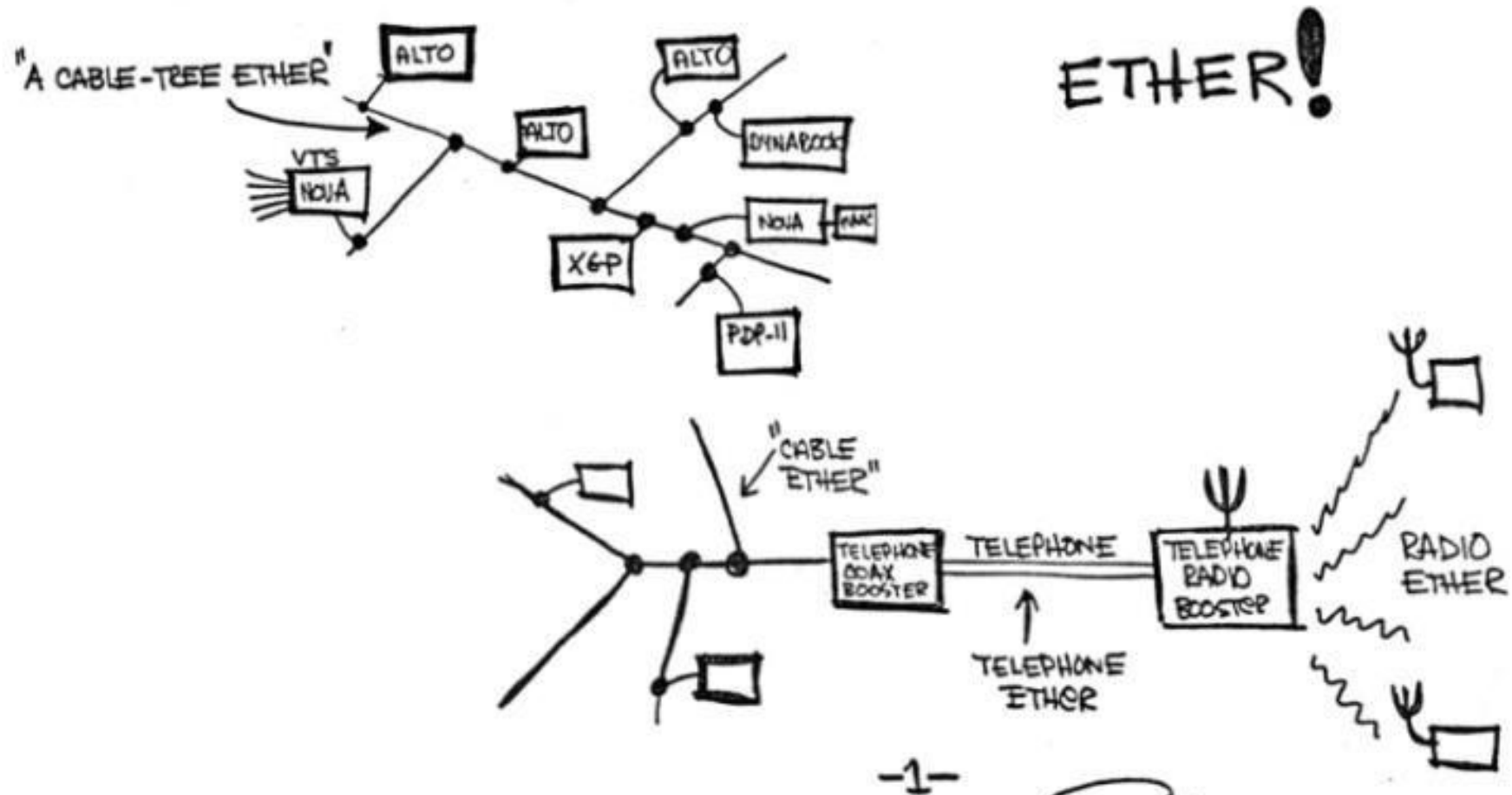


# Teoría de las Comunicaciones

**Claudio Righetti**  
**9 septiembre 2025**  
*segundo Cuatrimestre*

**Departamento de Computación**  
**Facultad de Ciencias Exactas y Naturales**  
**Universidad de Buenos Aires**  
**Argentina**



Bob Metcalfe's 1972 sketch of his original "ethernet" vision  
Image provided courtesy of Palo Alto Research Center Inc., a Xerox Company

# IEEE 802.11 a.k.a Wi-Fi

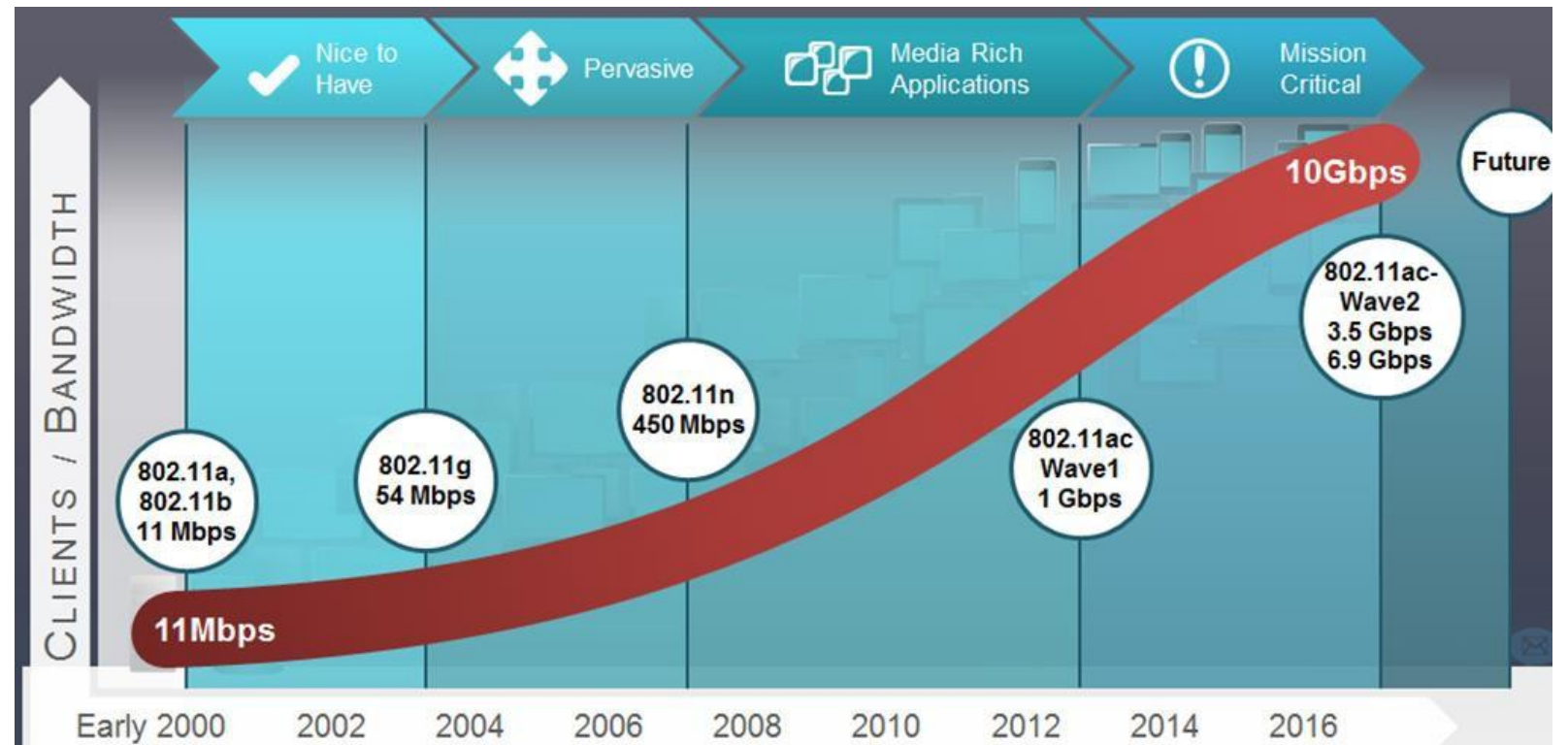
El “primer Wi-Fi electrónico” :WaveLAN



El “padre del wi-fi” Vic Vayes



[http://ethw.org/Vic\\_Hayes#Biography](http://ethw.org/Vic_Hayes#Biography)



# Protocolos de acceso múltiple

Medios Compartidos

# Acceso a medios Compartidos

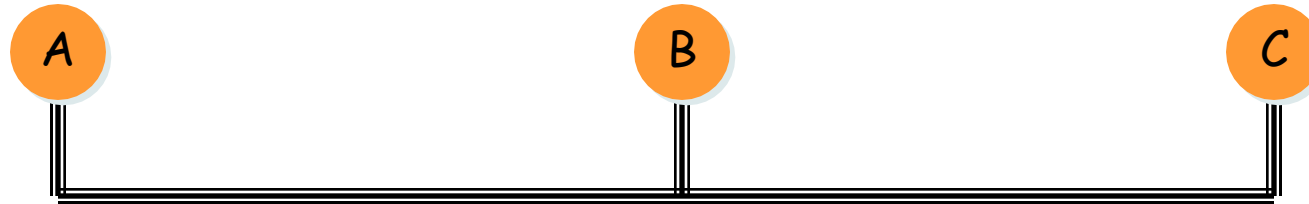
---

- ▶ Veremos que podemos “compartir” un medio de transmisión guiado o no guiado mediante
  - ▶ TDM
  - ▶ FDM
  - ▶ WDM
  - ▶ Existe otra técnica, que escapa a los objetivos de esta materia: CDMA (Code Division Multiple Access)
  - ▶ OFDMA que daremos una muy breve introducción
- ▶ Otras formas de compartir: **Contención estadística**
  - ▶ “Los sistemas en los cuales varios usuarios comparten un canal común de modo tal que puede dar lugar a conflictos se conocen como **sistemas de contención**”
  - ▶ Los conflictos son **1) aceptados** o **2) manejados**

# El problema del acceso a un canal compartido

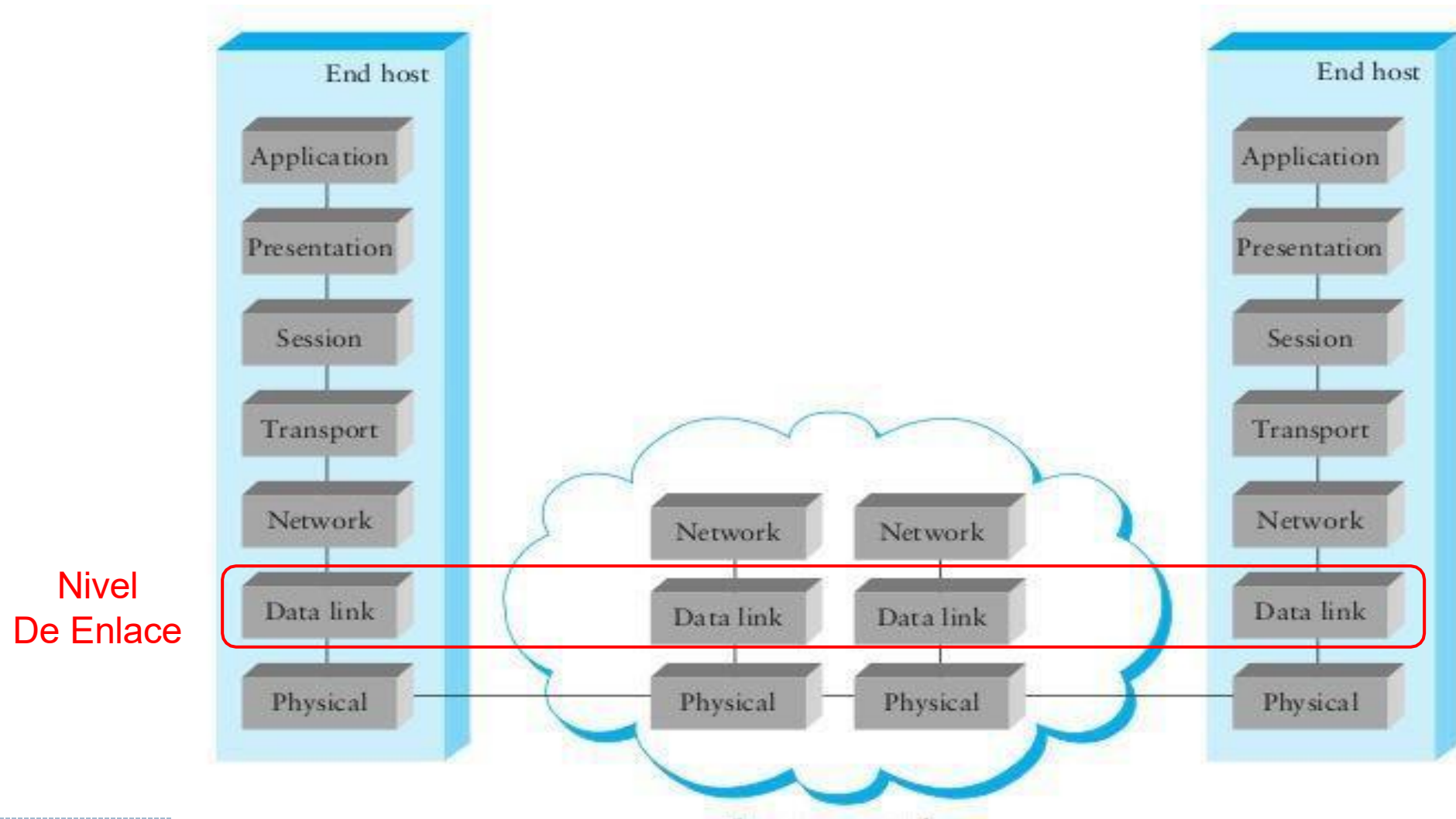
---

- ▶ Múltiples nodos comparten un medio



- ▶ La simultaneidad de transmisión no es posible
- ▶ “MAC Protocols” (Medium Access Control)
  - ▶ Maximizar, **en promedio**, el número de éxitos en los intentos de comunicación.
  - ▶ Asegurar “**igualdad de oportunidades**” (**average fairness**, criterio “**en promedio**”) entre todos los nodos “competidores”

