

# Internet de las Cosas

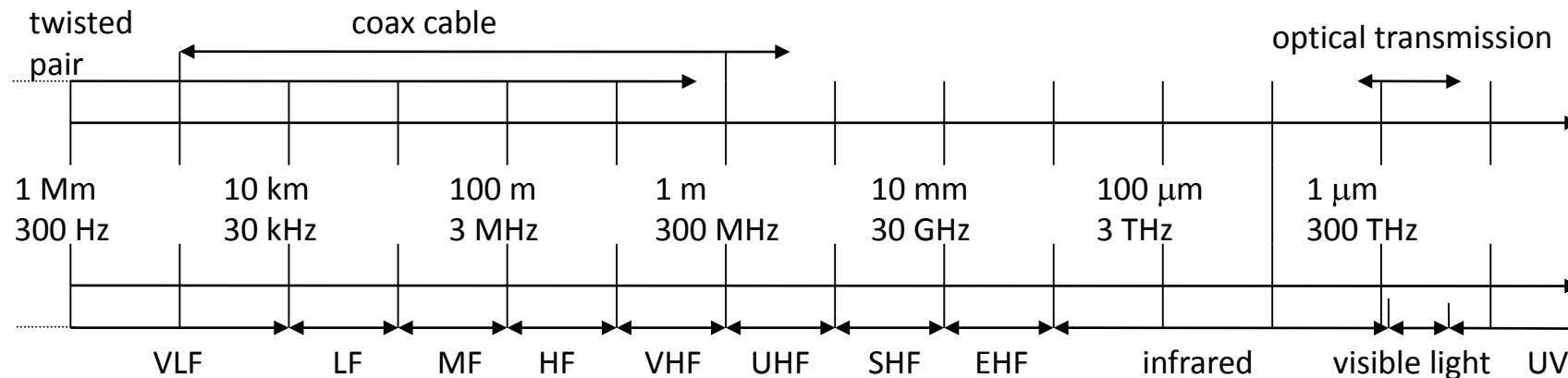
Diego Dujovne

Capas Física y MAC

Ingeniería Civil en Informática y Telecomunicaciones

# Redes: Capa Física

- El espectro electromagnético:



- VLF = Very Low Frequency
- LF = Low Frequency
- MF = Medium Frequency
- HF = High Frequency
- VHF = Very High Frequency

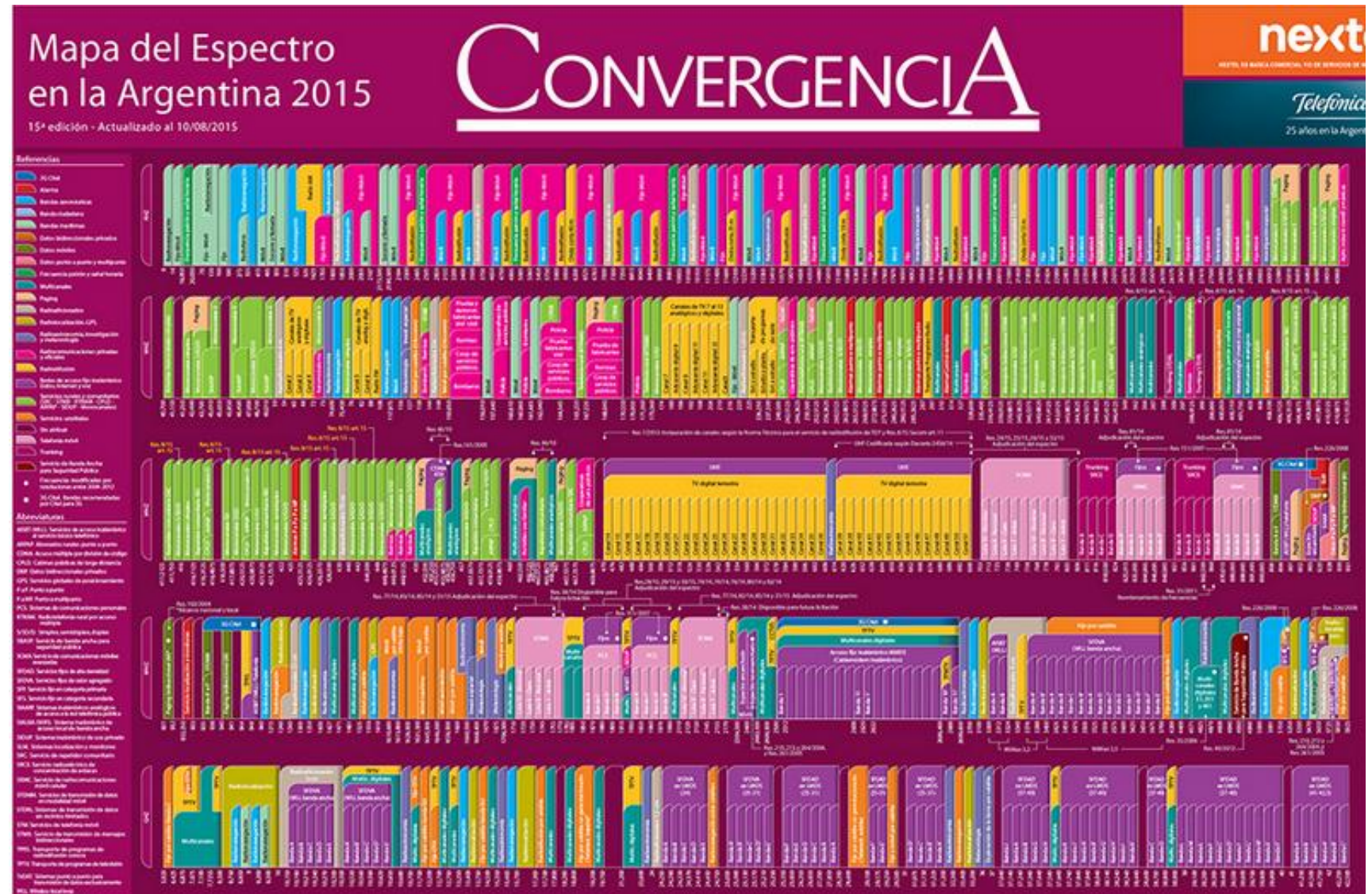
- UHF = Ultra High Frequency
- SHF = Super High Frequency
- EHF = Extra High Frequency
- UV = Ultraviolet Light

# Redes: Capa Física

- Las frecuencias bajas permiten una mayor penetración a través de objetos opacos a la luz visible.
- Pero las frecuencias bajas tienen asociado un ancho de banda menor por canal (por regulación y por capacidad de procesamiento analógico y digital)
- Por otro lado, la potencia de transmisión está regulada
- Y también el ciclo de trabajo para ciertos modos de transmisión (impulsiva, periódica)
- Esto asegura un nivel de convivencia entre dispositivos en bandas no licenciadas (ISM)

# Redes: Capa Física

- La asignación de frecuencias en Argentina:



# Redes: Capa Física

- Las bandas ISM en el mundo (típicas):
- Más la banda de **868** MHz en Europa
- 13,553-13,567 MHz
- 26,957 – 27,283 MHz
- 40,66 – 40,70 MHz
- **433 – 464 MHz**
- **900 – 928 MHz**
- **2,4 – 2,5 GHz**
- 5,725 – 5,875 GHz
- 24 – 24,25 GHz

