

## 2 COMUNICAÇÕES MÓVEIS E ONDAS MILIMÉTRICAS

### 2.1 Evolução das Tecnologias Móveis

As tecnologias de comunicações móveis atuais permitem transmissão de voz e dados a altas taxas durante os deslocamentos dos usuários utilizando o conceito celular. Entretanto, os primeiros sistemas móveis comerciais, criados há mais de cinquenta anos, tinham como principal objetivo alcançar uma grande área de cobertura a partir de um único transmissor de alta potência. Utilizavam a técnica de acesso múltiplo por divisão de frequências (*Frequency Division Multiple Access, FDMA*), na qual um canal centrado em uma frequência exclusiva é alocado a cada receptor. Embora estes sistemas apresentassem uma boa cobertura, atendiam simultaneamente a um número muito limitado de receptores. Como exemplo da baixa capacidade, pode-se citar o sistema móvel dos Laboratórios Bell em Nova Iorque de 1970, sistemas de comunicações instalados em viaturas policiais que suportava um máximo de doze chamadas simultâneas numa área igual a, aproximadamente, dois mil e seiscentos quilômetros quadrados [5].

As agências de regulamentação, em geral governamentais, não conseguiam alocar espectro na medida do aumento da demanda pelos serviços móveis. Portanto, foi necessário reestruturar os sistemas de comunicações móveis para prover maior capacidade com o espectro já disponível e, ao mesmo tempo, manter as grandes áreas de cobertura [1]. O conceito celular resolveu os problemas de congestionamento espectral e limitação de capacidade de usuários existentes nos sistemas de comunicações móveis iniciais. Em 1981, A *Federal Communication Commission* (FCC), órgão americano regulamentador das telecomunicações, 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

reutilizados em células diferentes na área de serviço”. Uma série de gerações foram desenvolvidas e oferecidas aos usuários, conforme resume a Figura 2.1.

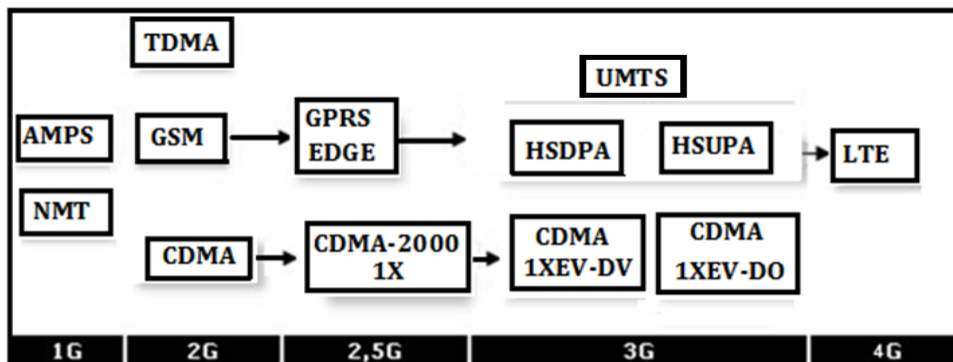


Figura 2.1: Gerações das tecnologias móveis (adaptada de [6]).

## 2.2 Primeira Geração

A invenção dos microprocessadores e a concepção da comunicação celular foram importantes para a primeira geração das comunicações móveis, que começaram a operar ao final da década de 1970. Estes sistemas eram totalmente analógicos e utilizavam a técnica de acesso FDMA. Ademais, a primeira geração foi projetada para o tráfego de voz apenas e utilizava a comutação por circuito [6]. Estes sistemas possuíam problemas como a limitação de capacidade, incompatibilidade entre os sistemas, interfaces sem padronização, ligações com baixa qualidade e sem nenhum tipo de segurança na transmissão. Os principais sistemas desenvolvidos na primeira geração são comparados na Tabela 2.1.

## 2.3 Segunda Geração

A telefonia móvel de segunda geração (2G) introduziu a mudança de transmissão de analógica para digital, atendendo a necessidade de padronização dos sistemas celulares desenvolvidos por diversos fabricantes e a crescente demanda pelo serviço móvel. Em 1990, os sistemas de segunda geração começaram a ser utilizados, impulsionados pelo avanço da tecnologia dos circuitos integrados que permitiram a utilização da transmissão digital.

A primeira tecnologia 2G implantada o Brasil foi baseada na técnica de acesso múltiplo por divisão de tempo (*Time Division Multiple Access, TDMA*), seguida pela técnica de acesso múltiplo por divisão de código (*Code Division Multiple Access, CDMA*). Posteriormente, ambas foram superadas pelo padrão (*Global System for Mobile communications, GSM*), desenvolvido na Europa. A Tabela 2.2 apresenta as principais características de cada tecnologia.