# Paradigma de capas



# Control de Acceso Compartido

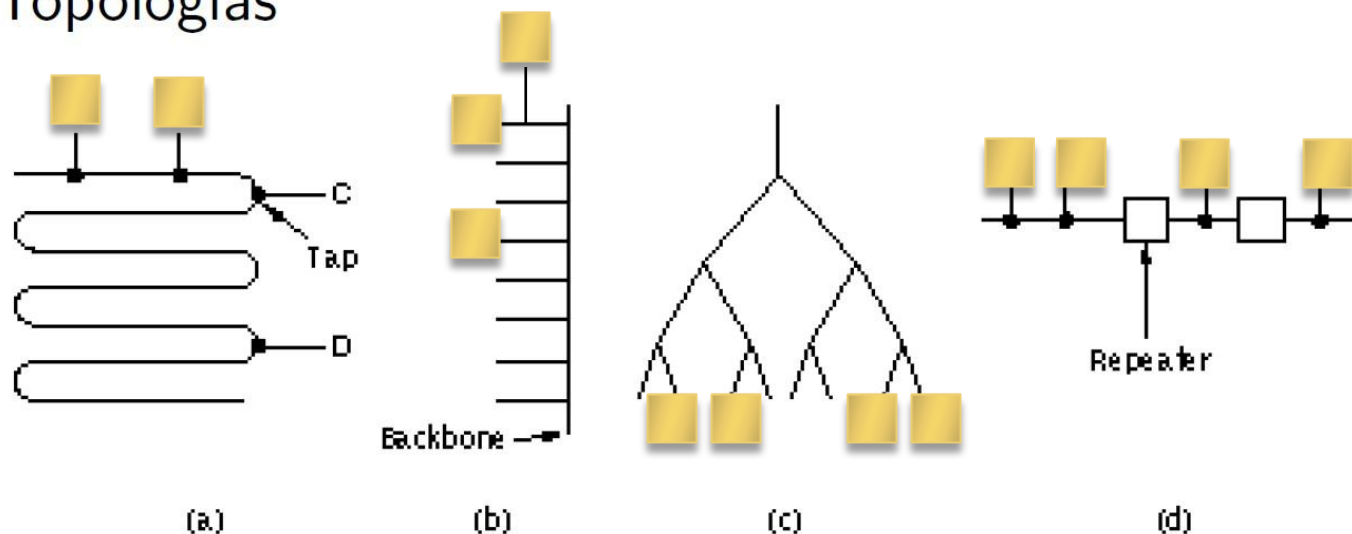
---

- Un medio físico para varios hosts, control descentralizado.
- Surge la necesidad de:
  - Esquema de Direccionamiento.
  - Control de Acceso.
    - Podría usarse FDM o TDM? Que recurso se administra?
- Ejemplos:
  - Aloha.
  - Ethernet (802.3).
  - WIFI (802.11).
  - Token Ring (802.5).



# Ejemplo: Tecnología Ethernet (IEEE 802.3)

## Topologías

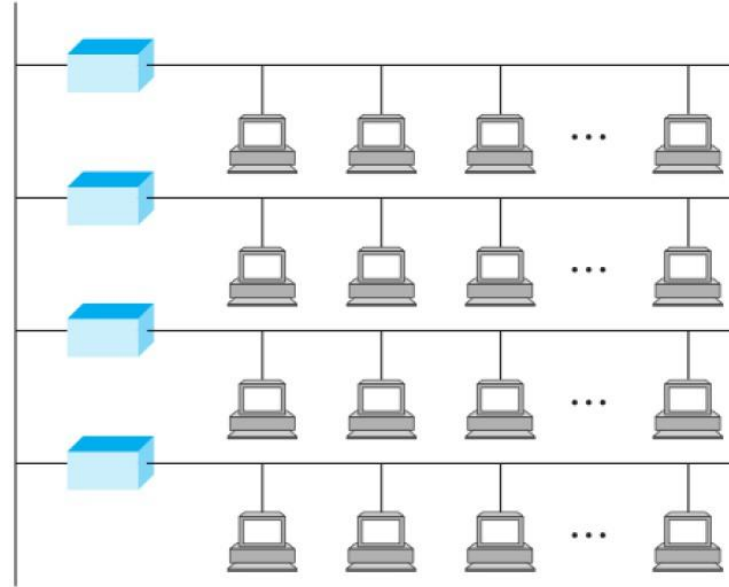


## Tipos de Cables (Medio Físico)

- 10base2 - Coaxil (10 Mbps, 200 m) IEEE 802.3a
- 10base5 - Coaxil (10 Mbps, 500 m) IEEE 802.3
- 10baseT - Par Trenzado (10/100/1000 Mbps, 100 m) IEEE 802.3i

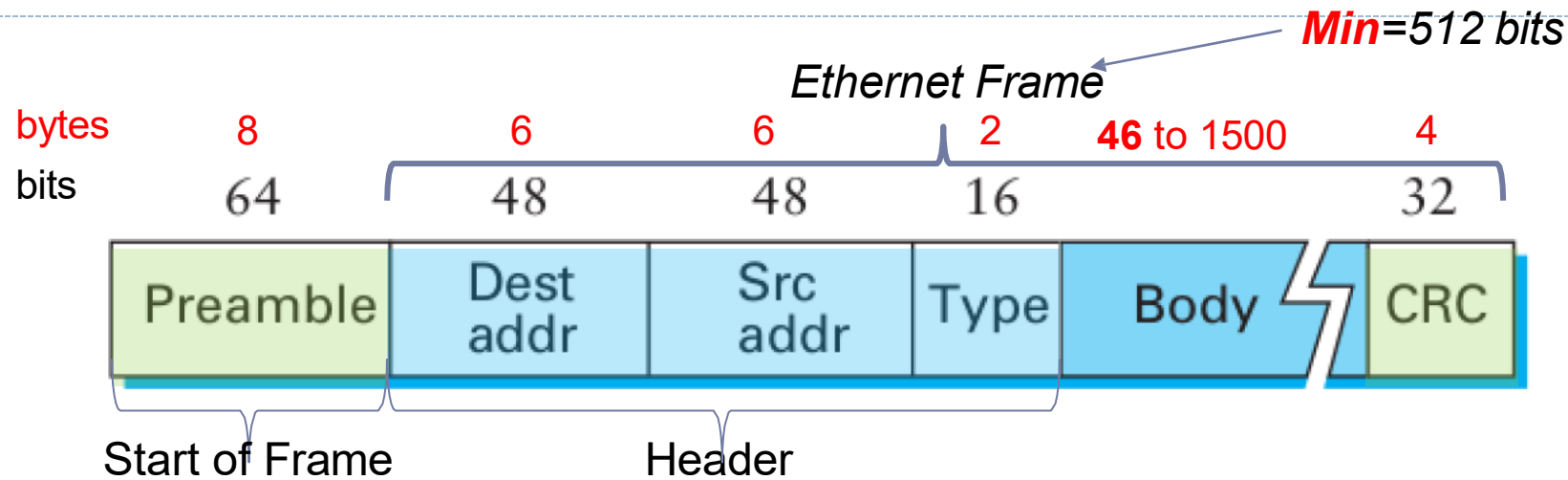
# Acceso compartido en Ethernet (IEEE 802.3)

---



- IEEE 802.3
- Max. 500m por tramo (evitar atenuación).
- Max. 4 repetidores  $\Rightarrow$  Enlace max=2500m
- Min. 2.5m entre hosts.

# Formato de Frame Ethernet



Un host recibe frames que estén destinados a ...

... su dirección.

... la dirección broadcast (FF:FF:FF:FF:FF:FF).

... una dirección multicast (de estar suscripto).

o cualquier frame (de haber sido activado el modo promiscuo).

# Mecanismo de acceso: CSMA-CD

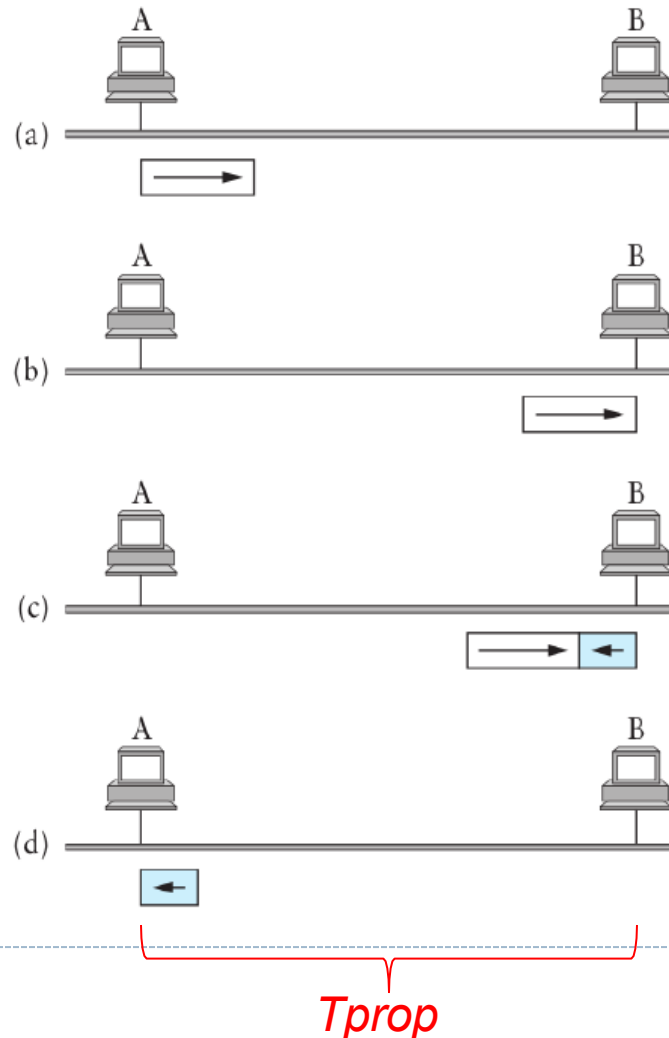
---

Cuando un host tiene datos para enviar, sensa el medio:

- Si está *libre*, transmite.
- Si está *ocupado*:
  - 1-persistente: espera a que se libere y transmite. (es el caso de Ethernet IEEE 802.3)
  - p-persistente: espera a que se libere y transmite con probabilidad  $p$ .
- Half-duplex: La lógica de recepción está establecida en el sensado para detectar colisiones.

# Colisiones

## Escenario de peor caso



- Si los hosts envían frames, producen colisiones.
- Es necesario tener un control sobre los envíos, para saber si llegaron sin colisionar.

★ **Largo mínimo de trama:**  
Se envía hasta saber que no hubo colisión. El tiempo de propagación entre los extremos es clave.

# Colisiones

---

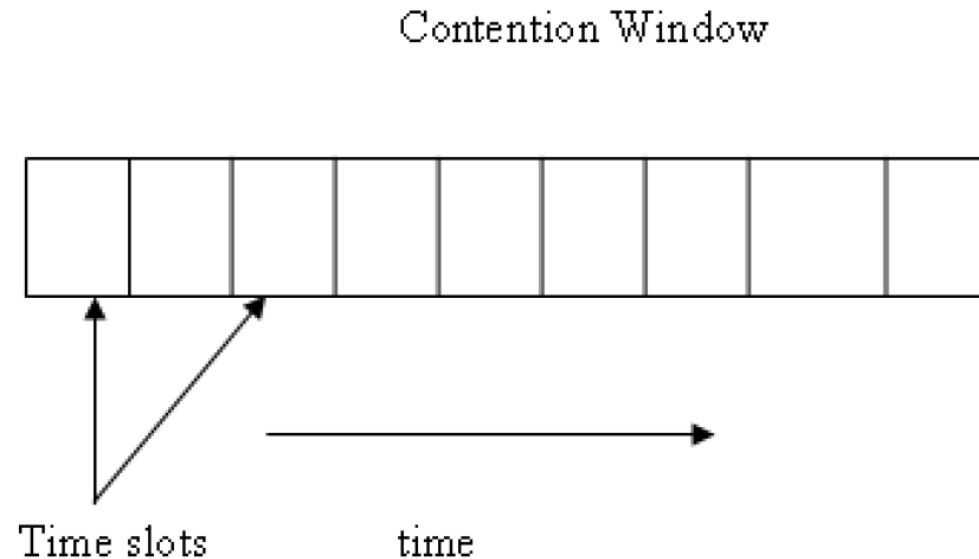
¿Qué hacer ante una colisión?