# Redes: Capa Física

- Principios de Transmisión Inalámbrica

- Señal: Portadora + Información

$$s(t) = A(t) \sin(2\pi f(t)t) + \theta(t)$$

- Donde A es la amplitud, f es la frecuencia y  $\theta$  es la fase.
- La información se modula en la portadora.
- Se puede modular de manera analógica (la modulante toma cualquier valor real dentro de un rango)
- O digital (la cantidad de valores posibles es limitada)

# Redes: Capa Física

- Principios de Transmisión Inalámbrica

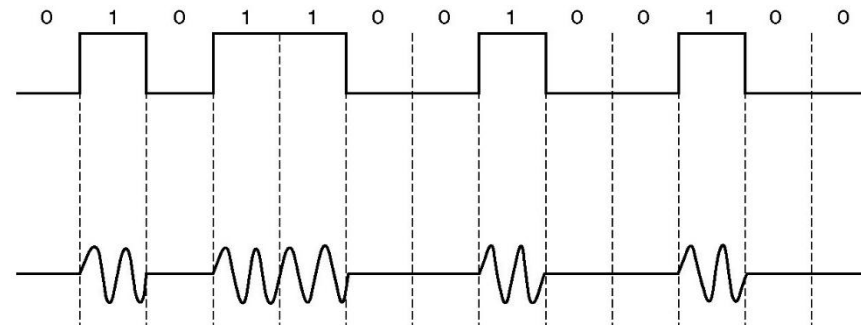
- Señal: Portadora + Información

$$s(t) = A(t) \sin(2\pi f(t)t) + \theta(t)$$

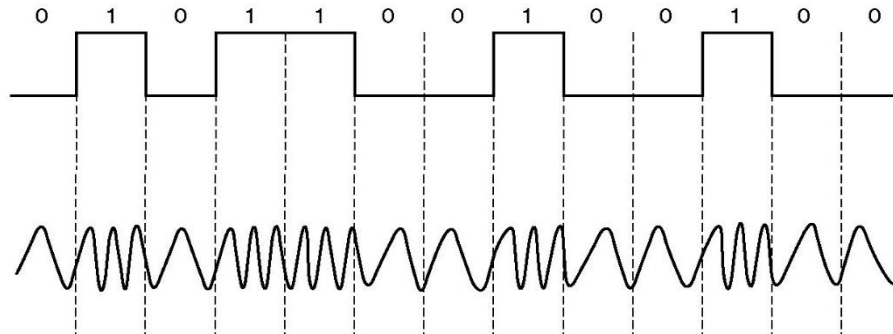
- Donde A es la amplitud, f es la frecuencia y  $\theta$  es la fase.
- La información se modula en la portadora.
- Se puede modular de manera analógica (la modulante toma cualquier valor real dentro de un rango)
- O digital (la cantidad de valores posibles es limitada)
- Se pueden modular la amplitud, la frecuencia y la fase y una combinación de ellas.

# Redes: Capa Física

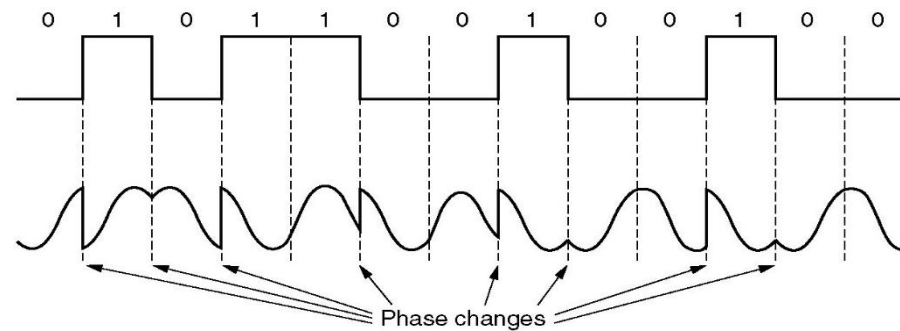
- ASK



- FSK



- PSK





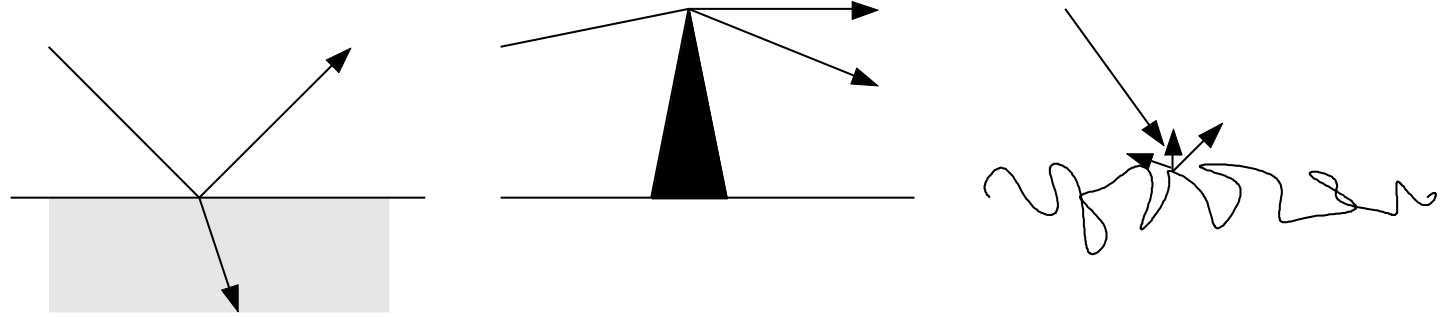
# Redes: Capa Física

- El receptor reconstruye los bits de la señal transmitida, demodulándola.
- La probabilidad de error es menor si la señal es digital, porque los valores analógicos correspondientes son predecibles
- Y la información está codificada en la colección finita de valores analógicos transmitidos.

# Redes: Capa Física

- Típicos problemas:
- Offset de frecuencia: Requiere sincronizarse con la portadora del transmisor
- Sincronización de Bit o de Símbolo: Encontrar los límites del símbolo
- Sincronización de Frame
- Detección (y posible corrección) de errores: ARQ / FEC

# Redes: Capa Física



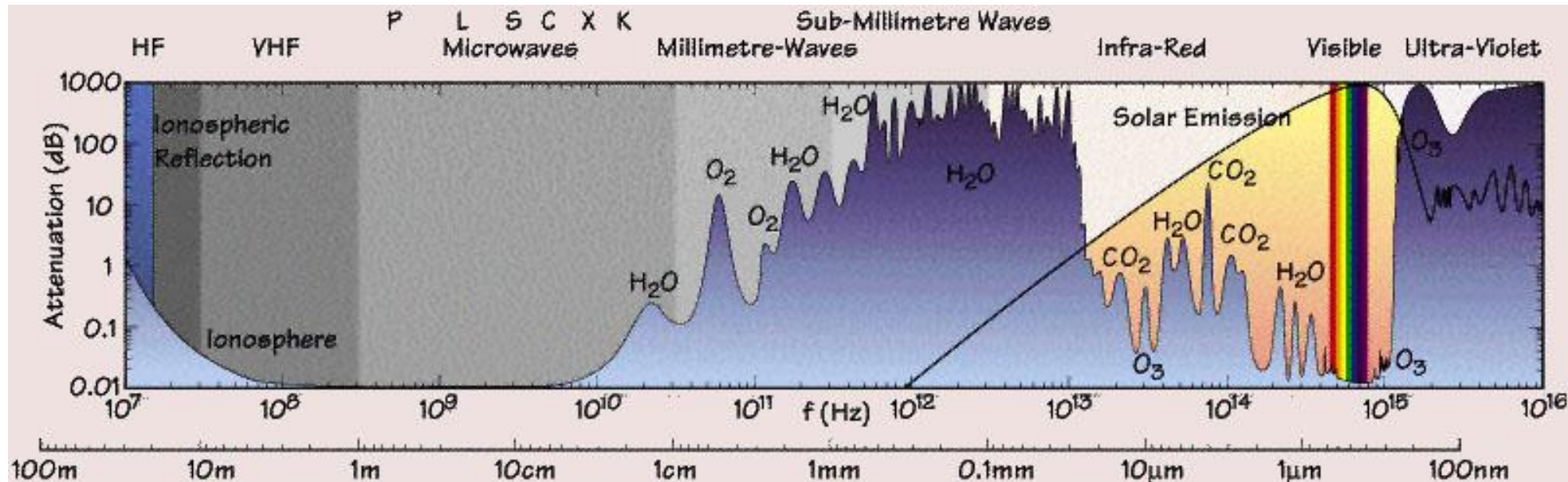
- Modelo de canal
- La señal que llega al receptor son una combinación de la señal original transmitida con reflexiones y refracciones en el camino
- Mas el ruido térmico y la interferencia de otras fuentes.
- Además la señal se atenúa con la distancia,
- El fenómeno de difracción genera una nueva señal a por efecto de los bordes
- La señal se difumina (o difunde) por múltiples reflexiones en superficies rugosas
- Y existe un corrimiento en frecuencia culpa del efecto Doppler para dispositivos en movimiento (o con el entorno en movimiento)

