

# Arquitectura y Comunicación de Datos

26 de mayo 2025 - 8 Clase

Prof. Dr. Claudio E. Righetti

Departamento de Computación

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Universidad de Buenos Aires

# Protocolo IP – Clave para la Interconexión Global



# Introducción

 Internet conecta hoy al 68% de la población mundial.

Desde sus orígenes, resolver cómo conectar redes diferentes fue un gran desafío.

 El Protocolo IP es el corazón que lo hizo posible.

# A Protocol for Packet Network Intercommunication

VINTON G. CERF AND ROBERT E. KAHN,  
MEMBER, IEEE

*Abstract* — A protocol that supports the sharing of resources that exist in different packet switching networks is presented. The protocol provides for variation in individual network packet sizes, transmission failures, sequencing, flow control, end-to-end error checking, and the creation and destruction of logical process-to-process connections. Some implementation issues are considered, and problems such as internetwork routing, accounting, and timeouts are exposed.

## INTRODUCTION

IN THE LAST few years considerable effort has been expended on the design and implementation of packet switching networks [1]-[7],[14],[17]. A principle reason for developing such networks has been to facilitate the sharing of computer resources. A packet communication network includes a transportation mechanism for delivering data between computers or between computers and terminals. To make the data meaningful, computer and terminals share a common protocol (i.e., a set of agreed upon conventions). Several protocols have already been developed for this purpose [8]-[12],[16]. However, these protocols have addressed only the problem of communication on the same network. In this paper we present a protocol design and philosophy that supports the sharing of resources that exist in different packet switching networks.

After a brief introduction to internetwork protocol issues, we describe the function of a GATEWAY as an interface between networks and discuss its role in the protocol. We then consider the various details of the protocol, including addressing, formatting, buffering, sequencing, flow control, error control, and so forth. We close with a description of an interprocess communication mechanism and show how it can be supported by

of one or more *packet switches*, and a collection of communication media that interconnect the packet switches. Within each HOST, we assume that there exist *processes* which must communicate with processes in their own or other HOSTs. Any current definition of a process will be adequate for our purposes [13]. These processes are generally the ultimate source and destination of data in the network. Typically, within an individual network, there exists a protocol for communication between any source and destination process. Only the source and destination processes require knowledge of this convention for communication to take place. Processes in two distinct networks would ordinarily use different protocols for this purpose. The ensemble of packet switches and communication media is called the *packet switching subnet*. Fig. 1 illustrates these ideas.

In a typical packet switching subnet, data of a fixed maximum size are accepted from a source HOST, together with a formatted destination address which is used to route the data in a store and forward fashion. The transmit time for this data is usually dependent upon internal network parameters such as communication media data rates, buffering and signalling strategies, routeing, propagation delays, etc. In addition, some mechanism is generally present for error handling and determination of status of the networks components.

Individual packet switching networks may differ in their implementations as follows.

1) Each network may have distinct ways of addressing the receiver, thus requiring that a



# Orígenes: Paper de Cerf & Kahn (1974)

🧠 “A Protocol for Packet Network Intercommunication”

Problema: Redes heterogéneas, no interoperables.

Solución: TCP/IP → Una red de redes (Internet)

✓ Introducción del concepto de encapsulamiento, direcciones lógicas y separación por capas.

# ¿Qué es el Protocolo IP?

Protocolo de la capa de red.

Encapsula datos en paquetes (datagramas).

Funciones clave:

-  Encapsulado de datos.
-  Direccionamiento (origen/destino).
-  Encaminamiento entre redes.

# Independencia de la tecnología subyacente

IP permite transmitir datos sobre cualquier red:

- Ethernet 
  - Wi-Fi 
  - Fibra óptica 
  - 5G o satélite 
-  Las capas superiores no necesitan saber cómo es la red física.
-  Clave para la escalabilidad y flexibilidad de Internet.

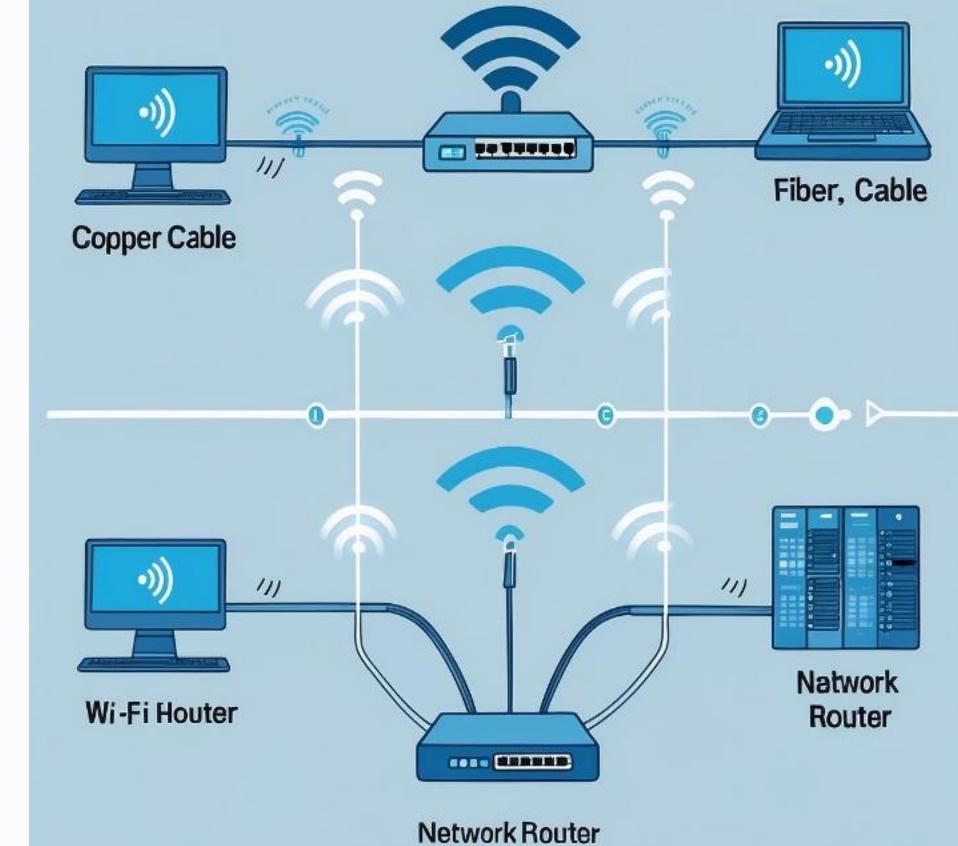
# Funcionamiento de IP: Cómo viajan los paquetes

Cada paquete viaja de forma independiente.

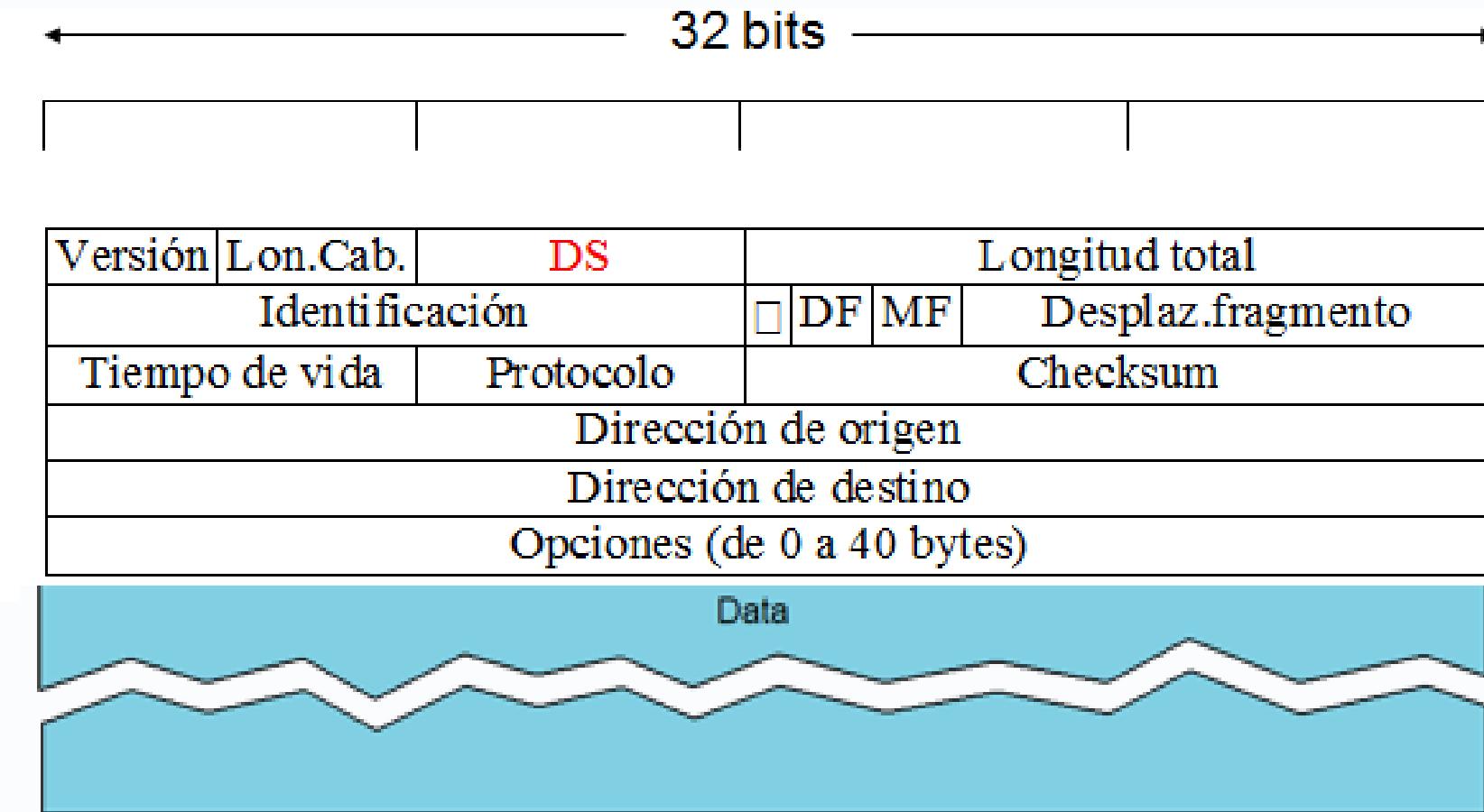
Toma distintas rutas según disponibilidad.

🚫 IP es best-effort: no garantiza entrega, orden ni integridad.

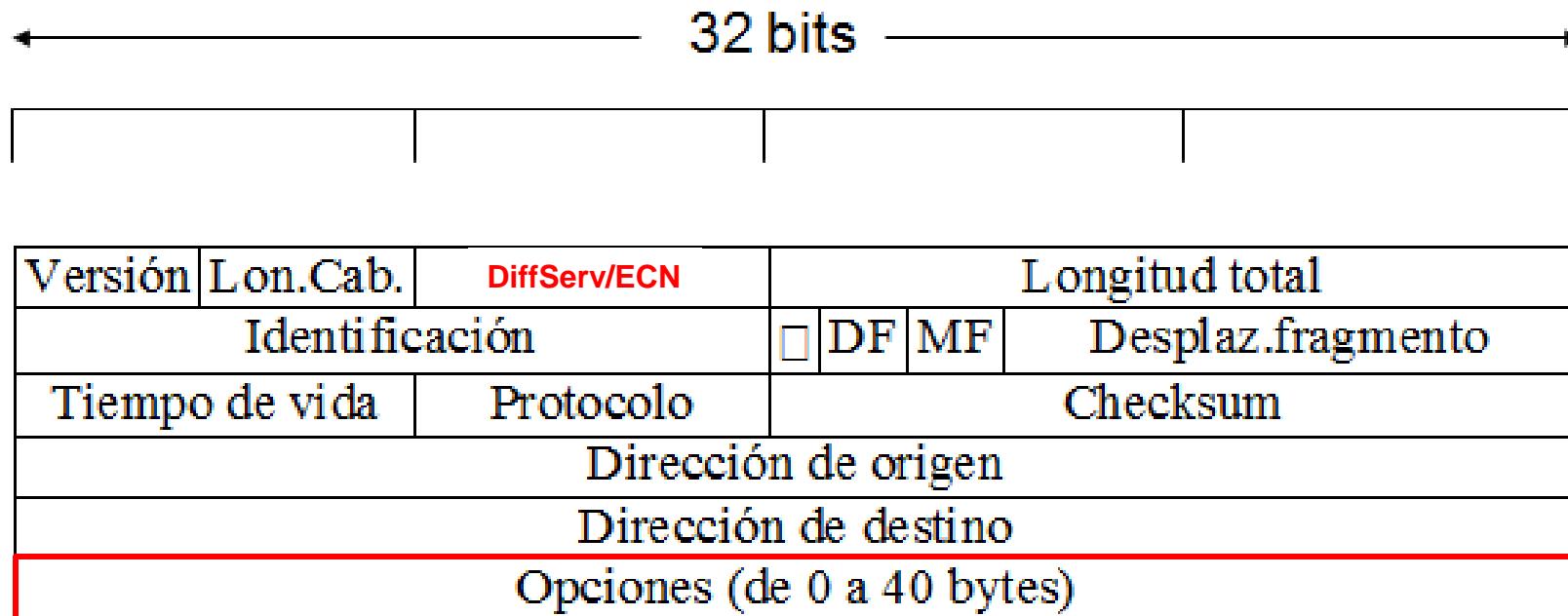
🔄 Fiabilidad delegada a capas superiores (TCP).



# Cabecera IP ( Versión 4)

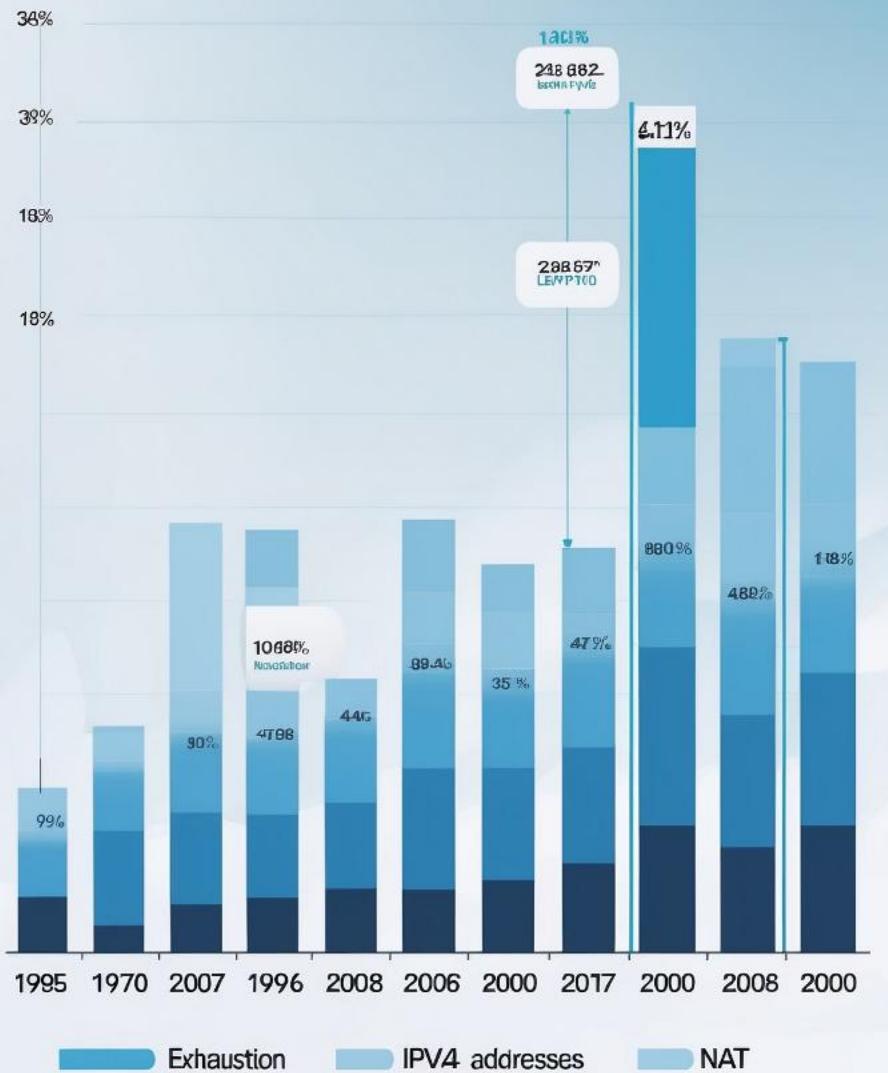


# Cabecera IP (versión 4)



- La cabecera de un datagrama IP contiene información que deben interpretar los routers.
- El tamaño de la cabecera es normalmente de **20 bytes**, pudiendo llegar hasta 60 si se utilizan todos los **campos opcionales**.

## IPv4 Address Space Allocation



# El desafío del agotamiento de IPv4

🌐 IPv4: 32 bits → ~4.294 millones de direcciones.

🚫 Agotadas oficialmente desde 2011.

Soluciones transitorias: NAT, compartir direcciones.

# La solución: IPv6

 IPv6: 128 bits → direcciones prácticamente ilimitadas ( $2^{128}$ ).

