

*GABRIEL TORRES*

# REDES WI-FI

*2ª EDIÇÃO*



*Clube **do** Hardware*

*GABRIEL TORRES*

# REDES WI-FI

*2<sup>a</sup> EDIÇÃO*

*Clube **do** Hardware*

Copyright © 2023 Gabriel Torres  
Copyright © 2023 Clube do Hardware

Projeto gráfico	Clube do Hardware
Ilustrações	Ingo Bertelli
Editoração Eletrônica	SF Editorial
Revisão Ortográfica	Mariana Rocha

## **REDES WI-FI - 2ª Edição**

Versão 27/11/2023

**Gabriel Torres**

ISBN 978-65-992225-3-5

Nenhuma parte deste livro poderá ser reproduzida sem a autorização prévia e por escrito do autor Gabriel Torres.

Apesar de toda a atenção, erros de digitação não são descartados. Caso encontre algum erro neste livro, por favor, entre em contato conosco pelo e-mail [webmaster@clubedohardware.com.br](mailto:webmaster@clubedohardware.com.br) para que possamos verificar e, eventualmente, corrigir o livro.

O autor Gabriel Torres se isenta de quaisquer responsabilidades por eventuais perdas ou danos a pessoas ou bens por uso deste livro.

Não fornecemos suporte técnico ou garantia técnica de qualquer tipo, tampouco a leitura desta obra dá direito a qualquer tipo de certificação. Ao adquirir o seu exemplar deste livro, você concorda com estes termos. Dúvidas sobre qualquer assunto abordado neste livro devem ser dirigidas em <https://www.clubedohardware.com.br/forums>, onde serão respondidas por membros de nossa comunidade.

Rio de Janeiro • RJ  
[www.clubedohardware.com.br](http://www.clubedohardware.com.br)

Aprenda sobre REDES DE COMPUTADORES diretamente com o autor deste livro.  
Seja aluno de



# GABRIEL TORRES

## REDES WI-FI



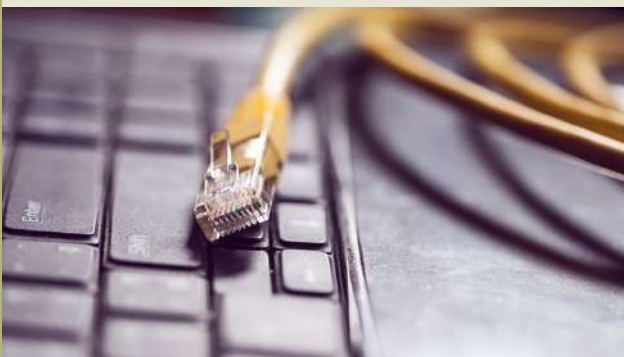
Neste curso você aprenderá sobre princípios de funcionamento de redes Wi-Fi, o uso do espectro eletromagnético, as versões do IEEE 802.11 até o IEEE 802.11be (Wi-Fi 7), segurança, configuração, desempenho e muito mais!

## ARQUITETURA DE REDES



Neste curso você aprenderá sobre princípios de funcionamento de redes, números binários, arquiteturas, comunicação, topologias, protocolos, equipamentos de rede, cabeamento, segurança e muito mais!

## REDES TCP/IP



Neste curso você aprenderá sobre endereçamento IPv4 e IPv6, portas, tradução de endereços (NAT), protocolos de aplicação (HTTP, DNS, FTP, email, etc.), protocolos de transporte (TCP e UDP), protocolos de rede (IPv4, IPv6, IPsec e ICMP), protocolos de roteamento e muito mais!

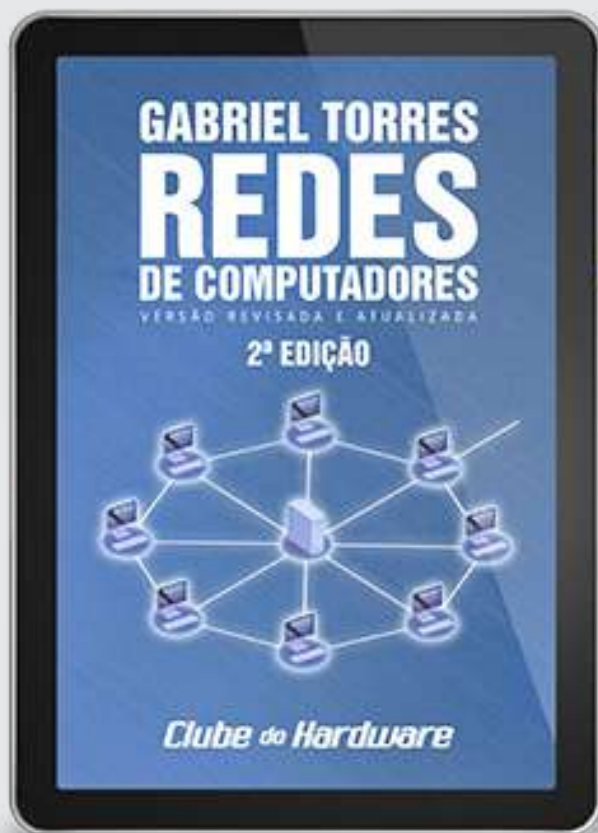
## VANTAGENS DOS NOSSOS CURSOS

- ◆ Não é leitura de PowerPoint
- ◆ Todas as aulas são ministradas pessoalmente por Gabriel Torres
- ◆ Pagamento único, sem mensalidades e barato
- ◆ Acesso vitalício
- ◆ Atualizações regulares com novas aulas e melhorias
- ◆ Acesso grátis a futuras aulas e atualizações
- ◆ Seção de perguntas e respostas para você tirar as suas dúvidas sobre o conteúdo do curso
- ◆ Certificado de conclusão de curso contendo o número de horas

<https://www.clubedohardware.com.br/cursos/>

# CONHEÇA TAMBÉM

**T**udo o que você precisa saber sobre redes está no livro *Redes de Computadores – Versão Revisada e Atualizada – 2ª Edição*, de Gabriel Torres. Este livro é uma referência na área e amplamente adotado em cursos técnico-profissionalizantes e universidades.



[CLIQUE AQUI E CONFIRA!](#)

## Sobre o Autor

Gabriel Torres é um dos mais conhecidos especialistas brasileiros em *hardware* e redes de computadores, além de autor best-seller na área, tendo 28 livros publicados sobre estes assuntos.

É fundador e editor executivo de uma das maiores, mais antigas e mais respeitadas publicações sobre informática, redes e tecnologia do Brasil, o Clube do Hardware (<https://www.clubedohardware.com.br>), no ar desde 1996.

Foi colunista do caderno de informática do jornal O DIA (RJ) durante quase 11 anos (1996-2007). Em 2001, e novamente em 2003, a Assembleia Legislativa do Estado do Rio de Janeiro (ALERJ) homenageou as empresas que mais ajudaram o desenvolvimento da informática no estado do Rio de Janeiro. No segmento de mídia, o jornal O DIA foi o homenageado, com moção especial a Gabriel Torres “pelos inestimáveis serviços prestados à informática brasileira”.

# Apresentação

Este e-book é uma pequena amostra grátis do meu curso “[\*Arquitetura de Redes\*](#)” e do meu livro [\*Redes de Computadores – Versão Revisada e Atualizada – 2ª Edição\*](#), contendo um resumo sobre o funcionamento básico de redes Wi-Fi. As informações aqui contidas são de grande valia tanto para usuários e estudantes, quanto para profissionais experientes.

Espero que você faça bom proveito deste conteúdo!

# Sumário

Sobre o Autor.....	6
Apresentação .....	7
Introdução.....	10
Arquitetura de Redes Wi-Fi .....	10
Serviços de Estação .....	13
Serviços de Distribuição .....	14
Criptografia.....	14
Dica de Segurança .....	16
Controle de Acesso ao Meio .....	17
Uso do Espectro Eletromagnético .....	17
Uso da Faixa de 2,4 GHz .....	18
Uso da Faixa de 5 GHz .....	21
6 GHz.....	22
Padrões IEEE 802.11 .....	25
IEEE 801.11-1997 ("Wi-Fi 0") .....	26
IEEE 802.11b ("Wi-Fi 1").....	27
IEEE 802.11a ("Wi-Fi 2").....	27
OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing).....	27
IEEE 802.11g ("Wi-Fi 3").....	28
IEEE 802.11n (Wi-Fi 4) .....	29
MIMO (Multiple Input, Multiple Output).....	29
Velocidades .....	30
IEEE 802.11ac (Wi-Fi 5).....	32
Beamforming .....	33
MU-MIMO (Multi-User – Multiple Input, Multiple Output).....	35
Velocidades .....	37
IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6/6E).....	38
OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access).....	39
Perfuração de Preâmbulo .....	39
Coloração do BSS (Reúso Espacial).....	41
Recursos de Economia de Energia.....	42
Velocidades .....	43
IEEE 802.11be (Wi-Fi 7) .....	43
MLO (Multi-Link Operation).....	44
MIMO Distribuído .....	44
MRU (Multiple Resource Unit) .....	44
Coordenação Entre Pontos de Acesso .....	44
Velocidades .....	45



# REDES WI-FI



## Introdução

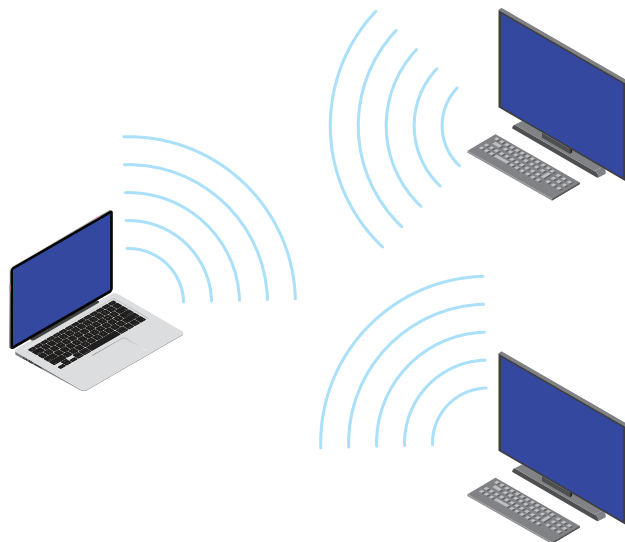
Existem várias tecnologias para se montar uma rede sem fio, sendo o padrão IEEE 802.11 o mais popular. Este padrão é também conhecido como Wi-Fi, mas é importante saber que Wi-Fi e IEEE 802.11 não são a mesma coisa. Wi-Fi é uma marca registrada da [Aliança Wi-Fi](#), um grupo formado por diversos fabricantes. Para um equipamento ter o direito de ser chamado Wi-Fi, ele tem de ter passado pelo processo de certificação deste grupo. Sendo assim, todo equipamento Wi-Fi é IEEE 802.11, mas nem todo equipamento IEEE 802.11 é Wi-Fi. Deixando esta questão semântica de lado, na prática, todos acabam usando os termos “Wi-Fi”, “IEEE 802.11”, “sem fio” e “wireless” como sinônimos.

## Arquitetura de Redes Wi-Fi

Para que possamos nos aprofundar na explicação do protocolo IEEE 802.11, precisamos antes explicar conceitos básicos de como redes sem fio Wi-Fi operam.

Há três modos de operação em redes Wi-Fi:

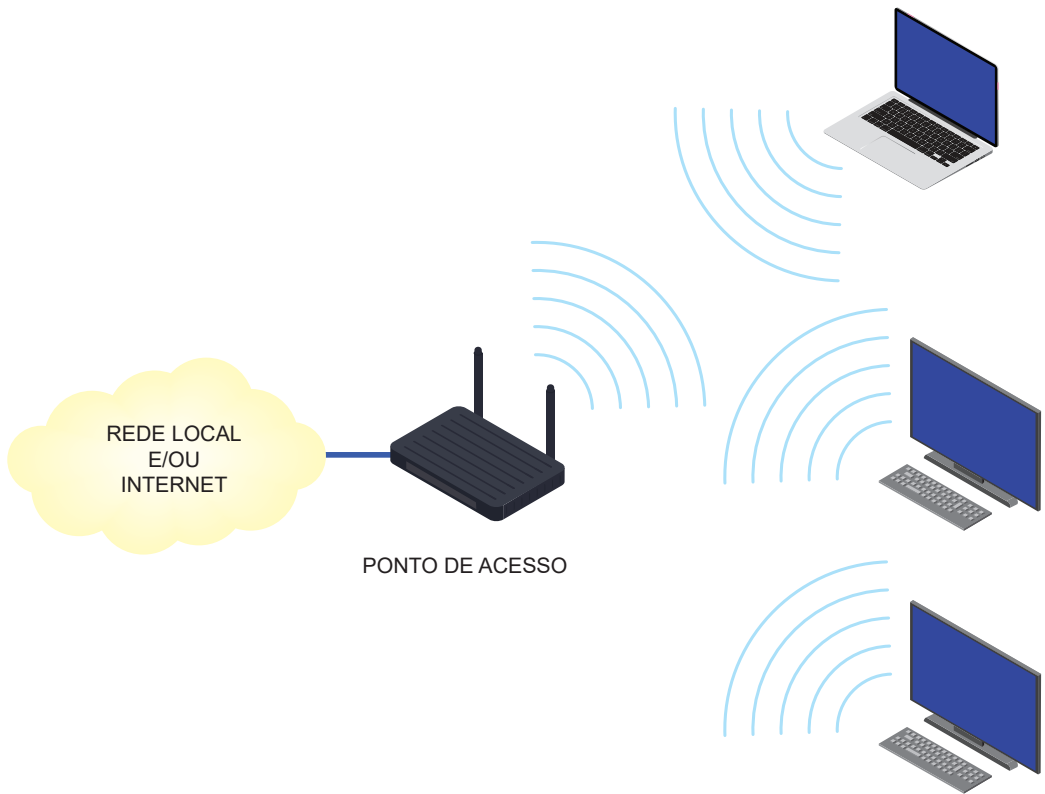
◆ **Ad-hoc ou IBSS (Independent Basic Service Set):** usado para conectar um pequeno número de computadores por meio de transmissão sem fio, sem o uso de um periférico chamado ponto de acesso. É possível trocar dados e compartilhar recursos (como impressoras) entre esses computadores, mas, para acessar a uma rede maior (como a rede da sua empresa ou à Internet), pelo menos um deles tem de ter este acesso e compartilhá-lo com os demais computadores da rede *ad-hoc*. Este acesso a uma rede maior pode ser feito por meio da ligação de um cabo, ou via conexão sem fio, usando um dos outros métodos descritos a seguir.