**¡Retransmitir!**

- ¿Inmediatamente?
- ¿Luego de un tiempo fijo?
- ¿Luego de un tiempo aleatorio?

# Mecanismo de Exponential BackOff

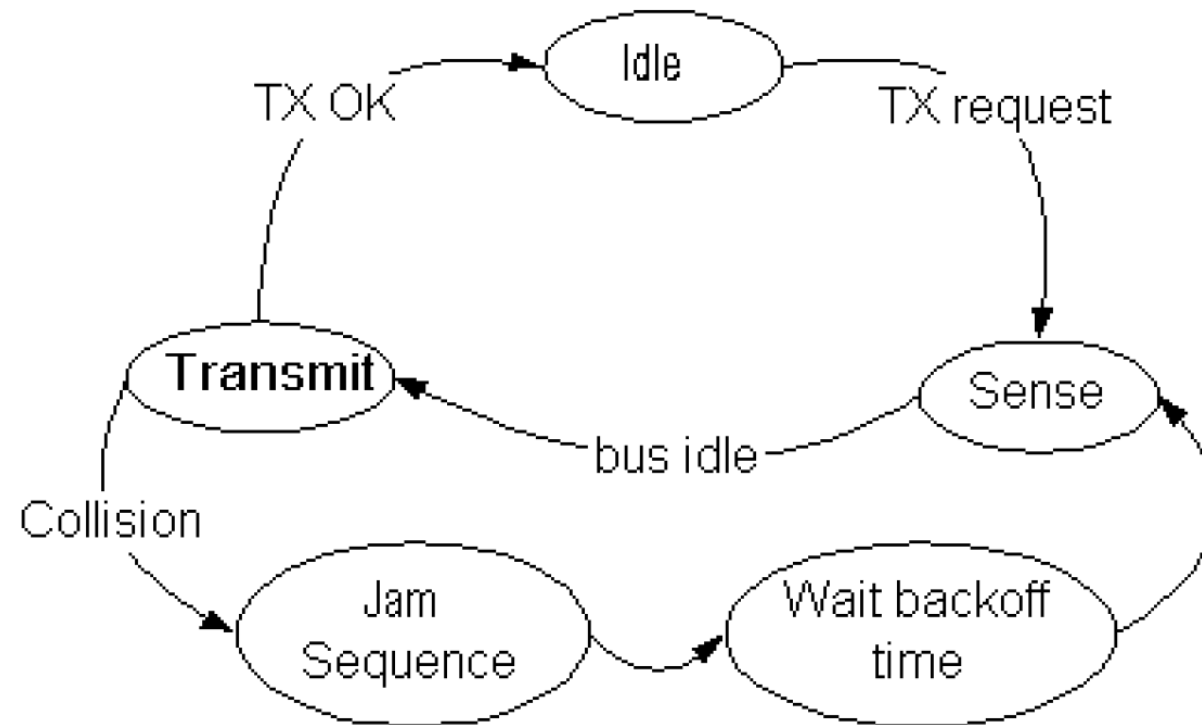
---



- Elegir un *slot* entre 0 y  $2^k - 1$ , con  $k$  la cantidad de intentos.
- Esperar *slot* veces el *RTT* antes de sensar para retransmitir.

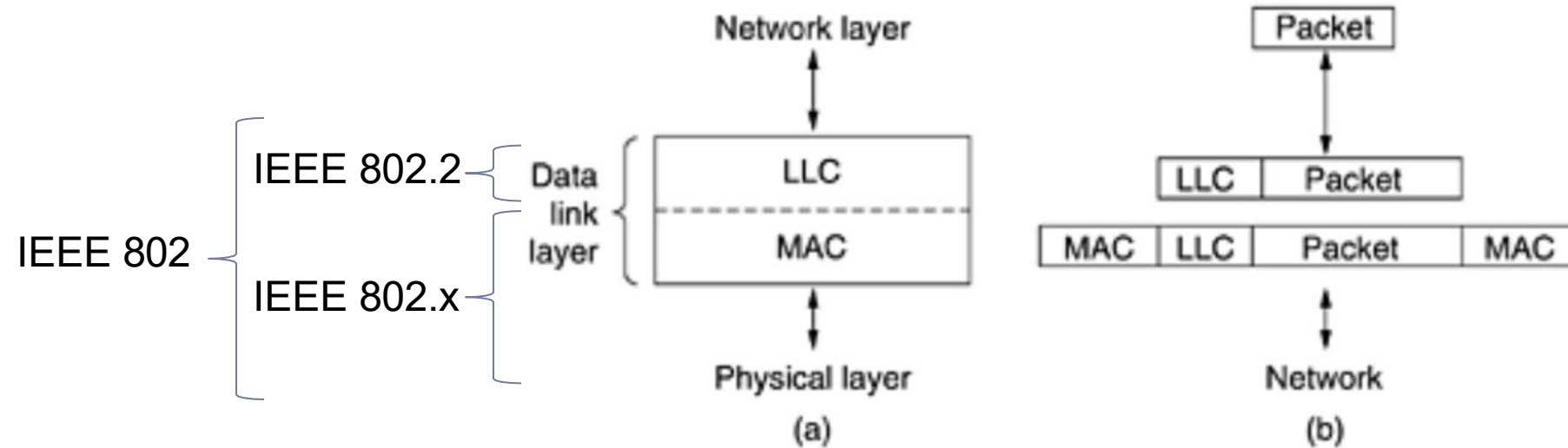
# Estados de un Transmisor CSMA-CD

---





# Estándar 802.2: LLC (Logical Link Control)

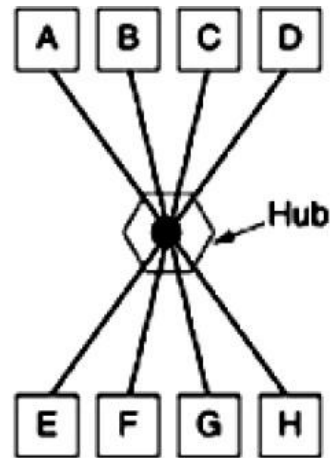


- Ofrece tres tipos de servicios
  - Sin conexión y sin ACK ← **CSMA**
  - Sin conexión y con ACK
  - Orientado a conexión
- Encapsula distintos tipos de medios físicos (WIFI, Ethernet, ...)

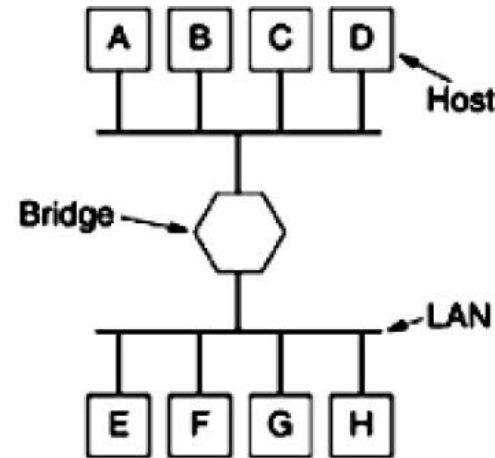
802.11

802.3

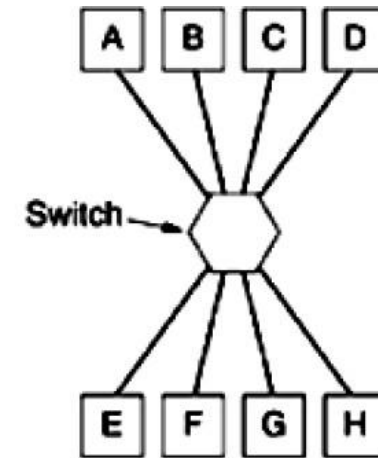
# Escalando con “Red de Área Local” (Local Area Network, LAN)



(a)



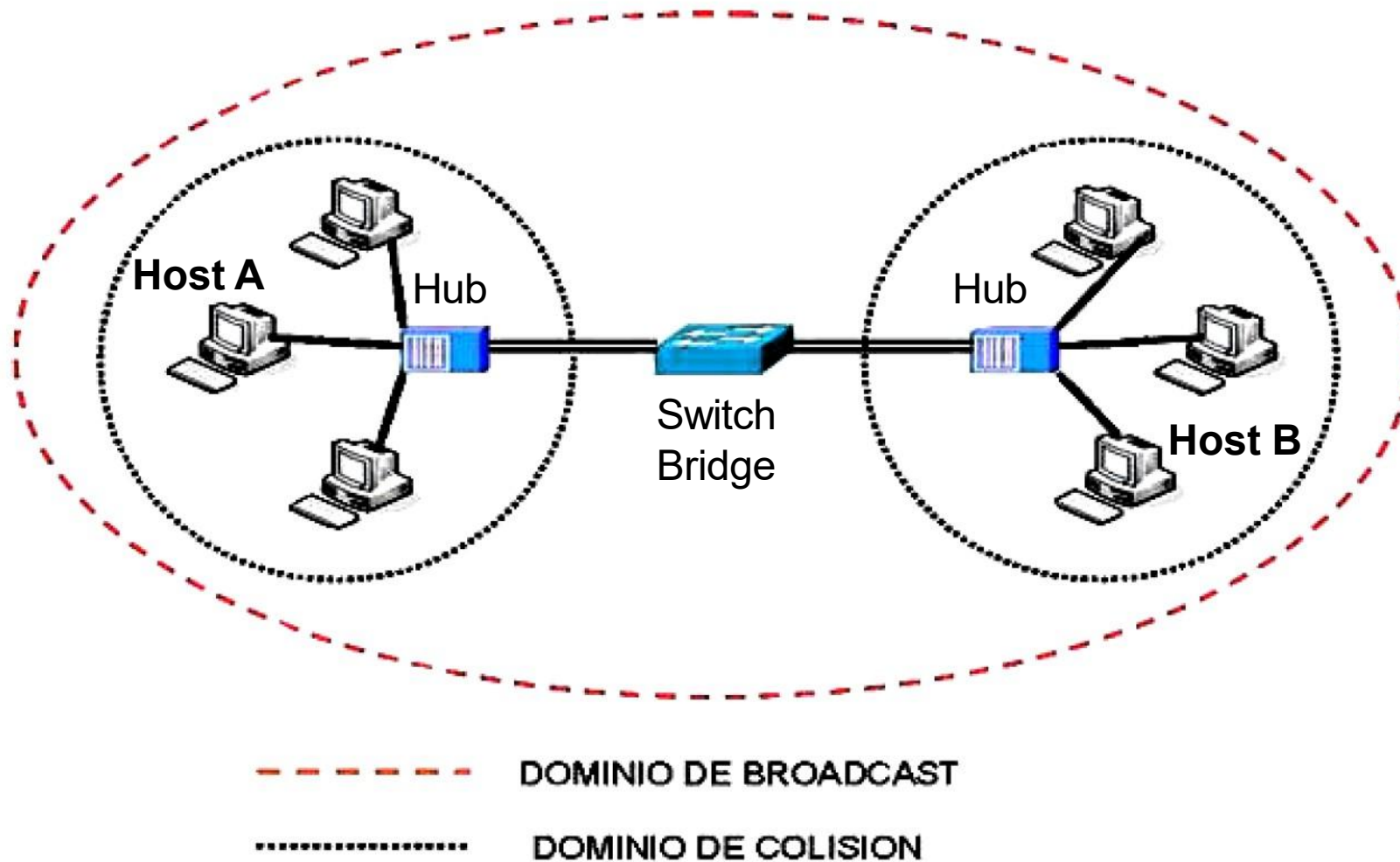
(b)



