

Capítulo 5

Sistemas *Wireless* e Padrões

Este capítulo destina-se a um breve estudo da evolução dos sistemas *wireless* (em caráter informativo) desde a geração analógica até a terceira geração, ainda não completamente padronizada. São descritos ainda, de forma sucinta, os principais padrões atualmente utilizados.

Parte do material que constitui este capítulo foi reproduzida a partir do *site* da Telesp Celular, referenciado em [12] e parte foi extraída de um tutorial disponibilizado pelo Prof. Dayani Adionel Guimarães, conforme referência [13]. Para atualização sobre o desenvolvimento dos sistemas de terceira geração duas boas fontes são sugeridas, uma delas é o *GSM World*, referenciado em [14] e o *CDMA Developers Group*, citado em [15].

5.1 Sistemas Celulares de Primeira Geração

Os Laboratórios Bell, da AT&T, desenvolveram o conceito de telefonia celular em 1947, sendo que em 1970 a própria AT&T propôs o primeiro sistema telefônico celular de alta capacidade, que ficou conhecido pela sigla AMPS (*Advanced Mobile Phone Service*). Em 13 de Outubro de 1983, o primeiro sistema celular entrava em operação comercial nos EUA, em Chicago. No entanto, a NTT (*Nippon Telephone & Telegraph*) havia se antecipado colocando um sistema semelhante ao AMPS em operação em 1979 na cidade de Tóquio, no Japão.

Na Europa, a primeira geração de sistemas celulares era composta de diversos sistemas. O NMT (*Nordic Mobile Telecommunications*), adotado por diversos outros países além dos nórdicos; o TACS (*Total Access Communications System*), adotado no Reino Unido, Itália, Áustria, Espanha e Irlanda; o C-450 na Alemanha e Portugal; o Radiocom 2000 na França e o RTMS na Itália.

Todos esses sistemas são bastante parecidos entre si, sendo que as principais diferenças concentram-se no uso do espectro de frequência e no espaçamento entre canais. O AMPS, por exemplo, opera na faixa de 869-894 MHz para recepção e 824-849 MHz para transmissão; o NMT-450 opera na faixa de 463-468 MHz para recepção e 453-458 MHz para transmissão; enquanto que o NMT-900 utiliza a faixa de 935-960 MHz para recepção e 890-915 MHz para transmissão. Com relação ao espaçamento entre os canais, por exemplo, o sistema AMPS adota 30 kHz, enquanto que o sistema TACS e vários outros sistemas adotam 25 kHz.

A primeira geração de sistemas celulares caracteriza-se basicamente por ser analógica, utilizando modulação em frequência para voz e modulação digital FSK (*Frequency Shift Keying*) para sinalização. Para acesso múltiplo é utilizada a técnica FDMA (*Frequency Division Multiple Access*). O tamanho das células situa-se na faixa de 500 metros a 10 quilômetros, sendo permitido o *handoff*, operação que permite a transferência automática de ligações de uma célula para outra. O sistema possibilita *roaming* (transferência automática de ligações entre sistemas) entre os diferentes provedores de serviço, desde que adotem o mesmo sistema.

5.2 Sistemas Celulares de Segunda Geração

Em função da pressão de demanda, particularmente nos EUA – onde o sistema analógico havia atingido o limite de sua capacidade nas maiores áreas metropolitanas – e devido à necessidade de padronização para o sistema celular Europeu, foi necessário dar início ao desenvolvimento de sistemas digitais.

Os sistemas digitais, além de possibilitar uma maior capacidade, ofereciam as seguintes vantagens sobre os analógicos: técnicas de codificação digital de voz mais poderosas, maior eficiência espectral, melhor qualidade de voz, facilidade para comunicação de dados e criptografia da informação transmitida.

Como resultado desse esforço surgiram os sistemas conhecidos como GSM (*Group Special Mobile/Global System for Mobile Communications*) na Europa, o TDMA (*Time Division Multiple Access*, IS-54 e IS-136) e o CDMA (*Code Division Multiple Access*, IS-95) nos EUA e o PDC (*Personal Digital Cellular*) no Japão.

Os sistemas IS-54 e IS-136 são baseados na técnica de acesso múltiplo por divisão do tempo (TDMA), razão pela qual são muitas vezes chamados de sistemas TDMA.

O padrão IS-95, que é baseado na técnica de acesso múltiplo por divisão de código – um forte concorrente dos sistemas que utilizam TDMA – é um sistema proprietário desenvolvido pela empresa QUALCOMM, baseada em San Diego, Califórnia. O sistema utiliza espalhamento espectral e foi originalmente utilizado em aplicações militares para espalhar o sinal em uma faixa espectral larga, tornando as transmissões difíceis de serem interceptadas ou mesmo interferidas.

Um outro padrão, ainda considerado pertencente ao grupo de sistemas de segunda geração, é o sistema CDMA de banda larga (*Broadband CDMA* ou B-CDMA), cujas patentes estão em poder da empresa *InterDigital*.

O sistema GSM foi adotado como padrão Europeu em meados dos anos 80 e introduzido comercialmente em 1992, operando na faixa de frequência 935-960 MHz para recepção e 890-915 MHz para transmissão. O GSM possui uma arquitetura aberta, o que permite a combinação de equipamentos de diferentes fabricantes, possibilitando assim a manutenção de baixos custos. A seu favor, contabiliza-se ainda uma larga infra-estrutura já implantada, sendo hoje, indiscutivelmente, o padrão mais popular implementado mundialmente (estima-se que 71% do mercado mundial atual (2002) é atendido pela tecnologia GSM).

Em resumo, os serviços de comunicações de segunda geração são baseados em sistemas de alto desempenho, alguns com capacidade, no mínimo, três vezes superior à dos sistemas de primeira geração. Caracterizam-se, principalmente, pela utilização de tecnologia digital para transmissão de voz e sinalização.

5.3 Sistemas Celulares de Terceira Geração

A comunicação sem fio permitindo a troca de informações a altas taxas e com alta qualidade entre terminais pequenos e portáteis que podem estar localizados em qualquer parte do mundo representa a fronteira a ser alcançada pelos sistemas de terceira geração – “*a global system to connect anywhere anytime*”.

