseguinte nos países que adotaram o AMPS como RCTM, é o aproveitamento da estrutura já montada e largamente utilizada. Por isso foram definidas duas etapas para tal atualização tecnológica. Num primeiro momento o sistema seria dual-mode (o chamado D-AMPS), ou seja, teria que ser compatível tanto com o sistema analógico FDM, quanto com o sistema TDM digital. Após, haveria a migração para um sistema totalmente digitalizado.

A estrutura do sistema TDMA é semelhante ao AMPS, porém com a inclusão de uma nova entidade chamada IWF - Interworking Function (fig. 4). A IWF é encarregada da conversão analógica-digital e vice-versa, da sincronização dos canais através de buffers elásticos, da identificação e da conversão de protocolos, etc. Enfim, é ela a responsável pela interoperabilidade da rede celular.

### Capacidade máxima do Sistema

O D-AMPS utiliza multiplexação FDM de canais de RF dentro do espectro de frequência da telefonia celular igual ao AMPS, e multiplexação TDM dentro de cada canal de RF. A multiplexação TDM implica em técnicas de transmissão digitais nos canais de RF. Atualmente são multiplexados três canais em cada canal de RF, o que equivale a multiplicar a capacidade do sistema por um fator de 3 em relação ao sistema AMPS analógico.

A estrutura de multiplexação do D-AMPS é especificada na IS-54 B da EIA/TIA que define um quadro com 1944 bits e 40 ms de duração. Cada quadro contém 6 fatias de tempo ("time slot") de 324 bits. Cada canal telefônico é composto de dois canais de voz digitais, um direto e outro reverso, cada um correspondendo a uma fatia de tempo.

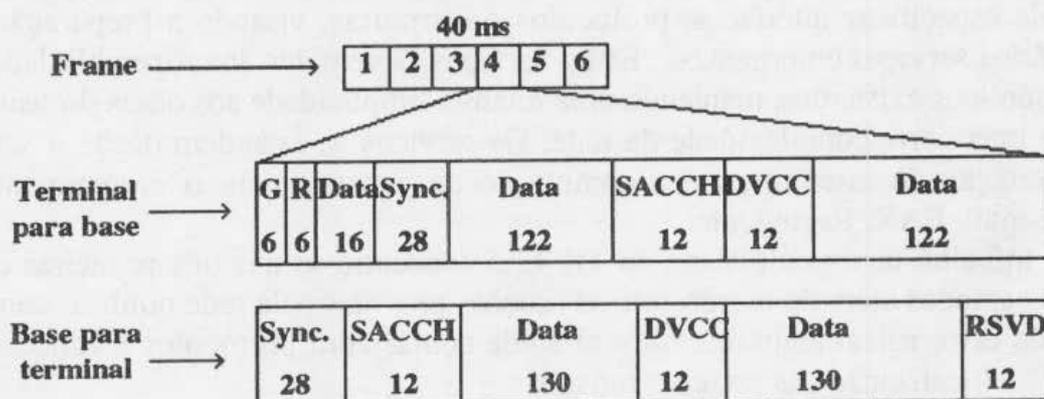


IWF: Interworking Function  
 BS: Base Station  
 MSC: Mobile Switching Center

Fig. 4 Estrutura Funcional do TDMA

A figura 5 apresenta a estrutura geral do quadro e das fatias de tempo, tanto do canal direto como do canal reverso.

A taxa de transmissão do agregado TDM é:  $\frac{1944 \text{ bit}}{40 \text{ ms}} = 48,6 \text{ kbit/s}$ . A taxa de cada canal é de 8,1 kbit/s, sendo que 6,5 kbit/s correspondem a voz digitalizada e 1,6 kbit/s correspondem a sinais de controle. Lembrando que é necessário alocar 2 "time-slots" para cada canal, a taxa total efetiva de voz digitalizada de um canal telefônico será de 13 kbit/s. Hoje, graças a técnicas de compressão de voz, já são possíveis sistemas com a metade desta taxa (half rate), ou seja, 6,5 kbit/s de taxa de voz total, aumentando desta forma a capacidade do sistema TDMA de um fator de 6 em relação ao AMPS analógico.