---

**Figura 1: Rede ad-hoc.**

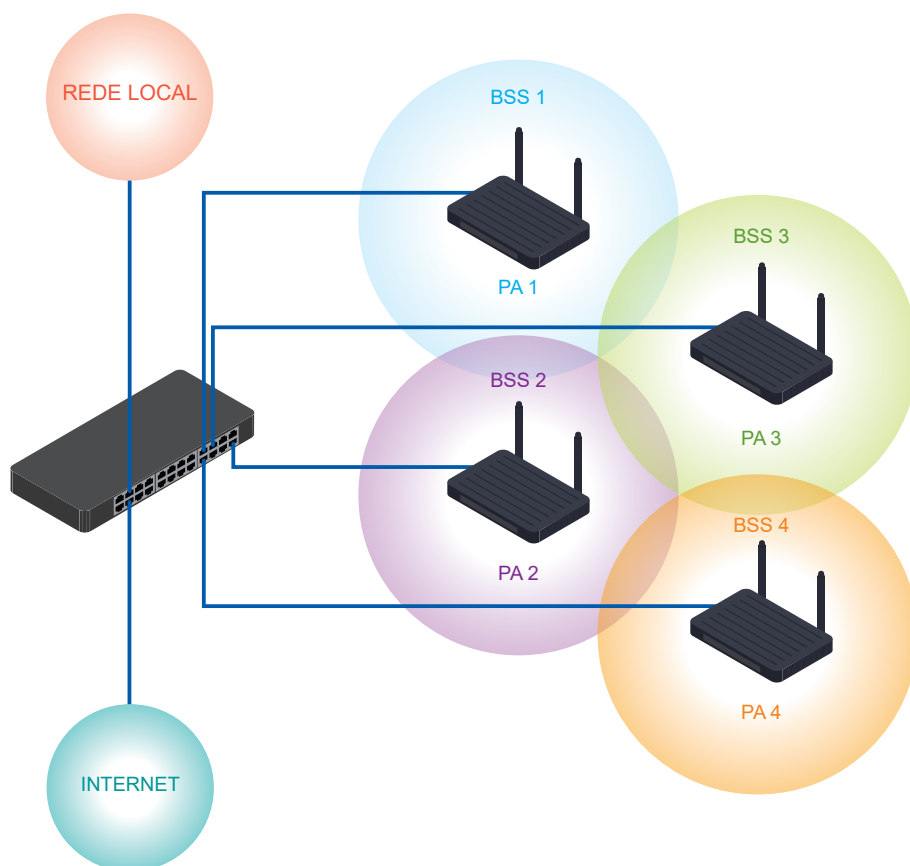
◆ **BSS (Basic Service Set):** neste modo de operação, a rede sem fio é comandada por um periférico chamado ponto de acesso. Para que os computadores que estão na rede sem fio possam acessar uma rede maior (rede da empresa ou à Internet), o ponto de acesso precisa estar conectado à esta rede através de cabos. Quando isto ocorre, o nome do modo de operação passa a ser Infrastructure Basic Service Set (note que este modo *não é* abreviado IBSS, pois esta é a abreviação de Independent Basic Service Set, ou seja, o modo *ad-hoc*). Este é o modo de operação usado em redes caseiras e redes de pequenas empresas. Neste modo de operação, a rede recebe um SSID (Service Set ID), que consiste em um nome configurado pelo administrador da rede. Em um dispositivo com capacidade de acesso a redes sem fio, precisamos selecionar a rede à qual queremos nos conectar: o nome da rede que aparece na lista de redes disponíveis é o seu SSID.



**Figura 2: Rede BSS.**

◆ **ESS (Extended Service Set):** neste modo de operação, são usados vários pontos de acesso formando uma rede maior com o mesmo SSID, permitindo que o usuário mantenha a sua conectividade com a rede quando está em trânsito, saindo do alcance de um ponto de acesso e entrando no alcance de outro. Note que a simples instalação de vários pontos de acesso em um ambiente não torna a rede ESS, pois

cada um deles criará uma rede individual usando um SSID diferente e, neste caso, os usuários perderão a conectividade com a rede quando estiverem em trânsito e passarão a ficar fora de alcance do ponto de acesso ao qual estavam conectados, mesmo que haja sinal de outro ponto de acesso nesta nova localização. No projeto de redes ESS, é necessário que haja uma interseção de pelo menos 10% na área de cobertura dos pontos de acesso. Este é o modo de operação usado quando precisamos de uma rede com grande área de cobertura, onde há necessidade de locomoção dos usuários sem perda da conexão. Vale ressaltar que redes ESS funcionam de maneira similar à rede de telefonia celular (no caso dos telefones celulares a área de cobertura de cada antena é chamada célula e você pode migrar de uma célula para a outra sem a perda da conexão). Para maior desempenho, cada BSS deverá ser configurado a utilizar um canal diferente dos BSS vizinhos.



**Figura 3: Rede ESS.**

O ponto de acesso, frequentemente abreviado PA ou AP (Access Point), é o “coração” das redes Wi-Fi do tipo BSS e ESS. Além de fazer a interface entre a rede cabeada e a rede sem fio, ele é quem “monta” e coordena redes Wi-Fi no espectro eletromagnético. O dispositivo é oferecido a usuários caseiros e pequenas empresas embutido em um equipamento do tipo “tudo em um” denominado “roteador de banda larga”. Este periférico, por sua vez, traz diversos equipamentos eletrônicos em uma única peça, como um roteador, um switch, um firewall e, muitas vezes, um modem, além do já mencionado ponto de acesso. A maioria dos usuários acaba chamando, informalmente, o ponto de acesso de “roteador”, mas é importante fazer a distinção técnica: a função de um roteador é a de interconectar redes diferentes, não a de prover acesso a redes Wi-Fi – que é função do ponto de acesso. Ademais, em redes maiores (ESS), o técnico lidará com pontos de acesso “puros”, sem as demais funções disponíveis em “roteadores de banda larga”.

Em redes Wi-Fi, qualquer dispositivo contendo uma interface de rede sem fio é chamado *estação*. Isso inclui computadores, tablets, smartphones, smart TVs, consoles de videogame, impressoras com conexão via rede sem fio etc.

O sistema de distribuição é o caminho usado por pontos de acesso para trocarem informações como enviar um pacote de dados que tenha partido de uma BSS que tenha como destino outra BSS (ver Figura 3), trocar informações para manter o usuário conectado quando ele move de uma BSS para outra e para encaminhar pacotes que tenham como destino a rede usando cabos ou a internet. Nos exemplos dados nas Figuras 2 e 3, o sistema de distribuição empregado usa cabos, porém, é possível usar comunicação sem fio para fazer a comunicação entre pontos de acesso.

## Serviços de Estação

O padrão IEEE 802.11 define alguns serviços disponíveis para as estações. Eles são:

- ◆ **Autenticação:** para permitir ou impedir computadores a terem acesso à rede sem fio. A autenticação pode ser do tipo aberta, em que não é necessário o uso de uma chave criptográfica (“senha”); ou por chave compartilhada, onde quem quiser ter acesso à rede precisa conhecer a chave criptográfica dela. Neste caso, um sistema de criptografia precisa estar ativado.
- ◆ **Desautenticação:** feito quando uma estação pretende se desconectar da rede sem fio.
- ◆ **Privacidade:** serviço para proteção de dados por meio da criptografia deles. Este serviço é essencial, pois, em uma rede sem fio que não possua criptografia, qualquer dispositivo pode “escutar” os quadros de dados sendo trafegados no ar, podendo, assim, ter acesso às informações ali contidas por meio de um programa para visualização de quadros de dados (*sniffer*).

◆ **Entrega de dados:** motivo pelo qual montamos redes, ou seja, este serviço é responsável pelo envio de dados de e para estações.

## Serviços de Distribuição

Estes serviços estão disponíveis para os pontos de acesso da rede sem fio:

◆ **Associação:** usado para fazer a ligação lógica entre uma estação e um ponto de acesso. Primeiro, cada estação precisa estar associada a um ponto de acesso para poder acessar a rede e seus recursos. Cada estação pode se associar a apenas um desses pontos, mas o ponto de acesso pode ser associado a várias estações. Este serviço, normalmente, é feito quando um computador “entra” na rede.

◆ **Desassociação:** este tipo de pedido pode ser feito tanto por estações, quanto por pontos de acesso. Por exemplo, um ponto de acesso pode desassociar uma estação, caso ela esteja enfrentando problemas de tráfego ou quando o administrador da rede está removendo o ponto dela por motivos de manutenção. Estações podem se desassociar de um ponto de acesso quando o usuário quer “sair” da rede.

◆ **Reassociação:** este serviço permite a uma estação mover de um ponto de acesso para outro dentro de uma rede ESS, desassociando-se do ponto de acesso anterior e associando-se ao novo ponto de acesso, sem perda de conectividade. Com a reassociação, quadros de dados que forem mandados para o ponto de acesso antigo com destino à estação que está se reassociando serão encaminhados para o novo ponto de acesso, para que não haja perda de quadros.

◆ **Distribuição:** o serviço de distribuição permite que estações acessem o sistema de distribuição da rede, de forma a ter acesso a outros pontos de acesso e estações.

◆ **Integração:** este serviço permite a conexão de redes Wi-Fi a outras redes, fazendo a tradução de quadros IEEE 802.11 em quadros usando o formato da outra rede.

## Criptografia

Criptografia é uma técnica que permite que dados sejam codificados de forma que apenas o receptor consiga decodificá-los.

Como qualquer dispositivo que esteja no alcance da rede Wi-Fi pode acessar os quadros de dados sendo transmitidos, a criptografia é essencial para que, caso alguém capture informações que estão circulando na rede, estas não consigam ser lidas. Para que você tenha uma ideia mais concreta do que ocorre na prática, se a informação capturada for um texto, por exemplo, o bisbilhoteiro verá tal texto todo embaralhado, sem sentido.

Habilitar a criptografia em uma rede Wi-Fi também impede o acesso não autorizado aos recursos oferecidos pela rede, como o acesso à internet, a arquivos e a impressoras.

Atualmente, grande parte das comunicações de rede é feita com o uso de criptografia – por exemplo, quando você acessa um site com o protocolo HTTPS (símbolo de cadeado ao lado do endereço do site em um navegador de Internet). Dessa forma, os dados transmitidos muitas vezes já estão criptografados.

No entanto, como não é possível assegurar que 100% do tráfego está criptografado, a criptografia é requerida em redes Wi-Fi, pois os quadros de dados que circulam na rede podem ser visualizados por qualquer dispositivo que esteja escutando a mesma faixa de frequência. Como a transmissão é feita por ondas de rádio, o dispositivo bisbilhoteiro não precisa estar no mesmo ambiente físico da rede: pode ser um vizinho acima, abaixo, ao lado ou mesmo do outro lado da rua.

Por esse motivo, desabilitar a criptografia de uma rede Wi-Fi “para facilitar” a conexão de usuários à rede sem a necessidade de uma senha é uma péssima ideia, pois a rede estará totalmente insegura. A finalidade de uma senha em redes Wi-Fi não é a de bloquear o acesso à rede local ou à internet, mas, sim, para que os dados transitando na rede sem fio sejam criptografados. Em redes abertas (sem criptografia), os dados que circulam na rede sem fio podem ser facilmente lidos por qualquer bisbilhoteiro, caso já não tenham sido criptografados pela aplicação que gerou os dados (nem todos os sites e aplicações criptografam os dados sendo transmitidos).

Escutar tráfego de redes cabeadas de forma não autorizada, por outro lado, é uma tarefa bem mais complexa, pois exige que o bisbilhoteiro tenha acesso à sala de equipamentos da rede para instalar uma “escuta”. Por isso a preocupação com a segurança em redes Wi-Fi é muito maior do que em redes cabeadas.

Apenas para enfatizar, a criptografia do Wi-Fi opera somente na comunicação entre o ponto de acesso e as estações. Se o destino for um endereço localizado fora da rede sem fio, ao chegar ao ponto de acesso, os dados são decodificados e seguem sem a criptografia adicionada pela rede Wi-Fi ao seu destino (mas podem conter criptografia adicionada pela aplicação).

Para que você entenda um pouco melhor como funciona a criptografia, vamos explicar rapidamente o funcionamento básico do algoritmo RSA, que é bastante didático. Neste algoritmo, são criadas duas chaves criptográficas: uma pública (responsável pela criptografia dos dados) e uma privada (responsável pela descriptografia dos dados). As chaves são geradas pelo dispositivo receptor, sendo a chave pública divulgada para todos os dispositivos que queiram transmitir dados ao receptor, enquanto a chave privada, somente o receptor tem acesso.

