



THROUGHPUT

Inicialmente vamos entender o que realmente afeta o THROUGHPUT (velocidade de Download e Upload), e depois vamos entender qual expectativa de THROUGHPUT devemos ter, em casos práticos.

- O QUE AFETA O THROUGHPUT?

• LARGURA DE BANDA DO CANAL

- A largura padrão do canal Wi-Fi é de 20 MHz. Portanto, um canal de 40 MHz são dois canais de 20 MHz juntos, 80 MHz são 4 canais de 20 MHz, e um canal de 160 MHz são oito canais de 20 MHz juntos. Teoricamente dobrando a largura de banda do canal se multiplica por 2 a velocidade transmitida, no entanto, este não é o caso se os canais estiverem obstruídos com interferência e ruído. Um canal de largura menor é mais estável a escolha de canais com largura de banda maior só devem acontecer em locais ideais, quando toda a faixa de conexão estiver livre.
- Embora a banda de 5 GHz tenha um canal amplo de 160 MHz, apenas um canal não sobreposto está disponível, portanto em função dos compromissos de interferência, na maioria dos casos, o THROUGHPUT estará muito próximo daquele medido quando escolhido um canal de 80 MHz. Usar a largura de banda do canal de 160 MHz é uma boa ideia quando há interferência mínima na rede, e os dispositivos Wi-Fi estão muito próximos do roteador.

◦ Seleção Automática de Canal (ACS)

- A Seleção Automática de Canal (ACS) é um recurso avançado que atribui automaticamente o melhor canal para cada AP (ponto de acesso) sem fio, dependendo de uma série de indicadores que levam em conta problemas como interferência de outras redes Wi-Fi, seguindo o seguinte passo a passo:

- Inicialmente é feito a varredura dos canais wireless em uso, próximos ao AP.
- Após a conclusão da varredura de canais, o AP descarta canais com utilização de airtime superior a 40%, de fontes não Wi-Fi.
- É escolhido então o canal mais “limpo” e não utilizado por nenhuma outra rede wireless.
- Isso é feito periodicamente para garantir que a rede funcione no melhor canal possível.

• MIMO

- Multiple Input, Multiple Output, ou multiplexação espacial, ou fluxos espaciais – É a utilização de múltiplas antenas, todas operando na mesma frequência ao mesmo tempo. A razão pela qual o MIMO é tão importante é porque ele é um multiplicador de capacidade direto ($\times 2$, $\times 3$, $\times 4$, $\times 8$, etc.) enquanto usa o MESMO espectro (não mais). Isto é conseguido simplesmente usando mais antenas (tanto pelo roteador quanto pelo cliente), adicionando mais capacidade sem usar mais espectro.

A grande ressalva, claro, é que AMBOS o transmissor e o receptor devem suportar MIMO. E se cada um suportar diferentes níveis de MIMO, será usado o nível MIMO mínimo comum a ambos os dispositivos. Por exemplo, um telefone celular MIMO 2×2 conectado a um roteador MIMO 8×8 usará

apenas MIMO 2x2. Mas como um bônus muito significativo, as antenas 'extras' (se houver uma incompatibilidade nos níveis MIMO entre o cliente e o roteador) não ficam sem uso, mas são usadas para **Diversidade** e **Beamforming**, o que amplia o alcance e melhora a velocidade.