# Redes: Capa Física

- El efecto de la atenuación de espacio libre (modelo de Friis) de espacio libre, para campo lejano ( $d > d_0$ )
- $$Pr = \frac{P_{tx} \cdot G_t \cdot G_r \cdot \lambda}{(4\pi)^2 \cdot d^2 \cdot L}$$
- $$\frac{P_{tx} \cdot G_t \cdot G_r \cdot \lambda}{(4\pi)^2 \cdot d_0^2 \cdot L} \cdot \left(\frac{d_0}{d}\right)^2 = Pr(d_0) \cdot \left(\frac{d_0}{d}\right)^2$$
- Antenas direccionales?

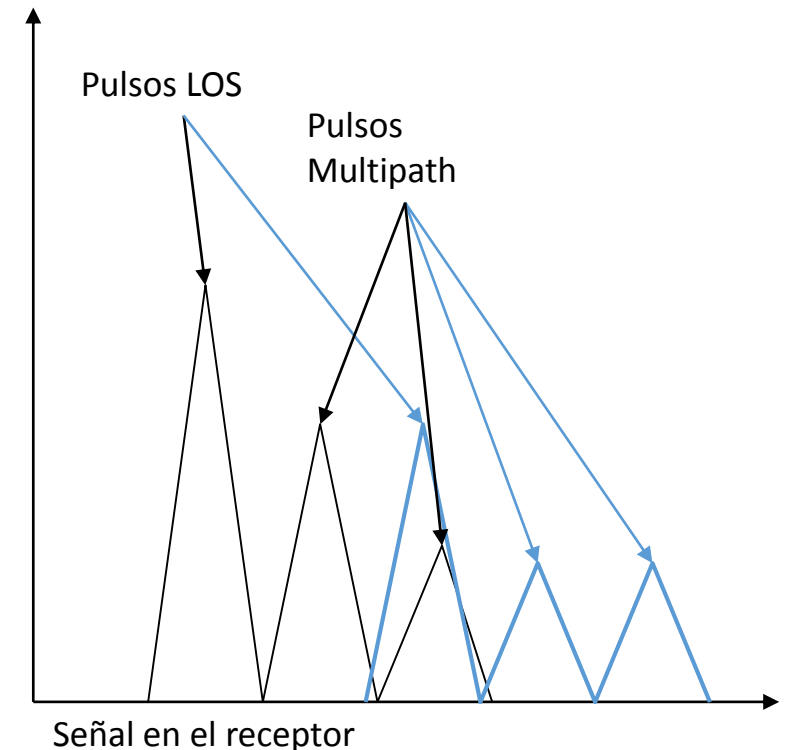
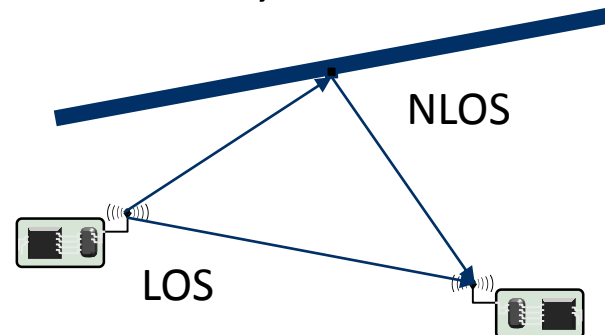
# Redes: Capa Física

- La atenuación depende de la frecuencia utilizada
- Puede resultar en un canal selectivo en frecuencia
  - Si el ancho de banda, por ejemplo, abarca parte del espectro con distintas propiedades de atenuación



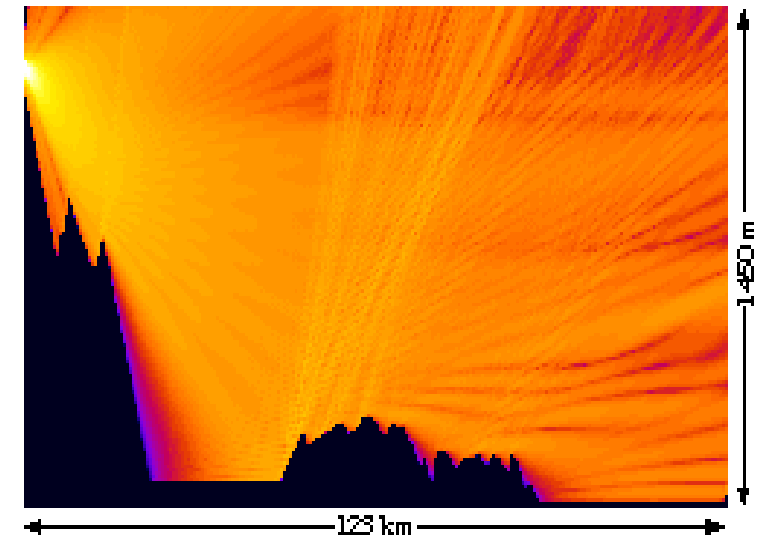
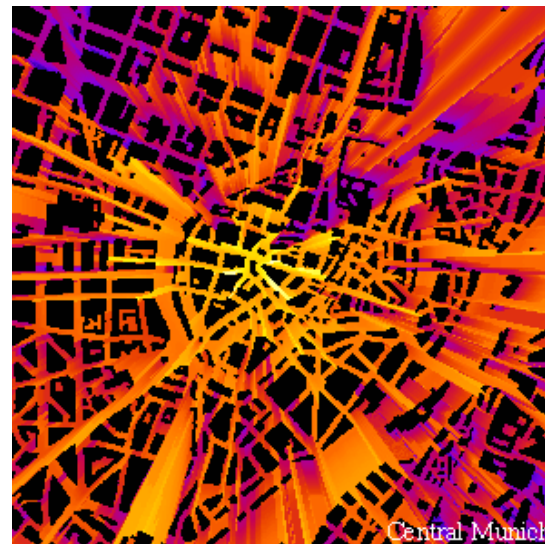
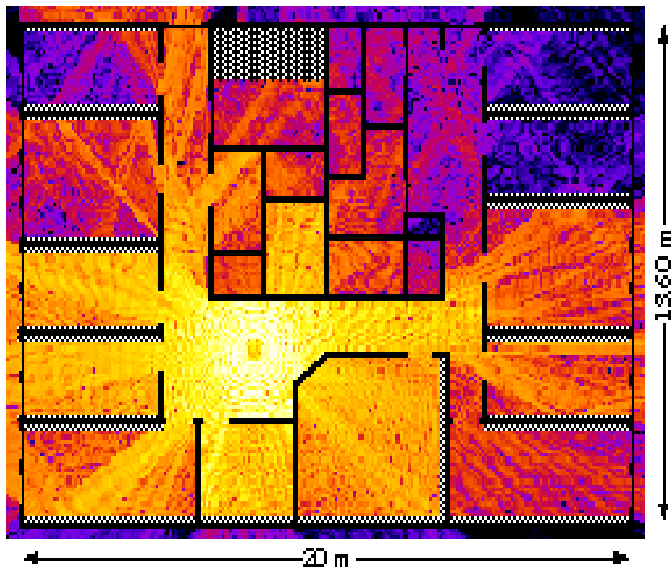
# Redes: Capa Física

