Paul Jean Etienne Jeszensky

Sistemas Telefônicos

Anexo 10 - Sistemas 4G e Além

Abril/2016

Preâmbulo

Este anexo trata da evolução dos sistemas celulares, posteriores aos sistemas 3G já detalhados no livro texto em seu anexo 5.

Trata-se apenas de um texto resumo, construído a partir de muitos outros, com o único objetivo de servir de guia de referência para as aulas da disciplina PTC2549 - Sistemas Telefônicos, ministrado pelo autor na EPUSP - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Todo cuidado foi tomado para que as referências consultadas fossem sempre mencionadas. Se, por um descuido, alguma referência foi omitida, pedimos desculpas e solicitamos que nos notifiquem, por meio do email:

pjj@lcs.poli.usp.br

para podermos fazer os devidos créditos.

O texto será atualizado sempre que se julgar necessário. Assim, para os que o acompanharem, identificaremos as novas versões por arquivos intitulados anexo10_vx.pdf, onde x indicará a versão atual. As alterações, em relação à versão anterior, estão indicadas no último parágrafo da última página

Índice **Página**

1. Retrospectiva 03

2. OFDM *(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)* 07

2.1 Modulação 08

2.2 Demodulação 10

2.3 Implementação utilizando IDFT e DFT 11

2.4 Modulador OFDM com IDFT 12

2.5 Demodulador OFDM com DFT 12

2.6 Prefixo Cíclico (CP-*Cyclic Prefix*) 13

3. O Sistema LTE (*Long-Term Evolution*) 15

3.1 O Sistema 4G no Brasil 21

4. O Sistema WiMAX 23

5. Sistemas 5G 23

6. Problemas Propostos 29

Referências Bibliográficas 33

ANEXO 10 - SISTEMAS 4G E ALÉM

1. Retrospectiva

A Figura A10.1 apresenta a evolução dos padrões de comunicação *wireless* a partir da segunda geração (2G), tratada no capítulo 17 do livro texto.

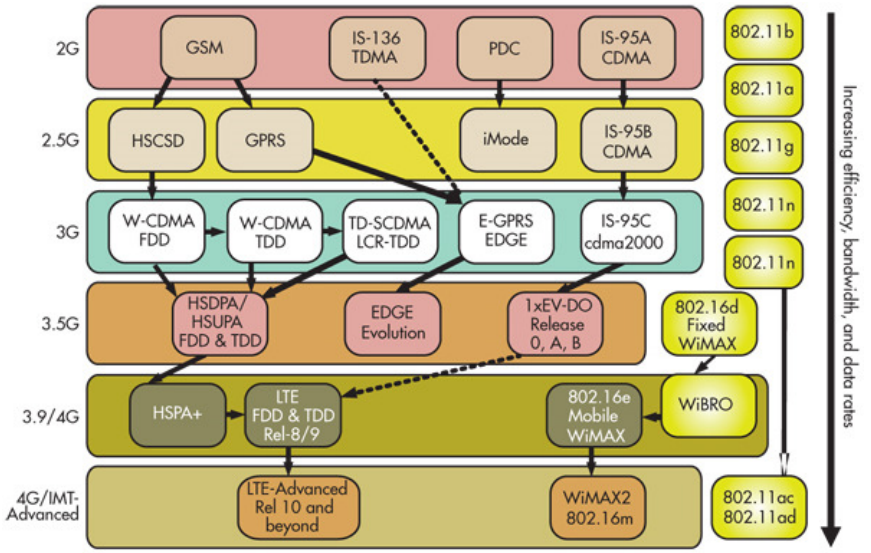


Figura A10.1 - Evolução dos padrões de comunicação *wireless*, ref. [FREN11].

Uma descrição sucinta dos sistemas intermediários, não detalhados no anexo 5 do livro texto, pode ser encontrada na ref. [JALO10]. Nota-se que a partir dos sistemas 3G, descritos no anexo 5, tem-se uma convergência para os sistemas LTE, que constitui um dos focos deste anexo, e WiMAX.

Seguindo um caminho de evolução do sistema GSM, deve-se observar que o mesmo foi desenvolvido para realizar serviços de tempo real, através de comutação de circuitos (representado em azul na Figura A10.2), com serviços de dados somente possível sobre uma conexão de modem em circuito comutado, com taxas de transferência bastante baixas. O primeiro passo em direção ao IP (*Internet Protocol*) baseado na solução de comutação de pacotes

(representado em verde na Figura A10.2) foi dado com a evolução de GSM para o GPRS, utilizando a mesma interface aérea e o mesmo método de acesso, i.e., o TDMA (*Time Division Multiple Access*).

Para se atingir taxas mais altas de transferência no UMTS (*Universal Mobile Terrestrial System)* uma nova tecnologia de acesso, o WCDMA (*Wideband Code Division Multiple Access),* foi desenvolvida.

A rede de acesso no UMTS emula conexão de comutação de circuito para serviços de tempo real e conexão de comutação de pacotes para serviços de dados (representado em preto na Figura A10.2). No UMTS o endereço IP é alocado ao UE (*User Equipment*) quando o serviço de dados é estabelecido e liberado quando o serviço é encerrado. Portanto, os serviços de transferência de dados se baseiam ainda na comutação de circuitos para os serviços de *paging*, i.e., o antigo "rádio chamada".

O EPS (*Evolved Packet System*) é totalmente baseado no IP. Tanto serviços de tempo real como serviços de dados são executados pelo protocolo IP. O endereço IP será alocado quando o móvel for ligado e liberado quando o móvel for desligado.

O LTE (*Long Term Evolution*), ou E-UTRAN (*Evolved Universal Access Network*), corresponde à parte de acesso do EPS. As principais exigências para o desenvolvimento dessa nova rede de acesso foram: alta eficiência espectral, altas taxas de pico para transferência de dados, tempos de ida e volta curtos (i.e., latências extremamente curtas), bem como flexibilidade em termos de espectro de frequências e largura de bandas. Vide referência [MAGD14] para um maior detalhamento.

Conforme apresentado no anexo 5 do livro texto os sistemas 3G, padrões IMT-2000, utilizam a tecnologia CDMA em várias de suas implementações. Trata-se de sistemas que iniciaram com maior ênfase a convergência para transmissão de dados, além dos serviços usuais de voz.

Como se explanará a seguir, os sistemas 4G representam uma mudança substancial na tecnologia adotada na transmissão para continuar a perseguir esta tendência. De fato, inicialmente, estas novas redes foram concebidas como redes de dados de alta velocidade, sem maiores preocupações para o tráfego de voz.

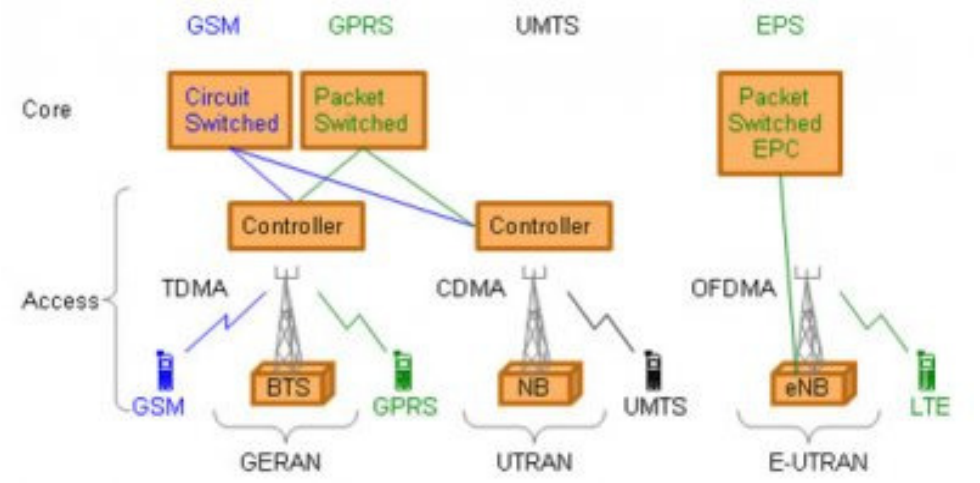


Figura A10.2 - Evolução do GSM, ref. [MAGD14].

Dois sistemas se sobressaem: LTE (*Long-Term Evolution*) e WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*).

O LTE foi padronizado pelo 3GPP (3*rd Generation Partnership Project*, vide anexo 5 do livro texto) e emprega novas técnicas na sua interface aérea, destacando-se a modulação OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) e antenas MIMO (*Multiple Input Multiple Output*).

Para melhor entender a motivação para a mudança ocorrida nesta geração faz-se uma comparação das tecnologias CDMA (3G) e OFDM (4G), ref. [MORA13].

Atributo	**CDMA**	**OFDM**
Banda de transmissão	Toda banda do sistema.	Variável até a banda total do sistema.
Programação seletiva da frequência	Não é possível.	Principal vantagem do OFDM, ainda que necessite da realimentação de informações precisas de canal, em tempo real, do RX para o TX.

Período de símbolo	Muito curto - inverso da banda de transmissão.	Muito longo, definido pelo espaçamento das subportadoras, independentemente da banda de transmissão.
Equalização	Difícil acima de 5 MHz.	Fácil para qualquer banda de transmissão devido à representação do sinal no domínio da frequência.
Resistência à multipercurso	Difícil acima de 5 MHz.	Livre de distorção de multipercurso até o comprimento CP*.
Adequação a sistemas MIMO	Requer potência computacional significativa devido ao fato do sinal estar definido no domínio do tempo.	Ideal para sistemas MIMO devido à representação no domínio da frequência e à possibilidade de alocação em faixa estreita para poder seguir as variações do canal em tempo real.
Sensibilidade às distorções no domínio da frequência e interferência	O processo de espalhamento tira uma média sobre o canal.	Vulnerável às distorções de faixa estreita e interferência.
Separação de usuários	Embaralhamento e códigos de espalhamento ortogonais.	Na frequência e no tempo, ainda que possam também ser utilizados técnicas de embaralhamento e espalhamento.