Quando A quer mandar uma mensagem cifrada para B, ele codifica esta mensagem usando a chave pública de B. Quando B recebe esta mensagem, ele usa sua chave privada para abri-la, ou seja, decodificá-la. Como somente quem tem a chave privada pode “abrir” (decodificar) a mensagem, alguém que roube os dados não terá acesso a eles, mesmo que ele conheça a chave pública, pois ela só permite a codificação da mensagem, e não a sua decodificação, e não é possível gerar a chave privada a partir da chave pública.

É importante notar que, quando a rede Wi-Fi está com criptografia ativada, a chave criptográfica nunca circula na rede: ela é configurada individualmente no ponto de acesso e nas estações. Durante o processo de autenticação, a estação manda um quadro de autenticação ao ponto de acesso. O ponto de acesso envia um quadro de autenticação à estação contendo um texto de verificação. A estação tem de criptografar este texto, usando a chave criptográfica que foi configurada e enviá-lo ao ponto de acesso usando um quadro de autenticação. O ponto de acesso decodifica o texto enviado e compara com o texto original, enviando um quadro de autenticação, aceitando-a ou negando-a, dependendo se os textos “bateram” ou não. Como é possível notar, em momento algum, a estação ou o ponto de acesso transferiu a chave criptográfica na rede.

Ao se habilitar criptografia em uma rede Wi-Fi, a chave é criada a partir de uma senha, que se deve configurar no ponto de acesso e nas estações por meio de um algoritmo matemático. Assim, a “senha” configurada no ponto de acesso e nas estações na realidade não é a chave criptográfica que é de fato usada.

Os principais protocolos criptográficos que podem ser usados em redes Wi-Fi são os seguintes:

- ◆ **WEP (Wired Equivalent Privacy):** não deve ser usado, pois é um protocolo cuja segurança já foi quebrada.
- ◆ **WPA (Wi-Fi Protected Access):** não deve ser usado, pois é um protocolo cuja segurança já foi quebrada.
- ◆ **WPA2 (Wi-Fi Protected Access 2):** só deve ser usado caso o ponto de acesso e as estações não tenham WPA3.
- ◆ **WPA3 (Wi-Fi Protected Access 3):** é o algoritmo mais forte no momento e que deve ser utilizado.

Os protocolos WPA estão disponíveis em duas variantes:

- ◆ **Personal:** usado em pequenas redes.
- ◆ **Enterprise:** usado em redes corporativas, fazendo uso de um servidor de autenticação RADIUS.

## Dica de Segurança

Além de habilitar criptografia, outro cuidado importante deve ser tomado. Pontos de acesso, como os embutidos nos “roteadores de banda larga”, podem trazer um sistema para facilitar a configuração das estações, denominado WPS (Wi-Fi Protected Setup). Entretanto, este sistema apresenta risco de segurança e recomendamos que não seja usado. De fato, recomendamos que tal sistema seja completamente desabilitado no painel de controle do ponto de acesso.



## Controle de Acesso ao Meio

Redes Wi-Fi utilizam o método CSMA/CA (Carrier-Sense Multiple Access with Collision Avoidance) de controle de acesso ao meio.

Este método funciona da seguinte forma: quando o ponto de acesso ou uma estação quer transmitir dados, a primeira coisa que é feita é “escutar” o canal do espectro eletromagnético para ver se ele está ocupado. Caso ele esteja livre, o quadro é transmitido. Caso ele esteja ocupado, o equipamento aguardará um período aleatório de tempo e repetirá o processo. A transmissão só será efetuada se o canal estiver livre.

Logo, o ponto de acesso e as estações não transmitem ou recebem dados ao mesmo tempo na rede. Há uma intercalação nessas transmissões: primeiro uma estação transmite dados, depois outra estação transmite, em seguida, pode ser que o ponto de acesso transmita e assim sucessivamente. Estas intercalações são feitas de forma tão rápida que os usuários têm a impressão de que todos os dispositivos conectados à rede estão transmitindo ou recebendo dados ao mesmo tempo.

O aumento do número de dispositivos utilizando o mesmo canal aumenta a probabilidade de o canal já estar sendo utilizado quando uma máquina ou o ponto de acesso precisa transmitir dados. A consequência prática é um aumento no tempo que cada máquina precisa esperar para o canal estar livre e poder iniciar a transmissão de dados. Em outras palavras, há uma queda no desempenho.

É possível que outras redes ou equipamentos utilizem o mesmo canal que a sua rede sem fio, porém, o desempenho será prejudicado, pelo motivo que explicamos no parágrafo anterior. Dessa forma, idealmente cada rede Wi-Fi deverá ser configurada a utilizar um canal que não esteja sendo utilizado por outras redes. Na prática nem sempre isto será possível, como veremos adiante.

Padrões IEEE 802.11 mais recentes trazem recursos como o *beamforming*, a operação dinâmica de banda, a perfuração de preâmbulo e a coloração de BSS para permitir que, em determinadas condições, mais de uma transmissão seja possível de ser feita ao mesmo tempo, mitigando esses problemas. Falaremos sobre tais recursos em momento mais oportuno.

## Uso do Espectro Eletromagnético

Redes Wi-Fi operam transmitindo ondas de rádio. O uso do espectro eletromagnético é definido e regulamentado pelas agências reguladoras de telecomunicações de cada país, como a Anatel no Brasil e a FCC nos EUA. Existem faixas denominadas ISM (Industrial, Scientific, and Medical) ou ICM (Industrial, Científico e Médico), que podem ser usadas livremente sem a necessidade de qualquer tipo de autorização prévia ou licenciamento por parte da agência reguladora. Por isto, estas faixas são também conhecidas, em inglês, como *unlicensed*.

Atualmente há três destas faixas que podem ser utilizadas por redes Wi-Fi: 2,4 GHz, 5 GHz e 6 GHz. Qual faixa a rede utilizará dependerá do padrão de rede sem fio suportado pelos equipamentos, conforme explicaremos no tópico *Padrões IEEE 802.11*.

Cada faixa é dividida em canais, e a rede sem fio utilizará um ou mais deles, conforme explicamos a seguir.

## Uso da Faixa de 2,4 GHz

Essa foi a primeira faixa de frequência a estar disponível para uso sem licenciamento. Por isso ela é a mais saturada: além de ser utilizada por redes Wi-Fi, é também utilizada por sistemas de controle remoto que operam por radiofrequência (como controles de portão de garagem e carrinhos de controle remoto), fornos de micro-ondas, walkie-talkies, conexões Bluetooth e conexões de teclado e mouse sem fio. Praticamente todas as conexões de dispositivos sem fio utilizando radiofrequência utilizam essa faixa de frequência.

A faixa de 2,4 GHz começa na frequência de 2.401 MHz e termina na frequência de 2.473 MHz (EUA) ou 2.483,5 MHz (maioria dos países do mundo, incluindo o Brasil, conforme a Resolução Anatel nº 506/2008). Ela é dividida em 14 canais, com uma distância de 5 MHz entre cada canal (exceto entre os canais 13 e 14, que possuem uma distância de 12 MHz entre eles). Nos EUA, só é permitido o uso dos canais até o 11 e, no Brasil, até o 13. Poucos países permitem o uso do canal 14, como é o caso do Japão.

**Tabela 1: Canais da banda de 2,4 GHz.**

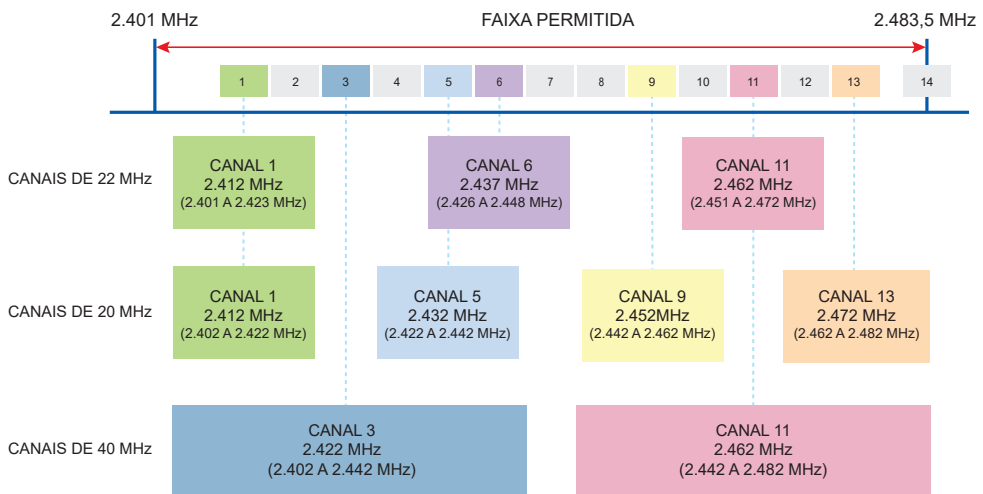
Canal	Frequência central
Canal 1	2.412 MHz
Canal 2	2.417 MHz
Canal 3	2.422 MHz
Canal 4	2.427 MHz
Canal 5	2.432 MHz
Canal 6	2.437 MHz
Canal 7	2.442 MHz
Canal 8	2.447 MHz
Canal 9	2.452 MHz
Canal 10	2.457 MHz
Canal 11	2.462 MHz
Canal 12	2.467 MHz
Canal 13	2.472 MHz
Canal 14	2.484 MHz

Os canais possíveis de serem usados (1 a 13) têm 5 MHz de largura, mas redes IEEE 802.11 operando na faixa de 2,4 GHz podem usar canais de 20 MHz, 22 MHz ou 40 MHz, dependendo do padrão. Ou seja, cada canal utilizado na rede é maior do que cada canal oferecido na faixa de 2,4 GHz, havendo uma sobreposição de canais.

Por exemplo, se você tiver uma rede operando no canal um, uma segunda rede operando no canal dois gerará interferência na primeira, visto que uma rede operando no canal um também utiliza as frequências do canal dois. Esta interferência diminui o desempenho da rede, conforme explicamos no tópico [Controle de Acesso ao Meio](#).

Idealmente, redes Wi-Fi utilizando a faixa de 2,4 GHz deveriam ser configuradas a usar um dos seguintes canais:

- ◆ **Canais de 20 MHz sem sobreposição:** 1, 5, 9 e 13.
- ◆ **Canais de 22 MHz sem sobreposição:** 1, 6 e 11.
- ◆ **Canais de 40 MHz sem sobreposição:** 3 e 11.



**Figura 4: Canais de 2,4 GHz sem sobreposição.**

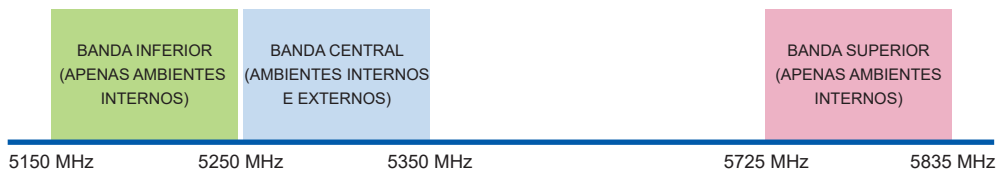
Isso significa que só poderíamos ter até quatro redes Wi-Fi utilizando canais de 20 MHz (que é a configuração mais usual, como veremos no tópico *Padrões IEEE 802.11*) em um mesmo ambiente. Porém, em centros urbanos, isso é simplesmente impossível. Se você utilizar o app Wifi Analyzer em seu smartphone, verá uma situação similar à apresentada na Figura 5: há inúmeras redes utilizando a faixa de frequência de 2,4 GHz, gerando interferência e, conseqüentemente, diminuindo o desempenho das redes.



## Uso da Faixa de 5 GHz

A faixa de 5 GHz é bem menos utilizada e oferece mais canais do que a faixa de 2,4 GHz. Com isso, há menos interferência e a rede sem fio consegue obter um desempenho maior. Além disso, a faixa de 5 GHz permite o uso de canais mais largos, o que aumenta o desempenho, caso os equipamentos permitam tal configuração.

A divisão da faixa de frequência de 5 GHz varia muito de país para país. No Brasil, a Resolução n° 506/2008 da Anatel determina o uso desta faixa de frequência da maneira ilustrada na Figura 6. O DFS (Dynamic Frequency Selection, seleção dinâmica de frequência) detecta se há radar utilizando o canal, fazendo com que o ponto de acesso troque de canal de forma automática.



**Figura 6: Uso da faixa de 5 GHz (Brasil).**

Com a faixa de frequência disponível no Brasil, podemos ter 24 canais de 20 MHz sem sobreposição, que podem ser combinados para formar 11 canais de 40 MHz (com a sobreposição de um deles), cinco canais de 80 MHz ou dois canais contíguos de 160 MHz. Canais de 160 MHz podem ser formados juntando-se dois canais contíguos de 80 MHz ou então por dois canais não contíguos. Esta segunda configuração é denominada 80+80 MHz.

O aumento do tamanho do canal permite que a rede atinja um maior desempenho (maior taxa de transferência). Por outro lado, usando canais mais largos, ocupamos mais o espectro eletromagnético, diminuindo o número de canais totalmente livres no ambiente.

É possível mais de uma rede utilizar os mesmos canais, porém, haverá um impacto no desempenho da rede, como já explicamos.