O início dos estudos sobre os sistemas de terceira geração foi marcado por uma indecisão mantida por duas correntes: uma defendia a criação de um único padrão mundial; a outra defendia a evolução das redes e sistemas atuais de forma a atender aos requisitos definidos a partir da visão 3G. Apesar de ambas as alternativas possibilitarem economia de escala de fabricação para os componentes do sistema, a segunda teve maior força, pois também permite que os maciços investimentos já realizados pelas operadoras na implantação das redes e pelos fabricantes em processos de fabricação e etapas de desenvolvimento de produtos em todo o mundo fossem de certa forma protegidos.

O ITU elaborou um conjunto de requisitos, de tal forma que pudessem ser apresentadas propostas para as tecnologias de transmissão via rádio (RTTs, *Radio Transmission Technologies*) candidatas a compor o conjunto de especificações para o futuro padrão mundial de sistema de comunicação móvel 3G. A esse sistema foi inicialmente dado o nome de FPLMTS (*Future Public Land Mobile Telecommunication System*), com o objetivo de atender tanto aos usuários fixos quanto aos usuários móveis, em redes públicas e privadas. Posteriormente o nome FPLMTS foi modificado para IMT-2000 (*International Mobile Telecommunications – 2000*), nome este que é mantido e reconhecido até hoje.

O real início de operação do IMT-2000 está predominantemente sujeito a considerações de mercado, mas também a considerações técnicas. Esse sistema irá prover acesso, através de um ou mais *links* de rádio, a uma ampla gama de serviços de telecomunicações suportados por redes fixas como a PSTN (RPTC), a RDSI e as redes IP e/ou X.25 e, ainda, a serviços específicos a usuários móveis. Deverão existir vários tipos de terminais móveis com capacidade de acesso fixo ou móvel a redes baseadas em satélites e/ou redes terrestres. Os principais atributos do IMT-2000 são:

- Alto grau de aspectos comuns (*high commonality*) de projeto em todo o mundo.
- Compatibilidade de serviços dentro do sistema e com as redes fixas.
- Alta qualidade.
- Terminais de pequeno porte.
- Possibilidade de *roaming* global.
- Elevadas taxas de transmissão, possibilitando aplicações multimídia com uma vasta gama de serviços e terminais.

O alto grau de aspectos comuns de um padrão mundial não só possibilitará grande economia de escala, mas facilitará a implementação do *roaming* global e impulsionará o incremento na indústria de Tecnologia da Informação (IT, *Information Technology*) em aplicações tais como serviços de multimídia que farão com que as redes de comunicação móvel possam ser vistas como uma extensão sem fio da Internet.

Para permitir cobertura e *roaming* global o IMT-2000 contará com a componente terrestre e a componente via satélite, atendendo aos usuários pico-celulares em interiores (*indoor* ou *in-building*), micro e macro-celulares em exteriores (*outdoor*) e em regiões remotas com cobertura global via satélite.

As velocidades de movimentação dos terminais irão de velocidade de pedestre (cerca de 10 km/h) a mais de 250 km/h, com taxas de transmissão de dados dependentes dessas velocidades e que variam de cerca de 144 kbit/s para terminais em alta velocidade em ambientes externos a 2 Mbit/s para terminais em velocidade de pedestre ou fixos, em ambientes internos. A Tabela 5.1 sintetiza alguns dados sobre os ambientes de operação, taxas atingíveis e qualidade de serviço esperada para o IMT-2000.

Ambiente	Máxima velocidade do terminal	Taxa de pico	BER alvo (tempo real / não tempo real)
Rural <i>outdoor</i>	250 km/h	144 kbit/s, preferencial 384 kbit/s	$10^{-3} - 10^{-7} / 10^{-5} - 10^{-8}$
Urbano / suburbano <i>outdoor</i>	150 km/h	384 kbit/s, preferencial 512 kbit/s	$10^{-3} - 10^{-7} / 10^{-5} - 10^{-8}$
<i>Indoor</i> / <i>outdoor</i> de curto alcance	10 km/h	2 Mbit/s	$10^{-3} - 10^{-7} / 10^{-5} - 10^{-8}$

Tabela 5.1 – Ambientes de operação para o IMT-2000.

É esperado que os usuários possam receber os serviços oferecidos pelo IMT-2000 independente de sua localização geográfica, com qualidade comparável àquela fornecida pelas redes *wired*, sendo essa qualidade influenciada apenas pelos limites impostos por cada ambiente de operação. A esse conceito dá-se o nome de **VHE** (*Virtual Home Environment*). O VHE está associado ao conceito de serviços UPT (*Universal Personal Telecommunication*) que utilizam as facilidades oferecidas pelas Redes Inteligentes (IN, *Intelligent Network*) para oferecer mobilidade pessoal (*Personal Mobility*) aos usuários finais. Por mobilidade pessoal entende-se a entrega de serviços e tarifação baseada em um número pessoal associado a cada usuário, de tal forma que o mesmo perfil de serviços seja oferecido ao usuário, independente de sua localização.

Espera-se ainda que a natureza predominante do tráfego multimídia que circulará nas futuras redes do sistema IMT-2000 seja assimétrica (como tipicamente ocorre no acesso à Internet) e que o sistema tenha que ser capaz de alocar os recursos de banda aos usuários por demanda (*bandwidth-on-demand*).

Com o IMT-2000 será percebida grande integração das redes com e sem fio, procurando interoperabilidade suficiente para dar ao sistema a flexibilidade exigida pelo mercado em termos da evolução e adequação dos serviços.

O IMT-2000, na verdade, será composto por uma família de especificações que atenderão aos requisitos dos sistemas de 3G. Os usuários dessa família de sistemas 3G deverão conviver com terminais multi-modo e multi-banda, capazes de permitir o *roaming* global de forma transparente. Tais terminais, desenvolvidos a partir de modernas técnicas de processamento digital, futuramente deverão ter suas interfaces de rádio configuradas automaticamente, via *software radio*, dependendo das características da rede utilizada e das condições do ambiente de propagação, a cada momento.

