

## 2 Comunicações Móveis e Ondas Milimétricas

### 2.1 Evolução das Tecnologias Móveis

A real história do telefone móvel, também conhecido como celular, começou em 1973, quando foi efetuada a primeira chamada de um telefone móvel para um telefone fixo. Foi a partir de Abril de 1973 que todas as teorias comprovaram que o celular funcionava bem, e que a rede de telefonia celular, sugerida em 1947, foi projetada de maneira correta. Este foi um momento não muito conhecido, mas certamente foi um fato marcado para sempre e que mudou totalmente a história do mundo.

Inicialmente, os sistemas móveis tinham como objetivo alcançar uma grande área de cobertura através de um único transmissor de alta potência, e utilizavam a técnica de acesso conhecida como *Frequency Division Multiple Access (FDMA)*, onde cada usuário era alocado em uma frequência distinta. Embora essa abordagem gerasse uma cobertura muito boa, o número de usuários era limitado. Como exemplo da baixa capacidade, pode-se citar o sistema móvel da *Bell* em Nova Iorque, em 1970: o sistema suportava um máximo de apenas doze chamadas simultâneas em uma área de mais de dois mil quinhentos e oitenta quilômetros quadrados. Dado o fato de que as agências de regulamentação dos governos não poderiam realizar alocações de espectro na mesma proporção do aumento da demanda de serviços móveis, ficou óbvia a necessidade de reestruturação do sistema de telefonia por rádio para que se obtivesse maior capacidade com as limitações de espectro disponível e, ao mesmo tempo, provendo grandes áreas de cobertura.

O conceito celular foi uma grande descoberta na solução do problema de congestionamento espectral e limitação de capacidade de usuários que havia em sistemas de comunicações móveis até então. A *Federal Communication Commission (FCC)* – órgão americano regulamentador de telecomunicações, em uma regulamentação de 22 de junho de 1981 definiu o sistema celular como “Um sistema móvel terrestre de alta capacidade no qual o espectro disponível é

dividido em canais que são reservados, em grupos, a células que cobrem determinada área geográfica de serviço. Os canais podem ser reusados em células diferentes na área de serviço”.

As tecnologias de telefonia celular são classificadas em gerações e sua evolução é apresentada na figura 2.1 a seguir.

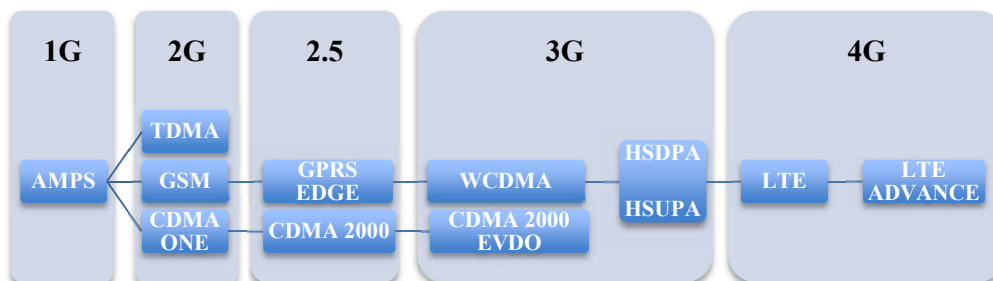


Figura 2.1: Evolução das Tecnologias Celulares

## 2.2 Primeira Geração

Com a invenção dos microprocessadores e a concepção da comunicação celular nas décadas de 70 e 80, a primeira geração das comunicações móveis nascia. Estes sistemas eram essencialmente analógicos e utilizavam o FDMA para se comunicar e foi projetado para trafegar somente voz. Os primeiros sistemas desenvolvidos foram o *Nordic Mobile Telecommunications (NMT)*, *Advanced Mobile Phone Service (AMPS)*, *Total Access Communications System (TACS)*, *Extended Total Access Communications System (ETACS)*, C450 e o Radicom 2000.

NMT [1] foi o primeiro sistema celular analógico que começou a ser operado na Escandinávia em 1979. Inicialmente utilizava a banda de 450 MHz e logo foi nomeado NMT450. Devido à necessidade de mais capacidade, o sistema adotou a banda de 900 MHz e ficou conhecido como NMT900. O AMPS foi introduzido nos EUA em 1978, pelos laboratórios *Bell*, e começou efetivamente a ser operado em 1983, em Chicago. O TACS teve início em UK, em 1982. Os sistemas celulares conhecidos como C-450 (operando na banda de 450 MHz) e o

Radicom 2000 (operando na banda de 200 MHz) foram introduzidos, respectivamente, na Alemanha e na França, em 1985.