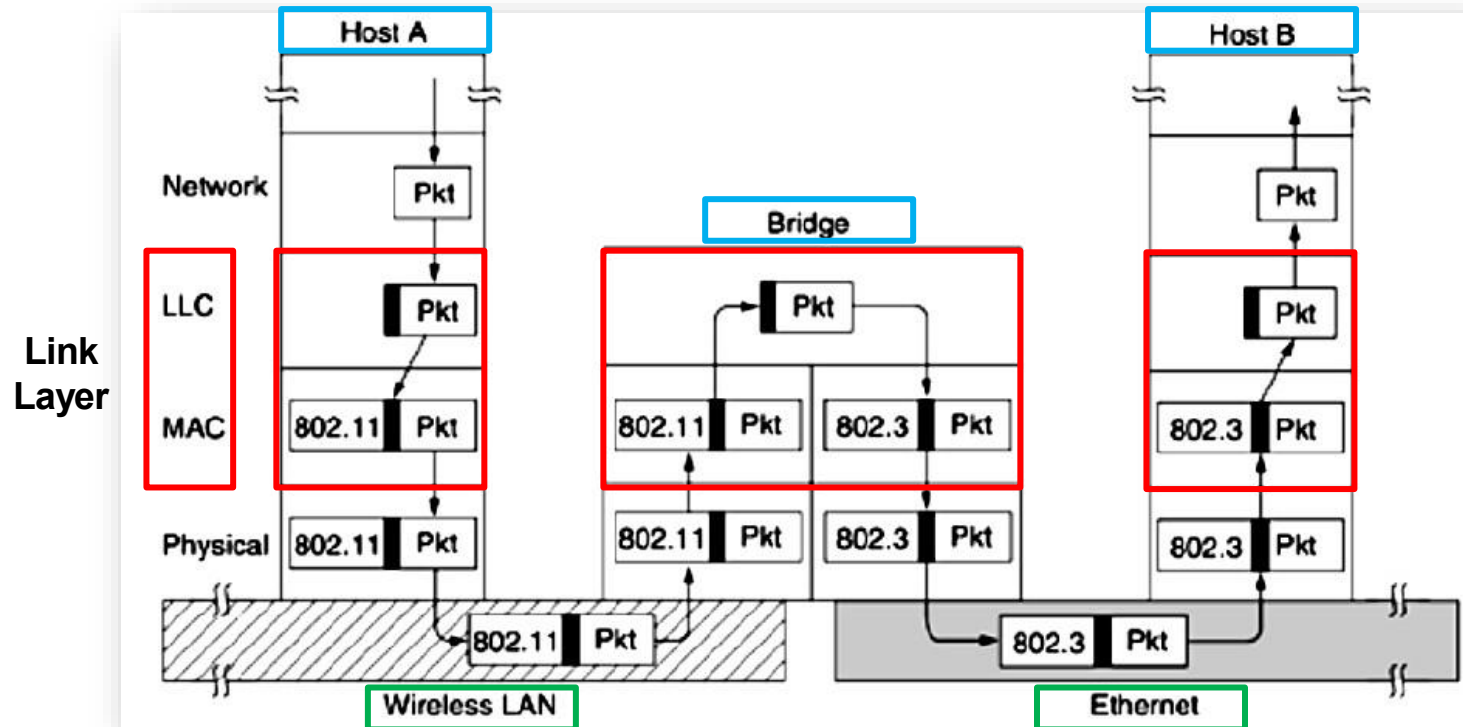
(c)

★ Conjunto de estaciones que comparten dominio de broadcast.

# Dominio de Colisión vs. Dominio de Broadcast



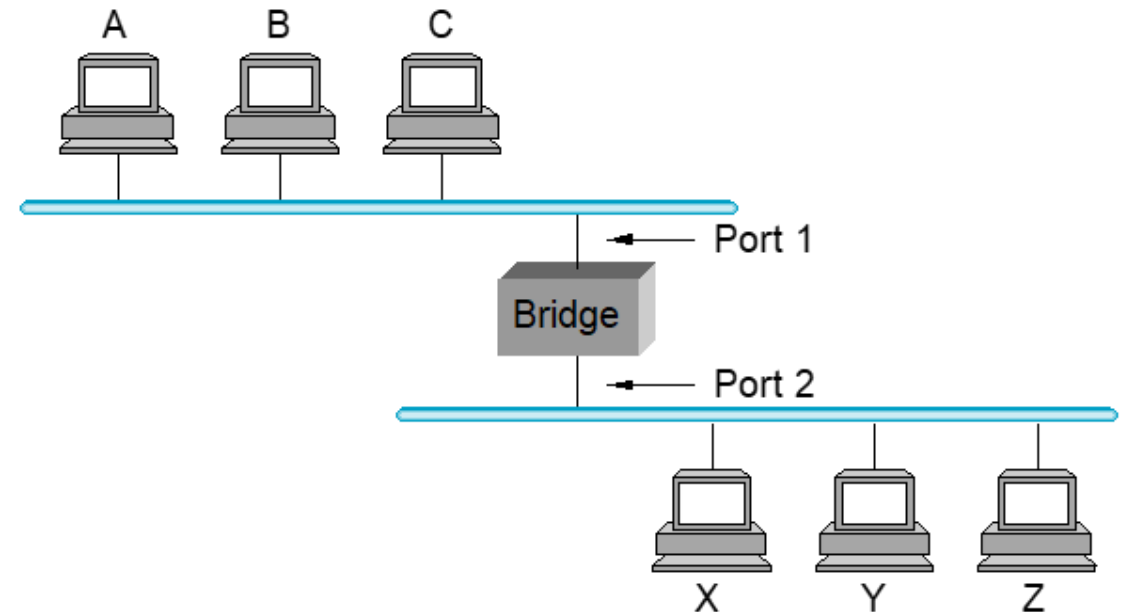
# Concepto de LAN “Extendida” con 802.2



- ★ Las LANs pueden ser de varios tipos de tecnologías.
- ★ Las estaciones deben compartir esquema de direccionamiento.

# LAN Extendida

- ★ Por razones de: heterogeneidad, distancia, aislamiento, redundancia, seguridad.
- ★ Distintos tipos de multiplexores. Se pueden caracterizar por la capa o nivel en que trabajan.
  - Físico: Repetidores y hubs.
  - Enlace: Bridges y switches.
  - Red: Routers. Gateways?.





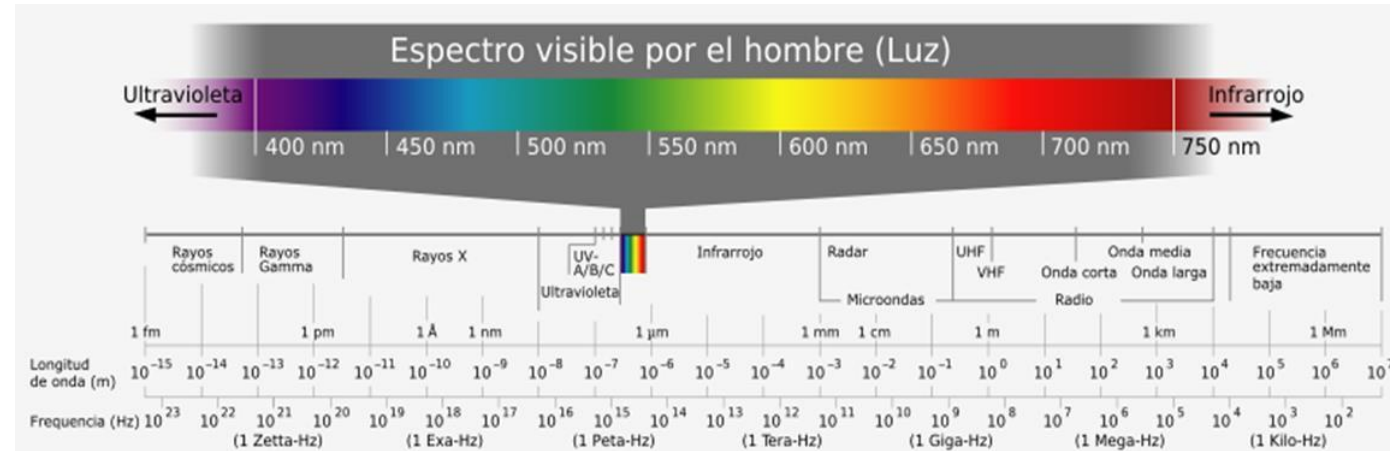
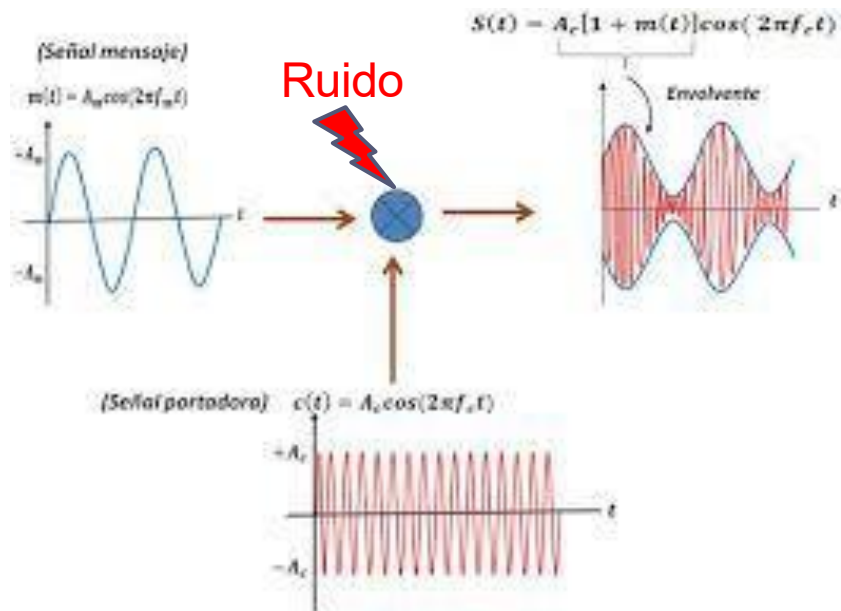
# Redes Compartidas

Redes Inalámbricas



# Algunos puntos importantes

- ▶ Qué es sintonizar una radio?
- ▶ Recordamos modulación AM
- ▶ “Listen-Before-Talk”
- ▶ Simplex vs. Half-Duplex



# Antecedentes

---

## ▶ ALOHA (Abramson, 1970)

- ▶ Transmite siempre que lo necesite
- ▶ Pasa a escuchar durante un  $T = 2 \cdot t_p + \Delta T$
- ▶ Si recibe ACK → OK
- ▶ Si no → RTX

## ▶ ALOHA ranurado (Roberts, 1972)

- ▶ Ninguna de las dos aprovechaban el hecho que el tiempo de propagación entre estaciones era pequeño con respecto al tiempo de transmisión de las tramas.
  - ▶ Apenas comience a transmitir un nodo, los demás lo sabrán casi inmediatamente, con lo cual las colisiones no serán habituales.



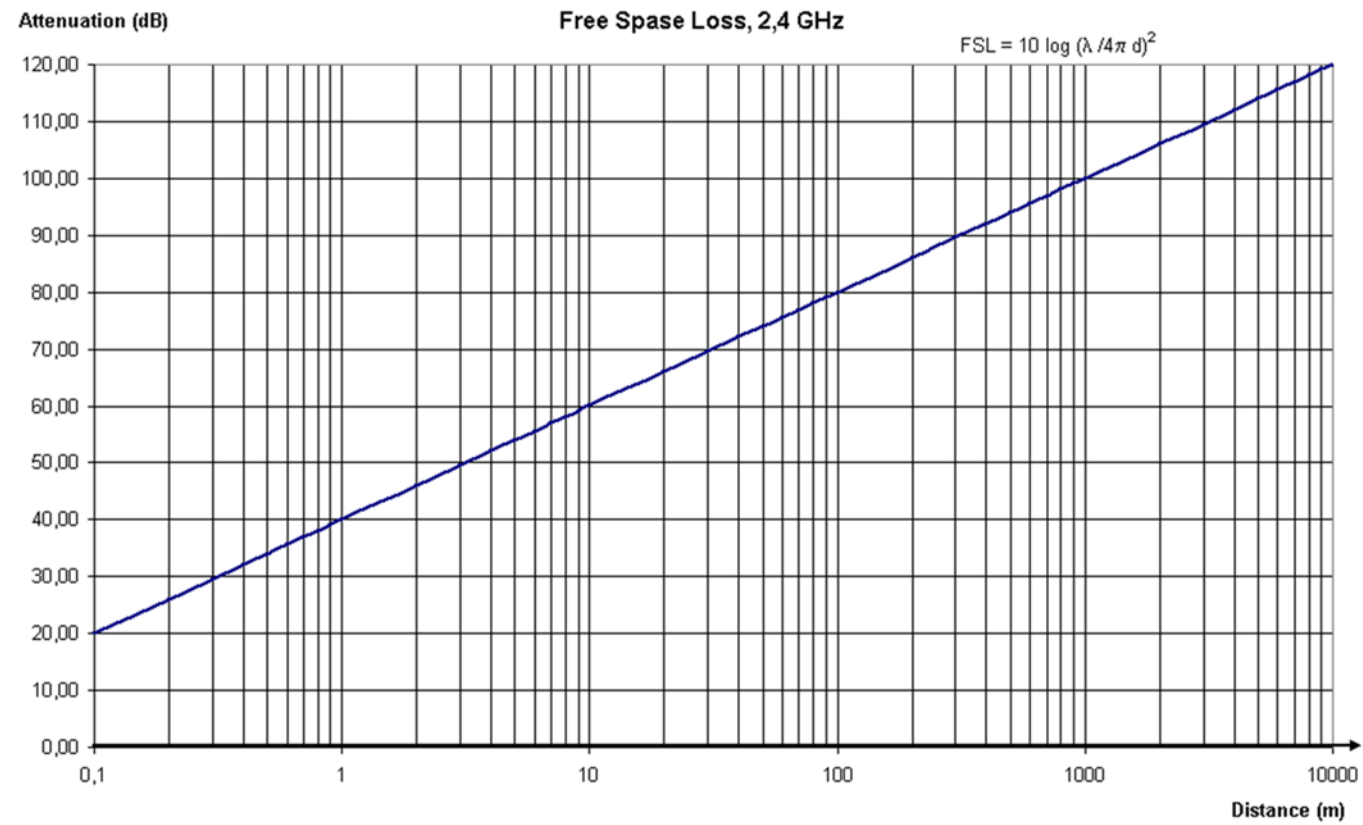


# Tecnologías Inalámbricas (Wireless)

---

- ▶ La intensidad de la señal disminuye con la distancia
- ▶ Fuentes de Ruido mas impredecibles que en medios guiados (wired, cableados) con lo cual:
  - ▶ Tasa de errores elevadas
  - ▶ Confiabilidad?
- ▶ Wireless en dispositivos móviles: la energía es un nuevo desafío
- ▶ Acceso Compartido (Multiacceso)