No que diz respeito às faixas de frequência de operação para os sistemas 3G, no ano 2000 a *World Radio Conference* do ITU estabeleceu as bandas de 2500–2690 MHz, 1710–1885 MHz e 806–960 MHz em caráter mundial para uso pelo IMT-2000. Nos Estados Unidos, uma banda espectral adicional próxima de 700MHz também foi destinada aos sistemas de terceira geração.

A ANATEL, inicialmente, atribuiu as faixas de 1885 – 1900 MHz, 1950 – 1980 MHz e 2140 – 2170 MHz para uso pelo IMT-2000.

Um outro ponto importante a considerar se refere à natureza assimétrica dos dados que predominantemente trafegarão pelas redes 3G, necessitando de maior capacidade no *link* direto do que no *link* reverso e, por conseqüência, atribuições assimétricas de banda.

Observando as faixas de freqüência escolhidas para o IMT-2000 pode-se notar que elas são significativamente mais altas que aquelas utilizadas pela maioria dos sistemas de segunda geração (abaixo de 1 GHz). Esse fato antecipa uma dificuldade maior no planejamento e na implantação dos sistemas 3G, pois a influência dos obstáculos entre transmissor e receptor torna-se mais significativa a freqüências mais elevadas, conduzindo à necessidade de utilização de ferramentas de análise de interferência mais precisas.

Além da limitação devida a interferências inerentes aos sistemas celulares, principalmente devido ao reuso de freqüências, os sistemas 3G terão também maior limitação de potência do que os sistemas de segunda geração, devido às condições de propagação nessa faixa de freqüências serem mais severas do que em faixas de freqüências mais baixas.

Na tecnologia 3G o modo de transmissão predominante nas atuais redes celulares (modo de transmissão por comutação de circuitos) dará lugar ao modo de transmissão por comutação de pacotes, modo esse compatível com a rede mundial e seu protocolo IP (*Internet Protocol*). Em um serviço de transmissão de dados baseado em comutação por circuitos é necessário o estabelecimento de uma conexão antes que os dados sejam transferidos da fonte ao destino, tratando-se portanto de um serviço orientado à conexão. O modo de transmissão de dados por comutação de pacotes se refere ao processo de roteamento e transferência de dados através de pacotes endereçados, de tal forma que um canal seja ocupado somente durante a transmissão do pacote. Pacotes consecutivos podem trafegar por caminhos diferentes na rede de acordo com o roteamento imposto a cada pacote.

Nos sistemas 3G deverá também haver uma mudança na forma de tarifação atual, predominantemente baseada em tempo de conexão, para técnicas de tarifação baseadas no tipo de mídia transportado e/ou no volume de tráfego gerado pelo usuário.

Os protocolos de compatibilização do conteúdo da Internet com os terminais móveis, como o WAP (*Wireless Application Protocol*), o transporte de voz sobre redes IP, VoIP (*Voice over IP*) e o transporte de tráfego IP sobre redes ATM (*Asynchronous Transfer Mode*) ou sobre redes WATM (*Wireless ATM*) são termos que deverão passar a ser comuns na terceira geração de sistemas de comunicações móveis.

Outras técnicas serão responsáveis por uma interface de rádio capaz de suportar os serviços almeçados para os sistemas 3G (e para os futuros sistemas 4G) e, conseqüentemente, as elevadas taxas necessárias. Algumas destas técnicas são:

- Equalização no domínio do tempo e do espaço.
- Técnicas de antenas adaptativas.
- Potentes esquemas de codificação de canal.
- Alocação de banda por demanda.
- *Software* Radio.
- Evolução da tecnologia de semicondutores.

A equalização no domínio do tempo e do espaço (*Space-Time Domain Equalization*) combina estruturas de equalização adaptativa temporal com arranjos espaciais de antenas, tendo como principal objetivo a redução da interferência devida a multipercursos (*Multipath Interference*) e a interferência intersimbólica.

O uso de antenas adaptativas se presta tanto na implementação da equalização no domínio do tempo e do espaço quanto para o cancelamento de interferências. Nessa última função, um arranjo de antenas é controlado de forma adaptativa objetivando maximizar a intensidade de irradiação (ganho) na direção desejada e minimizar a intensidade de irradiação na direção das fontes de interferência. O padrão de irradiação do arranjo é, então, dinamicamente conformado de tal sorte que a relação entre a potência de sinal desejado e a potência de sinal interferente seja maximizada. É importante ressaltar que os elementos chave desse processo são o algoritmo de adaptação e a implementação do arranjo. Numa primeira e simplificada análise, quanto mais eficaz o algoritmo, mais complexo e de execução demorada ele se torna; e quanto mais elementos compõem o arranjo de antenas, mais eficaz é o processo de cancelamento de interferências e direcionamento do feixe.

Claude E. Shannon demonstrou que adicionando redundância controlada à informação poder-se-ia reduzir a quantidade de erros na recepção, produzidos pelo ruído, a um patamar tão pequeno quanto se quisesse, desde que a taxa de transmissão estivesse abaixo da capacidade do canal, taxa determinada por um limite conhecido por limite de Shannon. A codificação de canal é justamente o processo através do qual essa redundância é adicionada à informação de modo a permitir a detecção e correção de erros. O termo “redundância controlada” está relacionado à restrição das possíveis seqüências de bits de informação na recepção. Tendo uma seqüência detectada um padrão diferente das possíveis seqüências, o decodificador de canal “procura” dentre elas a seqüência que mais se assemelha à seqüência detectada. Essa semelhança é obtida através da correta utilização de critérios de decisão, sendo que os mais conhecidos são o critério do máximo *a-posteriori* (MAP, *Maximum a-posteriori*) e o de máxima verossimilhança (ML, *Maximum Likelihood*). Ambos têm como objetivo minimizar o erro de bits transmitidos.

Atualmente existem vários esquemas de codificação de canal que levam um sistema de comunicação a um desempenho muito próximo da capacidade do canal. Dentre eles destacam-se os Códigos Turbo.