Estes sistemas possuíam inúmeros problemas como limitação de capacidade, terminais de usuários grandes e pesados, incompatibilidade entre os sistemas, as interfaces não eram padronizadas, baixa qualidade nas ligações e não havia nenhum tipo de segurança na transmissão das informações. Os principais sistemas desenvolvidos na 1ª geração são comparados na tabela 2.1.

| PRIMEIRA GERAÇÃO                                        |                       |              |                    |                |
|---------------------------------------------------------|-----------------------|--------------|--------------------|----------------|
| Parâmetros do Sistema                                   | AMPS<br>(USA)         | TACS<br>(UK) | C450<br>(ALEMANHA) | NTT<br>(JAPÃO) |
| Frequência de transmissão (MHz)                         |                       |              |                    |                |
| - Base                                                  | 870 - 890             | 935 - 960    | 461 - 165          | 870 - 885      |
| - Móvel                                                 | 825 - 845             | 890 - 915    | 451 - 455          | 825 - 840      |
| Espaçamento entre banda de transmissão e recepção (MHz) | 45                    | 45           | 10                 | 5              |
| Largura de canal (kHz)                                  | 30                    | 25           | 20                 | 25             |
| Número de Canais                                        | 666 (NES)<br>832 (ES) | 1000         | 222                | 600            |
| Raio de Cobertura da Base (km)                          | 2 - 25                | 2 - 20       | 5 - 30             | 5 - 10         |
| Sinal de áudio                                          |                       |              |                    |                |
| - Modulação                                             | FM                    | FM           | FM                 | FM             |
| - $\Delta f$ (kHz)                                      | $\pm 12$              | $\pm 9.5$    | $\pm 4$            | $\pm 5$        |
| Sinais de controle                                      |                       |              |                    |                |
| - Modulação                                             | FSK                   | FSK          | FSK                | FSK            |
| - $\Delta f$ (kHz)                                      | $\pm 8$               | $\pm 6,4$    | $\pm 2,5$          | $\pm 4,5$      |
| Taxa de transmissão de dados (kbps)                     | 10                    | 8            | 5,28               | 0,3            |

Tabela 2.1: Características técnicas da primeira geração de sistemas celulares.

### 2.3 Segunda Geração

Devido à necessidade de padronização para o sistema celular Europeu e a crescente demanda pelo serviço móvel, foi necessário dar início ao desenvolvimento de sistemas digitais. Os sistemas de 2ª geração começaram a ser efetivamente utilizados no início de 1990 e foi impulsionado pelo avanço da tecnologia dos circuitos integrados, que permitiram a efetiva utilização da transmissão digital.

Estes sistemas, além de possibilitarem uma maior capacidade, ofereciam as seguintes vantagens sobre os analógicos:

- Técnicas de codificação digital de voz mais poderosas;
- Maior eficiência espectral;
- Melhor qualidade nas ligações;
- Tráfego de dados na rede e
- Criptografia da informação transmitida.

Como resultados deste esforço surgiram os sistemas conhecidos como GSM, CT-2 e DECT na Europa, o *Time Division Multiple Access (TDMA*, também conhecido como IS-54 e IS-136), o *Code Division Multiple Access (CDMA IS-95)* nos EUA e o *Personal Digital Cellular (PDC)* no Japão. (CASTRO, 2009).

A tabela 2.2 apresenta as principais características de cada tecnologia.