Tabela 2: Canais de 20 MHz da banda de 5 GHz (Brasil).

Canal (20 MHz)	Frequência central	DFS	Ambiente
32	5.160 MHz	Não	Interno (200 mW)
36	5.180 MHz	Não	Interno (200 mW)
40	5.200 MHz	Não	Interno (200 mW)
44	5.220 MHz	Não	Interno (200 mW)
48	5.240 MHz	Não	Interno (200 mW)
52	5.260 MHz	Sim	Interno (200 mW)
56	5.280 MHz	Sim	Interno (200 mW)
60	5.300 MHz	Sim	Interno (200 mW)
64	5.320 MHz	Sim	Interno (200 mW)
68	5.340 MHz	Sim	Interno (200 mW)
96	5.480 MHz	Sim	Interno ou externo (1 W)
100	5.500 MHz	Sim	Interno ou externo (1 W)
104	5.520 MHz	Sim	Interno ou externo (1 W)
108	5.540 MHz	Sim	Interno ou externo (1 W)
112	5.560 MHz	Sim	Interno ou externo (1 W)
116	5.580 MHz	Sim	Interno ou externo (1 W)
120	5.600 MHz	Sim	Interno ou externo (1 W)
124	5.620 MHz	Sim	Interno ou externo (1 W)
128	5.640 MHz	Sim	Interno ou externo (1 W)
132	5.660 MHz	Sim	Interno ou externo (1 W)
136	5.680 MHz	Sim	Interno ou externo (1 W)
140	5.700 MHz	Sim	Interno ou externo (1 W)
144	5.720 MHz	Sim	Interno ou externo (1 W)
148	5.740 MHz	Sim	Interno ou externo (1 W)

Os canais disponíveis, na prática, dependem do modelo do ponto de acesso sem fio.

## 6 GHz

Prevendo uma futura saturação da faixa de 5 GHz e querendo possibilitar o uso de canais maiores que 160 MHz, a Aliança Wi-Fi pressionou as agências reguladoras para a liberação para uso não licenciado da faixa de 6 GHz, o que acabou ocorrendo e, felizmente, a Anatel seguiu o padrão norte-americano para esta faixa de frequência, que começa em 5.925 MHz e termina em 7.125 MHz, equivalendo às seguintes faixas U-NII (Unlicensed National Information Infrastructure) definidas pela FCC (Federal Communications Commission) dos EUA:

- ◆ **U-NII-5:** 5.925 MHz a 6.425 MHz.
- ◆ **U-NII-6:** 6.425 MHz a 6.525 MHz.
- ◆ **U-NII-7:** 6.525 MHz a 6.875 MHz.
- ◆ **U-NII-8:** 6.875 MHz a 7.125 MHz.

É importante notar, portanto, que, em outros países, a faixa de 6 GHz pode ser menor e, consequentemente, ter menos canais disponíveis.

Com a faixa de frequência disponível no Brasil, podemos ter 59 canais de 20 MHz, que podem ser combinados para formar 29 canais de 40 MHz, 14 canais de 80 MHz, sete canais contíguos de 160 MHz ou três canais contíguos de 320 MHz.

A faixa de 6 GHz só está disponível a partir do padrão Wi-Fi 6E (IEEE 802.11ax com extensões de 6 GHz) e o uso de canais acima de 160 MHz só está disponível a partir do padrão Wi-Fi 7 (IEEE 802.11be). Este padrão permite a utilização de outros tamanhos de canal, como 240 MHz, que podem ser formados por frequências contíguas ou separadas.

Diferentemente do que ocorre com a faixa de 5 GHz, a numeração dos canais recomeça do um. Portanto, a faixa de 6 GHz apresenta canais com mesma numeração dos canais utilizados nas faixas de 2,4 GHz e 5 GHz. Os canais continuam sendo numerados em divisões de 5 MHz, como descrito na Tabela 3.

**Tabela 3: Canais de 20 MHz da banda de 6 GHz (EUA e Brasil).**

Canal (20 MHz)	Frequência central
1	5.955 MHz
5	5.975 MHz
9	5.995 MHz
13	6.015 MHz
17	6.035 MHz
21	6.055 MHz
25	6.075 MHz
29	6.095 MHz
33	6.115 MHz
37	6.135 MHz
41	6.155 MHz
45	6.175 MHz
49	6.195 MHz
53	6.215 MHz
57	6.235 MHz
61	6.255 MHz

Canal (20 MHz)	Frequência central
65	6.275 MHz
69	6.295 MHz
73	6.315 MHz
77	6.335 MHz
81	6.355 MHz
85	6.375 MHz
89	6.395 MHz
93	6.415 MHz
97	6.435 MHz
101	6.455 MHz
105	6.475 MHz
109	6.495 MHz
113	6.515 MHz
117	6.535 MHz
121	6.555 MHz
125	6.575 MHz
129	6.595 MHz
133	6.615 MHz
137	6.635 MHz
141	6.655 MHz
145	6.675 MHz
149	6.695 MHz
153	6.715 MHz
157	6.735 MHz
161	6.755 MHz
165	6.775 MHz
169	6.795 MHz
173	6.815 MHz
177	6.835 MHz
181	6.855 MHz
185	6.875 MHz
189	6.895 MHz
193	6.915 MHz
197	6.935 MHz
201	6.955 MHz



Canal (20 MHz)	Frequência central
205	6.975 MHz
209	6.995 MHz
213	7.015 MHz
217	7.035 MHz
221	7.055 MHz
225	7.075 MHz
229	7.095 MHz
233	7.115 MHz

## Padrões IEEE 802.11

Ao longo dos anos, diversos padrões IEEE 802.11 foram lançados. O objetivo básico de um novo padrão é trazer maior desempenho. Para isso, cada nova geração traz novas técnicas de transmissão que não estavam disponíveis anteriormente, o que demanda anos de pesquisa e desenvolvimento, além de componentes eletrônicos mais caros. Isto explica o motivo de equipamentos de um novo padrão serem mais caros do que os de um padrão anterior.

Cada geração do padrão IEEE 802.11 é identificada por uma letra, que não tem qualquer significado em particular. Isto torna a memorização da ordem de lançamento e das características técnicas de cada padrão bem difícil. Em 2018, a Aliança Wi-Fi resolveu utilizar outro esquema de nomenclatura, passando a chamar os padrões IEEE 802.11n, IEEE 802.11ac e IEEE 802.11ax de Wi-Fi 4, Wi-Fi 5 e Wi-Fi 6, respectivamente, e a utilizar este esquema para novos padrões, como foi o caso do Wi-Fi 7 (IEEE 802.11be). Os padrões anteriores ao IEEE 802.11n não foram oficialmente renomeados, mas podemos efetuar uma numeração retroativa informal, por isso, grafamos esta nomenclatura retroativa entre aspas.

Estações e pontos de acesso só podem se comunicar se forem compatíveis com o mesmo padrão. De forma a serem compatíveis com a maior quantidade possível de equipamentos, tanto pontos de acesso quanto dispositivos com capacidade de comunicação Wi-Fi são compatíveis com diversos padrões ao mesmo tempo.

Apresentamos, na Tabela 4, uma comparação das principais características dos protocolos IEEE 802.11 existentes, indicando, em particular, qual banda cada padrão pode operar (2,4 GHz ou 5 GHz) e as larguras de canal suportadas. A banda e a largura do canal que serão usadas na prática dependerão da configuração dos equipamentos.

Tabela 4: Resumo dos padrões IEEE 802.11.

Padrão	Nome	Ano	Banda			Canais							Transmissão
			2,4 GHz	5 GHz	6 GHz	20 MHz	22 MHz	40 MHz	80 MHz	160 MHz	240 MHz	320 MHz	
802.11-1997	“Wi-Fi 0”	1997	✓	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✗	FHSS DSSS Infravermelho
802.11b	“Wi-Fi 1”	1999	✓	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✗	DSSS
802.11a	“Wi-Fi 2”	1999	✗	✓	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	OFDM
802.11g	“Wi-Fi 3”	2003	✓	✗	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	OFDM
802.11n	Wi-Fi 4	2009	✓	✓	✗	✓	✗	✓	✗	✗	✗	✗	MIMO-OFDM
802.11ac Wave 1	Wi-Fi 5 Wave 1	2013	✗	✓	✗	✓	✗	✓	✓	✗	✗	✗	MIMO-OFDM
802.11ac Wave 2	Wi-Fi 5 Wave 2	2016	✗	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✗	✗	MU-MIMO-OFDM*
802.11ax	Wi-Fi 6	2019	✓	✓	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✗	✗	MU-MIMO-OFDMA
802.11ax	Wi-Fi 6E	2021	✗	✗	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✗	✗	MU-MIMO-OFDMA
802.11be	Wi-Fi 7	2024	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓	MU-MIMO-OFDMA

\* Apenas no sentido *downlink* (do ponto de acesso às estações).

Falaremos, a seguir, sobre cada um desses padrões e suas principais características.

## IEEE 801.11-1997 (“Wi-Fi 0”)

O primeiro padrão IEEE 802.11 foi lançado em 1997, e como ele não recebeu nenhuma letra após o seu nome, utilizamos o seu ano de lançamento para identificá-lo, de forma que não haja confusão: quando dizemos “IEEE 802.11”, estamos falando sobre todos os padrões, de forma coletiva, mas quando dizemos “IEEE 802.11-1997”, estamos falando deste padrão específico.

Ele podia utilizar transmissões sem fio através de luz infravermelha (que foi abandonada nos padrões seguintes) ou de radiofrequência, utilizando as técnicas FHSS (Frequency-Hopping Spread Spectrum) ou DSSS (Direct-Sequence Spread Spectrum). Como esse padrão e suas técnicas não são mais utilizados na prática, não iremos explicar o seu funcionamento.

As principais características do padrão IEEE 802.11-1997 (“Wi-Fi 0”) são:

- ◆ **Ano de lançamento:** 1997
- ◆ **Faixa de frequência:** 2,4 GHz
- ◆ **Canais:** 22 MHz (DSSS) ou 1 MHz (FHSS)
- ◆ **Métodos de transmissão:** Infravermelho, FHSS ou DSSS
- ◆ **Velocidades disponíveis:** 2 Mbit/s e 1 Mbit/s

## IEEE 802.11b ("Wi-Fi 1")

O IEEE 802.11b manteve o método de transmissão DSSS herdado do IEEE 802.11-1997 e aumentou as velocidades disponíveis.

As principais características do padrão IEEE 802.11b ("Wi-Fi 1") são:

- ◆ **Ano de lançamento:** 1999
- ◆ **Faixa de frequência:** 2,4 GHz
- ◆ **Canais:** 22 MHz
- ◆ **Método de transmissão:** DSSS
- ◆ **Velocidades disponíveis:** 11 Mbit/s, 5,5 Mbit/s, 2 Mbit/s e 1 Mbit/s

## IEEE 802.11a ("Wi-Fi 2")

O padrão IEEE 802.11a foi o primeiro a utilizar a faixa de frequência de 5 GHz, mas não era compatível com a faixa de 2,4 GHz, portanto, era incompatível com os padrões anteriores. Para aumentar a compatibilidade, equipamentos IEEE 802.11a poderiam também ser IEEE 802.11b, o que encarecia o seu custo.

Este padrão introduziu um novo método de transmissão chamado OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing, multiplexação por divisão de frequência ortogonal) utilizando canais de 20 MHz, configuração que é utilizada até hoje, e por isto um breve estudo sobre este método de transmissão é necessário.

As principais características do padrão IEEE 802.11a ("Wi-Fi 2") são:

- ◆ **Ano de lançamento:** 1999
- ◆ **Faixa de frequência:** 5 GHz
- ◆ **Canais:** 20 MHz
- ◆ **Método de transmissão:** OFDM
- ◆ **Velocidades disponíveis:** 54 Mbit/s, 48 Mbit/s, 36 Mbit/s, 24 Mbit/s, 18 Mbit/s, 12 Mbit/s, 9 Mbit/s e 6 Mbit/s

## OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing)

O padrão IEEE 802.11a ("Wi-Fi 2") introduziu o método de transmissão OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing, multiplexação por divisão de frequência ortogonal), utilizado por todos os padrões subsequentes. Por isso, uma pequena explicação de como esta técnica funciona é necessária.

Com ela, o canal é dividido em subcanais, também chamados subportadoras ou tons.

No caso do IEEE 802.11a ("Wi-Fi 2") e IEEE 802.11g ("Wi-Fi 3"), eram utilizadas 52 subportadoras e, destas, 48 poderiam ser utilizadas para a transmissão de dados. As outras quatro eram subportadoras pilotos, que transmitem valores fixos conhecidos pelo transmissor e receptor, utilizadas para separar grupos de subportadoras e auxiliar na correção das imperfeições do sinal recebido. Padrões posteriores aumentaram o número de subportadoras.

O transmissor pega o dado a ser transmitido, o divide em pedaços e transmite cada pedaço em um subcanal, em paralelo. Ver Figura 10. O resultado é uma maior resistência contra interferências eletromagnéticas.

Há duas explicações básicas sobre como esta técnica aumenta o desempenho.

Quanto mais lenta uma transmissão, mais ela é resistente a interferências eletromagnéticas. Basta fazer uma analogia com o mundo real: há uma maior probabilidade de você entender o que uma pessoa diz quando ela está falando lentamente do que quando ela está falando de forma rápida, em particular quando há ruído no ambiente.