# Atenuación en el espacio libre

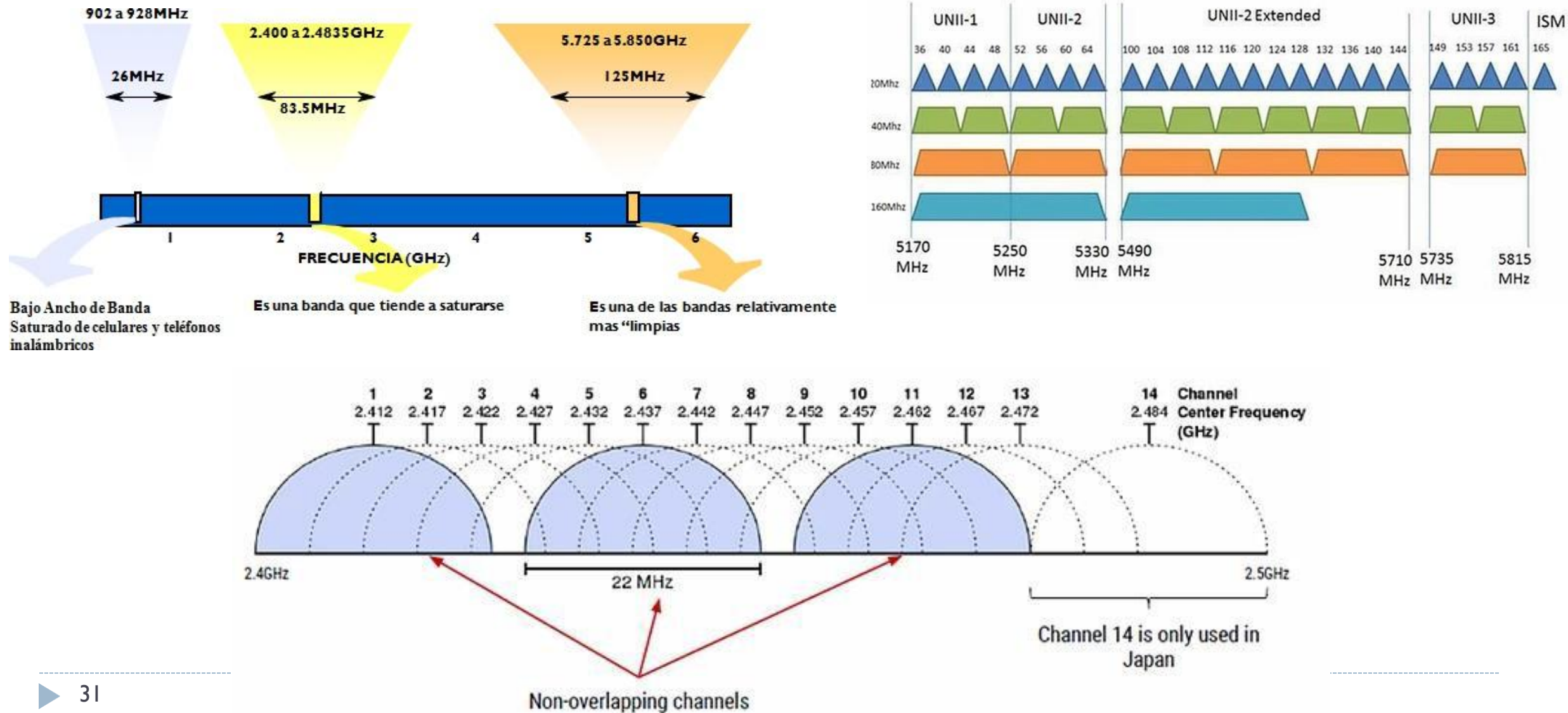


# Tecnologías Inalámbricas (Wireless)

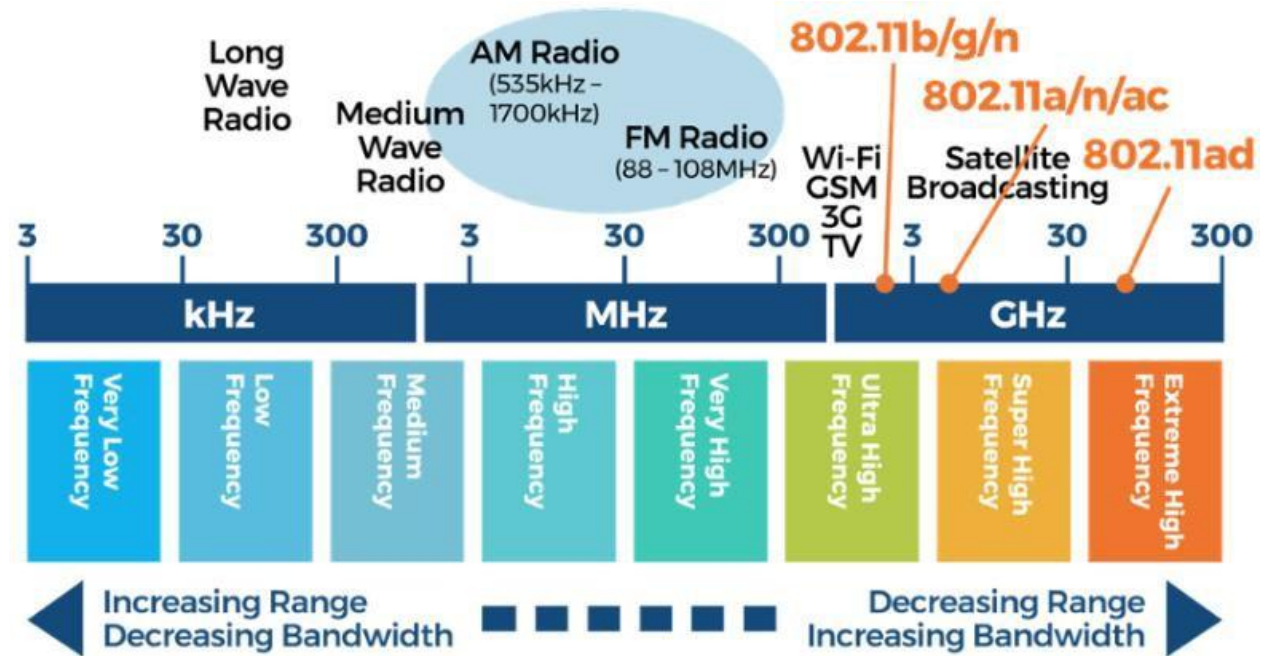
---

- ▶ Quien regula la potencia con que puedo transmitir ?
  - ▶ Depende de la banda del espectro electromagnético
  - ▶ En Argentina: ENACOM (en USA FCC)
- ▶ Existen bandas del espectro donde necesito licencias para transmitir (AM, FM, TV, Celulares, etc.) y otras denominadas “no licenciadas”
- ▶ El medio naturalmente permite “pinchar” una comunicación (eavesdropping)
  - ▶ Debo encriptar los datos

# Bandas No Licenciadas (ISM - Industrial, Scientific & Medical)

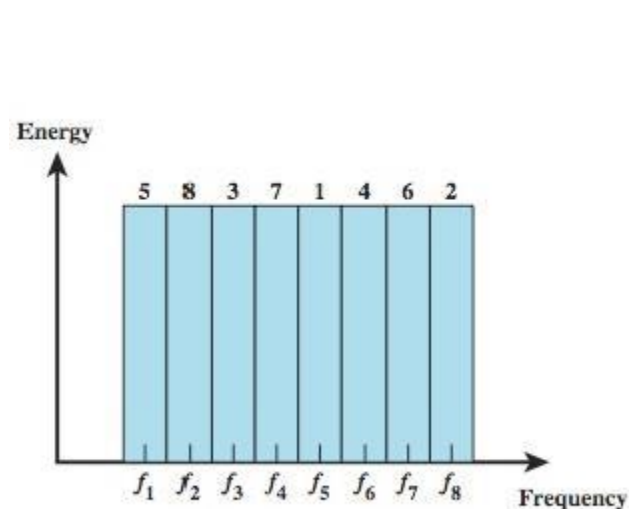


# Wi-Fi “en el” espectro

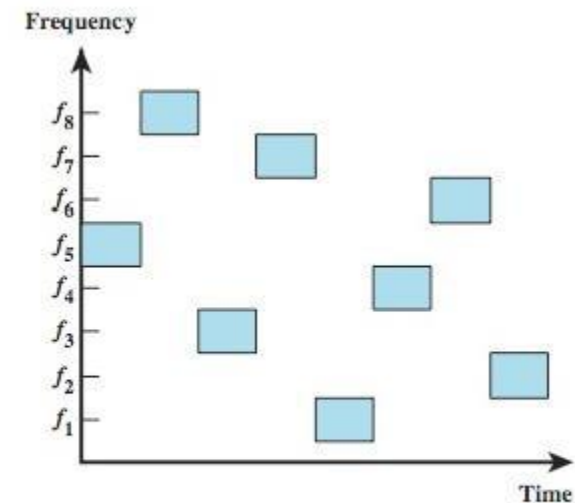


# Wireless en bandas no licenciadas

- ▶ Están sujetas a limitaciones en la potencia de transmisión
  - ▶ Con lo cual limito la distancia y también me afectan más las interferencias de otros dispositivos
- ▶ Además cuando el espectro es compartido por muchas aplicaciones y dispositivos, surge la idea de usar **espectro expandido (spread-spectrum)**



(a) Channel assignment

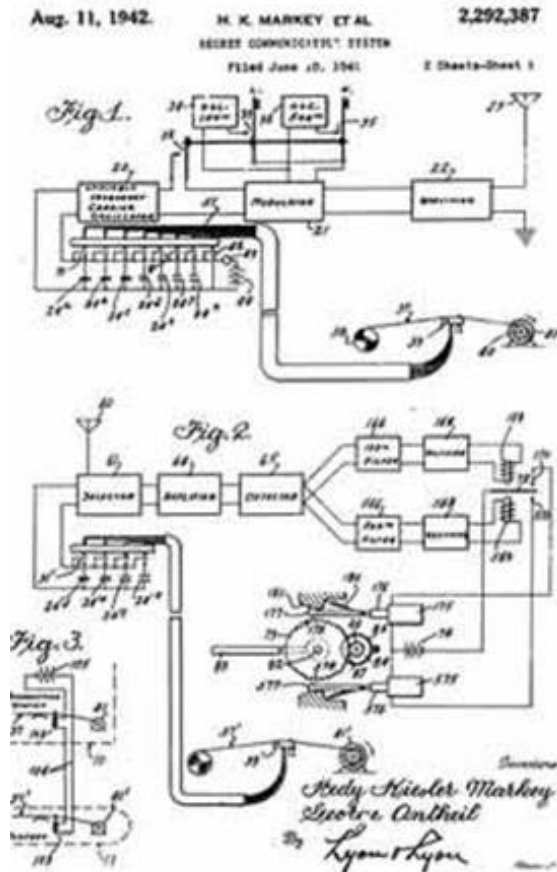


(b) Channel use



# “Wi-Fi” en 1942 ?

early version of frequency hopping **using a piano-roll to change among 88 frequencies** to **make radio-guided torpedoes harder for enemies to detect or to jam**



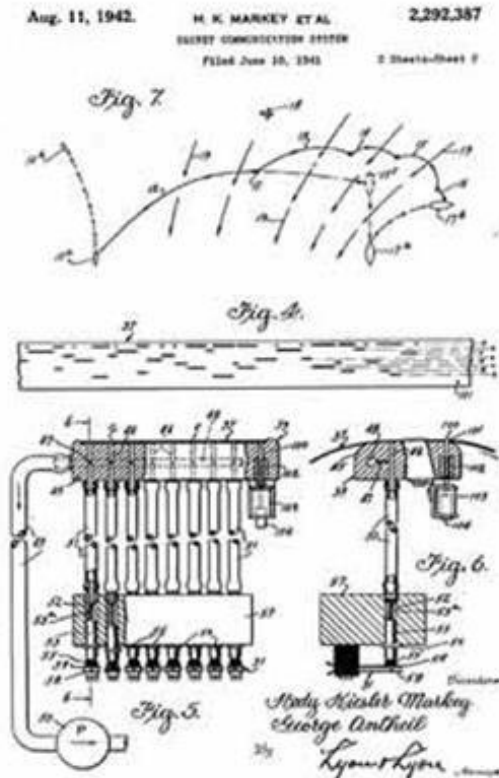
**HEDY LAMARR INVENTOR**

**Actress Devises 'Red-Hot' Apparatus for Use in Defense**

Special to THE NEW YORK TIMES.