| SEGUNDA GERAÇÃO                     |                          |                            |                |
|-------------------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------|
| Parâmetros do Sistema               | IS-54<br>IS-136<br>(USA) | GSM<br>(EUROPA)            | IS-95<br>(USA) |
| Técnica de Acesso                   | TDMA                     | TDMA                       | CDMA           |
| Frequência de transmissão (MHz)     |                          |                            |                |
| - Base                              | 869 - 894                | 935 - 960<br>890 - 915     | 869 - 894      |
| - Móvel                             | 824 - 849                | 1710 - 1785<br>1805 - 1880 | 869 - 894      |
| Técnica de duplexação               | FDD                      | FDD                        | FDD            |
| Largura de canal (kHz)              | 30                       | 200                        | 1250           |
| Modulação                           | DQPSK                    | GMSK                       | BPSK/QPSK      |
| Potência máxima / média (mW)        | 600 / 200                | 2000 / 125                 | 600            |
| Controle de Potência                |                          |                            |                |
| - Base                              | Sim                      | Sim                        | Sim            |
| - Móvel                             | Sim                      | Sim                        | Sim            |
| Codificação de voz                  | VSELP                    | RPE-LTP                    | QCELP          |
| Taxa de codificação de voz (kbps)   | 7,95                     | 13                         | 8 (Variável)   |
| Nº de canais de voz por portadora   | 3                        | 8                          | -              |
| Taxa de Transmissão do canal (kbps) | 48,6                     | 207,833                    | -              |
| Tamanho do quadro (ms)              | 40                       | 4,615                      | 20             |

Tabela 2.2: Características técnicas da segunda geração de sistemas celulares

## 2.4 Geração 2.5

A principal característica da geração 2.5 de sistemas celulares foi a possibilidade de solucionar os problemas de capacidade enfrentados pelos sistemas anteriores. Várias tecnologias foram desenvolvidas para este fim como o *High Speed Circuit Switched Data (HSCSD)*, *Enhanced Data Rates for Global Evolution (EDGE)* e o *General Purpose Radio Services (GPRS)*.

Segundo [1], o GPRS permite taxa de dados de 115 kbps e a utilização de códigos para correção de erros. Esta tecnologia é baseada na comutação por pacotes, o que torna o uso eficiente da largura de banda disponível com taxas de bits variável. É apropriado para serviços que utilizam transmissão por rajadas, devido a sua capacidade de alocar, dinamicamente, os recursos.

O EDGE representa uma fácil evolução do padrão GSM / GPRS rumo à terceira geração, possibilitando maiores taxas de dados, usando a mesma portadora de 200 kHz. As alterações na rede são mínimas, com foco nas características de modulação e na implementação de nova codificação e decodificação do sinal, associadas com adaptações do sinal e envio de redundância de informação, que aumentam a eficiência da utilização do espectro. Uma das principais características do EDGE está no seu baixo custo de implantação, pois sua implementação é feita através da atualização de *software* das *base transceiver station (BTS)*.

## 2.5 Terceira Geração

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, enquanto 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 alternativas possibilitarem a economia de escala da fabricação para os componentes do sistema, a segunda teve maior força, pois também permitia que os maciços investimentos já realizados pelas operadoras na implantação das redes e pelos fabricantes em processo de fabricação e etapas de desenvolvimento de produtos em todo o mundo fossem de certa forma protegidos.

Os sistemas 3G provêm diversas vantagens em comparação a seus antecessores, pois além de oferecerem serviços de telefonia e comunicação de dados com altas taxas de *throughput*, possui maior imunidade a interferências. Os principais padrões desenvolvidos são:

- **UMTS:** termo adotado para designar o padrão de 3ª Geração estabelecido como evolução para operadoras de GSM e que utiliza como interface rádio o WCDMA ou o EDGE. Esta tecnologia foi desenvolvida para prover serviços com altos níveis de consumo de banda, como *streaming*, transferência de grandes arquivos e videoconferências para uma grande variedade de aparelhos como telefones celulares, PDAs e *laptops*. Possui

taxas de transmissão que variam de 144 kbps a 2 Mbps, que dependem diretamente do ambiente e da mobilidade do usuário.

- **Evolution Data-Optimized (CDMA 1xEV-DO):** O CDMA 1xEV-DO é a evolução do CDMA (IS-95), e possui alto desempenho para transmissão de dados com picos de até 2,4 Mbps. Portadoras distintas são necessárias para dados e voz neste sistema. O *uplink* permanece praticamente inalterado em comparação com o CDMA2000, mas no *downlink* esta tecnologia utiliza a técnica TDMA. Opera em 800 e 1900 MHz.
- **HSPA:** é o resultado da utilização de dois protocolos de telefonia móvel, o *High Speed Downlink Packet Access (HSDPA)* e do *High Speed Uplink Packet Access (HSUPA)*. Ele amplia e melhora o desempenho dos protocolos WCDMA existentes, com taxa de dados que podem chegar até 14 Mbps no *downlink* e 5.8 Mbps no *uplink*.