Tabela 2.1: Sistemas móveis de primeira geração. (adaptada de [6])

PARÂMETROS DO SISTEMA	NMT (ESCANDI-NÁVIA)	AMPS (EUA)	TACS (REINO UNIDO)	C450 (ALEMANHA)	NTT (JAPÃO)
Ano de operação	1979	1983	1983	1985	1985
Frequência de transmissão (MHz)	463-467,5 453-457,5	870-890 825-845	935-960 890-915	461,3-465,74 451,3-455,74	870-885 925-940
Largura de canal (kHz)	25	30	25	20	25
Número de canais	180	666 / 832	1000	222	600
Raio de Cobertura da Base (km)	1,8 – 40	2 - 25	2 – 20	5 – 30	5 (urbano) 10 (suburbano)
Sinal de áudio -modulação - $\Delta f$ máximo (kHz)	FM $\pm 5$	FM $\pm 12$	FM $\pm 9,5$	FM $\pm 4$	FM $\pm 5$
Sinais de controle -modulação - $\Delta f$ (kHz)	FSK $\pm 3,5$	FSK $\pm 8$	FSK $\pm 6,4$	FSK $\pm 2,5$	FSK $\pm 4,5$
Taxa de transmissão de dados (kbps)	1,2	10	8	5,28	3

Estes sistemas mais estáveis, além de possibilitar uma maior capacidade, ofereciam vantagens sobre os sistemas analógicos: técnicas de codificação digital de voz mais eficiente, maior eficiência espectral e melhor qualidade nas ligações.

## - TDMA

O sistema TDMA tem a característica de divisão dos canais de frequência em até 6 intervalos de tempo diferentes e realiza o controle de interferências com cada usuário usando um intervalo específico. Cada portadora TDMA possui a largura de banda de 30 kHz.

A tecnologia TDMA não é mais usada no Brasil, pois suas redes foram desligadas desde 2009. As operadoras migraram para o padrão GSM ou CDMA [6], como mostra a Figura 2.2, onde se pode verificar que o GSM possui uma diferença considerável em usuários.

Tabela 2.2: Sistemas móveis de segunda geração. (adaptada de [6])

PARÂMETROS DO SISTEMA	IS-54 IS-136 (EUA)	GSM (EUROPA)	IS-95 (EUA)	CT-2 (EUROPA, ÁSIA)
Técnica de acesso	TDMA	TDMA	CDMA	FDMA
Frequência de transmissão (MHz)	869–894 824–849	935–960 890– 9151805–1880	869–894 824–849	864–868
Técnica de duplexação	FDD	FDD	FDD	TDD
Largura de canal (kHz)	30	200	1250	100
Modulação	DQPSK	GMSK	BPSK QPSK	/ BFSK
Potência máxima / média (mW)	600 / 200	2000 / 125	600	10 / 5
Nº de canais de voz por portadora	3	8	-	1
Taxa de transmissão do canal (kKbps)	48,6	207,833	-	72

## - CDMA

O sistema CDMA utiliza a técnica de espalhamento espectral (*spread spectrum*), que usa uma banda mais larga (1,25 MHz). Essa tecnologia competiu diretamente com os sistemas TDMA e GSM até meados da década passada, de acordo com a Figura 2.2. A principal característica é que diversos usuários podem utilizar a mesma largura de banda simultaneamente. A diferenciação entre usuários é feita por códigos ortogonais distintos associados a cada transmissão, do móvel para a Estação Base e vice-versa. A capacidade máxima alcançada depende, entre outros fatores, do controle de potência de cada ligação e dos sinais interferentes.

## - GSM

GSM é a tecnologia que utiliza a técnica de acesso TDMA. A portadora de rádio frequência do GSM possui uma largura de banda de 200 kHz que, por meio da técnica TDMA, é subdividida em 8 intervalos de tempo. Dessa maneira, até 8 conversações simultâneas podem compartilhar um único par de portadoras ou canal de 2 x 200 kHz. GSM tornou-se a tecnologia adotada na maior parte do mundo, caracterizada pelo uso de cartões de memória *Subscriber Identity Module* (SIM) nos aparelhos, o que possibilita mobilidade terminal, ou seja, levar as características do usuário para a rede GSM. No Brasil, foi a tecnologia 2G líder de mercado, responsável por mais de 100 milhões de acessos e ainda em expansão.

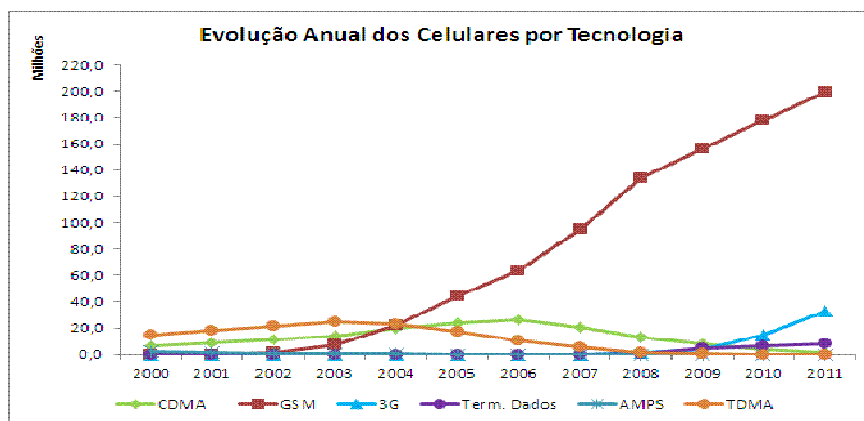


Figura 2.2: Evolução anual dos celulares por tecnologia.  
(reproduzida de [6])

## 2.4 Entre Gerações (2,5G)

Nesta geração intermediária, a grande inovação foi o uso da comutação por pacotes (ao contrário de circuitos), a mesma técnica de transmissão adotada pelo IP da arquitetura TCP/IP (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*).