* O termo CP (*Cyclic Prefix*) refere-se a prefixar um símbolo com uma repetição do seu final. Ainda que o receptor descarte este prefixo, ele tem duas finalidades: 1) Como intervalo de guarda ele elimina a interferência inter simbólica do símbolo anterior; 2) Como é uma repetição do final do símbolo ele permite que a convolução linear de canais multipercursos seletivos em frequência seja modelado como convolução circular, que por sua vez pode ser transformado para o domínio da frequência usando DFT (*Discrete Fourier Transform*). Ver item 2.6 adiante.

2. OFDM *(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)*

O OFDM é um tipo de transmissão com múltiplas portadoras. A principal característica que a distingue de outras transmissões multiportadoras é que a banda utilizada é dividida em múltiplas portadoras ortogonais, denominadas subportadoras. As subportadoras são escolhidas de maneira que seus espectros não interfiram na frequência central de cada subportadora.

A Transformada de Fourier (TF) de um pulso retangular de duração T_u, que poderia representar um símbolo OFDM, é uma função sinc e assim vários sinc deslocados de exatamente $\Delta f=1/T_u$, serão ortogonais, conforme se evidencia nas Figuras A10.3 e A10.4.

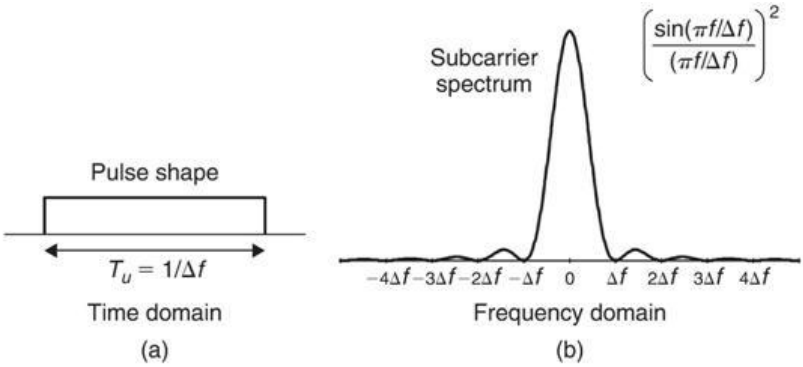


Figura A10.3 – Pulso básico nos domínios do tempo e da frequência, ref. [FIG1003]

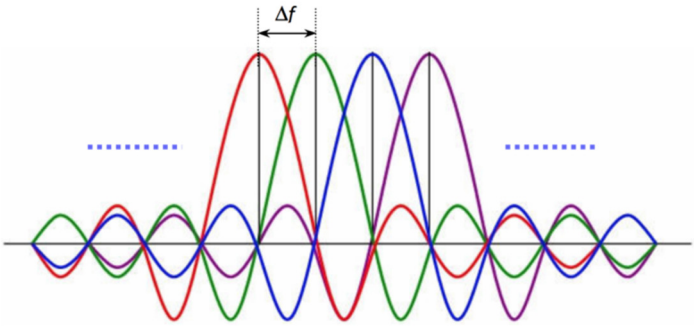


Figura A10.4 – Sincs sobrepostos sem interferência na frequência central, ref. [FIG1004].

Note-se que os cruzamentos por zero estão em múltiplos de Δf que corresponde ao inverso da duração do pulso no tempo. Esse Δf é o espaçamento entre as subportadoras que permite então obter a ortogonalidade. O espaçamento entre as subportadoras deve ser a menor possível, o que torna a duração do pulso T_u mais longa.

Uma característica importante é que cada símbolo pode transportar muitos bits e pode ser de duração mais longa, em contraposição a outros tipos de transmissão que transmitem poucos bits, em um tempo de transmissão mais curto, mas com a mesma taxa de transmissão.

O OFDM tem como objetivo aproximar ao máximo a sobreposição possível de canais sem causar interferência. Isto é conseguido pela escolha de frequências ortogonais; permitindo a sobreposição de espectros, mas sem interferir, tornando-a espectralmente mais eficiente.

2.1. Modulação

A modulação OFDM consiste num conjunto de N_c moduladores complexos, cada um correspondente a uma subportadora OFDM. Os elementos de um modulador OFDM são mostrados na Figura A10.5.

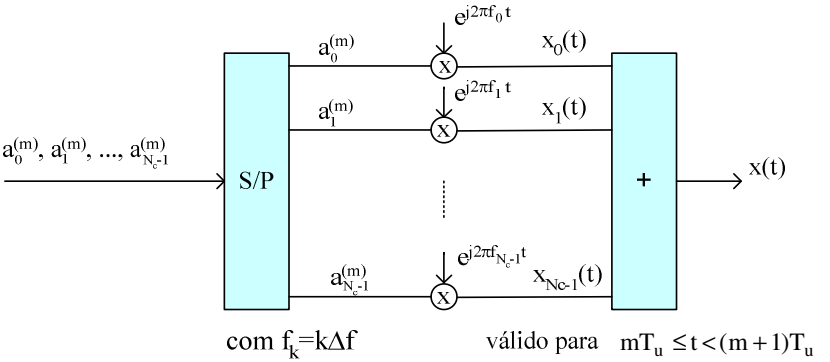


Figura A10.5 – Modulador OFDM.

Na Figura A10.5 mostra-se um conjunto de N_c símbolos, denotados por $a_k^{(m)}$, previamente modulados por um modulador digital, sejam estes BPSK, QPSK (2^n-PSK genericamente) ou então 16QAM, 64QAM (ou, de forma genérica, N-

QAM) e, portanto, caracterizados por uma amplitude e fase. Estes símbolos passam por um bloco serial-paralelo onde a cada símbolo é atribuída uma subportadora. Estas subportadoras serão ortogonais entre si, devido estarem localizadas em frequências equidistantes de $f_k = k\,\Delta f$. Note então que uma subportadora OFDM pode ser descrita por:

$$\underbrace{\left|a_k^{(m)}\right| e^{j\arg(a_k^{(m)})}}_{\text{ponto da constelação}} \times \underbrace{e^{j(2\pi f_k)t}}_{\text{subportadora}} \times \underbrace{p(t - mT_u)}_{\text{pulso unitário}}$$

onde $p(t\text{-}mT_u)$ denota um pulso retangular, de amplitude unitária e largura T_u centrado em mT_u.

Uma vez repartidas as subportadoras entre os símbolos, um bloco soma as subportadoras e assim, na multiplexagem OFDM, pode-se enviar N_c símbolos em um intervalo de tempo T_u. A saída do modulador, que é a soma de N_c símbolos repartidos entre N_c subportadoras, pode ser expressa como:

$$x(t) = \sum_{k=0}^{N_c-1} a_k^{(m)} e^{j(2\pi k\Delta f)t}$$

Observando esta expressão verifica-se que o OFDM pode ser implementado de uma maneira muito mais eficiente utilizando uma IDFT, como se detalhará adiante.

A parte fundamental da operação do OFDM está na propriedade de ortogonalidade entre as subportadoras e isso é possível por causa da separação $\Delta f = \frac{1}{T_u}$ entre elas e na sua forma de uma função sinc.

Para verificar esta propriedade de ortogonalidade basta efetuar o produto escalar de dois sinais do conjunto:

$$\int_{mT_u}^{(m+1)T_u} (a_{k_1}^{(m)} e^{j(2\pi k_1\Delta f)t})(a_{k_2}^{(m)} e^{j(2\pi k_2\Delta f)t})^* dt = \begin{cases} 0 & \text{se} \quad k_1 \neq k_2 \\ c & \text{se} \quad k_1 = k_2 \end{cases}$$

Mostrando assim a ortogonalidade entre duas subportadoras num intervalo de tempo $mT_u < t < (m+1)\,T_u$.

Genericamente, sinais senoidais são ortogonais entre si, em um tempo igual ao período do sinal de mais baixa frequência, sempre que a frequência de todas as subportadoras sejam múltiplas de uma fundamental, Δf no caso.

Assim, o espectro de saída resultante de um modulador OFDM será semelhante a um conjunto de N_c subportadoras sobrepostas mas sem interferir umas com as outras, como mostrado na Figura A10.6.

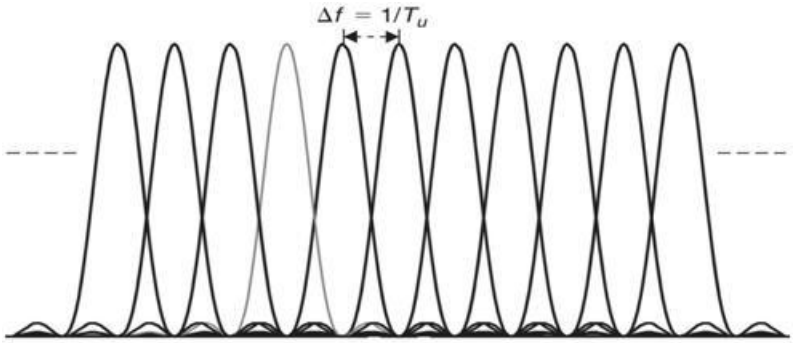


Figura A10.6 – Espectro de um sinal OFDM típico, ref. [FIG1006]

2.2 Demodulação

A demodulação OFDM consiste basicamente em um conjunto de dispositivos de correlação, um para cada subportadora, como ilustrado na Figura A10.7.

É possível demodular cada subportadora, no caso ideal em que as subportadoras mantêm a ortogonalidade depois do sinal passar pelo canal de transmissão, se não existir interferência entre as subportadoras.

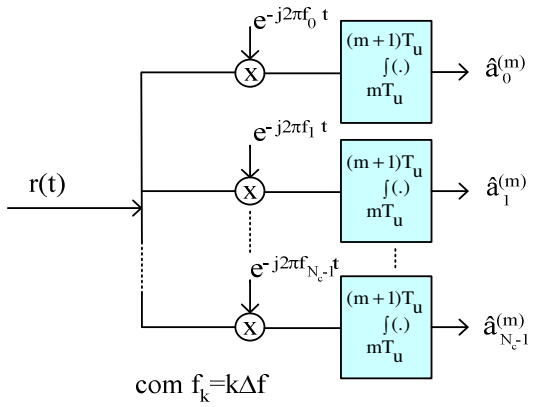


Figura A10.7 – Demodulador OFDM.