## 2.6 Quarta Geração

Essa tecnologia já se encontra em operação na Europa, Ásia e Américas, utilizando-se as tecnologias LTE (*Long Term Evolution*) e *Mobile-WiMAX*. No Brasil, iniciou-se a operação comercial das redes 4G LTE em 2012, na faixa de 2.5 GHz, a qual já está instalada nas cidades-sede da Copa do Mundo FIFA 2014, atualmente em fase de ampliação da cobertura.

O foco das redes 4G é integralmente para o tráfego de dados (pacotes), ao contrário dos sistemas anteriores, híbridos, que alternavam entre redes de pacotes ou de circuitos a depender da demanda, respectivamente, de dados ou voz. O propósito foi reduzir a complexidade na infraestrutura de rede existente nas arquiteturas anteriores. O LTE, especificamente, mantém compatibilidade com sistemas legados, no entanto, enquanto as redes 3.5G e 3G em uso atingem, tipicamente, velocidades máximas de 14 Megabits por segundo (Mbps), são esperados, em condições ideais, picos de até 120 Mbps nas redes LTE.

É importante notar que, de acordo com a ITU (*International Telecommunication Union*), como definido originalmente na especificação IMT-

Advanced, uma rede só poderia ser caracterizada como "4G" se fosse capaz de prover 100 Mbps a usuários em movimento e 1 Gbps para usuários parados. Por isso, tecnicamente falando, em princípio as redes LTE não seriam estritamente 4G. No entanto, a ITU posteriormente flexibilizou às tecnologias LTE e *Mobile-WiMAX*, devido a questões de *marketing* comercial e por características diferenciadas dessas tecnologias (como adoção de OFDM e MIMO, latência reduzida e maior patamar de velocidade, entre outras), a adoção do termo 4G para designá-las. Em seguida, criou a expressão "*True 4G*" exclusivamente para diferenciar as novas tecnologias que atinjam os requisitos necessários à especificação *IMT-Advanced*. Dessa forma, somente redes *LTE Advanced* e *WiMAX-Advanced*, sucessoras das tecnologias atualmente em uso, serão enquadradas como "*True 4G*"

Em decorrência, tornou-se usual às operadoras empregarem comercialmente a sigla da tecnologia empregada na publicidade e nos seus produtos, acrescentando, por exemplo, "LTE" após "4G" (i.e., "4G LTE"), identificando mais precisamente o tipo de rede e tecnologia disponibilizados.

## 2.7 Quinta Geração

Comunicação móvel, juntamente com a *internet*, tem sido uma tecnologia revolucionária na história da humanidade. Esta tecnologia tem vivido por mais tempo que qualquer outra tecnologia anterior, podendo se dizer que, pelo menos, 50% das pessoas do mundo estão usando esta tecnologia de acordo com o Dr. Farooq Khan, presidente do Centro de Investigações da Samsung na América.

Esta tecnologia foi se adaptando para oferecer mais serviços aos usuários. Há alguns anos atrás, inclusive atualmente em alguns países em desenvolvimento, para se poder fazer transferências bancárias, normalmente o usuário demora muito nestas operações nas agências dos bancos, mas com a facilidade das comunicações móveis de hoje, isso pode ser feito só em alguns minutos através de nosso computador ou de nosso celular. Do mesmo jeito, podemos ter informações de nossa história clínica sem ter que ir ao hospital, ou estudar em diferentes universidades sem estar presente.



Este tipo de serviços incrementou o consumo de serviços móveis e ainda está incrementando a passos gigantescos, levando o tráfego de dados crescer também, exponencialmente. De acordo com as estatísticas da Cisco, mostrado na Figura 2.2, em 2014 tivemos, aproximadamente, 7 bilhões de dispositivos móveis no mundo, com um consumo de dados de 2.1 Exabytes ( $10^{18}$ ) por mês. Estas estatísticas mostram, também, que para 2019 espera-se, aproximadamente, 11 bilhões de dispositivos móveis no mundo, com um consumo mensal de 20.6 Exabytes, significando que o tráfego de dados será 10 vezes maior que o consumo atual.

