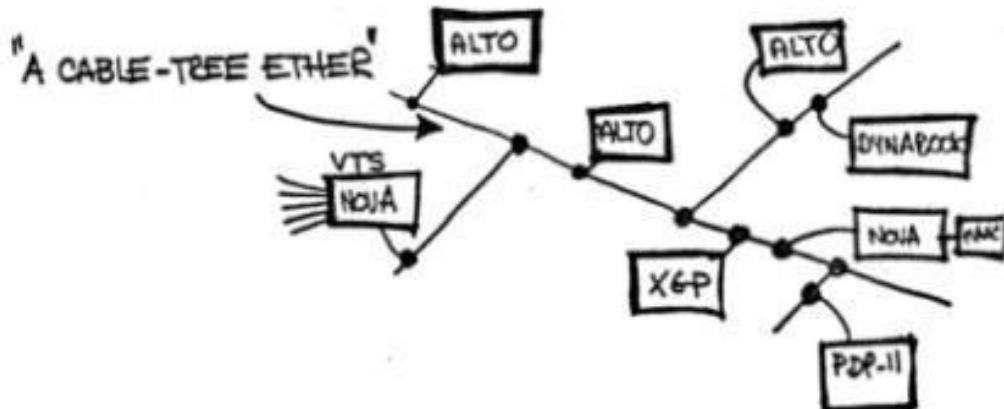




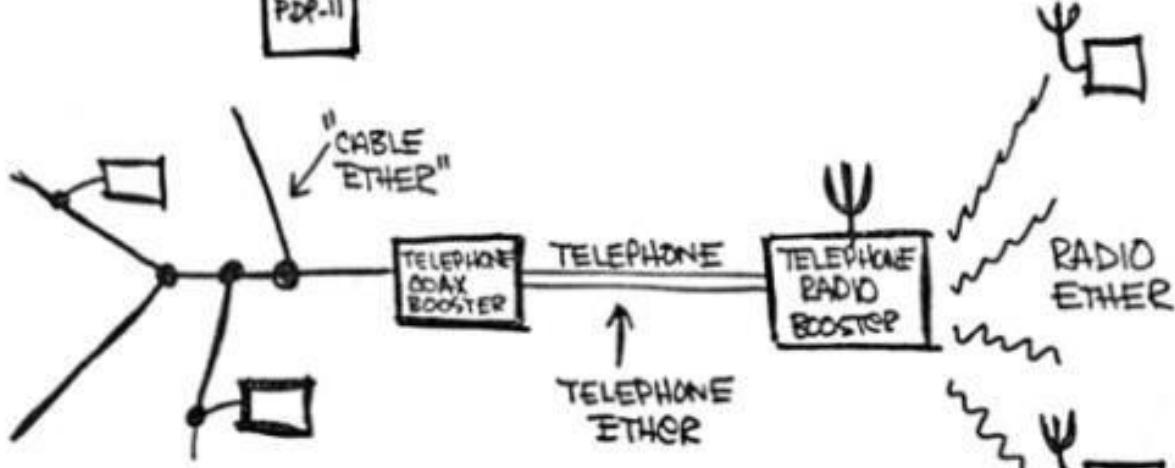
Teoría de las Comunicaciones

Claudio Righetti
9 septiembre 2025
segundo Cuatrimestre

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



ETHER!



-1-

Bob

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

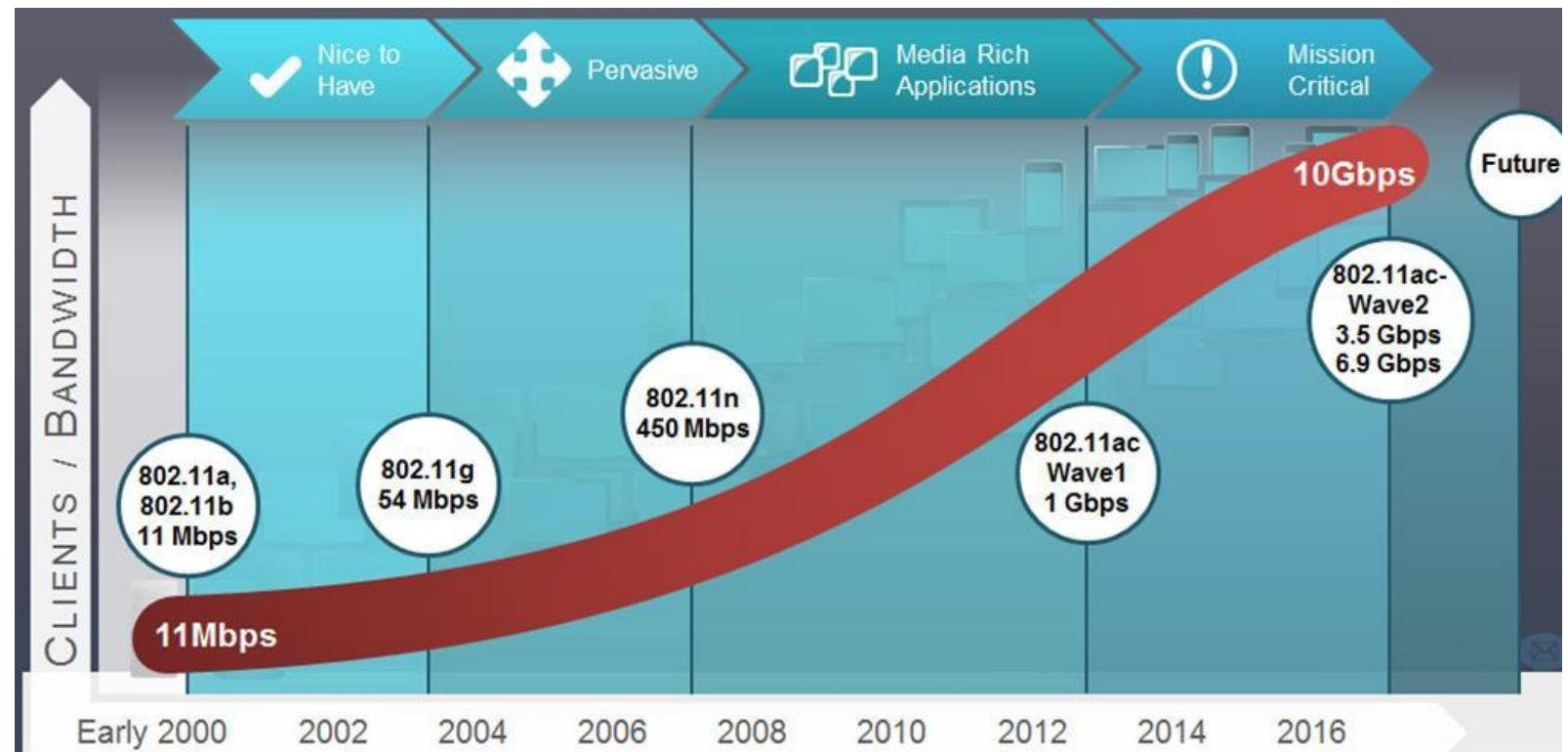
El “primer Wi-Fi electrónico” :WaveLAN



El “padre del wi-fi” Vic Hayes



http://ethw.org/Vic_Hayes#Biography





Protocolos de acceso múltiple



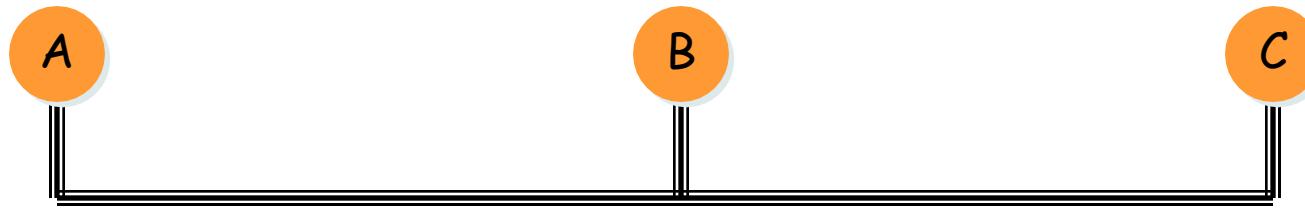
Medios Compartidos

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**

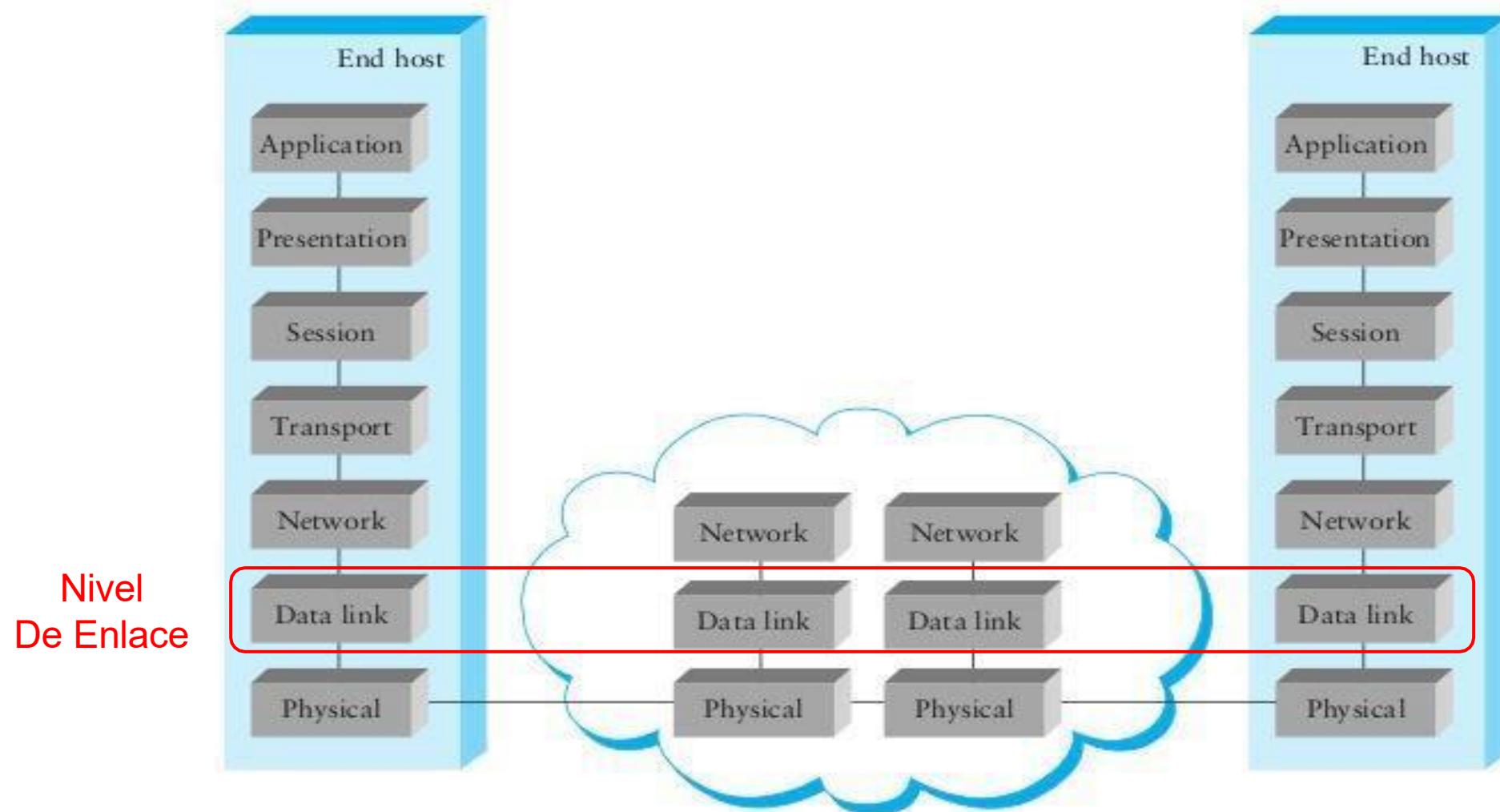
El problema del acceso a un canal compartido