- Los efectos combinados de reflexión y dispersión compuestos se pueden modelar con múltiples rayos.
- Los efectos son muy dependientes de la frecuencia, además.
- El resultado se denomina “Delay Spread”
- Y resulta también selectivo en términos de frecuencia.
- Si consideramos el movimiento, se convierte en “Fast fading”.



# Redes: Capa Física

- Un modelo de elementos finitos muestra los resultados de combinar los efectos:



# Redes: Capa Física

- Si generalizamos la fórmula de la atenuación, se reemplaza el cuadrado por un factor  $\gamma$ , llamado exponente de pathloss:

$$P_{\text{recv}}(d) = P_{\text{recv}}(d_0) \cdot \left(\frac{d_0}{d}\right)^\gamma$$

- En términos logarítmicos:

$$PL(d)[\text{dB}] = PL(d_0)[\text{dB}] + 10\gamma \log_{10} \left(\frac{d}{d_0}\right)$$

- Si agregamos una variable aleatoria para incluir los obstáculos (gaussiana, media cero, varianza  $\sigma^2$ ) resulta en un efecto denominado fading lognormal.

$$PL(d)[\text{dB}] = PL(d_0)[\text{dB}] + 10\gamma \log_{10} \left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma[\text{dB}]$$



# Redes: Capa Física

- Llevando esto a la capacidad de decodificar un bit
- Depende principalmente de la relación señal a ruido e interferencia (SINR):

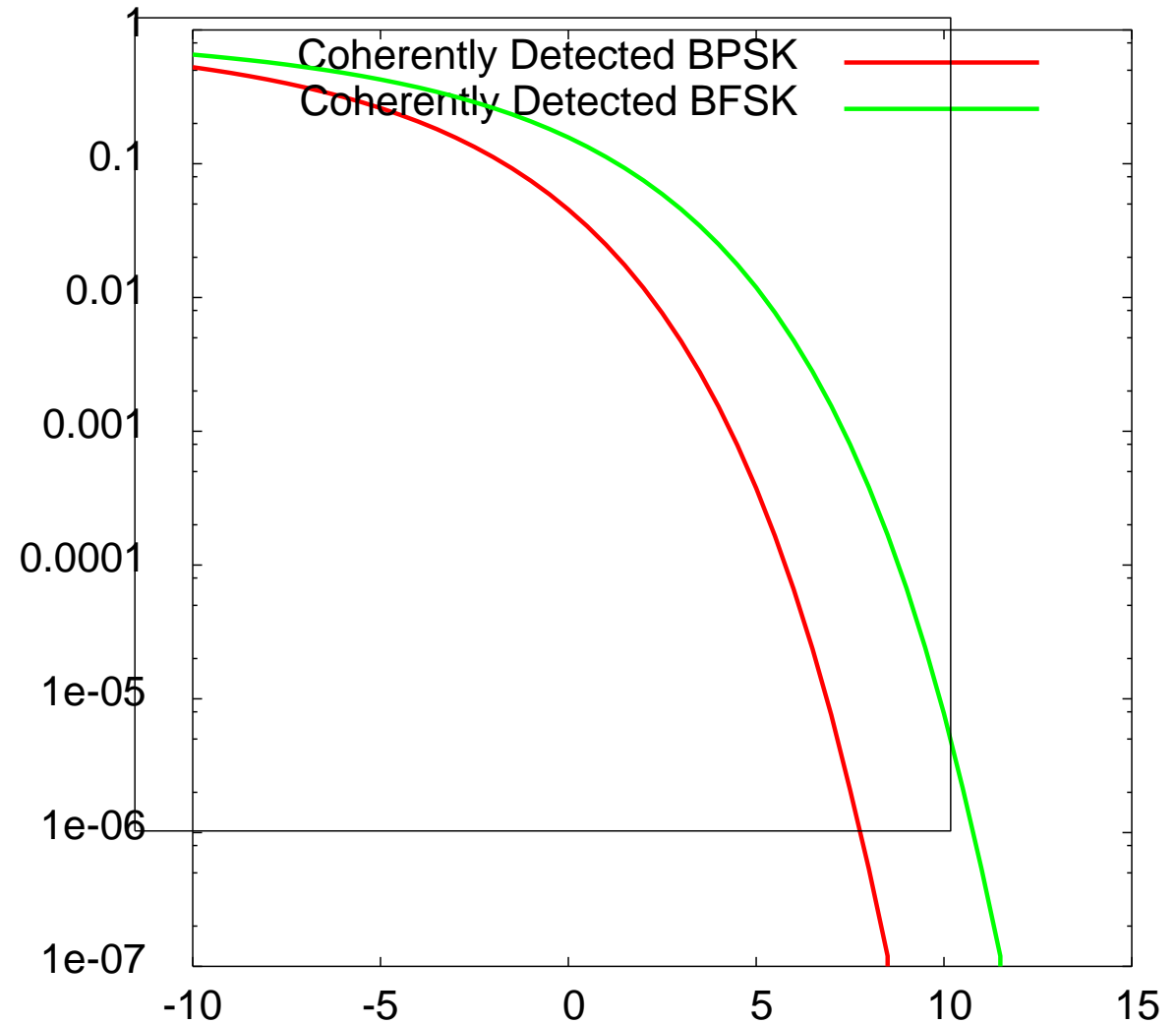
$$\text{SINR} = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{\text{recv}}}{N_0 + \sum_{i=1}^k I_i} \right)$$

- La SINR entonces permite estimar el BER (bit error rate) para una modulación determinada. Para DPSK, sería:

$$\text{BER}(\text{SINR}) = 0.5 e^{-\frac{E_b}{N_0}}$$
$$E_b/N_0 = \text{SINR} \cdot \frac{1}{R}$$

# Redes: Capa Física

- Para distintos valores de SINR y para distintas modulaciones, el BER se relaciona como establece la figura.