No OFDM, temos uma divisão da taxa de transmissão total. Se temos uma transmissão de 54 Mbit/s e 48 subcanais OFDM para a transmissão de dados, cada subcanal terá uma taxa de transferência máxima de 1,125 Mbit/s ( $1,125 \text{ Mbit/s} \cdot 48 \text{ canais} = 54 \text{ Mbit/s}$ ). Como canal subcanal trabalhará a uma taxa de transmissão bem menor, menos a comunicação será afetada por interferências eletromagnéticas.

Além disso, sem o uso da técnica OFDM, se o transmissor transmitir o dado "inteiro" em um canal e houver uma interferência em apenas parte do canal, o dado inteiro será perdido (chegará corrompido ao receptor) e terá de ser retransmitido. Porém, com a técnica OFDM, esta mesma interferência corromperia apenas alguns dos pedaços dos dados, e apenas estes pedaços precisariam ser retransmitidos: os pedaços que chegaram íntegros ao destino seriam aproveitados. Com isto, ganha-se desempenho.

## IEEE 802.11g ("Wi-Fi 3")

O IEEE 802.11g foi simplesmente uma adaptação do IEEE 802.11a ("Wi-Fi 2") para operar na faixa de 2,4 GHz.

As principais características do padrão IEEE 802.11g ("Wi-Fi 3") são:

- ◆ **Ano de lançamento:** 2003
- ◆ **Faixa de frequência:** 2,4 GHz
- ◆ **Canais:** 20 MHz
- ◆ **Método de transmissão:** OFDM

◆ **Velocidades disponíveis:** 54 Mbit/s, 48 Mbit/s, 36 Mbit/s, 24 Mbit/s, 18 Mbit/s, 12 Mbit/s, 9 Mbit/s e 6 Mbit/s

## IEEE 802.11n (Wi-Fi 4)

O padrão IEEE 802.11n (Wi-Fi 4) foi o primeiro a permitir a operação tanto na banda de 2,4 GHz quanto na banda de 5 GHz, introduzindo canais de 40 MHz, formados pela junção de dois canais de 20 MHz. Note que, apesar de, teoricamente, ser possível o uso de canais de 40 MHz na banda de 2,4 GHz, esta configuração não é recomendada.

Outra novidade introduzida neste padrão foi a técnica MIMO (Multiple Input, Multiple Output), que permite a transmissão de mais de um dado simultaneamente utilizando uma técnica de multiplexação espacial. Como esta técnica é também utilizada por todos os padrões posteriores, veremos em mais detalhes como ela funciona no próximo tópico.

O padrão IEEE 802.11n também introduziu uma técnica denominada *beamforming*, porém, de forma opcional. Se esta técnica fosse utilizada, a técnica MIMO não poderia ser usada, e é por este motivo que o *beamforming* só passou a ser utilizado de forma efetiva a partir da segunda geração do Wi-Fi 5 (IEEE 802.11ac Wave 2), com a introdução da técnica MU-MIMO. Explicaremos isto melhor no tópico [Beamforming](#).

As principais características do padrão IEEE 802.11n (Wi-Fi 4) são:

- ◆ **Ano de lançamento:** 2003
- ◆ **Faixa de frequência:** 2,4 GHz e 5 GHz
- ◆ **Canais:** 20 MHz e 40 MHz
- ◆ **MIMO-OFDM:** até quatro fluxos espaciais
- ◆ **Outros recursos:** *beamforming* (opcional, não funciona em conjunto com o MIMO)
- ◆ **Velocidades disponíveis:** ver [Tabela 5](#)

## MIMO (Multiple Input, Multiple Output)

A partir do Wi-Fi 4 (IEEE 802.11n), é possível a utilização de mais de uma antena para a transmissão e recepção de dados em paralelo, isto é, ao mesmo tempo, aumentando o desempenho.

Assim, com um ponto de acesso utilizando duas antenas para a transmissão de dados para uma estação que tenha duas antenas, dobraríamos o desempenho em comparação à mesma configuração utilizando apenas uma única antena.

Esta técnica é conhecida como multiplexação espacial, e cada caminho existente entre o ponto de acesso e as estações é denominado *fluxo espacial*. Assim, na comunicação utilizando duas antenas, temos dois fluxos espaciais disponíveis.

É importante notar que o número de fluxos espaciais será determinado pelo mínimo denominador comum. Por exemplo, na comunicação entre um ponto de acesso com quatro antenas e uma estação com duas antenas, apenas dois fluxos espaciais estarão disponíveis: apesar de o ponto de acesso permitir a criação de quatro fluxos espaciais, a estação só é capaz de trabalhar com dois. Na prática, a maioria das estações só tem uma ou duas antenas. Equipamentos muito topo de linha (alguns modelos de MacBooks e laptops Dell XPS, por exemplo) vêm com três antenas. Não temos conhecimento de dispositivos que venham com quatro antenas.

Você verá, no mercado, pontos de acesso com várias antenas, mas não necessariamente isso significa que o equipamento é capaz de formar a mesma quantidade de fluxos espaciais. Em muitos casos, as antenas adicionais não são independentes e estão ali apenas para reforçar o sinal das antenas de transmissão e evitar zonas de sombra. Para saber o número de fluxos espaciais que um equipamento suporta, você deverá localizar, em sua lista de especificações técnicas, o valor apresentado na linha “MIMO”. Por exemplo, “MIMO 4x4” significa que o ponto de acesso suporta quatro fluxos espaciais (o primeiro número indica a quantidade de antenas que é utilizada na transmissão, e o segundo, na recepção).

## Velocidades

O padrão Wi-Fi 4 (IEEE 802.11n) introduziu o conceito de tabela MCS (Modulation Coding Scheme). A velocidade máxima possível dependerá de diversos fatores, como a quantidade de fluxos espaciais, a largura do canal utilizado e da duração do intervalo de guarda. O intervalo de guarda, indicado na tabela em nanossegundos (ns) é um tempo adicionado entre transmissões de símbolos OFDM.

Como consequência, a velocidade máxima que será obtida na rede Wi-Fi dependerá dos equipamentos utilizados, lembrando sempre que a comunicação é nivelada pelo mínimo denominador comum. Mesmo que você tenha um ponto de acesso capaz de operar com quatro fluxos espaciais, a velocidade máxima estará limitada à quantidade de fluxos espaciais suportados pela estação. Um dispositivo que tenha apenas uma única antena, por exemplo, só permitirá o uso dos índices MCS zero a sete, limitando a conexão a uma velocidade máxima de 150 Mbit/s, caso seja utilizado canal de 40 MHz e intervalo de guarda de 400 ns. Caso o canal utilizado seja de 20 MHz, o desempenho máximo será de 72,2 Mbit/s. Ver Tabela 5.

Além disso, estamos falando da velocidade máxima disponível. Na prática, o transmissor e o receptor negociarão a velocidade que eles conseguem se comunicar com estabilidade. Ocorre para todos os padrões IEEE 802.11: começa-se tentando estabelecer uma conexão com a velocidade máxima, mas, de acordo com a presença de interferências eletromagnéticas, ou da intensidade do sinal, pode ser que a conexão seja estabelecida e mantida a uma velocidade mais baixa.

Apenas para reforçar a ideia, dada a sua importância: qual é a velocidade máxima, na prática, que é obtida em uma rede Wi-Fi 4 (IEEE 802.11n)? Dependerá dos equipamentos. Não é possível responder a esta pergunta sem saber as especificações técnicas do circuito Wi-Fi dos equipamentos que são utilizados na rede.

Essas mesmas ideias se aplicam para os padrões seguintes.

**Tabela 5: Taxas de transferência disponíveis no IEEE 802.11n (Wi-Fi 4).**

Índice MCS	Fluxos espaciais	Modulação	Taxa de codificação	Taxa de transferência (Mbit/s)			
				20 MHz		40 MHz	
				800 ns	400 ns	800 ns	400 ns
0	1	BPSK	1/2	6,5	7,2	13,5	15
1	1	QPSK	1/2	13	14,4	27	30
2	1	QPSK	3/4	19,5	21,7	40,5	45
3	1	16-QAM	1/2	26	28,9	54	60
4	1	16-QAM	3/4	39	43,3	81	90
5	1	64-QAM	2/3	52	57,8	108	120
6	1	64-QAM	3/4	58,5	65	121,5	135
7	1	64-QAM	5/6	65	72,2	135	150
8	2	BPSK	1/2	13	14,4	27	30
9	2	QPSK	1/2	26	28,9	54	60
10	2	QPSK	3/4	39	43,3	81	90
11	2	16-QAM	1/2	52	57,8	108	120
12	2	16-QAM	3/4	78	86,7	162	180
13	2	64-QAM	2/3	104	115,6	216	240
14	2	64-QAM	3/4	117	130	243	270
15	2	64-QAM	5/6	130	144,4	270	300
16	3	BPSK	1/2	19,5	21,7	40,5	45
17	3	QPSK	1/2	39	43,3	81	90
18	3	QPSK	3/4	58,5	65	121,5	135
19	3	16-QAM	1/2	78	86,7	162	180
20	3	16-QAM	3/4	117	130	243	270
21	3	64-QAM	2/3	156	173,3	324	360
22	3	64-QAM	3/4	175,5	195	364,5	405
23	3	64-QAM	5/6	195	216,7	405	450
24	4	BPSK	1/2	26	28,8	54	60
25	4	QPSK	1/2	52	57,6	108	120
26	4	QPSK	3/4	78	86,8	162	180

Índice MCS	Fluxos espaciais	Modulação	Taxa de codificação	Taxa de transferência (Mbit/s)			
				20 MHz		40 MHz	
				800 ns	400 ns	800 ns	400 ns
29	4	64-QAM	2/3	208	231,2	432	480
30	4	64-QAM	3/4	234	260	486	540
31	4	64-QAM	5/6	260	288,8	540	600
32	1	BPSK	1/4	ND	ND	6,0	6,7

## IEEE 802.11ac (Wi-Fi 5)

O IEEE 802.11ac (Wi-Fi 5) teve um lançamento diferente dos demais padrões, pois foi feito em duas fases, denominadas Wave 1 (2013) e Wave 2 (2016), gerando um pouco de confusão no mercado, pois características avançadas introduzidas por esse padrão estão disponíveis apenas em equipamentos de segunda geração (Wave 2), e não em todos os equipamentos.

Ambas as gerações desse padrão só suportam operação na faixa de 5 GHz. Isto significa que equipamentos IEEE 802.11ac (Wi-Fi 5) normalmente também são IEEE 802.11n (Wi-Fi 4) para permitirem comunicação na faixa de 2,4 GHz.

A primeira geração trouxe como principal novidade a possibilidade de uso de canais de 80 MHz e uma capacidade teórica para até oito fluxos espaciais, mas, normalmente, equipamentos dessa fase suportavam até três fluxos espaciais.

As principais características do padrão IEEE 802.11ac (Wi-Fi 5) Wave 1 são:

- ◆ **Ano de lançamento:** 2013
- ◆ **Faixa de frequência:** 5 GHz
- ◆ **Canais:** 20 MHz, 40 MHz e 80 MHz
- ◆ **MIMO-OFDM:** até oito fluxos espaciais em teoria, três fluxos espaciais na prática
- ◆ **Velocidades disponíveis:** ver [Tabela 6](#)

A segunda geração trouxe os recursos avançados que são alardeados como grandes novidades do padrão, como o *beamforming* e o MU-MIMO, sobre os quais falaremos em mais detalhes. As principais características do padrão IEEE 802.11ac (Wi-Fi 5) Wave 2 são:

- ◆ **Ano de lançamento:** 2016
- ◆ **Faixa de frequência:** 5 GHz
- ◆ **Canais:** 20 MHz, 40 MHz, 80 MHz, 80+80 MHz e 160 MHz
- ◆ **MU-MIMO-OFDM:** até quatro fluxos espaciais (até quatro clientes), apenas no sentido *downlink*

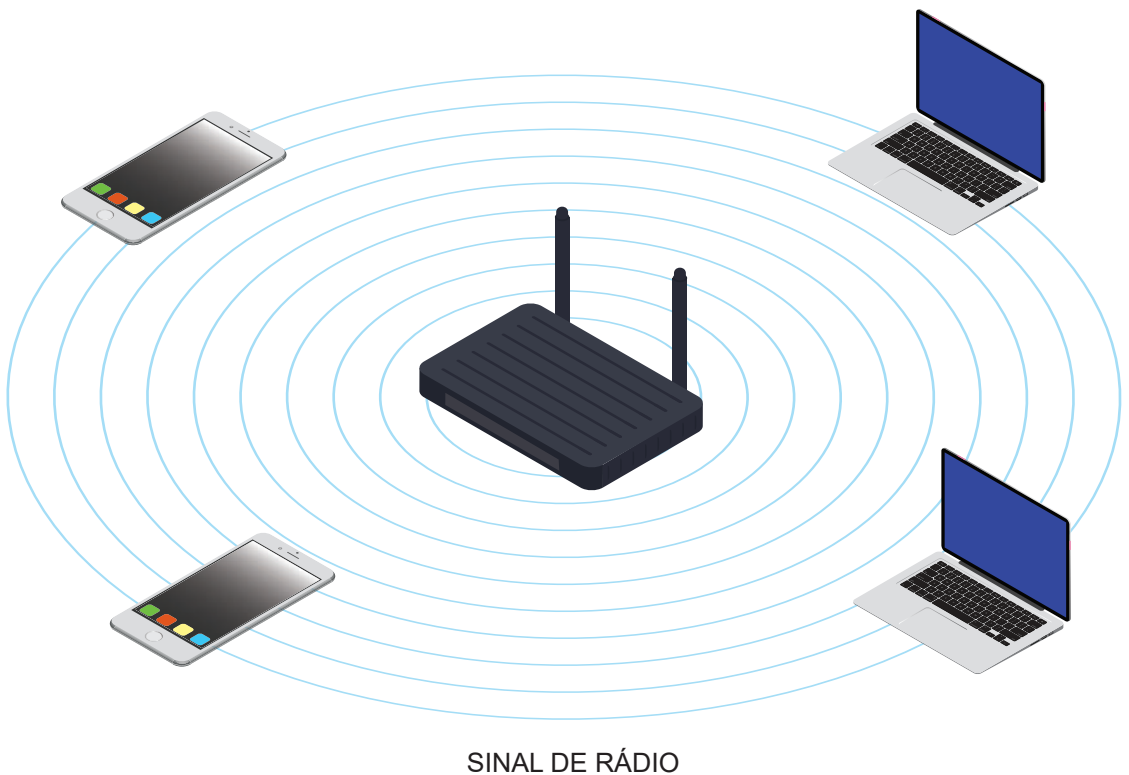


◆ **Outros recursos:** operação dinâmica de banda, que será explicada no tópico [Perfuração de Preâmbulo](#)