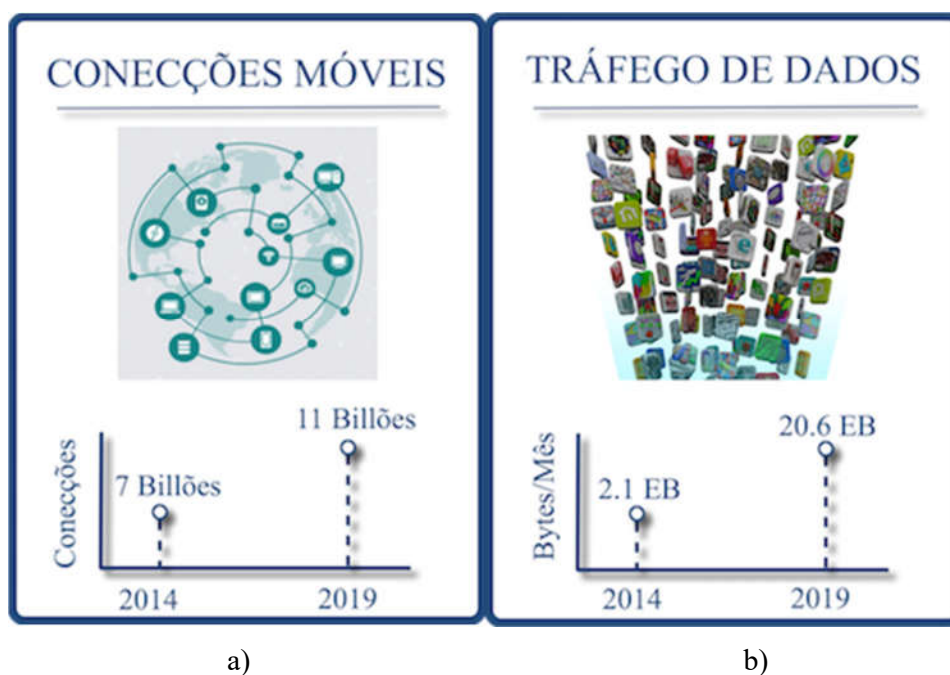


Figura 2.2: Estatísticas das conexões móveis (a) e do tráfego de dados (b)

A atual quarta geração não será capaz de suportar este tipo de demanda nos próximos anos, já que as tendências tecnológicas levarão a uma demanda maior que a capacidade das redes celulares. O comportamento do uso de dispositivos móveis mudou drasticamente e ninguém tinha ideia deste crescimento exponencial anteriormente, então, agora não podemos pensar numa tecnologia que só permita um incremento de duas vezes a capacidade atual, inclusive nem 10 vezes. A nova tecnologia deve ser capaz de suportar 100 ou 1000 vezes a capacidade atual para poder cobrir a capacidade para os próximos 10, 15 anos. Na verdade, isto não é impossível, outras tecnologias, como armazenamento ou

processamento computacional, já experimentaram este tipo de crescimento, de até milhões de vezes nos últimos 30 anos, então, as redes celulares também podem ter este tipo de crescimento. Não será fácil, mas terá que ser feito.

Cada nova geração, em geral, envolve três passos: melhorar a eficiência espectral, aumentar a largura de banda por usuário para oferecer maiores taxas de tráfego e permitir novos serviços. O problema, é que todas as comunicações por rádio, como o serviço de TV, Rádio, comunicações celulares, usam o espectro até 3 GHz, que é um espectro muito limitado e que já está completamente congestionado. Então, a solução é usar frequências maiores, frequências de ondas milimétricas, onde as antenas são menores e, principalmente, onde o espectro é muito maior que o atual.

## 2.8 Ondas Milimétricas

A rigor, a faixa de ondas milimétricas começa com a frequência de 30 GHz (comprimento de onda = 10 mm). As frequências da faixa de micro-ondas (6 a 40 GHz), entretanto, possuem características relativamente semelhantes e são gerenciadas de forma similar pelos órgãos reguladores, ao redor do mundo. Por esta razão, convencionou-se considerar como pertencentes à faixa de ondas milimétricas, as frequências acima de 40 GHz.