# Redes: Capa Física

- Qué tiene que ver esto con la IoT?
- El rango de transmisión es pequeño: genera un delay spread en el orden de los nanosegundos, no distorsionando mayormente la señal con velocidad de bit bajas
- Como el ancho de banda de coherencia es mayor a 50MHz, el fading no es selectivo en frecuencia.
- Respecto a las atenuaciones:
- $\gamma$  es el exponente,
- La varianza es  $\sigma^2$
- Y el rango de pérdida a 1m

Location	Average of $\gamma$	Average of $\sigma^2$ [dB]	Range of PL(1m)[dB]
Engineering Building	1.9	5.7	[−50.5, −39.0]
Apartment Hallway	2.0	8.0	[−38.2, −35.0]
Parking Structure	3.0	7.9	[−36.0, −32.7]
One-sided Corridor	1.9	8.0	[−44.2, −33.5]
One-sided patio	3.2	3.7	[−39.0, −34.2]
Concrete canyon	2.7	10.2	[−48.7, −44.0]
Plant fence	4.9	9.4	[−38.2, −34.5]
Small boulders	3.5	12.8	[−41.5, −37.2]
Sandy flat beach	4.2	4.0	[−40.8, −37.5]
Dense bamboo	5.0	11.6	[−38.2, −35.2]
Dry tall underbrush	3.6	8.4	[−36.4, −33.2]

# Redes: Capa Física

- Actividad 4:
- *Existen las tecnologías LPWAN (Low Power, Wide Area) que comprenden a:*
- *LoRa (Long-Range)*
- *SigFox*
- *802.15.4g (Wi-Sun)*
- *Weightless*
- *NB-IoT*
- *Investigar las características de potencia, sensibilidad, capacidad, canalización, bandas, coberturas estimadas*
- *En un slide, presentar brevemente la tecnología agregando al menos los datos anteriores.*
- *Enviar el slide en formato pdf a: [diego.dujovne@mail.udp.cl](mailto:diego.dujovne@mail.udp.cl)*

# Redes: Capa MAC

- Históricamente, las capas MAC se propusieron de manera (semi) independiente de la existencia de un canal de comunicación no ideal.
- Esto permitió definir, mediante simulaciones y estudios analíticos, límites máximos y cotas
- Sin embargo, no siempre fueron optimizados para consumo ni para la capacidad limitada de procesamiento, ni para la escalabilidad deseada, o peor aún, el tiempo de convergencia resultó alto, por ejemplo.

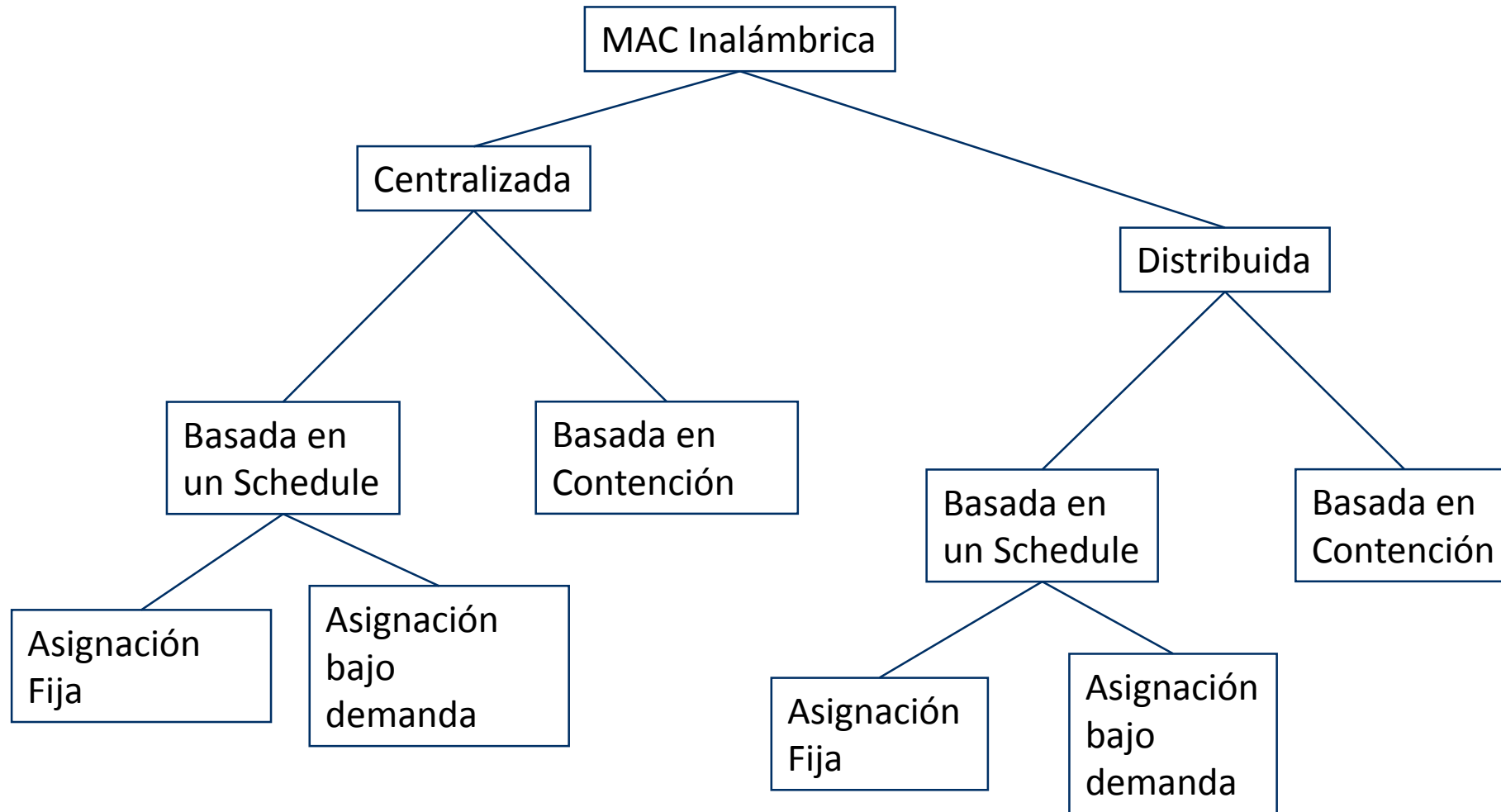
# Redes: Capa MAC

- Generalmente no está permitido transmitir y recibir al mismo tiempo.
- La interferencia en el receptor es el factor determinante para la recepción, y es distinta a la situación que observa el transmisor (por CSMA)
- Un BER alto también complica las cosas, sobre todo por la señalización de ACKs y otros paquetes de gestión de red.
- Y uno espera que sea eficiente en energía, además de tener poco overhead, alto throughput, bajo delay, baja cantidad de errores...

# Redes: Capa MAC

- Las colisiones son uno de los problemas más complejos de manejar
- El costo de escuchar paquetes que no corresponden al nodo receptor
- Escuchar mientras nadie transmite consume energía
- Overhead del protocolo (en encabezados y otros paquetes) suele ser costoso.
- Y uno espera que la solución sea simple.

# Redes: Capa MAC





# Redes: Capa MAC

- Protocolos basados en Schedule

**TSMP, IEEE 802.15.4, Arisha,  
PEDAMACS, BitMAC, G-MAC,  
SMACS, TRAMA, FLAMA,  $\mu$ MAC,  
EMACs, PMAC,  
PACT, BMA, MMAC,  
FlexiMAC, PMAC, O-MAC,  
PicoRadio, Wavenis, f-MAC,  
Multichannel LMAC, MMSN, Y-MAC,  
Practical Multichannel MAC, LMAC,  
AI-LMAC, SS-TDMA, RMAC**

# Redes: Capa MAC

- Protocolos basados en Periodo activo común

**SMAC, TMAC, E2MAC,  
SWMAC, Adaptive Listening,  
nanoMAC, DSMAC, FPA,  
DMAC, Q-MAC, MSMAC,  
GSA, RL-MAC, U-MAC,  
RMAC, E2RMAC**

# Redes: Capa MAC

- Protocolos basados en Preamble sampling

**Preamble-Sampling ALOHA, Preamble-Sampling CSMA, Cycled Receiver, LPL, Channel Polling, BMAC, EA-ALPL, CSMA-MPS, TICER, WOR, X-MAC, MH-MAC, DPS-MAC, CMAC, GeRAF, 1-hopMAC, RICER, WiseMAC, RATE EST, SP, SyncWUF, STEM, MFP, 1-hopMAC, SpeckMAC-D, MX-MAC**

# Redes: Capa MAC

- Protocolos Híbridos

**IEEE 802.15.4, ZMAC, Funneling  
MAC, MH-MAC, SCP,  
Crankshaft**

# Redes: Capa MAC

- Centralizado:
- Una unidad central decide cuándo debe transmitir cada nodo
- Es generalmente simple, y sirve para sistemas de polling
- Permite calcular centralmente schedules TDMA
- No es obvio para tamaños grandes de redes
- Pero se puede utilizar cuando las redes se organizan en clusters.