- ▶ 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

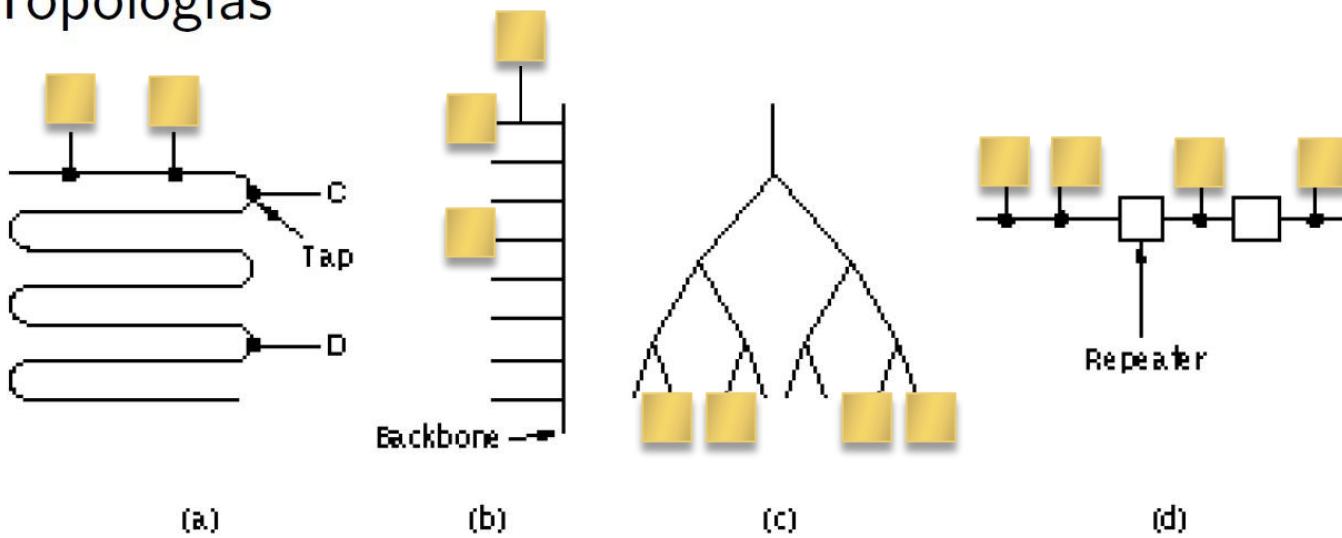


Control de Acceso Compartido

- Un medio físico para varios hosts, control descentralizado.
- Surge la necesidad de:
 - Esquema de Direcccionamiento.
 - 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)

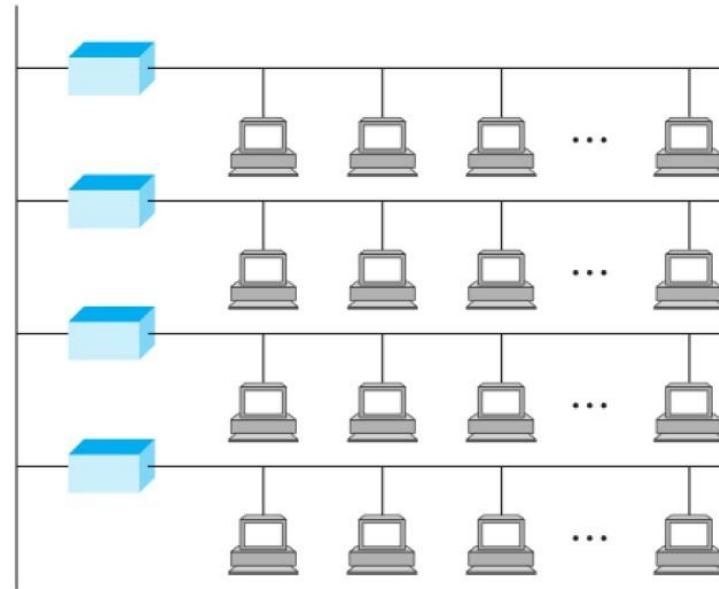
Topologías



Tipos de Cables (Medio Físico)

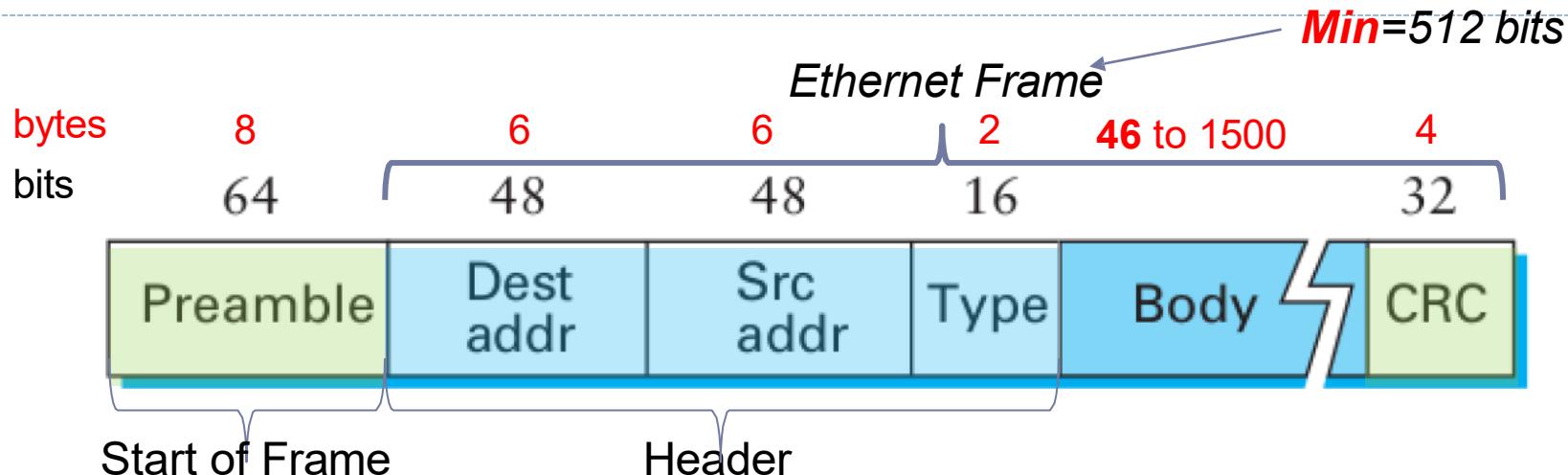
- 10base2 - Coaxil (10 Mbps, 200 m) IEEE 802.3a
- 10base5 - Coaxil (10 Mbps, 500 m) IEEE 802.3
- 10baseT - Par Trenzado (10/100/1000 Mbps, 100 m) IEEE 802.3i

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 ...

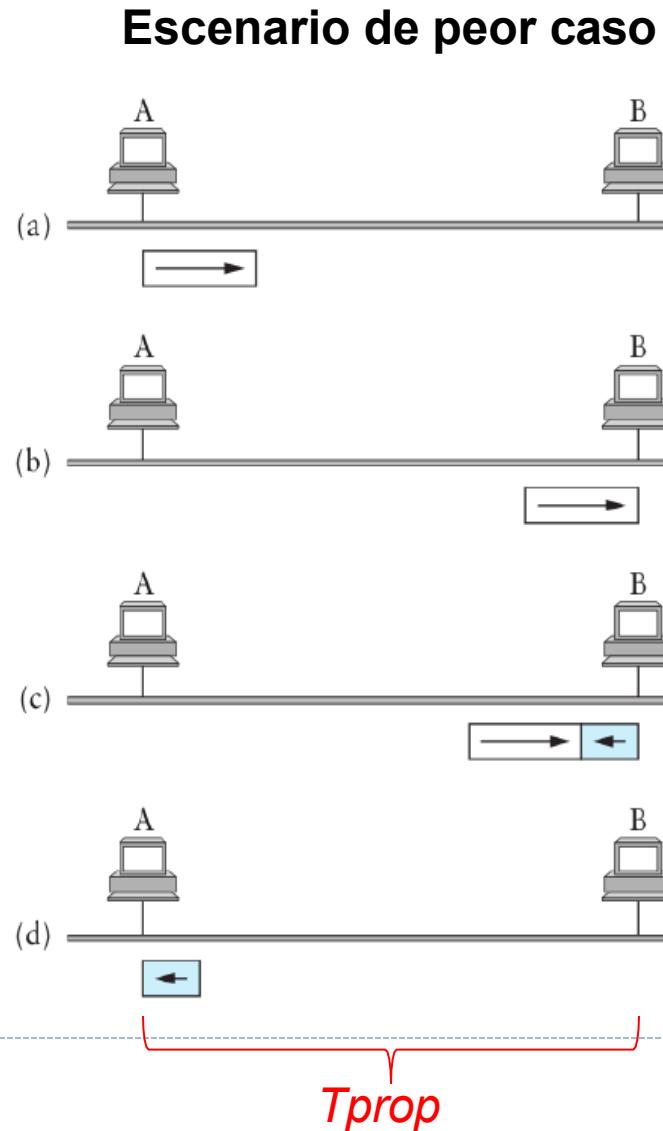
- ... su dirección.
- ... la dirección broadcast (FF:FF:FF:FF:FF:FF).
- ... una dirección multicast (de estar suscripto).
- o cualquier frame (de haber sido activado el modo promiscuo).

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



- 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.

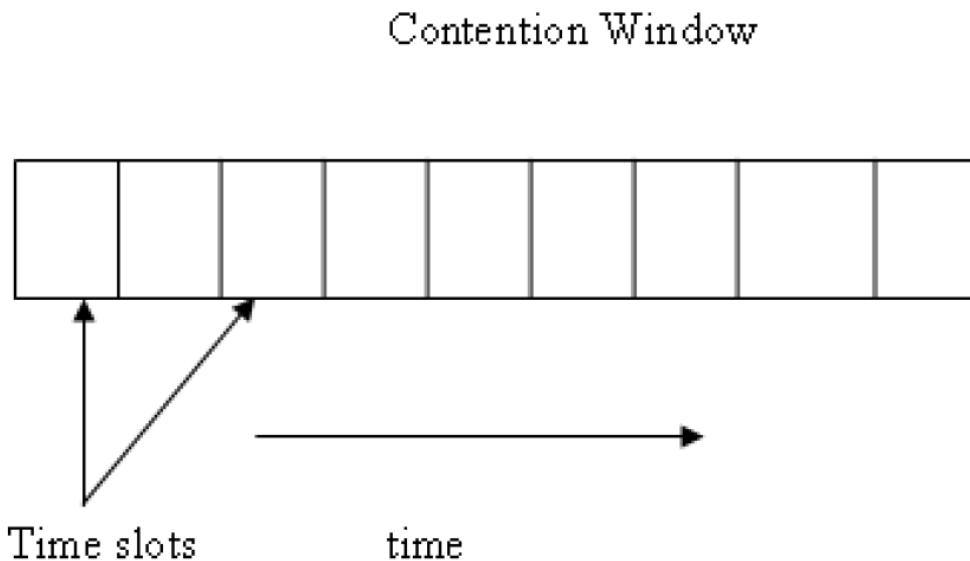
Colisiones

¿Qué hacer ante una colisión?