## - GPRS

*General Packet Radio Services* (GPRS) é baseado em tecnologia que usa a transmissão de pacotes, oferecendo velocidades máximas de transmissão de dados de 115 kbps. O funcionamento de GPRS consiste ainda no uso de canais TDMA ociosos para transmissão de dados, de modo que vários usuários podem utilizar o

mesmo canal. Cada pacote tem tamanho constante (correspondente ao *time slot* GSM). Para a atribuição do canal, utilizam-se as técnicas FDMA e FDD; para a comutação de pacotes, uma multiplexação estatística no domínio do tempo.

### - EDGE

O sistema *Enhanced Data Rates for GSM Evolution* (EDGE) utiliza diferentes esquemas de modulação e códigos corretores de erros, possibilitando uma taxa de transmissão de dados maior (possui limite teórico de 473,6 kbps, utilizando 8 *slots*) e uma conexão mais confiável e robusta. O sistema EDGE também possibilita a comutação de pacotes.

### - CDMA-2000 1X

Esta tecnologia é a evolução do CDMA original, ou CDMA-1, sendo considerada uma tecnologia 2.5G, segundo o padrão da ITU-T, por possuir taxas de transmissão superiores a 144 kbps. O CDMA-2000 1X abriu o caminho para as altas taxas de velocidade de dados. De fato, sua velocidade máxima é 153,6 kbps.

## 2.5 Terceira Geração

Os sistemas 3G provêm serviços de telefonia e comunicação de dados a velocidades maiores que seus antecessores. O padrão 3G especifica, minimamente, 144 kbps para usuários móveis, 384 kbps para pedestres e 2 Mbps para usuários fixos.

### - UMTS

*Universal Mobile Telecommunications Service* (UMTS) é uma tecnologia baseada em IP e suporta pacotes de voz e dados, oferecendo taxas máximas de transmissão de até 2 Mbps e até 320 kbps para usuários em movimento. É uma tecnologia desenvolvida para prover serviços que exigem alto consumo de banda. UMTS é compatível com EDGE e GPRS, permitindo ao assinante sair de uma área com cobertura e ser automaticamente transferido para uma rede EDGE ou GPRS, dependendo de fatores como disponibilidade de rede e taxa de transferência.

### - CDMA 1xEV-DO

CDMA 1xEV-DO (*Evolution, Data-Optimized*) é baseado em tecnologia que possui alto desempenho para transmissão de dados, com picos de até 2,4 Mbps. A taxa máxima de transmissão de dados teórica é de 24 Mbps e taxa de transmissão média de 300 kbps a 500 kbps. Opera nas frequências de 800 MHz e 1900 MHz. Portadoras distintas são necessárias para transmitir dados e voz neste sistema. O enlace de subida permanece igual em comparação com o CDMA2000, mas os dados dos diversos usuários são multiplexados em tempo no enlace de descida.

### - CDMA 1xEV-DV

CDMA 1xEV-DV (*Evolution, Data and Voice*) é a evolução do CDMA 1xEV-DO no qual uma mesma portadora pode ser utilizada para voz e dados. Ao contrário, no 1xEV-DO, uma portadora de 1,25 MHz é dedicada para dados.

### - HSDPA/HSUPA

*High Speed Downlink Packet Access* (HSDPA) se refere à velocidade com que é possível receber dados no celular e pode oferecer taxas de transmissão de até 14,4 Mbps. *High Speed Uplink Packet Access* (HSUPA) se refere à velocidade com que é possível enviar dados e oferece velocidade máxima de 5,76 Mbps. Níveis tão altos se devem à redução do *Transmission Time Interval* (TTI), que varia entre 1 ms e 3 ms. Nos outros padrões, este tempo varia em torno de 10 ms.

A primeira operadora a oferecer 3G no Brasil foi a VIVO em 2004 [6], com a tecnologia CDMA 1xEV-DO, que atinge velocidades de até 2,4 Mbps. No entanto, a cobertura ficou limitada a poucas cidades. Em 2005, a ANATEL com uso do Plano Geral de Outorgas (PGO), definiu as regiões e setores no Brasil para concessões e autorizações para serviços telefônicos Fixos Comutados (STFC) [7], mostrados na Tabela 2.3. Em 2007, as operadoras CLARO e TELEMIG lançaram suas redes 3G UMTS/HSDPA na frequência de 850 MHz, antecipando-se ao leilão realizado. Em dezembro de 2007, foi realizado o leilão das faixas de frequências no Brasil. Dessa forma, as três principais operadoras do país (Vivo,

Claro e TIM) conseguiram obter licenças para cobertura nacional. A Oi obteve licenças nas regiões I e III, com a compra da BrT (Brasil Telecom), que atuava somente na região II, com isso a Oi conseguiu ter cobertura nacional. A Telemig celular e a BrT obtiveram a cobertura em regiões I e II respectivamente.