Beneficios:

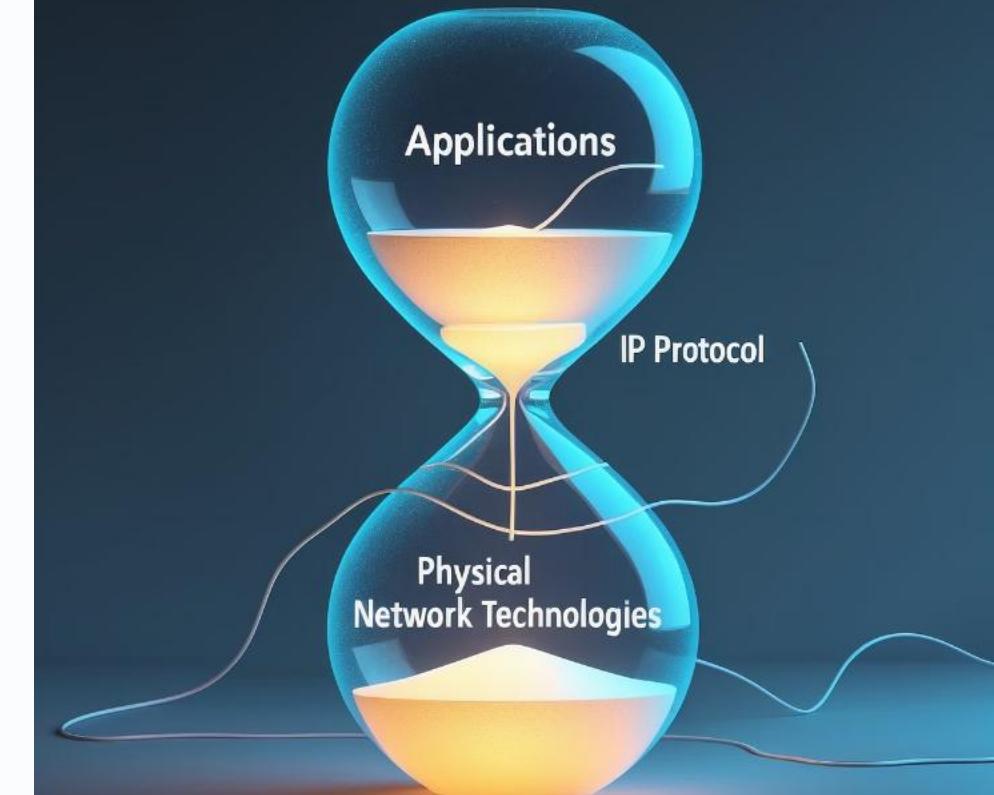
- Más direcciones.
- Mejor soporte para IoT.
- Simplificación del enrutamiento.

Estado actual: IPv4 e IPv6 conviven.

# 🔍 ¿Qué es la Visión del Reloj de Arena?

La arquitectura de Internet fue diseñada siguiendo un modelo que se asemeja a un **reloj de arena**, donde:

- En la parte superior están las **aplicaciones** (Web, correo, streaming, etc.).
- En la parte inferior están las **tecnologías de red física** (Ethernet, Wi-Fi, 4G, satélites, fibra óptica, etc.).
- En el **cuello angosto del reloj** hay un único protocolo común y universal: el **Protocolo IP (Internet Protocol)**.



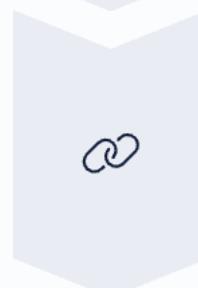


# Visión y Principio Clave



## Diseño de un único protocolo de red

Se diseña un único protocolo de red – **IP** – como punto de convergencia.



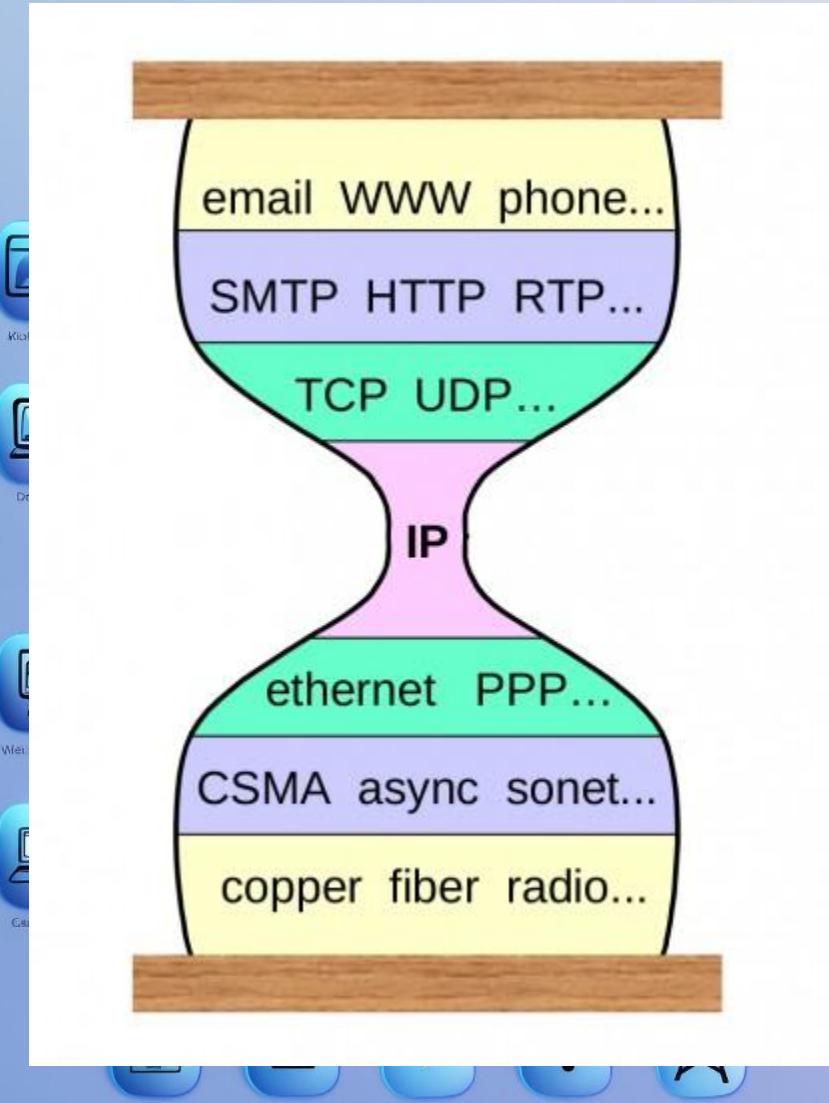
## Compatibilidad universal

Esto permite que cualquier aplicación funcione sobre cualquier tipo de red física, siempre que ambas hablen IP.



## Capa de abstracción universal

Es decir, **IP actúa como capa de abstracción universal**, que es lo suficientemente simple como para ser implementada sobre diversas tecnologías físicas y lo suficientemente poderosa para soportar una enorme variedad de aplicaciones.





# Orígenes del Modelo

1

## Pioneros del diseño de Internet

Esta visión fue parte del trabajo de **David Clark, Vinton Cerf, Robert Kahn** y otros pioneros del diseño de Internet a fines de los años 70 y principios de los 80.

2

## Formalización en documentos

Se formaliza en varios documentos, especialmente en los trabajos del Internet Architecture Board (IAB) y en papers como *"The Design Philosophy of the DARPA Internet Protocols"* de David D. Clark (1988).



# 🎯 Ventajas del Modelo de Reloj de Arena



## Flexibilidad

Permite que nuevas tecnologías físicas (Wi-Fi, LTE, fibra, etc.) se integren fácilmente a Internet sin cambiar las capas superiores.



## Escalabilidad

Nuevas aplicaciones pueden surgir (Zoom, WhatsApp, Netflix) sin requerir cambios en la infraestructura subyacente.



## Interoperabilidad global

Cualquier dispositivo puede comunicarse con otro en cualquier parte del mundo si ambos entienden IP.



## Simplicidad y estabilidad

La capa IP es minimalista y estable, lo que asegura compatibilidad a lo largo del tiempo.

# Conclusiones

- ✓ IP es el pilar de la interconexión global.
- ✓ Proporciona independencia de la infraestructura.
- ✓ Su simplicidad (best-effort) permitió escalar a Internet.
- ✓ IPv6 garantiza la evolución y expansión futura.

Mensaje final: La arquitectura IP es un ejemplo brillante de diseño modular, escalable y resiliente.

# Unidad 6: Arquitectura de datos y aprendizaje automático aplicados

- Redes Inalámbricas y Cableadas de próxima generación.
- Aprendizaje automático en: redes definidas por Software, Multimedia y Telecomunicaciones.
- Arquitectura de datos que soporten todo el ecosistema.
- Plano del Conocimiento en las redes y servicios
- AIOps , de la automatización a las redes autónomas

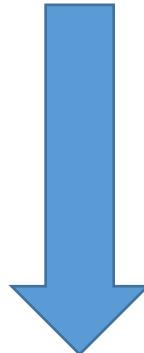
# Redes Inalámbricas y Cableadas de próxima generación

De Wi-Fi 4 a Wi-Fi 6 y recordando algunos tips para las redes actuales

# Recordemos que es Wi-Fi

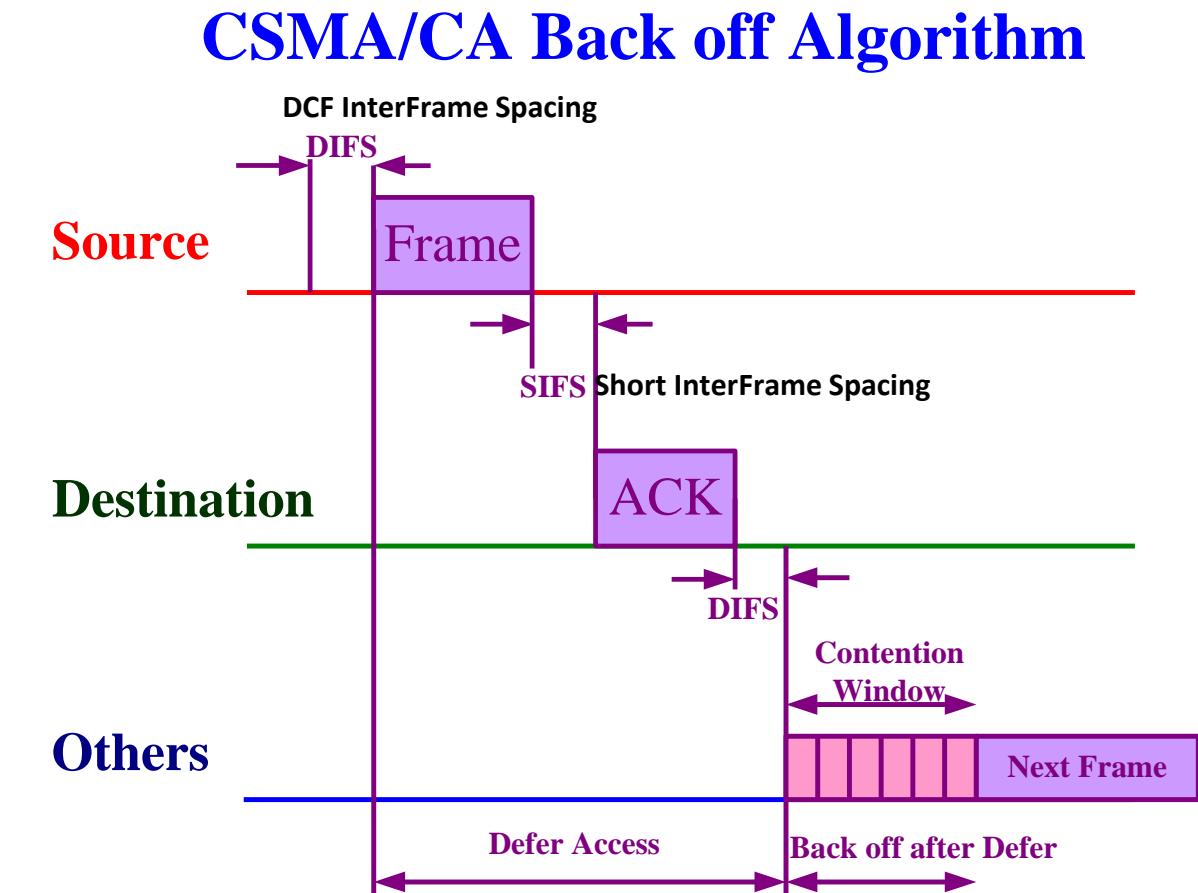
- El término "Wi-Fi" fue creado por la organización sin fines de lucro **Wi-Fi Alliance** y se refiere a un grupo de protocolos de redes inalámbricas que se basan en el estándar de red IEEE 802.11
- La tecnología Wi-Fi existe desde finales de los noventa, pero ha mejorado drásticamente en la última década

# El ecosistema de Wi-Fi: ¿cambio en los últimos 20 años ?



# Listen Before-to-Talk y DCF MAC: La ventana de contención

- Mientras el canal está libre el nodo decrementa el backoff counter (caso contrario se mantiene)
- Si backoff counter==0
  - El nodo TX el frame
- Si la TX no es exitosa (no ACK)
  - La *ventana de contención* (contention window) se selecciona de un intervalo random que es el doble del intervalo previo
  - este proceso se repite hasta que el canal esté libre



## Optimize your Wireless

Identify bottlenecks and Improve performance

Analyze Now



Conectes el Wireless	Conectar	Desconectar	Conectar	Desconectar
Phone	289.00M	III	29.88.00	III
Laptop	402.01M	III	22.20.63	III
Smart TV	200.00M	III	8.31.05	III
Smart TV	280.00M	III	21.6.00	III

# Acceso Múltiple: El Reto del Aire Compartido



## Competencia por recursos

Múltiples dispositivos intentan usar el mismo canal inalámbrico simultáneamente.



## Problema de colisiones

Las transmisiones simultáneas generan interferencias y pérdida de datos.

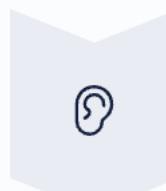


## Necesidad de coordinación

Se requieren mecanismos que ordenen el acceso al medio compartido.



# ¿Qué es Listen Before Talk (LBT)?



## Escuchar

El dispositivo monitorea el canal para detectar actividad.



## Esperar

Si el canal está ocupado, pospone la transmisión.



## Transmitir

Envía datos sólo cuando detecta que el canal está libre.

# El Papel de DCF en Wi-Fi



## Función principal

Control de acceso al medio en redes IEEE 802.11



## Detección de portadora

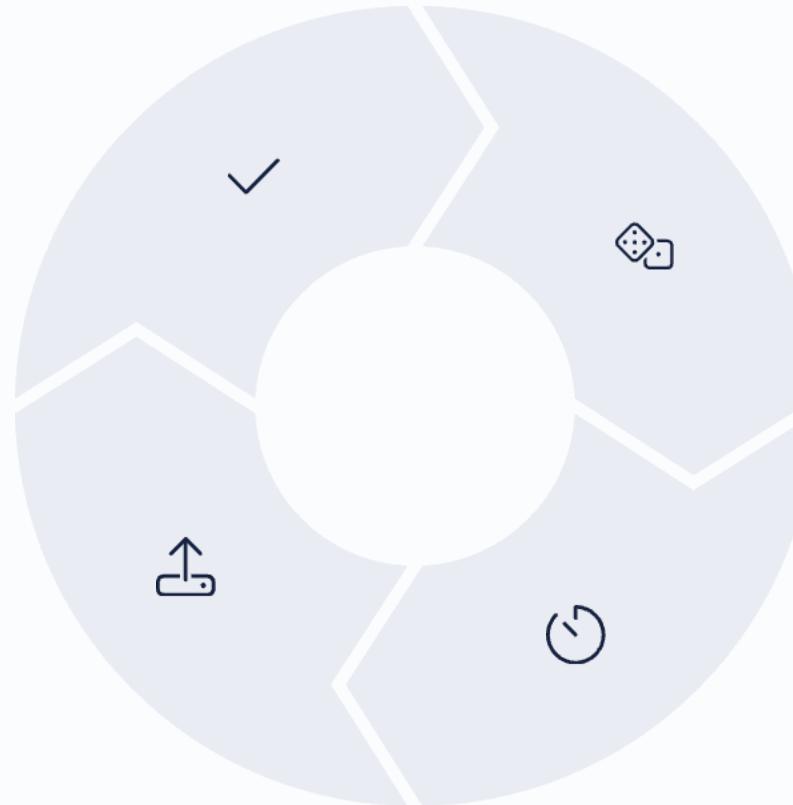
Basado en CSMA/CA: monitoreo continuo del canal



## Organización distribuida

Utiliza ventanas de contención para ordenar acceso

# La Ventana de Contención en DCF



**Canal libre**

El dispositivo detecta que no hay transmisiones activas

**Valor aleatorio**

Selecciona un número entre 0 y CW

**Transmisión**

Envía datos cuando su contador llega a cero primero

**Cuenta regresiva**

Espera mientras el contador disminuye hasta cero

# Relación entre LBT y la Ventana de Contención





# Ejemplo Práctico: ¿Cómo Funciona en la Vida Real?

2

Dispositivos

Laptops intentando transmitir  
simultáneamente

1

Canal

Medio inalámbrico compartido entre  
ambos

0

Colisiones

Resultado ideal tras aplicar LBT y  
contención

Learn More



**Seamless connectivity.  
Limitless potential.**

# Conclusiones y Tendencias Futuras

## Beneficios actuales

- Mayor eficiencia en redes congestionadas
- Reducción significativa de interferencias
- Mejor experiencia para usuarios finales

## Desafíos pendientes

- Saturación en entornos de alta densidad
- Optimización para aplicaciones en tiempo real
- Compatibilidad entre diferentes estándares

## Innovaciones futuras

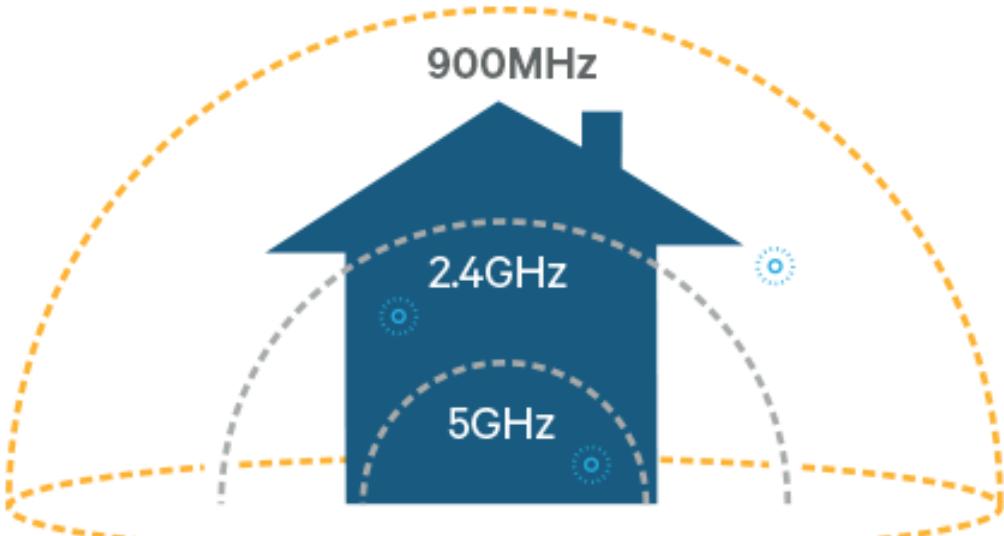
- Algoritmos adaptativos de contención
- Integración con inteligencia artificial
- Coordinación multi-banda automatizada