¡Retransmitir!

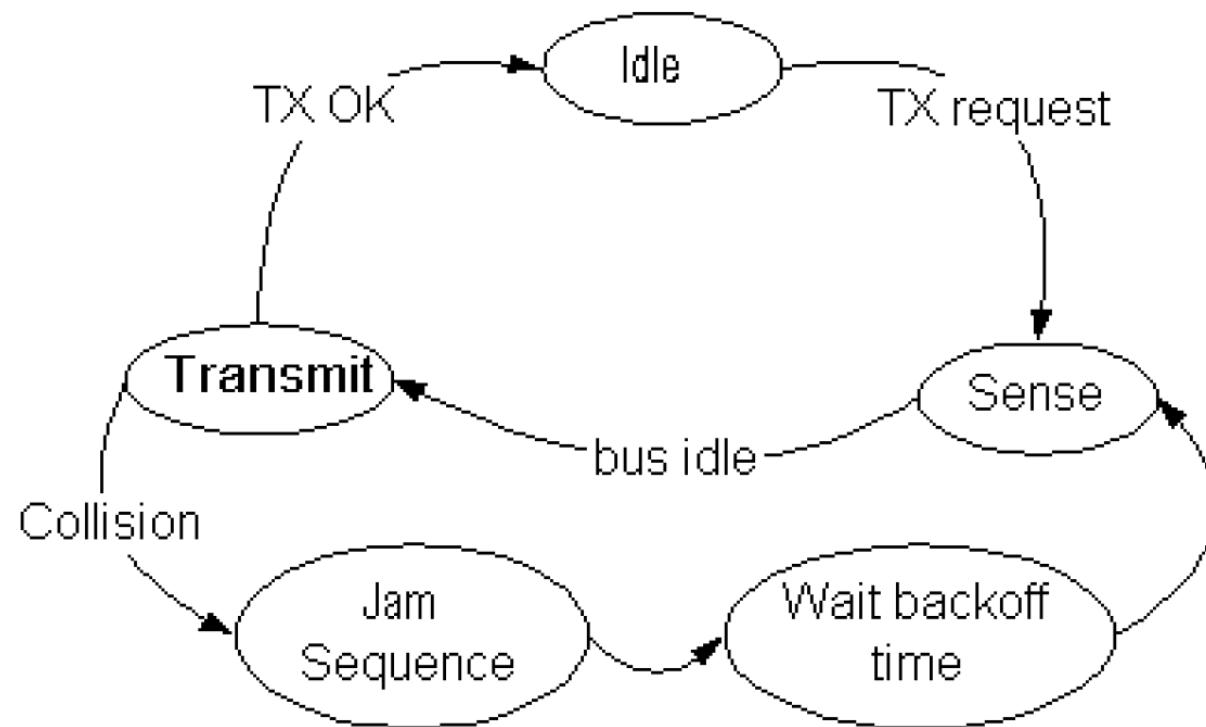
- ¿Inmediatamente?
- ¿Luego de un tiempo fijo?
- ¿Luego de un tiempo aleatorio?

Mecanismo de Exponential BackOff



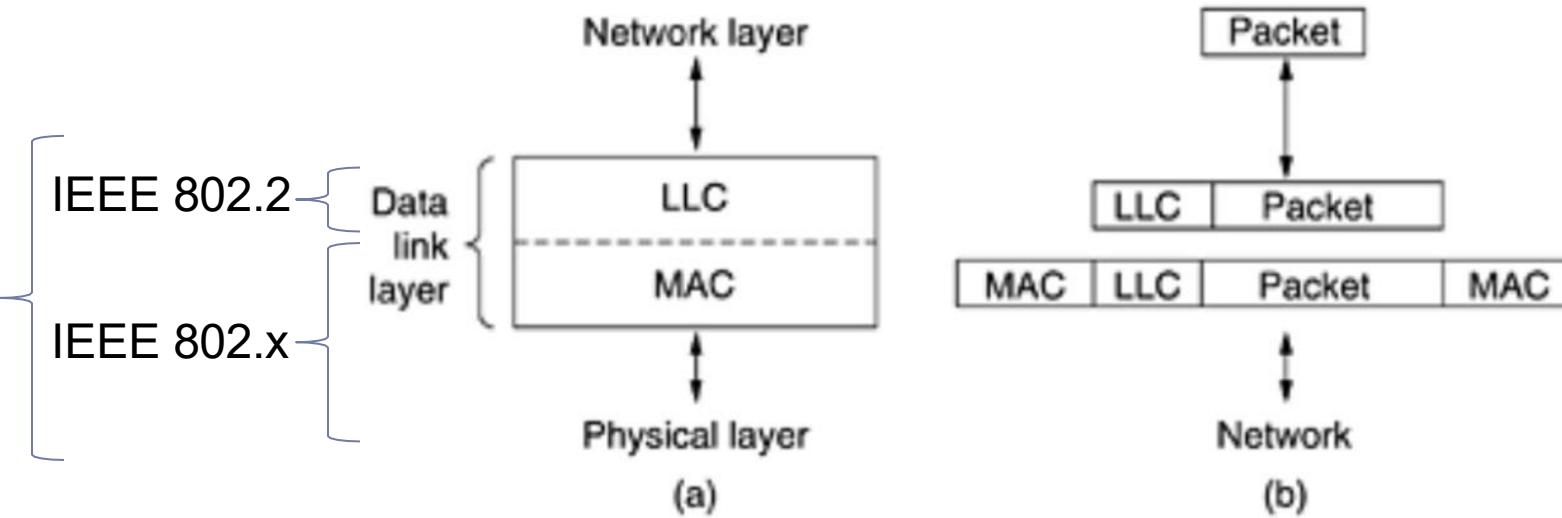
- Elegir un *slot* entre 0 y $2^k - 1$, con k la cantidad de intentos.
- Esperar *slot* veces el *RTT* antes de sensar para retransmitir.

Estados de un Transmisor CSMA-CD



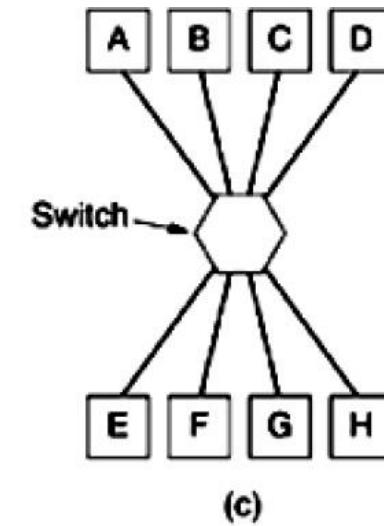
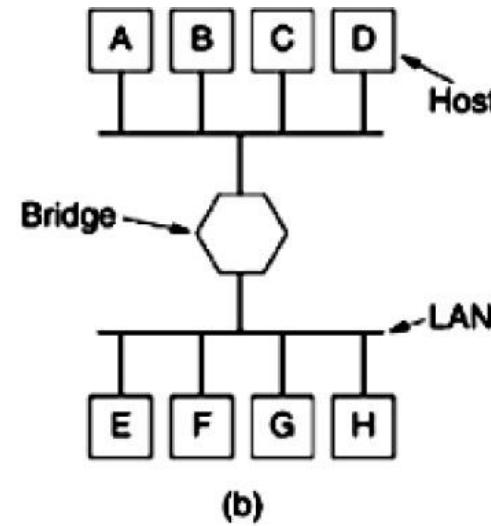
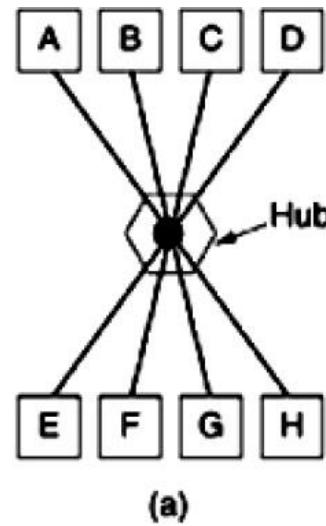
Estándar 802.2: LLC (Logical Link Control)

IEEE 802



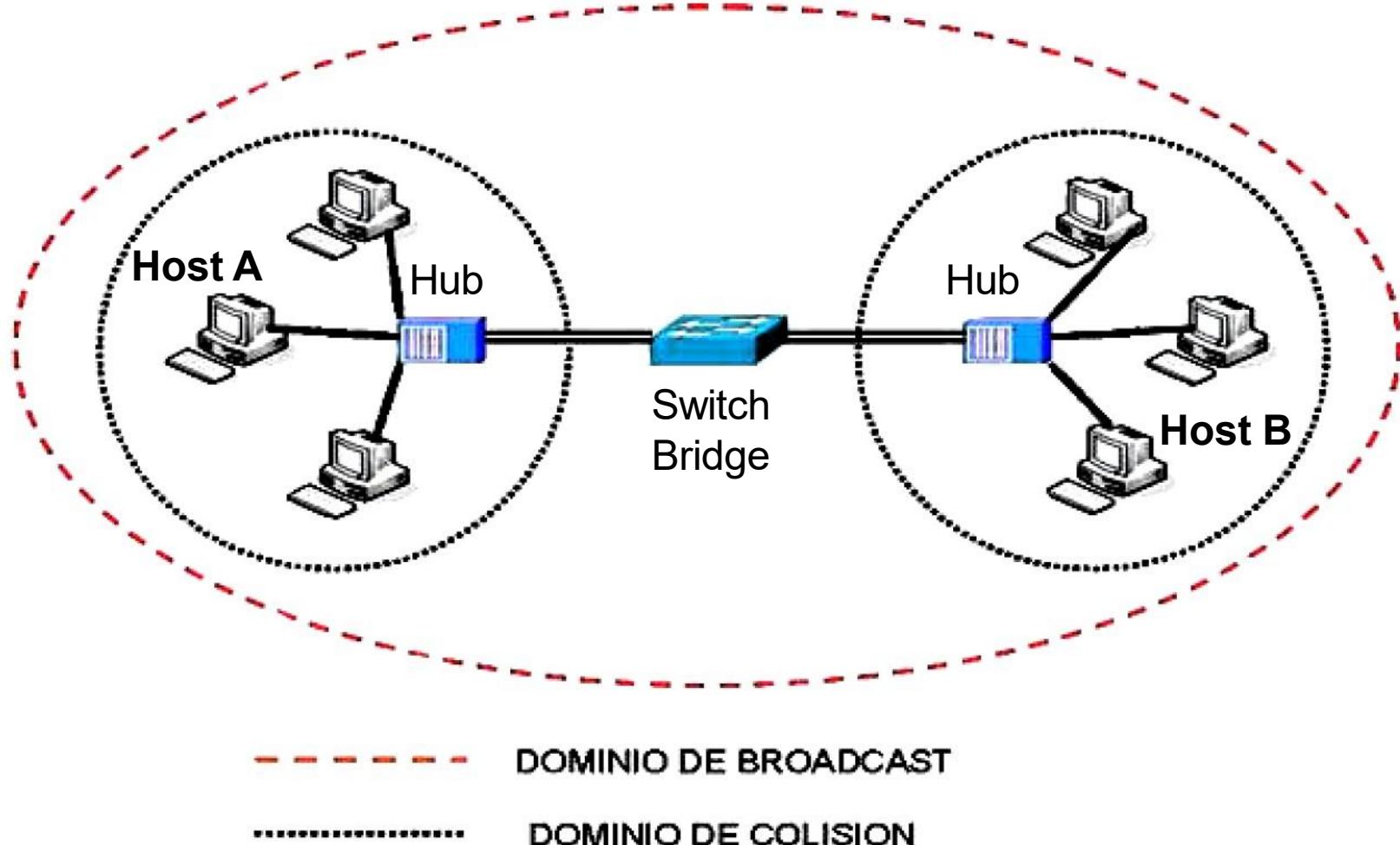
- Ofrece tres tipos de servicios
 - Sin conexión y sin ACK ← **CSMA**
 - Sin conexión y con ACK
 - Orientado a conexión
- Encapsula distintos tipos de medios físicos (WIFI, Ethernet, ...)