Tabela 2.3: Regiões para concessões definida pela Anatel [6], [7].

Região	Estados
I	Rio de Janeiro, Espírito Santo, Minas Gerais, Amazonas, Roraima, Pará, Amapá, Maranhão, Bahia, Sergipe, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Alagoas, Pernambuco.
II	Paraná, Santa Catarina, Rio Grande do Sul, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Goiás, Distrito Federal, Tocantins, Rondônia, Acre.
III	São Paulo

## 2.6 Quarta Geração

Atualmente, essa geração se encontra em operação na Europa, Ásia e América, utilizando-se as tecnologias *Long Term Evolution* (LTE) e *Mobile-WiMAX* (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*). O ponto focal das redes 4G é integralmente o tráfego de dados (pacotes), ao contrário dos sistemas anteriores (híbridos, que alternavam entre redes de pacotes ou de circuitos, segundo a demanda de dados ou voz). O propósito foi reduzir a complexidade na infraestrutura da rede existente nas arquiteturas anteriores. LTE mantém compatibilidade com os sistemas antecessores e, em condições ideais, permite picos de taxa de transmissão de até 120 Mbps.

A tecnologia LTE também se diferencia pela forma de acesso. Enquanto as tecnologias UMTS e HSPA são baseadas no padrão W-CDMA (*Wide-Band Code-Division Multiple Access*), a tecnologia LTE utiliza as especificações *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA), que distribui as informações das transmissões entre diversos subconjuntos paralelos de portadoras. Esta característica favorece velocidades maiores para o *downlink*. As tecnologias LTE e *Mobile-WiMAX* possuem características diferenciadas, como adoção de OFDM e MIMO (*Multiple-Input and Multiple-Output*), latência reduzida e maior patamar de velocidade.



A primeira capital brasileira a utilizar comercialmente a tecnologia 4G foi a cidade de Recife, em 2012. Logo a seguir, em fevereiro de 2013, Curitiba foi a primeira cidade do sul do Brasil a receber esta tecnologia de Internet móvel.

## 2.7 Quinta Geração

A demanda pela transmissão de dados envolvendo aparelhos celulares continua crescendo a um ritmo intenso. De fato, estimativas conservadoras para o aumento de tráfego variam de 40% a 70% ao ano [8]. Este crescimento implica que, dentro das próximas décadas, redes celulares precisariam atender até 1000 vezes a capacidade atual. Ao mesmo tempo, os benefícios da conectividade sem fio devem também ser estendidos a dispositivos novos, além de *smartphones*. Estima-se que 50 bilhões de dispositivos estarão conectados até 2020 [9]. O atendimento dessa demanda será uma tarefa difícil. Muitos dos requisitos necessários para este atendimento caracterizam o que estão sendo chamados de sistemas celulares de quinta geração (5G). Esta geração deverá ser lançada nos próximos cinco anos, seguindo o padrão de evolução das gerações anteriores.

Para enfrentar os desafios descritos no parágrafo anterior, existe um interesse crescente em sistemas celulares operando na faixa de ondas milimétricas (mmW), entre 30 GHz e 300 GHz, onde as larguras de banda disponíveis são muito mais amplas do que aquelas das atuais redes celulares. Atualmente, o espectro disponível nestas frequências mais elevadas pode ser 100 vezes maior que todas as alocações atuais a sistemas celulares, restritas a frequências inferiores a 3 GHz [9]. Além disso, os pequenos comprimentos de onda de sinais mmW, combinados com os avanços dos circuitos de baixa potência CMOS RF [10], permitem que um grande número (de 32 ou mais elementos) de antenas miniaturizadas possam ser alocados em pequenas dimensões, como mostra a Figura 2.3.

Estas redes de quinta geração também têm a possível característica de possuir muitos pontos de acesso (PAs) nas áreas urbanas. São esperadas densidades de 10 a 100 PAs por quilômetro quadrado, formando redes heterogêneas muito densas, com PAs operando em frequências de ondas mmW

que interagiriam com as redes das tecnologias antecessoras, como se mostra na Figura 2.3. Observa-se que os pontos de acesso vizinhos de uma rede uniforme de densidade igual a  $100 \text{ PA}/\text{km}^2$  estariam afastados de cerca de 100 m. No momento, estas possíveis características continuam em desenvolvimento.