◆ **Velocidades disponíveis:** ver [Tabela 6](#)

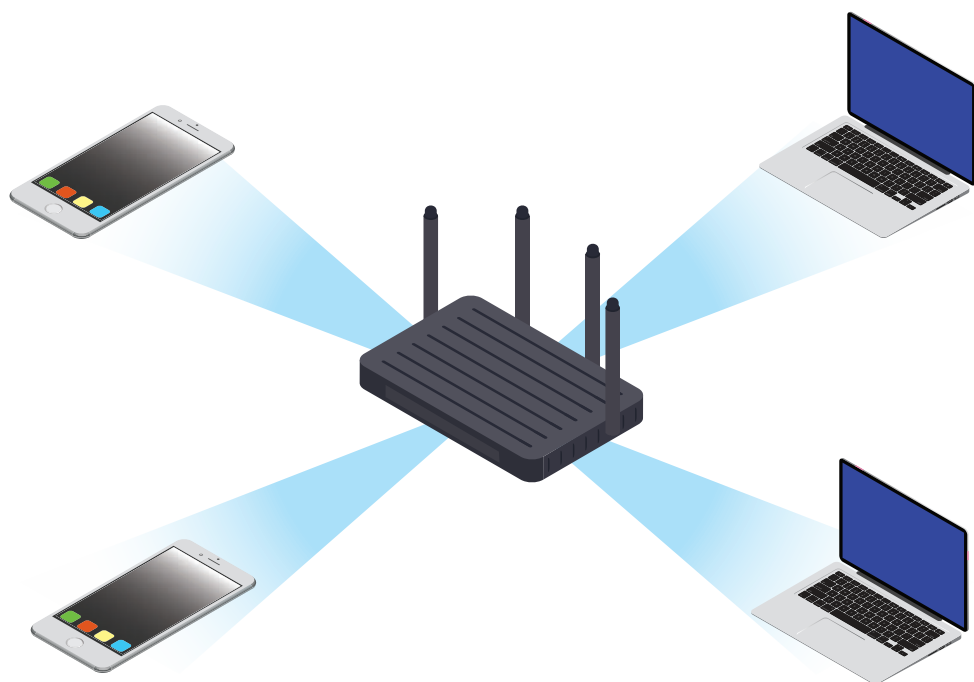
## Beamforming

Antenas utilizadas em redes Wi-Fi normalmente são unidirecionais, significando que as ondas de rádio se propagam em todas as direções. Ver Figura 7. Isso faz com que equipamentos localizados dentro do raio de alcance da antena não possam transmitir dados enquanto o canal estiver sendo utilizado, conforme explicamos no tópico [Controle de Acesso ao Meio](#).



**Figura 7: Antena omnidirecional.**

Vimos que, a partir do padrão IEEE 802.11n (Wi-Fi 4), os pontos de acesso normalmente têm mais de uma antena para uso da técnica MIMO. Com a presença de um conjunto de antenas, é possível polarizá-las a fim de criar um sinal de rádio com um formato que permite apontá-lo em direções específicas. Esta técnica é denominada *beamforming*. Com isso, o ponto de acesso pode direcionar o sinal de rádio apenas na direção da estação de destino do quadro que será enviado. Ver Figura 8.



---

**Figura 8:** *Beamforming.*

Há duas consequências práticas com o uso da técnica de *beamforming*.

A primeira é a possibilidade de transmissão de quadros de dados exatamente ao mesmo tempo, desde que estejam indo em direções diferentes. Como agora as ondas de rádio estão focadas, não há mais o problema de interferência que ocorria na transmissão omnidirecional. No exemplo da Figura 8, o ponto de acesso poderia enviar quadros para todas as quatro estações simultaneamente, algo que antes era impossível de ser feito.

Ressaltamos que isso só é possível pela existência de quatro feixes independentes, isto é, as estações não estão na mesma direção. No caso de estações que estiverem no alcance de um mesmo feixe, não será possível o envio de quadros simultâneos para elas, e teremos a situação tradicional de alternância no envio de quadros.

A segunda consequência é um maior alcance do sinal, pois a mesma energia que antes era utilizada para uma transmissão em todas as direções está agora focada na transmissão em direções específicas. Logo, o sinal consegue ir mais longe.

## MU-MIMO (Multi-User – Multiple Input, Multiple Output)

Estudamos, anteriormente, o funcionamento da técnica MIMO, que consiste na criação de mais de um fluxo espacial (transmissão e recepção com mais de uma antena) para aumento no desempenho. Na técnica MIMO convencional, também denominada SU-MIMO (Single User MIMO), a transmissão é feita para um único receptor.

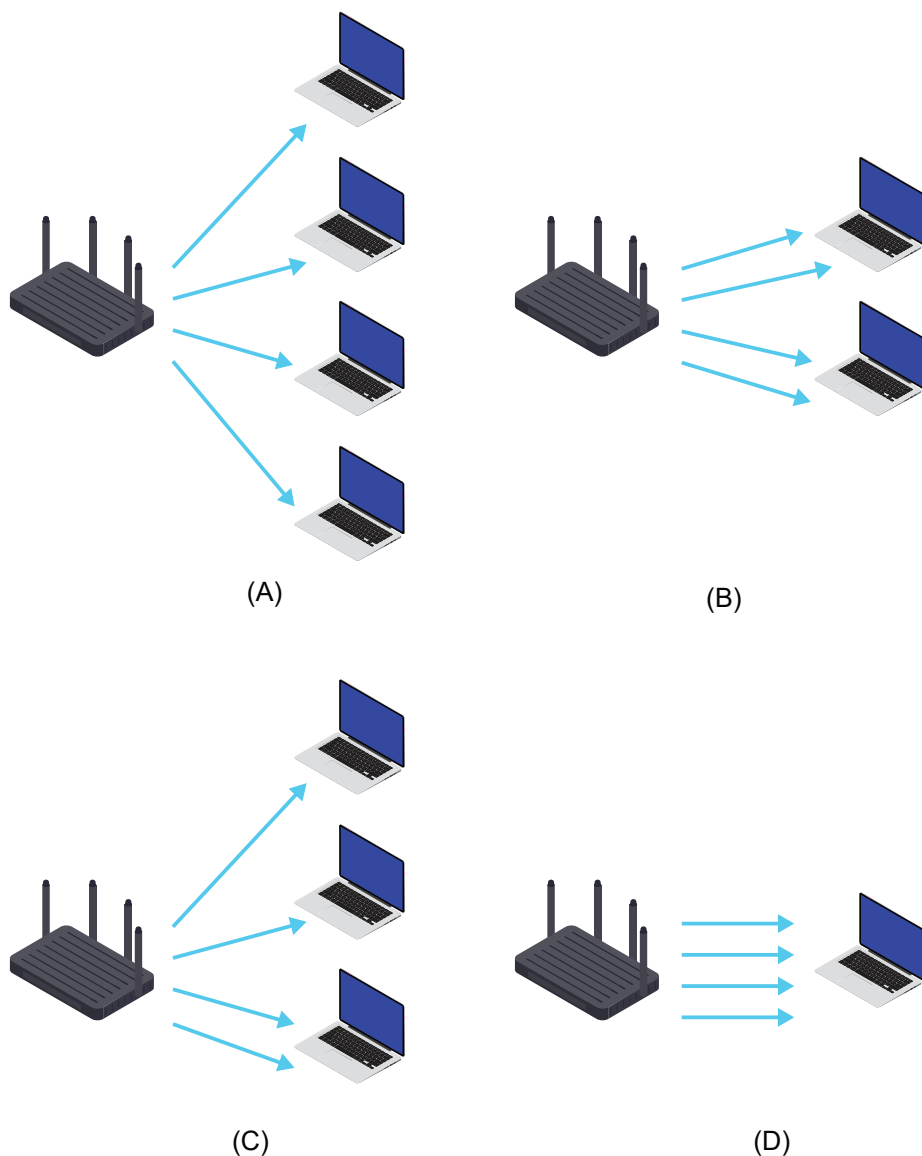
A técnica MU-MIMO (Multi-User MIMO) é baseada na técnica *beamforming* que, como vimos, permite a transmissão de mais de um quadro ao mesmo tempo para dispositivos diferentes e que estejam em direções diferentes. O MU-MIMO dá um passo além, permitindo mais de um fluxo espacial nessas comunicações.

Para que você entenda melhor como essa técnica funciona, vamos supor um ponto de acesso que tenha a capacidade de gerar quatro fluxos espaciais (quatro antenas) com capacidade MU-MIMO. Estes quatro fluxos espaciais poderão ser usados para a transmissão simultânea de quadros para até quatro estações. Esta seria a aplicação da técnica *beamforming* tal como explicamos no tópico anterior e vista na Figura 8, sendo também o caso “A” da Figura 9. É importante notar que, nesta situação, só haverá um fluxo espacial disponível para cada estação e, portanto, do ponto de vista das estações, é como se a técnica MIMO não estivesse sendo utilizada (não receberão mais de um quadro de dados por vez).

No entanto, se o ponto de acesso precisar enviar quadros simultaneamente para apenas dois clientes e se cada um deles suportar dois fluxos espaciais (isto é, tiver duas antenas), o ponto de acesso será capaz de utilizar dois fluxos espaciais para cada cliente, simultaneamente, dobrando o desempenho teórico, tal como ocorria na técnica SU-MIMO. Este é o caso “B” da Figura 8.

Expandindo nosso exemplo, se o nosso ponto de acesso quiser enviar três quadros simultaneamente para três clientes, dois utilizariam um fluxo espacial e o terceiro poderia utilizar dois fluxos espaciais, caso tenha duas antenas. É o que ilustramos em “C” na Figura 8.

E, caso o ponto de acesso não tiver a necessidade de transmitir dados para mais de uma estação em um determinado momento, todos os fluxos espaciais disponíveis poderão ser utilizados pela estação de destino, como mostramos na situação “D” da Figura 8. Neste caso, a estação deverá suportar quatro fluxos espaciais, isto é, dispor de quatro antenas, o que nunca vimos na prática, como já discutido anteriormente, pois estações normalmente apresentam apenas uma ou duas antenas, sendo um exemplo mais teórico.



**Figura 9: Configurações possíveis para MU-MIMO com quatro fluxos espaciais.**

Pode ser que você tenha ficado com a impressão que, em uma rede IEEE 802.11ac (Wi-Fi 5) Wave 2 com a técnica MU-MIMO ativada, só é possível haver até quatro dispositivos conectados à rede, o que não é o caso. A rede em si pode ter dezenas de estações conectadas: o limite informado é para quatro comunicações *simultâneas*. No caso de o ponto de acesso tiver dados para serem enviados a mais de quatro

estações, os quadros excedentes precisarão aguardar o canal estar livre, como tradicionalmente ocorre.

Além disso, repare que, se uma estação tiver a capacidade de comunicação com mais de um fluxo espacial (mais de uma antena), haverá momentos em que ela não poderá utilizar todos os fluxos espaciais disponíveis pelo fato de os fluxos espaciais adicionais estarem sendo utilizados pelo ponto de acesso para a comunicação em paralelo com outras estações. Ver casos “A” e “C” da Figura 9.

No padrão IEEE 802.11ac (Wi-Fi 5) Wave 2, a técnica MU-MIMO só funciona no sentido *downlink*, isto é, do ponto de acesso para as estações (sentido de *download*). A partir do próximo padrão (IEEE 802.11ax, Wi-Fi 6), o MU-MIMO está disponível nos dois sentidos.

Importante notar que não são todos os equipamentos IEEE 802.11ac (Wi-Fi 5) Wave 2 que suportam MU-MIMO.

## Velocidades

Na Tabela 6, você confere as taxas de transferência disponíveis no padrão IEEE 802.11ac (Wi-Fi 5). Os valores referem-se somente a um fluxo espacial. Para mais fluxos espaciais, você deverá multiplicar o valor pela quantidade de fluxos espaciais existentes na estação.

É importante enfatizarmos que o número de fluxos espaciais deve ser verificado do ponto de vista da estação. Um ponto de acesso pode suportar quatro fluxos espaciais, mas se a estação só suportar um fluxo espacial, a taxa de transferência máxima estará limitada a um fluxo espacial.