Os vários tipos de mídia que serão suportados pelo IMT-2000 com suas diferentes taxas e qualidades de serviço (QoS, *Quality of Service*) impõem a necessidade da alocação de banda por demanda e diferentes níveis de proteção da informação, respectivamente. Os diferentes níveis de proteção podem ser atingidos com a mudança do esquema de codificação de canal em função da QoS imposta por cada serviço oferecido. A alocação de banda por demanda permitirá que um usuário ocupe uma largura de faixa que será função do serviço utilizado a cada instante. Quanto maior a taxa de transmissão necessária para esse serviço, mais banda será disponibilizada. Por exemplo, um usuário que estiver utilizando o sistema apenas para tráfego de voz irá ocupar uma banda significativamente menor do que aquele que estiver utilizando para vídeo conferência. A alocação por demanda de canais (códigos) e o uso de fatores de espalhamento espectral variáveis (VSF, *Variable Spreading Factor*) nos sistemas CDMA e a alocação de slots temporais por demanda nos sistemas TDMA serão os principais responsáveis por atender a esse tráfego multi-taxas, de tal sorte que a utilização dos recursos de rádio seja otimizada e a capacidade do sistema seja maximizada.

O termo *software-radio*, de modo geral, pode ser entendido como um sistema responsável pela configuração via *software* de elementos da interface de rádio dos sistemas de comunicação, tais como: técnica de múltiplo acesso, modulação e codificação de canal.

A configuração por *software* permitirá a adaptação da interface às condições do ambiente e ao tipo de informação transportada. As principais vantagens do *software-radio* incluem (mas não se limitam a):

- flexibilidade, devido à configuração da interface de rádio por *software* e não por *hardware*;
- repetibilidade e precisão;
- invariabilidade com o tempo e condições ambientais;
- capacidade de implementação de sofisticadas funções a custos relativamente reduzidos e
- custos de implementação e dimensões cada vez mais reduzidos, conforme permite a evolução da tecnologia de semicondutores marcada pela evolução na escala de integração (VLSI, *Very Large Scale Integration*) e a evolução dos processadores digitais de sinais (DSPs, *Digital Signal Processors*).

A última vantagem acima citada representa um dos grandes impulsionadores e responsáveis pelos maiores avanços nas comunicações sem fio. O processo de miniaturização, o aumento na densidade de empacotamento, o aumento na capacidade de processamento e a diminuição no consumo de potência são fatores que viabilizarão cada vez mais as implementações tecnológicas que suportarão as contínuas evoluções nos sistemas de comunicação de terceira geração e além da terceira geração.

A evolução tecnológica nos processos de armazenamento de energia tem também grande impacto na evolução dos sistemas de comunicações móveis. Infelizmente essa evolução não tem ocorrido em velocidade compatível com os demais itens desses sistemas: enquanto a velocidade de processamento de CPUs dobra a aproximadamente cada 18 meses, a densidade de energia das baterias levou quase 35 anos para que fosse duplicada – esse fato terá grande impacto nas dimensões e na portabilidade dos futuros terminais. No dias de hoje, as baterias representam quase que metade do volume e do peso dos equipamentos portáteis.

Um outro quesito também importante a se considerar nos sistemas de comunicação é a segurança e o sigilo. O IMT-2000 se valerá de modernas técnicas de criptografia e de autenticação de usuários, de forma a evitar fraudes. Apesar dos processos de criptografia já

serem amplamente empregados nos sistemas 2G e a autenticação já ser parte de todo estabelecimento de uma chamada nesses sistemas, pode-se dar destaque a essas implementações no padrão GSM. O SIM (*Subscriber Identity Module*) utilizado no GSM é um cartão que contém a identificação completa do usuário, chaves de código de privacidade e outras informações específicas sobre o usuário e os serviços por ele contratados. O SIM pode ter a forma de um cartão de crédito ou de um *plug-in* com dimensões aproximadas de 1,5 cm x 1,5 cm, que é conectado ao terminal GSM. Sem o SIM o terminal fica inoperante. É possível que todos os sistemas 3G venham a utilizar algum tipo de SIM com propósitos de segurança, identificação e armazenamento do perfil de serviços do usuário.

Merecem ainda destaque os esforços de pesquisa e desenvolvimento dos processos de codificação de voz e imagem. Esses processos, baseados nos princípios de codificação de fonte, procuram reduzir o grau de redundância contido nos sinais de voz e imagem e assim representar esses sinais na forma digital a taxas tão pequenas quanto possível, maximizando a eficiência de utilização do espectro nos sistemas de comunicação via rádio. O compromisso entre complexidade, consumo, taxa e inteligibilidade do sinal são importantes condições de contorno para a evolução desses processos. Grandes são os avanços alcançados até o momento e, certamente, num futuro não muito distante, outros ainda maiores serão atingidos.

O enorme desafio nesse início de século 21 será prover todos esses novos serviços com todas essas tecnologias através de sistemas de comunicação móvel inter-operáveis e com cobertura global.

A questão econômica é, com certeza, o maior empecilho enfrentado neste começo de século para a efetiva implantação dos sistemas de terceira geração. Tanto os custos de implantação, quanto o custo das licenças para operação ainda são proibitivos para um mercado ainda não perfeitamente definido (não se sabe o quanto o assinante estará disposto a pagar por um sistema que permitirá o acesso a inúmeros serviços de alta qualidade, que ainda não estão perfeitamente definidos e que surgirão à medida que os sistemas comecem a operar!).

Os investimentos elevados para a implantação de um sistema de terceira geração passam pela obtenção da licença para uso de espectro. Alguns governos Europeus leiloaram o

espectro de rádio para 3G em um período anterior ao período de crise desencadeado em 2001. O primeiro leilão ocorreu na Inglaterra, onde o valor arrecadado atingiu 35.5 bilhões de dólares americanos, em abril de 2000, para apenas 3 licenças de operação dentro da Inglaterra. Na Alemanha os leilões realizados um pouco mais tarde, no mesmo ano, geraram 46 bilhões de dólares americanos, para 4 licenças dentro do país. Após os problemas ocorridos na economia mundial em 2001, muitos governos, incluindo o governo americano, adiaram os leilões e as decisões de espectro destinadas aos sistemas de terceira geração.