- **Diversidade:** Múltiplas antenas também podem ser usadas para melhorar a qualidade do link e aumentar o alcance. Com múltiplas antenas recebendo o mesmo sinal transmitido, o receptor pode recombinar todos os sinais recebidos em uma estimativa melhor do verdadeiro sinal transmitido.
- **Beamforming:** Esta tecnologia Wi-Fi utiliza múltiplas antenas para “focar” os sinais de RF transmitidos mais em direção a um dispositivo (em vez de apenas transmitir o sinal igualmente em todas as direções). O resultado final é um sinal um pouco mais forte (na direção do dispositivo), o que normalmente faz com que uma modulação um pouco mais alta seja usada, o que por sua vez aumenta um pouco a velocidade em Mbps.
 - A tecnologia MIMO é usada para conexões celulares e Wi-Fi. Mas o celular e o Wi-Fi têm antenas separadas. Vários telefones celulares mostram em sua especificação suportar 4 fluxos de dados (MIMO 4x4) quando conectados a uma rede celular que os oferece. No entanto, isso se refere apenas à conexão celular. Por exemplo, o iPhone 14 é 4x4 MIMO LTE (celular), mas 2x2 MIMO Wi-Fi. Mesmo se você estiver conectado a um roteador MIMO 4x4, você obterá apenas velocidades Wi-Fi MIMO 2x2. As antenas de celular e Wi-Fi são separadas.
- **MODULAÇÃO/DEMODULAÇÃO**
 - A taxa de link máxima requer modulação 1024-QAM e uma relação sinal-ruído (SNR) muito alta. As maiores taxas de dados só são possíveis nas melhores situações, com um AP próximo e interferência limitada no canal. Uma modulação mais realista é 256-QAM ou 64-QAM, resultando em uma taxa máxima de link (PHY SPEED) na faixa de 600-900 Mbps para 80 MHz 2x2, ou 1.200-1.800 Mbps para 160 MHz 2x2.
- **OVERHEAD - Devido ao OVERHEAD do Wi-Fi, a velocidade no nível das aplicações (THROUGHPUT) será 60% a 80% do PHY SPEED (velocidade no nível físico).** Por definição, o **PHY SPEED** é a taxa bruta de bits no canal físico entre o dispositivo do cliente e o roteador. É um indicador da **LARGURA DE BANDA DO CANAL**, o nível de **MIMO** e a distância entre o dispositivo do cliente e o roteador (**MODULAÇÃO/DEMODULAÇÃO**).
 - **O QUE CONTRIBUI PARA O OVERHEAD**
 - **TCP/IP e ETHERNET**
 - Na interface Ethernet do roteador (Cabo), pode-se esperar um overhead de 5 a 6 % devidos ao protocolo TCP/IP e Ethernet. Desta forma, para um link de 1 Gbps espere um THROUGHPUT máximo de aproximadamente 940 Kbps na interface ETHERNET.
 - **TRANSMISSÕES DE GERENCIAMENTO**
 - Para garantir que TODOS os dispositivos em um canal (AP e clientes) possam receber e decodificar transmissões de gerenciamento, essas transmissões devem ser transmitidas na modulação mais lenta possível - para que os dispositivos que estão mais distantes do AP (e, portanto, rodando em velocidade mais lenta) poderem receber e decodificar com sucesso essas transmissões. Por exemplo, 802.11 'Beacon Frames' (a taxa de envio típica é uma vez a cada 102,4 ms). E essa velocidade 'lenta' pode ser tão lenta quanto 1 Mbps (banda de 2,4 GHz) ou 6 Mbps