G (Guard): Tempo para evitar sobreposição de informações  
 R (Ramp): Tempo que permite que o transmissor alcance seu máximo nível de potência  
 DVCC: Digital Verification Color Code  
 RSVD: Porção reservada para uso futuro  
 SACCH: Slow Associated Control Channel

Fig. 5 Estrutura do quadro e Time Slots do IS-45 B da EIA/TIA

A nova norma IS-136 (antiga IS-54 C) define algumas novas facilidades para o D-AMPS como o canal de controle digital, que permitirá grande eficiência na operação de tráfego e de serviços. Além disso, é introduzido um novo conceito de estruturação hierárquica das células em macro, micro e pico células.

Temos, baseados na capacidade máxima do AMPS:

$$\text{IS-54 B} \rightarrow N_{\text{max}} = 3 \times 147,9 = 443,7 \text{ canais (13 kbit/s)/célula}$$

$$\text{IS-136} \rightarrow N_{\text{max}} = 6 \times 147,9 = 887,4 \text{ canais (6,5 kbit/s)/célula}$$

#### Eficiência Espectral do Sistema

$$\text{IS-54 B} \rightarrow E = 443,7/25 = 17,75$$

$$\text{IS-136} \rightarrow E = 887,4/25 = 35,50$$

#### Capacidade de atualização tecnológica

Na próxima etapa, quando o sistema TDMA Norte-Americano for totalmente digitalizado teremos um novo método de acesso TDM, sendo que a multiplexação dos canais em frequência não mais será utilizado passando para a técnica conhecida como "frequency hopping". Nesta técnica é empregado um esquema que chaveia cada usuário segundo uma seqüência, dentro de um conjunto de canais RF. Como a alocação deste conjunto de canais é dinâmica, através do acompanhamento do fluxo, consegue-se um ou mais usuários por canal de RF, dependendo da demanda. O uso destas e outras técnicas, permitirá aumentar a capacidade da RCTM. Note-se, porém, que a técnica de "frequency hopping" utiliza o conceito de SST (Spread Spectrum Technology), que por sua vez implica em interferência mútua entre células, necessitando codificações que diferenciem o usuário.

#### Facilidades próprias do Sistema para Comunicação de Dados

O esforço para padronização do sistema digital Norte-Americano está concentrado na TIA/TR 45.3 Digital Cellular Standards Subcommittee, que é um grupo de trabalho com o objetivo de especificar interfaces, protocolos e estruturas, visando a preparação de um suporte para os vários serviços emergentes. Estes serviços devem ter interoperabilidade com os atuais serviços públicos existentes, mantendo uma relativa simplicidade aos olhos do usuário, mesmo que isto custe uma certa complexidade da rede. Os serviços se estendem desde o serviço de voz, ou seja, comutação de circuitos, até a comutação de pacotes, com o oferecimento de facilidades como o E-mail, FAX, Paging, etc.

O trabalho de especificação do TR 45.3 concentra-se nas três primeiras camadas do MR-OSI. Tais camadas além de oferecerem as funções providas pela rede pública, como a detecção e o controle de erro, roteamento, etc, devem ainda contar com protocolos e funções de controle do "hand-off" e localização das estações móveis.

Já estão definidas interfaces de acesso aos diversos serviços, compatíveis com a técnica ISDN ou não. As interfaces não compatíveis com o ISDN seguem a norma EIA/TIA-RS232. Para conseguir a compatibilidade com a ISDN são utilizados agregados de canais, a fim de se conseguir os 64 kbit/s.

Os problemas para Comunicação de Dados no TDMA não são poucos. Apesar da norma IS - 136 determinar um "hand-off" assistido, ainda é problemática a troca de canais quando são ultrapassados os limites da célula. Além disso, os canais foram especificados para voz e possuem, portanto, baixas taxas. Deve-se, então, ao selecionar o canal, desativar o "vocoder" (dispositivo de codificação da voz), caso contrário haverá distorção nos sinais de dados. O controle de canal oferece, além disto, protocolos e algoritmos de detecção e correção de erros específicos para a transmissão de dados.

Na tabela 1 são apresentados de forma resumida as principais etapas de evolução do sistema AMPS em direção ao sistema todo digital de acordo com a IS-136.