2.3 Implementação utilizando IDFT e DFT

Observação preliminar: definição de DFT e IDFT.

Dada uma sequência de N amostras f(n), indexadas por n=0,1,2,...N-1 define-se sua Transformada Discreta de Fourier (DFT - *Discret Fourier Transform*) à sequência:

$$\text{DFT} \Rightarrow F(k) = \sum_{n=0}^{N-1} f(n) e^{-j(2\pi k)\frac{n}{N}} \quad \text{com k=0,1,2,...N-1.}$$

Por outro lado, a sequência f(n) pode ser calculada a partir de F(k) usando a Transformada Inversa Discreta de Fourier (IDFT – *Inverse Discret Fourier Transform*):

$$\text{IDFT} \Rightarrow f(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} F(k) e^{j(2\pi k)\frac{n}{N}} \quad \text{com n=0,1,2,...N-1}$$

O modulador e demodulador OFDM apresentados teoricamente funcionam, mas implementações mais práticas podem ser realizadas através da substituição do x(t) por uma versão amostrada deste sinal mais um conversor digital-analógico. Para tanto, x(t) é amostrado a uma taxa f_s maior e também múltipla inteira de Δf (o espaçamento entre as subportadoras); assim o sinal discreto resultante é, onde $T_s=1/f_s$ e N é um número inteiro tal que $f_s = N\Delta f$:

$$x_n = x(nT_s) = \sum_{k=0}^{N_c-1} a_k^{(m)} e^{j(2\pi k\frac{f_s}{N})nT_s} = \sum_{k=0}^{N_c-1} a_k^{(m)} e^{j(2\pi k)\frac{n}{N}}$$

Agora, se aos N_c símbolos a serem transmitidos forem concatenados ainda ($N-N_c$) símbolos com valor igual a zero, isto é, fazendo-se:

$$a_k^{'} = \begin{cases} a_k^{(m)} & \text{com } 0 \le k < N_c \\ 0 & \text{com } N_c \le k < N \end{cases}$$

pode-se escrever, de forma equivalente:

$$x_n = \sum_{k=0}^{N-1} a_k^{'} e^{j(2\pi k)\frac{n}{N}} = N \times \text{IDFT}(a_k^{(m)})$$

O que evidencia então que se tem uma IDFT de N pontos, onde N é tal que a frequência de amostragem é dada por $f_s=N\Delta f$ (a efetiva localização dos zeros

inseridos pode ser diferente da exposta por razões práticas).

Adicionalmente, a DFT pode ser implementada usando uma FFT (*Fast Fourier Transform*) que é um algoritmo muito mais eficiente, com a restrição de que o número de pontos N seja uma potência exata de 2 ou o produto de números primos pequenos, vide referência [LYON10].

2.4 Modulador OFDM com IDFT

Com a observação do item anterior, o modulador pode ser implementado com um conversor serial a paralelo para em seguida mapear-se cada elemento com alguma constelação (PSK, QAM, entre outros). A estes dados são concatenados zeros até completar os N elementos que irão ser transformados no bloco IDFT, o que dará a eles a subportadora ortogonal; em seguida é gerado o símbolo OFDM, convertendo-se agora o sinal x_i (i=0, 1, 2, ..., N-1) de paralelo a serial e agregando ainda um intervalo de guarda chamado prefixo cíclico (não representado na Figura A10.8 adiante); no passo final converte-se o sinal de digital para analógico para transmissão.

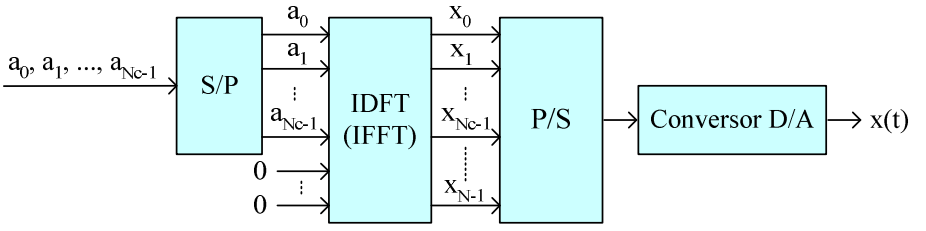


Figura A10.8 - Modulador OFDM com IDFT.

2.5 Demodulador OFDM com DFT

No receptor tem-se o processo inverso, isto é, o sinal é convertido para digital e removido o intervalo de guarda ou prefixo cíclico (vide adiante); em seguida, no bloco DFT, são eliminados os elementos com valor zero agregados no modulador e designados os valores correspondentes, segundo o esquema utilizado (PSK, QAM, entre outros); finalmente, converte-se de novo o sinal para a forma serial obtendo assim a decodificação da sequência original.

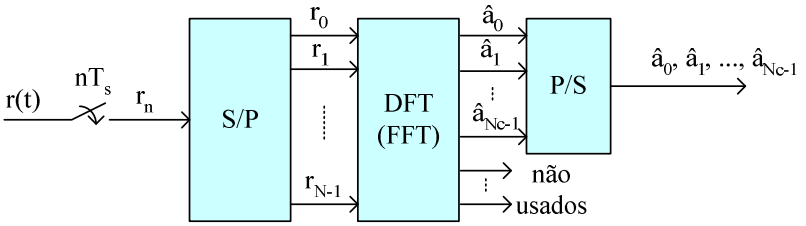


Figura A10.9 – Demodulador OFDM com DFT.

2.6 Prefixo Cíclico (CP-*Cyclic Prefix*)

Em um canal com múltiplas trajetórias, devido ao atraso entre os símbolos que chegam ao receptor, a ortogonalidade é perdida, conforme se evidencia na Figura A10.10.

Um dos objetivos principais do OFDM é reduzir a interferência intersimbólica (ISI-*Intersimbolic Interference*), fenômeno presente em todas as comunicações sem fio, devido aos múltiplos trajetos. O receptor recebe várias réplicas do sinal transmitido, mas em diferentes intervalos de tempo, o que gera a ISI e com isso perde-se a ortogonalidade.

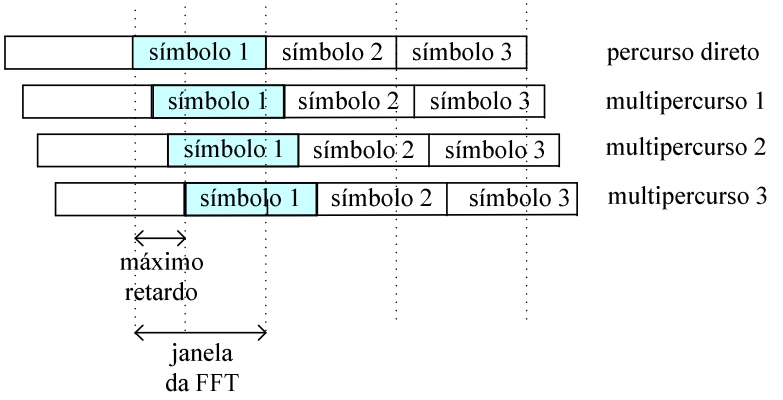


Figura A10.10 – Exemplo de recepção com multipercursos.

Para reduzir a interferência intersimbólica OFDM agrega-se um intervalo de guarda, conhecido como prefixo cíclico. Este intervalo de guarda é formado pela parte final do símbolo OFDM a transmitir, conforme se evidencia nas

Figuras A10.11 e A10.12 a seguir.

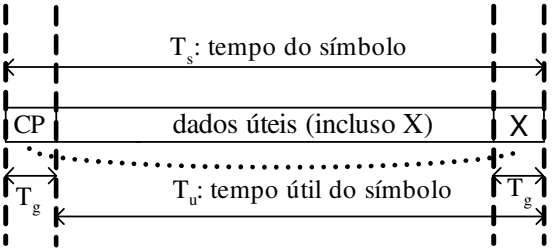


Figura A10.11 – Prefixo cíclico.

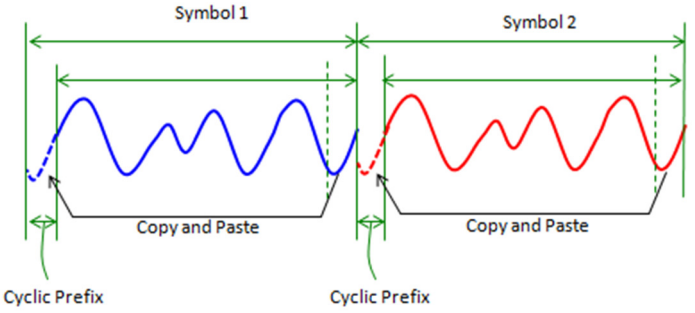


Figura A10.12 – Exemplo de inserção do prefixo cíclico, ref. [FIG1012]

Depois deste intervalo segue o símbolo OFDM original. Assim, o símbolo OFDM é formado por um prefixo cíclico (CP) e o símbolo original (denominado na Figura A10.11 como dados úteis).

Note que com este procedimento estabelece-se uma periodicidade cíclica do símbolo.

Observe-se inicialmente que a atenuação de cada subportadora é praticamente plana dado que os sinais OFDM são de banda muito estreita. Assim a equalização fica reduzida ao conhecimento da amplitude e fase de cada subportadora recebida. Para esta estimativa de canal utilizam-se portadoras piloto, em instantes pré-estabelecidos, com fase e amplitude conhecidas, que são detectadas no receptor e servem de referência.