- O espectro Wi-Fi é um recurso compartilhado. Um dispositivo sabe que pode transmitir através do CSMA/CA (Carrier-Sense Multiple Access with Collision Avoidance). Portanto, qualquer dispositivo em um canal que queira transmitir deve primeiro “sentir” se o espectro está disponível. E para garantir condições igualitárias a todas as estações Wi-Fi, todas as estações que queiram transmitir aguardam um período de tempo aleatório antes de transmitir. E se você tem muito para transmitir, aquela “espera por um período de tempo aleatório” aumenta continuamente. Mas essa espera aleatória é necessária para garantir as condições igualitárias com outros dispositivos Wi-Fi. CSMA/CA funciona muito bem quando não há muitos dispositivos querendo transmitir ao mesmo tempo. Mas a sobrecarga pode aumentar drasticamente se houver muitos dispositivos querendo transmitir ao mesmo tempo.
- **ACKNOWLEDGEMENTS**
 - Todo pacote Wi-Fi enviado deve ser 'reconhecido' (para confirmar o recebimento). Para conseguir isso, cada pacote enviado tem um espaço extra reservado (uma 'janela de tempo') anexado ao final do pacote, para o receptor transmitir de volta (durante a 'janela de tempo' vazia) um “Eu consegui”. É um reconhecimento (ao remetente).
- **COLISÕES/RETRANSMISSÕES**
 - Quando vários dispositivos desejam transmitir ao mesmo tempo (conforme o canal fica ocupado), a possibilidade de colisões (mais de um dispositivo transmitindo ao mesmo tempo) aumenta, fazendo com que toda a transmissão seja perdida, e seja necessária uma retransmissão futura.
- **COEXISTÊNCIA DE TECNOLOGIAS MAIS ANTIGAS (802.11 a/b/g/n)**
 - Para que um canal 802.11ac de 80 MHz coexista adequadamente com rádios mais antigos de 20 MHz operando dentro do canal, há uma troca de RTS (solicitação para envio) e CTS (liberação para envio) antes de cada mensagem ser enviada. E isso adiciona um retardo.
- **INTERFERÊNCIAS/CONTENÇÕES**
 - O espectro Wi-Fi é um recurso limitado e compartilhado no tempo com todos os pontos de acesso, inclusive de vizinhos. Se você tiver um roteador configurado no mesmo canal do seu vizinho (e seu vizinho estiver usando Wi-Fi), você estará compartilhando espectro/tempo/largura de banda com seu vizinho. Exemplo:
 - se todos os 'N' usuários quiserem usar o Wi-Fi ao mesmo tempo, em média, todos poderão usar o canal '1/N' do tempo. Por exemplo, se dois usuários quiserem usar o mesmo canal, e o primeiro usuário com um PHY SPEED de 6 Mbps, e o segundo usuário com um PHY SPEED de 866 Mbps, o primeiro usuário poderá usar o canal 50% do tempo (então 6/2, ou cerca de 3 Mbps), e o segundo usuário poderá usar o canal nos outros 50% do tempo (portanto, 866/2, ou cerca de 433 Mbps).
- **SERVIDOR**
 - Os resultados podem variar dependendo do servidor que o dispositivo está usando para realizar o teste de velocidade. A distância e a quantidade de tráfego que o servidor está recebendo afetam os resultados do teste de velocidade.

- QUAL EXPECTATIVA DE THROUGHPUT DEVO TER?

- **Roteador Wi-Fi 5 (802.11ac) na banda de 5 Ghz em um canal de 80 Mhz**
 - Pela especificação, com modulação de 1024-QAM e MIMO 4x4 seria possível uma velocidade física máxima (PHY SPEED) de 2166 Mbps.

802.11ac PHY Speeds (Mbps)							
		MIMO					
Modulation + Coding		1x1	2x2	3x3	4x4	8x8	
0	BPSK	1/2	32	65	97	130	260
1	QPSK	1/2	65	130	195	260	520
2		3/4	97	195	292	390	780
3	16-QAM	1/2	130	260	390	520	1040
4		3/4	195	390	585	780	1560
5		2/3	260	520	780	1040	2080
6	64-QAM	3/4	292	585	877	1170	2340
7		5/6	325	650	975	1300	2600
↓ typical real-world Modulation/Coding ↓							
8	256-QAM	3/4	390	780	1170	1560	3120
9		5/6	433	866	1300	1733	3466
-	1024-QAM	3/4	487	975	1462	1950	3900
		5/6	541	1083	1625	2166	4333

- Como foi visto no tópico MIMO, sempre será usado o nível MIMO mínimo comum a ambos os dispositivos. Embora muitos roteadores sejam MIMO 4x4, os telefones celulares são MIMO 2x2, de forma que a expectativa do PHY SPEED máximo cai de 2166 para 1083 Mbps.

- Conforme nos afastamos do roteador, as velocidades diminuem gradualmente. A uma distância de apenas 10 metros do roteador, em função das interferências e da relação sinal/ruído (SNR), uma modulação muito mais realista a ser usada é de 64-QAM. Nesta modulação a expectativa do PHY SPEED máximo cai de 1083 Mbps para 650 Mbps.

- Como explicado no tópico OVERHEAD, em função do overhead do protocolo Wi-Fi a velocidade medida ao nível da aplicação (THROUGHPUT) será de 60 a 80% da velocidade física PHY SPEED. Desta forma, utilizando uma média de 70%, a expectativa de THROUGHPUT (que é a medida de download e upload apresentada no teste de Speedtest) será de 455 Mbps.
- Em um ambiente com pouca interferência, em uma conexão com alta relação sinal/ruído, é possível que roteador e dispositivo utilizem a modulação 256-QAM. Neste caso teremos um PHY SPEED máximo de 866 Mbps, e THROUGHPUT de 600 Mbps.