HOLLYWOOD, Calif., Sept. 30—Hedy Lamarr, screen actress, was revealed today in a new role, that of an inventor. So vital is her discovery to national defense that government officials will not allow publication of its details.

Colonel L. B. Lent, chief engineer of the National Inventors Council, classed Miss Lamarr's invention as in the "red hot" category. The only inkling of what it might be was the announcement that it was related to remote control of apparatus employed in warfare.



Frequency-Hopping  
Spread Spectrum  
FHSS

[http://ethw.org/Hedy\\_Lamarr](http://ethw.org/Hedy_Lamarr)



# Protocolos de acceso múltiple



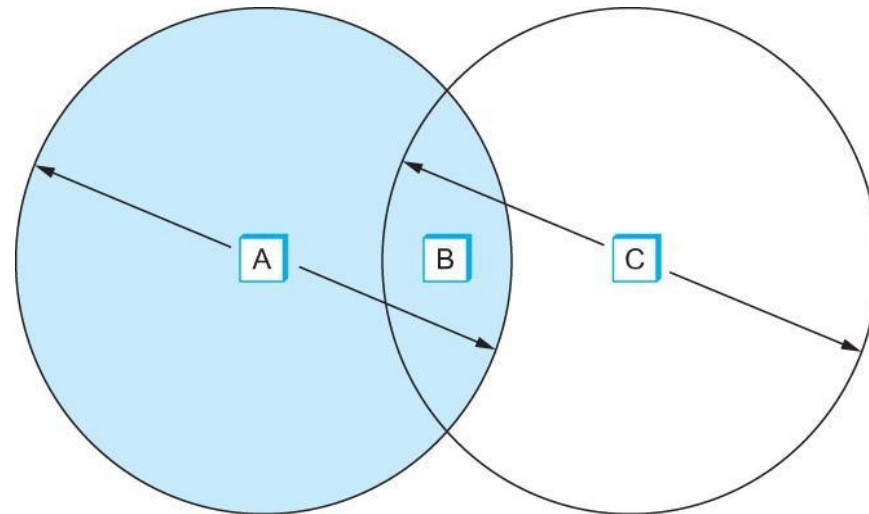
Medios Compartidos



# Problema de la estación oculta

---

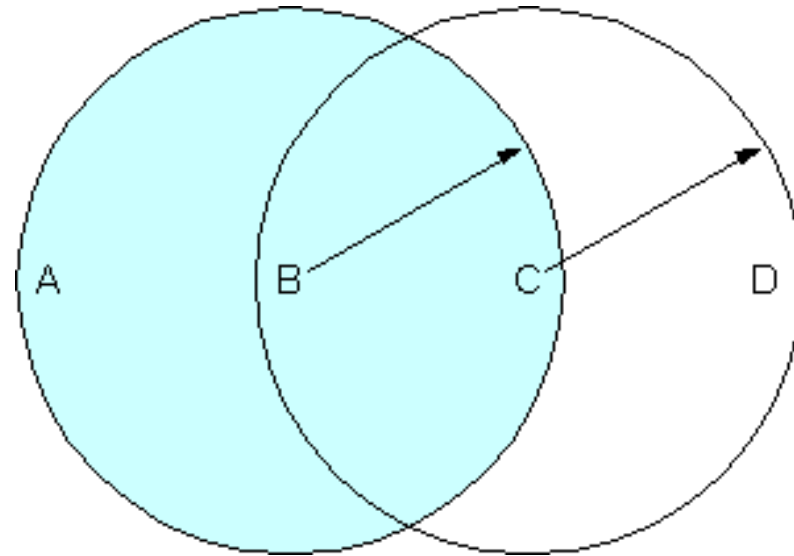
- ▶ Primero considere lo que ocurre cuando **A transmite a B**
- ▶ Si C detecta el medio no escuchará a A porque está fuera de su alcance, y por lo tanto deducirá erróneamente que puede transmitir.
- ▶ Si C comienza a transmitir, interferirá en B eliminando la trama de A.
- ▶ El problema de que una estación no puede detectar a un competidor potencial por el medio, puesto que el competidor está demasiado lejos, se denomina problema de **la estación oculta**.



# Problema de la estación expuesta

---

- ▶ Ahora consideremos la situación inversa:  
**B transmite a A.**
- ▶ Si C detecta el medio, escuchará una transmisión y concluirá que no puede enviar a D.
- ▶ Cuando de hecho tal transmisión causaría una mala recepción solo en la zona entre B y C, en la que no está localizado ninguno de los receptores pretendidos.
- ▶ Esta situación se conoce como problema de **estación expuesta**





# CSMA (Carrier Sense Multiple Access Protocols)



CSMA/CA

# CSMA/CA (Collision Avoidance)

---

- ▶ Antes de transmitir, una estación debe determinar el estado del medio (libre o ocupado)
- ▶ Si el canal no está ocupado, se realiza una espera adicional llamada **espaciado entre tramas** (IFS)
- ▶ Si el canal se encuentra ocupado o se ocupa durante la espera, se ha de esperar hasta el final de la transacción actual
- ▶ Tras finalizar la transacción actual se ejecuta el algoritmo de Backoff
  - ▶ Determina una espera adicional y aleatoria escogida uniformemente en un intervalo llamado **ventana de contención** (CW)
  - ▶ Se mide en ranuras temporales (slots) (Contention Timer)

# CSMA/CA (Collision Avoidance)

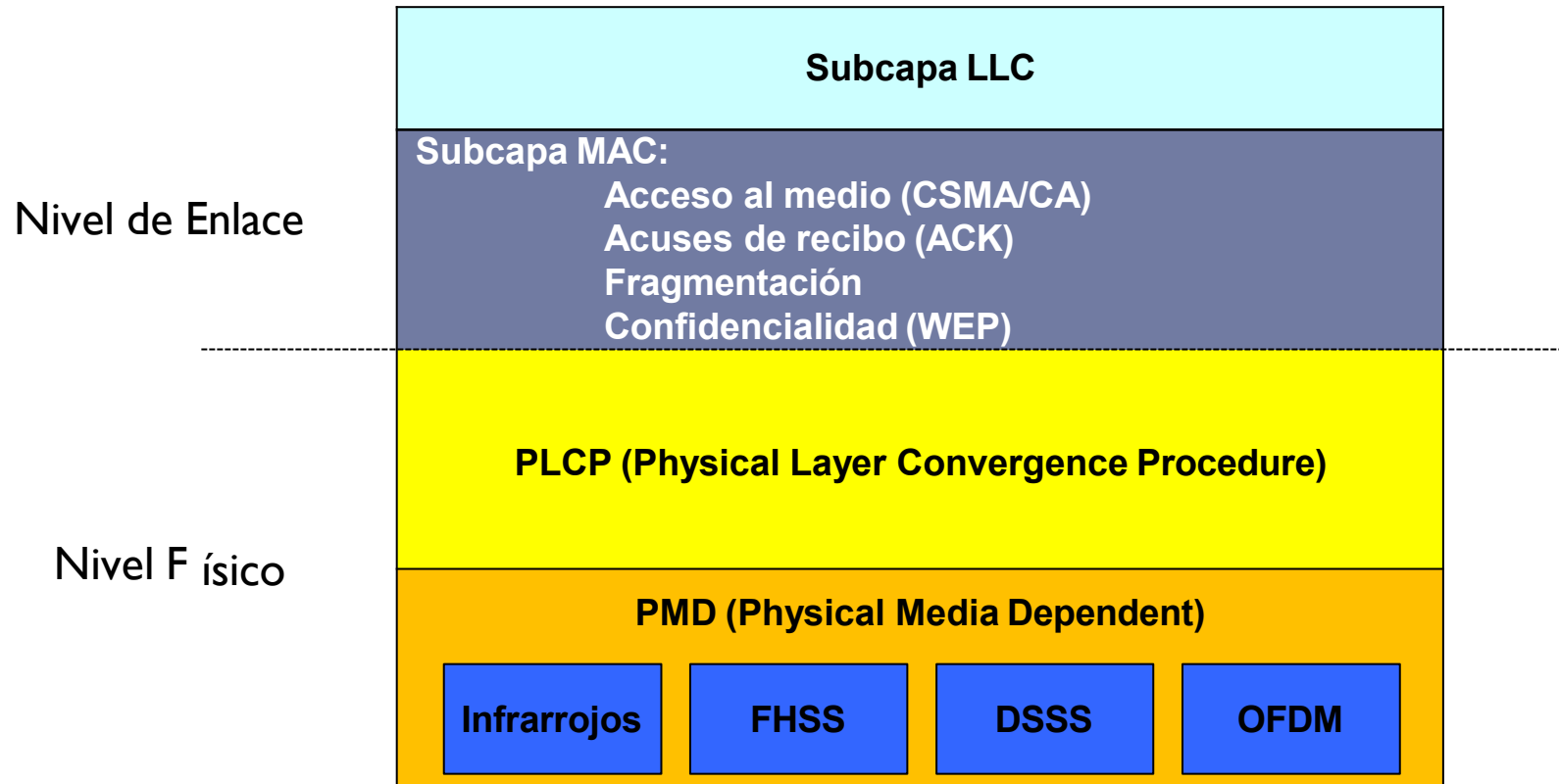
---

- ▶ Si durante esta espera el medio **no permanece libre** durante un tiempo igual o superior a IFS, dicha espera queda suspendida hasta que se cumpla dicha condición
- ▶ Si se transmitió una trama, se espera recibir un ACK
- ▶ Si no se recibe, se asume que se perdió en una colisión y se lo intentará retransmitir