Procurando se fazer o tempo de guarda (T_g) sempre maior do que o máximo atraso introduzido pelo canal garante-se que a sobreposição ocorrerá sempre no

tempo do CP e com isso não haverá sobreposição de símbolos consecutivos. Vide Figura A10.10, onde o receptor recebe o símbolo principal e três ecos deste, com atrasos e amplitudes diferentes. As interferências ocorrem apenas no intervalo de tempo T_g (interferência de um símbolo em outro) e estas serão ignoradas no receptor. Assim a decodificação é possível ajustando-se a amplitude e fase de acordo com as estimativas de canal obtidas por intermédio dos pilotos (de forma análoga aos receptores Rake).

Para esta única função o CP poderia ser simplesmente um tempo de guarda, mas existe uma outra razão para que seja a parte final do símbolo em curso pois, com este procedimento, convoluções lineares em tempo discreto convertem-se em convoluções circulares em tempo discreto facilitando a implementação do receptor; vide, por exemplo, ref. [LYON10].

3. O Sistema LTE (*Long-Term Evolution*)

O sistema LTE usa OFDM para o *downlink* (sentido direto, i.e., da ERB para o UE). O OFDM utiliza um número muito grande de subportadoras para uma transmissão multiportadora e pode ser visto como uma grade frequência-tempo como ilustrado na Figura A10.13.

No domínio da frequência o espaçamento entre subportadoras é de Δf=15 kHz. Adicionalmente, a duração de um símbolo OFDM é de $T_s = 1/\Delta f + CP$.

Este CP é utilizado para manter a ortogonalidade entre as subportadoras mesmo para um canal com dispersão temporal. Para que o CP seja efetivo seu comprimento deve ser ao menos igual à duração do canal de multipercurso. Este tempo não pode ser muito curto pois assim ele não combaterá os efeitos de multipercursos (*delay spread*) e nem muito longo pois reduziria a capacidade do canal, ref. [ZYRE07]. Para o LTE este tempo foi fixado em 4,69 µs, o que permite acomodar variações de percurso de até 1,4 km e determina T_s = 66,67 + 4,69 = 71,36 µs (existe ainda uma outra possibilidade no LTE que é a extensão deste CP para 16,7 µs com o que se suportaria uma variação de percurso de até 5 km).

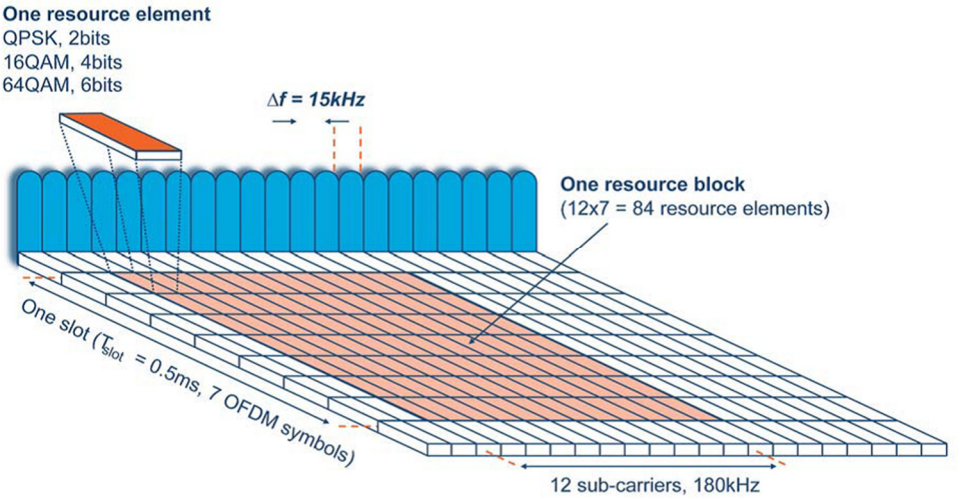


Figura A10.13 - Grade frequência-tempo, ref. [LONG07].

Um elemento de fonte (*resource element*) é formado de um sinal QPSK, 16QAM ou 64 QAM, neste último caso o elemento contém 6 bits. Os símbolos OFDM são agrupados em blocos de fonte (*resource blocks*). Um bloco tem um tamanho de 180 kHz no domínio da frequência e 0,5 ms no domínio do tempo. Cada transmissão de 1 ms (TTI-*Transmission Time Interval*) consiste assim de 2 slots. A cada usuário é alocado um certo número de blocos na grade frequência-tempo. Quanto mais blocos ele tiver e quanto maior a ordem de modulação utilizada maior será a taxa do usuário. Quantos e quais blocos um usuário dispõe em um determinado instante depende de mecanismos avançados de atribuição no domínio frequência-tempo.

O fator de reuso adotado no sistema LTE é flexível (SFR-*Soft Frequency Reuse*). Uma solução possível é adotar-se o fator 1:1 no centro da célula e 1:3 nas bordas, vide Figura A10.14, combatendo-se desta forma a interferência entre células.

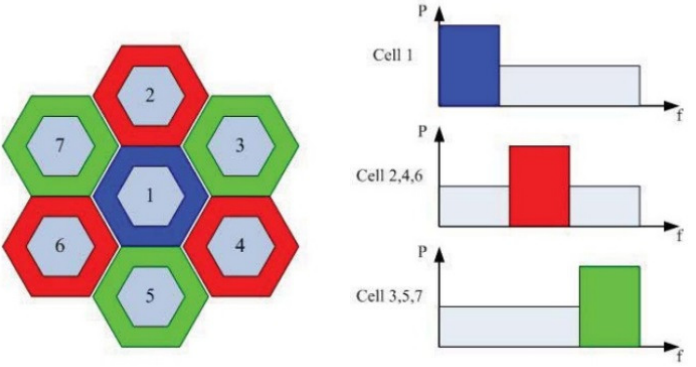


Figura A10.14 – SFR-*Soft Frequency Reuse,* ref. [FIG1014].

O OFDM é uma tecnologia de multiportadoras que subdivide a faixa disponível de frequências em um grande número de subportadoras ortogonais de faixa estreita. No OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) essas subportadoras podem ser compartilhadas entre múltiplos usuários, na frequência e no tempo, como ilustra a Figura A10.15.

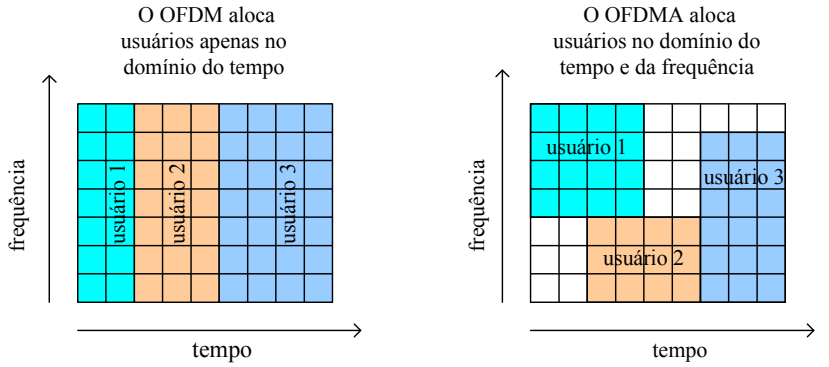


Figura A10.15 OFDM e OFDMA

No *uplink* (sentido reverso, i.e., do UE para a ERB) o sistema LTE utiliza uma versão pré-codificada do OFDM denominado de SC-FDMA (*Single Carrier Frequency Division Multiple Access*) para evitar-se um alto PAPR (*Peak to Average Power Ratio*), típico de sistemas OFDM e que exigiria o uso de amplificadores lineares pouco eficientes no UE, drenando assim as baterias

mais rapidamente. O SC-FDMA resolve este problema agrupando os blocos de uma maneira que reduz a necessidade da linearidade e, portanto, do consumo do amplificador de saída. Adicionalmente um baixo PAPR melhora a cobertura e o desempenho nas bordas da célula. A conversão OFDM para SC-FDMA pode ser realizada de forma simples com o uso de DFT (*Discrete Fourier Transform*). A Figura A10.16 ilustra estes dois modos de transmissão.

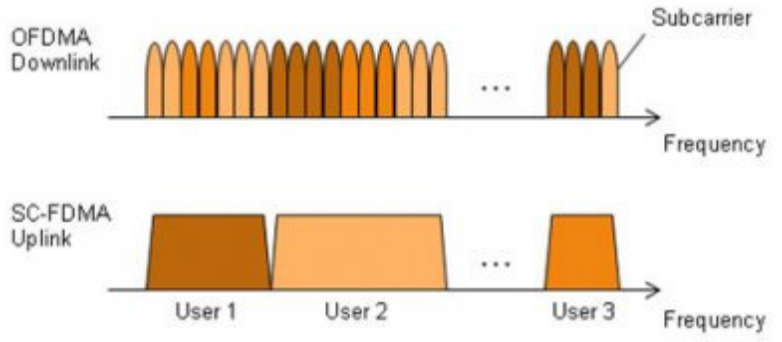


Figura A10.16 Transmissão no sentido direto (*downlink*) e reverso (*uplink*), ref. [MAGD14].

Sistemas LTE utilizam ainda a tecnologia de múltiplas antenas MIMO (*Multiple Input Multiple Output*). Esta técnica, conhecida desde os anos 1970, é parte inerente do sistema, limitada porém a pequenos números dadas as dimensões físicas do UE e a separação física exigida entre as antenas.

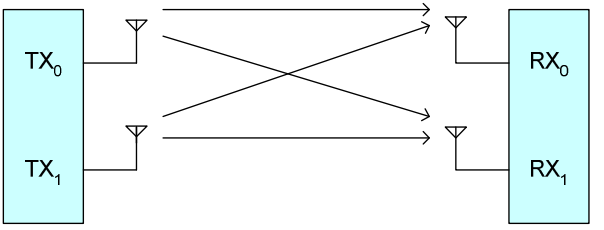


Figura A10.17 Sistemas MIMO

Existem diversas formas de implementação de sistemas MIMO no LTE. Pode-se usá-las implementando: uma simples antena, diversidade de transmissão, multiplexação espacial (de malha aberta ou fechada), pré-codificação, multiusuário e *beamforming*. A forma de uso pode melhorar tanto a qualidade do sinal recebido por diversidade na recepção (usando a favor sinais de multipercursos) ou até aumentar a taxa final do canal por diversidade na transmissão e recepção.