Tabela 1 Características das etapas intermediárias na evolução em direção à IS-136

Características	Analogico AMPS	Digital Dual Mode D-AMPS, IS-54 B	Todo Digital IS -136 (Antigo IS-54 C)
Largura de Banda RF	30 kHz	30 kHz	30 kHz
Tipo do Canal de Tráfego	Analogico	Analogico e Digital	Digital
Transmissão de Voz	Analogica	Analogica e Digital 13 kbit/s (full rate)	6,5 kbit/s (digital half rate)
Transmissão de Dados	Modem	Modem e Dados digitais	Dados digitais
Canal de Controle	Analogico	Analogico	Digital
Método de Acesso	FDMA	FDMA/TDMA	TDMA
Canais de Usuários/ Canais RF	1	1 para modo analg. 3 para modo digital	6 ou mais

## 5.2 O sistema Europeu - GSM ("Global System for Mobile Telecommunications")

É o sistema difundido na Europa e tem como base a tecnologia TDMA ("Time Division Multiple Access"). Surgiu com a necessidade de padronizar um sistema digital que cobrisse todo o território europeu, em substituição aos diversos sistemas analógicos incompatíveis existentes no continente.

### Capacidade máxima do Sistema

Os canais RF no GSM são baseados numa estrutura TDMA. Duas bandas de frequência são definidas:

- 890-915 MHz , para a ligação do móvel para a base;
- 935-960 MHz , para a ligação da base para o móvel;

Estas bandas são divididas em 124 pares de portadoras espaçadas por 200 kHz, começando com o par 890,2 MHz. Cada célula tem um número de canais que vai de 1 a 15 e o tamanho das células varia de 1 a vários Km.

O espectro de 200 kHz por canal é segmentado no tempo usando uma alocação fixa, esquema TDMA. O eixo de tempo é dividido em oito time slots de 0,577 ms que formam um quadro de 4,615 ms. A repetição de um time slot particular em cada quadro forma um canal físico.

Os canais de tráfego são definidos para que se tenham oito diferentes formas de serviço. Os canais que transmitem voz ou dados "full-rate", ou seja, utilizam taxa de transmissão completa, suportam taxas de 13 kbit/s (voz), 2400, 4800 e 9600 bit/s. Canais que transmitem "half-rate", ou seja, com a metade da taxa de transmissão completa, oferecem taxas de 6,5 kbit/s (voz), 1200, 2400 e 4800 bit/s.

Temos, portanto:

$$N_{\max} = (124 / 7) \times 2.55 \times 8 = 361,37 \text{ canais (13 kbit/s)/ célula}$$

Nesta expressão usou-se um ganho não ideal de setorização ( $S=2,55$ ), igual ao utilizado anteriormente.

Para que se possa incluir canais de sinalização e controle é definido uma estrutura multiquadro contendo 26 quadros básicos, com duração de 120 ms. Nesta estrutura foram definidos os canais de tráfego - TCH ("traffic channels") e seus canais de controle lentos associados - SACCH "(slow associated control channel)" e rápidos - FACCH ("fast associated control channel") que carregam a informação de controle da ligação entre base e móvel.

O SACCH está implementado no 13º quadro da estrutura, contendo oito canais SACCH, um dedicado a cada um dos canais de tráfego. O 26º quadro normalmente está inativo e reservado para oito SACCH adicionais quando for utilizada transmissão de voz a meia taxa.

O FACCH é obtido através de um "roubo" de um canal de tráfego e é usado para sinalizar as características de transferência do caminho físico ou as mensagens de controle do "hand-off". O "roubo" deste canal de tráfego para implementar um FACCH está indicado através de um flag no slot do TCH.