# IEEE 802.11 aka Wi-Fi

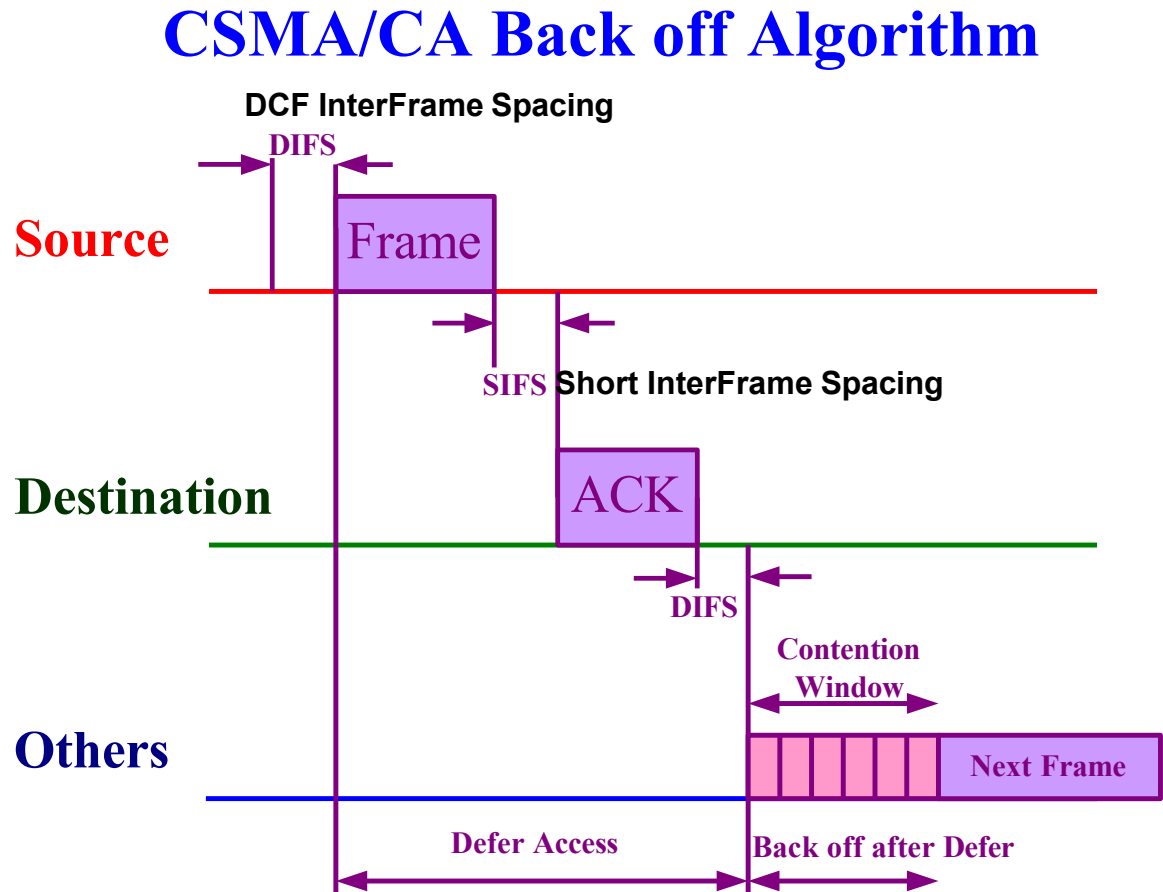
Nivel MAC en 802.11

# Modelo de Referencia de 802.11



# 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





# El ecosistema de Wi-Fi: cambio en este cuarto de siglo ?

---



# Evolución de 802.11

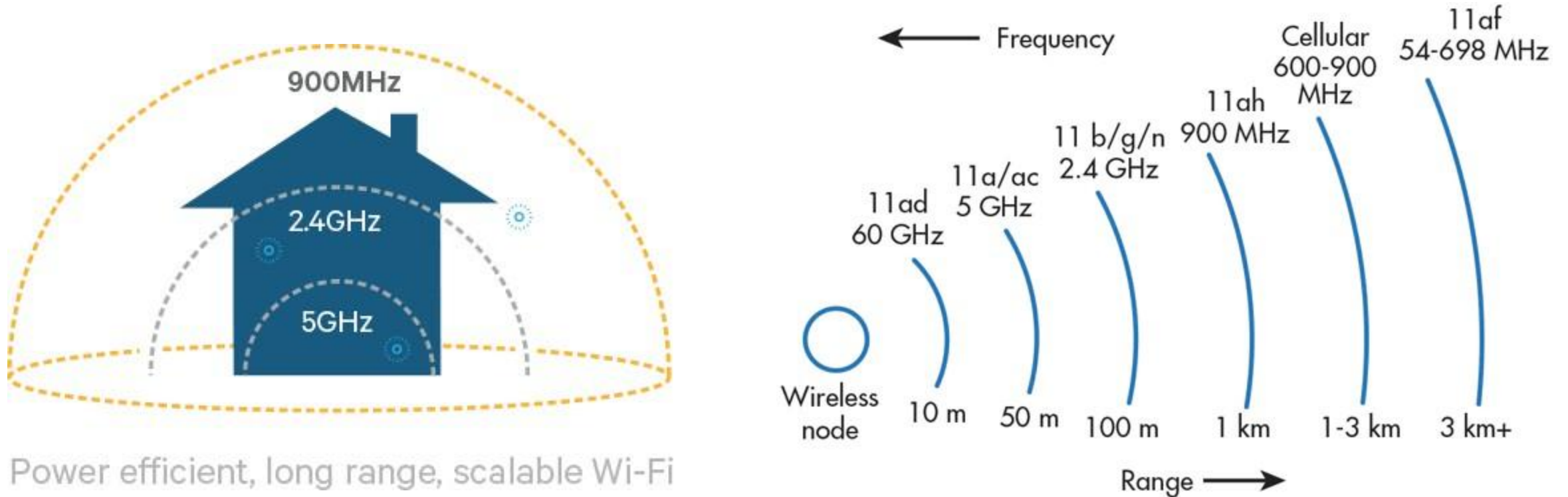
---

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.



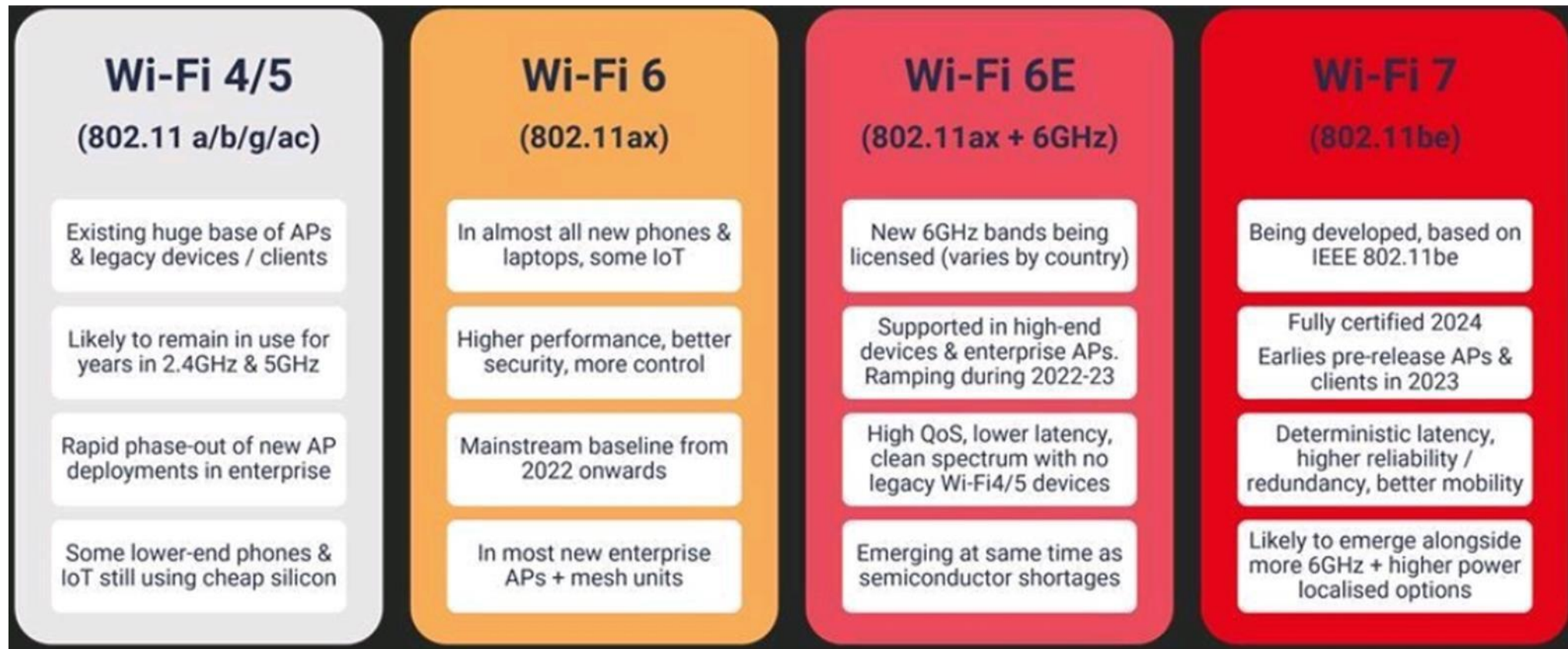
# Expandiendo las fronteras: 802.11ah



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

# A1 Wi-Fi 7

---



# Medios Compartidos

2 Parte IEEE 802.11



# IEEE 802.11n vs 802.11ac

	802.11n	802.11n IEEE Specification	802.11ac Wave 1 Today	802.11ac Wave2 WFA Certification Process Continues	802.11ac IEEE Specification
Band	2.4 GHz & 5 GHz	2.4 GHz & 5 GHz	5 GHz	<b>5 GHz</b>	5 GHz
MIMO	Single User (SU)	Single User (SU)	Single User (SU)	<b>Multi User (MU)</b>	Multi User (MU)
PHY Rate	450 Mbps	600 Mbps	1.3 Gbps	<b>2.34 Gbps - 3.47 Gbps</b>	6.9 Gbps
Channel Width	20 or 40 MHz	20 or 40 MHz	20, 40, 80 MHz	20, 40, 80, <b>80-80, 160 MHz</b>	20, 40, 80, 80-80, 160 MHz
Modulation	64 QAM	64 QAM	256 QAM	256 QAM	256 QAM
Spatial Streams	3	4	3	<b>3-4</b>	8
MAC Throughput*	293 Mbps	390 Mbps	845 Mbps	<b>1.52 Gbps- 2.26 Gbps</b>	4.49Gbps

\* Assuming a 65% MAC efficiency with highest MCS

# Esquemas de Modulación

MCS Index - 802.11n and 802.11ac

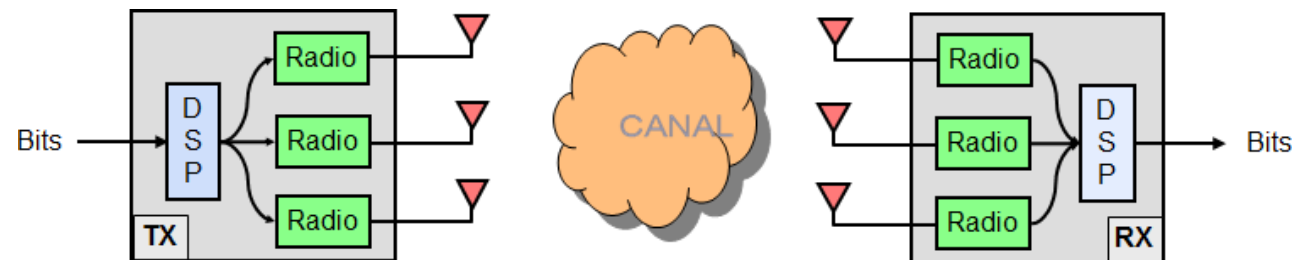
HT MCS Index	VHT MCS Index	Spatial Streams	Modulation	Coding									802.11n		802.11ac	
					20MHz		40MHz		80MHz		160MHz					
					Data Rate No SGI	Data Rate SGI	Data Rate No SGI	Data Rate SGI	Data Rate No SGI	Data Rate SGI	Data Rate No SGI	Data Rate SGI	Data Rate No SGI	Data Rate SGI	Data Rate No SGI	Data Rate SGI
0	0	1	BPSK	1/2	6.5	7.2	13.5	15	29.3	32.5	58.5	65				
1	1	1	QPSK	1/2	13	14.4	27	30	58.5	65	117	130				
2	2	1	QPSK	3/4	19.5	21.7	40.5	45	87.8	97.5	175.5	195				
3	3	1	16-QAM	1/2	26	28.9	54	60	117	130	234	260				
4	4	1	16-QAM	3/4	39	43.3	81	90	175.5	195	351	390				
5	5	1	64-QAM	2/3	52	57.8	108	120	234	260	468	520				
6	6	1	64-QAM	3/4	58.5	65	121.5	135	263.3	292.5	526.5	585				
7	7	1	64-QAM	5/6	65	72.2	135	150	292.5	325	585	650				
	8	1	256-QAM	3/4	78	86.7	162	180	351	390	702	780				
	9	1	256-QAM	5/6	n/a	n/a	180	200	390	433.3	780	866.7				
8	0	2	BPSK	1/2	13	14.4	27	30	58.5	65	117	130				
9	1	2	QPSK	1/2	26	28.9	54	60	117	130	234	260				
10	2	2	QPSK	3/4	39	43.3	81	90	175.5	195	351	390				
11	3	2	16-QAM	1/2	52	57.8	108	120	234	260	468	520				
12	4	2	16-QAM	3/4	78	86.7	162	180	351	390	702	780				
13	5	2	64-QAM	2/3	104	115.6	216	240	468	520	936	1040				
14	6	2	64-QAM	3/4	117	130.3	243	270	526.5	585	1053	1170				
15	7	2	64-QAM	5/6	130	144.4	270	300	585	650	1170	1300				
	8	2	256-QAM	3/4	156	173.3	324	360	702	780	1404	1560				
	9	2	256-QAM	5/6	n/a	n/a	360	400	780	866.7	1560	1733.3				
16	0	3	BPSK	1/2	19.5	21.7	40.5	45	87.8	97.5	175.5	195				
17	1	3	QPSK	1/2	39	43.3	81	90	175.5	195	351	390				
18	2	3	QPSK	3/4	58.5	65	121.5	135	263.3	292.5	526.5	585				
19	3	3	16-QAM	1/2	78	86.7	162	180	351	390	702	780				
20	4	3	16-QAM	3/4	117	130	243	270	526.5	585	1053	1170				
21	5	3	64-QAM	2/3	156	173.3	324	360	702	780	1404	1560				
22	6	3	64-QAM	3/4	175.5	195	364.5	405	n/a	n/a	1579.5	1755				
23	7	3	64-QAM	5/6	195	216.7	405	450	877.5	975	1755	1950				
	8	3	256-QAM	3/4	234	260	486	540	1053	1170	2106	2340				
	9	3	256-QAM	5/6	260	288.9	540	600	1170	1300	n/a	n/a				

