

2

Tecnologia LTE-Advanced.

2.1

Introdução.

A padronização do LTE (*Long Term Evolution*) na 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) já atingiu um estado maduro, onde as mudanças na especificação são limitadas a correções e resolução de problemas. Os sistemas de comunicações móveis LTE estão sendo implantados desde 2010 como uma evolução natural do GSM (*Global System for Mobile Communications*) e UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*). Em setembro de 2009 a 3GPP enviou um documento oficial para a UIT propondo que o *LTE Release 10* e superiores (*LTE-Advanced*) fossem avaliados como candidatos para *IMT-Advanced* [43]. Além de atender aos requisitos técnicos, uma das maiores razões para o alinhamento LTE com o *IMT-Advanced* é que os sistemas IMT serão candidatos para novas bandas no futuro. Isso faz com que as redes móveis LTE implantadas hoje tenham um caminho evolutivo comercialmente por muitos anos. Com base nos requisitos da UIT para o *IMT-Advanced*, a 3GPP criou um relatório técnico resumindo requisitos para o *LTE-Advanced*. As principais características do *IMT-Advanced* são:

- Um alto nível de funcionamento no mundo, mantendo a flexibilidade para suportar uma ampla gama de serviços e aplicações de uma forma rentável;
- Suporte para serviços IMT e de rede fixa;
- Capacidade de interface com outros sistemas de acesso de rádio;
- Alta qualidade de serviços móveis;
- Equipamentos funcionais para uso mundial;
- Aplicações, serviços e equipamentos de fácil uso;
- Recursos de *roaming* global;

- Altas capacidades binárias para suportar serviços e aplicações avançadas (os objetivos são 100 Mbps para alta mobilidade e 1 Gbps para baixa mobilidade).

Quatro são os pilares sobre os quais repousa o *LTE-Advanced* para superar seu antecessor e ficar na liderança das tecnologias 4G. Para conseguir uma taxa de transmissão de 1 Gbps, implementa a “adição de portadora”, o que aumenta a largura de banda até os 100 MHz; para melhorar a eficiência espectral são introduzidas otimizações das técnicas MIMO; para atenuar o efeito das interferências inter-células que o LTE sofre, devido ao reuso de frequência, e aumentar o desempenho, é usada a técnica de transmissão-recepção coordenada multiponto e finalmente, a possibilidade de implantar os nós de comunicação no interior das células permite estender a cobertura e aumentar o rendimento em determinadas áreas.

2.1.1

Pilares do LTE-Advanced.

Adição de Portadora.

Para alcançar 1 Gbps, o *LTE-Advanced* permite uma largura de banda de até 100 MHz em comparação com os 20 MHz do LTE [5]. Para isto divide o espectro em cinco blocos de 20 MHz e pode atribuir aos usuários, dinamicamente, o bloco que melhor atende às suas necessidades e às da rede permitindo, assim, as alocações contíguas e não contíguas, como mostrado na Figura 2.1:

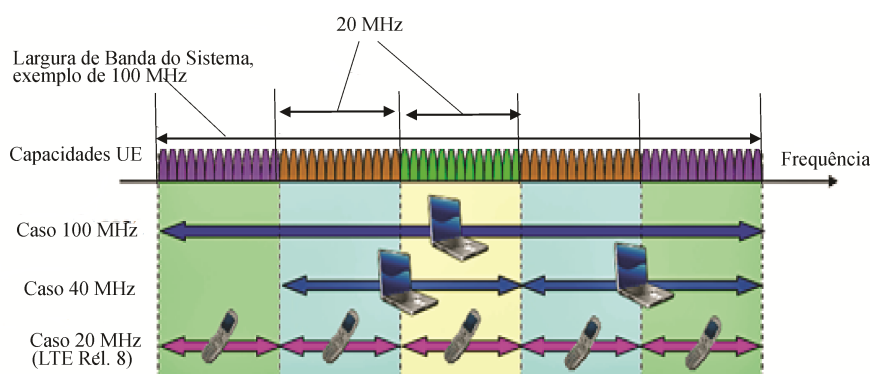


Figura 2.1: Alocação Dinâmica do Espectro.

Cada um dos blocos básicos, chamados componente da portadora (CC), é adicionado como mostra na figura 2.2. Os parâmetros de rádio que estão incluídos em cada bloco são baseados no LTE e assim, esses usuários podem acessá-los. Desta maneira, um usuário com um equipamento LTE pode se

juntar à rede *LTE-Advanced* sem alterar o dispositivo nem fazer modificações no mesmo.

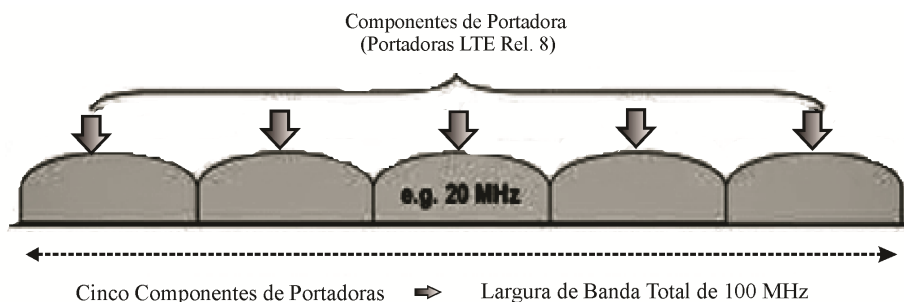


Figura 2.2: Adição de Portadora.

Multiplexado espacial avançado.

LTE-Advanced inclui melhorias sobre os esquemas MIMO utilizados pelo LTE, tanto no canal de subida como no canal de descida. De fato, permite a utilização de um maior número de antenas (8 na estação base e 4 no terminal móvel). No canal de descida se tem um interesse especial nos sistemas multiusuários para fornecer, por exemplo, melhorias na supressão de interferência entre os usuários. No canal de subida, o estudo da transmissão de um único usuário é considerado como um dos principais pontos a melhorar no que diz respeito ao LTE. As especificações e requisitos do sistema para todas as melhorias MIMO ainda estão em discussão na 3GPP.

Coordenação multiponto de transmissão e recepção.

O objetivo da coordenação multiponto, ou CoMP, é aumentar o desempenho do sistema, com um aumento mínimo na complexidade. Enquanto um terminal móvel está sempre ligado a uma ERB, a qual é responsável pelo envio de informação de sincronização e controle, as ERB vizinhas podem se aliar para enviar ou receber, a partir ou até o terminal. O funcionamento interno desta técnica baseia-se na tecnologia MIMO, aproveitando o efeito multi-caminhos, mas neste caso as antenas são distribuídas em zonas remotas. A figura 2.3 mostra um exemplo de CoMP no canal de descida com dois usuários, UE1 e UE2. A eNB2 e a eNB3 estão cooperando com a ERB principal eNB1 na transmissão multiponto.

Existem dois pontos de vista quando se trata de programar o CoMP no canal de descida:

- Coordenação de sincronização e/ou “*beamforming*”: A transmissão é realizada pela ERB principal, no entanto, a sincronização, incluindo o

beamforming, é coordenada entre as ERBs para controlar e/ou reduzir a interferência entre as transmissões.

- Processamento e transmissão conjunta: Várias ERBs transmitem simultaneamente para um terminal. Este esquema oferece um melhor desempenho, mas isso depende de uma boa comunicação entre ERBs a fim de simular uma única transmissão.

O CoMP no canal de subida envolve o recebimento a partir de vários pontos separados geograficamente. As decisões de sincronização são tomadas de forma coordenada para controlar a interferência.