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

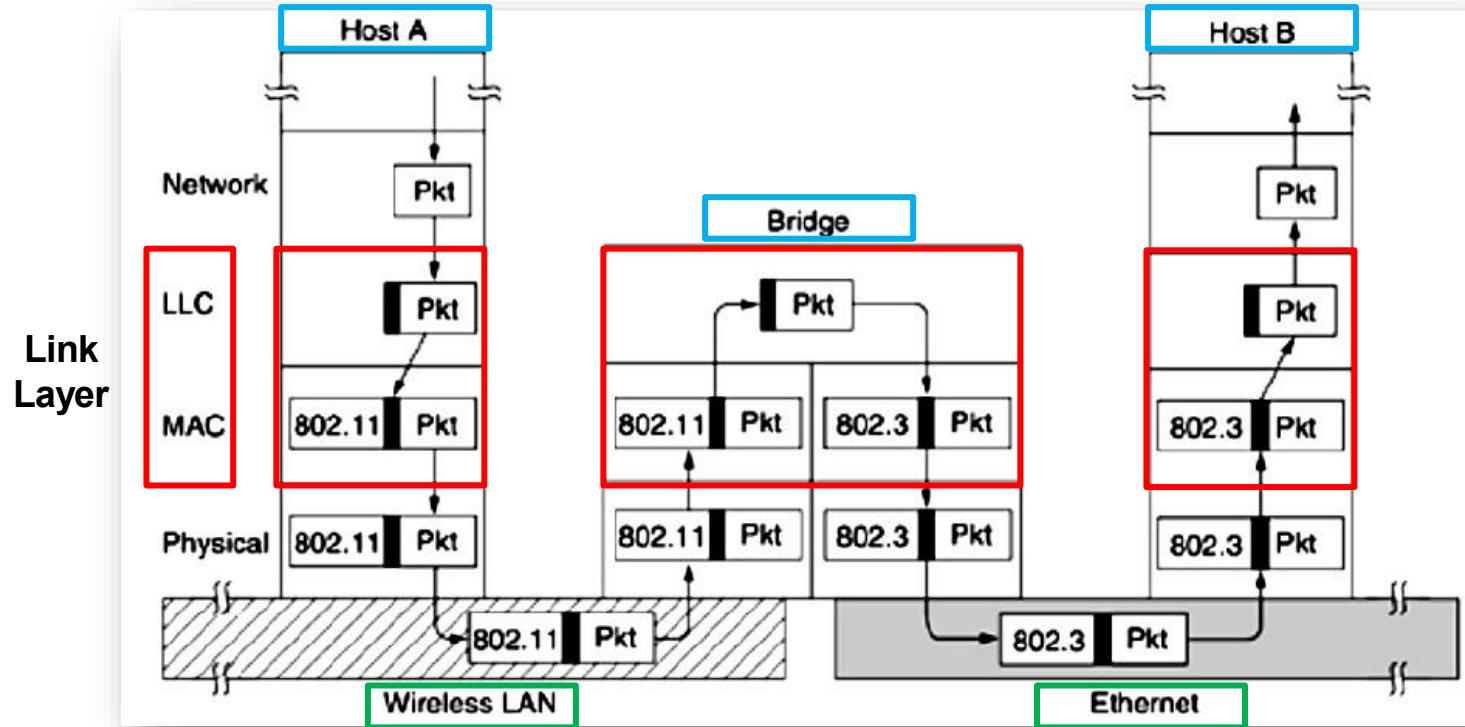


★ Conjunto de estaciones que comparten dominio de broadcast.

Dominio de Colisión vs. Dominio de Broadcast



Concepto de LAN “Extendida” con 802.2

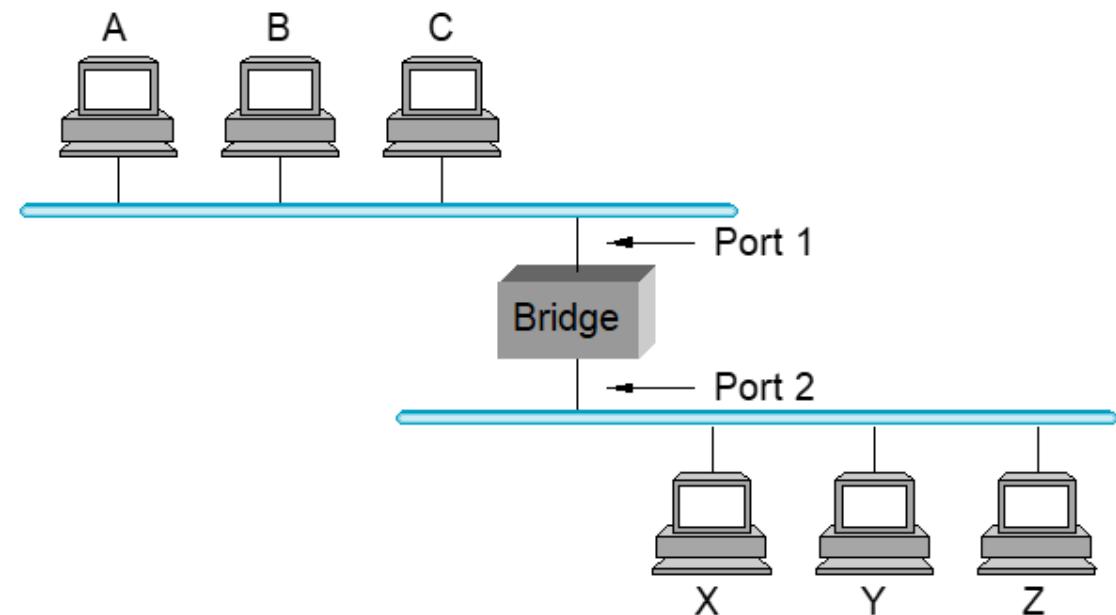


- ★ Las LANs pueden ser de varios tipos de tecnologías.
- ★ Las estaciones deben compartir esquema de direccionamiento.

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?.



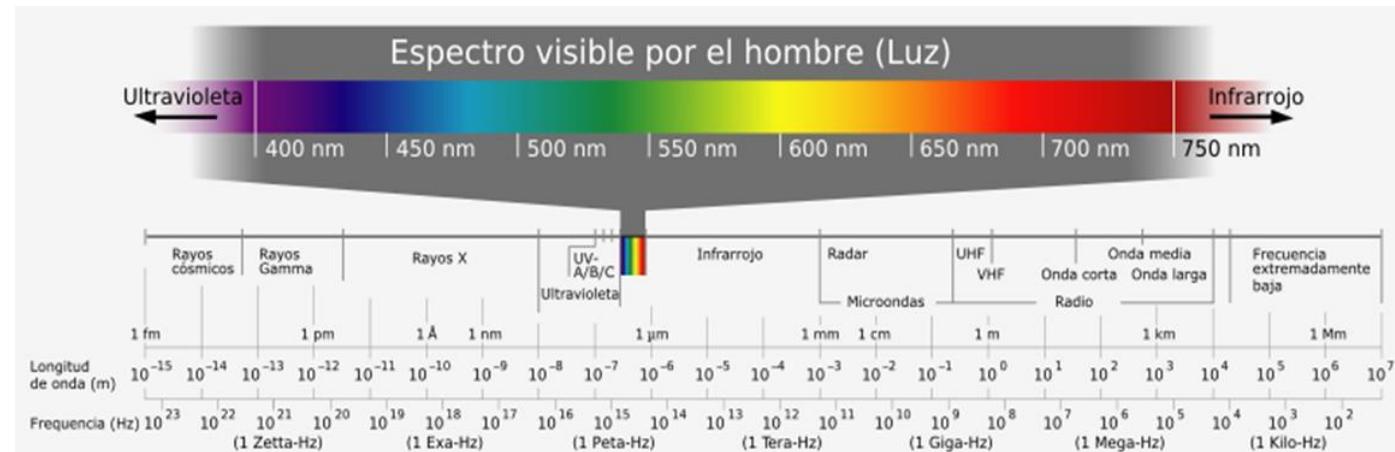
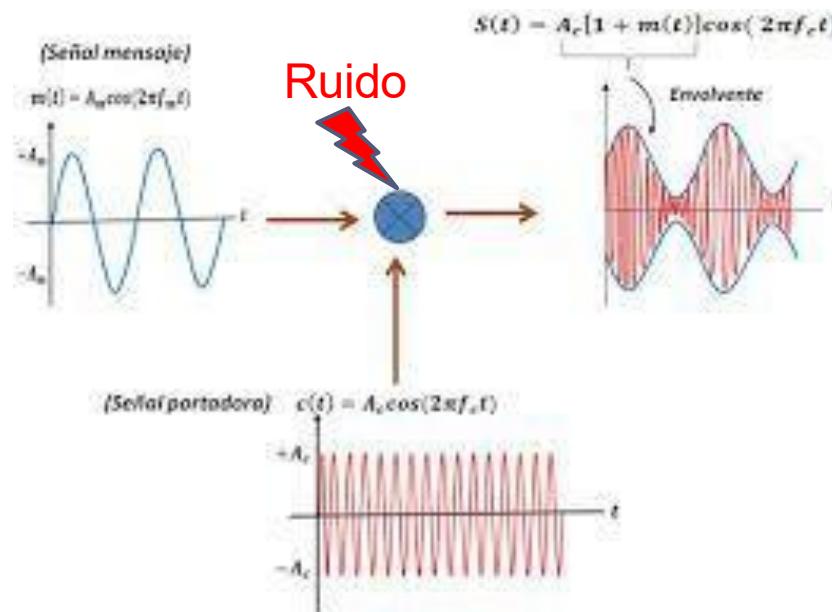


Redes Compartidas

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 $T = 2 * tp + \Delta T$
- ▶ Si recibe ACK → OK
- ▶ Si no → RTX

- ▶ ALOHA ranurado (Roberts, 1972)