O modo de duplexação pode ser tanto na técnica TDD (*Time Division Duplex*) como FDD (*Frequency Division Duplex*), vide Figura A10.18.

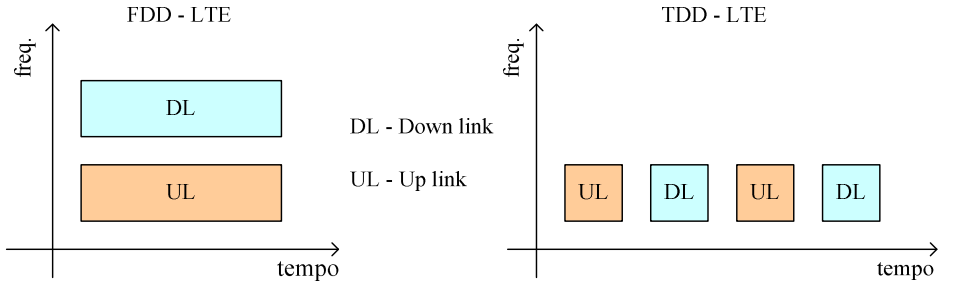


Figura A10.18 Implementações para obtenção do *full duplex*.

No FDD tem-se o *full duplex* estabelecido pelo uso simultâneo de diferentes frequências para cada sentido de transmissão (pareamento de frequências) e no TDD por divisão no tempo (com a utilização da mesma frequência).

Sistemas LTE são definidos por bandas de operação (atualmente um total de 44 estão fixadas) de 700 MHz até 3,8 GHz e as formas de duplexação (FDD ou TDD) estão definidas pelas faixas específicas, vide ref. [POOL14].

É importante ainda destacar que o sistema LTE, sendo uma rede toda IP, suporta apenas comutação por pacote. Trata-se de uma rede de alta velocidade para a transmissão/recepção de dados e, inicialmente, a transmissão de voz não era uma prioridade (lembrando que chamadas vocais em sistemas celulares de gerações anteriores são por comutação de circuitos). Para que a rede suportasse ligações telefônicas, as operadoras precisaram adaptar-se à rede. Existem duas possibilidades: uma delas é de, no momento de receber a ligação, reconfigurar o dispositivo móvel para uma rede 3G ou 2G. A outra possibilidade, surgida posteriormente, foi a criação do VoLTE (Voz sobre LTE) no qual o telefone funciona normalmente na rede 4G. Basicamente, trata-se de um VoIP (Voz

sobre IP) adaptado para uma tecnologia de acesso específica (o LTE). Detalhes adicionais na ref. [POOL15].

Apesar do LTE ter sido especificado para trabalhar com canais de largura 1,4; 3; 5; 10; 15 e 20 MHz, as velocidades mais altas só são alcançadas com canais de 20 MHz, quando é possível obter até 300 Mb/s de velocidade de pico no *downlink* e 75 Mb/s no *uplink* (categoria 5, vide adiante).

O número de blocos utilizados em cada faixa prevê bandas de guarda no sistema. Por exemplo, para uma banda de 1,4 MHz podem ser utilizados apenas 6 blocos e 6×180kHz=1,08MHz<1,4MHz; com uma banda de 20 MHz apenas 100 blocos são permitidos e 100×180kHz=18MHz<20MHz (o número de blocos permitidos é, na ordem crescente das bandas especificadas, dado por: 6, 15, 25, 50, 75 e 100, respectivamente).

Seja um exemplo simples de cálculo da máxima taxa teórica possível no *downlink*, com uma banda de 20 MHz, utilizando um sistema MIMO 4×4 e modulação 64QAM.

Como tem-se 14 símbolos OFDM por slot de 1 ms e um símbolo 64QAM transmite 6 bits por símbolo, 6×14=84 bits serão enviados a cada 1 ms. Tem-se assim uma taxa de 84 kbits/s por subportadora de 15 kHz. Cada bloco consiste de 12 subportadoras e assim chega-se a uma taxa de 84×12=1,008 Mbits/s por bloco. Como cada bloco tem largura de 180 kHz e em uma banda de 20 MHz pode-se ter até 100 destes blocos chega-se à taxa de 100,8 Mbits/s. Finalmente, com um sistema MIMO 4×4 esta taxa pode ainda ser elevada para 4×100,8=403,2 Mbits/s (na prática apenas 300 Mbits/s devido, entre outros fatores, aos *overheads*).

Já para o *uplink,* sem a utilização da técnica MIMO, a taxa final é um quarto da anterior, i.e., 75 Mbits/s.

Note que a relação sinal ruído (S/N) requerida para se obter esta capacidade, dada pelo teorema de Shannon, pode ser determinada por $C = B \log(1+S/N) \Rightarrow 300\times10^6 = 20\times10^6 \log(1+S/N) \Rightarrow (1+S/N) = 2^{15} = 32.768 \Rightarrow (S/N)_{dB} = 45$ dB, valor difícil de se obter na prática. Adicionalmente, neste exemplo um único usuário estaria usando todos os recursos do sistema daquela célula.

Assim, todas velocidades são limites teóricos que variam dependendo de uma série de fatores, como o número de antenas utilizadas, a distância UE-ERB, a velocidade do UE, a relação S/N entre outros. A tabela A10.1 apresenta as categorias de equipamentos LTE, em uma banda de 20 MHz.

Category		1	2	3	4	5
Peak rate Mbps	DL	10	50	100	150	300
	UL	5	25	50	50	75
Capability for physical functionalities						
RF bandwidth		20MHz				
Modulation	DL	QPSK, 16QAM, 64QAM				
	UL	QPSK, 16QAM				QPSK, 16QAM, 64QAM
Multi-antenna						
2 Rx diversity		Assumed in performance requirements.				
2x2 MIMO		Not supported	Mandatory			
4x4 MIMO		Not supported				Mandatory

Tabela A10.1 Categoria de equipamentos LTE, B=20 MHz, ref. [TAB101].

Atualmente está em pleno desenvolvimento/implantação o sistema LTE *Advanced* (*release* 12), ainda um sistema 4G, que deverá melhorar as funções do atual LTE (*release* 8) com o maior uso de sistemas MIMO (até 8×8 na ERB e 4×4 no UE), a agregação de portadoras possibilitando o uso de bandas maiores, entre outros avanços.

3.1 O Sistema 4G no Brasil

No Brasil a Anatel anunciou, em 04/2012, que as seis cidades hóspedes da Copa das Confederações, que iria ser realizada em 06/2013, seriam as primeiras a terem sistemas 4G no país, utilizando a faixa de 2,5 GHz. Os compromissos adicionais de abrangência na faixa de 2,5 GHz* deverão atender ao cronograma de implantação apresentado na Tabela A10.2.

Posteriormente, em 10/2014, a Anatel licitou uma outra faixa (700MHz) para uso da tecnologia 4G. A faixa de 700MHz é considerada melhor para as transmissões e é a mesma utilizada em outros países como os Estados Unidos, por exemplo. Por ser uma frequência mais baixa que a de 2,5GHz, terá um alcance maior de propagação, exigindo assim menos torres para se atingir a mesma cobertura e isso deverá reduzir os custos de implantação.

Três empresas (Claro, Vivo e Tim) adquiriram, cada uma, lotes nacionais para a prestação de serviços móveis na faixa de 700MHz. Cada lote correspondia a uma banda de 20MHz na faixa de 700MHz. A utilização da faixa de 700MHz

depende ainda da desocupação da faixa pelos radio transmissores que a utilizam (TV Analógica) e, conforme cronograma do Ministério das Comunicações, a expectativa é que o serviço comece a operar nesta faixa em 2017.

Prazo	Cobertura
04/2013	Todas sedes da Copa das Confederações 2013
12/2013	Todas sedes e subsedes da Copa do Mundo 2014
05/2014	Todas capitais e municípios com mais de 500 mil hab.
12/2015	Todos municípios com mais de 200 mil hab.
12/2016	Todos municípios com mais de 100 mil hab.
12/2017	Todos municípios entre 30 e 100 mil hab.

Tabela A10.2 Cronograma de implantação de sistemas 4G no Brasil, ref. [TAB102].

*Haverá ao menos uma prestadora em 2,5 GHz e, em todos os municípios, serão ofertados serviços em condições tecnológicas equivalentes ao 3G.

Em 12/2014 o Brasil tinha 280,7 milhões de celulares (para uma população estimada, pelo IBGE em 07/2014, de 203 milhões) e destes 6,76 milhões eram com acessos 4G (LTE). As diversas tecnologias em uso distribuem-se percentualmente no Brasil na proporção apresentada na Tabela A10.3.

Tecnologia (Geração)	Penetração em 31/12/2014 (%)
GSM (2G)	40,25
WCDMA (3G)	51,53
Terminais de dados (leitores de cartões, *tablets* etc)	5,81
LTE (4G)	2,41

Tabela A10.3 Terminais Móveis no Brasil por tecnologia, ref. [TAB103].

Esta penetração de 2,41 % apenas dos sistemas 4G, contra quase 70% na Coreia do Sul na mesma data, por exemplo, indica que há ainda muito a se expandir nesta área no Brasil.

4. O Sistema WiMAX

O WiMAX refere-se à implementação de uma família de redes sem fio MAN (*Metropolitan Area Network*) definida na norma IEEE 802.16, de forma similar ao Wi-Fi que trata de uma família de redes sem fio LAN (*Local Area Network)* definida na norma IEEE 802.11. O assunto não é tratado neste anexo; para um maior detalhamento sugere-se a leitura das referências [ANDR07] e [AHMA9].

5. Sistemas 5G

As Figuras A10.19 e A10.20 ilustram a duração e cronologia dos passos desde a concepção de um sistema celular e a Figura A10.21 um cronograma de implantação atualizado, evidenciando assim que o sistema 5G tem uma expectativa de início de operação para após o ano de 2020.