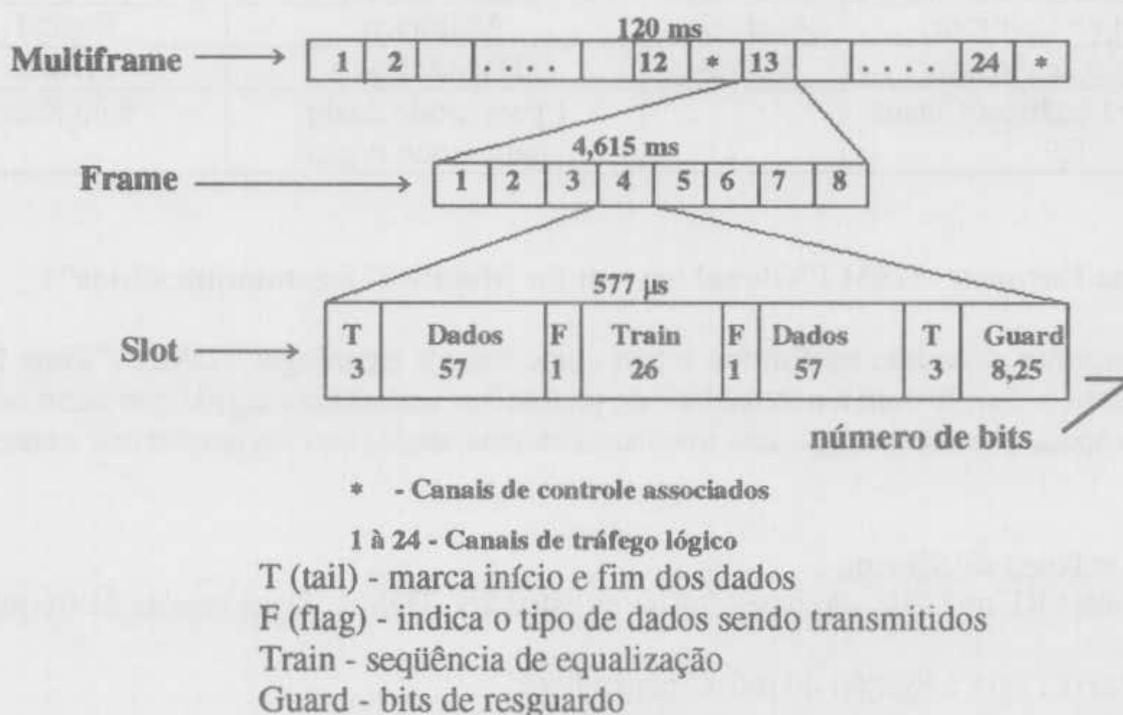


Fig. 5 Estrutura dos quadros e fatias de tempo no sistema GSM

### Eficiência Espectral

$$E = 361,37 / 50 = 7,23$$

### Facilidades próprias do Sistema para Comunicação de Dados

Por ser uma tecnologia digital, o GSM tem várias facilidades para a comunicação de dados. Uma delas é a possibilidade da detecção rápida de erros, por meio de um código convolucional. O maior problema que se verifica para a Comunicação de Dados é o processo de "hand-off", ou seja, a passagem do controle da ligação ao passar de uma célula para outra. Este processo de comutação, gera uma interrupção da transmissão de algumas dezenas de milissegundos, enquanto é feita a comutação. Todos os bits transmitidos durante esse tempo são perdidos o que ocasiona erros na transmissão dos dados.

## 6. O Sistema CDMA baseado na IS-95 da TIA/EIA

Em 1992 foi submetido à TIA ("Telecommunication Industries Association") da EIA uma proposta da Qualcomm Incorporated, de um novo sistema de telefonia celular digital baseado em SST ("Spread Spectrum Technology"), chamado de CDMA ("Code Division Multiple Access"). O CDMA se apresenta como um sistema de telefonia celular digital de terceira geração e portanto como uma alternativa ao padrão TDMA.

Em 1994 a TIA/EIA acolheu a proposta da Qualcomm como um dos padrões industriais para telefonia celular sob o código IS-95 (Interim Standard). O padrão novo se apresenta como um Dual-Mode Wideband Spread Spectrum Cellular System, ou seja, permite a operação tanto no modo AMPS analógico como no modo digital segundo a proposta CDMA da Qualcomm. Desta maneira é garantida a convivência entre o sistema AMPS, que atualmente representa 85% da base de telefonia celular instalada nos EUA, com o novo sistema celular digital CDMA.

A tecnologia SST foi desenvolvida na década de 40, durante a Segunda Guerra Mundial, para permitir comunicações militares seguras. Um transmissor SST espalha ou difunde o sinal de rádio sobre uma ampla gama de frequências, segundo uma seqüência determinada. No lado da recepção o sinal só pode ser detectado por receptores de faixa larga e que conheçam a seqüência de espalhamento. Este código ou seqüência de espalhamento deu origem ao nome de SST-CDMA.

O CDMA divide a banda de 25 MHz em 10 canais duplex de RF com 1,25 MHz de largura de banda cada. Cada macro célula pode utilizar a banda celular inteira, o que significa um fator de re-utilização da frequência igual a um. Em cada canal de RF são transmitidos simultaneamente 64 canais digitais de 9600 bit/s, diferenciados através de códigos de modulação e sequenciação de espalhamento próprios. Destes, 55 são de telefonia, 7 para o serviço de mensagens ou paging e 2 são reservados para controle de acesso e sincronismo.