# Redes: Capa MAC

- MAC basada en schedule:
- Un Schedule define cuándo transmite qué estación (TDMA)
- O una banda específica dentro de un espacio determinado, con un código (para CDMA)
- Puede ser fijo o calculado bajo demanda
- Requiere sincronización

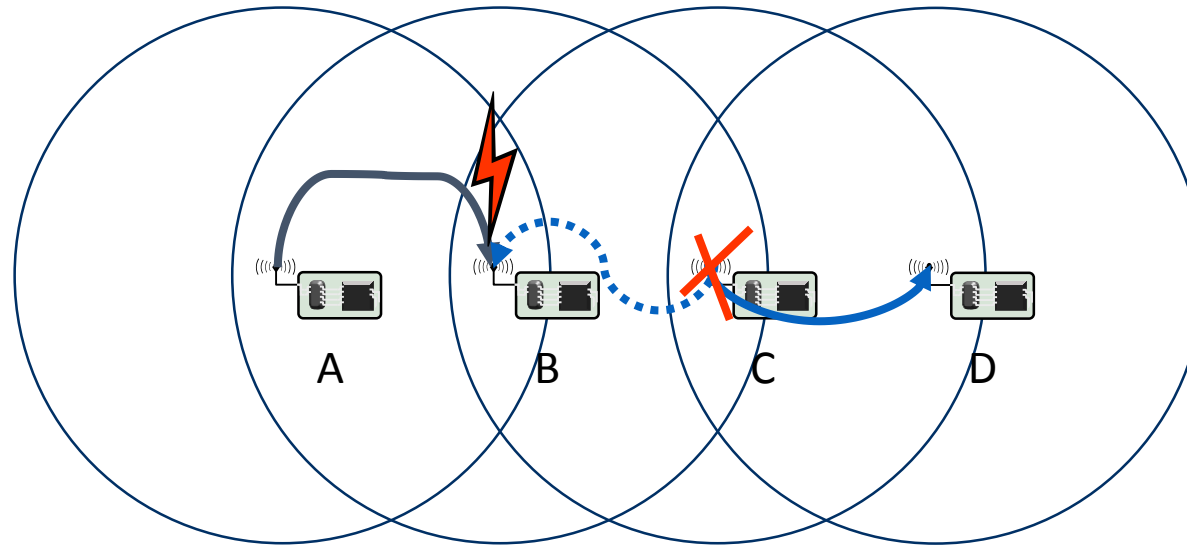
# Redes: Capa MAC

- MAC basada en contención:
- El riesgo de colisionar está incluido
- El overhead de coordinación puede ser ahorrado, para ahorrar tiempo de canal
- Mecanismos para reducir las colisiones (RTS/CTS)
- Usar aleatorización es también útil.

# Redes: Capa MAC

- Ideas básicas: CSMA (y ALOHA...?)