O primeiro experimento com ondas milimétricas foi realizado em 1895, por um físico hindu chamado Jagadish Chandra Bose. Bose demonstrou a possibilidade de transmissão de ondas eletromagnéticas, na faixa de 60 GHz, por meio de um enlace de 23 metros, bloqueado por uma parede. Até a segunda metade do século XX, as pesquisas na faixa de ondas milimétricas ficaram restritas à aplicações experimentais militares. Em 1960, sistemas operando com ondas milimétricas tiveram sua primeira aplicação prática, no campo da radioastronomia. Até a década de 80, a utilização de ondas milimétricas ficou restrita a aplicações militares.

Na década de 80, o desenvolvimento de circuitos integrados, para a faixa de ondas milimétricas, permitiu a fabricação em larga escala de componentes e sistemas, o que tornou viável certas aplicações comerciais. Aliado a este fato, o enorme sucesso das redes móveis celulares e a grande faixa de espectro disponível, levaram a uma intensificação dos estudos relativos à viabilidade do emprego de ondas milimétricas em sistemas móveis. Nesta época, entretanto, o principal foco das pesquisas, relativas a sistemas móveis, residia no aumento da eficiência do uso do espectro disponível. Os avanços obtidos nesta área permitiram que os sistemas celulares operassem satisfatoriamente, com faixas de frequências disponíveis até o final dos anos 90. Além disto, as dimensões das células dos sistemas que operavam nesta época, da ordem de quilômetros, tornavam inviável a utilização de ondas milimétricas, devido aos efeitos de atenuação pela atmosfera e acentuada atenuação de espaço livre. Tais fatos implicaram na redução do volume de pesquisas relativas ao emprego de ondas milimétricas no contexto celular urbano.

As pesquisas relativas à utilização de ondas milimétricas ficaram restritas, portanto, às aplicações em ambientes interiores tais como: *Wireless Local Area Network* (WLAN), como alternativa às redes locais padrão *ethernet*, conexão sem fio de dispositivos, em substituição aos cabos *High Definition Multimedia Interface* (HDMI) e conexão de dispositivos no contexto das WPAN (*Wireless Personal Area Network*). O emprego comercial de ondas milimétricas continuou restrito aos enlaces ponto a ponto para *backhaul*, aplicação cujos custos de produção e dimensões dos componentes eletrônicos atendiam às expectativas do mercado.

As soluções dos sistemas 3G e 4G não conseguiram atender de forma satisfatória as demandas do mercado, principalmente em ambientes externos com alto grau de mobilidade. Devido a este fato, a indústria e a comunidade científica voltam, novamente, as atenções para o potencial das ondas milimétricas. O desenvolvimento tecnológico nas pesquisas, no contexto das WLANs e WPANs, permitiram a fabricação de componentes eletrônicos a baixos custos, de forma a atingir o mercado de massas. As características de atenuação das ondas

milimétricas não constituem obstáculos à operação dos modernos sistemas móveis que utilizam células de ordem de centenas de metros.

Os fatos citados no parágrafo anterior pavimentam o caminho para o emprego das ondas milimétricas na operação de sistemas celulares, em ambientes urbanos. Restam, entretanto, muitas lacunas de conhecimento em relação à questão dos efeitos dos mecanismos de propagação, característicos dos ambientes urbanos, sobre a energia eletromagnética nesta faixa de frequências. Cobrir estas lacunas é de fundamental importância para se definir as frequências mais adequadas para operação dos futuros sistemas celulares e para a concepção dos projetos destes sistemas.

## 2.9 Vantagens e Desvantagens das Ondas Milimétricas

As ondas milimétricas oferecem mais espectro. Hoje, o espectro de micro-ondas (30 GHz) está praticamente esgotado. As agências governamentais em todo o mundo têm alocado todo o espectro. Há escassez de espectro e conflitos. A expansão dos serviços celulares com tecnologias 4G, como LTE, dependem da disponibilidade do tipo certo de espectro. O problema é que não há o suficiente para se expandir.

A faixa das ondas milimétricas resolvem parcialmente o problema, proporcionando mais espaço para expansão. Ondas milimétricas também permitem altas taxas de dados digitais. As comunicações sem fio nas frequências de micro-ondas e outras menores tem limitações a cerca de 1 Gbit / s. Na faixa de ondas milimétricas, as taxas de dados podem chegar a 10 Gbits / s ou mais.