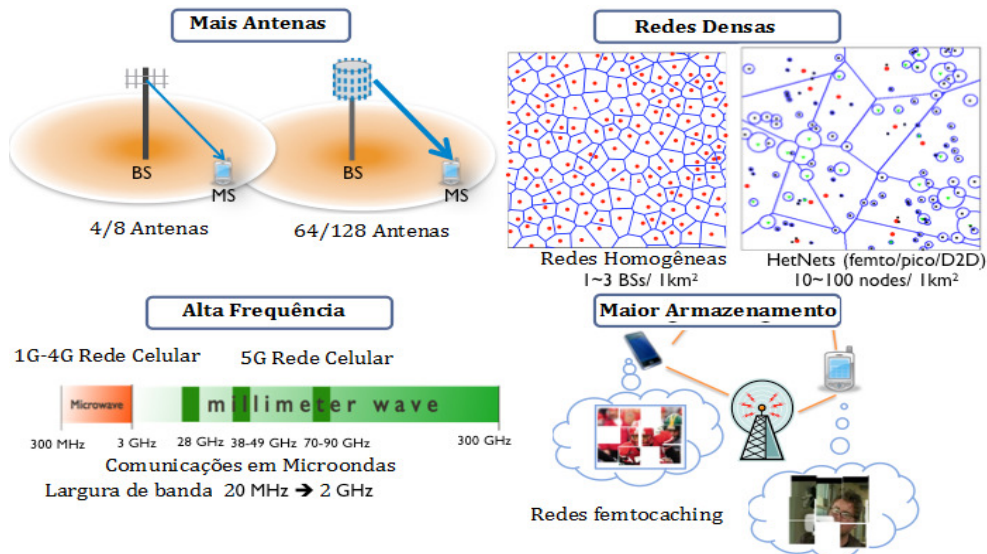


Figura 2.3: Características em desenvolvimento para o sistema de quinta geração. (adaptada de [11])

### 2.7.1 Ondas Milimétricas

Atualmente, o espectro de micro-ondas (SHF, de 3 GHz a 30 GHz) tem uma grande ocupação. O espectro de ondas milimétricas (EHF, que varia entre 30 GHz e 300 GHz), é ocupado por radares militares e formam o *backhaul* das redes de comunicações, mas tem menor utilização. As ondas milimétricas oferecem uma largura espectral muito mais ampla que a utilizada até o momento. As faixas de frequências de 28 GHz, 38 GHz, 60 GHz e 70 GHz a 90 GHz parecem especialmente promissoras para a próxima geração de sistemas celulares, permitindo a utilização de larguras de canais superiores a 1 GHz.

Adicionalmente, a maioria dos países ainda não começou a regulamentar, alocar e utilizar o espectro acima de 100 GHz, já que a tecnologia sem fio nestas frequências só agora começa a se tornar comercialmente viável. Em 1995, o *Federal Communication Committee* (FCC) autorizou o uso do espectro entre 59

GHz e 64 GHz para comunicações sem fio não licenciadas, resultando no desenvolvimento de uma infinidade de aplicações de banda larga e de radares de objetivos comerciais. Em 2003, a FCC autorizou o uso das faixas de 71 GHz a 76 GHz e de 81 GHz a 86 GHz para licenças para sistemas de comunicações ponto a ponto [12].

É interessante notar na Figura 2.4, que mostra a versão de 2015 do Plano de Atribuição, Distribuição e Destinação de Rádio Frequências (PADDF) [13], e na Resolução ANATEL no. 506 de 07 de julho de 2008 [14], que a faixa de frequências compreendida entre 57 GHz e 64 GHz é atribuída a equipamentos de radiação restrita, que podem ser utilizados com dispensa da licença de funcionamento de estação, sendo independentes de outorga de autorização de uso de radiofrequência (faixa delimitada dentro de um quadro na figura 2.4). Esta faixa de frequências tem largura superior à ocupada por todos os satélites, sistemas celulares, estações *Wi-Fi*, Rádios AM, Rádios FM, e estações de televisão do Brasil e mesmo do mundo. Isto ilustra as enormes larguras de banda disponíveis em frequências de ondas milimétricas.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1413453/CA