5.4 Os Principais Padrões Atualmente Utilizados em Sistemas Celulares

Em 1982, a *Bell Labs* instalou pela primeira vez nos Estados Unidos o sistema celular analógico AMPS (*Advanced Mobile Phone System*), que tinha muito mais capacidade de canais simultâneos do que o sistema anteriormente usado (IMTS - *Improved Mobile Telephone System*). Tal sistema era utilizado não só nos EUA, como também na Inglaterra (onde era chamado TACS - *Total Access Communications System*) e no Japão (MCS - L1).

Este padrão de telefonia celular analógica divide uma região geográfica em células, cada uma usando um conjunto de frequências. O AMPS utiliza a técnica chamada FDMA (*Frequency Division Multiple Access*). No FDMA, cada usuário utiliza um canal até que a conversa acabe.

Nos EUA, começaram a surgir tecnologias celulares digitais e junto com elas uma intensa competição e a conseqüente briga pela sobrevivência. Algumas tecnologias desenvolveram-se mais que outras, oferecendo diferentes vantagens, mas a principal característica discutida era a capacidade de usuários simultâneos.

Nessa "guerra", destacaram-se duas tecnologias: a tecnologia TDMA e a tecnologia CDMA. A tecnologia TDMA (*Time Division Multiple Access*) é compatível com o sistema analógico AMPS e foi especificada nos padrões conhecidos como IS-54 (ou D-AMPS) e IS-136 (que difere do IS-54 pela introdução de um canal de controle digital). A tecnologia

CDMA (*Code Division Multiple Access*) é baseada na técnica de múltiplo acesso "*direct sequence spread spectrum*" e foi especificada no padrão IS-95 .

Em um determinado estágio do desenvolvimento dos sistemas celulares havia, na Europa cinco sistemas analógicos diferentes, em diferentes países, o que acabou por levar ao desenvolvimento de um novo sistema digital, conhecido por GSM (*Global System for Mobile Communications*). No Japão, o sistema utilizado é o PDC (Personal Digital Celular).

5.4.1 O Padrão AMPS e o Padrão ETACS

O padrão AMPS (*Advanced Mobile Phone System*) é o mais antigo e mais difundido sistema celular analógico, tendo sido desenvolvido pelos AT&T Bell *Laboratories* e empregado pela primeira vez pela Ameritech em 1983, em Chicago, USA. Em 1983, um total de 40 MHz de espectro foi alocado na banda de 800 MHz pelo FCC (*Federal Communications Commission*) para o sistema AMPS. À medida que a demanda por serviços celulares foi aumentada, esta banda foi acrescida de 10 MHz ("espectro estendido").

Os primeiros sistemas AMPS utilizavam células grandes e antenas omnidirecionais nas ERBs, sendo que o sistema pioneiro implantado em Chicago cobria aproximadamente 2100 milhas quadradas.

Um sistema AMPS utiliza um padrão de reuso de sete células, permitindo setorização e divisão de células para aumentar a capacidade do sistema, quando necessário. Após testes subjetivos foi determinado que os canais AMPS de (30 kHz) necessitavam uma relação Sinal/Interferência de 18dB para desempenho adequado do sistema. O menor fator de reuso que permitia atingir este requerimento utilizando antenas direcionais de 120° foi determinado como sendo $N = 7$.

O sistema AMPS foi empregado em todo o mundo e ainda é popular em regiões rurais dos Estados Unidos, América do Sul, Austrália e China.

O sistema também pode ser utilizado para transmissão de dados, mas com desempenho marginal, sendo muito menor do que em canais discados convencionais,

normalmente 10 kbps. Se existirem muitos obstáculos no percurso (grandes edifícios ou elevações), o desempenho pode cair para 1 kbps. Cada ERB é conectada por meio do Centro de Comutação e Controle (CCC) à Rede Telefônica Convencional. Quando um assinante móvel move-se de uma célula para outra, o controle fica a cargo do CCC.

O padrão ETACS (*European Total Access Communication System*) foi desenvolvido na metade dos anos 80, sendo virtualmente igual ao padrão AMPS, exceto pelo fato de utilizar canais de 25 kHz e da diferente formatação da identificação do usuário (*MIN - Mobile Identification Number*). O diferente critério utilizado para formatação da MIN é devido à necessidade de acomodar os diferentes códigos dos países Europeus (diferentemente dos códigos de área regionais americanos utilizados no padrão AMPS).

A Tabela 5.2 mostra algumas especificações dos sistemas AMPS e ETACS.

Parâmetro	AMPS	ETACS
Múltiplo Acesso	FDMA	FDMA
Duplexação	FDD	FDD
Largura de Banda do Canal	30 kHz	25 kHz
Usuário por Canal	1	1
Frequência Canal Reverso	824-849 MHz	890-915 MHz
Frequência Canal Direto	869-894 MHz	935-960 MHz
Modulação de Voz	FM	FM
Codificação de Canal para Transmissão de dados	BCH(40,28) no Canal Direto BCH(48,36) no Canal Reverso	BCH(40,28) no Canal Direto BCH(48,36) no Canal Reverso
Taxa de Dados	10 kbps	8 kbps
Número de Canais	832	1000

Tabela 5.2: Especificações dos sistemas AMPS e ETACS.

Para aumentar a capacidade dos sistemas AMPS, a Motorola desenvolveu em 1991 um sistema chamado N-AMPS (*Narrowband AMPS*) que não chegou a ser muito empregado devido à posterior migração para os sistemas digitais. O sistema N-AMPS representou, no

entanto, uma útil tecnologia de transição adotada antes da disponibilização dos sistemas digitais.

O padrão N-AMPS permitia três usuários em um canal de 30 kHz, através do uso da tecnologia de acesso múltiplo FDMA e canais de 10 kHz – provendo três vezes a capacidade do sistema AMPS.