Roteador Wi-Fi 6 (802.11ax) na banda de 5 Ghz em um canal de 80 Mhz

- Pela especificação, com modulação de 1024-QAM e MIMO 4x4 seria possível uma velocidade física máxima (PHY SPEED) de 2401 Mbps.

802.11ax PHY Speeds (Mbps)							
		MIMO					
Modulation + Coding		1x1	2x2	3x3	4x4	8x8	
0	BPSK	1/2	36	72	108	144	288
1	QPSK	1/2	72	144	216	288	576
2		3/4	108	216	324	432	864
3	16-QAM	1/2	144	288	432	576	1152
4		3/4	216	432	648	864	1729
5		2/3	288	576	864	1152	2305
6	64-QAM	3/4	324	648	972	1297	2594
7		5/6	360	720	1080	1441	2882
↓ typical real-world Modulation/Coding at distance ↓							
8	256-QAM	3/4	432	864	1297	1729	3458
9		5/6	480	960	1441	1921	3843
10	1024-QAM	3/4	540	1080	1621	2161	4323
11		5/6	600	1200	1801	2401	4803

- Como foi no tópico MIMO, sempre será usado o nível MIMO mínimo comum a ambos os dispositivos. Embora muitos roteadores sejam MIMO 4x4, os telefones celulares são MIMO 2x2, de forma que a expectativa do PHY SPEED máximo cai de 2401 para 1200 Mbps.

- Conforme nos afastamos do roteador, as velocidades diminuem gradualmente. A uma distância de apenas 10 metros do roteador, em função das interferências e da relação sinal/ruído (SNR), uma modulação muito mais realista a ser usada é de 64-QAM. Nesta modulação a expectativa do PHY SPEED máximo cai de 1200 Mbps para 720 Mbps.

- Como explicado no tópico OVERHEAD, em função do overhead do protocolo Wi-Fi a velocidade medida ao nível da aplicação (THROUGHPUT) será de 60 a 80% da velocidade física PHY SPEED. Desta forma, utilizando uma média de 70%, a expectativa de THROUGHPUT (que é a medida de download e upload apresentada no teste de Speedtest) será de 504 Mbps.
- Em um ambiente com pouca interferência, em uma conexão com alta relação sinal/ruído, é possível que roteador e dispositivo utilizem a modulação 256-QAM. Neste caso o PHY SPEED máximo será de 960 Mbps e o THROUGHPUT de 672 Mbps.
- Em uma situação próxima da ideal, no caso do roteador e o dispositivo estarem muito próximos e sem ruído no link, há a possibilidade de que os dois dispositivos negociem uma largura de canal inicial de 160 MHz. O THROUGHPUT pode chegar a 80% da

velocidade física PHY SPEED de 2.400 Mbps (MIMO 2x2, 1024-QAM e 160 Mhz), ou cerca de 1.900 Mbps. No entanto, isso só acontece quando o dispositivo cliente e o roteador estão muito próximos um do outro, em uma situação ideal. Com o aumento da distância ou adição de paredes, os dois dispositivos Wi-Fi 6 irão “desacelerar” significativamente e passarão a se comunicar entre si em velocidades muito mais próximas das velocidades do Wi-Fi 5.

- Diferentemente do que ocorreu com as recomendações 802.11 anteriores, cujo objetivo era aumentar a velocidade de pico (um cliente), o Wi-Fi 6 (802.11ax) foi projetado desde o início para fornecer melhorias de velocidade (Alta Eficiência) para um grupo de clientes Wi-Fi 6 e NÃO para somente um cliente Wi-Fi 6. Resumindo, o Wi-Fi 6 adiciona tecnologia semelhante ao ‘celular’ ao Wi-Fi. Isso foi conseguido mudando para o esquema de modulação OFDMA e alterando o protocolo Wi-Fi para suportar diretamente muitos usuários ao mesmo tempo. O resultado é uma capacidade geral (agregada) bastante melhorada em ambientes altamente “densos” (muitos dispositivos) (como escolas, estádios, centros de convenções, campi, etc.). Para aproveitar as vantagens das melhorias do Wi-Fi 6, é necessário que todos os dispositivos clientes suportem Wi-Fi 6.