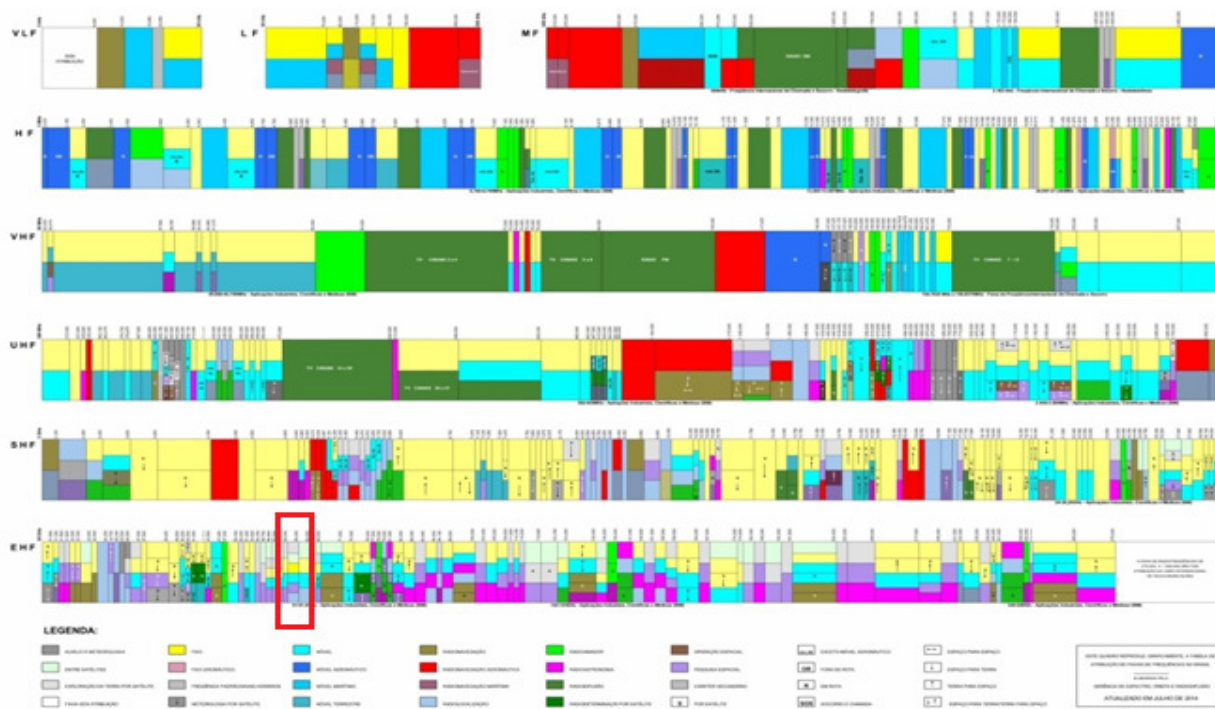


Figura 2.4: Quadro de atribuição de faixas de frequências no Brasil (ANATEL 2015 [13]).

Em 2012, o projeto da União Europeia "*Mobile and Wireless Communications Enablers for the Twenty-twenty Information Society*" [11] iniciou suas atividades, com o objetivo de especificar o sistema 5G usando ondas milimétricas. Pretende garantir um consenso global sobre este sistema.

Em 2013, o Grupo de Trabalho 5D (WP 5D) do ITU-R começou a trabalhar em dois itens de estudo sobre: (1) a Visão IMT para 2020; e (2) as tendências tecnológicas futuras para os sistemas IMT terrestres [15]. Ambos têm como objetivo uma melhor compreensão dos futuros aspectos técnicos de comunicações móveis para a definição de sistemas de próxima geração.

As ondas milimétricas permitem altas taxas de transmissão digital de dados. De fato, as comunicações sem fio nas frequências de micro-ondas ou inferiores são limitadas a 1 Gbps, aproximadamente. Na faixa de ondas milimétricas, as taxas de transmissão podem superar 10 Gbps [16]. Fabricantes de equipamentos para redes celulares, incluído a Ericsson, Huawei e Nokia [17], estão desenvolvendo equipamentos baseados em ondas milimétricas para conectar, em linha de visada de alta velocidade, estações de base, *backhaul* e *backbone* de redes, eliminando a necessidade de conexões por fibra ótica, fornecendo maior qualidade e baixa latência. Portanto, as ondas milimétricas devem viabilizar novos serviços sem fio. Por outro lado, as redes móveis baseadas em ondas milimétricas podem não ser capazes de proporcionar uma cobertura total. Em certos ambientes (exteriores ou mesmo interiores), as redes poderão não garantir sempre uma conexão em linha de visada entre um ponto de acesso (PA) e um equipamento do usuário (EU).

## **2.7.2 Características de Propagação das Ondas Milimétricas**

### **2.7.2.1 Perda de percurso em condições de céu claro**

Modelos de canal para sistemas celulares urbanos usuais devem considerar as perdas de percurso sob condições de rádio visibilidade ou não visibilidade (LOS e NLOS, respectivamente). As perdas de percurso LOS seguem aproximadamente a propagação em espaço livre, com base na fórmula de Friis. Isto é, a perda de espaço livre é calculada em decibéis (dB) pela expressão:

$$L = 92.4 + 20 \log f(\text{GHz}) + 20 \log D(\text{km}) \quad (2.1)$$

onde  $f$  é a frequência de operação e  $D$  é a distância entre o transmissor e o receptor. Por exemplo, numa frequência de 60 GHz e uma distância de 10 metros, a perda de espaço livre seria aproximadamente igual a 88 dB. Fornecedores e operadores têm superado esta perda com receptores muito sensíveis, alta potência de transmissão e antenas com alto ganho.

A seguinte equação empírica descreve a perda com ou sem linha de visada:

$$F(d) = PL(d_0) + 10 n \log_{10} \frac{d}{d_0} + S_\sigma \quad (2.2)$$

Nesta expressão,  $d_0$  é uma distância de referência,  $d$  é a distância em metros,  $n$  é o expoente de perda devida a multipercursos e  $S_\sigma$  é a perda por sombreamento. Os coeficientes desta expressão são obtidos aplicando-se um ajuste linear padrão a dados experimentais. Por exemplo, os valores  $n = 2,1$  e  $n = 3,3$  são indicadores típicos de existência ou não de linha de visada entre o PA e o usuário, respectivamente.

### 2.7.2.2 Atenuações devidas a gases atmosféricos e chuva

Durante a propagação em ligações de rádio terrestres ou via satélite, ocorrem atenuações do sinal devidas à absorção e espalhamento causados por partículas atmosféricas e por hidrometeoros como chuva, neve, granizo ou nevoeiro. Estes efeitos são importantes no caso dos sistemas que operam em frequências milimétricas [18].