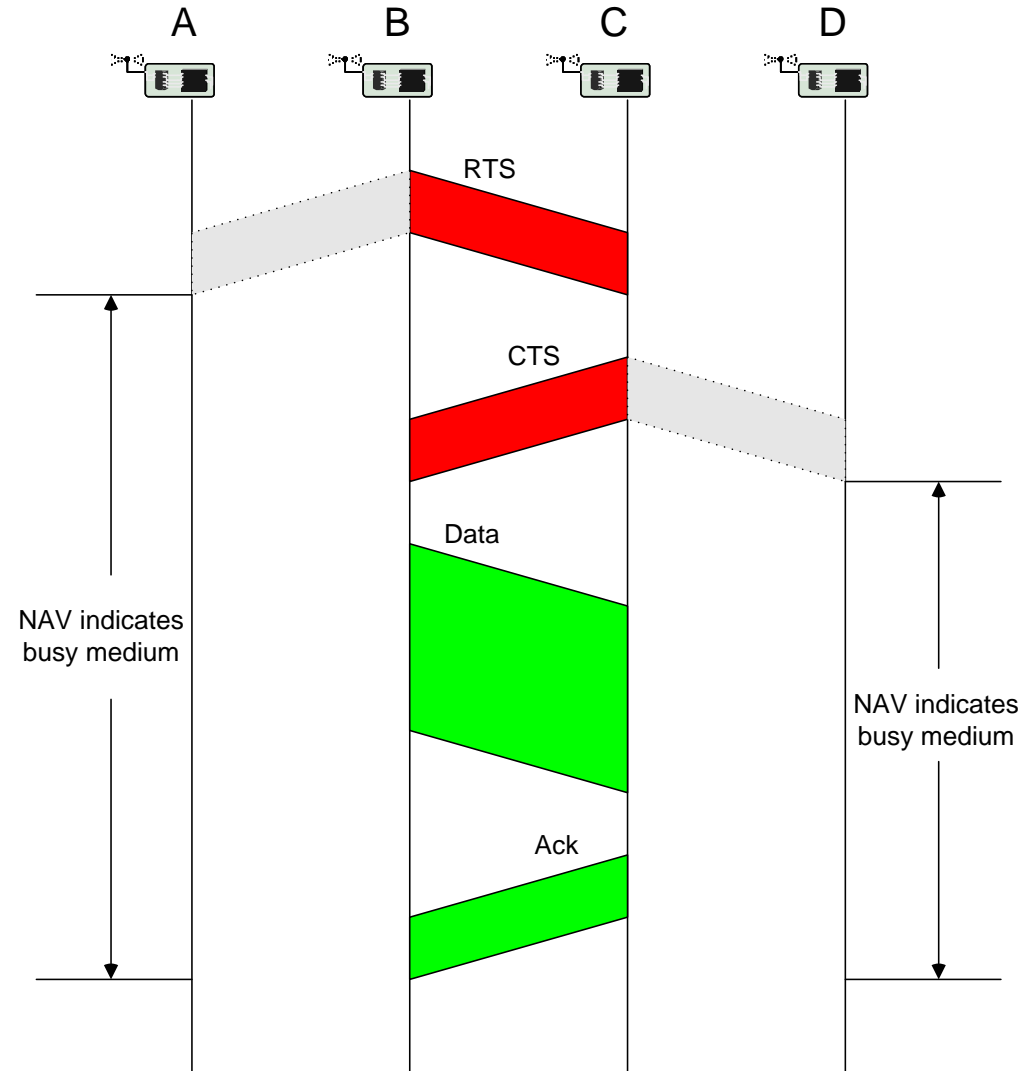
Terminal  
Oculta





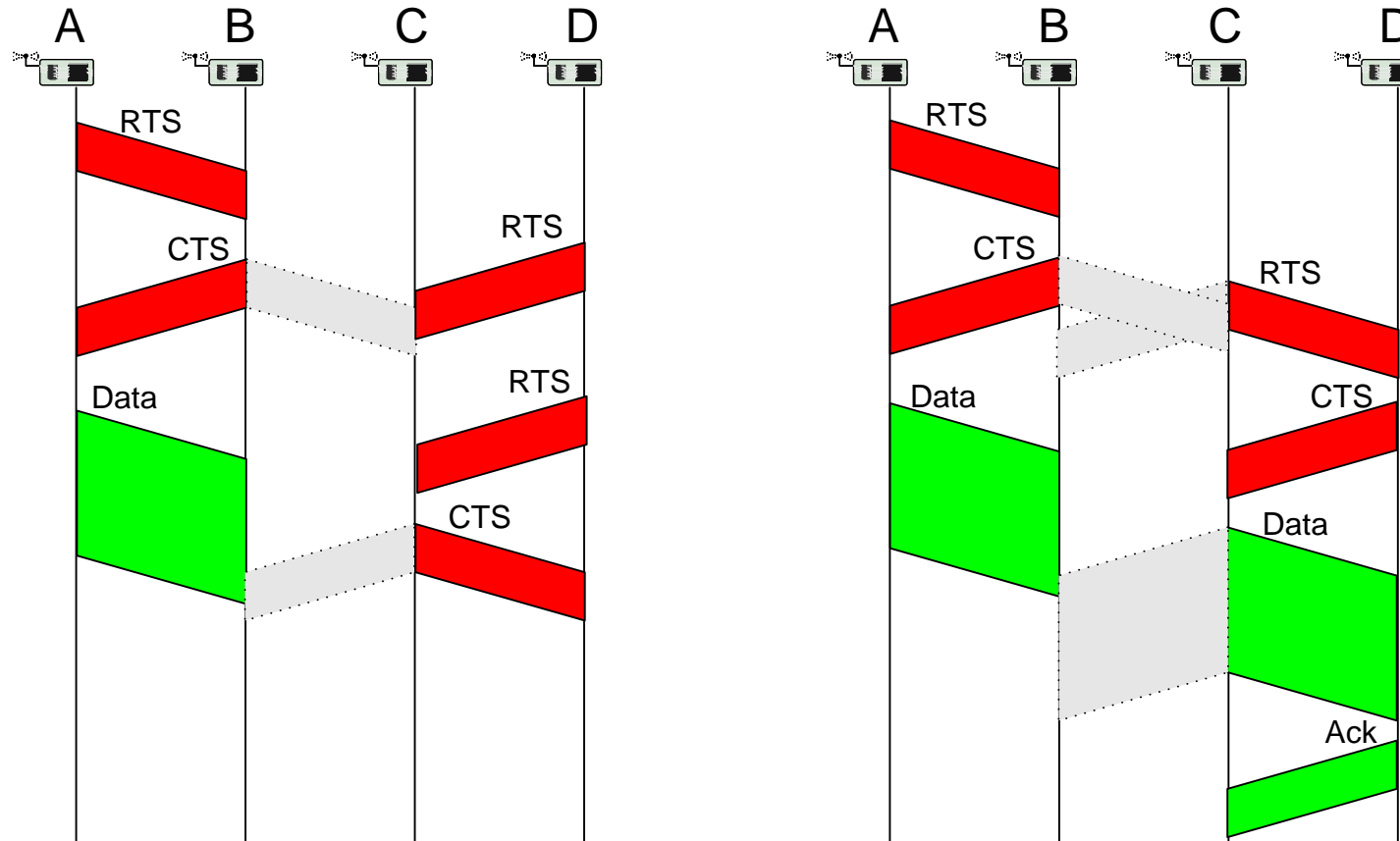
# Redes: Capa MAC

- RTS/CTS: MACA



# Redes: Capa MAC

- RTS/CTS: No resuelve totalmente la terminal expuesta/oculta

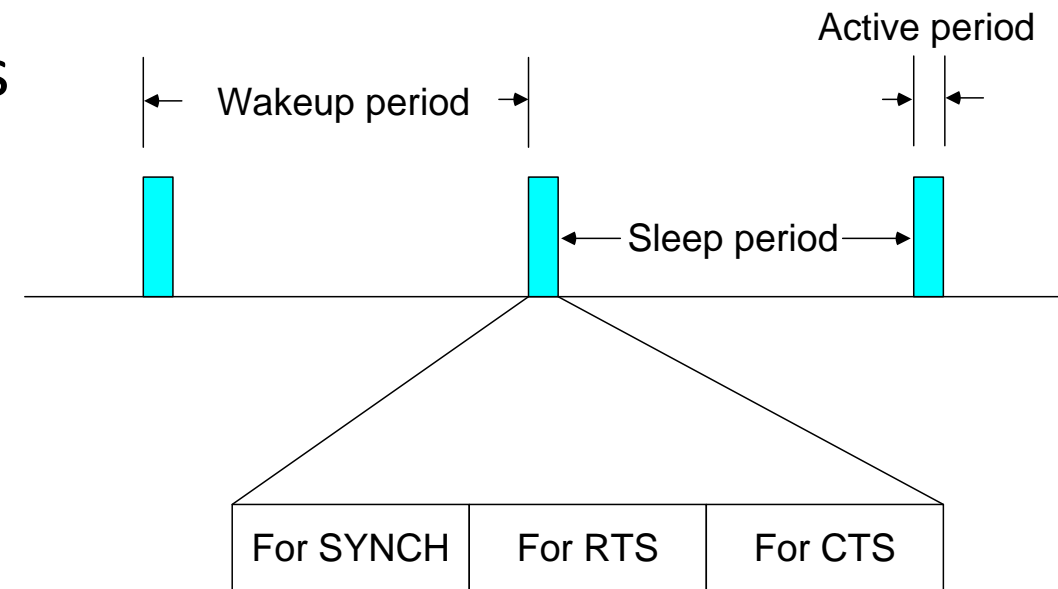


# Redes: Capa MAC

- Para solucionar el tiempo de Escucha en espera, se puede mandar en el beacon información (ej ATIM) sobre si hay paquetes pendientes
- Los nodos se duermen si no hay nada para ellos.
- Requiere infraestructura
- Para el RTS/CTS hay que mantenerse escuchando permanentemente