# Evolución 802.11 ....

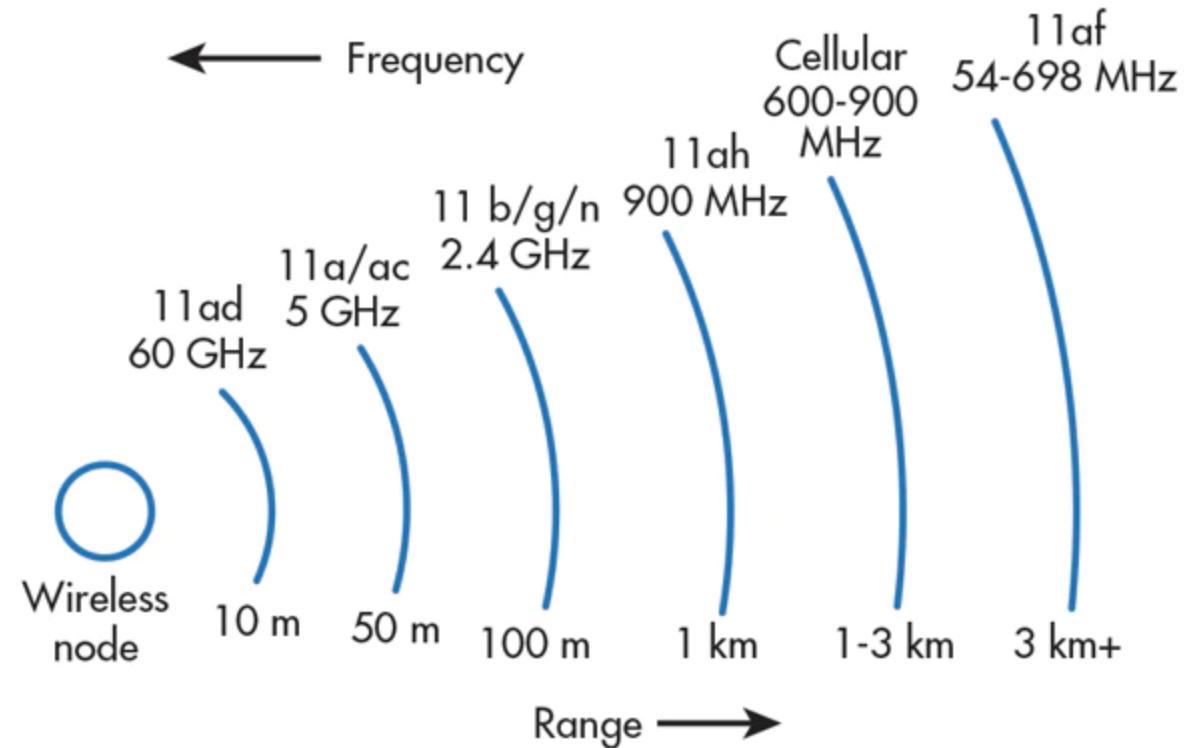
Standard	Frequency (GHz)	Bandwidth (MHz)	Modulation	Max Data Rate
802.11b	2.4	22	DSSS	11 Mbps
802.11a	5	20	OFDM	54 Mbps
802.11g	2.4	20	OFDM	54 Mbps
802.11n	2.4, 5	20, 40	MIMO-OFDM	600 Mbps
802.11ac	5	20,40,80,160	MIMO-OFDM	7 Gbps
802.11ax	2.4, 5	20,40,80,160	MIMO-OFDM	10 Gbps
802.11ad	60	2160	OFDM, SC	7 Gbps
802.11ay	60	(2160) x2, x3, x4	OFDM, SC	20 Gbps

Note: Capacity is the key performance metric for Wi-Fi instead of theoretical peak rate.

# Expandiendo las fronteras: 802.11ah



Power efficient, long range, scalable Wi-Fi



<https://www.electronicdesign.com/industrial-automation/article/21805297/whats-the-difference-between-ieee-80211ah-and-80211af-in-the-iot>



# 11AX

## THE PATH TO TRULY BRILLIANT WI-FI



4x

### BETTER IN DENSE ENVIRONMENTS

Improve average throughput per user by at least four times in dense or congested environments



### FASTER THROUGHPUT

Deliver up to 40 percent higher peak data rates for a single client device



### INCREASE NETWORK EFFICIENCY

By more than four times



### EXTEND BATTERY LIFE

Of client devices

# Nuevos logos que identifican a los estándares Wi-Fi

Generation/IEEE Standard	Frequency	Maximum Linkrate	Year
Wi-Fi 6 (802.11ax)	2.4/5 GHz	600–9608 Mbit/s	2019
Wi-Fi 5 (802.11ac)	5 GHz	433–6933 Mbit/s	2014
Wi-Fi 4 (802.11n)	2.4/5 GHz	72–600 Mbit/s	2009

Generation of network connection	Sample user interface visual
Wi-Fi 6	
Wi-Fi 5	
Wi-Fi 4	

## ¿Qué mejoras brinda Wi-Fi 6? : Velocidad

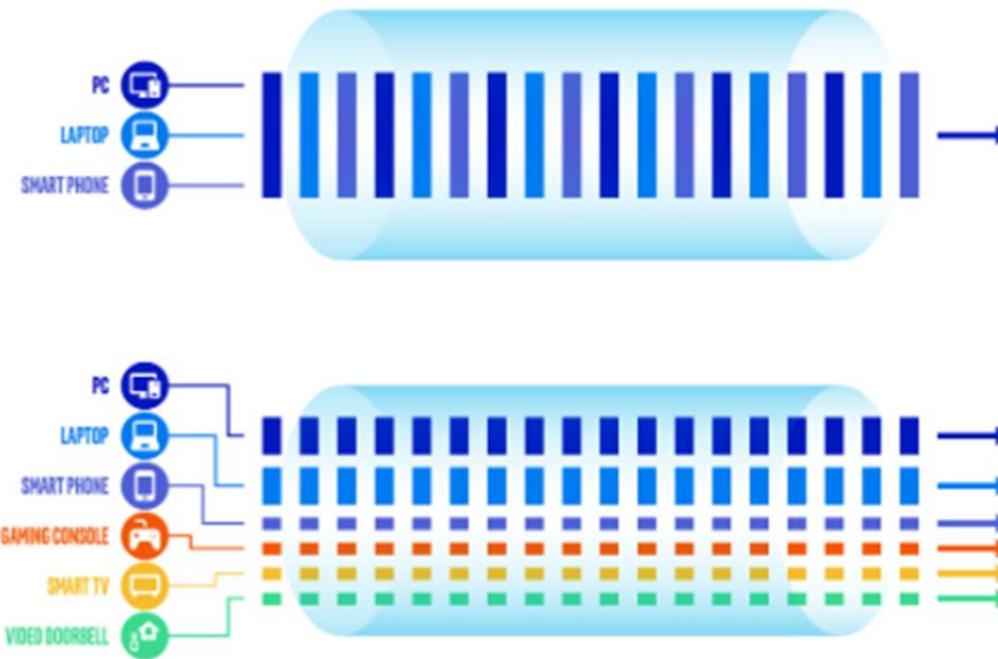
- 9,6 Gbps es el rendimiento máximo en varios canales. Wi-Fi 5 ofrece un máximo de 3,5 Gbps. Sin embargo, estos son máximos teóricos; en situaciones del mundo real, es posible que las redes locales no alcancen esta velocidad máxima.
- Debido a que ese máximo se comparte entre varios dispositivos, los dispositivos con Wi-Fi 6 pueden disfrutar de velocidades significativamente más rápidas incluso si no alcanzan el máximo potencial
- Las velocidades pueden ser más rápidas en comparación con Wi-Fi 5 (Es como que estás usando un enrutador Wi-Fi con un solo dispositivo)
- puede lograr velocidades de transferencia de datos más altas a través de una variedad de técnicas, comenzando con una codificación de datos más eficiente y un uso inteligente del espectro inalámbrico que es posible gracias a procesadores más potentes.

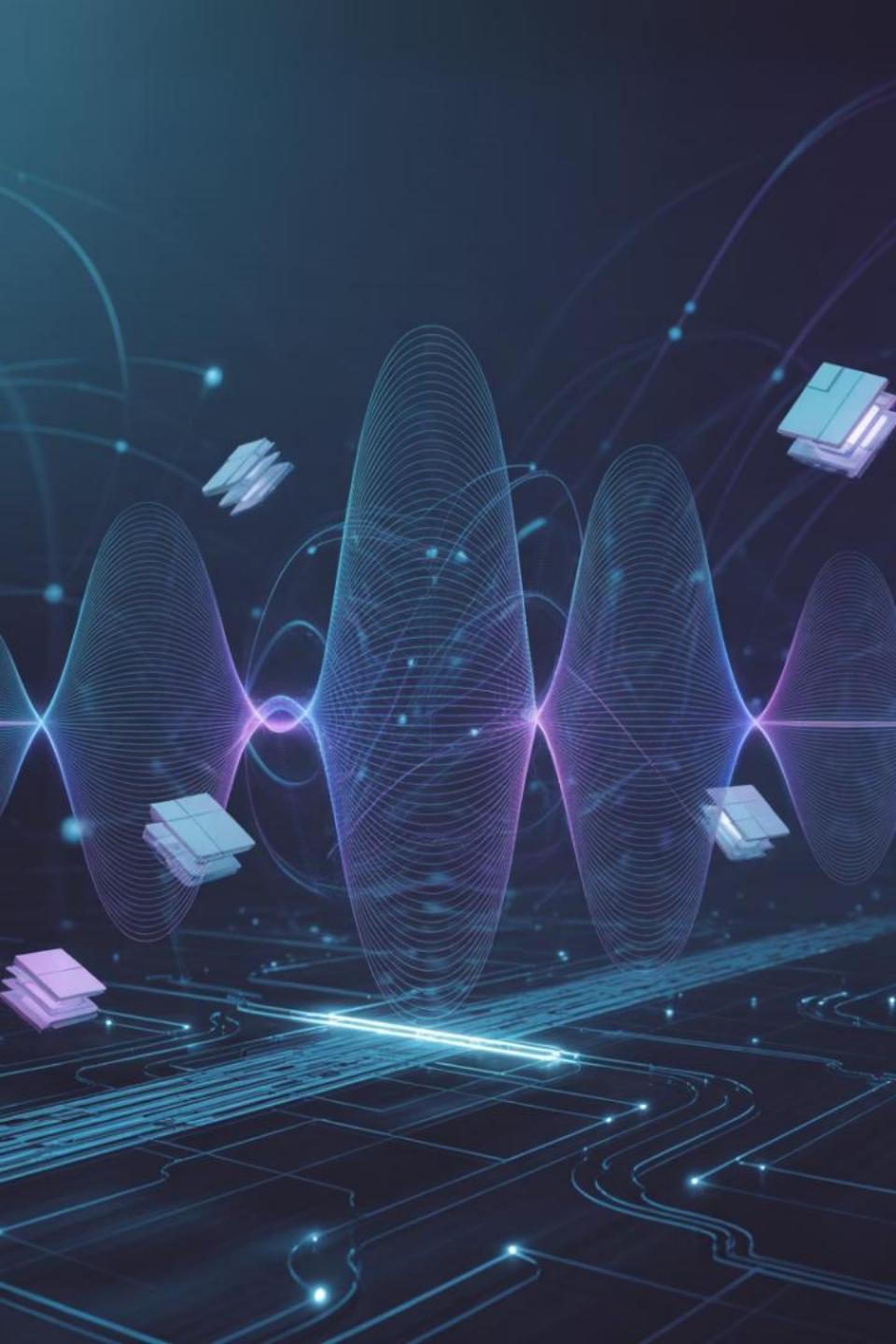
## ¿Qué mejoras brinda Wi-Fi 6? : Latencia

- puede resultar en hasta un 75% menos de latencia con respecto a Wi-Fi 5 . Lo logra manejando grandes cantidades de tráfico de red de manera más eficiente.
- Para los gamers, esto significa descargas de juegos más rápidas, mejores velocidades de carga para la transmisión de juegos y una multitarea de medios más confiable.
- Wi-Fi 6 acerca las señales cableadas e inalámbricas a la paridad. Esto potencialmente libera a más usuarios de las limitaciones de estar conectados a su módem. Muchos jugadores o creadores de contenido todavía se conectan directamente a enrutadores o commutadores de red a través de cables Ethernet en lugar de aprovechar la flexibilidad que ofrece la red inalámbrica. Wi-Fi 6 ayuda a cerrar aún más la brecha entre la conectividad por cable e inalámbrica ( Intel dixit ☺ )

# ¿Qué hace Wi-Fi 6 mas “rápido”?

## OFDMA





# OFDM y OFDMA: Fundamentos de Transmisión Inalámbrica

Estas técnicas son fundamentales en comunicaciones modernas como Wi-Fi, 4G y 5G.

OFDM divide el espectro en subportadoras ortogonales mientras OFDMA extiende esta capacidad para múltiples usuarios.

Ambas tecnologías constituyen la base de Wi-Fi 6 y sistemas móviles avanzados.

## Frequency Spectrum

# OFDM: Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales



### División del ancho de banda

Separa la señal en múltiples subportadoras ortogonales.

### Transmisión simultánea

Envía datos en frecuencias superpuestas sin interferencia.

### Resistencia mejorada

Reduce vulnerabilidad a interferencias y propagación multirayecto.

### Transformada de Fourier

Utiliza FFT para demodulación eficiente de señales.

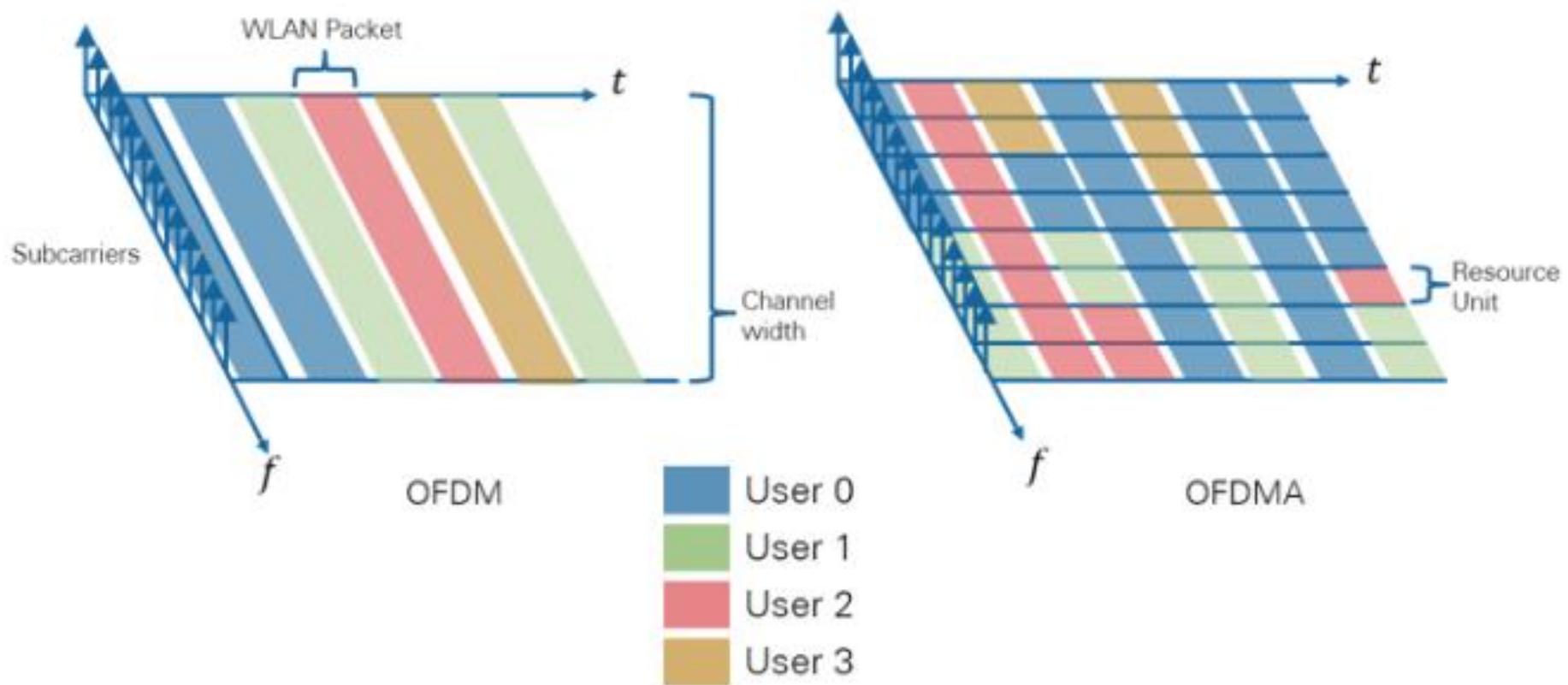


OFDM

# OFDMA: Evolución para Acceso Múltiple



# OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access)

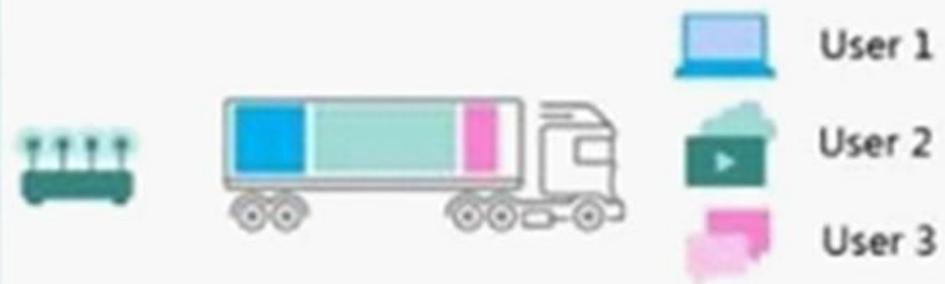


## OFDM



- Exclusive channel regardless of traffic size

## OFDMA



- Simultaneous transmission of data from multiple users on the same channel
- Improve channel resource utilization efficiency
- Coordinate resources according to traffic type (for example: instant messaging vs big traffic download)
- Improve forwarding performance

OFDM vs OFDMA

# Beneficios en Wi-Fi 6 (802.11ax)

75%

Reducción de latencia

Respuesta más rápida en aplicaciones sensibles al tiempo.