A má notícia é que, enquanto este espectro nos dá alguma margem de expansão, não é útil para todos os tipos de aplicações sem fio. Ele tem suas limitações e superar essas deficiências tem sido o desafio de fazer as ondas milimétricas de acesso prático. Uma das principais limitações das ondas milimétricas é o alcance limitado. As leis da física dizem que quanto mais curto o comprimento de onda, mais curto o intervalo de transmissão para uma dada potência.

A perda de espaço livre (L) em dB, é calculado com:

$$L = 92,4 + 20 \log f(\text{GHz}) + 20 \log D(\text{Km})$$

onde  $f$  é a frequência de operação e  $D$  é a distância entre o transmissor e o receptor. Como exemplo, numa frequência de 60 GHz e uma distância de 10 metros, a perda de espaço livre seria no entorno dos 88 dB. Projetistas tem superado esta perda com receptores muito sensíveis, alta potência de transmissão e antenas com alto ganho.

Além disso, a atmosfera absorve as ondas milimétricas, restringindo a área de cobertura. Chuva, neblina, e qualquer umidade do ar fazem com que a atenuação do sinal seja muito elevada, reduzindo as distâncias de transmissão.

Curtas distâncias podem ser um benefício. Por exemplo, elas reduzem a interferência com outras rádio-bases próximas. Antenas de alto ganho, que são altamente direcionais, também reduzem a interferência. Essas antenas de feixe estreito aumentam o poder de alcance e também proporcionam segurança, já que impedem que os sinais sejam interceptados. O tamanho pequeno é outra grande vantagem do equipamento de ondas milimétricas. Como exemplo, um típico dipolo de meia onda com uma frequência de 900 MHz apresenta seis centímetros de comprimento, mas a 60 GHz uma meia-onda é de apenas cerca de 2,5 mm. Isto significa que a estrutura inteira do rádio, incluindo a antena, pode ser muito pequena o que reduz custos de fabricação, instalação e outros.

## 2.10 Aplicações das Ondas Milimétricas

Atualmente, existem três aplicações comerciais para a faixa de 60 GHz:

- Enlaces ponto a ponto curtos (< 2 km), para interconexão de redes locais. A grande faixa de frequências não licenciadas, disponível na faixa de 60 GHz, permite a conexão entre redes locais com até 1,25 Gbps de taxa de transferência de dados, a custos relativamente baixos; □

- Conexão de dispositivos como televisores, *home teathers*, *videogames*, etc; para a transmissão de áudio e vídeo em alta definição. Esta aplicação permite a transmissão de dados a altas taxas, sem a necessidade de compressão, reduzindo latência e complexidade dos sistemas;
- Conexão de dispositivos no conceito de WLAN como alternativa aos padrões *Gigabit Ethernet* e *10 Gigabit Ethernet*. A tecnologia de circuitos, aliada às evoluções tecnológicas das camadas de rede, permitiram a exploração da faixa de 60 GHz no conceito de redes celulares em ambientes internos.

### 2.11 Propagação móvel a 60 GHz em áreas urbanas

À medida que a tecnologia dos sistemas celulares evoluiu para atender as demandas, cada vez mais exigentes do mercado consumidor, as dimensões das células foram reduzidas da ordem de quilômetros para a ordem das centenas de metros. Em grandes centros urbanos, é comum encontrar células com 100 a 200 m de raio, cuja área de cobertura corresponde a trechos de ruas. Ambientes internos, em muitos casos, possuem suas próprias estações base, operando dentro do conceito de pico células. Este cenário fez com que características de propagação das ondas milimétricas, antes vistas como fatores limitantes ao emprego em ambientes celulares, se convertessem em potenciais vantagens.

De fato, as grandes perdas devidas à atenuação pelo efeito de espaço livre e os efeitos de atenuação por gases atmosféricos, não constituem limitações para a cobertura no contexto das micro e pico-células e permitem reduções nas distâncias de reuso, o que se traduz, pelo menos em tese, em aumento da capacidade dos sistemas [5] . Devido aos reduzidos comprimentos de onda e aos avanços nas técnicas de circuitos integrados, existe a possibilidade de se instalar *arrays* de antenas nas unidades móveis de modo a tirar proveito da propagação por multipercursos, para a recepção de sinais. Para que estas possibilidades sejam confirmadas e concretizadas é necessário, entretanto, incrementar os estudos sobre a propagação de ondas milimétricas em ambientes urbanos.