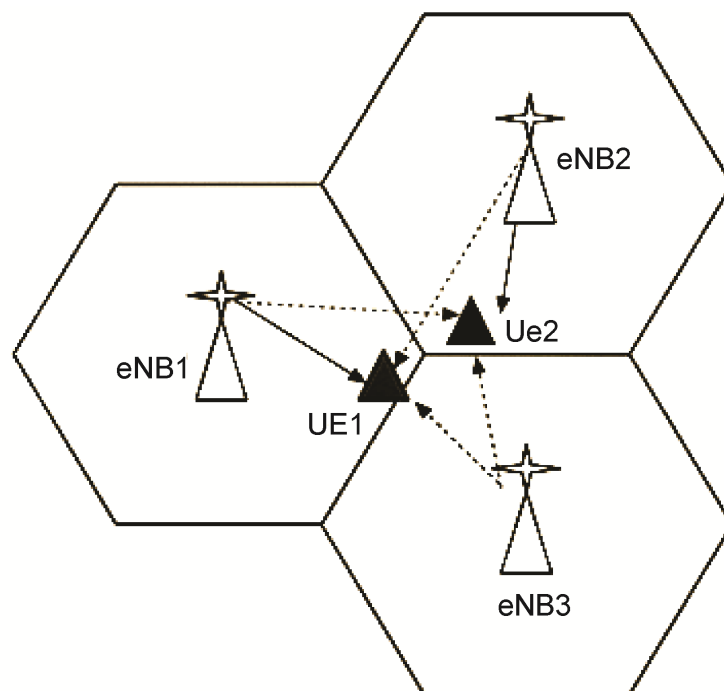


Figura 2.3: Esquema CoMP no canal de descida.

Redes heterogêneas.

Devido aos obstáculos ambientais e ao uso de altas frequências, o que implica maior atenuação, as ERBs devem estar perto do usuário para poderem alcançar maiores taxas de transmissão. A idéia das redes heterogêneas consiste em distribuir nós de comunicação, mais simples e mais baratos, dentro das células. Esses nós estão se comportando como pontes entre terminais móveis e as ERBs. Definem-se vários tipos de nós: pico ERB, femto ERB, nós relé e DAS (*Distributed Antenas Systems*). No entanto, o *LTE-Advanced* é centrado nos nós de relé, que são dispositivos semelhantes à ERB, mas muito mais simples [5]:

- Tipo 1: Permite ampliar a cobertura da célula a qual ele está ligado. Ele comporta-se como uma ERB e tem o seu próprio identificador de célula, de modo que não é transparente para o usuário.
- Tipo 2: Permite aumentar a qualidade e a capacidade de uma área, graças ao seu posicionamento e a utilização do efeito de múltiplos caminhos, no entanto o dispositivo é transparente para o usuário.

A utilização deste tipo de nó, conforme mostrado na figura 2.4, pode estender a cobertura e/ou aumentar o desempenho em certas áreas. Esta técnica utiliza estratégias colaborativas (como CoMP) que permite a cooperação de todos os nós e ERBs.

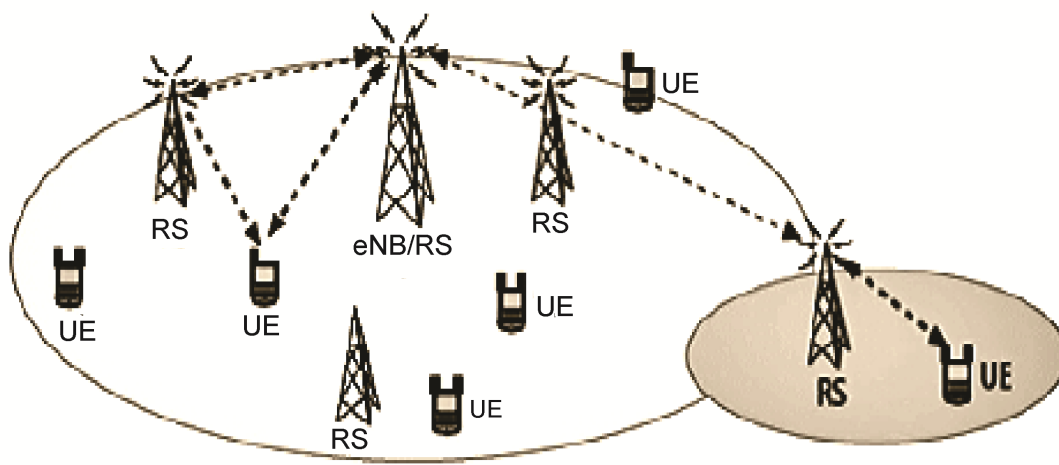


Figura 2.4: Esquema de célula com nós relé.

2.2

Arquitetura LTE-Advanced.

A arquitetura *LTE-Advanced* é igual que a dos sistemas de comunicação LTE, detalhada na figura 2.5:

- O rádio acesso é através da E-UTRAN.
- Os aspectos que não são de rádio estão sob a SAE (*System Architecture Evolution*).

Todo o sistema composto por LTE e SAE é chamado de EPS (*Evolved Packet System*). No nível mais elevado, a rede é constituída por:

- *Core Network* (CN), conhecida como EPC (*Evolved Packet Core*) na SAE.

- Rede de Acesso (E-UTRAN).

Uma portadora é um fluxo de pacotes IP com uma QoS definida entre o *gateway* e o terminal de usuário. O *Core Network* é responsável por todo o controle do terminal de usuário e do estabelecimento das portadoras.

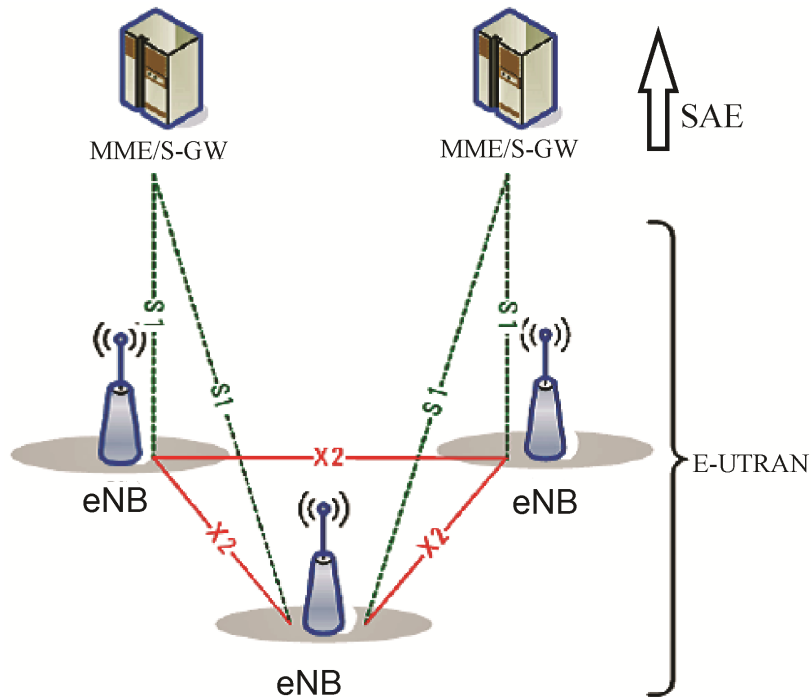


Figura 2.5: Arquitetura Básica LTE.

2.2.1

Enhanced Base Stations (eNodeB).

No LTE, uma nova arquitetura, totalmente diferente do que vinha sendo utilizado nas tecnologias anteriores, se passa a realizar as tarefas de processamento na estação rádio base, conhecida como *eNodeB*, que antes eram realizadas na RNC (*Radio Network Controller*). No LTE a rede é menos complexa do que no UMTS, porque as funções da RNC (*Radio Network Controller*) foram transferidas para o *eNodeB* e parte para o *Core Network Gateway*. Nesse sistema não teremos a central controlando os elementos na rede de acesso. A *eNodeB* irá realizar o controle de tráfego na interface aérea assegurando o QoS (*Quality of Service*) para os serviços oferecidos. O *eNodeB* também será responsável pelas decisões de *handover* dos móveis, através da comunicação entre os elementos, fazendo uso da interface X2. No LTE temos somente o *hard handover*, ou seja, apenas uma única célula irá se comunicar com o móvel em um mesmo momento. Para poder fazer o *handover*, o *eNodeB* toma a decisão de quando fazer a mudança de nó, baseado na informação que

o terminal manda constantemente. Os *eNodeB*, utilizando a interface X2, se comunicam e fazem a transferência dos pacotes do usuários pendentes. Este esquema permite reduzir o número de pacotes perdidos durante o *handover*. No caso em que não exista uma comunicação entre os *eNodeB* com interface X2, os *eNodeB* podem se comunicar por meio da interface S1 com a MME.