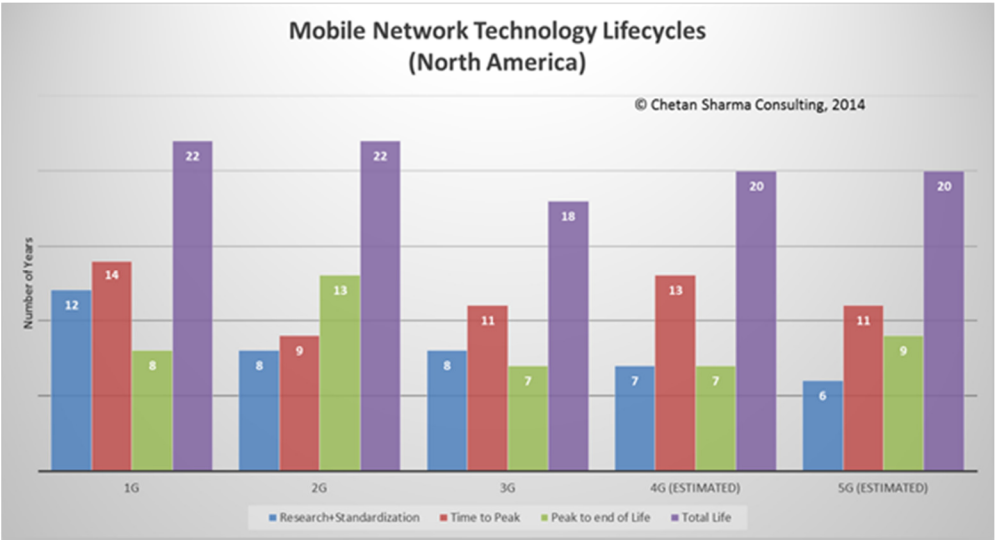


Figura A10.19 – Intervalo de tempo de vida de sistemas celulares, ref. [FIG1019].

Assim, discorrer hoje (meados de 2015) sobre sistemas 5G é uma tarefa quase que de pura especulação teórica. Estudos nesta área remontam ao início de 2008 envolvendo muitos centros de pesquisa, universidades e indústrias e,

oficialmente, nada pode ser caracterizado hoje como uma definição para sistemas 5G.

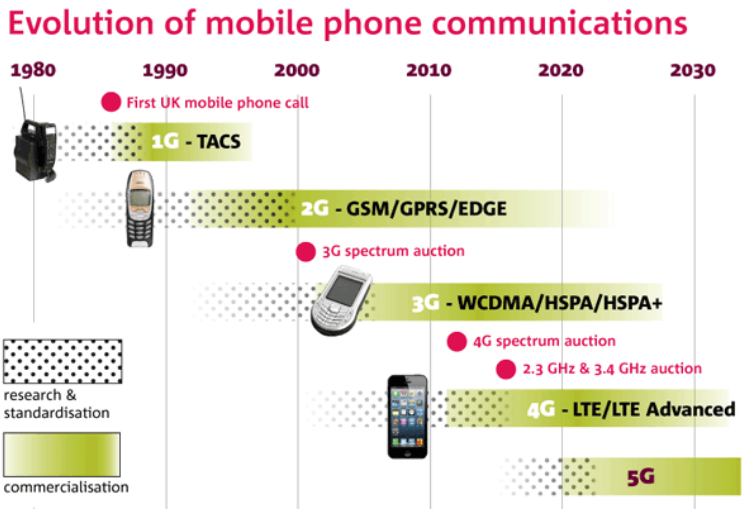


Figura A10.20 – Cronologia dos sistemas celulares, ref. [FIG1020].

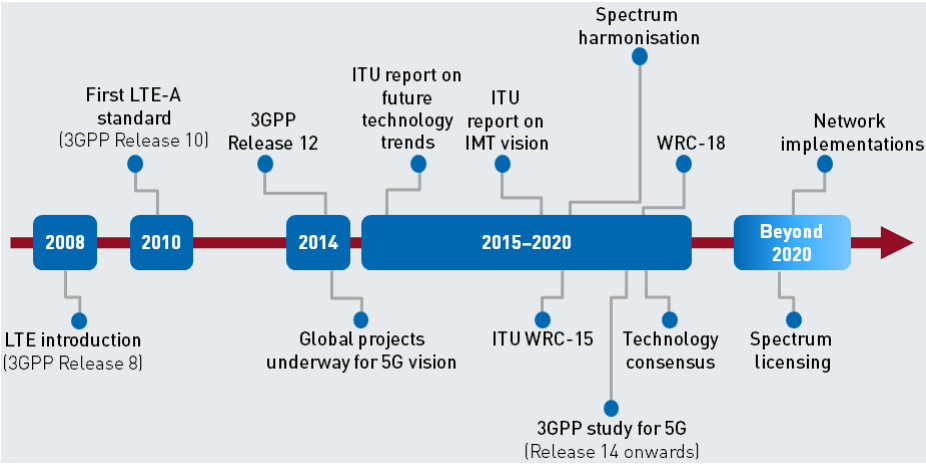


Figura A10.21 - Cronograma (p)revisto de implantação para sistemas 5G, ref. [FIG1021].

É preciso destacar que as discussões no entorno de sistemas 5G acabam quase sempre caindo em duas correntes de pensamento distintas: uma primeira que considera o 5G como uma consolidação dos sistemas anteriores 2G, 3G, 4G,

Wi-Fi com inovações que levam à evolução destes para um novo sistema que define um novo patamar de operações, e a segunda corrente que considera a mudança como um novo sistema, independente, constituído a partir de um marco tecnológico que excede os anteriores por um aumento de taxa e a diminuição do tempo de latência. Estes pontos de vista diferentes, discutidos conjuntamente, podem levar a contradições nas especificações. O tema é ainda hoje objeto de debates na tentativa de definir uma visão global que determinará a tecnologia, as redes e as necessidades de espectro para o sistema.

Entretanto, uma diferença fundamental em relação às gerações anteriores é que agora o foco deve ser achar a melhor técnica para otimizar a utilização do espectro em termos de bits/Hz por unidade de área, ao invés de otimizar a eficiência espectral em bits/Hz apenas. Isso decorre do fato de que melhorias na eficiência espectral são limitadas pelo ruído de fundo, significando que codificações e modulações mais eficientes se tornam mais difíceis e menos efetivas (limite de Shannon), entretanto novas tecnologias e topologias podem melhorar a utilização do espectro em termos de bits/Hz por unidade de área.

Alguns pontos de interesse, ainda que assim listados possam parecer simplistas, emergem como pontos comuns destes estudos:

1. Taxas de 1-10Gbps para as conexões em pontos finais da rede;
2. Latência menor ou igual à 1 ms;
3. Ganho de 1000× na razão banda por unidade de área;
4. Ganho 10-100× no número de dispositivos conectados;
5. Percepção de disponibilidade de 99,999%;
6. Percepção de cobertura de 100%;
7. Redução de 90% no consumo de energia da rede;
8. 10 anos, ou mais, para a vida útil de baterias nos móveis.

Como salientado anteriormente, estas metas são especificadas sob pontos de vista diferentes e assim não constituem uma lista coerente, pois é difícil, se não impossível, conceber uma nova tecnologia que possa atender, simultaneamente, a todos estes requisitos.

Destacam-se, no entanto, três grandes tecnologias a desenvolver. Seja um aumento desejado de 1.000x na capacidade. Essa meta poderia ser alcançada, por exemplo, como se evidencia na Figura A10.22.

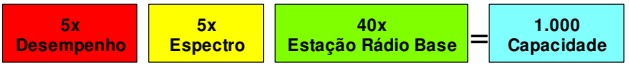


Figura A10.22 – Como obter um ganho 1.000× na capacidade.

Esse aumento passará por três pontos fundamentais destacados na figura:

- uma ultra-densificação (mais ERBs ou pontos de acesso);

- o uso frequências milimétricas (permitindo com isso o alargamento do espectro alocado) e

- uso massivo de MIMO (aumentando o desempenho).

Para atender algumas metas específicas novas técnicas deverão ser adotadas, assim como a alocação de bandas maiores do que as atualmente em uso, com a consequente elevação das frequências de operação. Especula-se inclusive no uso de frequências milimétricas para estes sistemas (até 90 GHz). A regulamentação do uso de frequências milimétricas ainda não foi estabelecida e será um dos objetivos das próximas reuniões do WRC (*World Radiocommunication Conference*), vide Figura A10.21. Na Figura A10.23 representa-se a disponibilidades destas faixas, muitas ainda à espera de regulamentação.

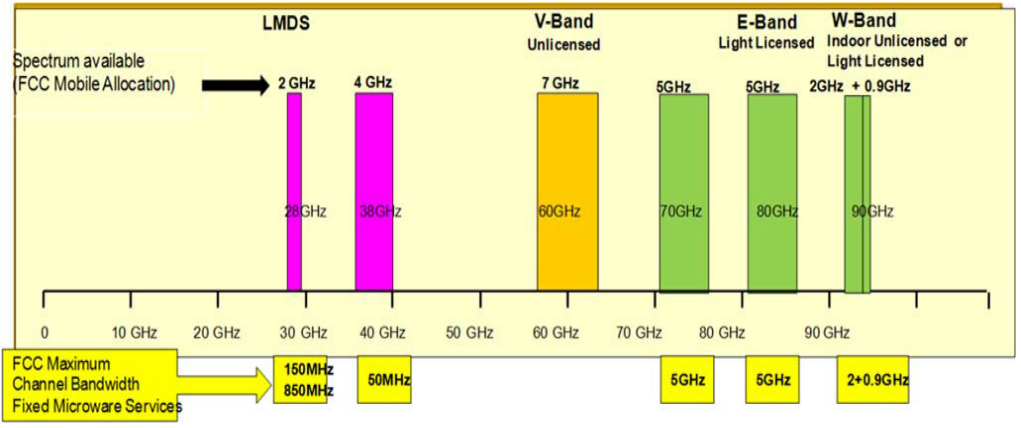


Figura A10.23 – Espectros potenciais, acima de 20 GHz, para uso em sistemas 5G, ref. [GHOST14]. (nota: LMDS: *Local Multipoint Distribution Service*).