Da mesma forma, por conta do uso da técnica MU-MIMO, nas transmissões simultâneas, o número de fluxos espaciais poderá ser menor do que a quantidade suportada pelo equipamento. Por exemplo, com um ponto de acesso suportando quatro fluxos espaciais, se houver quatro clientes recebendo dados ao mesmo tempo, só haverá um único fluxo espacial para cada um deles, mesmo que eles suportem mais de um fluxo espacial (situação “A” da Figura 9).

Observe que, no caso de equipamentos que suportam mais de um fluxo espacial, a quantidade de fluxos espaciais utilizada pode variar a cada momento, pois estamos falando de transmissões *simultâneas*. Mesmo que existam quatro ou mais estações na rede, um equipamento com duas antenas poderá utilizar dois fluxos espaciais, caso o ponto de acesso não tenha dados a serem transmitidos para as demais máquinas naquele exato momento.

Estes mesmos conceitos deverão ser levados em consideração na análise dos padrões posteriores.

Tabela 6: Taxas de transferência disponíveis no IEEE 802.11ac (Wi-Fi 5).

Índice MCS	Modulação	Taxa de codificação	Taxa de transferência (Mbit/s)							
			20 MHz		40 MHz		80 MHz		160 MHz	
			800 ns	400 ns	800 ns	400 ns	800 ns	400 ns	800 ns	400 ns
0	BPSK	1/2	6,5	7,2	13,5	15	29,3	32,5	58,5	65
1	QPSK	1/2	13	14,4	27	30	58,5	65	117	130
2	QPSK	3/4	19,5	21,7	40,5	45	87,8	97,5	175,5	195
3	16-QAM	1/2	26	28,9	54	60	117	130	234	260
4	16-QAM	3/4	39	43,3	81	90	175,5	195	351	390
5	64-QAM	2/3	52	57,8	108	120	234	260	468	520
6	64-QAM	3/4	58,5	65	121,5	135	263,3	292,5	526,5	585
7	64-QAM	5/6	65	72,2	135	150	292,5	325	585	650
8	256-QAM	3/4	78	86,7	162	180	351	390	702	780
9	256-QAM	5/6	ND	ND	180	200	390	433,3	780	866,7

## IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6/6E)

Diferentemente do padrão anterior, o IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6) é compatível tanto com a banda de 2,4 GHz, quanto de 5 GHz, acrescentando compatibilidade à banda de 6 GHz em sua revisão 6E, lançada dois anos após o padrão original.

A grande novidade do padrão IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6/6E) foi a introdução da técnica de transmissão OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access, divisão de frequência ortogonal de acesso múltiplo), aumento da capacidade de fluxos espaciais e outras novidades sobre as quais explicaremos em detalhes adiante.

As principais características do padrão IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6/6E) são:

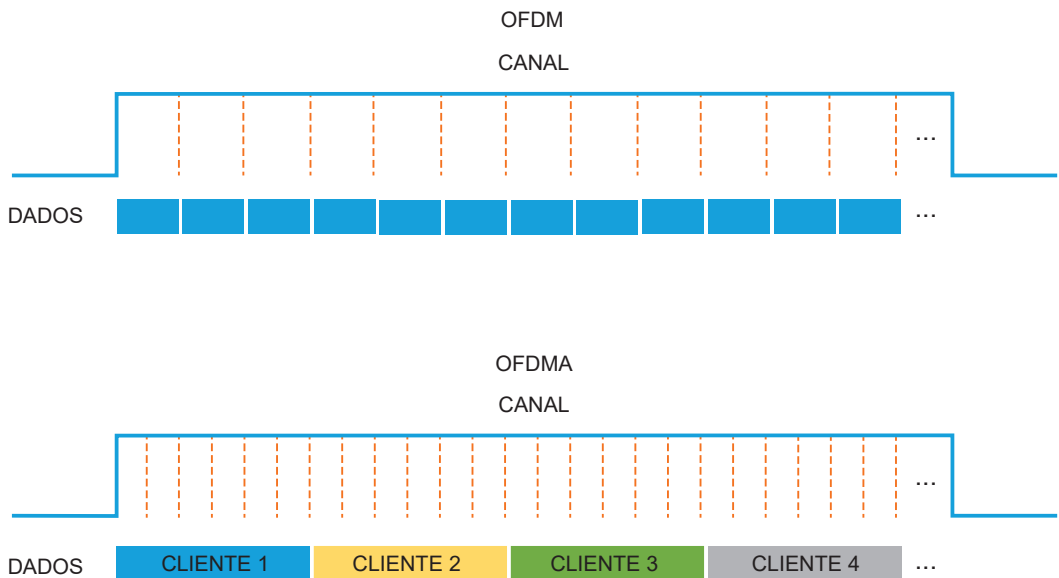
- ◆ **Ano de lançamento:** 2019 (Wi-Fi 6) e 2021 (Wi-Fi 6E)
- ◆ **Faixa de frequência:** 2,4 GHz e 5 GHz (Wi-Fi 6) ou 6 GHz (Wi-Fi 6E)
- ◆ **Canais:** 20 MHz, 40 MHz, 80 MHz, 80+80 MHz e 160 MHz
- ◆ **MU-MIMO-OFDMA:** até quatro fluxos espaciais (quatro clientes) em 2,4 GHz e até oito fluxos espaciais (até oito clientes) em 5 GHz ou 6 GHz, bidirecional
- ◆ **Outros recursos:** perfuração de pré-âmbulo, coloração do BSS (reúso espacial) e economia de energia
- ◆ **Velocidades disponíveis:** ver [Tabela 7](#)

## OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access)

A técnica OFDMA é uma evolução da OFDM que permite a utilização de subcanais para a transmissão de dados a clientes diferentes, ao contrário da OFDM, onde todos os subcanais são utilizados na transmissão de dados a um mesmo cliente.

O canal agora é dividido em muito mais subportadoras ou tons. Enquanto, no OFDM, cada subportadora ou tom corresponde diretamente a um subcanal, no OFDMA subportadoras são agrupadas para formar um subcanal e pode haver subcanais de tamanhos diferentes (utilizando mais ou menos subportadoras). No linguajar técnico, cada subcanal de uma transmissão OFDMA é chamado RU (Resource Unit, unidade de recurso).

Na Figura 10, ilustramos graficamente a diferença entre o OFDM e o OFDMA.



*Figura 10: Diferença básica das técnicas OFDM e OFDMA.*

## Perfuração de Preâmbulo

Como vimos, canais mais largos são formados pela junção de canais menores. Por exemplo, canais de 80 MHz são formados por dois canais de 40 MHz ou quatro de 20 MHz.

Quando a rede Wi-Fi utiliza um canal maior, se um dos canais menores dentro deste canal maior estiver ocupado ou oferecer algum tipo de interferência eletromagnética, em teoria o transmissor perceberá que parte da faixa de frequência necessária para a transmissão está sendo utilizada e terá de aguardar o canal inteiro estar livre para poder efetuar a transmissão, por conta do mecanismo CSMA/CA.

O padrão anterior, IEEE 802.11ac (Wi-Fi 5), traz um recurso opcional denominado operação dinâmica de banda, que permite ao transmissor utilizar o canal parcialmente. Considere o exemplo da Figura 11, onde temos uma rede Wi-Fi utilizando o canal 42 (de 80 MHz) da banda de 5 GHz. Este canal é formado pelos canais 36, 40, 44 e 48 de 20 MHz. Se o canal 40 estiver ocupado, com a técnica de operação dinâmica de banda, em vez de o transmissor ter de aguardar todos os canais de 20 MHz estarem liberados para uso, ele pode utilizar imediatamente o canal 36 para transmitir dados. Neste caso, os canais 44 e 48 não podem ser utilizados por estarem localizados após o canal ocupado, sendo esta uma limitação desse recurso.

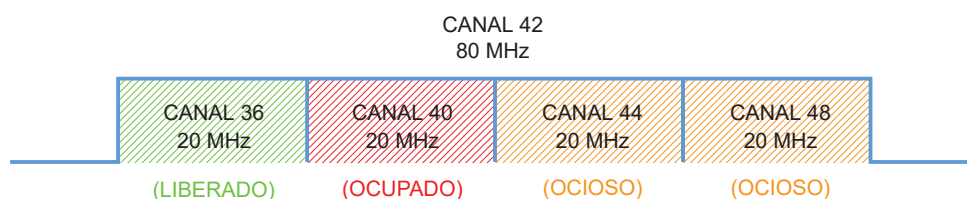
A taxa de transferência da transmissão, nesse caso, não será a mesma comparada a se o canal inteiro estivesse disponível para uso. Por outro lado, aumenta-se o desempenho, pois, sem o uso dessa técnica, o transmissor teria de aguardar para poder transmitir.

Continuando o mesmo exemplo, se o canal ocupado agora fosse o 44, o transmissor poderia utilizar os canais 36 e 40 para transmissão, porém o 48 não poderia ser utilizado e ficaria ocioso.

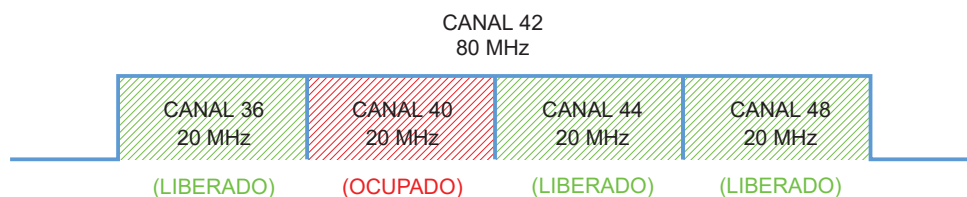
E se o canal ocupado fosse o 48, o transmissor poderia utilizar os canais 36 e 40 para transmissão, mas não o 44. Isto ocorre porque isto formaria um canal de 60 MHz (36, 40 e 44), e esse recurso só suporta a formação de canais de 20 MHz, 40 MHz ou 80 MHz.

E, se o canal ocupado fosse o 36, a técnica de operação dinâmica de banda não poderia ser utilizada, pois esta requer que o canal primário de 20 MHz esteja livre. Neste caso, o transmissor teria de aguardar esse canal estar livre para iniciar a transmissão.

#### OPERAÇÃO DINÂMICA DE BANDA (IEEE 802.11ac)



#### PERFURAÇÃO DE PREÂMBULO (IEEE 802.11ax)



**Figura 11: Operação dinâmica de banda e perfuração de pré-amplio.**



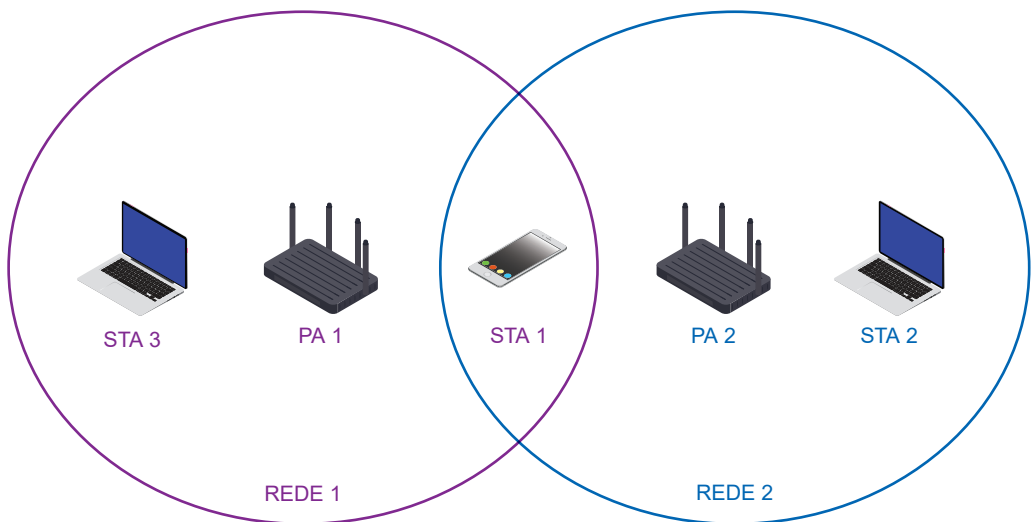
Em resumo, a operação dinâmica de banda não permite a utilização dos canais posteriores ao canal ocupado nem a formação de canais de larguras diferentes de 20 MHz, 40 MHz ou 80 MHz, limitações que não existem com a técnica de perfuração de preâmbulo, introduzida com o padrão IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6).

Como você pode ver na Figura 11, se o canal 40 estiver ocupado, com a perfuração de preâmbulo os outros três canais podem ser utilizados, diferentemente do que ocorria com a operação dinâmica de banda. Desta forma, o desempenho da rede é aumentado em situações em que um ou mais canais de 20 MHz estão ocupados.

## Coloração do BSS (Reúso Espacial)

Pelo funcionamento tradicional das redes Wi-Fi, o transmissor precisa aguardar até o canal estar livre para uso para poder utilizá-lo (ver tópico [Controle de Acesso ao Meio](#)). O grande problema de redes Wi-Fi em ambientes urbanos é a coexistência de várias redes utilizando os mesmos canais, o que aumenta a probabilidade de o canal estar sendo utilizado, diminuindo o desempenho da rede, pois o transmissor precisará aguardar mais tempo para poder enviar dados.

Considere o exemplo da Figura 12, onde temos duas redes operando no mesmo canal. Quando o ponto de acesso 1 (PA 1) envia um quadro à estação 1 (STA 1), se o ponto de acesso 2 (PA 2) quiser enviar, ao mesmo tempo, um quadro à estação 2 (STA 2), não poderá, pois ele perceberá que o canal está ocupado e terá de esperar até o canal desocupar.