2.2.2

Core Network e Gateway.

O *Gateway* entre a rede de acesso e o core é dividido em duas entidades: *Serving Gateway* (*Serving-GW*) e *Mobility Management Entity* (MME). Juntos eles são responsáveis por tarefas semelhantes às controladas pelo SGSN (*Serving GPRS Support Node*) do UMTS. Na prática, estas duas entidades lógicas podem ser implementadas no mesmo *hardware* físico ou separadas em níveis diferentes. Quando separadas, a interface S11 será a responsável pela comunicação entre estas entidades.

- MME: É responsável pela mobilidade do usuário e pela sinalização, incluindo autenticação, estabelecimento de conexões, suporte ao *handover* entre diferentes *eNodeB* e entre diferentes tecnologias. É responsável também, pelo móvel em *idle mode* (quando ainda não temos o estabelecimento de conexões com alguma portadora) e pela seleção do PDN-GW quando o móvel requer estabelecimento com endereços IP da rede.
- S-GW (*Serving Gateway*): É responsável pelo encaminhamento de pacotes IP entre o móvel e a Internet.

Do ponto de vista de capacidade, a MME depende da carga de sinalização da rede (S1-C-*Control Plane*) e a capacidade de uma *Serving Gateway* (S1-U-*User Plane*) depende da carga de tráfego dos usuários. A separação destas entidades é interessante, agregando facilidades para o dimensionamento. No LTE o roteador é chamado *Packet Data Network* (*PDN-Gateway*, PDNGW), sendo responsável em desempenhar as mesmas tarefas que o GGSN (*Gateway GPRS Support Node*) do UMTS. A quantidade de PDNs depende do número de usuários, da capacidade de *hardware* e da quantidade de dados trafegados pelos usuários. Assim como o HLR (*Home Location Register*) para o UMTS, no LTE existe o HSS (*Home Subscriber Server*). Essencialmente, o HSS é considerado um *Enhanced HLR*. O HSS é a combinação dos dados dos usuários sendo utilizado, simultaneamente, pelo GSM, UMTS e LTE. A comunicação entre o HSS e a MME é realizada pela interface S6, como descrito na figura 2.6. Quando um usuário se move para fora de uma área coberta pelo LTE, o móvel reporta para a *eNodeB* que uma célula UMTS ou GSM foi encontrada. Essa

informação é passada para o MME, que tem a responsabilidade de conectar, trocar informações com o SGSN responsável (UMTS, GSM) solicitando o procedimento de *handover*. Quando a rede UMTS ou GSM estiver preparada para receber o móvel, o MME envia uma mensagem de *handover* para a *eNodeB*, responsável por comunicar o móvel. Após a execução do *handover* o túnel de dados entre o *Serving Gateway* e a *eNodeB* é roteado para o novo SGSN. O MME é liberado do controle do usuário, que é repassado para o SGSN. O *Serving Gateway*, no entanto, continua com o caminho do usuário e ativa o GGSN do ponto de vista do SGSN. Do ponto de vista do SGSN, a interface entre GGSN e *Serving Gateway* é considerada como uma interface transparente entre SGSN e GGSN. Na figura 2.6, podemos observar a estrutura que pode ser executada pela operadora que possua redes GSM, UMTS e LTE integradas.

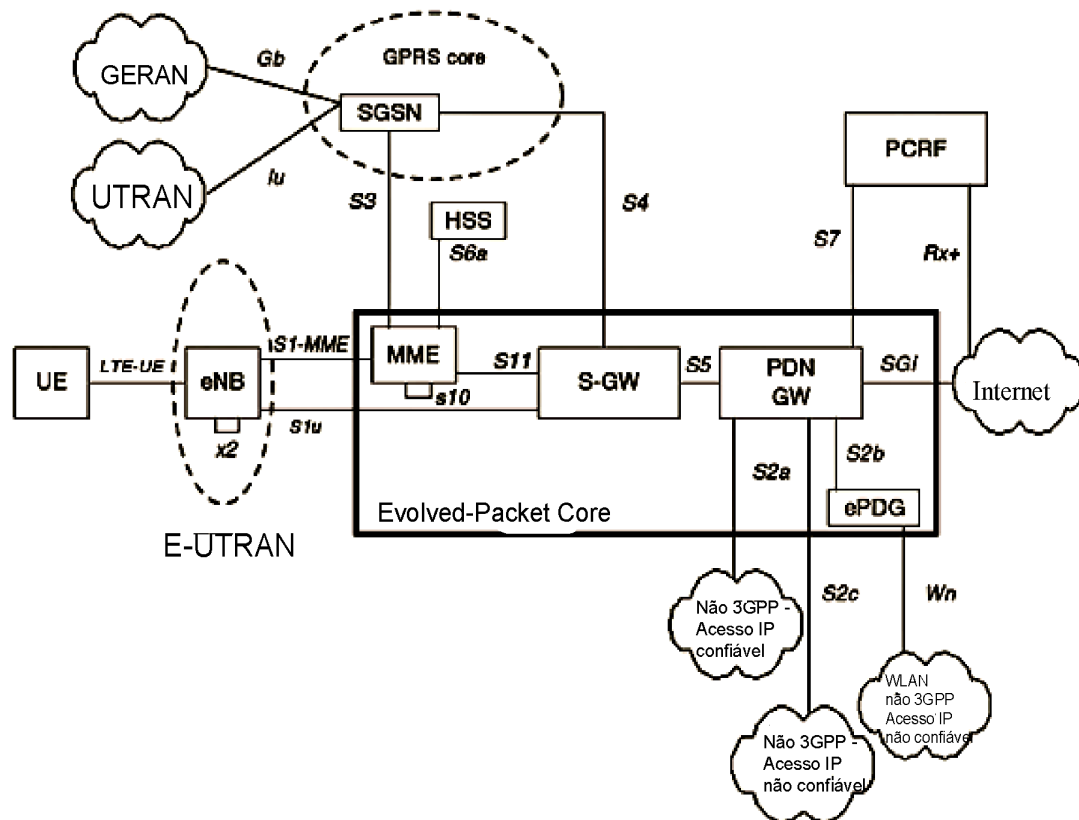


Figura 2.6: Integração das Redes GSM, UMTS e LTE.[19]

2.2.3

Camada Física do LTE.

Estrutura de Quadro.

Existem dois tipos de projetos para o LTE:

- *Frequency Division Duplex* (FDD).

O FDD é válido para os modos *half duplex* e *full duplex*. Cada quadro tem uma duração de 10 ms e consiste em 20 janelas de 0.5 ms cada uma. Um sub-quadro comprime duas janelas, tendo-se 10 sub-quadros de 1 ms cada no modo FDD. Metade dos sub-quadros são para a transmissão no *downlink* e a outra metade é para no *uplink* em intervalos de 10 ms, onde o *uplink* e o *downlink* são separados no domínio da frequência.