4x

Mayor eficiencia

Rendimiento superior en entornos de alta densidad.

30%

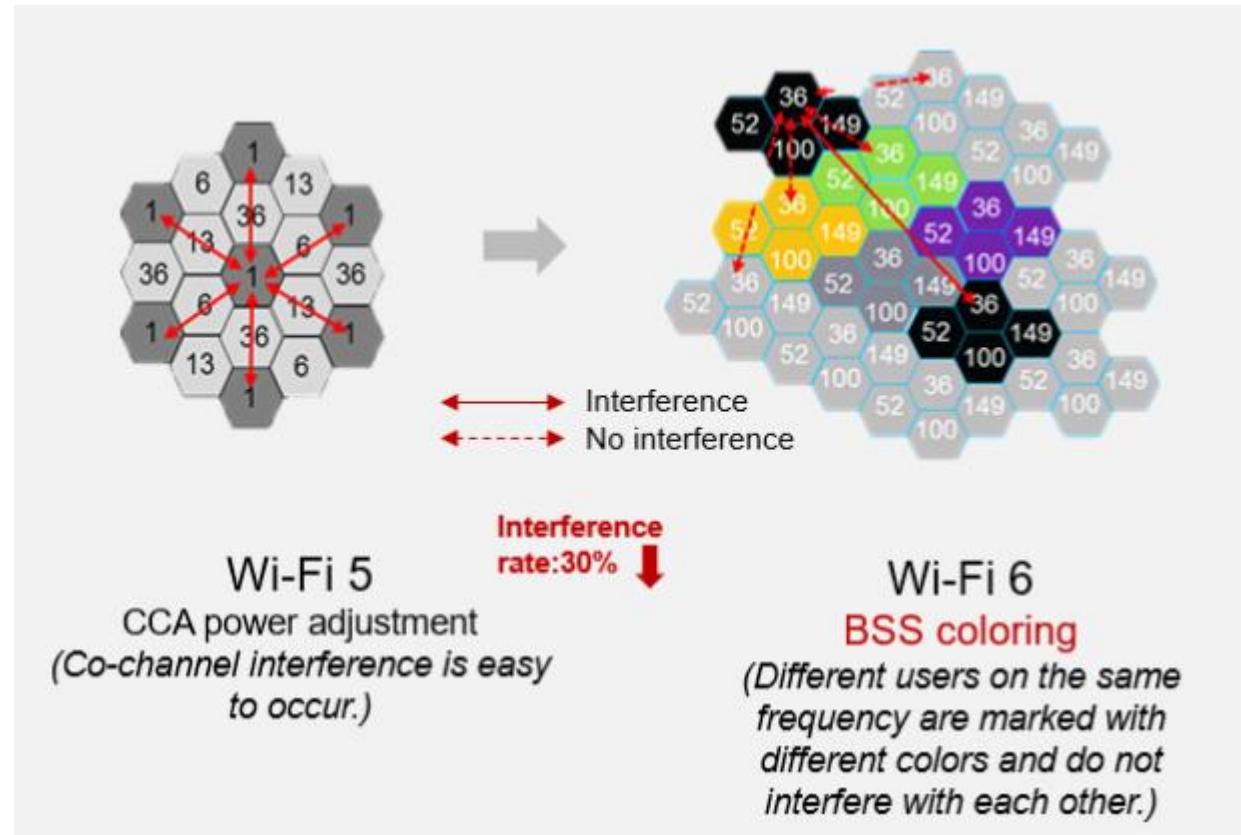
Ahorro de batería

Los dispositivos consumen menos energía.

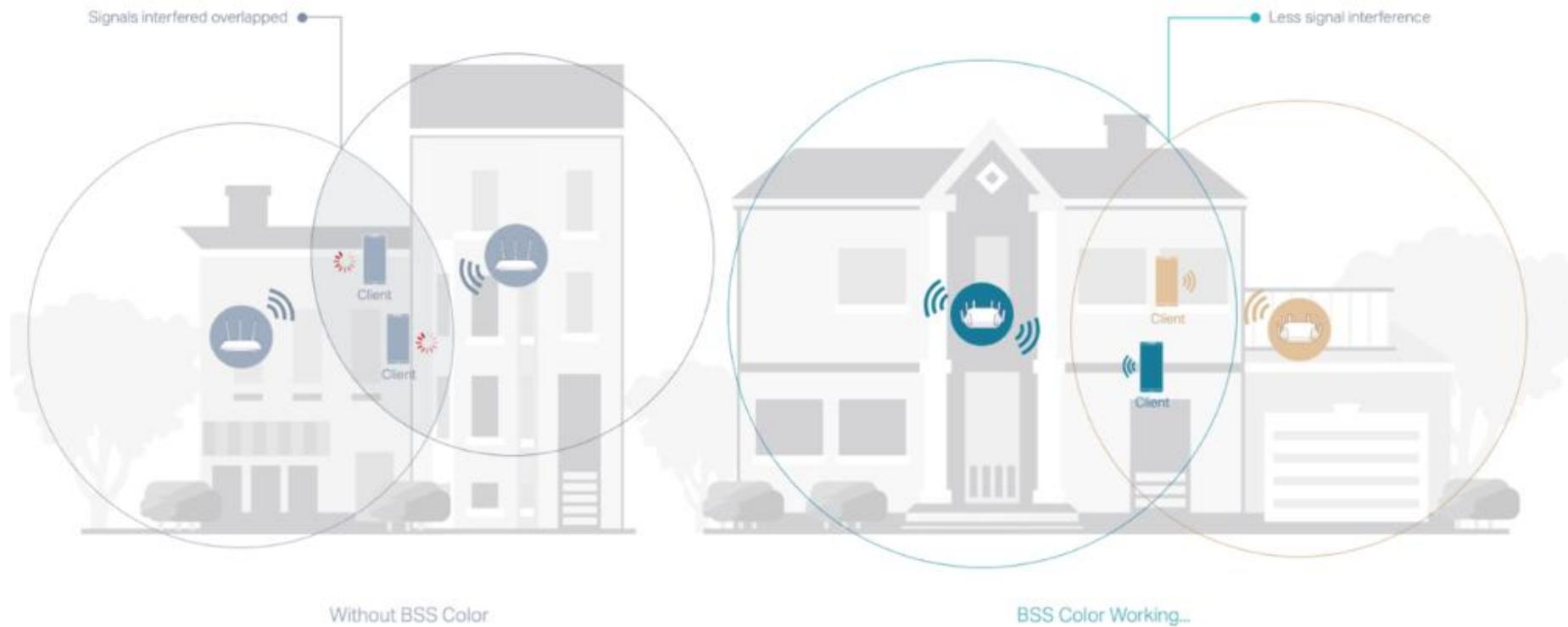


¿Qué hace Wi-Fi 6 tener mejor rendimiento a la congestión de la WLAN?

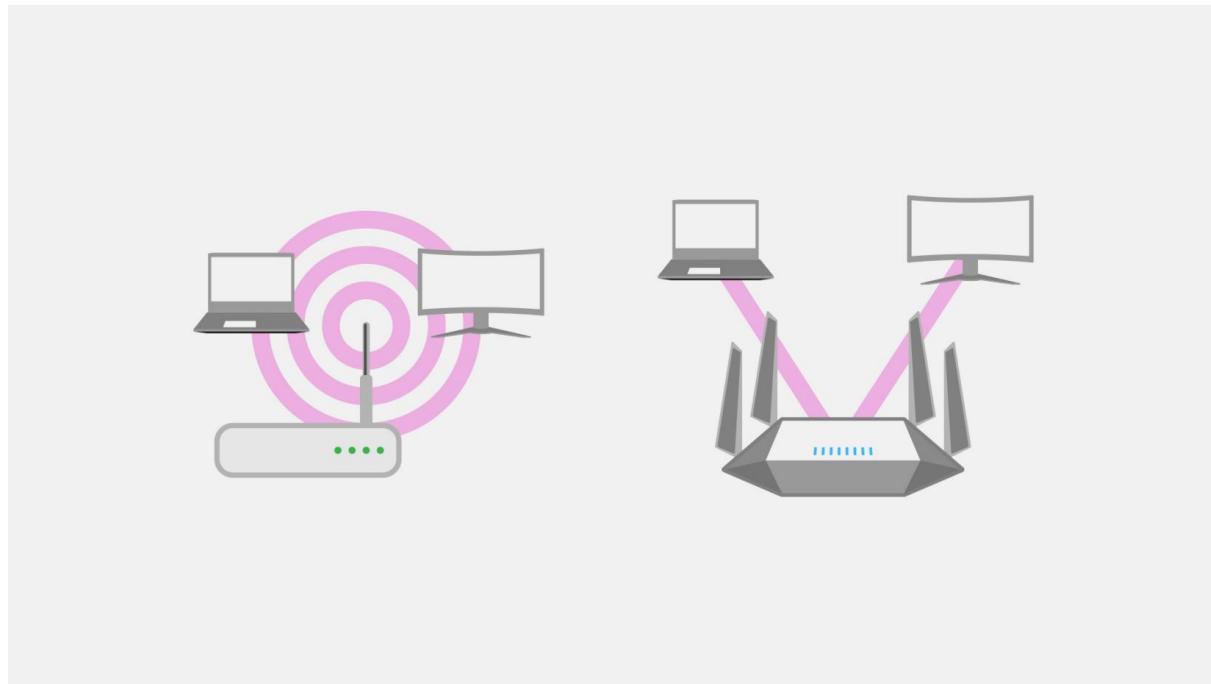
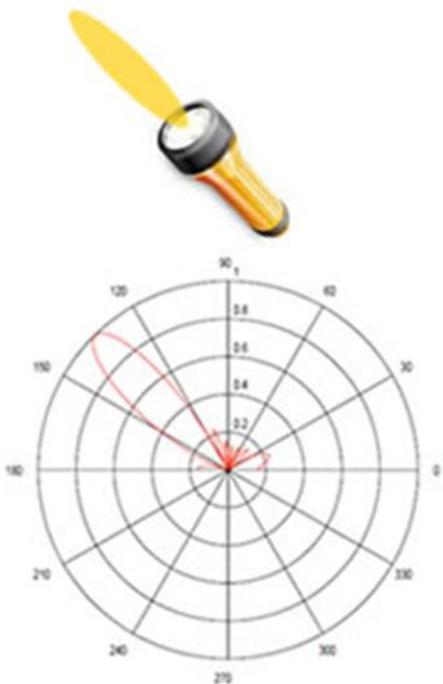
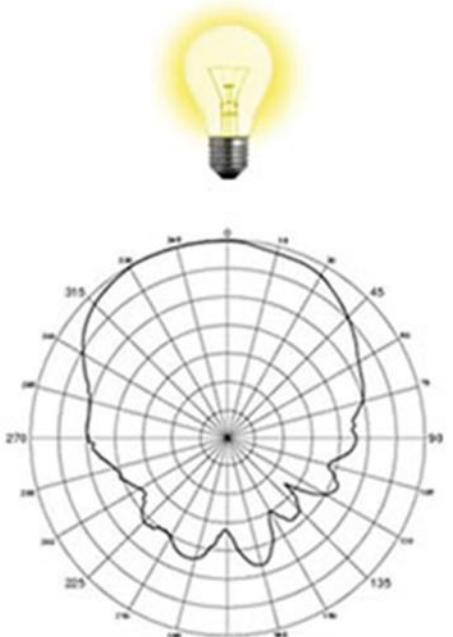
BBS coloring permite OBSS



# Superposición de los conjuntos de servicios básicos (OBSS)

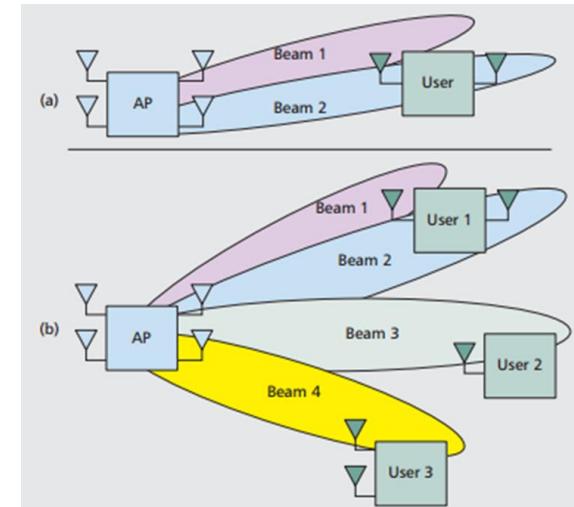


# Beamforming



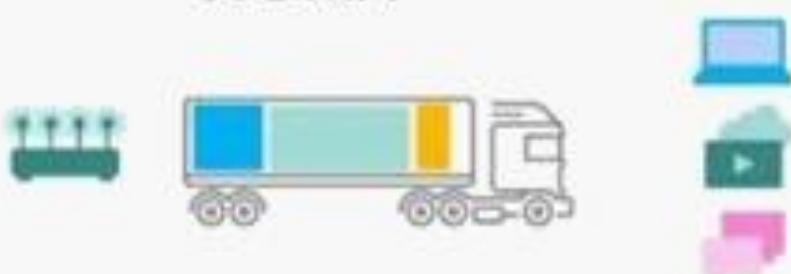
# MU-MIMO

- Usada en estándares anteriores, se vuelve esencial en Wi-Fi 6 para alcanzar la consistencia en el flujo de datos a muchos usuarios.
- es además bidireccional, contando con Downlink y Uplink de múltiples usuarios
- El modo de subida de múltiples usuarios es exclusiva del nuevo estándar y no existía en ninguno de los anteriores.



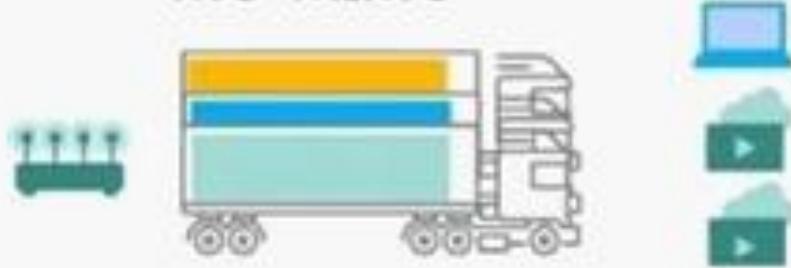
# OFDMA + MU-MIMO

## OFDMA



- OFDMA improves performance and efficiency
- OFDMA reduces latency
- Suitable for low bandwidth applications

## MU-MIMO



- MU-MIMO boost capacity
- MU-MIMO provides high-speed connectivity for each user
- Suitable for high bandwidth applications

MU-MIMO is similar to serving multiple users simultaneously with multiple buses

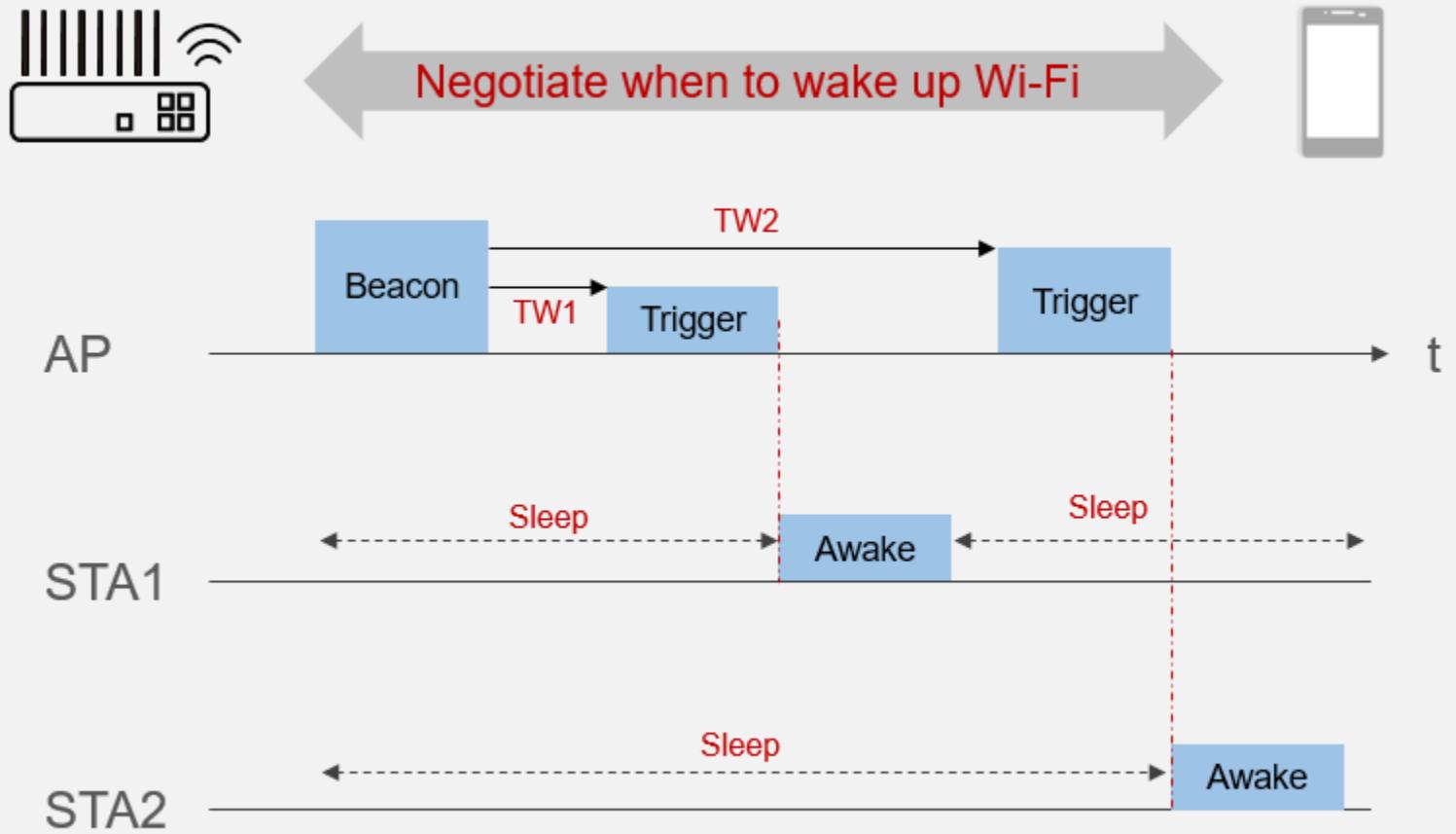
Use OFDMA and MU-MIMO depending on the type of application being served

# TWT

Target Wakeup Time  
(TWT)



Wake up Wi-Fi on demand,  
reducing power consumption  
by 30%



# Wi-Fi 6

- Orthogonal Frequency Division Multiplexing Multiple Access (OFDMA), que aumenta la capacidad espectral dividiendo los canales en porciones más pequeñas, de manera de contemplar múltiples dispositivos en simultáneo.
- Multi-User MIMO (MU-MIMO), que mejora la capacidad del canal durante el servicio simultáneo de múltiples dispositivos utilizando las mismas frecuencias
- Intervalos de guarda ampliados, que permiten a los puntos de acceso (APs) ofrecer conectividad mejorada en entornos al aire libre

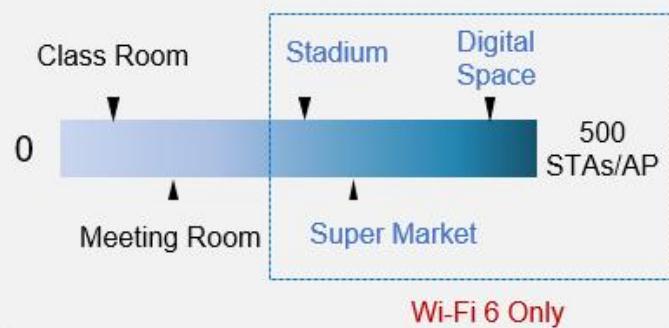
# Wi-Fi 6

- Target Wake Time (TWT), que mejora la duración de la batería de los dispositivos móviles al permitirles dormir mientras no se requiera el intercambio de datos.
- BSS Coloring, que permite que redes WiFi solapadas transmitan simultáneamente en casos donde la interferencia no es aceptable.
- Canales de 160 MHz capaces de mejorar drásticamente la performance frente a los dispositivos WiFi más eficientes de la actualidad.