# 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

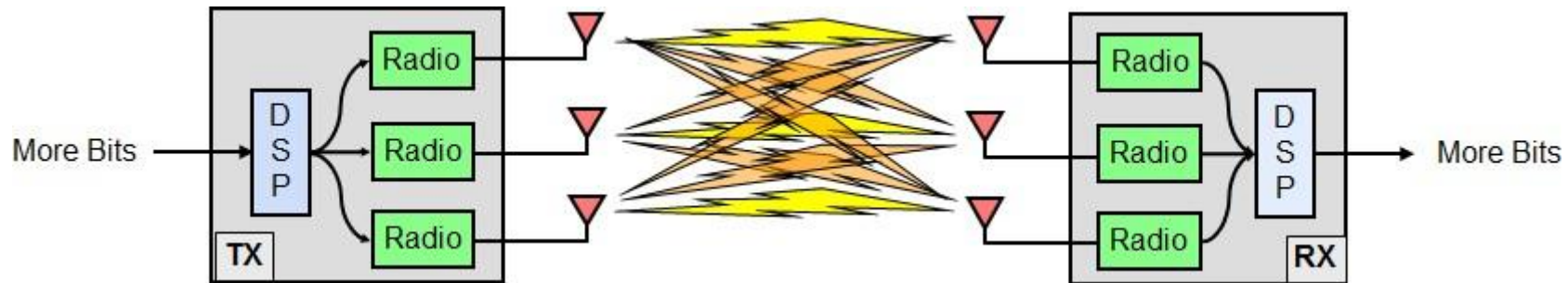




# Multiplexación por división espacial

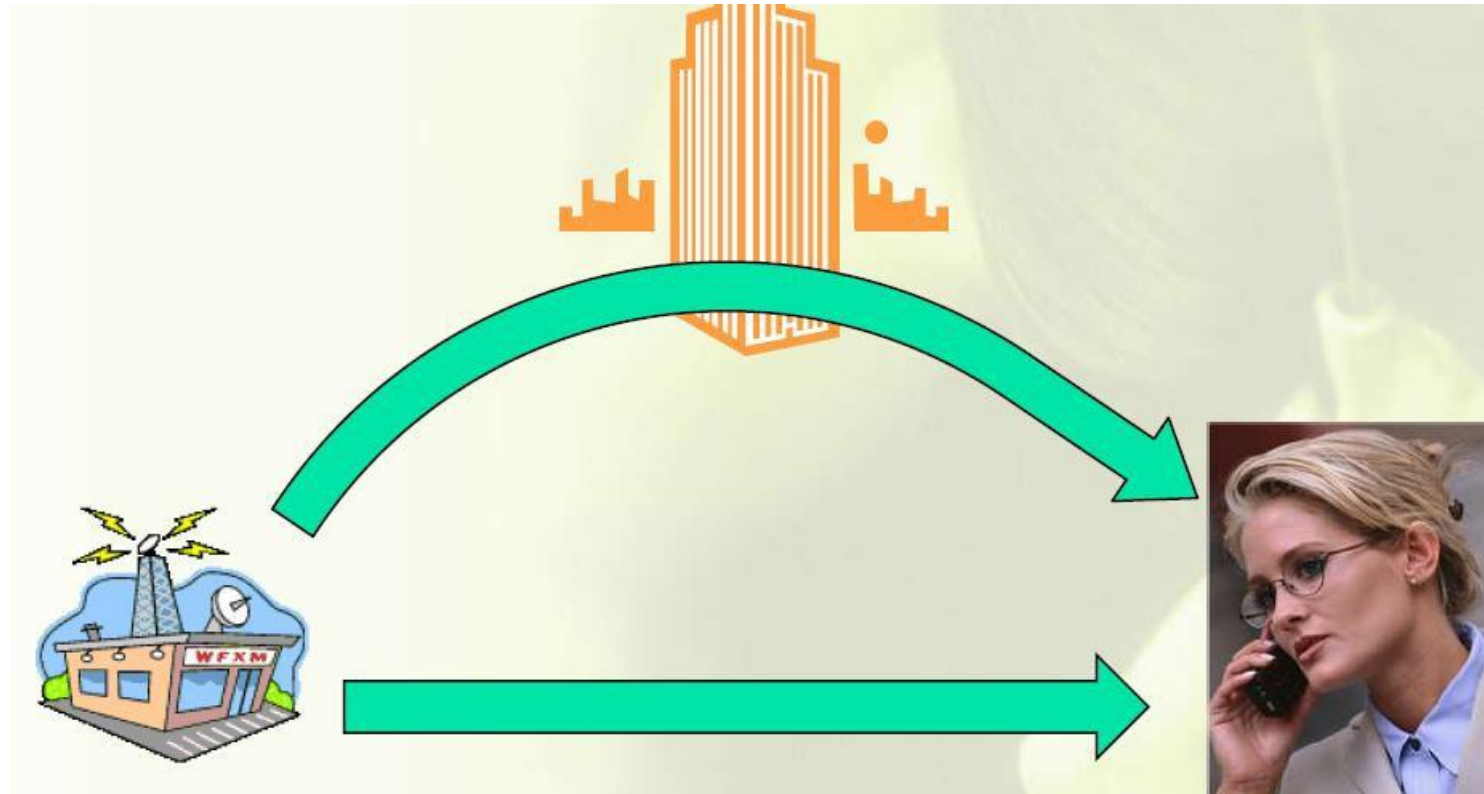
---

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



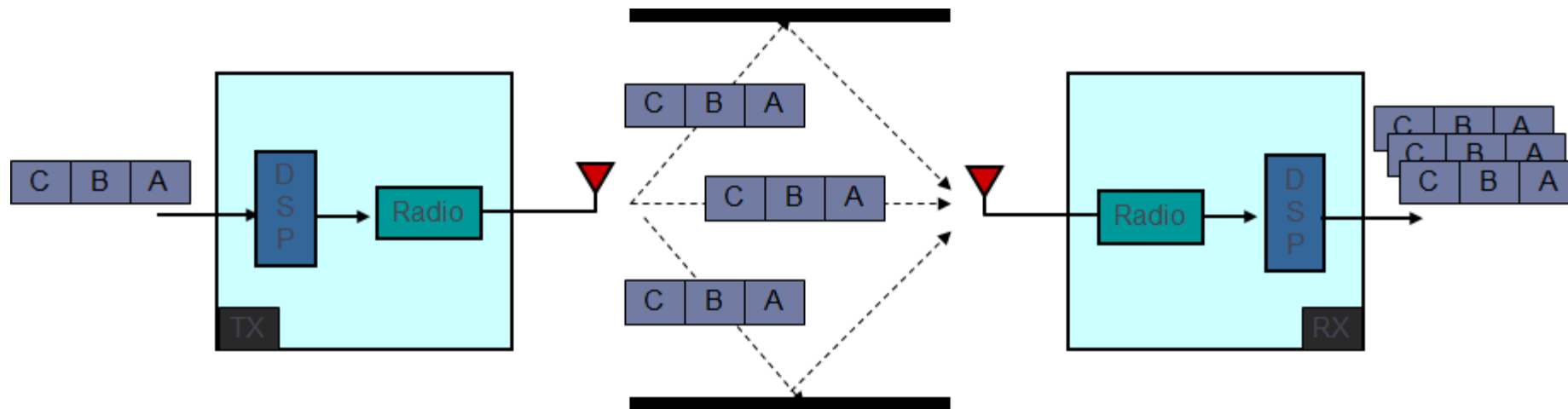
# “Multi-path Fading”

---



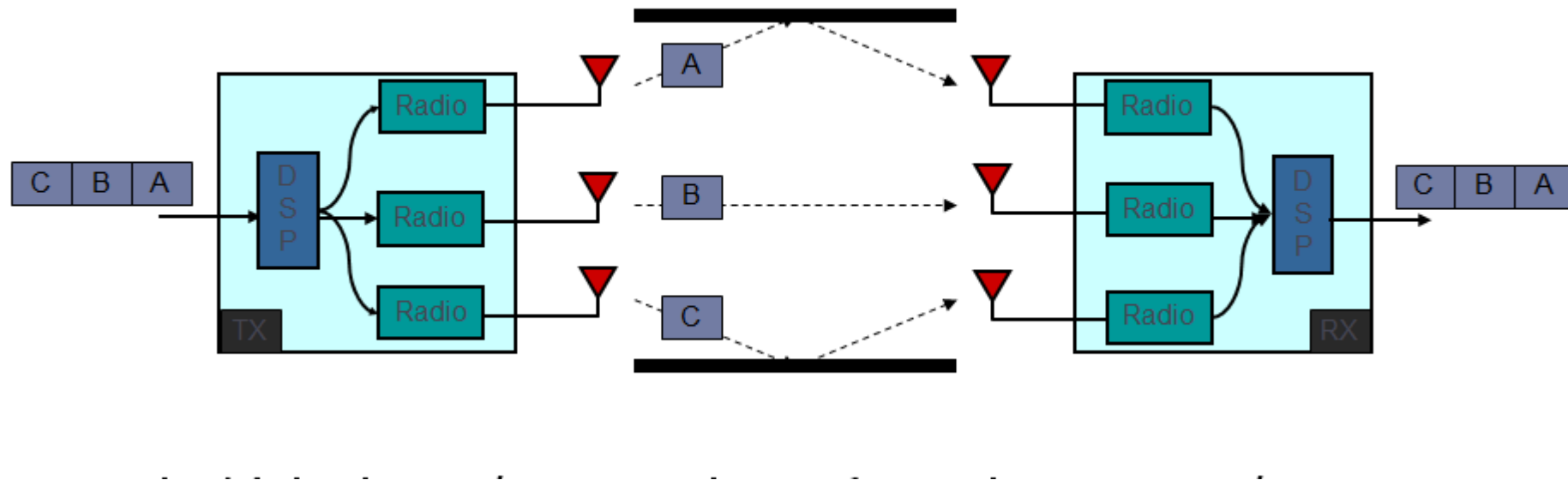
# Propagación Multi-path en a/b/g

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



# Multi-path en 802.11n

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



# Notación MIMO

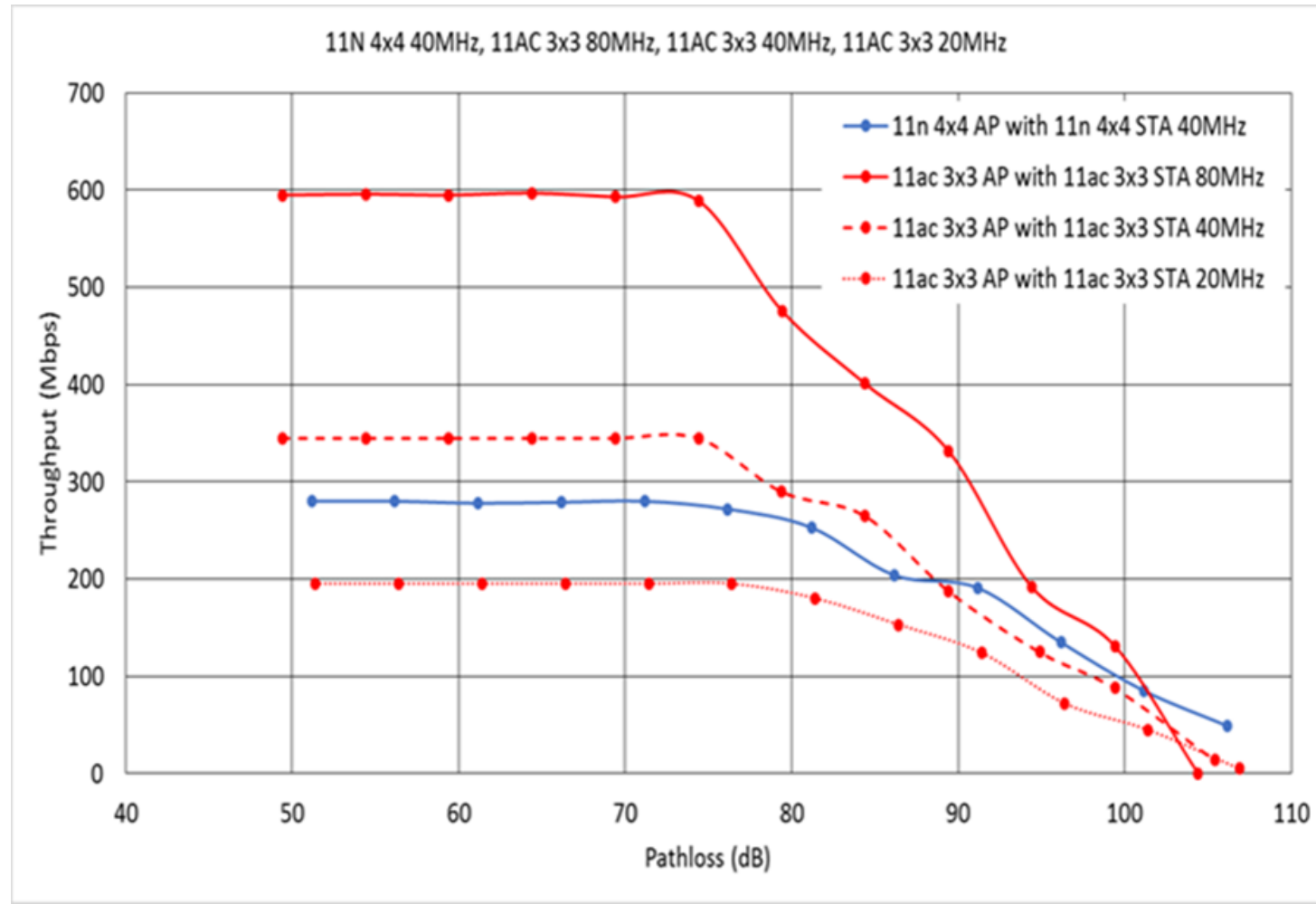
---

$$T \times R : S$$

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



# Performance vs Atenuación



# Atenuaciones típicas

Attenuation Properties of Common Building Materials		
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*

SCTE  
Society of Cable  
Telecommunications  
Engineers

# Atenuaciones típicas

---



ARRIS SCTE 2015



# Donde no poner el AP ....

---