Banda	Frequências UL/DL (MHz)
1	1920 - 1980 / 2110 - 2170
2	1850 - 1910 / 1930 - 1990
3	1710 - 1785 / 1805 - 1880
4	1710 - 1755 / 2110 - 2155
5	824 - 849 / 869 - 894
6	830 - 840 / 875 - 885
7	2500 - 2570 / 2620 - 2690
8	880 - 915 / 925 - 960
9	1750 - 1785 / 1845 - 1880
10	1710 - 1770 / 2110 - 2170
11	1428 - 1453 / 1476 - 1501
12	698 - 716 / 728 - 746
13	746 - 758 / 776 - 788
14	758 - 768 / 788 - 798
17	704 - 716 / 734 - 746

Tabela 2.1: Faixas FDD.

- *Time Division Duplex* (TDD).

No TDD, o *downlink* e o *uplink* são transmitidos na mesma frequência e a separação ocorre no domínio do tempo. Cada um dos endereços numa ligação tem designado um *timeslot* específico. A distribuição dos subquadros entre os endereços de transmissão podem ser adaptada ao tráfego de dados e é feita simetricamente (igual número de subquadros no *downlink* e no *uplink*) ou assimetricamente. Na tabela 2.2, mostra-se a configuração do *uplink* e o *downlink*, onde “D” é usado para os dados transmitidos no *downlink*, “U” para os dados transmitidos no *uplink* e “S” é um campo especial onde é transmitido um subquadro do tipo DwPTS (*Downlink Pilot Timeslot*), GP (*Guard Period*) ou UpPTS (*Uplink Pilot Timeslot*).

Configuração Uplink - Downlink	Ponto de Periodicidade Downlink para Uplink	Número de Sub-Quadro									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	5 ms	D	S	U	U	U	D	S	U	U	U
1	5 ms	D	S	U	U	D	D	S	U	U	D
2	5 ms	D	S	U	D	D	D	S	U	D	D
3	10 ms	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D
4	10 ms	D	S	U	U	D	D	D	D	D	D
5	10 ms	D	S	U	D	D	D	D	D	D	D
6	5 ms	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D

Tabela 2.2: Sub-Quadros do TDD.[28]

Para poder separar os intervalos de envio e recebimento dos dados é introduzido um pequeno tempo de retardo (um *Guard Frame*). No TDD, cada quadro é composto por dois *half-frames* iguais cada um com uma duração de 5 ms. Cada *half-frame* é dividido em 5 *sub-frames* com durações de 1 ms. Duas janelas de 0.5 ms formam uma *sub-frame* que não é uma sub-frame especial. Uma *sub-frame* especial é composta por três campos DwPTS, GP e UpPTS [28].

Banda	Frequências UL/DL (MHz)
33, 34	1900 - 1920 / 2010 - 2025
35, 36	1850 - 1910 / 1930 - 1990
37	1910 - 1930
38	2570 - 2620
39	1880 - 1920
40	2300 - 2400

Tabela 2.3: Faixas TDD.

Recurso Físico e Estrutura da Janela.

Em cada janela disponível o sinal transmitido pode ser visto como um agrupamento de recurso tempo-frequência, onde cada elemento de recurso (*Resource Element*, RE) corresponde a uma sub-portadora OFDM durante o intervalo do símbolo OFDM. O número de sub-portadoras é determinado pela largura de banda na transmissão. Para um prefixo cíclico normal (CP) cada janela contém 7 símbolos OFDM, e no caso de prefixo cíclico alargado, 6 símbolos OFDM são contidos em cada janela de tempo. No *downlink* do LTE o espaçamento das sub-portadoras é de 15 kHz. No domínio da frequência, 12 sub-portadoras são agrupadas formando um Bloco de Recurso (*Resource Block*, RB) ocupando um total de 180 kHz. Em caso de um CP curto, o comprimento do RB contém 84 elementos de recurso (RE) e para um CP alargado o número é de 74

elementos de recurso. Para todas as bandas disponíveis, o tamanho do bloco de recurso é o mesmo.

Estrutura do Sinal de Referência no Downlink LTE.

A fim de realizar uma demodulação coerente no *downlink*, a estimativa do canal é necessária no receptor final. No caso da transmissão OFDM os símbolos de referência conhecidos são adicionados nas quadriculas da estimação do canal. Esse sinal é conhecido como sinal *LTE Downlink Reference*. Para o domínio do tempo, símbolos de referência são encaixados na primeira e, depois, na terceira posição depois do último elemento no quadro de recursos, onde os sinais de referência são inseridos cada seis sub-portadoras no domínio da frequência.

Um sinal de referência é transmitido de cada uma das antenas para estimar a qualidade do canal correspondente quando múltiplas antenas são aplicadas. Nesse caso, os sinais de referência são mapeados em diferentes sub-portadoras para diferentes antenas para poder evitar a interferência.

- Parâmetros do *Downlink* LTE.

O LTE tem uma largura de banda escalável, então o número de sub-portadoras muda mas o espaçamento entre elas continua sendo acima de 15 kHz. Dependendo do atraso na propagação, dois prefixos cíclicos (CP) de comprimentos pequeno ou alargado são permitidos. Isto também tem como objetivo suportar diferentes tipos de cenários: urbano, suburbano, interiores e rural, e vai funcionar para os tipos de mobilidade (baixa e alta) de 350 k/h até 500 k/h. Usando uma configuração FDD a configuração do quadro e os parâmetros são os mesmos para o *downlink* e para o *uplink*. Os parâmetros são:

Largura de Banda na Transmissão		1.25 MHz	2.5 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
Duração Subportadora		0.5 ms					
Espaçamento entre Subportadoras		15kHz					
Frequência de Amostragem		1.92MHz	3.84MHz	7.68MHz	15.36MHz	23.04MHz	30.72MHz
FFT e N_{FFT}		128	256	512	1042	1536	2048
Número de subportadoras ocupadas		75	150	300	600	900	1200
Número de símbolos OFDM por subquadro curto/longo (CP)		7/6					
Comprimento CP (us/amostra)	Curto	(4.69/9)x6 (5.21/10)x1	(4.69/18)x6 (5.21/20)x1	(4.69/18)x6 (5.21/40)x1	(4.69/72)x6 (5.21/80)x1	(4.69/108)x6 (5.21/120)x1	(4.69/144)x6 (5.21/160)x1
	Longo	16.67/32	16.67/64	16.67/128	16.67/256	16.67/384	16.67/512

Figura 2.7: Parâmetros do *Downlink* LTE.[28]

- OFDM.

O OFDM não é uma técnica nova o *Bell Labs* a patenteou, originalmente, em 1970, sendo a tecnologia incorporada a vários sistemas DSL (*Digital Subscriber Line*), assim como no padrão de WLAN IEEE 802.11a. O OFDM é baseado em um processo matemático denominado FFT (*Fast Fourier Transform*), que permite que vários canais sobreponham grande parte de sua energia sem perder suas características individuais (ortogonalidade), ou seja, sem interferirem entre si. A técnica é especialmente popular em aplicações de sistemas sem fio, devido a sua resistência à interferência e degradação. De fato, o OFDM permite que os sistemas operem com os grandes espalhamentos temporais (*delay spread*) de sinal, típicos dos ambientes NLOS, onde se espera que tais sistemas sejam implementados. Pelo fato de o OFDM ser composto de múltiplas portadoras de faixa estreita (baixa taxa de transmissão, longo período), o desvanecimento seletivo está localizado em um subconjunto de portadoras e é fácil de equalizar a interferência inter-simbólica é reduzida, significativamente, pois a taxa completa de transmissão (em portadora simples) é quebrada em taxas menores, com símbolos de maior duração. A Figura 2.8 apresenta uma comparação simples, que ilustra o conceito.