O sistema tem como desvantagem a necessidade de um rígido controle da potência de transmissão das estações móveis por parte da estação base. Este controle é necessário para minimizar o problema de interferência, tendo em vista que na recepção, além do ruído próprio da banda larga (1,25 MHz), todos os usuários de um determinado canal RF dentro da célula, interferem entre si, pois ocupam todos a mesma banda. Além desta interferência temos ainda, em grau menor, a interferência causada pelos usuários das células adjacentes no mesmo canal RF.

### Capacidade máxima do Sistema:

O número máximo de canais por canal de RF do sistema CDMA é de 64 canais de 9600 bit/s por banda de 1,25 MHz. Utilizando porém técnicas de setorização e técnicas de otimização devido as pausas de voz, é demonstrado em [QUA92] que pode-se chegar a um valor de 98 usuários por banda de 1,25 MHz. Desta forma, o número máximo de usuários por célula  $N_{max}$  do sistema CDMA será:

$$N_{max} = 10 \times 98 = 980 \text{ usuários por célula}$$

Neste número, se comparado ao do TDMA, deve-se levar em conta o fato de que no CDMA estamos lidando com canais de 9600 bit/s, contra 6500 bit/s (half-rate) do TDMA.

### Eficiência Espectral do Sistema

A eficiência espectral  $E$  do sistema CDMA será por definição igual ao número máximo de canais  $N_c$  por célula por MHz de banda  $B_c$ , multiplicado pelo fator de re-utilização de frequência  $F$  e o fator de setorização  $S$ , ou seja;

$$E = N_c/B_c \times F \times S \text{ canais/ célula/ MHz}$$

No caso do CDMA temos:  $N_c = 64 \times 10/12,5$  e assumindo um  $S = 2,55$  e  $F = 1$  teremos;

$$E = 64/1,25 \times 2,55 = 130,56 \text{ canais/ célula/ MHz}$$

Verifica-se portanto neste sistema uma eficiência espectral aproximadamente 20 vezes melhor em relação ao sistema AMPS e 3,7 vezes maior em relação ao sistema TDMA (IS-136).

### Sigilo e Segurança

Um dos pontos fortes do sistema é a sua segurança e sigilo. Mesmo não utilizando mecanismos específicos de encriptação dos dados, o sistema faz uso de um código convolucional e mais um código de entrelaçamento em blocos, que por si só já garantem um certo grau de sigilo aos dados. Além disto, a técnica SST aplica ao fluxo de dados um código pseudo-aleatório equivalente a um polinômio de grau 47 e taxa de 1,2288 Mc/s (Mc/s: milhões de chips/s - elementos binários de espalhamento por segundo) como uma chave específica de usuário, e mais um embaralhador (randomizador) no modulador com quadratura. Todas estas técnicas e códigos tornam difíceis quaisquer tentativas de quebra de sigilo. Se houver necessidade de maior segurança, pode-se incluir facilmente um método de encriptação padronizado, disponível no sistema.

### Robustez quanto a ruído, interferência e "fading"

É em relação a estas características que o sistema CDMA apresenta os maiores trunfos comparado aos demais. O enfoque adotado pelo sistema para o controle do "fading", causado pela existência de caminhos múltiplos do sinal, é a de utilizar várias formas de diversidade, ou seja, em relação ao tempo, espaço e frequência (ver figura 6).

- Diversidade de Tempo - é conseguida através de entrelaçamento dos símbolos em blocos e uma codificação convolucional que permite detecção e correção de erros.
- Diversidade de Espaço (ou caminhos) - é conseguida de três maneiras distintas:
  - caminhos de sinal múltiplos através de enlaces simultâneos entre duas ou mais células ("hand-off" suave).
  - exploração do ambiente multi-caminho através do processamento separado, porém simultâneo, de vários sinais com atrasos de propagação diferentes e combinando os resultados.
  - antenas múltiplas no espaço da célula.
- Diversidade de frequência - é conseguida através da própria técnica de espalhamento que gera um sinal com uma largura de banda de 1,25 MHz.

A performance superior do sistema CDMA é em grande parte conseguida devido a estas características de diversidade do sistema. Diversidade de tempo e algum tipo de diversidade espacial, como as antenas múltiplas, é conseguida também nos sistemas AMPS e TDMA. Porém as demais diversidades são inerentes ao sistema CDMA.