**Figura 12: Coloração do BSS (reúso de frequência).**

A técnica de coloração do BSS, também conhecida como reuso espacial, mitiga este problema da seguinte forma: cada quadro enviado é “pintado” com a cor da rede. No exemplo da Figura 12, os quadros da rede 1 seriam “pintados” de roxo e os quadros da rede 2 seriam “pintados” de azul. É claro que esta é apenas uma metáfora; na prática, um número de identificação da rede é adicionado bem no início do quadro.

Retornando ao nosso exemplo, quando o ponto de acesso 1 enviar um quadro à estação 1, este estará agora “pintado” de roxo. O ponto de acesso 2, ao perceber que o canal está ocupado, observará agora dois fatores: a cor do quadro que está fazendo uso do canal e a intensidade do sinal.

Se o quadro for da mesma cor de sua rede, então o ponto de acesso terá de esperar. Mas, se o quadro for de outra cor, isto significa que o quadro pertence a outra rede e talvez seja possível utilizar o canal. O segundo ponto a observar, como destacado, é a intensidade do sinal. Se o sinal estiver fraco, significa que o equipamento emitindo o sinal está relativamente distante, e não gerará muita interferência se o ponto de acesso enviar um quadro ao mesmo tempo.

Continuando nosso exemplo, o ponto de acesso 2 perceberá que essas condições são verdadeiras e poderá enviar, ao mesmo tempo, um quadro à estação 2. Ou seja, agora, enquanto o ponto de acesso 1 envia um quadro à estação 1, o ponto de acesso 2 poderá enviar um quadro à estação 2, ao mesmo tempo, mesmo as duas redes utilizando o mesmo canal.

É importante notar que essa técnica só funciona se os pontos de acesso e as estações de todas as redes que estão utilizando o mesmo canal forem do padrão IEEE 802.11ax (Wii-Fi 6) ou superior, uma situação muito rara de acontecer na prática.

## Recursos de Economia de Energia

O padrão IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6) introduziu alguns recursos para a economia de energia de dispositivos operados a bateria. Os dois principais são o TWT (Target Wake Time) e o OMI (Operating Mode Indication).

Há certos dispositivos que, apesar de estarem em um modo de hibernação quando não estão em uso, precisam ainda assim ficar escutando a rede para serem acordados e poderem efetuar alguma tarefa. O recurso TWT possibilita ao ponto de acesso agendar com o dispositivo um determinado horário para acordar e acessar a rede. Com isto, o circuito de rede do equipamento pode ficar totalmente desligado enquanto ele estiver “dormindo”, fazendo com que a sua bateria dure mais tempo.

Os parâmetros da rede como número de fluxos espaciais a serem usados e o tamanho do canal são configurados pelo ponto de acesso. O recurso OMI permite que a estação informe ao ponto de acesso à configuração que ela prefere utilizar. Assim, quando o dispositivo está com sua bateria cheia, ele opera com a sua melhor configuração. Na medida em que a bateria vai se descarregando, o equipamento

pode decidir utilizar uma configuração mais modesta (diminuindo o número de fluxos espaciais, o tamanho do canal ou o índice MCS, por exemplo), acarretando uma queda no desempenho, porém permitindo que a bateria dure mais tempo.

## Velocidades

Na Tabela 7, você confere as taxas de transferência disponíveis no padrão IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6/6E). Os valores referem-se somente a um fluxo espacial. Para mais fluxos espaciais, você deverá multiplicar o valor pela quantidade de fluxos espaciais existentes na estação. Veja toda a discussão sobre esta questão no tópico [Velocidades](#) do padrão IEEE 802.11ac (Wi-Fi 5).

**Tabela 7: Taxas de transferência disponíveis no IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6/6E).**

Índice MCS	Modulação	Taxa de Codificação	Taxa de transferência (Mbit/s)							
			20 MHz		40 MHz		80 MHz		160 MHz	
			1600 ns	800 ns	1600 ns	800 ns	1600 ns	800 ns	1600 ns	800 ns
0	BPSK	1/2	8	8,6	16	17,2	34	36,0	68	72
1	QPSK	1/2	16	17,2	33	34,4	68	72,1	136	144
2	QPSK	3/4	24	25,8	49	51,6	102	108,1	204	216
3	16-QAM	1/2	33	34,4	65	68,8	136	144,1	272	282
4	16-QAM	3/4	49	51,6	98	103,2	204	216,2	408	432
5	64-QAM	2/3	65	68,8	130	137,6	272	288,2	544	576
6	64-QAM	3/4	73	77,4	146	154,9	306	324,4	613	649
7	64-QAM	5/6	81	86,0	163	172,1	340	360,3	681	721
8	256-QAM	3/4	98	103,2	195	206,5	408	432,4	817	865
9	256-QAM	5/6	108	114,7	217	229,4	453	480,4	907	961
10	1024-QAM	3/4	122	129,0	244	258,1	510	540,4	1021	1081
11	1024-QAM	5/6	135	143,4	271	286,8	567	600,5	1134	1201

## IEEE 802.11be (Wi-Fi 7)

O padrão Wi-Fi mais recente, IEEE 802.11be (Wi-Fi 7), trouxe diversas novidades para o aumento do desempenho. Entre elas, está o aumento da capacidade de fluxos espaciais para 16 e a possibilidade de uso de canais de até 320 MHz, sendo que canais maiores que 160 MHz só podem ser formados na faixa de 6 GHz. Note o uso da expressão *até*. Em teoria, é possível a utilização de canais de 240 MHz, por exemplo, que poderia ser montado de forma contígua ou através do uso de um canal de 160 MHz e outro de 80 MHz não contíguos. Falaremos mais adiante sobre os demais recursos introduzidos com esse padrão.

As principais características do padrão IEEE 802.11be (Wi-Fi 7) são:

- ◆ **Ano de lançamento:** 2024
- ◆ **Faixa de frequência:** 2,4 GHz, 5 GHz e 6 GHz
- ◆ **Canais:** até 320 MHz
- ◆ **MU-MIMO-OFDMA:** até 16 fluxos espaciais (até 16 clientes)
- ◆ **Outros recursos:** MLO (Multi-Link Operation), MIMO distribuído, MRU (Multiple Resource Unit) e coordenação entre pontos de acesso
- ◆ **Velocidades disponíveis:** ver [Tabela 8](#)

## MLO (Multi-Link Operation)

Até o padrão anterior, os pontos de acesso e estações operam utilizando apenas uma banda (2,4 GHz, 5 GHz ou 6 GHz), mesmo quando são compatíveis com mais de uma. A partir do IEEE 802.11be (Wi-Fi 7), os equipamentos podem transmitir e receber dados em mais de uma banda ao mesmo tempo, em paralelo, aumentando o desempenho.

## MIMO Distribuído

Com este recurso, é possível distribuir a técnica MIMO entre pontos de acesso presentes na mesma rede.

Como o padrão tem um limite de 16 fluxos espaciais, seria possível, pelo menos em teoria, juntar dois pontos de acesso com capacidade de oito fluxos espaciais cada ou mesmo quatro pontos de acesso com capacidade de quatro fluxos espaciais cada para aumentar o desempenho e capacidade de clientes possíveis de serem atendidos simultaneamente através da técnica MU-MIMO.

## MRU (Multiple Resource Unit)

Trata-se de um aprimoramento da multiplexação OFDMA. No IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6/6E), cada cliente só pode utilizar um único subcanal (RU). Já no IEEE 802.11be (Wi-Fi 7), um cliente pode utilizar mais de um subcanal (RU), em particular um que ficaria ocioso, aumentando o desempenho.

## Coordenação Entre Pontos de Acesso

Este padrão permite, finalmente, que os pontos de acesso se comuniquem para ajustar seus parâmetros de forma a diminuir a interferência entre eles. Isto é válido tanto para pontos de acesso que pertencem a uma mesma rede, como para pontos

de acesso de redes diferentes. Dessa forma, o desempenho em áreas onde haja mais de uma rede operando no mesmo canal é aumentada. Todavia, para que esta comunicação funcione, os pontos de acesso precisam ser IEEE 802.11be (Wi-Fi 7).

Velocidades

Na Tabela 8, você confere as taxas de transferência disponíveis no padrão IEEE 802.11be (Wi-Fi 7). Os valores referem-se somente a um fluxo espacial. Para mais fluxos espaciais, você deverá multiplicar o valor pela quantidade de fluxos espaciais existentes na estação. Veja toda a discussão sobre esta questão no tópico [Velocidades](#) do padrão IEEE 802.11ac (Wi-Fi 5).

Tabela 8: Taxas de transferência disponíveis no IEEE 802.11be (Wi-Fi 7).

Índice MCS	Modulação	Taxa de Codificação	Taxa de transferência (Mbit/s)														
			20 MHz			40 MHz			80 MHz			160 MHz			320 MHz		
			3200 ns	1600 ns	800 ns	3200 ns	1600 ns	800 ns	3200 ns	1600 ns	800 ns	3200 ns	1600 ns	800 ns	3200 ns	1600 ns	800 ns
0	BPSK	1/2	7	8	9	15	16	17	31	34	36	61	68	72	123	136	144
1	QPSK	1/2	15	16	17	29	33	34	61	68	72	122	136	144	245	272	288
2	QPSK	3/4	22	24	26	44	49	52	92	102	108	184	204	216	368	408	432
3	16-QAM	1/2	29	33	34	59	65	69	123	136	144	245	272	282	490	544	577
4	16-QAM	3/4	44	49	52	88	98	103	184	204	216	368	408	432	735	817	865
5	64-QAM	2/3	59	65	69	117	130	138	245	272	288	490	544	576	980	1089	1153
6	64-QAM	3/4	66	73	77	132	146	155	276	306	324	551	613	649	1103	1225	1297
7	64-QAM	5/6	73	81	86	146	163	172	306	340	360	613	681	721	1225	1361	1441
8	256-QAM	3/4	88	98	103	176	195	207	368	408	432	735	817	865	1470	1633	1729
9	256-QAM	5/6	98	108	115	195	217	229	408	453	480	817	907	961	1633	1815	1922
10	1024-QAM	3/4	110	122	129	219	244	258	459	510	540	919	1021	1081	1838	2042	2162
11	1024-QAM	5/6	122	135	143	244	271	287	510	567	600	1021	1134	1201	2042	2269	2402
12	4096-QAM	3/4	131	146	155	263	293	310	551	613	649	1103	1225	1297	2205	2450	2594
13	4096-QAM	5/6	146	163	172	293	325	344	613	681	721	1225	1361	1441	2450	2722	2882
14	BPSK-DCM-DUP	1/2	ND	ND	ND	ND	ND	ND	7	8	9	15	17	18	31	34	36
15	BPSK-DCM	1/2	4	4	4	7	8	9	15	17	18	31	34	36	61	68	72

Aprenda sobre REDES DE COMPUTADORES diretamente com o autor deste livro. Seja aluno de



# GABRIEL TORRES

## REDES WI-FI



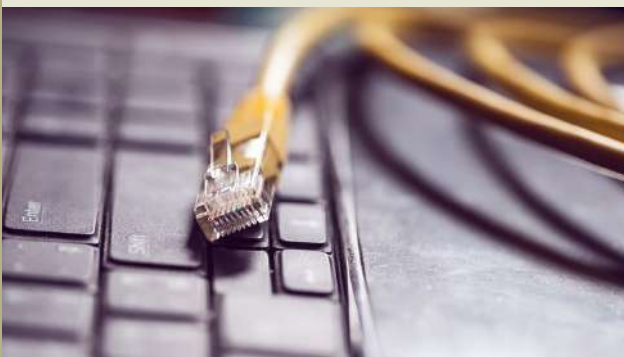
Neste curso você aprenderá sobre princípios de funcionamento de redes Wi-Fi, o uso do espectro eletromagnético, as versões do IEEE 802.11 até o IEEE 802.11be (Wi-Fi 7), segurança, configuração, desempenho e muito mais!

## ARQUITETURA DE REDES



Neste curso você aprenderá sobre princípios de funcionamento de redes, números binários, arquiteturas, comunicação, topologias, protocolos, equipamentos de rede, cabeamento, segurança e muito mais!

## REDES TCP/IP



Neste curso você aprenderá sobre endereçamento IPv4 e IPv6, portas, tradução de endereços (NAT), protocolos de aplicação (HTTP, DNS, FTP, email, etc.), protocolos de transporte (TCP e UDP), protocolos de rede (IPv4, IPv6, IPsec e ICMP), protocolos de roteamento e muito mais!

## VANTAGENS DOS NOSSOS CURSOS

- ◆ Não é leitura de PowerPoint
- ◆ Todas as aulas são ministradas pessoalmente por Gabriel Torres
- ◆ Pagamento único, sem mensalidades e barato
- ◆ Acesso vitalício
- ◆ Atualizações regulares com novas aulas e melhorias
- ◆ Acesso grátis a futuras aulas e atualizações
- ◆ Seção de perguntas e respostas para você tirar as suas dúvidas sobre o conteúdo do curso
- ◆ Certificado de conclusão de curso contendo o número de horas

<https://www.clubedohardware.com.br/cursos/>

# CURTIU ESTE EBOOK GRÁTIS?

**S**eu conteúdo é apenas uma pequena amostra do que você encontrará em meu livro *Redes de Computadores – Versão Revisada e Atualizada – 2ª Edição*. Com 1.022 páginas, você aprenderá tudo o que precisa saber sobre redes com a mesma didática e qualidade de apresentação que teve o prazer de avaliar neste ebook.



[CLIQUE AQUI E CONFIRA!](#)