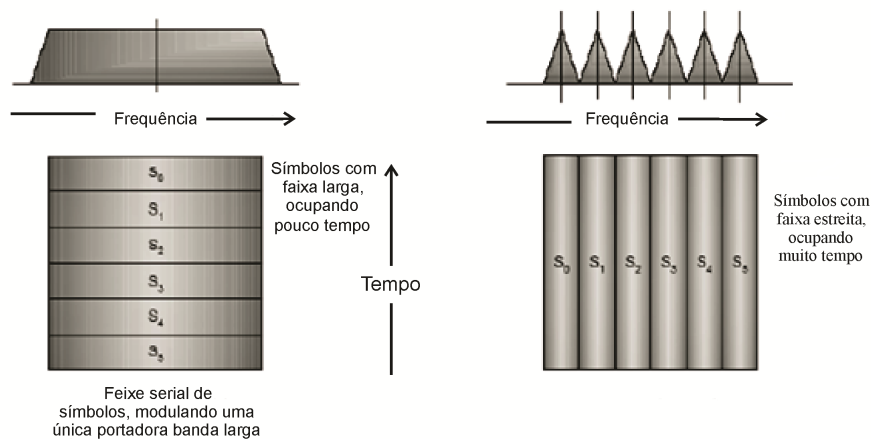


Figura 2.8: Portadora Simples e OFDM.[37]

– OFDMA.

A técnica de acesso múltiplo OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Access*), que é utilizada no enlace de descida do LTE, surge de maneira natural a partir da modulação OFDM, ao se considerar que a possibilidade de que os diferentes símbolos modulados para

as subportadoras pertencem a diferentes usuários. Assim, é possível acomodar múltiplas transmissões simultâneas correspondentes a diferentes fluxos de informação quando viajam em subportadoras diferentes, como ilustrado no esquema de transmissão mostrado na figura 2.9.

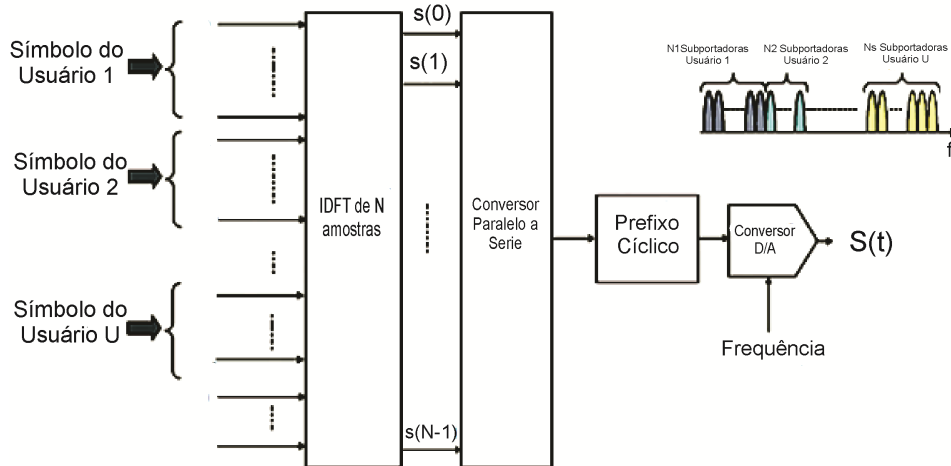


Figura 2.9: Multiplexação de usuários em OFDMA.[7]

Por meio do OFDMA, é simples fazer uma atribuição dinâmica de sub-portadoras disponíveis para os diferentes usuários, simplesmente modificando os símbolos injetados em cada entrada do processo de IDFT na transmissão. Isso permite que, em períodos de tempo muito curtos, geralmente compostos por um pequeno número de períodos de símbolos (em LTE de 6 ou 7), possam se modificar as sub-portadoras utilizadas por cada usuário, proporcionando a flexibilidade necessária para acomodar os fluxos de informação com diferentes requisitos de QoS. O mecanismo de *scheduling* de pacotes é responsável por determinar, em cada momento, as sub-portadoras que são atribuídas a cada um dos diferentes usuários, ou os diferentes fluxos de informação que podem ser do mesmo usuário, correspondendo a diferentes serviços. O processo é ilustrado, graficamente, na figura 2.10.

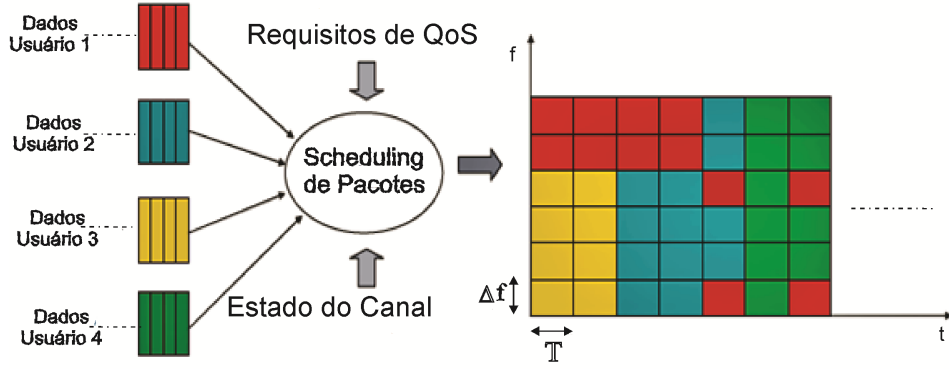


Figura 2.10: Ilustração do *scheduling* de pacotes em OFDMA.[7]

Como mostrado, tem-se quatro usuários diferentes e o conjunto de recursos é representado por uma grade nos eixos tempo e frequência, de forma que existe um conjunto de sub-portadoras separadas de Δf , em frequência, aos quais pode ser atribuído um período temporário T . O *scheduling* de pacotes é responsável pelo mapeamento dos pares de sub-portadoras, ou seja, o período de tempo para cada um dos usuários. A separação das subportadoras é de $\Delta f = 15kHz$, mas também existe um espaçamento reduzido de 7.5 kHz. As sub-portadoras são agrupadas em blocos de 12 sub-portadoras com uma largura de banda resultante de:

$$12\Delta f = 180kHz$$

Cada um destes blocos constitui um recurso no domínio da frequência, o equivalente à unidade mínima para alocação de recursos de um usuário. O número total de sub-portadoras ocupadas pela portadora LTE no enlace descendente é:

$$N_s = 12N_B + 1$$

Sendo N_B o número de blocos de 12 sub-portadoras utilizados. Como nota, a sub-portadora do centro da banda não é utilizada em nenhum dos blocos. A flexibilidade da largura de banda utilizada é dada pelo número de blocos N_B utilizados, tomando valores de $\{6, 15, 25, 50, 75, 100\}$, correspondentes a larguras de banda na transmissão de $BW = (12N_B + 1)\Delta f = \{1.095, 2.715, 4.515, 9.015, 13.515, 18.015\}MHz$. Com esses valores,

se faz a configuração de diferentes espaços entre os canais LTE, correspondentes a: {1.4, 3, 5, 10, 15, 20} MHz. A largura de banda ocupada é, aproximadamente, 90% do espaço entre canais (menos para o caso de 1.4 MHz, onde é de 78%)[7].

A utilização de uma ou outra configuração para o número de blocos utilizados é regulado pelo número de amostras utilizadas para o processo de IDFT/DFT, dado por $N = \{128, 256, 512, 1024, 1536, 2048\}$, e os valores correspondentes de frequência de amostragem $f_m = N\Delta f = \{1.92, 3.84, 7.68, 15.36, 23.04, 30.72\} \text{ MHz}$. É importante notar que a seleção desses valores de amostragem foi feita levando em conta as questões de compatibilidade com os sistemas UMTS atuais, enquanto que a frequência de amostragem de 3.84 MHz coincide com a taxa de *chip* de 3.84 Mchips/s do UMTS, o que facilita a implementação de terminais multimodo UMTS / LTE com um único oscilador.