O vapor de água e oxigênio têm linhas de absorção na faixa de frequências de micro-ondas e ondas milimétricas, causando atenuação em enlaces terrestres e por satélites. Especificamente, existem frequências onde ocorrem altas atenuações, separadas por janelas de transmissão, onde a atenuação é menor. Por exemplo, a absorção causada pelo oxigênio causa uma perda aproximada de 15 dB/km na potência de uma onda que se propaga na frequência de 60 GHz. Esta

absorção elevada é um dos fatores que tornam importante diminuir os espaçamentos entre as estações base, que podem ser da ordem de 200 m ou menos para sistemas operando na faixa de ondas milimétricas [19]. Na verdade, essa absorção pode ser benéfica, aumentando eficazmente o isolamento de cada célula. Estes efeitos serão revisados mais detalhadamente no capítulo 3.

### 2.7.2.3 Feixes estreitos

A construção de um sistema sem fio com feixes estreitos não é trivial e modifica aspectos tradicionais de planejamento. A utilização de feixes altamente direcionais em sistemas baseados em ondas milimétricas muda completamente o comportamento das interferências, assim como a sensibilidade a raios desalinhados [20]. A interferência adota um comportamento próximo ao *on/off*, onde a maioria dos feixes geralmente não interferem, mas fortes interferências podem ocorrer de forma intermitente. A interferência é de-enfatizada e as ligações em ondas milimétricas podem ser muitas vezes limitadas pelo ruído, o que é uma importante reversão relativa a tecnologias anteriores. De fato, mesmo a noção de uma "célula" pode se tornar muito diferente em um sistema de ondas milimétricas, já que a distância e o bloqueio são, muitas vezes, os efeitos de primeira ordem sobre a potência do sinal recebido. Isto é ilustrado na Figura 2.5.

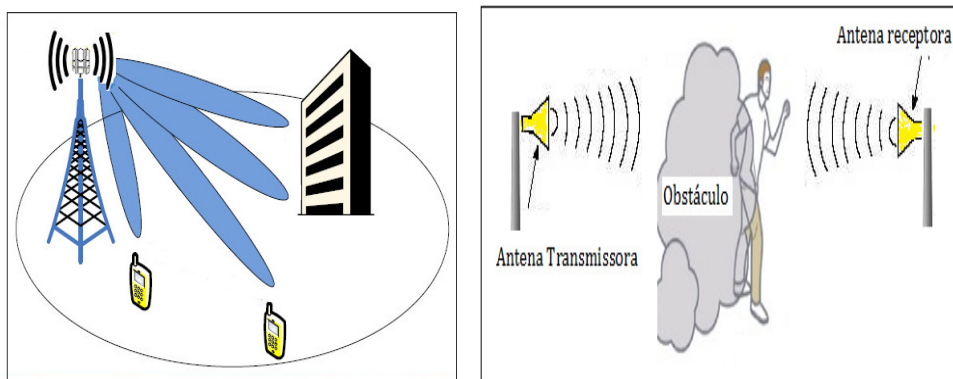


Figura 2.5: a) Feixes direcionais; b) Bloqueio humano.

Um desafio fundamental para feixes estreitos é a dificuldade em estabelecer associações entre usuários e PAs, tanto para o acesso inicial quanto para o *handoff* [19]. Para localizar um usuário e um PA, pode ser necessário armazenar

previamente um conjunto de posições angulares de cada um, onde um feixe estreito poderia ser encontrado. Também se podem implantar ganhos de codificação extremamente grandes ao longo de um feixe em vários níveis. Desenvolvimentos de soluções para este problema, em particular no contexto de alta mobilidade, são um importante desafio para trabalhos futuros.

Como visto, enlaces em ondas milimétricas são inerentemente direcionais. Considerando os pequenos comprimentos de onda correspondentes, conjuntos de antenas podem ser implementados em placas de circuitos e seus feixes podem ser orientados eletronicamente [20]. Isto é, através de controle da fase de cada sinal transmitido individualmente pelos elementos do conjunto de antenas, seu feixe pode ser orientado em qualquer direção. Desta forma, consegue-se alcançar um elevado ganho na direção selecionada e oferecer um ganho muito baixo em todas as outras direções. Para que o transmissor e receptor orientem seus feixes de um para o outro, é necessário o procedimento de formação do feixe nas direções apropriadas. Vários algoritmos de formação de feixes têm sido propostos para reduzir o tempo necessário para a realização deste procedimento [21].

#### **2.7.2.4 Perda de penetração**

A perda de penetração é um fator considerado na incidência da onda milimétrica sobre materiais que formam a estrutura de edifícios. De acordo com a permissividade e condutividade do material sobre o qual a onda incide, assim como com a frequência de operação, reduz-se substancialmente a possibilidade de uma comunicação entre o exterior e interiores de edificações. Existem estudos sobre a perda de penetração dentro de prédios na frequência de 60 GHz que variam desde 28.3 dB para ladrilho ou tijolo até 40.1 dB para placas de vidro [22].

#### **2.7.2.5 Bloqueio e confiabilidade**

As ondas eletromagnéticas apresentam intensas atenuações ao se difratar em torno de obstáculos de tamanho significativamente maior que o comprimento de onda. Com um pequeno comprimento de onda, ligações na faixa de 60 GHz são sensíveis ao bloqueio por obstáculos (por exemplo, seres humanos e móveis). Por exemplo, o bloqueio por um ser humano atenua o sinal transmitido nesta faixa de

frequências de 20 dB a 30 dB. Collonge et al. [23] realizou medições de propagação em um ambiente interior realista na presença da atividade humana, e os resultados mostram que o canal está bloqueado durante 1% a 2% do tempo.