5.4.2 O Padrão USDC (IS-54 e IS-136)

Em aproximadamente uma década o sistema AMPS foi substituído por um sistema totalmente digital, denominado USDC (*US Digital Cellular Technology*). O padrão USDC, especificado na IS-54 e na IS-136, teve por principal motivação aumentar a capacidade e o desempenho dos sistemas, suportando mais usuários em uma alocação fixa de espectro.

O padrão USDC é compatível com o sistema analógico AMPS, utilizando a tecnologia TDMA (*Time Division Multiple Access*) e permitindo no máximo seis vezes a capacidade do sistema AMPS. O padrão USDC utiliza o mesmo esquema FDD utilizado pelo sistema AMPS.

O modo dual USDC/AMPS foi padronizado como IS-54 pela *Electronic Industries Association and Telecommunication Industry Association* (EIA/TIA) em 1990, tendo como *upgrade* o padrão IS-136. O padrão passou também a ser conhecido como *North American Digital Cellular*, à medida que passou a ser utilizado no Canadá e no México.

O padrão USDC foi projetado para compartilhar as mesmas frequências, os mesmos planos de reuso de frequência e as mesmas estações-base utilizados pelo sistema AMPS, de tal forma que as ERBs e as unidades dos assinantes pudessem utilizar ambos canais AMPS e USDC, no mesmo equipamento. Devido a esta característica, os provedores puderam prover novos usuários com telefones digitais, substituindo as ERBs AMPS por ERBs USDC, canal por canal, ao longo do tempo. Devido à compatibilidade AMPS/USDC, o sistema USDC é também conhecido como Digital AMPS (D-AMPS).

A Tabela 5.3 mostra algumas especificações do sistema USDC.

Parâmetro	Especificação USDC IS-54
Múltiplo Acesso	TDMA/FDD
Modulação	$\pi/4$ DQPSK
Largura de Banda do Canal	30 kHz
Banda de Frequências Canal Reverso	824-849 MHz
Banda de Frequências Canal Direto	869-894 MHz
Taxa de Dados nos Canais Direto e Reverso	48.6 kbps
Codificação de Canal	Código cíclico de 7 bits e codificador convolucional 1/2, de comprimento de palavra = 6.
<i>Interleaving</i>	<i>Interleaver</i> de dois <i>slots</i>
Usuários por Canal	3 (a 7.95 kbps/usuário) 6 (a 3.975 kbps/usuário)

Tabela 5.3: Especificações do sistema USDC.

Como pode ser verificado na Tabela 5.3, cada canal TDMA tem a mesma largura de banda dos canais AMPS (30 kHz). No sistema TDMA, o canal – de taxa 48.6 kbps (24.3 kbps para o canal direto e 24.3 kbps para o canal reverso) e *frames* de 40 ms – pode ser compartilhado por até três usuários. As implementações do sistema TDMA digitalizam a voz a 8 kbps (3 usuários a 8 kbps/usuário = 24 kbps < taxa de 24.3kbps atribuída para os canais direto e reverso), o que triplica a capacidade de usuários simultâneos, quando comparado ao sistema analógico AMPS.

No sistema TDMA, o tempo é dividido em períodos curtos chamados *slots* que compõem *frames*. Um usuário pode ter acesso a um ou mais *slots* de tempo durante um *frame*, razão pela qual existe a necessidade de sincronização, para que seja viabilizada a transmissão de cada usuário.

O padrão USDC oferece muitas vantagens sobre os sistemas analógicos e também sobre outros sistemas digitais. As suas principais vantagens em relação aos padrões analógicos são o transporte de um volume maior de informação, uma melhor qualidade de

som, uma maior capacidade de usuários simultâneos, maior segurança (privacidade) e a possibilidade de oferecer mais serviços que as redes analógicas.

Uma desvantagem do USDC é que cada usuário tem um *slot* de tempo pré-definido. Conseqüentemente, se um usuário muda de uma célula para outra, não há um *slot* reservado para ele nesta outra célula. Se todos os *slots* na próxima célula estiverem ocupados, a chamada poderá ser desconectada. Também, se todos os *slots* de tempo da célula à qual um usuário pertence estiverem ocupados, ele não receberá o tom de discagem.

Outro problema com relação ao TDMA é a distorção do sinal. Um sinal vindo de uma ERB para um telefone celular irá possuir componentes atrasadas, devidas ao multipercurso (sinais esbarram em diferentes obstáculos – edifícios, acidentes geográficos, veículos em movimento, etc. – antes de chegar ao usuário), fenômeno que causa interferência. Uma forma de contornar esta interferência é colocar um limite de tempo no sistema, que será configurado para receber e processar o sinal dentro de um certo intervalo de tempo, após o qual o sistema irá ignorar o sinal. Uma outra desvantagem é a necessidade de sincronização.

Em 1988, a *Cellular Telecommunications Industry Association* (CTIA) especificou as necessidades para o futuro da telefonia celular digital em um conjunto de *User Performance Requirements* (UPR). Em particular, o conjunto UPR especificava uma capacidade aumentada de um fator = 10 sobre o celular analógico. Perto de 1990, a TIA (*Telecommunications Industry Association*), em resposta ao UPR do CTIA, adotou o padrão IS-54 TDMA. No entanto, tal padrão não alcançou a capacidade especificada no UPR, aumentando a capacidade apenas por um fator 3, não sendo o ideal.

O padrão original foi denominado IS-54 e introduzido em 1988-89 pelo TIA/CTIA. Em 1994, a atualização IS-54B perdeu lugar com a introdução do IS-136, seguido logo depois pelas revisões A e B. O padrão IS-136 é compatível com o padrão IS-54B e inclui um canal de controle digital, além de outras características mais avançadas. O padrão IS-136A entrou em atividade para serviços similares ao IS-136, nas bandas de frequência entre 800 MHz e 1.900 MHz. Finalmente, o padrão IS-136B abrange novos serviços, incluindo *broadcast, packet data, etc..*

A utilização do padrão TDMA melhorou substancialmente a eficiência dos sistemas celulares. Entretanto, o ponto fraco de um sistema baseado na tecnologia TDMA é gastar banda passante: o *slot* de tempo é alocado a uma conversação específica, não importando se alguém está falando ou não, no momento. Uma versão melhorada deste sistema (ETDMA - *Enhanced TDMA*) tenta corrigir este problema. Ao invés de esperar para determinar se alguém está transmitindo ou não, o padrão ETDMA associa assinantes dinamicamente e envia dados através das pausas que a fala normal contém. Quando os assinantes têm sinal para transmitir, um bit é colocado na fila do *buffer*. O sistema procura no *buffer*, nota que um assinante deseja transmitir e aloca banda, de acordo com a necessidade. Se um assinante não tem sinal para transmitir, a fila simplesmente passa ao próximo assinante. Então, ao invés de estar arbitrariamente reservado, o tempo é alocado de acordo com a necessidade.