O conjunto de amostras de frequências define o intervalo temporal de referência como $T_m = 1/30.72\mu s$, a partir do qual são definidos as durações de símbolo, dos prefixos cíclicos e, finalmente, da estrutura temporal da trama. A duração do símbolo OFDM, o qual corresponde ao inverso da separação entre sub-portadoras $T_s = 1/\Delta f = 4.68\mu s$, pode ser expressa como $T_s = 2048T_m$. Da mesma forma, durante a duração dos prefixos cíclicos pode assumir diferentes valores: $T_p = 160$; $T_m = 5.21\mu s$, $T_p = 144$; $T_m = 4.68\mu s$ e $T_p = 512$; $T_m = 16.7\mu s$. Por último, as modulações utilizadas nos enlace de descida do LTE podem ser QPSK, 16 QAM e 64 QAM, correspondentes a 2, 4 e 6 bits por símbolo, respectivamente.

Canal (MHz)	1.4	3	5	10	15	20
Resource Blocks	6	15	25	50	75	100
Subportadoras	72	180	300	600	900	1200

Tabela 2.4: *Resource Blocks* e Subportadoras.[18]

– *Resource Blocks*.

O termo *Resource Block* é utilizado para descrever o mapeamento dos canais físicos que descrevem os *Resource Elements*. Fisicamente podemos definir um *resource block* como um conjunto de símbolos OFDM consecutivos no domínio do tempo em consecutivas sub-portadoras no domínio da frequência. No domínio da frequência, as sub-portadoras são agregadas em janelas de 180 kHz cada e,

dependendo do prefixo cíclico adotado (normal ou estendido), o número de sub-portadoras e símbolos OFDM trafegados em 180 kHz podem variar de acordo com o mostrado na tabela 2.5.

Prefixo	Subportadoras	Nº	Símbolos
Cíclico	(kHz)	Subportadoras	OFDM
<i>Normal</i>	15	12	7
<i>Estendido</i>	15	12	6
<i>Estendido</i>	7,5	24	3

Tabela 2.5: Parâmetros físicos dos *Resource Blocks*. [18]

Uplink LTE.

– SC-FDMA.

O SC-FDMA (*Single Carrier FDMA*) é utilizado no *uplink* no LTE e, da mesma forma que ocorre no OFDM, intervalos de guarda com prefixos cíclicos são introduzidos entre os blocos de símbolos a serem transmitidos.

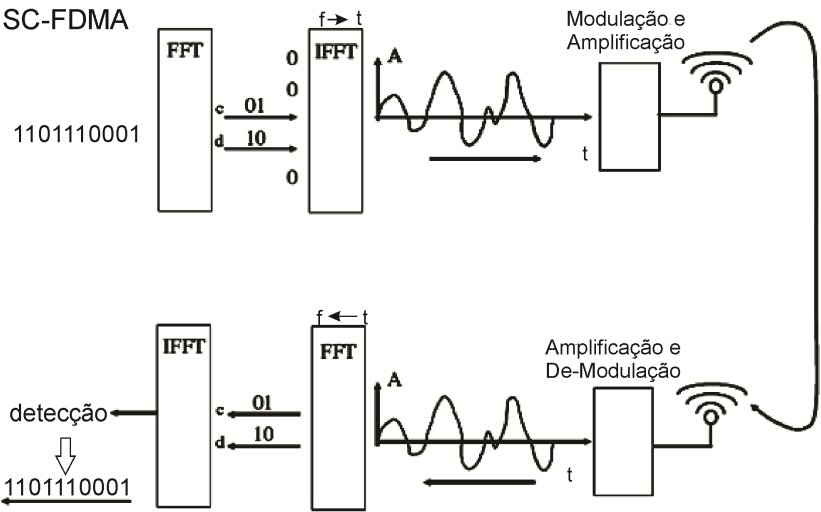


Figura 2.11: Transmissão SC-FDMA. [41]

A principal vantagem do SC-FDMA, em comparação com o OFDM e OFDMA, é que os sinais apresentam um baixo PAPR (*Peak-to-average Power Ratio*) diminuindo a necessidade de transmissores complexos. Podemos classificar o SC-FDMA como um sistema híbrido, que combina o baixo PAPR do SC utilizado no GSM

com o bom desempenho relacionado ao multipercurso do OFDM. Apesar do nome, o SC-FDMA também transmite dados na interface aérea, utilizando múltiplas sub-portadoras, assim como o OFDMA. Como exemplo, podemos observar a figura 2.12, onde no OFDMA os quatro símbolos QPSK são transmitidos paralelamente, sendo um em cada sub-portadora, enquanto que no SC-FDMA, os quatro símbolos são transmitidos em série em quatro tempos distintos. No OFDMA cada sub-portadora carrega somente informações de um símbolo específico. No SC-FDMA cada sub-portadora contém informações de todos os símbolos transmitidos. No *uplink* os dados são transmitidos também em 12 sub-portadoras com o mesmo TTI de 1 ms.

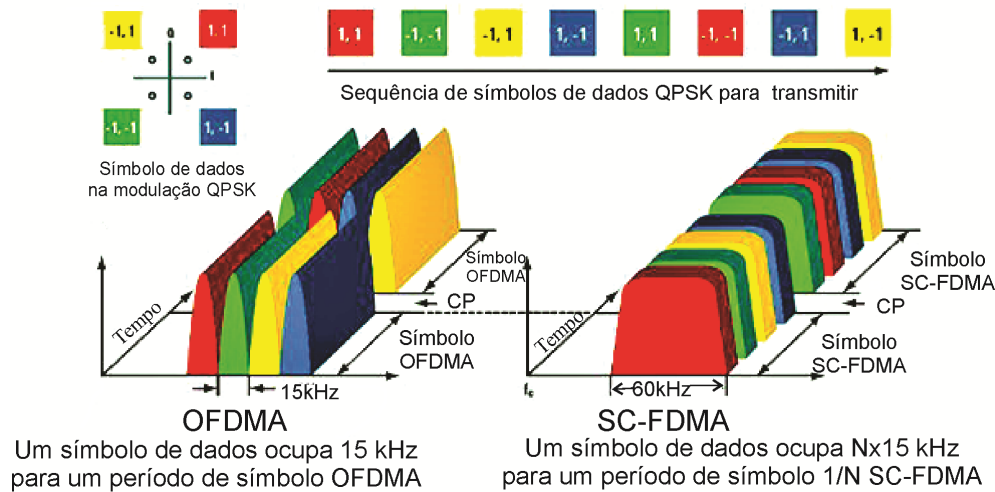


Figura 2.12: Transmissão utilizando OFDMA vs. SC-FDMA.[41]

As principais diferenças entre OFDMA e SC-FDMA podem ser resumidas da seguinte forma: no OFDMA são usados grupos de entradas de bits (0 s e 1 s) para montar as subportadoras que são processadas com IFFT para se ter um sinal no tempo. No SC-FDMA primeiro se tem uma FFT sobre grupos de input para espalhar sobre todas subportadoras e, em seguida, usar o resultado no IFFT que cria o sinal no tempo. Este é o motivo que por vezes o SC-FDMA é referido como FFT espalhado OFDM.

2.3

MIMO.

O sistema LTE promete elevadas taxas de bits, da ordem das centenas de megabits por segundo, o que representa um aumento substancial

frente às taxas de bits oferecidas pelos sistemas 3G atuais (da ordem das dezenas de megabits por segundo)[27]. Trata-se de uma proposta desafiante, uma vez que as redes móveis estão sujeitas à interferência, multipercurso e canais com baixas características de propagação, o que limita o desempenho. As técnicas de MIMO emergiram como solução para fornecer melhores taxas de bits explorando as características de multipercurso dos canais móveis. Isto é realizado através da utilização de diversas antenas para transmissão (Tx) e recepção (Rx) dos sinais, o que reforça a dimensão espacial resultante da utilização de múltiplas antenas distribuídas espacialmente (daí o termo *Multiple Input Multiple Output* - MIMO). Quando os sinais são combinados corretamente no receptor, a qualidade do sinal ou a taxa de bits para cada utilizador de MIMO será melhorada.