Levando em consideração a mobilidade humana, ligações em ondas milimétricas são intermitentes. Portanto, manter uma conexão confiável para aplicações sensíveis a retardos, tais como HDTV, é um grande desafio para as comunicações em ondas milimétricas. A confiabilidade das redes sem fio em ondas milimétricas depende de diversos fatores. Em particular, da distância de operação, margem de enlace rádio (em função da potência de transmissão, sensibilidade do receptor, divergência do feixe).

A disponibilidade de uma rede é medida pela percentagem de tempo em que estará funcionando. Por exemplo, a disponibilidade de 99,999% durante um ano, requisito apresentado pela ITU [24] para sistemas do serviço fixo de alta densidade (HDFS), irá igualar a pouco mais de 5 minutos de tempo de inatividade anual.

## **2.7.3 Aplicações das Ondas Milimétricas**

### **2.7.3.1 Redes metropolitanas sem fio**

O número de edifícios e empresas continua crescendo nas áreas das cidades, de modo que a exigência de internet de banda larga é alta e crescente. No entanto, muitos edifícios contam com infraestrutura de transmissão de dados antiga, baseada em fios de cobre que devem estar conectados à rede principal de fibras ópticas, estrangulando a eficiência das comunicações. A maioria de edifícios está localizada a uma distância reduzida da rede de fibra óptica. Mesmo assim, a instalação de uma conexão entre uma edificação e a rede pode ser problemática ou de custo elevado. Pela instalação de uma ligação ponto-a-ponto em ondas milimétricas de um edifício ao anel de fibra óptica, uma conexão em banda larga confiável (comparável à do próprio anel da rede metropolitana) pode ser obtida.



### 2.7.3.2 Redundância de conexão e recuperação de falhas

Usuários dependem de conexões de cabos de fibra óptica para o acesso de banda larga à Internet. Acidentes podem ocorrer, danificando esses cabos e impedindo completamente toda a conectividade. Isto resulta em deixar os usuários afetados em estado crítico, durante o qual não podem operar por um longo período de tempo, até que o cabo de fibra óptica seja reparado. Por isso, é muito desejável implementar um sistema alternativo para impedir que isso aconteça, reduzindo o tempo de inatividade [25]. Ligações ponto a ponto em ondas milimétricas podem ser instaladas ao lado de conexões de fibra óptica para garantir que, sempre que for detectado um problema com o cabo, internet e a rede de acesso óptico sejam transferidas diretamente para a ligação sem fio, minimizando o efeito sobre o desempenho da conexão e disponibilidade.

### 2.7.3.3 Backhaul de rede celular

Se os usuários móveis aumentam a demanda pela rede celular, em particular pela utilização de novas aplicações de uso intensivo de banda larga, a infraestrutura da rede deve melhorar para atender a estas aplicações. Os recursos atualmente utilizados poderão não ser capazes de lidar com esta demanda. Ligações em onda milimétricas poderão ser implementadas entre os pontos de acesso e o núcleo da rede.

### 2.7.3.4 DAS (Distributed Antenna Systems)

Sistemas de antenas distribuídas são usados para fornecer uma cobertura uniforme para redes de amplas áreas, onde uma antena central isolada não pode alcançar. Ligações ponto a ponto em ondas milimétricas podem ser instaladas entre antenas remotas e a principal estação de base para fornecer transferência de dados com altas taxas de transmissão onde o uso de cabos de fibra óptica não seria prática. Estas antenas remotas e ligações de ondas milimétricas também podem ser utilizadas em corporações, onde uma base de assinantes estará utilizando toda a largura de banda, tornando eficiente o uso de vários enlaces. Ligações em ondas milimétricas são a solução ideal para transferir sinais DAS sem fio.

### 2.7.3.5 Outras aplicações

Outras áreas em que as aplicações de onda milimétrica podem ser feitas são: recuperação de desastres, mercado financeiro, transmissão HDTV, assistência médica e vídeo vigilância. Ondas milimétricas estão encontrando seu caminho para uma ampla variedade de aplicativos de comunicação. Eles oferecem maior largura de banda, melhor resolução e maior diretividade das antenas. Como resultado, sistemas leves e menores estão sendo implantados entre ligações de satélite, radares militares e sistemas anticollisão. De fato, sistemas de radar de curto alcance em 24 GHz estão sendo oferecidos em veículos de maior valor agregado produzidos em países desenvolvidos. Fornecedores também estão trabalhando com sistemas de radar automotivo de maior resolução operando nas frequências de 77 GHz e 79 GHz. Os comprimentos de onda mais curtos os permitem operar com antenas consideravelmente menores para atingir ganhos elevados e feixes estreitos.

Outra aplicação muito importante das ondas milimétricas é aproveitada por radares biestáticos que são usados para determinar basicamente as distâncias e rastreamento de objetivos (termo militar) ou de precipitações (termo meteorológico) em função de uma antena transmissora localizada em um lugar e outra antena receptora localizada em outro lugar.