Para manter as interferências de outros usuários, tanto da própria célula como das células adjacentes, em níveis toleráveis, o sistema adotou um mecanismo de controle da potência emitida pela estação móvel em três níveis; um enlace de controle de potência lento no sentido direto (base para móvel) e dois enlaces de controle rápidos no sentido reverso, sendo um aberto e um fechado. Este mesmo mecanismo permite também uma outra vantagem, a expansão suave do número de usuários dentro de uma célula. Ao contrário do sistema AMPS e TDMA, que bloqueiam quando é atingido o número máximo de usuários dentro de uma célula, o sistema CDMA ao se aproximar

de sua capacidade máxima, comanda as estações móveis para uma potência menor, conseguindo desta forma aumentar o número de usuários [QUA92].

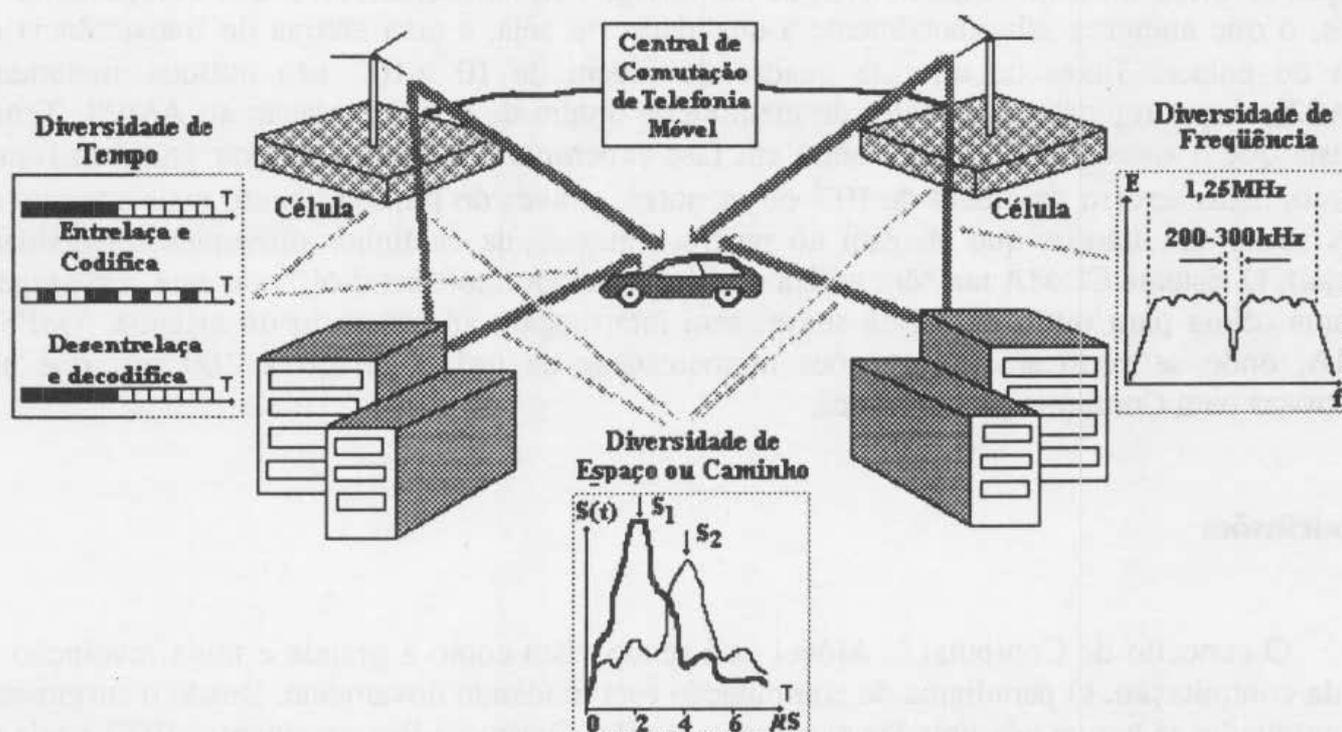


Fig. 6 Diversidade de Frequência, Espaço e Tempo no sistema CDMA

### Capacidade de atualização tecnológica

No atual sistema já se encontram embutidos os serviços de voz/dados e *paging* (difusão de mensagens). Protocolos de FAX poderão ser suportados pela estrutura de controle atual em futuro próximo.