Uma das tecnologias fundamentais introduzidas juntamente com a primeira versão do LTE (*Release 8*) a técnica MIMO inclui multiplexação espacial, bem como pré-codificação e diversidade de transmissão. O princípio básico da multiplexação espacial baseia-se em enviar sinais de duas ou mais antenas diferentes com fluxos de dados diferentes e, por meio de processamento do sinal no receptor, separar esses fluxos de dados aumentando, assim, a taxa de bits por um fator de 2 (ou 4 para uma configuração MIMO 4x4). Na pré-codificação, os sinais transmitidos pelas diferentes antenas são ponderados de modo a maximizar a SNR recebido. A diversidade de transmissão depende do envio do sinal codificado a partir de várias antenas, de forma a explorar os ganhos do desvanecimento entre as mesmas. A utilização do MIMO já tinha sido incluída nas especificações do WCDMA, mas funcionava de forma ligeiramente diferente da do LTE. A natureza do OFDMA é bastante adequada para a operação de MIMO, que requer uma SNR razoavelmente elevada e pode beneficiar-se da alta SNR que é atingido localmente (no domínio do tempo e da frequência). Na Figura 2.13 é apresentado o princípio MIMO, onde os diferentes fluxos de dados são alimentados pela operação de pré-codificação e, em seguida, partem para o mapeamento e geração do sinal OFDMA.

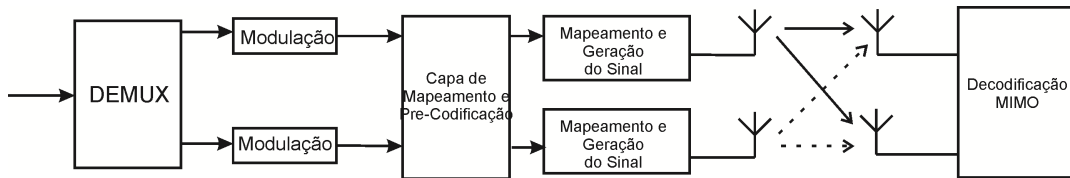


Figura 2.13: Princípio MIMO para uma configuração de duas antenas.

Os símbolos de referência ativam o receptor para separar as diferentes antenas umas das outras. Para evitar que a transmissão de outra antena corrompa a estimação do canal necessária para separar os fluxos MIMO é preciso ter recursos de símbolos de referência utilizados por cada uma das antenas de transmissão. Este princípio é apresentado na Figura 2.14, onde os símbolos de referência e os elementos de recursos vazios são mapeados para alternar entre as antenas. Este princípio também pode ser estendido para cobrir mais de duas antenas, sendo que no *Release 8* do LTE é possível utilizar até 4 antenas. Conforme o número de antenas aumenta a SNR necessária também aumenta, assim como a complexidade entre o transmissor e o receptor e a sobrecarga de símbolos de referência.

Mesmo o UL no LTE suporta a tecnologia MIMO. Enquanto o UE utiliza apenas uma antena de transmissão a taxa de bits do SU (Single User) não pode ser aumentada com MIMO. O nível máximo da taxa de bits da célula pode ser dobrada, isso apenas é possível com a atribuição de dois UE com sinais de referência ortogonais. Assim, a transmissão do eNodeB é tratada como uma transmissão MIMO como é possível ver na Figura 2.15 e o fluxo de dados é separado com processamento do receptor MIMO.

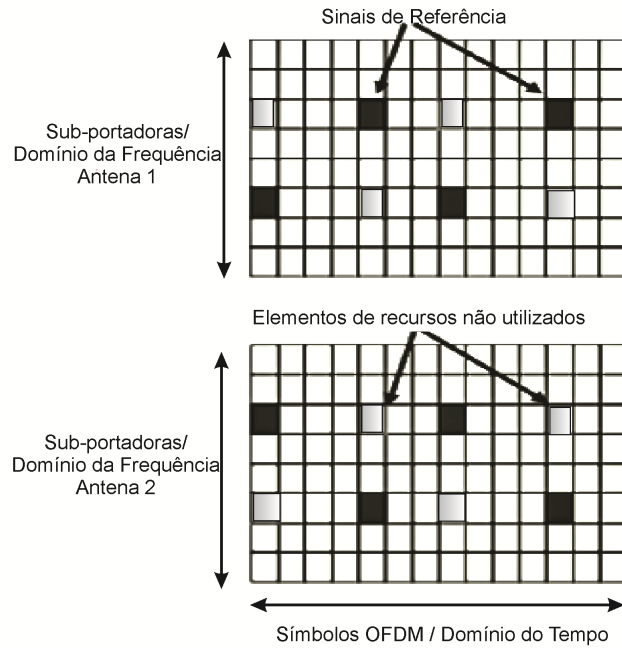


Figura 2.14: Símbolos de Referência OFDMA.[27]

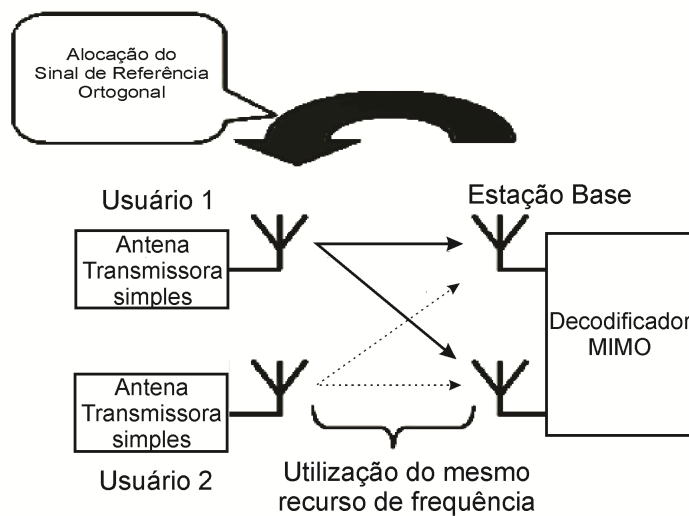


Figura 2.15: Princípio MIMO para múltiplos utilizadores.

Outro fator preponderante no desempenho do MIMO é o número de camadas espaciais (“spatial layers”) do canal móvel, o que determina a capacidade de melhorar a eficiência espectral. Outro fator é o número de antenas de transmissão e de recepção. O aumento da taxa de bits de um sistema MIMO é linearmente proporcional ao número mínimo de antenas de transmissão e recepção sujeitas ao limite do “rank” da estimativa de propagação do canal. O *rank* é a medida do número independente de camadas espaciais, ou seja, um sistema MIMO com 4 antenas de

transmissão (4Tx) e 2 antenas de recepção (2Rx) oferece o dobro da taxa de bits, uma vez que existem duas camadas espaciais ($rank = 2$) no canal móvel. Em condições de linha de visada, o $rank$ da matriz do canal é igual a um; portanto, mesmo com 4 antenas não é possível aumentar a eficiência espectral do canal.

2.3.1

Modos MIMO.

São definidos sete modos MIMO para o DL no LTE, *Release 8* [27]:

- Modo 1 - *Single-antenna Port, Port 0*: É análogo aos sistemas atuais de comunicações móveis, onde um único fluxo de dados (palavra de código) é transmitido por uma única antena e recebido, ou por uma antena (SISO: *Single Input Single Output*), ou por mais antenas (SIMO: *Single Input Multiple Output*). Na Figura 2.16 é possível ver os sistemas de acesso de múltiplas antenas nas modernas redes de comunicação móveis.