Em [6] é fornecida a visão geral dos principais estudos [7], [8], [9], e [10], relativos à propagação de ondas milimétricas em ambientes móveis urbanos, realizados até o final da década de 80. A principal crítica a estes estudos [6], reside no fato de que as medições foram realizadas em ambientes onde não havia grande densidade de tráfego de veículos, situação comum em grandes centros urbanos. No cenário urbano micro-celular, a presença dos veículos nas ruas e estruturas como postes e árvores constituem as principais fontes de obstrução à propagação em visada direta entre transmissor e receptor, para a faixa de ondas milimétricas [6]. Na época da realização dos referidos estudos, o conceito de micro-células ainda possuía aplicações comerciais. As campanhas de medições foram realizadas, portanto, levando-se em conta o espalhamento em grandes estruturas tais como prédios. Estas estruturas são as principais fontes de perturbações para os sistemas celulares antigos e atuais, cujas frequências de operação se situam nas faixas de 900 MHz a 1900 MHz, com células de 1 a 3 km de raio. Com base em [6], G.L. Siqueira [11], conduziu uma campanha de medições, em faixa estreita, na frequência de 55 GHz, no centro de Londres, procurando cobrir as lacunas deixadas pelos estudos anteriores. Sua principal contribuição foi demonstrar a viabilidade de se prover comunicações por ondas milimétricas, na faixa de 60 GHz, no cenário urbano micro-celular, em condições semelhantes àsquelas observadas durante operação de sistemas reais.

Em [12] é feito um resumo dos resultados obtidos em estudos na faixa de 60 GHz realizados na década de 90. Dentre os trabalhos analisados, somente 4 estudos foram conduzidos em faixa larga, em ambientes urbanos, no contexto micro-celular. Nestes trabalhos, entretanto, a maior banda de sondagem do canal foi de 200 MHz. É previsto que, no futuro, os sistemas celulares operarão com maiores larguras de faixas por portadora, além disto, medições com bandas mais largas permitem melhor avaliação da dispersão espacial do canal.

Em [5] é feita uma análise das campanhas de medidas correspondentes aos trabalhos sobre propagação de ondas milimétricas no cenário urbano, a partir do ano 2000 [13], [14], [15], [16], [17], [18] e [19]. Estes estudos utilizaram faixas de frequência para a sondagem do canal de até 1,9 GHz, entretanto, a frequência

de 60 GHz somente foi analisada no contexto de sistemas *peer-to-peer*. As medições em cenários correspondentes a sistemas celulares foram conduzidas somente na frequências de 28 e 38 GHz.

## 2.12 A escolha da frequência de 60 GHz

Discutidos os aspectos históricos, acadêmicos e técnicos que motivaram o trabalho que ora se pretende conduzir, serão apresentados os aspectos que conduziram à escolha da faixa de frequências que será utilizada para a sondagem do canal rádio.

- Disponibilidade do equipamento de medidas. Foi adquirido pelo Exército Brasileiro um sistema ponto-a-ponto para a faixa de 60 GHz. Foi iniciado pela Pontifícia Universidade Católica (PUC) o processo de adaptação do referido sistema para o uso em ambientes urbanos; □
- A frequência escolhida pertence à faixa compreendida entre 55 e 66 GHz, disponível para uso não licenciado. Se os avanços das pesquisas apontarem no sentido da viabilidade da utilização desta porção de espectro, existirá uma grande probabilidade de haver harmonização em escala global quanto ao uso de uma considerável porção da referida faixa. A harmonização quanto ao uso do espectro é uma das chaves para o sucesso comercial de sistemas de comunicação;
- Os avanços tecnológicos na produção de circuitos para componentes de RF e processamento em banda base foram impulsionados por pesquisas, na faixa de 60 GHz, □ que resultaram na primeira aplicação de ondas milimétricas em sistemas de comunicações pertencentes ao mercado de massas. A estrutura para a produção de dispositivos para a faixa de 60 GHz já se encontra, portanto, estabelecida;
- Continuidade dos estudos realizados em [11] [6]. A frequência de 60 GHz constitui o pico de absorção pelo gases atmosféricos, devido à ressonância com o modo de vibração dos momentos magnéticos das moléculas do



oxigênio. Em distâncias entre 100 e 300 m, contudo, os efeitos de atenuação por gases atmosféricos são semelhantes às frequências utilizadas em [6].