O sistema, além disto, pode servir de suporte a uma série de aplicações ou serviços futuros devido a suas características inerentes. Assim, se for necessário, poderá ser concebido um equipamento único, multiprotocolar, capaz de oferecer acessos a diferentes rádio-sistemas como PABX sem fio (cordless), sistema residencial sem fio, sistemas digitais públicos sem fio, redes privadas de comunicação (PCN-Private Communication Network) e sistemas celulares. O equipamento poderá ter interfaces para conexão com ISDN, WAN, LAN, PABX e Rede Telefônica Pública.

### Facilidades próprias do Sistema para Comunicação de Dados.

O sistema CDMA fornece atualmente um canal duplex com uma taxa máxima de 9600 bit/s. A sinalização da chamada é feita dentro do próprio canal de tráfego ou seja sinalização dentro da banda, da mesma forma como no canal de voz do sistema telefônico fixo. Isto significa que o canal somente será transparente para Comunicação de Dados após passar por uma fase de "hand shake" como na telefonia fixa. Além disto, o CDMA preconizado pela IS-95, utiliza um vocoder de taxa variável controlado a partir da estação base em função do nível de interferência observado pelo sistema. Para contornar este problema, o serviço de Comunicação de Dados no CDMA, deverá ser estruturado em transferência assíncrona de pacotes, tipo X.25, para compatibilizar as taxas de transferência. Por outro lado, sendo o sistema digital, não há

necessidade de equipamento extra, como modem ou CSU ("Channel Service Unit"), como no caso do AMPS.

Quanto à confiabilidade e taxa de erro, o sistema CDMA fornece funções de detecção e correção de erros no nível físico através de um código convolucional, CRC e entrelaçamento de blocos, o que aumenta substancialmente a qualidade, ou seja, a taxa efetiva de transferência de dados do enlace. Taxas de erro de quadro da ordem de  $10^{-3}$  a  $10^{-4}$  são obtidos atualmente [QUA92], o que representa um fator de melhora da ordem de dez em relação ao AMPS. Tendo em vista que o sistema ainda se encontra em fase experimental, é de se esperar para um futuro próximo, taxas de erro da ordem de  $10^{-5}$  ou menores, através do processamento mais apurado de vários sinais simultâneos que chegam ao receptor através de caminhos diferentes (diversidade espacial). O sistema CDMA também utiliza o assim chamado "soft-hand-off", ou seja, a passagem de uma célula para outra de forma suave, sem interrupção, ao contrário do sistema AMPS e TDMA, onde se verificam interrupções momentâneas da ordem de 50 a 100 ms, que são desastrosas para Comunicação de Dados.

## 7. Conclusões

O conceito de Computação Móvel está sendo visto como a grande e nova revolução na área da computação. O paradigma de computação está mudando novamente. Desde o surgimento do computador já houve três grandes mudanças: 1960 o Centro de Processamento, 1970 a sala do Terminal, 1980 a Estação de Trabalho e as Redes, 1990 a Computação Móvel e Ubíqua, de e para qualquer lugar. A característica chave da Computação Móvel é o fato de ter a habilidade de fornecer recursos de computação a qualquer hora e de qualquer lugar. O principal suporte para a Computação Móvel são as Comunicações sem Fio. Computação Móvel (CM) e Computação Sem Fio (SF) não devem ser tomados como sinônimos. Em CM dispositivos de computação portáteis são conectados a redes através de conexões sem fio ou portas com fiação. A comunicação SF utiliza métodos de transmissão que são aplicados a serviços ou dispositivos de computação em instalações permanentes, temporários ou móveis.

Na CM as RCTM serão em futuro próximo um dos principais suportes de comunicações pessoais (PC - Personal Communications) porém não o único. Entre os diversos sistemas RCTM implantados, o sistema AMPS ocupa um lugar de destaque com quase 85% dos terminais instalados nos EUA e praticamente o único sistema instalado nos países sul-americanos, incluindo o Brasil. O sistema AMPS, com sua característica analógica, não oferece maiores atrativos para sua aplicação ampla e eficiente em CM. Também não oferece uma perspectiva de atualização tecnológica, devendo ser progressivamente substituído por um sistema digital de segunda ou terceira geração.