5.4.3 O Padrão Digital Celular CDMA (IS-95)

Em março de 1992, a TIA (*Telecommunications Industry Association*) estabeleceu um subcomitê chamado TR-45.5, com o objetivo de desenvolver um padrão celular digital que utilizasse a tecnologia *spread-spectrum*. O padrão CDMA foi desenvolvido e aprovado em julho de 1993, recebendo o nome de IS-95.

A tecnologia CDMA tem tido aceitação internacional por parte de operadoras de sistemas de rádio celular, que a vêem como um *upgrade* tanto para a capacidade do sistema quanto para a qualidade de serviço.

O padrão IS-95 também foi projetado para ser compatível com o sistema celular analógico AMPS. Equipamentos telefônicos duais CDMA/AMPS foram disponibilizados pela Qualcomm em 1994 e no ano de 2001 o sistema já contava com mais do que 80 milhões de assinantes pelo mundo.

Em sistemas que utilizam a tecnologia CDMA, todos os telefones móveis e todas as ERBs transmitem seus sinais ao mesmo tempo e nas mesmas frequências portadoras, através da tecnologia CDMA *Direct Sequence Spread Spectrum*, em que cada um dos elementos do

sistema (ERBs e assinantes) possuem um longo código binário exclusivo para diferenciá-los, no lado do receptor. Tal código é aplicado a cada um dos bits gerados por um assinante.

Os sistemas CDMA eliminam completamente a necessidade de planejamento de frequências.

Para facilitar a transição do sistema AMPS para o sistema CDMA, cada canal IS-95 ocupa 1.25 MHz de espectro, ou 10% do espectro celular disponível (o sistema celular americano, por exemplo, dispõe de 25 MHz e cada provedor de sistema recebe metade do espectro, ou seja 12.5 MHz). Na prática, portadoras AMPS utilizam banda de guarda de 270 kHz (tipicamente 9 canais AMPS) de cada lado do espectro dedicado ao IS-95.

Diferentemente de outros padrões celulares, as taxas de usuário variam em tempo-real, dependendo da atividade do sinal de voz e de requerimentos da rede. O padrão usa, ainda, técnicas de espalhamento e modulação diferentes nos *links* direto e reverso. No *link* direto a ERB transmite simultaneamente os dados de todos os usuários na célula através de diferentes seqüências de espalhamento para cada usuário móvel. Um código piloto é também transmitido simultaneamente e a um nível maior de potência, para que todos os usuários móveis usem detecção de portadora coerente enquanto estimam as condições do canal. No *link* reverso, todos os usuários móveis respondem de forma assíncrona e possuem idealmente um nível de sinal constante devido ao controle de potência aplicado pela ERB.

O codificador de voz utilizado no sistema IS-95 é o codificador QCELP (*Qualcomm 9600 bps Code Excited Linear Predictive*). A implementação original deste vocoder detecta atividade de voz e reduz a taxa de dados a 1200 bps durante os períodos de silêncio. Taxas de dados de 2400, 4800 e 9600 bps são também utilizadas para propósitos específicos. Um codificador que utiliza 13.4 kbps de dados de voz (QCELP13) foi introduzido pela Qualcomm em 1995.

5.4.4 O Padrão GSM

O GSM é derivado de uma proposta de 1982 desenvolvida para resolver os problemas de fragmentação dos primeiros sistemas celulares na Europa. Este padrão foi o primeiro a especificar modulação digital e serviços e arquiteturas de rede.

Como consequência, a comissão Européia emitiu uma diretiva aos seus países membros para que fosse reservada a frequência na faixa de 900 MHz para o sistema GSM e a Comissão Européia de Padronização de Telecomunicações (CEPT) definiu o GSM como o padrão de telefonia celular a ser utilizado na Europa.

A proposta do GSM emergiu em setembro de 1987, quando 13 administradores, operadores e consultores da CEPT assinaram a carta de criação do *GSM (Groupe Spéciale Mobile)* que foi lançado em 1 de julho de 1991. O nome original que era francês foi alterado para *Global System for Mobile Communications* em 1992, mantendo a sigla original. O estabelecimento da padronização GSM está sob a responsabilidade do *European Technical Standards Institute (ETSI)*.

O padrão GSM superou todas as expectativas e é atualmente o padrão mais popular para comunicações celulares e PCS. Em 2001, o sistema GSM contava com mais de 350 milhões de assinantes, no mundo. Em 2002, o sistema GSM atende a 71% do mercado mundial.

Redes GSM estão estabelecidas na Europa, Estados Unidos, Ásia, Austrália, África e América do Sul, viabilizadas através de acordos internacionais para garantir uma comunicação comum. Os integrantes destes acordos geralmente se encontram a cada quatro meses para discutir o desenvolvimento do GSM e fazer revisões nos documentos, contando com um secretariado permanente, sediado em Dublin, na Irlanda, o qual provê mecanismos técnicos, operacionais e mecânicos para dar apoio aos usuários.

Uma das características que mais contribuiu e contribui para a difusão do padrão GSM é a possibilidade do assinante de uma rede em um determinado país ter acesso a redes de outros países, processo conhecido como *roaming* internacional. O *roaming* permite aos assinantes utilizarem os seus telefones (ou, simplesmente, os seus cartões de cliente) no

estrangeiro, sendo os custos posteriormente debitados nas suas contas, no país de origem e na sua moeda.