Cada faixa tem suas particularidades próprias (atenuação atmosférica, penetração indoor etc.) e recomenda-se a ref. [GHOS14] para um maior detalhamento. Apenas a título de exemplo, a Figura A10.24 apresenta a atenuação atmosférica nesta faixa de frequências.

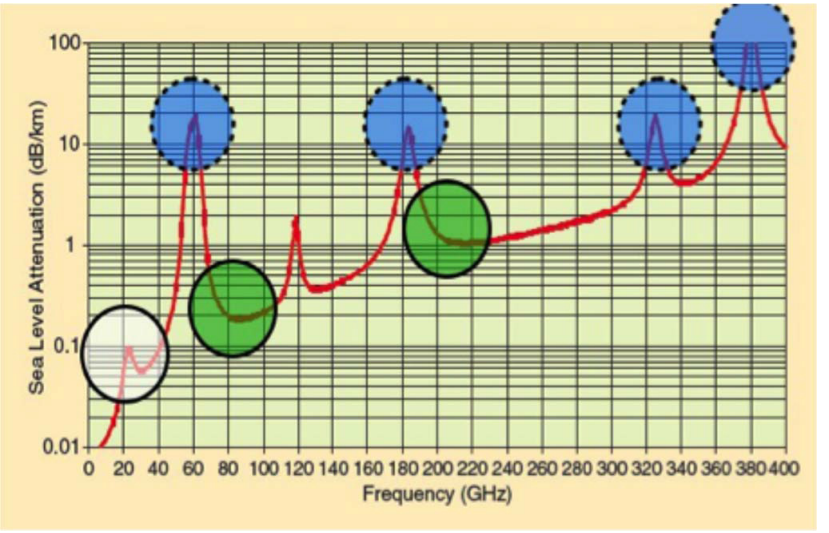


Figura A10.24 – Atenuação atmosférica, função da frequência, ref. [GHOST14].

Nota-se que a atenuação atmosférica em áreas urbanas é muito pequena. Especificamente, para células com até 200 metros de raio, a atenuação atmosférica é de 0,06 dB/km e 0,08 dB/km para a faixa de 28 e 38 GHz, respectivamente; e cerca de 0,3 dB/km entre 70 e 90 GHz. Estas frequências mais elevadas e, portanto, com um comprimento de onda menor (em 30 GHz, por exemplo, o comprimento de onda é de λ= 1 cm), permitirão o uso massivo da tecnologia MIMO com o consequente aumento da capacidade.

Pesquisas recentes incluem testes nas bandas 15GHz, 28GHz, 60GHz e 70GHz, por exemplo, substancialmente mais altas do que as usadas tradicionalmente nesta área. Entretanto é importante notar que estas frequências mais altas não são indicadas para grandes coberturas, assim as bandas de frequências mais baixas deverão continuar sendo usadas de forma cooperativa e harmoniosa.

Para aumentar o número de usuários conectados será necessário ainda adotar o uso de pico e/ou fento-células, o que por sua vez tornará o *handoff* (inclusive

na vertical) e roteamento mais frequentes e complexos. Na Figura A10.25 apresentam-se algumas opções recentemente propostas, vide ref. [GHOST14], para o desenvolvimento de clusters cooperativos numa grade de ruas (os retângulos representando blocos de construções e os pontos de acesso representados em vermelho). Compare esta sugestão com o problema 4, proposto ao final do capítulo 17 do livro texto.

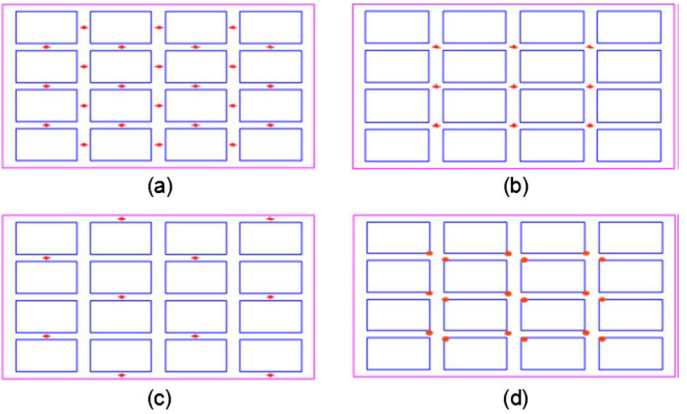


Figura A10.25 – Opções para o desenvolvimento de clusters cooperativos, ref. [GHOST14].

Entre outros aspectos igualmente importantes a considerar, deve-se ainda mencionar:

- economia de potência, onde agora a eficiência energética (medida em joule/bit) passa a ser um parâmetro relevante, dado que a indústria de telecomunicações é uma grande consumidora de energia e, portanto, também poluidora; vide edição especial do IEEE sobre Eficiência Energética;

- interoperabilidade com sistemas existentes, não só por uma questão de compatibilidade, mas também para um uso mais eficiente da infraestrutura já instalada;

- adaptação aos novos elementos que estarão presentes na rede como D2D (*Device to Device*), M2M (*Machine to Machine*) e IoT (*Internet of Things*) com grandes demandas de tráfego e especificações muito particulares, ainda não muito bem caracterizadas;

- SDR (*Software Defined Radio*) e Cloud-RAN (*Cloud Radio Access Network*) para permitir uma maior versatilidade tanto de terminais quanto de pontos de acesso e como uma nova opção de arquitetura para redes celulares.

Para uma descrição mais atualizada das várias alternativas tecnológicas em consideração recomenda-se a leitura das referências [GSMA14], [FREN11], [ANDE14], [GHOS14] e a edição especial do IEEE sobre 5G.

6. Problemas Propostos

1) Considere-se o exemplo simples de cálculo da máxima taxa teórica possível no *downlink*, com uma banda de 20 MHz, utilizando um sistema MIMO 4×4 e modulação 64QAM, apresentado na página 20. Seja então ainda uma banda de 20 MHz, mas, alternativamente, com um número de blocos não limitado, mas dado pelo máximo possível de ser alocado na banda. Adicionalmente, suponha que se possa utilizar uma modulação 256-QAM e um sistema MIMO 8×8. Nestas circunstâncias determine a máxima taxa teórica possível no *downlink*.

Solução

Como se tem 14 símbolos OFDM por slot de 1 ms e um símbolo 256-QAM transmite 8 bits por símbolo, 8×14=112 bits serão enviados a cada 1 ms. Tem-se assim uma taxa de 112 kbits/s por subportadora de 15 kHz.

Cada bloco consiste de 12 subportadoras e assim chega-se a uma taxa de 112×12=1,344 Mbits/s por bloco.

Como cada bloco tem largura de 180 kHz e em uma banda de 20 MHz pode-se ter até $\lfloor 20\times10^6/180\times10^3) \rfloor = 111$ destes blocos chega-se à taxa de 149,184 Mbits/s.

Finalmente, com um sistema MIMO 8×8 esta taxa pode ainda ser elevada para 8×149,184=1.193,472 Mbits/s.

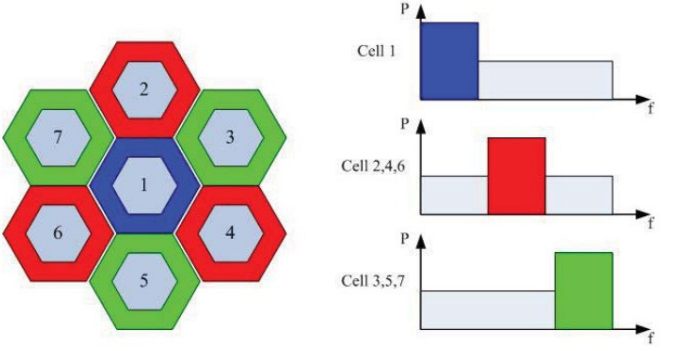
Observação:

(Resultado anterior)×(aumento de blocos)×(ganho devido à constelação)×(ganho devido ao MIMO)=

403,2×(111/100)×(8/6)×2=1.193,472 Mbits/s.

2) Em sistemas de telefonia celular 4G (LTE-*Long-Term Evolution*) foi apresentado um novo esquema possível de reuso de frequências denominado SFR *(Soft Frequency Reuse)*. Considere então a partição das frequências disponíveis como abaixo indicada, com fator de reuso 1:3 nas bordas das células e 1:1 nos seus centros, e admita ainda que o lado do hexágono menor é de R e do maior de R'. Nestas circunstâncias, considerando-se uma perda de

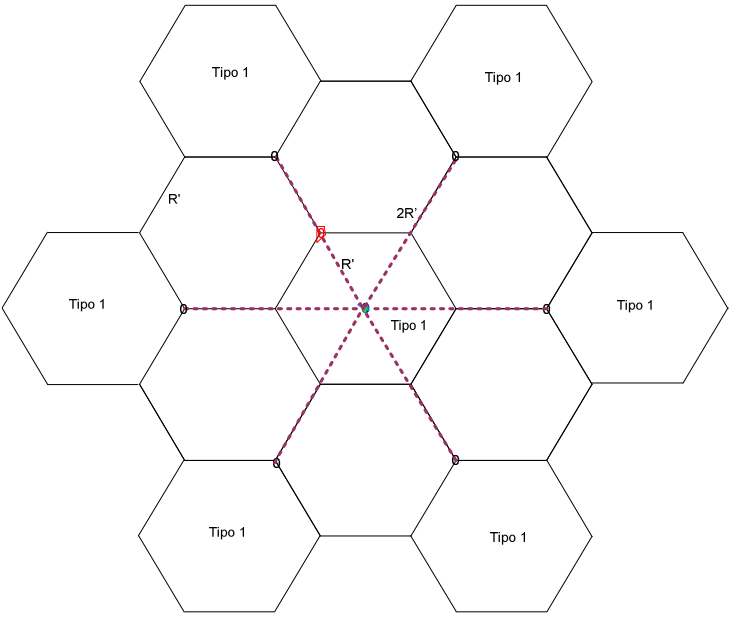
propagação com fator $\gamma = 4$, como em regiões urbanas, e o uso de antenas setorizadas de 120^0 (considere-as ideais), determine a relação entre R' e R de maneira que a interferência co-canal de pior caso (na ERB) seja igual tanto considerando os móveis do centro da célula quanto o das bordas. Determine esta interferência. Comente seus resultados.