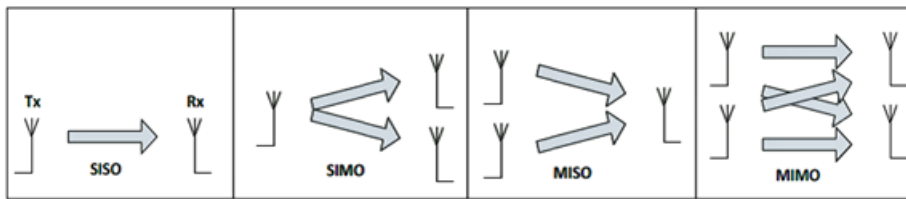


Figura 2.16: Sistemas de Acesso de Múltiplas Antenas.[27]

- Modo 2 - *Transmit-Diversity*: Este modo envolve transmitir o mesmo fluxo de informação em múltiplas antenas (o LTE suporta a opção de uma, duas ou quatro antenas). O fluxo de informação é codificado de forma diferente para cada antena utilizando “*Space-Frequency Block Codes*” (SFBC). Ao contrário do “*Space-Time Block Codes*” de Alamouti, onde os símbolos são repetidos no tempo, o SFBC repete os símbolos em diferentes sub-portadoras em cada antena. Este modo é utilizado no LTE como padrão para os canais comuns tal como para os canais de controle e de transmissão. Uma vez que se trata de uma “transmissão de camada única”, não aumenta a taxa de bits. Por sua vez, a qualidade do sinal torna-se mais robusta e é necessário uma SINR mais baixa para decodificar o sinal.

- Modo 3 - *Open Loop Spatial Multiplexing* (OL-SM): Neste modo são transmitidos dois fluxos de informação (duas palavras de código) através de duas ou mais antenas (até 4 no LTE). Não existe nenhuma informação de retorno por parte do equipamento do UE. No entanto, uma *Transmit Rank Indication* (TRI) transmitida pelo UE é utilizada pelo *eNodeB* para selecionar o número de camadas espaciais. Como são transmitidos múltiplas palavras de código, este modo oferece picos de *throughput* muito melhores que o Modo 2. Também é mais fácil de implementar e considera-se que seja um dos principais modos de MIMO a ser implementado nos sistemas de LTE.
- Modo 4 - *Closed Loop Spatial Multiplexing* (CL-SM): Tal como no Modo 3, são transmitidos dois fluxos de informação através de duas palavras de código a partir de N antenas (até 4). A diferença é o PMI (*Precoding Matrix Indicators*), que é uma informação de retorno do UE para o *eNodeB*. Este mecanismo de informação de retorno permite ao transmissor pré-codificar os dados de forma a otimizar a transmissão pelo canal móvel, tornando mais fácil a separação dos sinais no receptor até chegar ao fluxo original. Espera-se que este seja o modo de maior desempenho do MIMO no LTE.
- Modo 5 - *Multi-User* MIMO: Este modo é semelhante ao CL-SM, mas os fluxos de informação são direcionados para UEs diferentes, ou seja, múltiplos utilizadores partilham os mesmos recursos. Enquanto cada utilizador experimenta a mesma taxa de bits, a taxa de bits global da rede é melhorada. É esperado que, na prática, sejam utilizadas matrizes lineares de antenas para este modo, ao contrário das múltiplas antenas distribuídas espacialmente.

O número de usuários é limitado pelo número de camadas: o limite é um utilizador por cada camada espacial. Os utilizadores são separados no domínio espacial e podem não ser correlacionados devido a padrões individuais de *beamforming*. No caso das camadas não serem completamente ortogonais, cada utilizador irá ter interferência dos outros utilizadores. Este modo é geralmente interessante, quando as redes de LTE estiverem bastante carregadas e não se espera que seja uma das principais características em implementações iniciais.

- Modo 6 - *Closed Loop Rank 1* com pré-codificação: Neste modo uma única palavra de código é transmitida por uma única camada espacial. Muitos consideram que é um retorno ao Modo 4 e tem sido

associado ao *beamforming*.

- Modo 7 - *Single-antenna Port, Port 5*: Trata-se de um modo de *beamforming* onde uma única palavra de código é transmitida numa única camada espacial. Um sinal de referência dedicado origina uma porta de antena adicional (Port 5), permitindo transmissões de mais de 4 antenas. O UE estima a qualidade do canal a partir de sinais de referência comuns em antenas 1-4. É esperada a utilização de matrizes lineares de antenas neste modo.

Análise dos desempenhos dos diversos modos MIMO.

Uma característica chave no MIMO é que o seu desempenho depende de vários fatores, tais como o estado do canal móvel (dispersão baixa vs. alta), a qualidade do sinal (medida pela SINR), a velocidade do UE e a correlação dos sinais recebidos nas antenas receptoras. Por esta razão, alguns modos MIMO serão mais eficientes que os outros, dependendo destes fatores críticos. Isto gera a possibilidade de vários tipos de implementações práticas do MIMO, que poderiam diferenciar os produtos das diferentes marcas.

Os benefícios dos Modos 3 e 4 são atingidos quando a qualidade do sinal recebido (medida pelo SINR) é máxima (normalmente, para uma SINR = 15 dB ou superior, quando a correlação é baixa). No limite da célula, um sinal mais fraco e uma relação sinal-ruído maior reduz os benefícios destes modos, no entanto, torna os Modos 2 e 6 mais atrativos. O Modo 2 também é mais atrativo que os Modos 3 e 4 em ambientes onde a dispersão do sinal é baixa (em zonas rurais). Uma forma de aperfeiçoar o sistema é ir alternando entre estes modos quando o UE se afasta do centro da célula ou o ambiente de dispersão é alterado.

A velocidade do UE tem um forte impacto no Modo 4. Normalmente, o Modo 4 oferece uma eficiência espectral superior a do Modo 3, uma vez que é dada uma informação de retorno, por parte do receptor, ao transmissor acerca dos parâmetros do canal e, assim, esses são utilizados para codificar os fluxos de dados, no entanto, com o aumento da velocidade do UE, as condições do canal mudam, rapidamente, e o Modo 4 perde as vantagens que tinha sobre o Modo 3, sendo este último mais fácil de implementar. O Modo 2 também é robusto para diferentes velocidades, no entanto, tem um melhor desempenho que o Modo 3 em ambientes de baixa dispersão e para altos valores de SINR, portanto, no caso de um veículo se deslocando em alta velocidade numa estrada, com

linha de visada para o *eNodeB*, o Modo 2 ofereceria a melhor eficiência espectral enquanto o Modo 3 seria o mais adequado para um UE a alta velocidade, num ambiente rico em multipercurso e com elevados valores de SINR.

Os Modos 3 e 4 têm um melhor desempenho quando os sinais têm um coeficiente de correlação baixo. Com o aumento da correlação do sinal, o desempenho destes modos diminui. A correlação do sinal está relacionada com o ambiente de dispersão junto do *eNodeB* ou do UE. Quanto maior for a dispersão do sinal, mais eficientes se tornam os Modos 3 e 4. Espera-se que os Modos 3 e 4 tenham o seu melhor desempenho em ambientes de alta dispersão, onde o sinal recebido tem uma propagação angular relativamente elevada, tal como em densas áreas urbanas. A baixa correlação dos sinais é, também, dependente da colocação das antenas. Quanto maior for a distância entre as múltiplas antenas em cada transmissor e receptor, menor é a correlação. Isto coloca algumas restrições no projeto dos terminais uma vez que o espaço é muito limitado. As técnicas de *beamforming* são alternativas eficientes em ambientes de elevada correlação, onde os sinais têm uma propagação angular baixa, tal como em ambientes rurais.

A Tabela 2.6 resume a matriz de decisão para seleccionar os modos MIMO mais aconselháveis para cada cenário. Com a variação do cenário e das características do canal móvel é possível adaptar-se, dinamicamente, entre certos modos.

Modo MIMO	Qualidade do Sinal (SINR)	Dispersão	Velocidade	Adaptação Dinâmica
Modo 2	Baixa	Baixa	Alta	---
Modo 3	Alta	Alta	Alta	Modo 2
Modo 4	Alta	Alta	Baixa	Modo 2 ou Modo 6
Modo 6	Baixa	Baixa	Baixa	Modo 2

Tabela 2.6: Matriz de Decisão para os Principais Modos MIMO.[27]