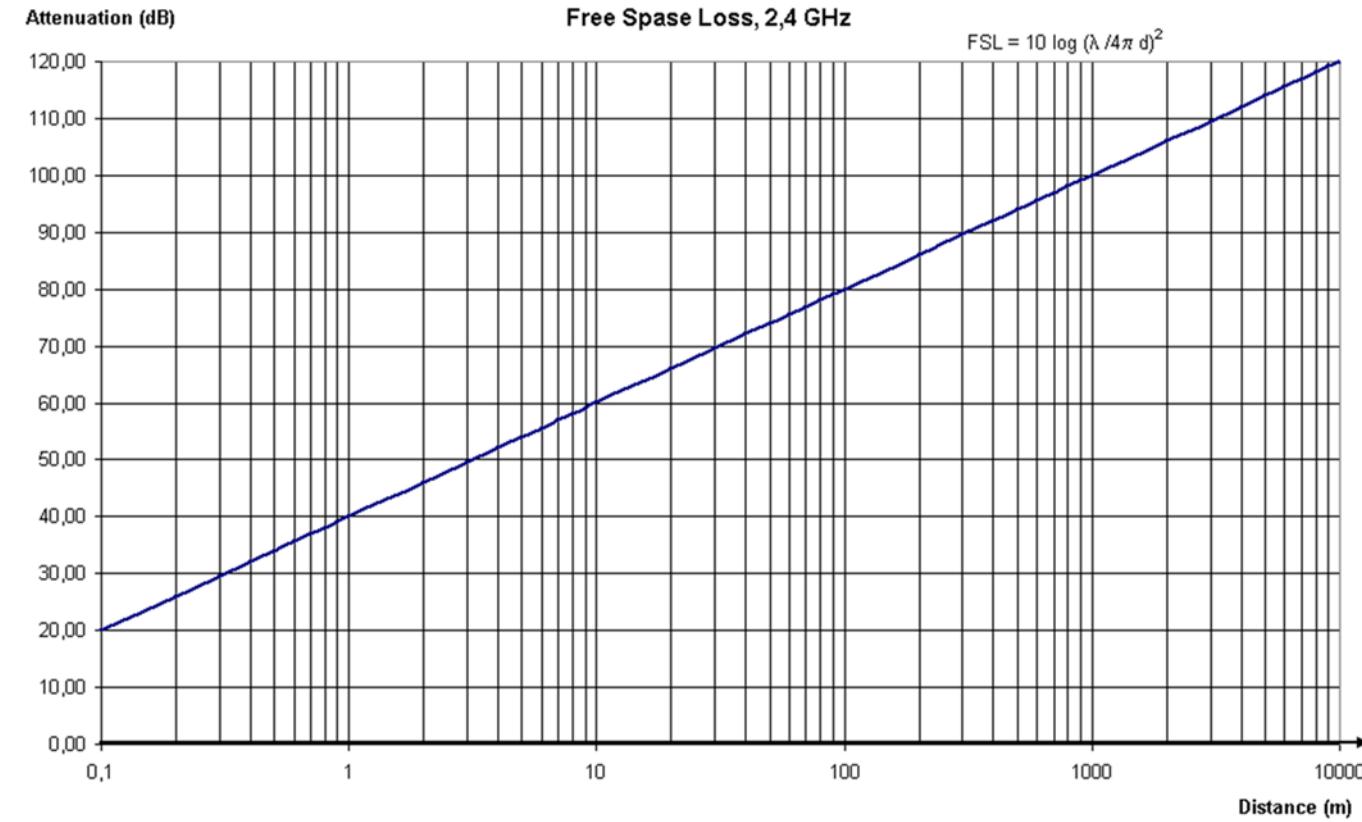
- ▶ Ninguna de las dos aprovechaban el hecho que el tiempo de propagación entre estaciones era pequeño con respecto al tiempo de transmisión de las tramas.
 - ▶ Apenas comience a transmitir un nodo, los demás lo sabrán casi inmediatamente, con lo cual las colisiones no serán habituales.



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)

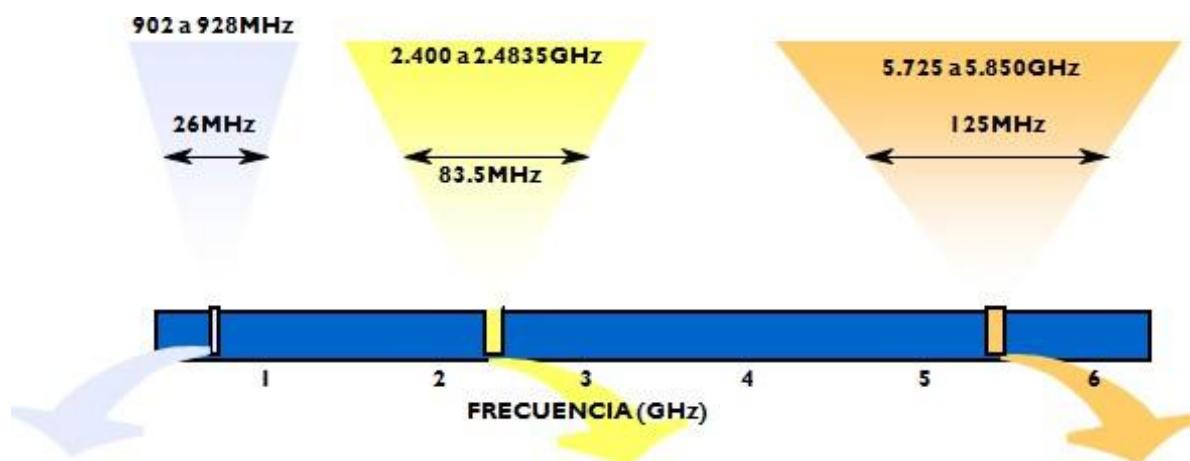
Atenuación en el espacio libre



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

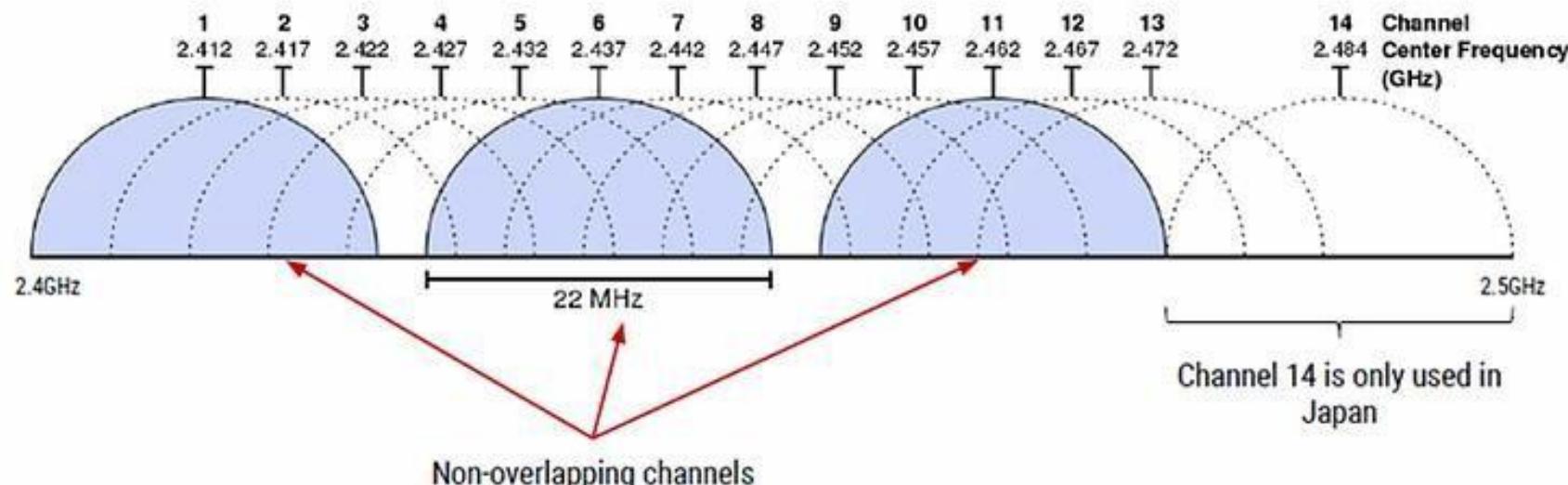
Bandas No Licenciadas (ISM - Industrial, Scientific & Medical)



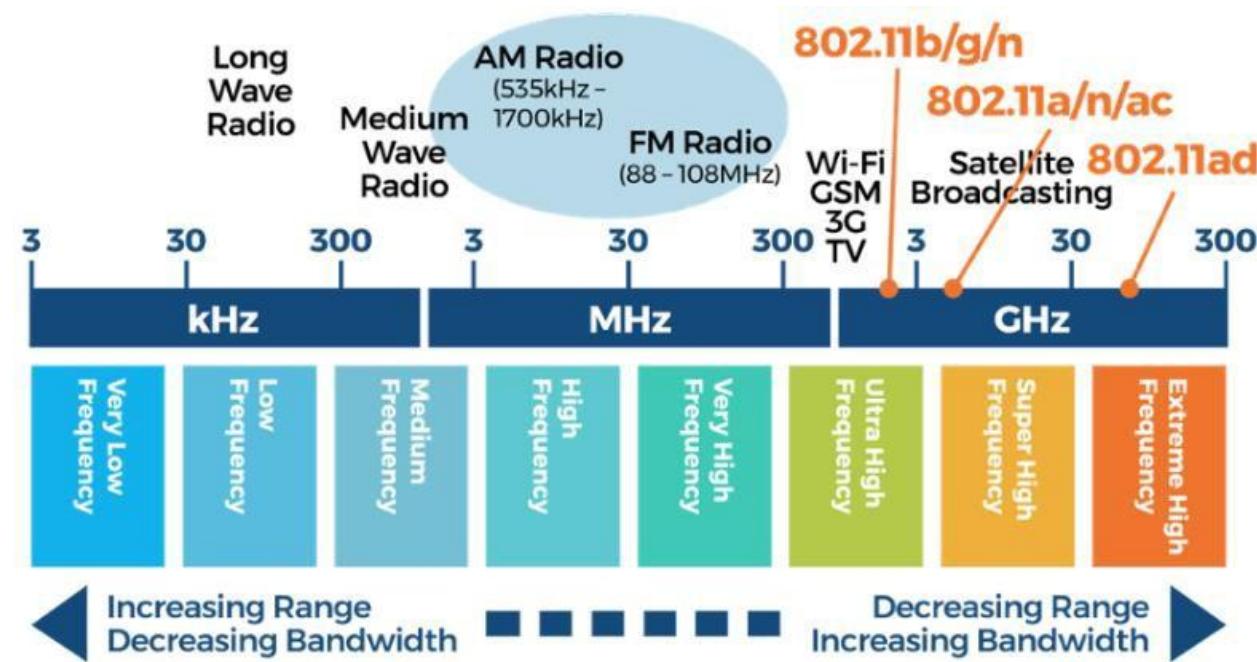
Bajo Ancho de Banda
Saturado de celulares y teléfonos
inalambricos

Es una banda que tiende a saturarse

Es una de las bandas relativamente
mas "limpias"