Solução

Considera-se primeiramente os móveis da borda quando o resultado independerá do raio menor. Para as frequências adotadas nas bordas das células, a distância entre usuários interferentes e a ERB interferida (vide figura adiante) é, no pior caso (isto é, interferente estar mais próximo) de 2R' e o usuário interferido na ERB dista, no pior caso (isto é, está mais longe da sua ERB), de R' da sua própria ERB. Como todos estão situados à mesma distância da respectiva ERB, e, portanto, com a mesma potência de transmissão, pode-se escrever, considerando-se uma setorização ideal:

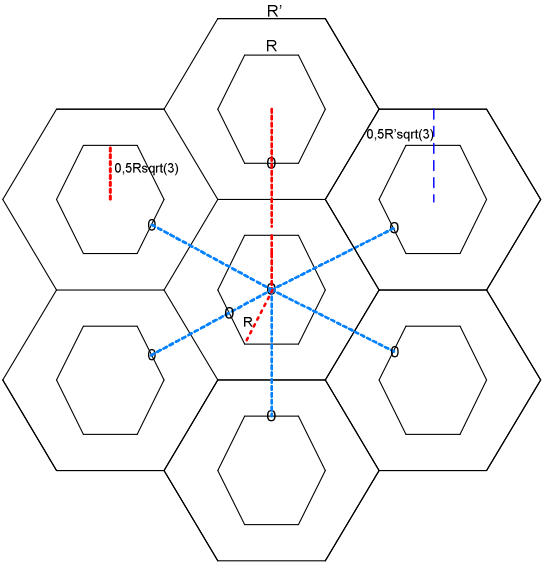
$$\frac{C}{I} = \frac{\left(\frac{1}{R'}\right)^4}{2\times\left(\frac{1}{2R'}\right)^4} = 8 \Rightarrow \left(\frac{C}{I}\right)_{dB} = 9{,}03\,dB$$



Para as frequências alocadas em centros de células, a distância entre os móveis interferentes e a ERB interferida é, no pior caso (isto é, interferente estar mais próximo) dada por (vide figura adiante) $R'\sqrt{3}-\frac{R\sqrt{3}}{2}$. Já o usuário interferido na ERB dista, também no pior caso (isto é, está mais longe da sua ERB) de R. No entanto, podemos alocá-lo na posição indicada a $\frac{R\sqrt{3}}{2}$ da ERB dado que existe um controle de potência que faz com que seu sinal chegue à sua ERB sempre com a mesma amplitude, independentemente da sua posição na célula. Assim, todos interferentes, assim como o móvel de interesse, estarão situados à esta mesma distância das suas respectivas ERBs e, portanto, com a mesma potência de transmissão (fator que se cancela na razão C/I). Assim pode-se escrever considerando-se uma setorização ideal:

$$\frac{C}{I}=\frac{\left(\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^{-4}}{2\times\left(R'\sqrt{3}-\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^{-4}}=\frac{1}{2}\times\left(\frac{2R'}{R}-1\right)^{4}$$ e impondo-se a mesma $\frac{C}{I}$ anterior tem-se

$$\frac{1}{2}\times\left(\frac{2R'}{R}-1\right)^4 = 8{,}0 \Rightarrow \; 2R' = 3R$$



Comentário: Note que o valor obtido para $\frac{C}{I}$ é baixo, mas só acontece no pior caso. Aceitando-se esta solução deve-se fazer uma distribuição do número de canais disponíveis de forma proporcional à área de atuação (no caso deste problema as áreas estão na razão (9-4):4, isto é 5:4).

3) Ao lado da própria questão assinale: F se a sentença for falsa, V se verdadeira ou NS se você não souber.

1. (F) (V) (NS) Sistemas 4G (LTE-*Long-Term Evolution*) utilizam modulações de QPSK até 64QAM, dependendo da taxa de transferência necessária, assim como da qualidade do canal de transmissão, e modulação OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*).

2. (F) (V) (NS) O princípio SFR (*Soft Frequency Reuse*), introduzido nos sistemas 4G (LTE), pode ser adaptado para quaisquer valores do fator de reuso nas bordas das células.

3. (F) (V) (NS) O prefixo cíclico, utilizado na transmissão OFDMA, elimina completamente a ISI (interferência intersimbólica) em canais multipercursos.

4. (F) (V) (NS) Sistemas MIMO (*Multiple Input - Multiple Output*) sempre aumentam a capacidade dos sistemas, em termos da taxa de transmissão, que as utilizam.

5. (F) (V) (NS) A previsão do uso de frequências de transmissão mais elevadas em sistemas 5G facilitará o uso massivo de sistemas MIMO.

6. (F) (V) (NS) Latências menores que 1 ms, como propostas em algumas especificações iniciais para sistemas 5G, são importantes para algumas aplicações específicas, incluindo as de voz.

Solução

1) V; 2) F; 3) F; 4) F; 5) V; 6) F

Referências Bibliográficas

(Todos sítios indicados foram acessados em 02/10/2015)

[AHMA10] Mobile WiMAX: A Systems Approach to Understanding IEEE 802.16m Radio Access Technology, 1st Edition, Elsevier-Academic Press, Sassan Ahmadi, 2010.

[ANDE14] Jeffrey G. Andrews, Stefano Buzzi, Wan Choi, Stephen V. Hanly, Angel Lozano, Anthony C. K. Soong, and Jianzhong Charlie Zhang; What Will 5G Be?; IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 32, n° 6, June 2014, pp. 1065-82 (ver adiante).

[ANDR07] Fundamentals of WiMAX : Understanding Broadband Wireless Networking, Jeffrey G. Andrews, Arunabha Ghosh e Rias Muhamed, Prentice Hall, 2007.

[FREN11] Wireless Companies Follow The Roadmap Past 4G And On to 5G, Lou Frenzel, 2011, Electronic Design; acessível em: http://electronicdesign.com/4g/wireless-companies-follow-roadmap-past-4g-and-5g

[GHOS14] Amitava Ghosh, Timothy A. Thomas, Mark C. Cudak, Rapeepat Ratasuk, Prakash Moorut, Frederick W. Vook, Theodore S. Rappaport, George R. MacCartney, Jr., Shu Sun, and Shuai Nie; Millimeter-Wave Enhanced Local Area Systems: A High-Data-Rate Approach for Future Wireless Networks, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 32, n° 6, June 2014, pp. 1152-63 (ver adiante).

[GSMA14] Understanding 5G: Perspectives on future technological advancements in mobile, GSMA Intelligence, 2014, acessível em: https://gsmaintelligence.com/analysis/2014/12/understanding-5g/451/

[JALO10] Wireless Mobile Evolution to 4G Network, Mohammed Jaloun, Zouhair Guennoun, Wireless Sensor Network, Vol. 2, No. 4, 2010, pp. 309-317; acessível em: http://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?PaperID=1596

[LONG07] Long Term Evolution (LTE): An Introduction, Ericsson, White paper, 2007, acessível em: http://www.mforum.ru/arc/090321_lte_overview_MForum.pdf

[LYON10] Understanding Digital Signal Processing, Lyons, R. G., 3rd ed., Prentice Hall, 2010

[MAGD14] LTE Overview; 3GPP - A Global Initiative, Magdalena Nohrborg; acessível em: http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte

[MORA13] LTE and the Evolution to 4G Wireless: Design and Measurement Challenges, 2nd Edition, Agilent Technologies, Moray Rumney (Editor), Publisher: Wiley, 2013.

[POOL14] 3GPP, LTE-Long Term Evolution Tutorial & Basics; Ian Poole, 2014, acessível em: http://www.radio-electronics.com/info/cellulartelecomms/lte-long-term-evolution/3g-lte-basics.php

[POOL15] Voice over LTE–VoLTE–Tutorial; Ian Poole, 2015, acessível em: http://www.radio-electronics.com/info/cellulartelecomms/lte-long-term-evolution/voice-over-lte-volte.php

[ZYRE07] Overview of the 3GPP Long Term Evolution Physical Layer, Jim Zyren, Freescale Semiconductors, 2007, acessível em: https://www.freescale.com/files/wireless_comm/doc/white_paper/3GPPEVOLUTIONWP.pdf

Sítios de origem para algumas figuras e tabelas

[FIG1003] e [FIG1006]
https://wirelesscafe.wordpress.com/author/frusebaba/

[FIG1004]
http://www.revolutionwifi.net/revolutionwifi/2015/3/how-ofdm-subcarriers-work

[FIG1012]
http://www.sharetechnote.com/html/Communication_OFDM.html

[FIG1014]
http://www.raymaps.com/index.php/soft-frequency-reuse/

[FIG1019]
http://www.chetansharma.com/blog/2015/02/18/5g-the-history-of-the-future/

[FIG1020]
http://hexus.net/mobile/news/service-providers/79605-ofcom-lays-foundations-5g-networking-uk/

[FIG1021]
http://www.analysysmason.com/About-Us/News/Newsletter/5G-spectrum-Oct2014/

[TAB101]
http://www.anandtech.com/show/4289/verizon-4g-lte-two-datacards-wifi-hotspot-massively-reviewed/3

[TAB102]
http://www.mc.gov.br/internet-telefonia-e-tv-paga/4g

[TAB103]
http://www.anatel.gov.br/dados/

Edição especial dedicada à 5G

IEEE Journal on Selected Areas in Communications,Vol. 32, n° 6, June 2014.

Edição especial dedicada à Eficiência Energética

IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 29, n° 8, Sep. 2011.

Observação sobre esta versão

Nesta versão foi acrescentado o item 6. Problemas Propostos.