Em quase todos os países há uma preocupação crescente para definir a RCTM digital a ser adotado e como proceder para efetuar esta mudança. É consenso que esta mudança passará necessariamente por uma fase de transição em que deverá ser adotado um padrão do tipo dois modos de operação simultânea (dual mode); AMPS e o novo sistema a ser escolhido entre o TDMA (ou D-AMPS) e o CDMA. Não vemos condições de que o sistema GSM europeu tenha alguma chance de vir a ser adotado em algum país da América-latina, o que de alguma forma pode parecer surpreendente, tendo em vista que quase todos os países sul-americanos tem seguido sempre as recomendações européias do ITU-T.

Tabela 2 Comparativo entre os sistemas AMPS, TDMA (IS-136) e CDMA (IS-95)

Sistema RCTM	AMPS	TDMA IS-136	CDMA IS-95
Capacidade máxima do Sistema	147,9	887,4	980
Eficiência Espectral	5,92	35,50	130,56
Processamento para Controle do "Fading"	Somente diversidade espacial	"Interleaving" e diversidade espacial	"Interleaving", diversidade espacial e espalhamento do espectro
Capacidade de Atualização Tecnológica	Analógico Pouco apto	Totalmente digital Apto à atualização	Totalmente digital Apto à atualização
Sigilo e Segurança	Nenhuma	Multiplexação TDM Suporta encriptação	Diversos códigos próprios Suporta encriptação
Controle de Erro Taxa de erro típica	Sem controle de erro Sensível a ruído impulsivo Taxa de erro de $10^{-2}$ a $10^{-3}$	Suporta controle de erro Taxa de erro de $10^{-3}$ a $10^{-4}$	Código de Entrel. e Convolutacional Detecção e Correção Taxa de erro de $10^{-5}$
Facilidades para Serviço de Comunicação de Dados	Necessita Modem V.32bis 14,4 kbit/s Taxa efetiva $\cong$ 1,2 kbit/s	Necessidade de unidade de IWF* Taxa efetiva de 4,8 kbit/s	Necessidade de unidade de IWF* Taxa efetiva de 9,6 kbit/s

\* IWF : Interworking Functions

Pela análise comparativa feita neste trabalho, ficou claro também que as vantagens do sistema CDMA, são por de mais óbvias, o que nos leva a concordar com a posição da Telebrás [SIQ94b] de que seja preconizado para as futuras RCTMs do Brasil o sistema CDMA. Na tabela 2 estão resumidas as principais características que foram objeto da nossa análise.

## 8. Bibliografia

- [DIG94] DIGITAL EQUIPMENT CORPORATION-DEC, **A Guide to Mobile and Wireless Networking**, Special Advertising Section in: Data Communication v.21, May 1994.
- [GIL91] GILHOUSEN, K. S., JACOBS, I. M., PADOVANI, R., VITERBI, A. J., WEAVER, L. A., WHEATLEY III, C. E. **On the Capacity of a Cellular CDMA System**. IEEE Transactions on Vehicular Technology, May 1991, p. 303-312.
- [GOO91] GOODMAN, D. J., **Trends in Cellular and Cordless Communications**. IEEE Communications Magazine, June 1991, p. 31-40.

- [JOH94] JOHNSON, J. T. **Wireless Data: Welcome to the Enterprise.** Data Communications, March 1994, p.42-45.
- [MIL94] MILLER, K. **Cellular Essentials for Wireless Data Transmission.** Data Communications, March 1994, p. 61-67.
- [QUA92] QUALCOMM INCORPORATED, **An Overview of the Application of Code Division Multiple Access (CDMA) to Digital Cellular Systems and Personal Cellular Networks.** Document Number EX60-10010 from Qualcomm Incorporated, 1992, p.58.
- [SIQ94a] SIQUEIRA, E. **O Brasil no Quadro Mundial.** RNT-Revista Nacional de Telecomunicações, n.184, dezembro 1994, p.14-20.
- [SIQ94b] SIQUEIRA, E. **TDMA E CDMA são Padrões em Evolução.** RNT-Revista Nacional de Telecomunicações, n.184, dezembro 1994, p.32-40.
- [TIA94] TIA/EIA **Mobile Station - Base Station Compatibility Standard for Dual-Mode Wideband Spread Spectrum Cellular System.** Interim Standard TIA/EIA/IS-95, March 1994, p 604.
- [WEI93] WEISSMAN, D., LEVESQUE, A. H., DEAN, R. A. **Interoperable Wireless Data.** IEEE Communications Magazine, February 1993, p. 68-77.