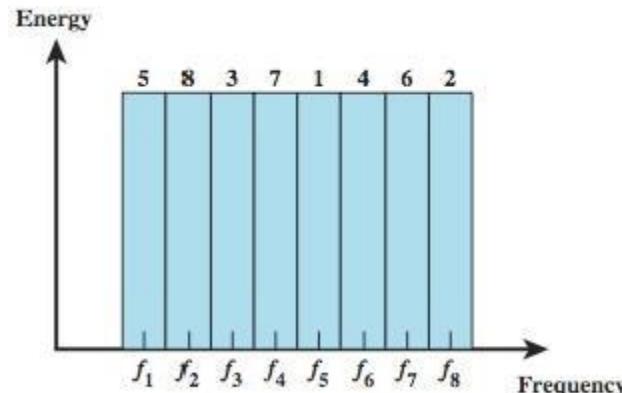


Wi-Fi "en el" espectro

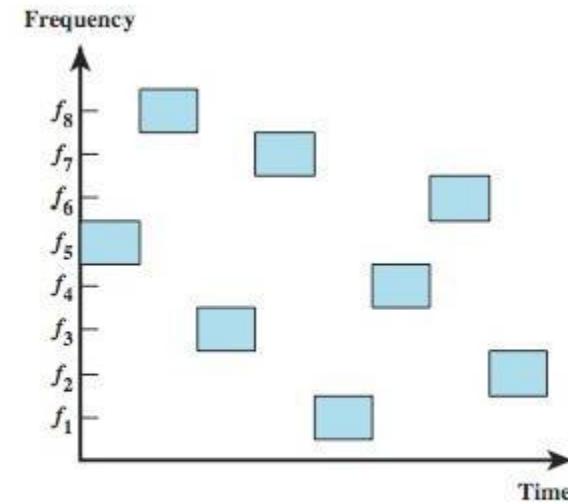


Wireless en bandas no licenciadas

- ▶ 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)**



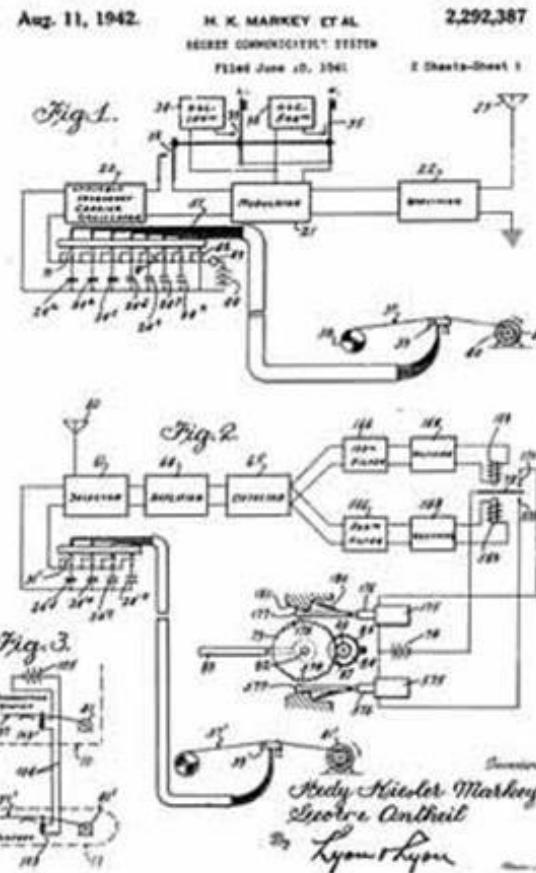
(a) Channel assignment



(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



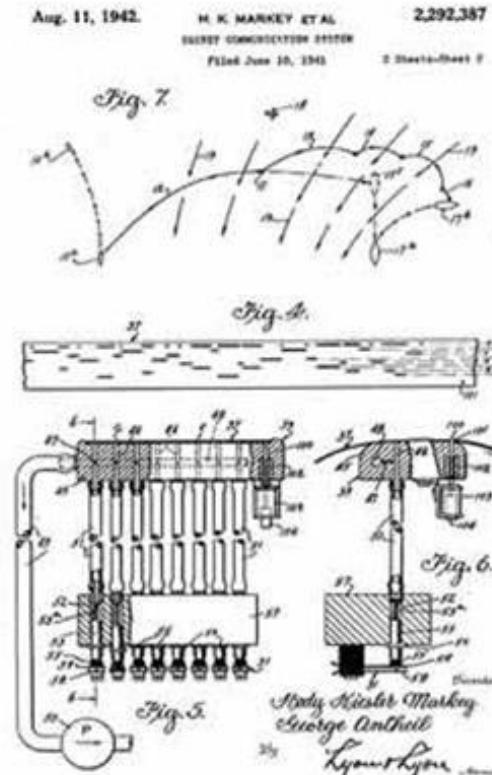
HEDY LAMARR INVENTOR

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



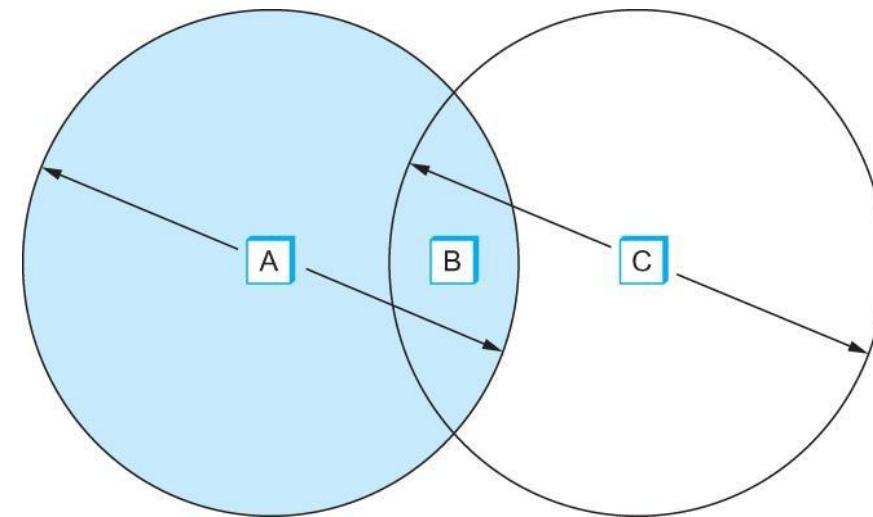
Protocolos de acceso múltiple



Medios Compartidos

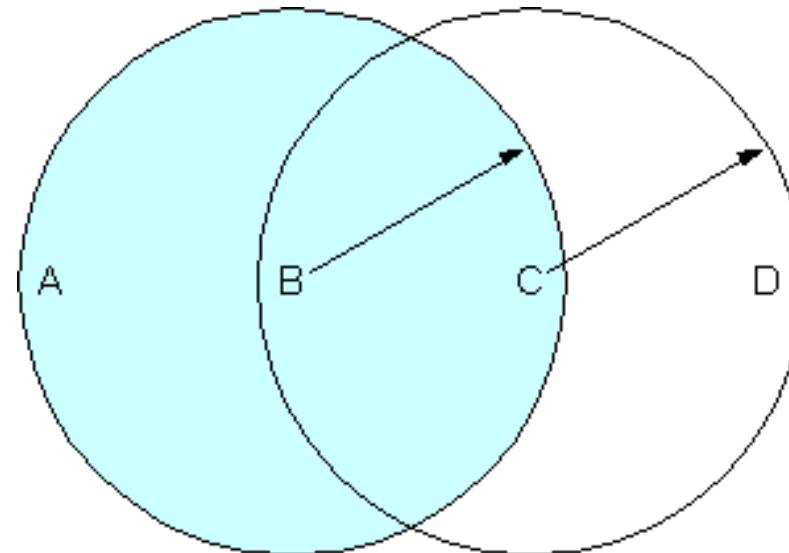
Problema de la estación oculta

- ▶ 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 esta 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