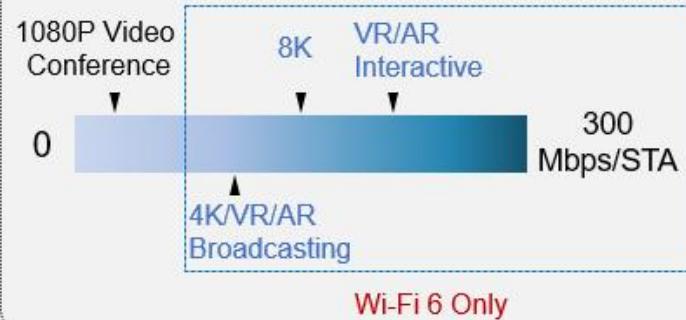
# Wi-Fi 5 versus Wi-Fi 6

	Wi-Fi 5	Wi-Fi 6
Lanzado en...	2013	2019
Bandas	5 GHz	2,5 GHz y 5 GHz
Ancho de banda	20MHz, 40MHz, 80MHz, 80+80MHz y 160MHz	20MHz/40MHz a 2.4GHz, 80MHz, 80+80MHz y 160MHz a 5 GHz
Tamaños de FTT	64, 128, 256, 512	64, 128, 256, 512, 1024, 2048
Modulación más alta	256-QAM	1024-QAM
ODFMA	No, sólo OFDM	Sí
MU-MIMO	Sólo para descarga	Disponible en subida y bajada y mejor velocidad
Color BSS	No	Sí, disminuye las interferencias
Target Wake Time	No	Sí, permite consumir menos energía

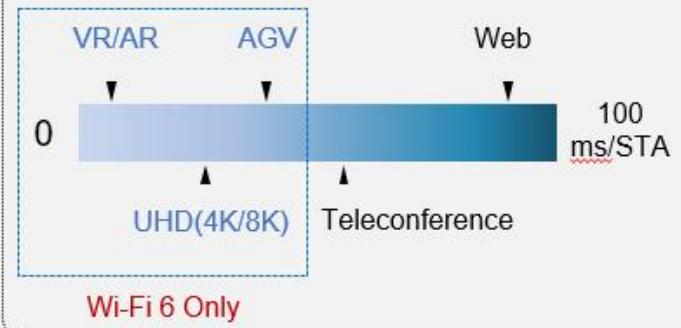
## Capacity



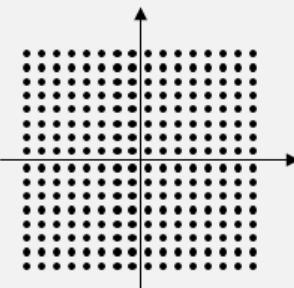
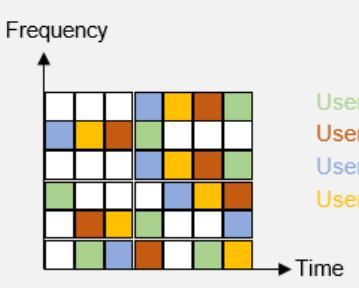
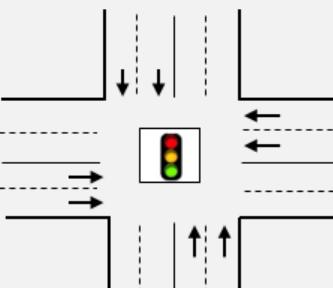
## Bandwidth



## Latency



# Resumiendo Wi-Fi 6

High Bandwidth	Large Capacity	Low Latency	Low Power Consumption
	 <p>Frequency</p> <p>User 1 User 2 User 3 User 4</p> <p>Time</p>		
<b>1024-QAM</b>	<b>UL/DL OFDMA</b>	<b>OFDMA</b>	<b>TWT</b>
<b>8x8 MU-MIMO</b>	<b>UL/DL MU-MIMO</b>	<b>Spatial Reuse</b>	<b>20MHz-Only</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>Up to <b>9.6 Gbps</b></li><li><b>4</b> x higher bandwidth</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li><b>1024</b> access users (per AP)</li><li><b>4</b> x higher concurrent capacity</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Uplink ordered scheduling, latency reduced to <b>20 ms</b></li><li>Average latency lowered by <b>50%</b></li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Target time wakeup (TWT) mechanism</li><li>Terminal power consumption reduced by <b>30%</b></li></ul>

# A1 Wi-Fi 7

Wi-Fi 4/5 (802.11 a/b/g/ac)	Wi-Fi 6 (802.11ax)	Wi-Fi 6E (802.11ax + 6GHz)	Wi-Fi 7 (802.11be)
<p>Existing huge base of APs &amp; legacy devices / clients</p> <p>Likely to remain in use for years in 2.4GHz &amp; 5GHz</p> <p>Rapid phase-out of new AP deployments in enterprise</p> <p>Some lower-end phones &amp; IoT still using cheap silicon</p>	<p>In almost all new phones &amp; laptops, some IoT</p> <p>Higher performance, better security, more control</p> <p>Mainstream baseline from 2022 onwards</p> <p>In most new enterprise APs + mesh units</p>	<p>New 6GHz bands being licensed (varies by country)</p> <p>Supported in high-end devices &amp; enterprise APs. Ramping during 2022-23</p> <p>High QoS, lower latency, clean spectrum with no legacy Wi-Fi4/5 devices</p> <p>Emerging at same time as semiconductor shortages</p>	<p>Being developed, based on IEEE 802.11be</p> <p>Fully certified 2024</p> <p>Earlies pre-release APs &amp; clients in 2023</p> <p>Deterministic latency, higher reliability / redundancy, better mobility</p> <p>Likely to emerge alongside more 6GHz + higher power localised options</p>

**Wi-Fi 4**

IEEE 802.11n

**Bands:**

2.4 GHz, 5 GHz

**Channel Bandwidths**

20, 40 MHz

**64 QAM****KEY ADVANCES:**

- WPA2 Security
- 4x4 MIMO
- LDPC Error Correction

**Wi-Fi 5**

IEEE 802.11ac

**Bands:**

5 GHz

**Channel Bandwidths**

20, 40, 80, 160 MHz

**256 QAM****KEY ADVANCES:**

- Up to 8x8 MIMO
- DL MU-MIMO
- Beamforming

**Wi-Fi 6 / 6E**

IEEE 802.11ax

**Bands:**

2.4 GHz, 5 GHz

**Channel Bandwidths**

20, 40, 80, 160 MHz

**1024 QAM****KEY ADVANCES:**

- Best-in-class WPA3 security
- UL and DL MU-MIMO, OFDMA
- Target wait time (TWT)

**Wi-Fi 7**

IEEE 802.11be

**Bands:**

2.4 GHz, 5 GHz, 6 GHz

**Channel Bandwidths**

20, 40, 80, 160, 320 MHz

**4096 QAM****KEY ADVANCES:**

- Multi-link operation (MLO)
- Multi-RU and puncturing
- Managed QoS & Restricted Service Periods

**~300 Mbps****~1.7 Gbps****~2.4 Gbps****~5.8 Gbps\*\*****2007****2013****2019**

Wi-Fi 6E, 6 GHz BAND ADDED (JAN 2021)

**2024**

# Redes Inalámbricas y Cableadas de próxima generación

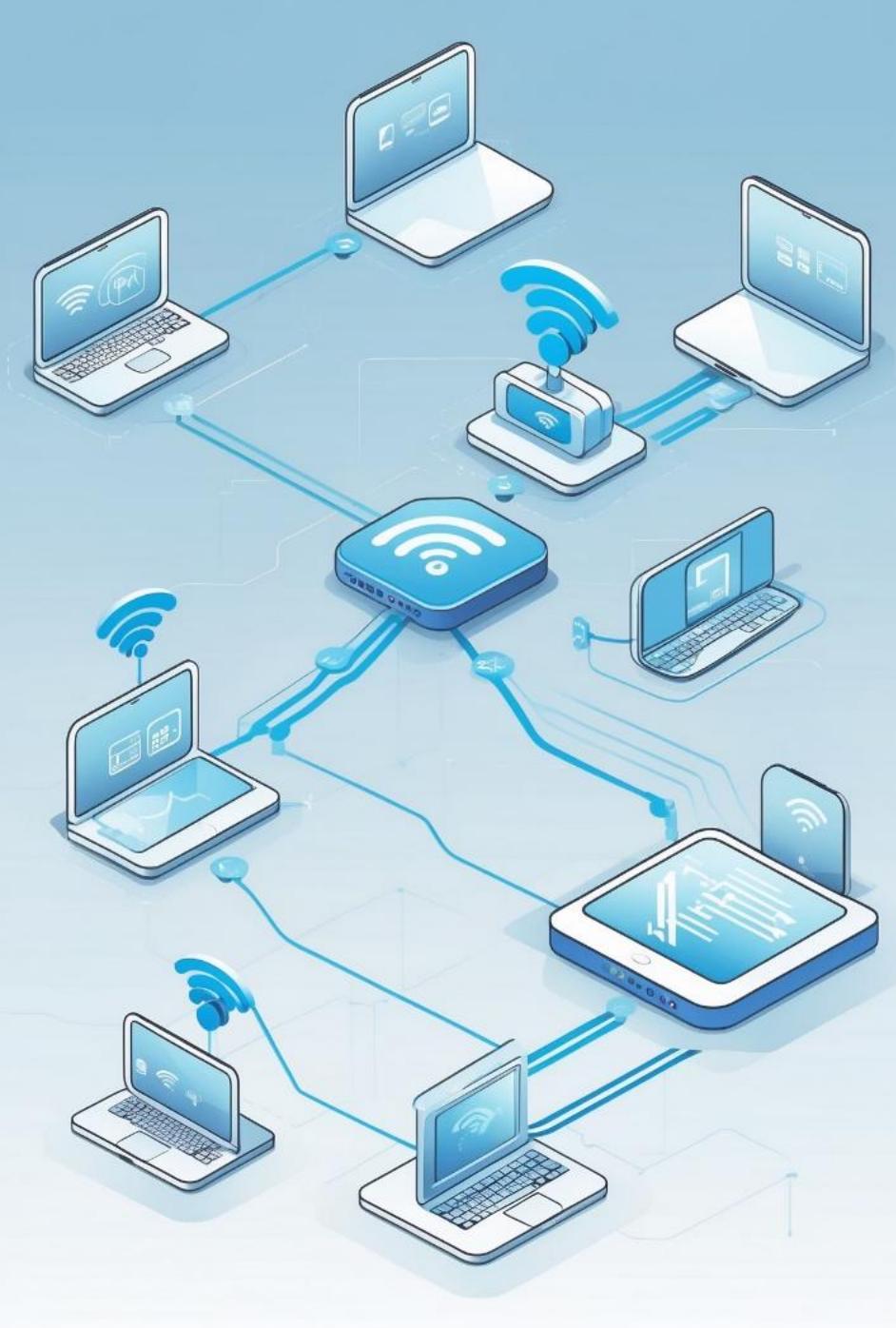
Reecordando algunos tips para las redes actuales

# Anomalía de Wi-fi



- ▶ En WiFi los nodos de baja velocidad degradan el throughput de los nodos de alta velocidad
- ▶ Los nodos reducen su data rate cuando la potencia de la señal es baja (WiFi auto-rate)
- ▶ Los paquetes de los nodos de baja velocidad consuelen más “tiempo de aire”
  - ▶ Monopolizan el canal Half Duplex
- ▶ WiFi arbitra las transmisiones paquete a paquete
  - ▶ Los nodos de alta velocidad reciben menos “tiempo de aire”

Standard	Frequency (GHz)	Bandwidth (MHz)	Modulation	Max Data Rate
802.11b	2.4	22	DSSS	11 Mbps
802.11a	5	20	OFDM	54 Mbps
802.11g	2.4	20	OFDM	54 Mbps
802.11n	2.4, 5	20, 40	MIMO-OFDM	600 Mbps



# Anomalía de Velocidad en Redes 802.11

En el mundo de las redes inalámbricas, existe un fenómeno crítico conocido como la "anomalía de rendimiento" que afecta significativamente la velocidad de todas las terminales conectadas a una red Wi-Fi.

Este problema, presente desde los primeros estándares 802.11 desarrollados en 1997, puede causar una reducción del 40-60% en el rendimiento total de redes empresariales. El efecto, también denominado "efecto de estación lenta", representa uno de los desafíos más persistentes en las comunicaciones inalámbricas modernas.

# Fundamentos de la Anomalía 802.11

## Acceso Equitativo

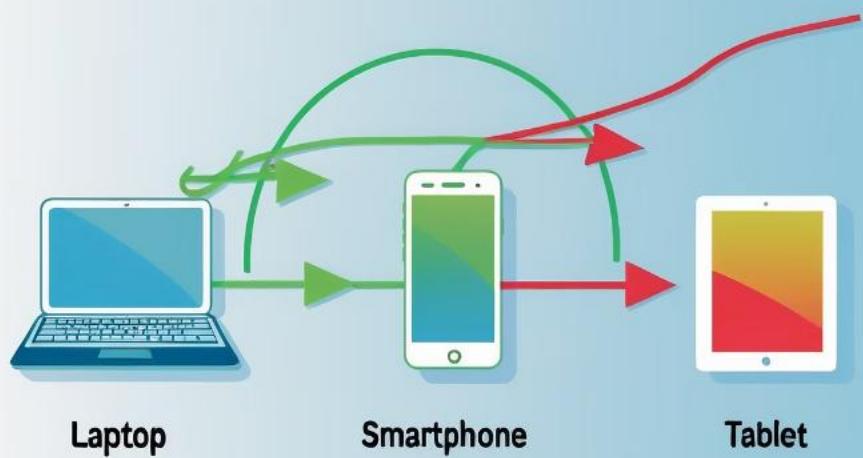
El protocolo CSMA/CA otorga acceso equitativo por paquete a todas las terminales, independientemente de su velocidad de transmisión. Esto significa que cada dispositivo recibe la misma oportunidad para enviar datos, sin considerar el tiempo que tardará en hacerlo.

## Consumo Desproporcionado

Las terminales lentas consumen un tiempo desproporcionado de transmisión, pudiendo utilizar hasta 10 veces más tiempo de aire que las terminales rápidas para enviar la misma cantidad de datos. Este problema ha sido documentado desde la aparición del estándar 802.11b en 1999.

# Mecánica de la Anomalía

La raíz del problema reside en cómo el protocolo MAC (Control de Acceso al Medio) otorga igualdad de oportunidades a todas las estaciones, sin considerar su velocidad. Esta democracia en el acceso al medio se convierte en un obstáculo cuando las velocidades son muy dispares.



-  **Terminal Rápida (54 Mbps)**  
Transmite 1500 bytes en apenas 0.22 milisegundos
-  **Terminal Lenta (1 Mbps)**  
Necesita 12 milisegundos para transmitir los mismos 1500 bytes
-  **Factor de Diferencia**  
Una terminal a 1 Mbps ocupa el canal 54 veces más tiempo que una a 54 Mbps

# Impacto en Rendimiento de Red



El rendimiento global de la red Wi-Fi tiende a caer dramáticamente al nivel del dispositivo más lento conectado. Una sola terminal operando a baja velocidad puede reducir el throughput total en hasta un 80%, afectando a todos los usuarios.

Este efecto se ve agravado en ambientes con múltiples dispositivos compitiendo por el acceso al medio. Situaciones comunes que provocan este problema incluyen dispositivos alejados del punto de acceso, presencia de interferencias electromagnéticas o el uso de equipos antiguos con estándares obsoletos.

# Evolución de Soluciones en Estándares Wi-Fi

## Primeras Soluciones

Los primeros intentos de mitigación incluyeron técnicas básicas de gestión de ancho de banda y algoritmos de control de acceso al medio, pero con resultados limitados en los estándares originales.