O padrão GSM foi inicialmente criado para uso na banda de 900 MHz. Mais tarde, as frequências passaram a ser alocadas em 1.8 a 2.0 GHz e um segundo sistema foi configurado. Esse novo padrão é denominado DCS 1800.

A documentação referente ao padrão GSM é extensa, contendo mais de 500 páginas, grande parte do material referenciando aspectos de engenharia do sistema, especialmente estrutura dos receptores e sincronização de transmissores e receptores.

Um sistema GSM é baseado na tecnologia de acesso múltiplo TDMA e possui, no máximo, 200 canais *full-duplex* por célula. Cada canal consistindo de uma frequência direta e uma reversa, cada banda de frequência com 200 kHz de largura. A cada conexão ativa é atribuído um *slot* de tempo, em um canal. Na teoria, cada célula é capaz de suportar 992 canais, porém muitos deles não ficam disponíveis para evitar conflitos de frequências com células vizinhas.

Os *slots* TDMA fazem parte de uma complexa hierarquia de quadros. Cada *slot* TDMA tem uma estrutura específica, e os grupos de *slots* TDMA formam multiquadros, que também possuem uma estrutura específica. Cada quadro TDMA começa e termina com três bits 0 (zero), para fins de delimitação de quadros, contendo ainda dois campos de bits de informação e um campo chamado *sync*, que é usado pelo receptor para sincronizar os limites de quadros com o transmissor.

Os serviços GSM seguem a linha ISDN (*Integrated Services Digital Network*) e são classificados como tele-serviços ou serviços de dados. Os tele-serviços constituem os serviços de telefonia móvel padrão, enquanto que os serviços de dados incluem comunicações entre computadores e tráfego de pacotes comutados. Os serviços voltados aos usuários podem ser divididos em três categorias principais: Serviços Telefônicos, Serviços de Dados e Serviços ISDN.

A Tabela 5.4 mostra algumas especificações do sistema GSM.

Parâmetro	Especificação GSM
Frequência Canal Reverso	890-915 MHz
Frequência Canal Direto	935-960 MHz
Taxa de modulação	270.833333 kbps
Múltiplo Acesso	TDMA
Período de <i>frame</i>	4.615 ms
Usuários por <i>frame</i>	8
Período do <i>time slot</i>	576.9 μ s
Período de bit	3.692 μ s
Modulação	0.3 GMSK
Espaçamento entre canais	200 kHz
Nº dos canais	0 a 124 e 975 a 1023
Taxa de bits do codificador de voz	13.4 kbps

Tabela 5.4: Especificações do sistema GSM.

Do ponto de vista do usuário, uma das principais características do padrão GSM é o *Subscriber Identity Module* (SIM), que é um dispositivo de memória que armazena informações tais como o número de identificação do usuário, as redes e países onde o assinante está habilitado a receber serviços, chaves privadas e outras informações específicas.

Um assinante utiliza o SIM com um número pessoal de 4 dígitos para ativar os serviços, a partir de qualquer fone GSM. Os SIMs são disponíveis como *smart cards* (que são cartões do tamanho de cartões de crédito que podem ser inseridos nos aparelhos telefônicos GSM) ou módulos *plug-in*, também removíveis e portáteis, porém menos práticos que os *smart cards*. Os assinantes podem conectar seus SIMs em qualquer terminal adequado – telefones em hotéis, telefones públicos ou quaisquer telefones móveis ou portáteis compatíveis – podendo rotear todas as chamadas GSM recebidas para aquele terminal e ter todas as mensagens enviadas cobradas em seu provedor original de serviços de telefonia móvel, no domicílio, não importando em que lugar do mundo se encontre.

Uma segunda característica importante do sistema GSM é a privacidade provida pelo sistema. Diferentemente dos sistemas analógicos que utilizam modulação FM e podem ser facilmente monitorados, é virtualmente impossível escutar às escondidas as transmissões de rádio GSM. A privacidade é tornada possível através da encriptação da cadeia de bits enviada ao transmissor GSM, de acordo com uma chave criptográfica secreta. Esta chave muda com o tempo, para cada usuário.

Cada provedor e/ou fabricante GSM precisa assinar o *Memorandum of Understanding* (MoU) antes de utilizar ou fabricar um sistema GSM. O MoU é um acordo internacional que permite o compartilhamento de algoritmos criptografados e outras informações particulares entre diferentes países e provedores.

5.5 Referências Bibliográficas

- [1] Yacoub, M., *Celular Communication Systems*, Prentice Hall, 1992.
- [2] Waldman, H. e Yacoub, M. D., *Telecomunicações - Princípios e Tendências*, Editora Érica, 1997.
- [3] Brodsky, I., *Wireless – The Revolutions in Telecommunications*, Artech House, 1995.
- [4] Wong, P. & Britland, D., *Mobile Data Communication Systems*, Artech House, 1995.
- [5] Bedell, P., *Wireless Crash Course*, McGraw-Hill, 2001.
- [6] A. B. Carlson, *Communication Systems*, McGraw-Hill, 1965.
- [7] J. G. Proakis, *Digital Communications*, McGraw-Hill, 2001.
- [8] H. Taub and D.L. Schilling, *Principles of Communications Systems*, McGraw-Hill, 1986.
- [9] Lee, W. C. Y., *Elements of Cellular Mobile Radio Systems*, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 38, Número 2, Páginas 69 a 75, Maio de 1989.
- [10] Kartalopoulos, S. V., *Understanding SONET/SDH and ATM - Communications Networks for the Next Millennium*, IEEE Press, 1999.
- [11] Bellamy, John C., *Digital Telephony*, John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- [12] Rappaport, T. S., *Wireless Communications - Principles and Practice*, Second Edition, Prentice Hall, 2002.
- [13] <http://www.telespcelular.com.br/index2.shtml>
- [14] Dayani Adionel Guimarães, INATEL. "Sistemas de Comunicação Móvel de Terceira Geração". http://sites.uol.com.br/helyr/dayani_3g_03.html
- [15] GSM World em <http://www.gsmworld.com>
- [16] CDMA Developers Group em <http://www.cdg.org>