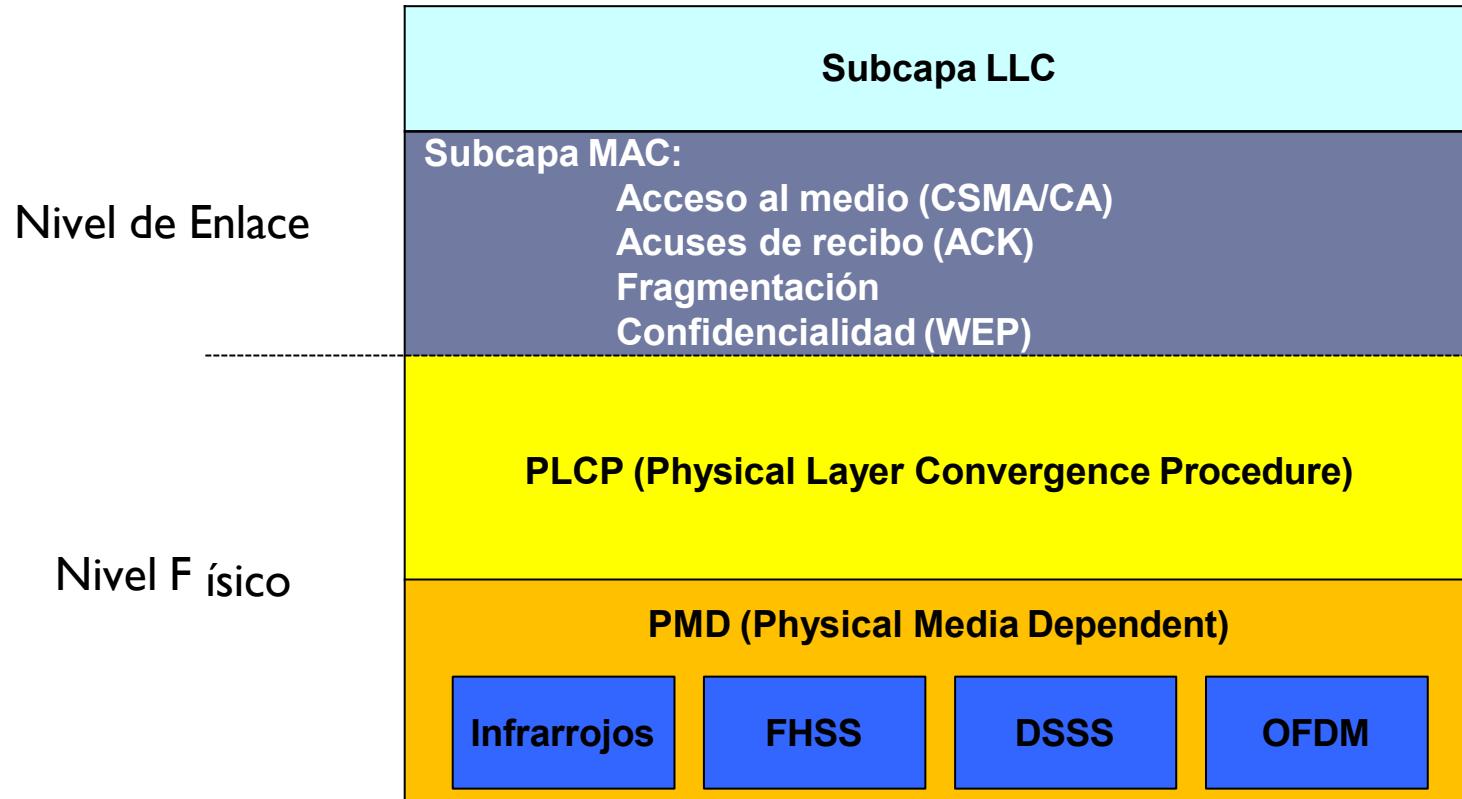


IEEE 802.11 aka Wi-Fi



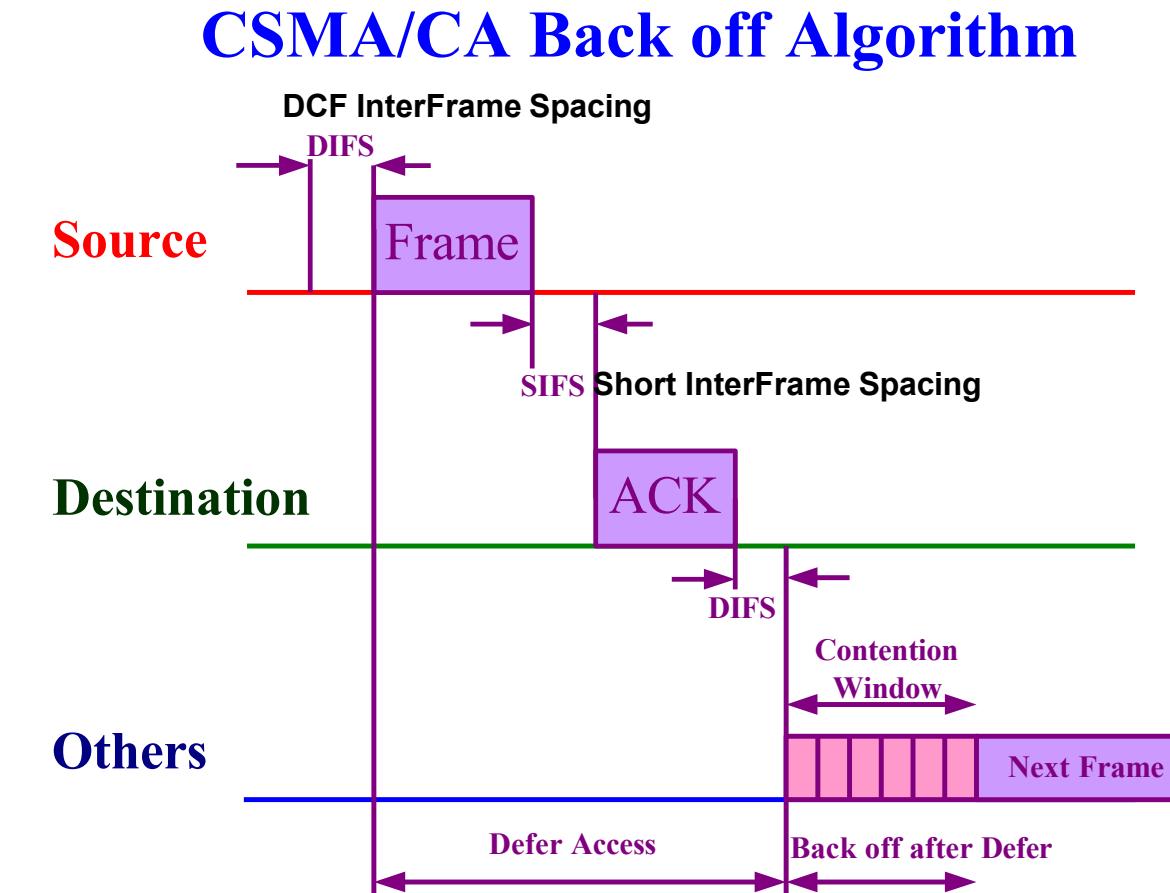
Nivel MAC en 802.11

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 ?

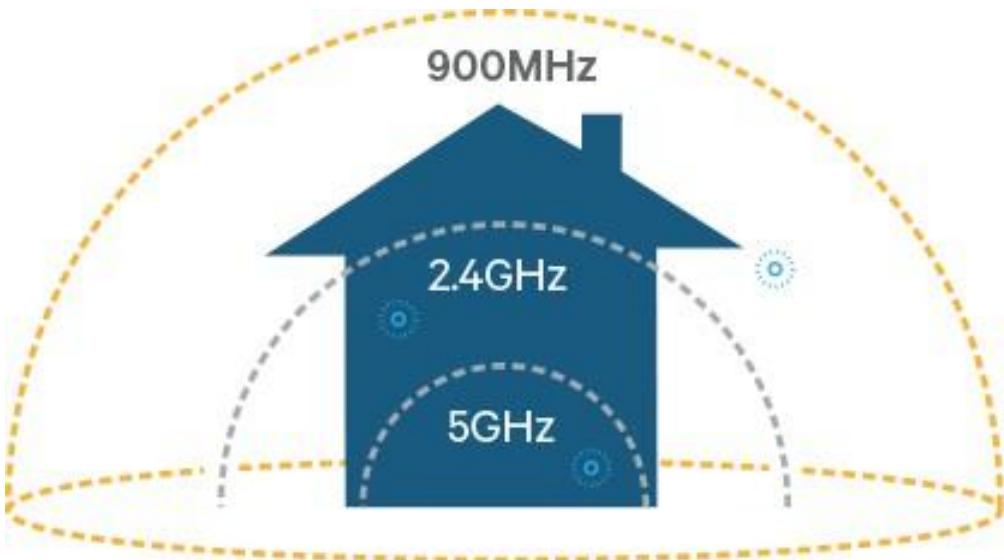


Evolución de 802.11

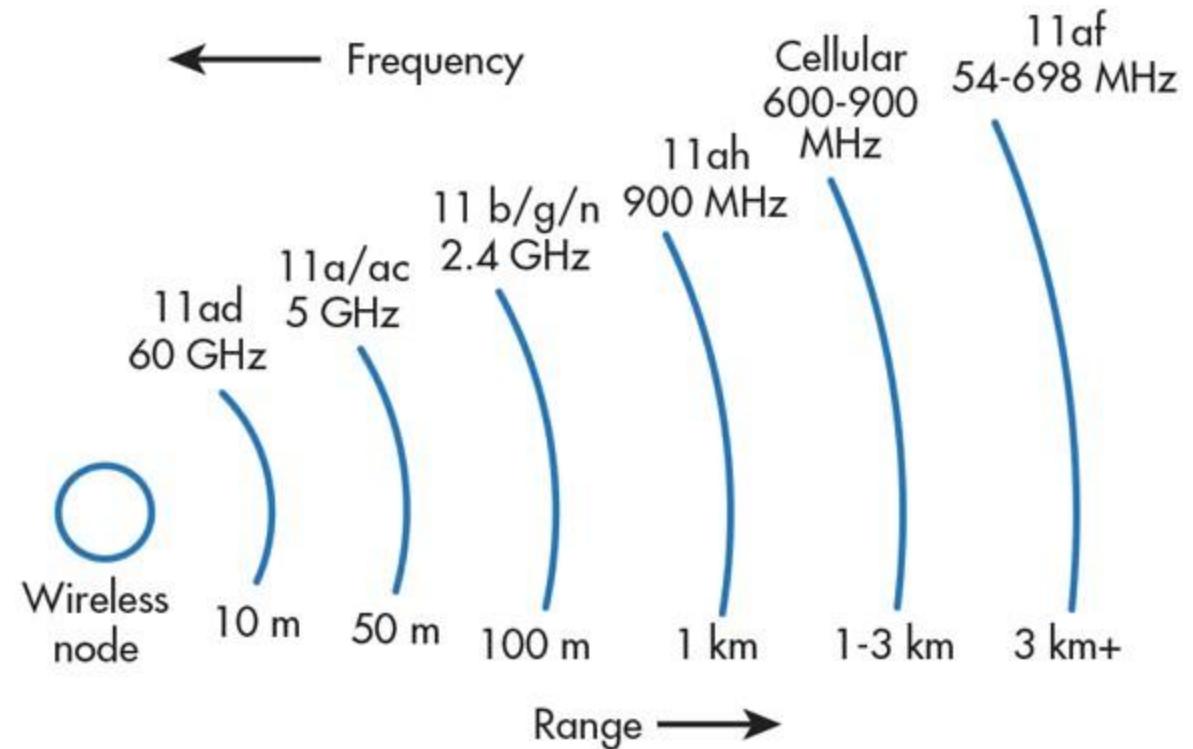
Standard	Frequency (GHz)	Bandwidth (MHz)	Modulation	Max Data Rate
802.11b	2.4	22	DSSS	11 Mbps
802.11a	5	20	OFDM	54 Mbps
802.11g	2.4	20	OFDM	54 Mbps
802.11n	2.4, 5	20, 40	MIMO-OFDM	600 Mbps
802.11ac	5	20,40,80,160	MIMO-OFDM	7 Gbps
802.11ax	2.4, 5	20,40,80,160	MIMO-OFDM	10 Gbps
802.11ad	60	2160	OFDM, SC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



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>



AI 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 & legacy devices / clients</p> <p>Likely to remain in use for years in 2.4GHz & 5GHz</p> <p>Rapid phase-out of new AP deployments in enterprise</p> <p>Some lower-end phones & IoT still using cheap silicon</p>	<p>In almost all new phones & 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 & 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 & 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>



Medios Compartidos



2 Parte IEEE 802.11

IEEE 802.11n vs 802.11ac

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

* 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	20MHz				40MHz				80MHz				160MHz				802.11n 802.11ac	
					Data Rate		Data Rate		Data Rate		Data Rate		Data Rate		Data Rate		Data Rate		Data Rate		Data Rate	
					No SGI	SGI	No SGI	SGI	No SGI	SGI	No SGI	SGI	No SGI	SGI	No SGI	SGI	No SGI	SGI	No SGI	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	468	520								
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	526.5	585										
6	6	1	64-QAM	3/4	58.5	65	121.5	135	263.3	292.5	702	780										
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	780	866.7										
	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										

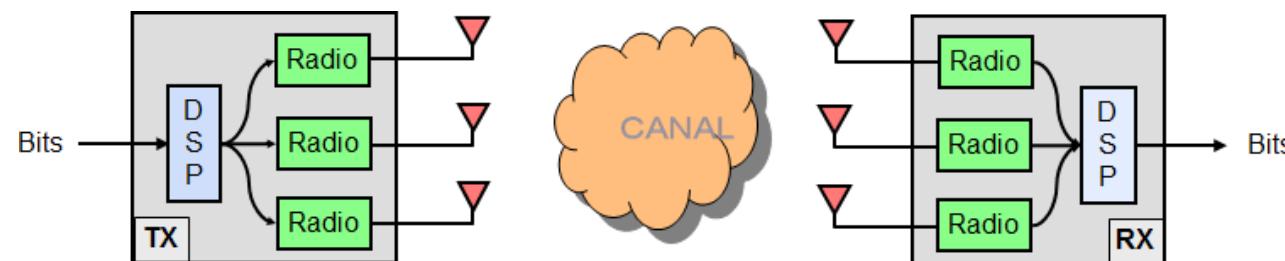


802.11n introduce : MIMO

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

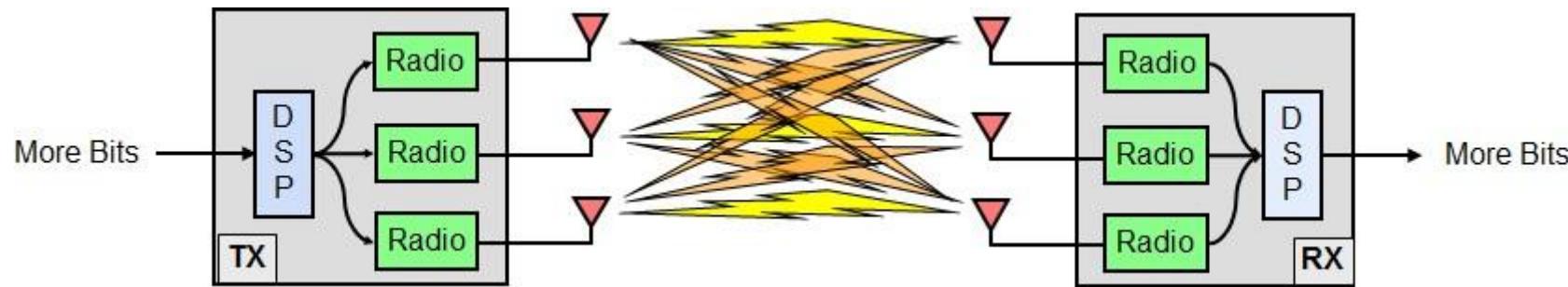


- ▶ Multiple Input Multiple Output (MIMO) Tx y Rx reciben múltiples señales de radio simultáneamente en el mismo espectro