## Protocolos QoS

La incorporación de mecanismos de calidad de servicio (QoS) desde Wi-Fi 4 permitió establecer prioridades entre diferentes tipos de tráfico, ofreciendo una solución parcial al problema.

## Tecnologías MIMO

El desarrollo de tecnologías MIMO (Multiple Input Multiple Output) y posteriormente MU-MIMO (Multi-User MIMO) ha sido clave en la reducción del impacto de la anomalía, permitiendo comunicaciones simultáneas.

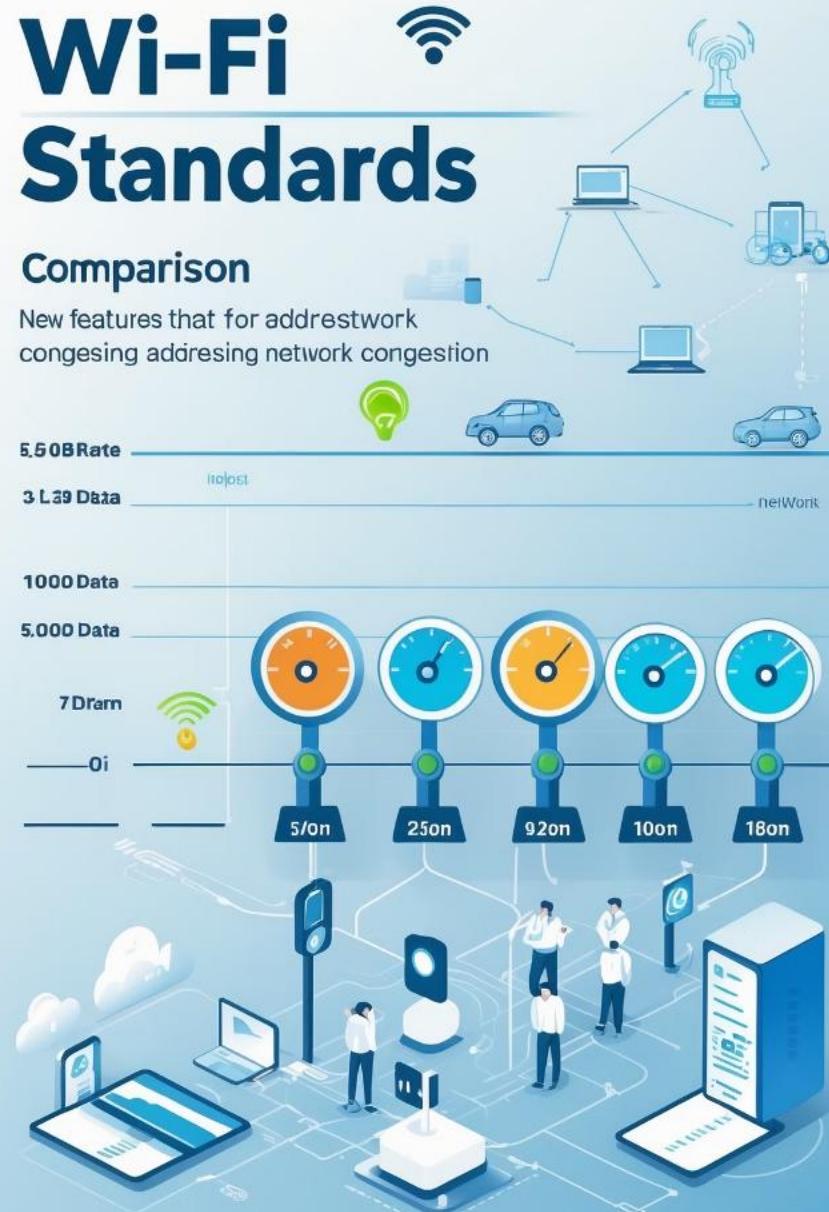
## Soluciones Avanzadas

Los estándares más recientes implementan técnicas sofisticadas como OFDMA y operaciones multi-enlace que abordan directamente el problema de la anomalía de rendimiento.

# Comparativa de Estándares Wi-Fi y Mitigación de Anomalía

Estándar	Año	Velocidad Máx.	Mitigación de Anomalía	Técnica Principal
Wi-Fi 4 (802.11n)	2009	600 Mbps	Parcial	Frame Aggregation
Wi-Fi 5 (802.11ac)	2014	6.9 Gbps	Media	MU-MIMO (DL)
Wi-Fi 6 (802.11ax)	2019	9.6 Gbps	Alta	OFDMA + Scheduling
Wi-Fi 7 (802.11be)	2024	46 Gbps	Muy Alta	Multi-Link Operation

La evolución de los estándares Wi-Fi muestra un progreso significativo en la capacidad para mitigar la anomalía de estación lenta. Cada nueva generación ha introducido mecanismos más sofisticados que permiten un uso más eficiente del espectro y reducen el impacto negativo de los dispositivos lentos.



# Soluciones Tecnológicas Implementadas

## OFDMA

Wi-Fi 6 introduce la tecnología OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) que divide el canal en pequeñas unidades de recursos, permitiendo que múltiples dispositivos transmitan simultáneamente, reduciendo drásticamente el impacto de terminales lentas.

## Schedulers Inteligentes

Los algoritmos avanzados de programación (scheduling) priorizan inteligentemente las terminales rápidas, optimizando el uso del tiempo de aire y evitando que dispositivos lentos monopolicen el canal de comunicación.

## Target Wake Time

Esta función permite programar con precisión cuándo los dispositivos deben despertar para transmitir datos, reduciendo la congestión y las colisiones en la red, particularmente útil en entornos con alta densidad de dispositivos.

## BSS Coloring

La técnica de "coloreado" BSS minimiza la interferencia entre redes superpuestas, permitiendo transmisiones paralelas y reduciendo los tiempos de espera que exacerbaban el problema de la anomalía de rendimiento.

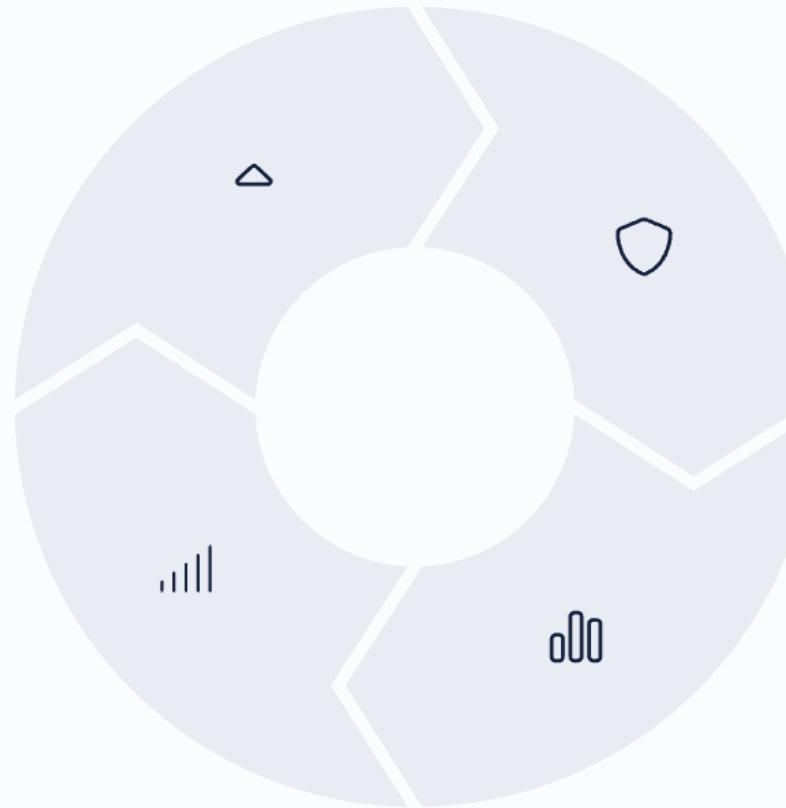
# Recomendaciones Prácticas

## Actualizar Infraestructura

Implementar dispositivos compatibles con Wi-Fi 6 o superior cuando sea posible

## Banda de 5 GHz

Priorizar esta banda para dispositivos críticos que requieren mayor rendimiento



Para mitigar efectivamente la anomalía de rendimiento en redes 802.11, es fundamental adoptar un enfoque proactivo en la gestión de la infraestructura Wi-Fi. La combinación de hardware moderno, configuración optimizada y monitoreo constante permitirá maximizar el rendimiento incluso en presencia de dispositivos con capacidades limitadas.

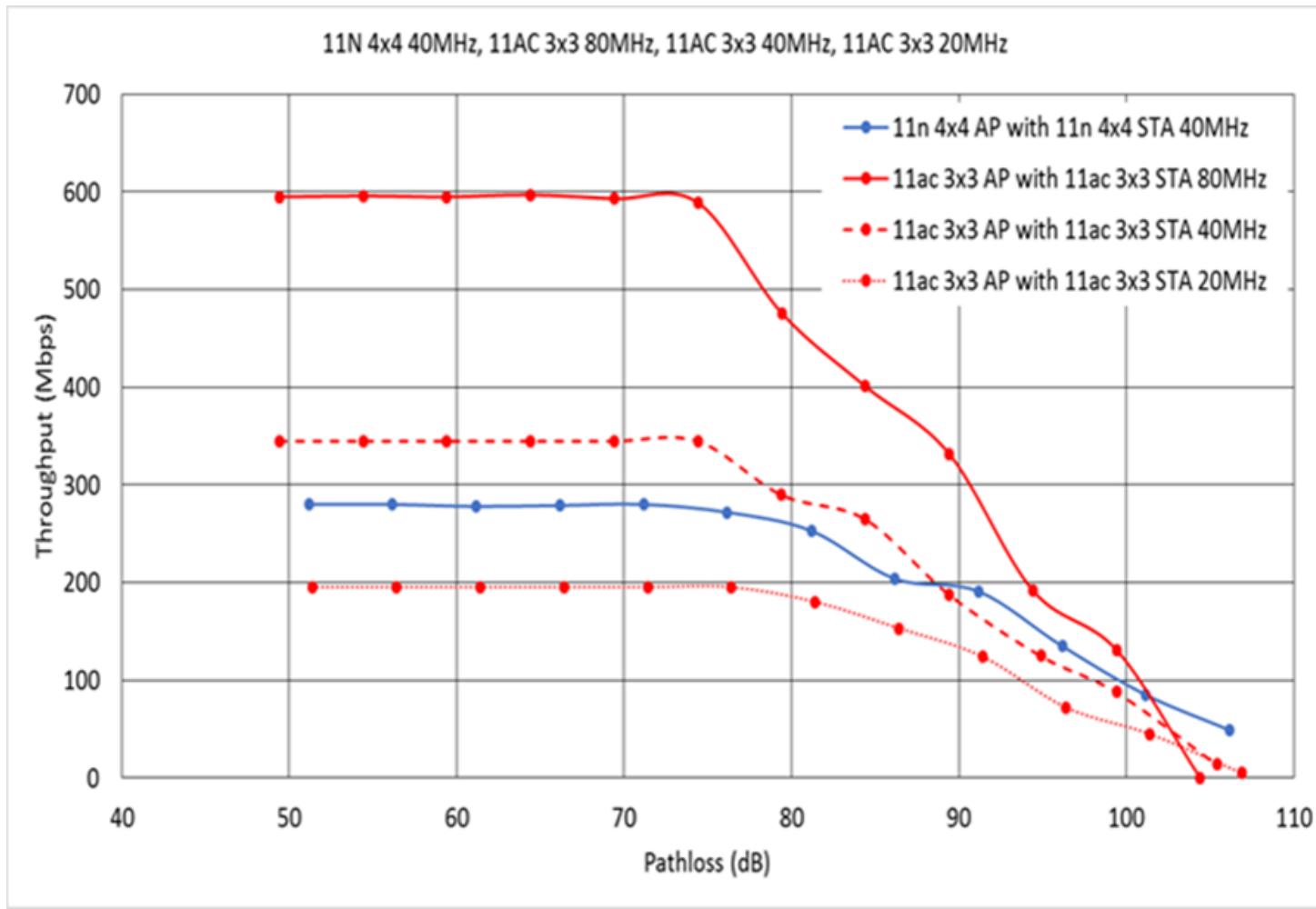
## Políticas de Banda

Configurar redes separadas o políticas específicas para dispositivos antiguos

## Monitoreo Continuo

Utilizar herramientas como Wireshark, Ekahau o AirMagnet para diagnóstico

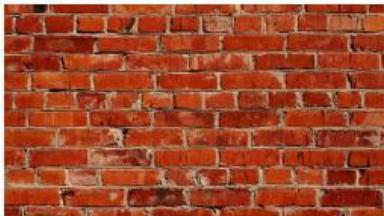
# Performance vs Atenuación



# Atenuaciones típicas

Building Material	2.4 GHz Attenuation	5 GHz Attenuation
Solid Wood Door 1.75"	6 dB	10 dB
Hollow Wood Door 1.75"	4 dB	7 dB
Interior Office Door w/Window 1.75"/0.5"	4 dB	6 dB
Steel Fire/Exit Door 1.75"	13 dB	25 dB
Steel Fire/Exit Door 2.5"	19 dB	32 dB
Steel Rollup Door 1.5"	11 dB	19 dB
Brick 3.5"	6 dB	10 dB
Concrete Wall 18"	18 dB	30 dB
Cubical Wall (Fabric) 2.25"	18 dB	30 dB
Exterior Concrete Wall 27"	53 dB	45 dB
Glass Divider 0.5"	12 dB	8 dB
Interior Hollow Wall 4"	5 dB	3 dB
Interior Hollow Wall 6"	9 dB	4 dB
Interior Solid Wall 5"	14 dB	16 dB
Marble 2"	6 dB	10 dB
Bullet-Proof Glass 1"	10 dB	20 dB
Exterior Double Pane Coated Glass 1"	13 dB	20 dB
Exterior Single Pane Window 0.5"	7 dB	6 dB
Interior Office Window 1"	3 dB	6 dB
Safety Glass-Wire 0.25"	3 dB	2 dB
Safety Glass-Wire 1.0"	13 dB	18 dB

EXPO'15



*Bad*



*Worse*



*Worst*



*Garden Wi-Fi  
Killer*

 Society of Cable  
Telecommunications  
Engineers

# Atenuaciones típicas



ARRIS SCTE 2015

# Donde no poner el AP ....



# Estado del Arte de la Tecnología Wi-Fi

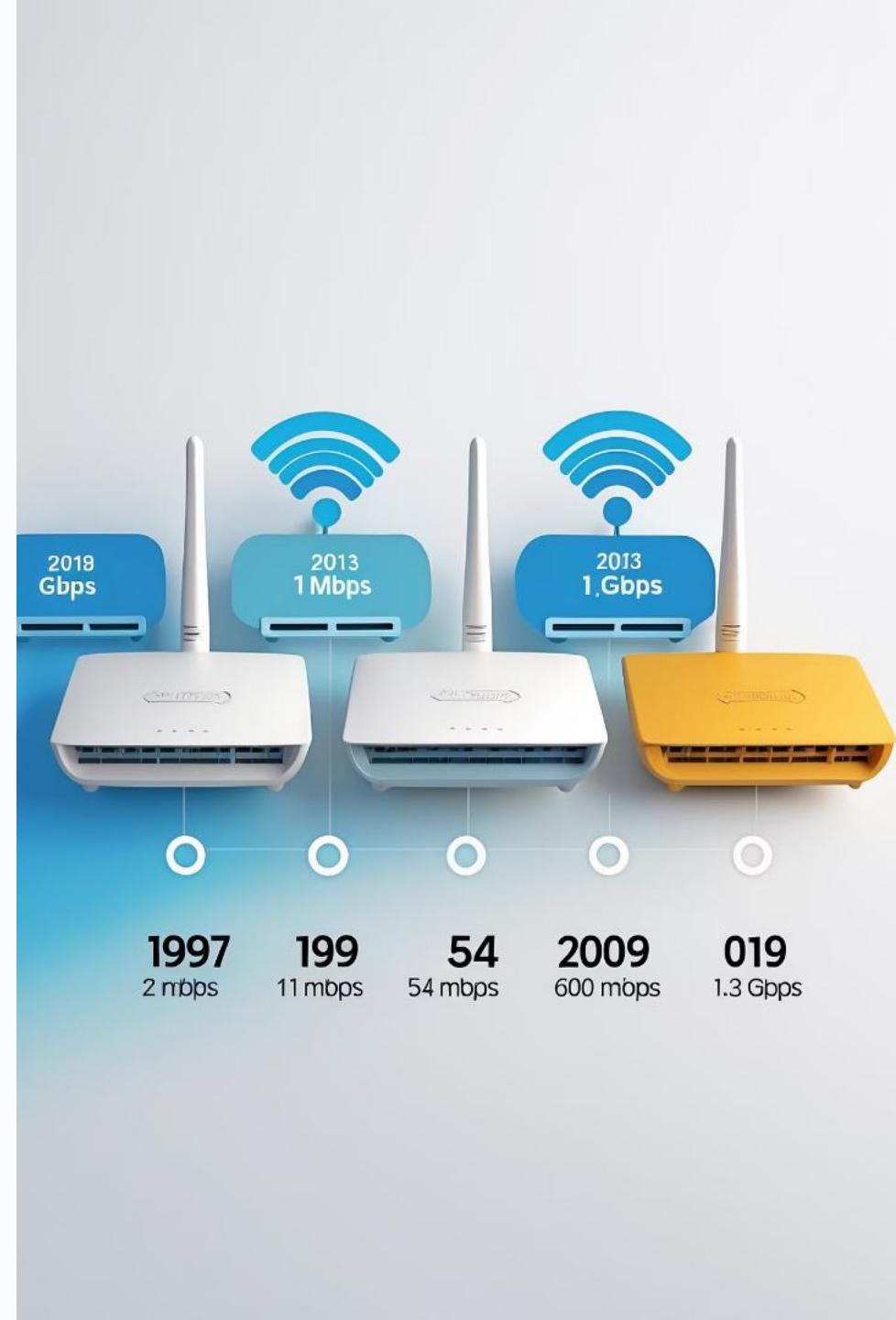
La evolución de la tecnología Wi-Fi ha transformado fundamentalmente nuestra forma de conectarnos al mundo digital. Desde sus inicios hasta los avances actuales en Wi-Fi 7, presenciamos una revolución continua en velocidad, capacidad y eficiencia.