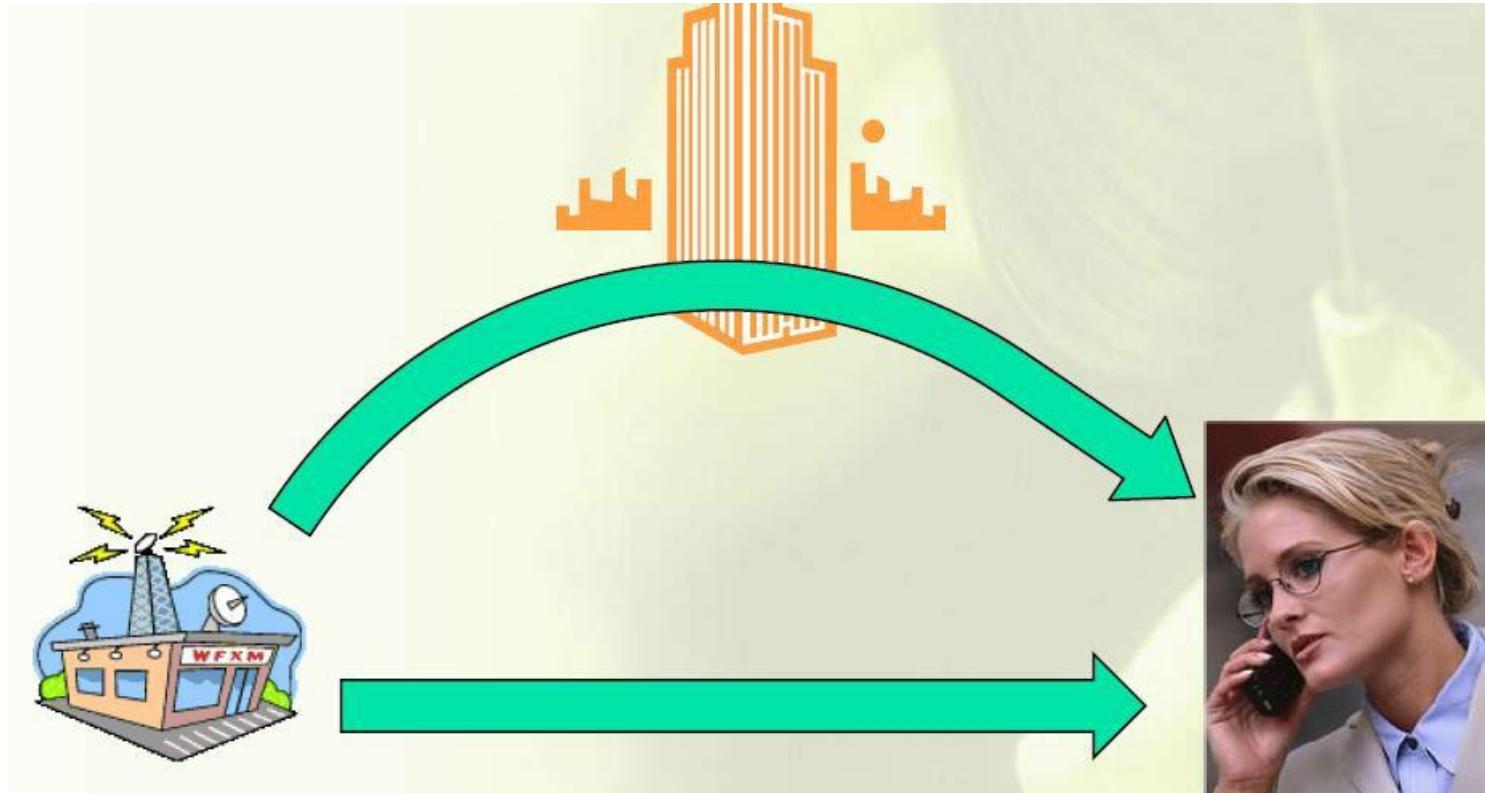


Multiplexación por división espacial

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

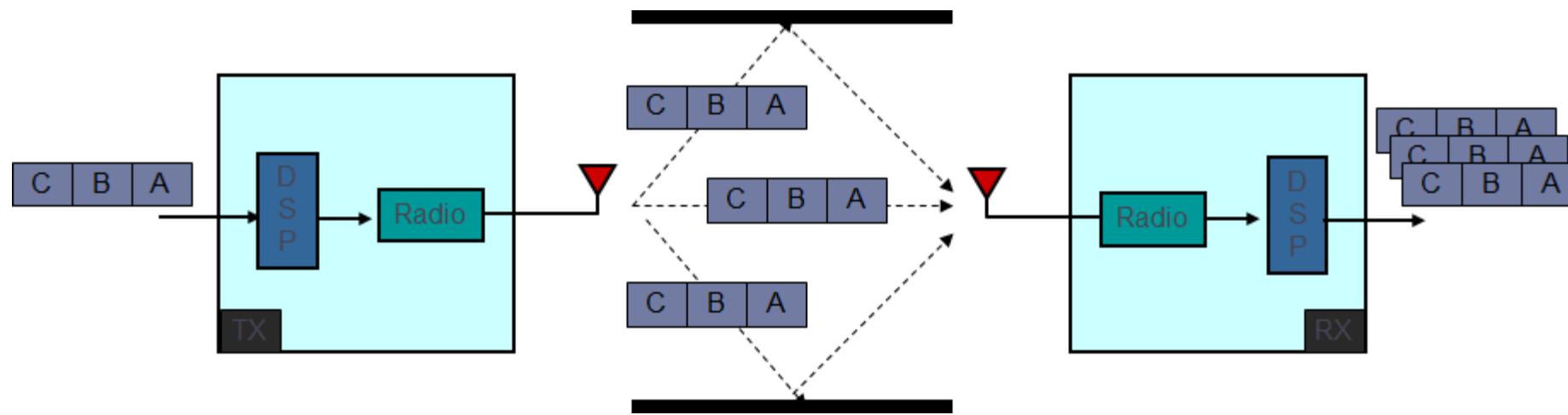


“Multi-path Fading”



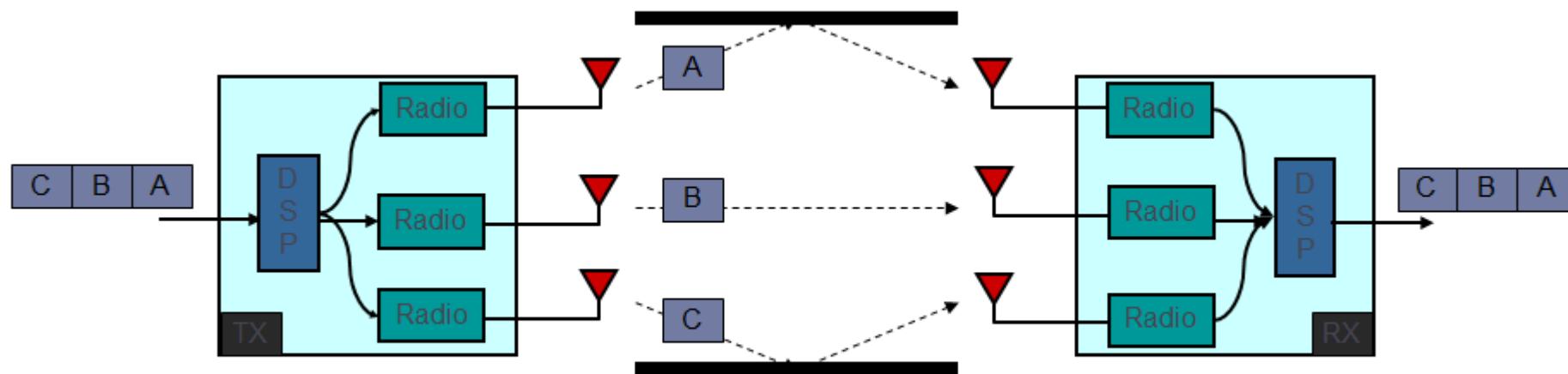
Propagación Multi-path en a/b/g

- ▶ Multi-path produce interferencia inter-simbólica (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



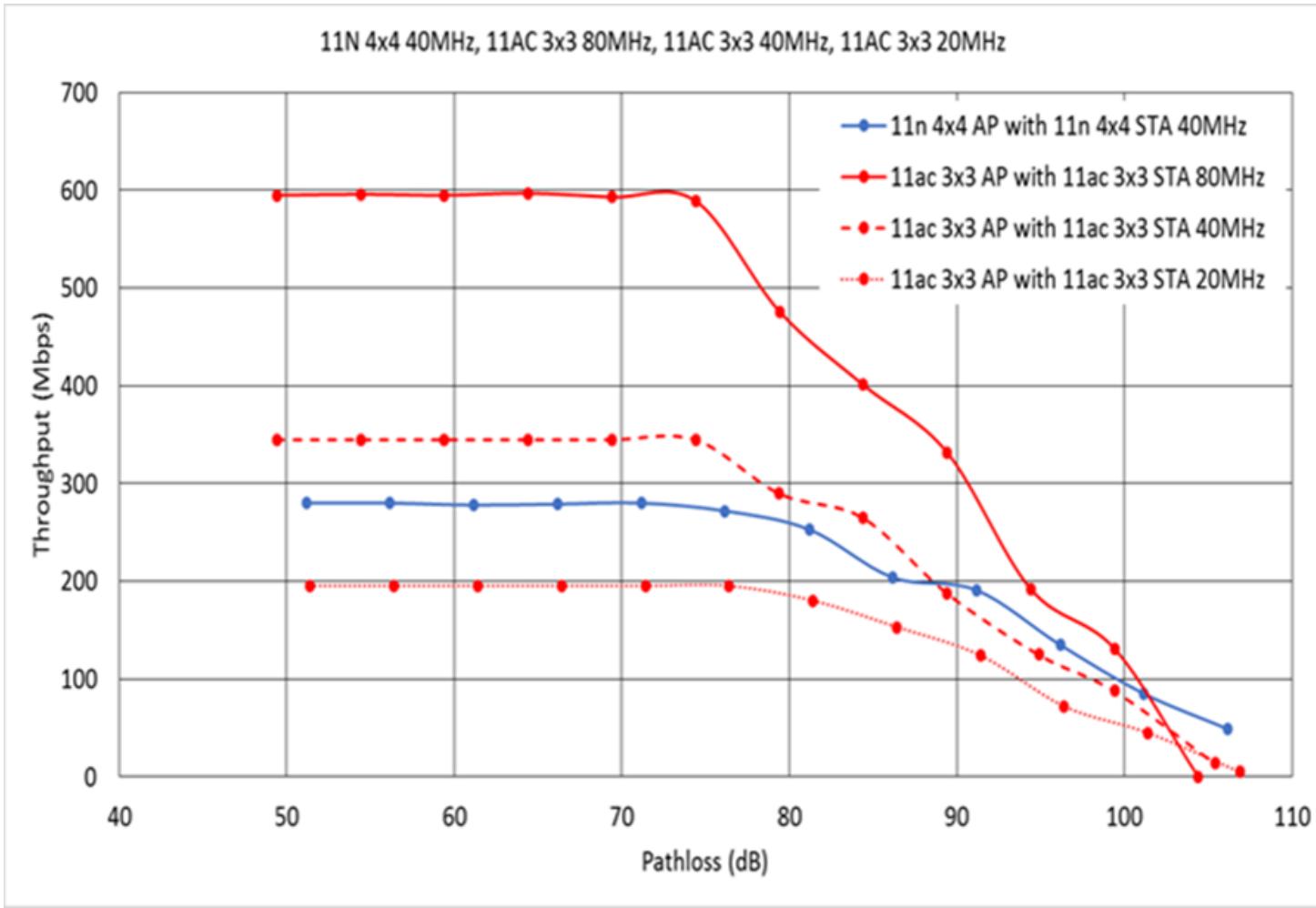
Notación MIMO

$$T \times R : S$$

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



Performance vs Atenuación

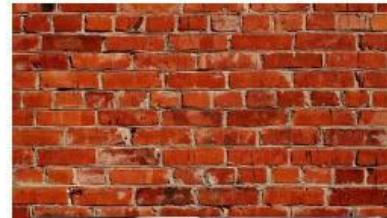


Atenuaciones típicas

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



Society of Cable
Telecommunications
Engineers

Atenuaciones típicas



ARRIS SCTE 2015

Donde no poner el AP