# Evolución de los Estándares Wi-Fi

-  Wi-Fi 5 (802.11ac)
  - Lanzado en 2014
  - Velocidades hasta 3.5 Gbps
  - Primera generación con MU-MIMO
-  Wi-Fi 6 (802.11ax)
  - Introducido en 2019
  - Velocidades hasta 9.6 Gbps
  - Mayor densidad de conexiones
-  Wi-Fi 6E
  - Extensión lanzada en 2020
  - Utiliza banda de 6 GHz
  - Menor congestión de red
-  Wi-Fi 7 (802.11be)
  - Implementación 2024-2025
  - Velocidades hasta 46 Gbps
  - Latencia ultra baja

La evolución de Wi-Fi muestra un patrón consistente de mejora exponencial en velocidad y capacidad. Cada nueva generación ha introducido tecnologías revolucionarias que permiten experiencias de conectividad más fluidas y robustas para usuarios y aplicaciones cada vez más exigentes.



# Wi-Fi 7: La Revolución de Conectividad



Wi-Fi 7 representa un salto tecnológico extraordinario, con velocidades teóricas que superan los 46 Gbps, casi cinco veces más rápido que Wi-Fi 6. Esta nueva generación introduce la tecnología Multi-Link Operation (MLO), permitiendo transmisiones simultáneas en diferentes bandas de frecuencia.

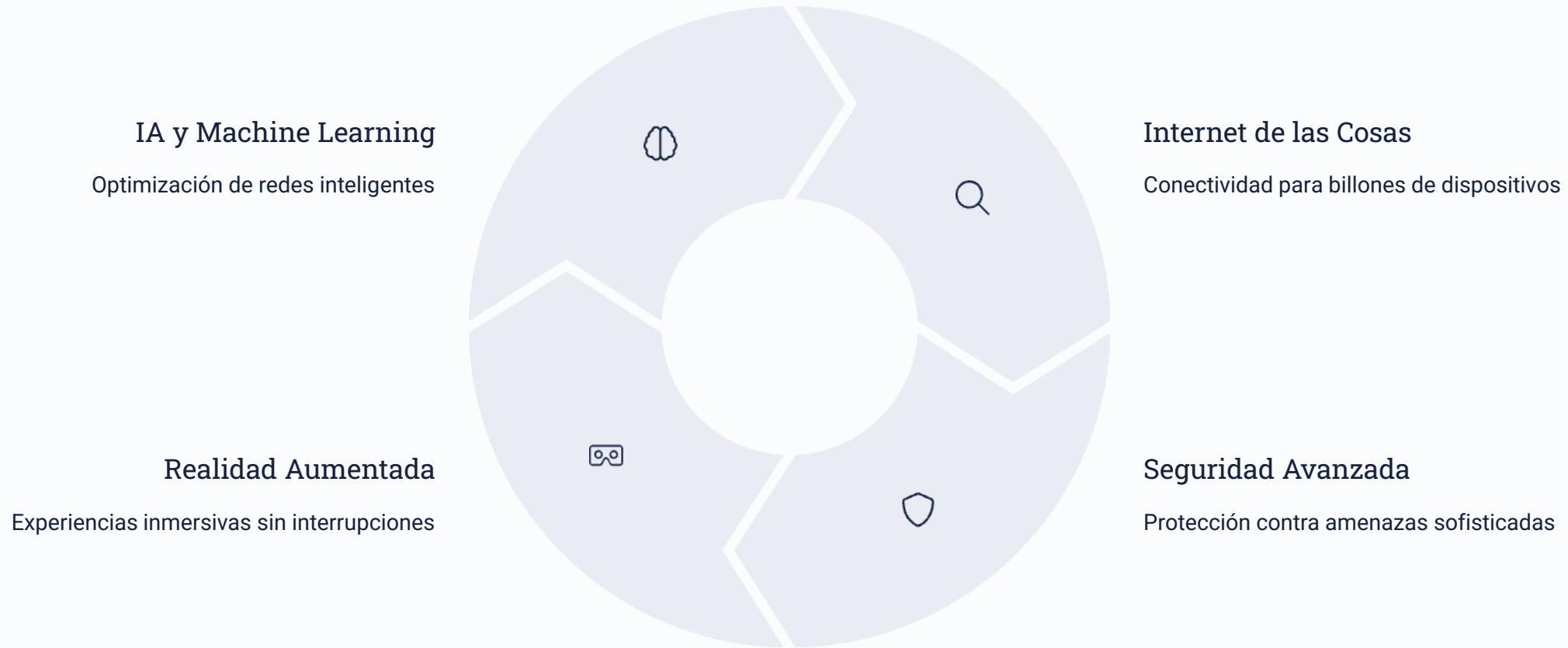
La latencia extremadamente baja hace que Wi-Fi 7 sea ideal para aplicaciones críticas como telemedicina, análisis de datos en tiempo real y experiencias inmersivas de realidad virtual. Su capacidad para manejar entornos densamente poblados de dispositivos lo convierte en la solución perfecta para campus universitarios y centros de investigación.

# Estadísticas de Adopción Global (2025)

Generación	Porcentaje estimado	Volumen aproximado
Wi-Fi 4	25-30%	5.000-6.000 millones
Wi-Fi 5	45-50%	9.000-10.000 millones
Wi-Fi 6	20-25%	4.000-5.000 millones
Wi-Fi 7	<1%	<200 millones



# Integración con Tecnologías Emergentes



La integración de Wi-Fi 7 con tecnologías emergentes creará ecosistemas tecnológicos sin precedentes. Los algoritmos de IA y machine learning optimizarán dinámicamente las redes, adaptándose a patrones de uso y anticipando necesidades de ancho de banda.

En entornos académicos, esta integración facilitará la gestión eficiente de vastas redes de sensores y dispositivos IoT para investigación científica. Los nuevos protocolos de seguridad basados en comportamiento protegerán mejor contra amenazas sofisticadas, crucial para la integridad de datos de investigación.

Las aplicaciones de realidad aumentada y virtual se beneficiarán enormemente de la baja latencia, permitiendo experiencias inmersivas para modelado científico y visualización de datos complejos.

# Ventajas del Wi-Fi 7 en Entornos Académicos

## Transmisión de Datos Científicos

La velocidad de Wi-Fi 7 permite transferir conjuntos de datos masivos en segundos, facilitando colaboraciones entre instituciones y acceso inmediato a recursos computacionales compartidos.

Ejemplos: secuenciación genómica, modelos climáticos, análisis de partículas.

## Laboratorios Virtuales

Soporte para simulaciones complejas y laboratorios virtuales con requisitos de alta demanda, permitiendo prácticas remotas sin compromiso en la calidad de la experiencia.

Ejemplos: simulaciones de física cuántica, entornos quirúrgicos virtuales.

## Computación Distribuida

Mejora en la eficiencia de sistemas de computación distribuida y procesamiento paralelo, reduciendo tiempos de cálculo para problemas complejos.

Ejemplos: modelado 3D, entrenamiento de modelos de IA.

## Colaboración Remota

Experiencias mejoradas en clases remotas y entornos colaborativos con transmisión sin interrupciones de video 8K y audio de alta fidelidad.

Ejemplos: defensas de tesis, conferencias internacionales.

Los entornos académicos de ciencias de la computación y análisis de datos serán los principales beneficiarios de Wi-Fi 7, transformando fundamentalmente la forma en que se realiza la investigación y la enseñanza.

# Desafíos y Consideraciones

## Costos de Actualización



La transición a Wi-Fi 7 requerirá inversiones significativas en infraestructura. Para una universidad de tamaño medio, el costo estimado puede superar los \$250,000 USD considerando puntos de acceso, switches y configuración.

## Compatibilidad



Los dispositivos actuales no aprovecharán todas las ventajas de Wi-Fi 7. Se necesitará una estrategia de actualización gradual de equipos para estudiantes e investigadores, particularmente para aplicaciones exigentes.

## Seguridad



Mayor ancho de banda significa mayores superficies de ataque. Serán necesarios protocolos de seguridad robustos para proteger datos de investigación sensibles y propiedad intelectual en entornos de alta densidad.

## Consumo Energético



Las implementaciones a gran escala pueden aumentar significativamente el consumo energético. Será crucial desarrollar estrategias de eficiencia para mantener el compromiso con la sostenibilidad ambiental.

Aunque Wi-Fi 7 promete beneficios extraordinarios, su implementación presenta desafíos significativos que deben abordarse cuidadosamente, especialmente en instituciones académicas con presupuestos limitados.

# El Futuro de la Conectividad Inalámbrica



## Wi-Fi 7 dominante (2026-2027)

Adopción masiva en todos los sectores



## Integración con IA (2027-2028)

Redes autooptimizables y adaptativas



## Convergencia con 5G/6G (2028-2030)

Conectividad híbrida sin interrupciones



## Nuevos casos académicos (2025+)

Transformación de la investigación y enseñanza

Hacia 2026-2027, Wi-Fi 7 se consolidará como el estándar dominante, impulsando una nueva era de aplicaciones que actualmente son apenas concebibles. La integración profunda con inteligencia artificial permitirá redes que se optimicen continuamente, prediciendo patrones de uso y previniendo congestiones.

La convergencia con tecnologías 5G y futuras 6G creará experiencias de conectividad verdaderamente ubicuas, donde las transiciones entre redes serán imperceptibles. Para las ciencias computacionales, esto abrirá nuevas fronteras en computación distribuida y análisis de datos a escala global.

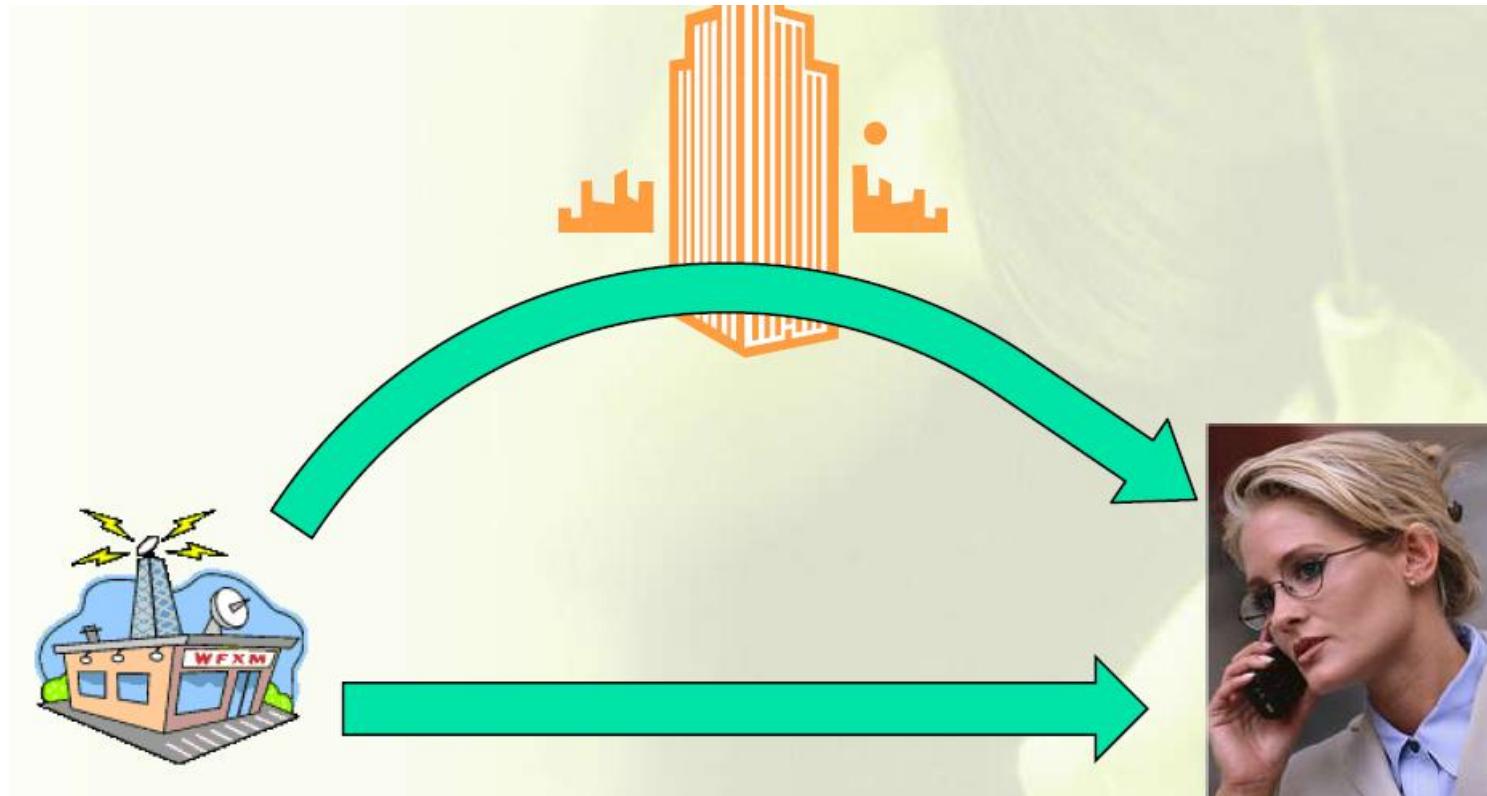
En el ámbito académico, estos avances revolucionarán la forma en que enseñamos e investigamos, facilitando colaboraciones internacionales sin barreras y democratizando el acceso a recursos computacionales avanzados.



# El Problema del Multipath en los Primeros Wi-Fi

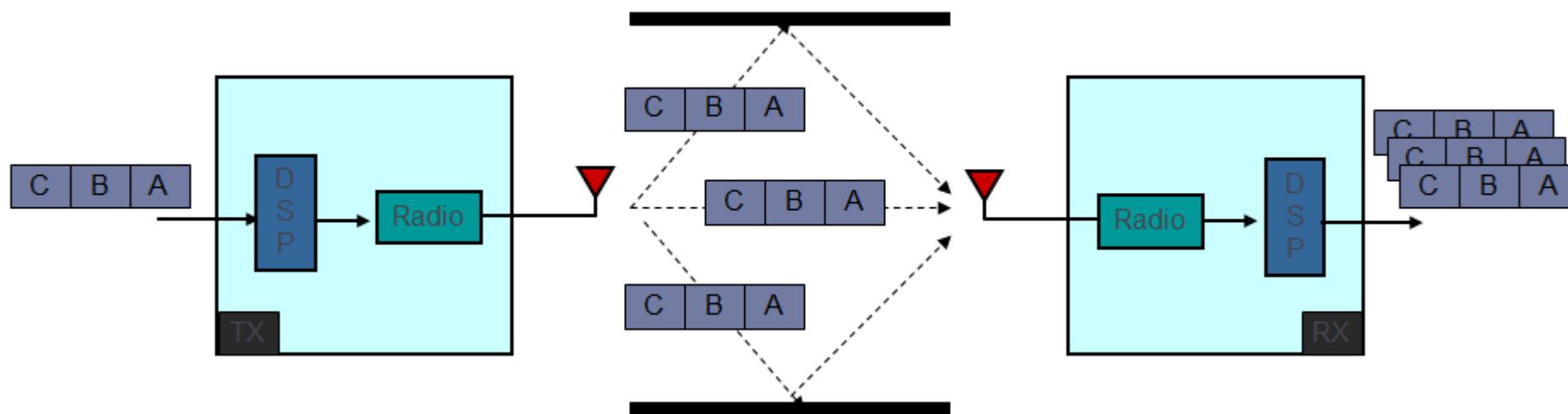
Una explicación para estudiantes de ciencias de la computación sobre uno de los mayores desafíos en las primeras redes inalámbricas.

# “Multi-path Fading”



# Propagación Multi-path en a/b/g

- Multi-path produce interferencia inter-simbólica (ISI) impactando en el throughput y el alcance



# ¿Qué es el Problema del Multipath?



## Señal Original

La señal Wi-Fi sale del router hacia los dispositivos receptores.

## Múltiples Caminos

La señal rebota en paredes, techos y objetos.

## Llegadas Desincronizadas

Versiones de la misma señal llegan en diferentes momentos.

## Interferencia

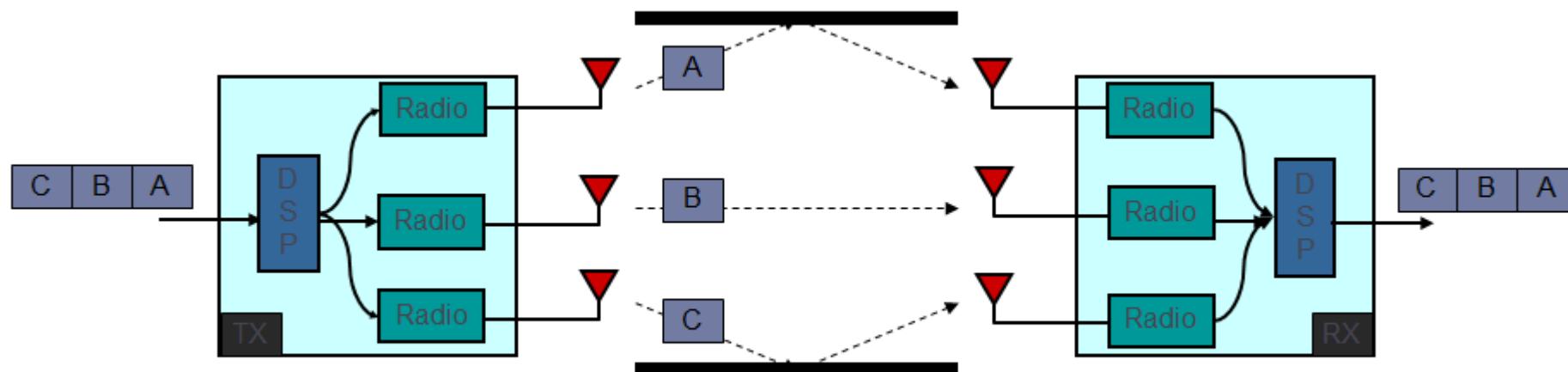
El receptor no puede interpretar correctamente los datos recibidos.

**WiFi signals un multipath problem**



# Multi-path en 802.11n

- La Multiplexación espacial transforma la propagación multi-path en un beneficio logrando un aumento del throughput y alcance



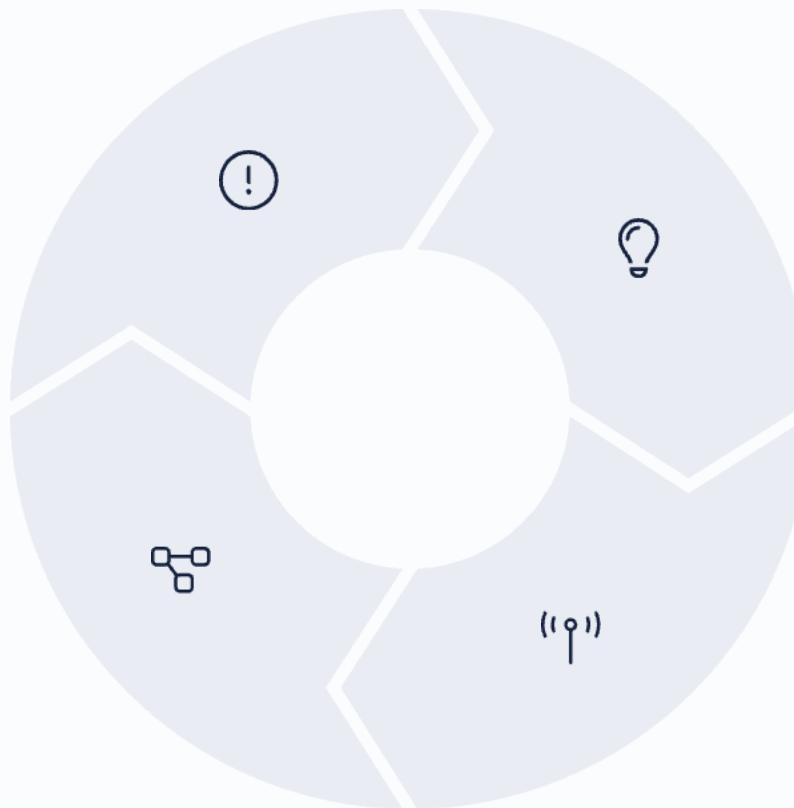
# Evolución y Soluciones

## Problema Original

Primeros Wi-Fi: interferencias, pérdida de datos y conexiones inestables.

## MIMO

Múltiples antenas aprovechan diferentes rutas para mejorar la transmisión.



## Cambio de Perspectiva

Ingenieros vieron el multipath como oportunidad, no obstáculo.

## Beamforming

Direcciona señales específicamente hacia los dispositivos conectados.

# ¿Qué es MIMO en Wi-Fi?

MIMO significa "Múltiple Entrada, Múltiple Salida". Esta tecnología permite usar varias antenas para transmitir y recibir datos simultáneamente.

Fue introducida con el estándar Wi-Fi 4 (802.11n). Revolucionó las comunicaciones inalámbricas al multiplicar la eficiencia de la red.

L0 por LIC-FI Gamma 01





# ¿Cómo funciona MIMO?



## Transmisión múltiple

Los routers envían señales Wi-Fi desde varias antenas al mismo tiempo.

## Aprovechamiento de rebotes

Utiliza reflexiones en paredes y obstáculos para mejorar la señal.

## Multiplexación espacial

Cada antena envía diferentes partes de los datos simultáneamente.

# Beneficios de MIMO en Wi-Fi

## Mayor velocidad

Aumenta la velocidad hasta cuatro veces más al sumar antenas. Aprovecha múltiples canales de datos simultáneos.

## Mejor cobertura

Mejora la estabilidad y alcance de la señal. Reduce las zonas muertas en espacios grandes.

## Más conexiones

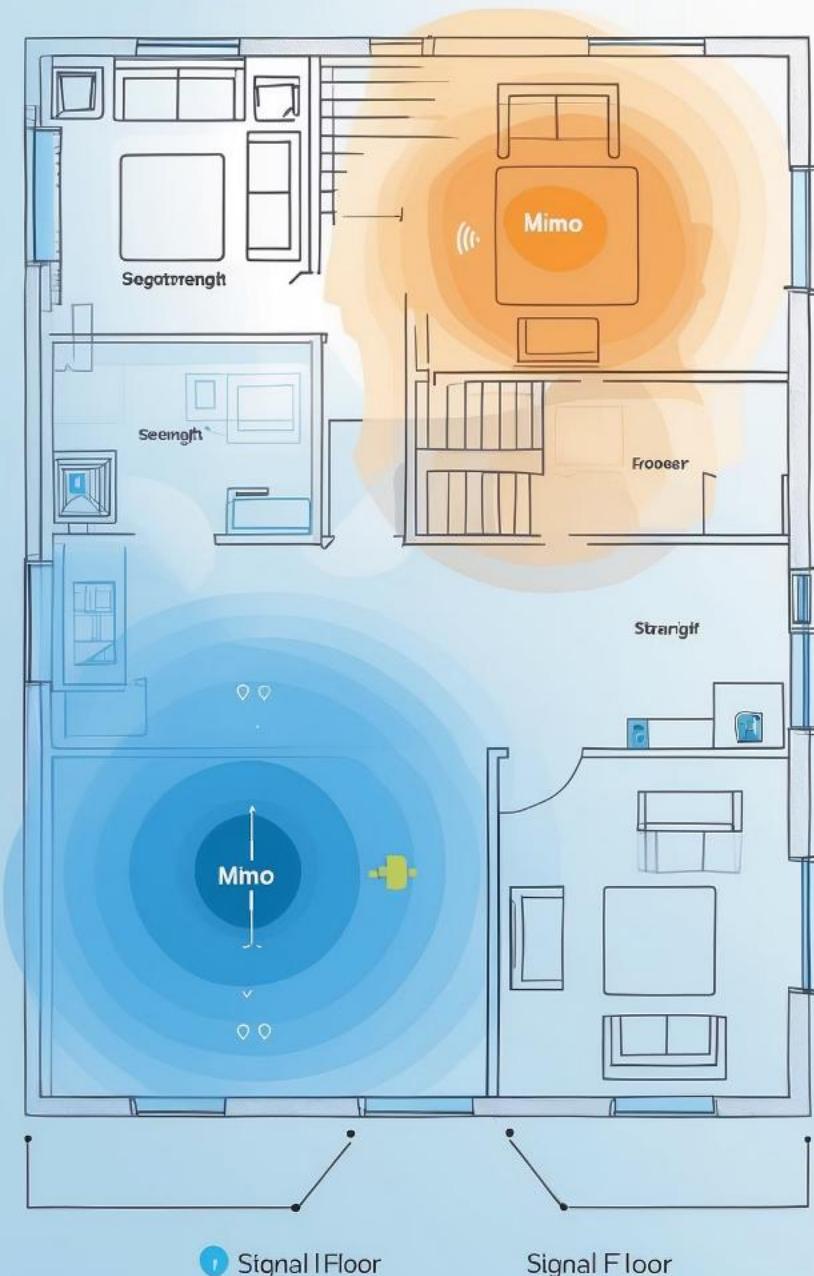
Permite conectar más dispositivos sin perder calidad. Ideal para hogares con muchos aparatos.

## Mayor fiabilidad

Reduce errores de transmisión aprovechando la diversidad espacial. Mantiene conexiones estables.

Wi-Fi Coverage

Without MIMO



# Ejemplo Práctico y Conclusión

**600Mbps**

Router 4 antenas

Velocidad teórica con MIMO

**150Mbps**

Antena única

Velocidad sin tecnología MIMO

**100%**

Adopción

Routers modernos con MIMO

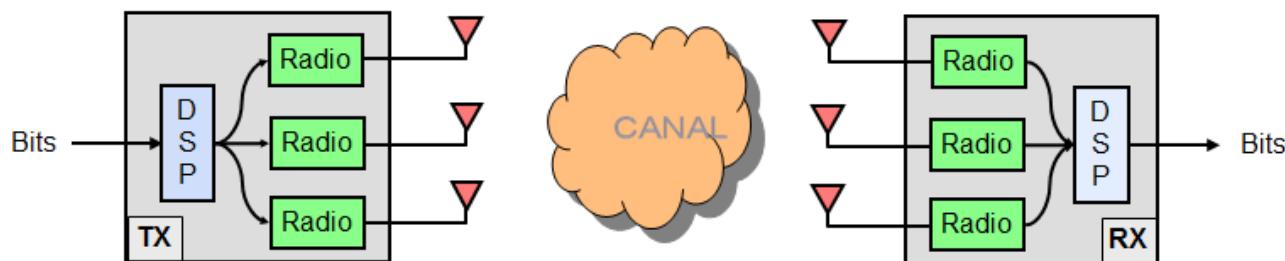
MIMO es esencial para redes rápidas y estables. Todos los routers Wi-Fi 4/5/6/6E incorporan esta tecnología fundamental.

# 802.11n introduce : MIMO

- Antes SISO : Single Input Single Output Radio (con un Rx de diversidad opcional)

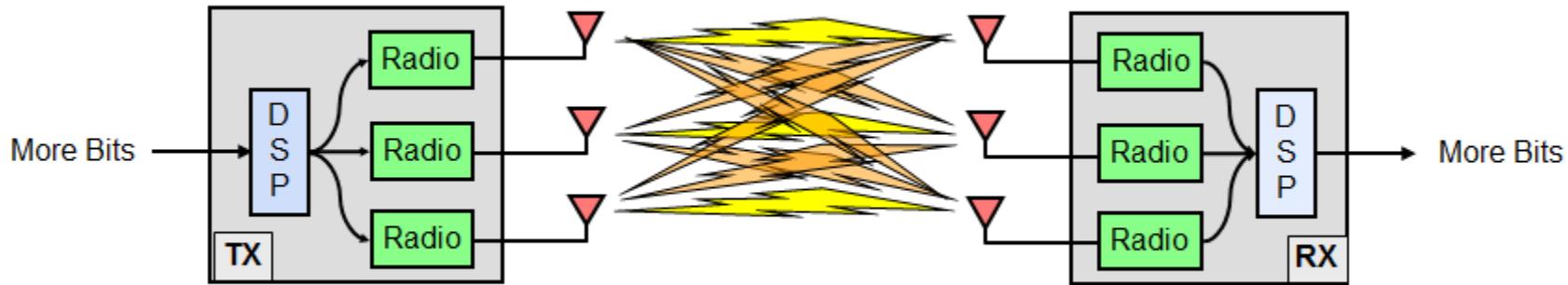


- Multiple Input Multiple Output (MIMO) Tx y Rx reciben múltiples señales de radio simultáneamente en el mismo espectro



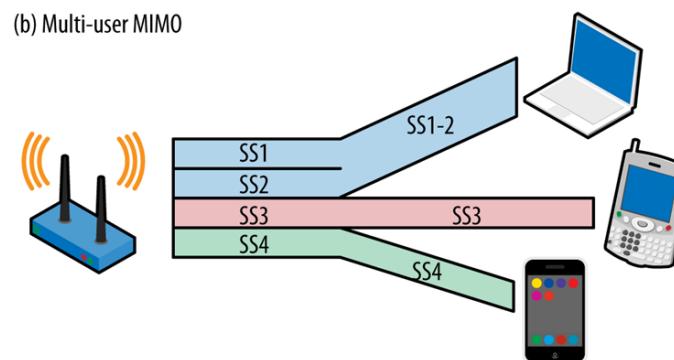
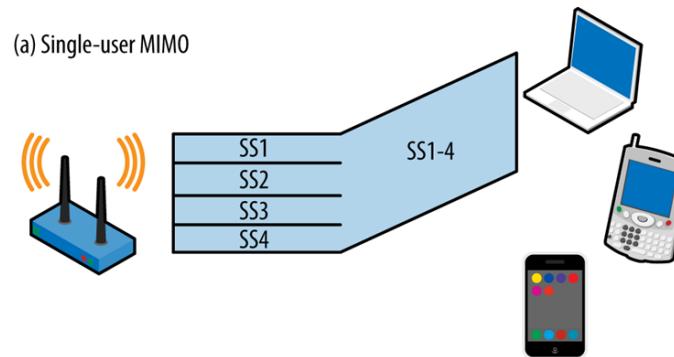
# Multiplexación por división espacial

- Múltiples streams de datos independientes son enviados entre las antenas del Tx y Rx para poder enviar mas “bits” en determinado ancho de Banda

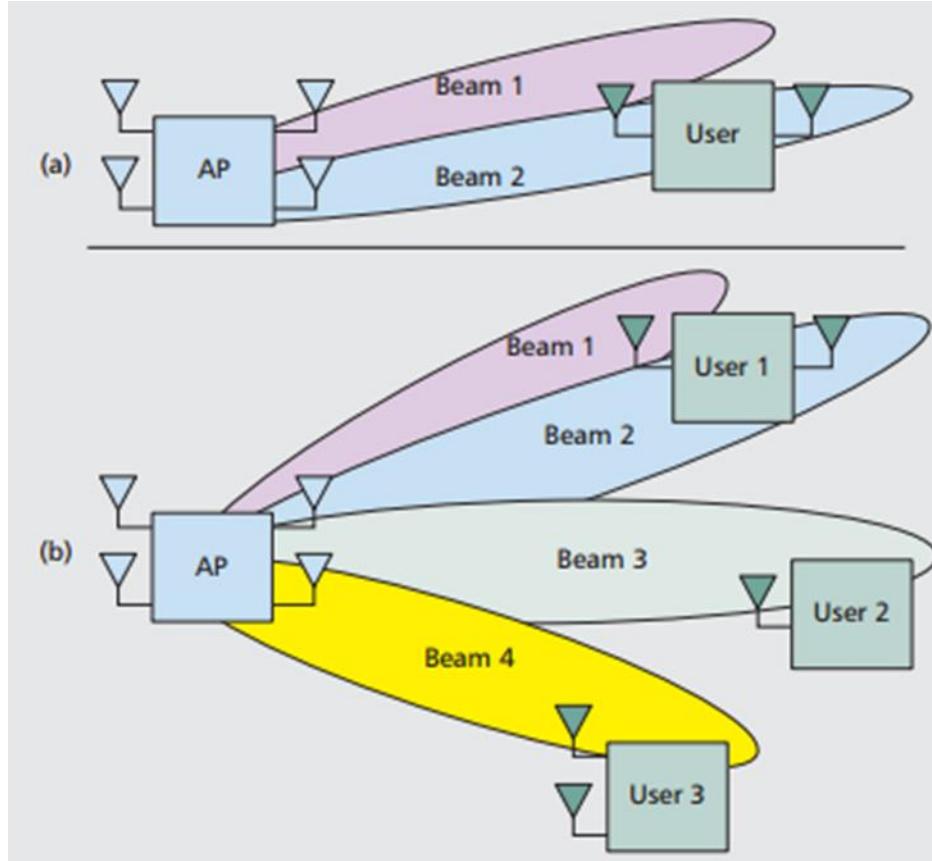


# 802.11ac introdujo : MU-MIMO

- MIMO Multiusuario



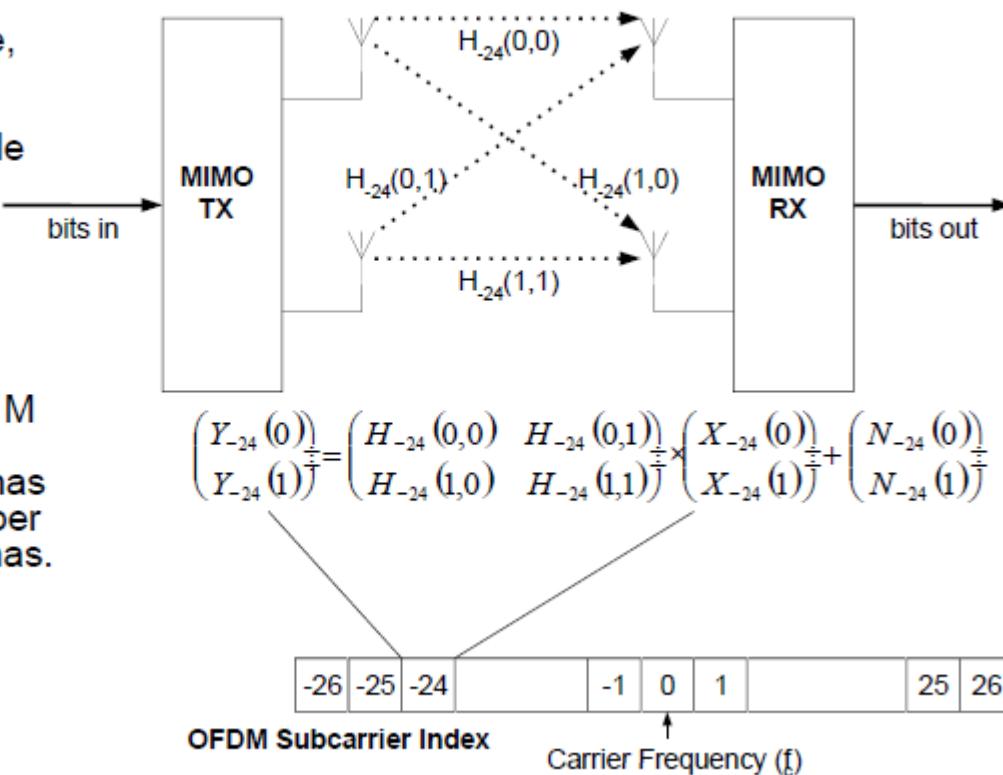
# SU-MIMO beamforming (a) downlink MU-MIMO beamforming (b)



# MIMO no es trivial .....

In OFDM, the channel is broken into L (in this case, 53) parallel flat-fading channels, each representable by a single coefficient.

In MIMO OFDM, there is an NxM matrix of channel coefficients per subcarrier, where M is the number of transmitter antennas and N is the number of receiver antennas.



# Notación MIMO

$$T \times R : S$$

- T : cantidad de antenas transmisoras
- R: cantidad de antenas receptoras
- S: cantidad de streams espaciales

# Referencias

- <https://www.intel.com/content/www/us/en/gaming/resources/wifi-6.html>
- <https://www.cisco.com/c/en/us/products/wireless/what-is-wi-fi-6.html>
- <https://www.intel.la/content/www/xl/es/support/articles/000005725/wireless/legacy-intel-wireless-products.html>
- <https://www.qualcomm.com/products/wi-fi>