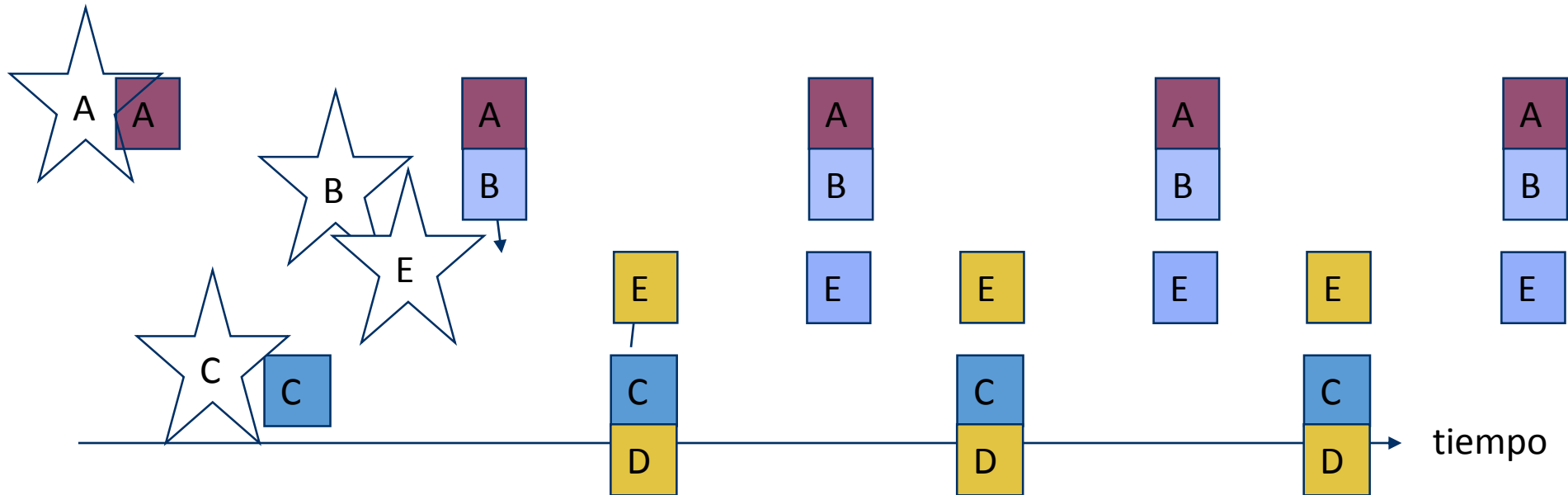
# Redes: Capa MAC

- S-MAC:
- Si la velocidad es baja, esperar a que otro transmita es mucho gasto.
- Idea: Apagarlos y encenderlos sólo en periodos precisos de manera simultánea.
- Todos deben intercambiar sus schedules
- Cuando despiertan, RTS/CTS
- Fases de SYNCH, RTS, CTS



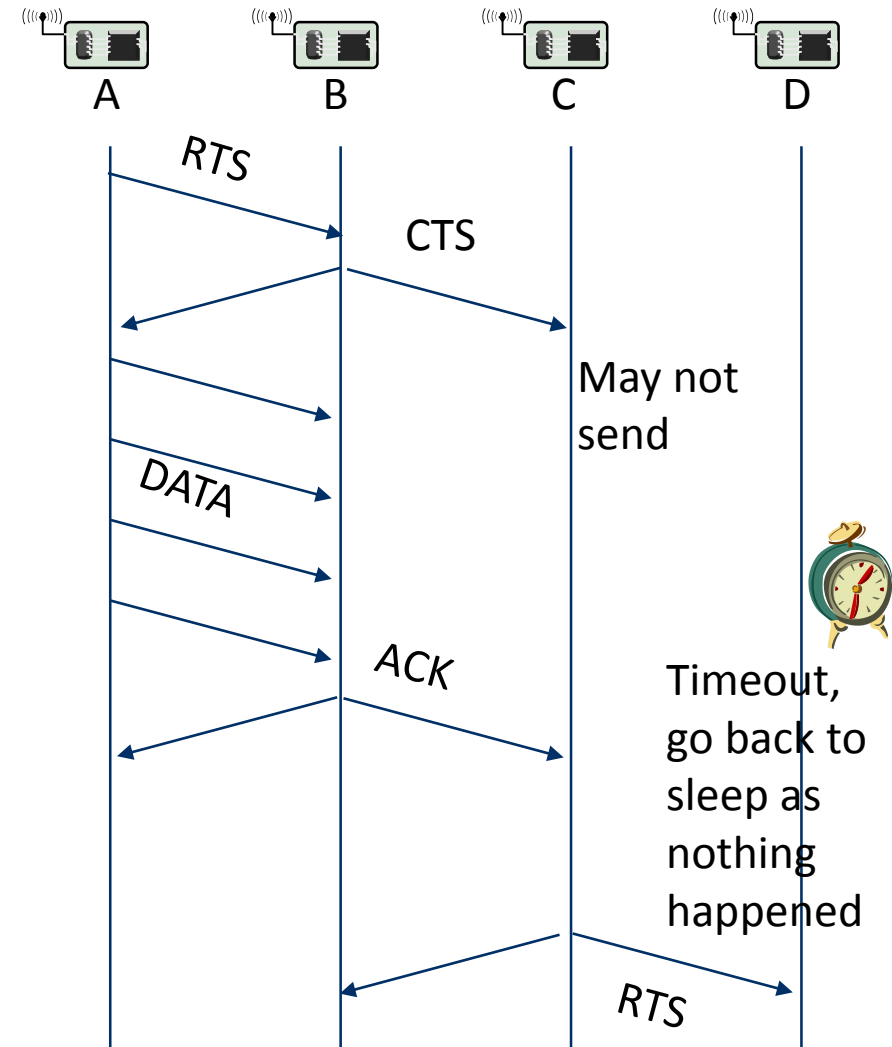
# Redes: Capa MAC

- S-MAC:
- Se pueden generar islas sincronizadas, cuando llegan nuevos nodos.



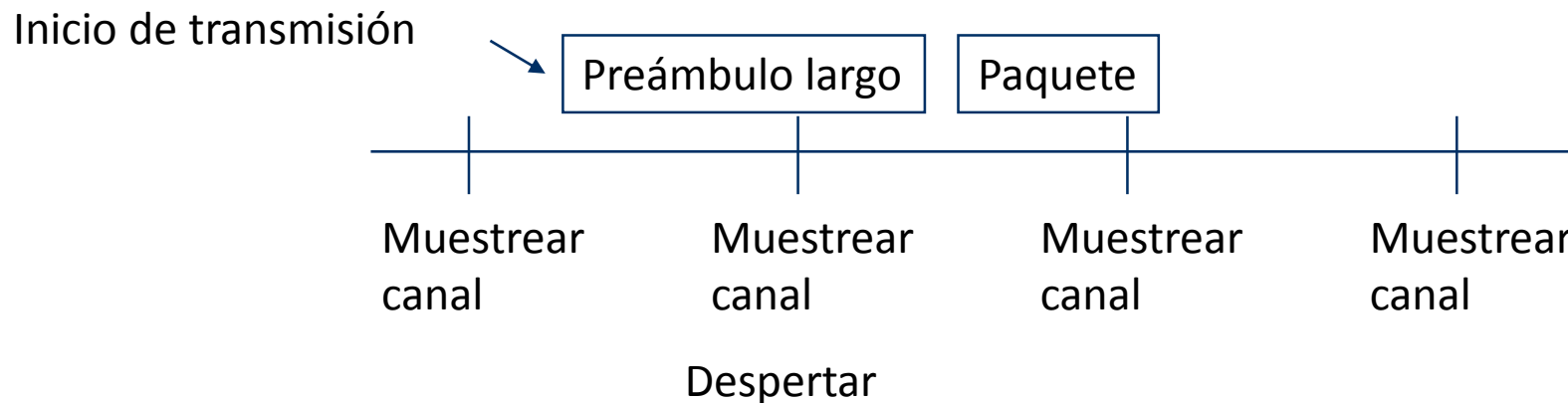
# Redes: Capa MAC

- T-MAC: parte del S-MAC
- Si nadie empieza a transmitir, dormirse rápidamente en lugar de esperar todo el periodo.



# Redes: Capa MAC

- Muestreo de preámbulo:
- Despertarse periódicamente para muestrear el preámbulo.
- Armar preámbulos suficientemente largos como para asegurar que son muestreados.
- Ejemplo WISEMAC



# Redes: Capa MAC

- B-MAC: Lo mejor de lo anterior:
- Adapta además el piso de ruido para detectar que está libre (Clear Channel Assessment)
- Las muestras son separadas exponencialmente
- Tomar al menos 5 muestras para asegurarse que está libre el canal
- Usar random backoff si está realmente ocupado.
- Poner ACK inmediato al recibir paquetes (opcional)



# Redes: Capa MAC

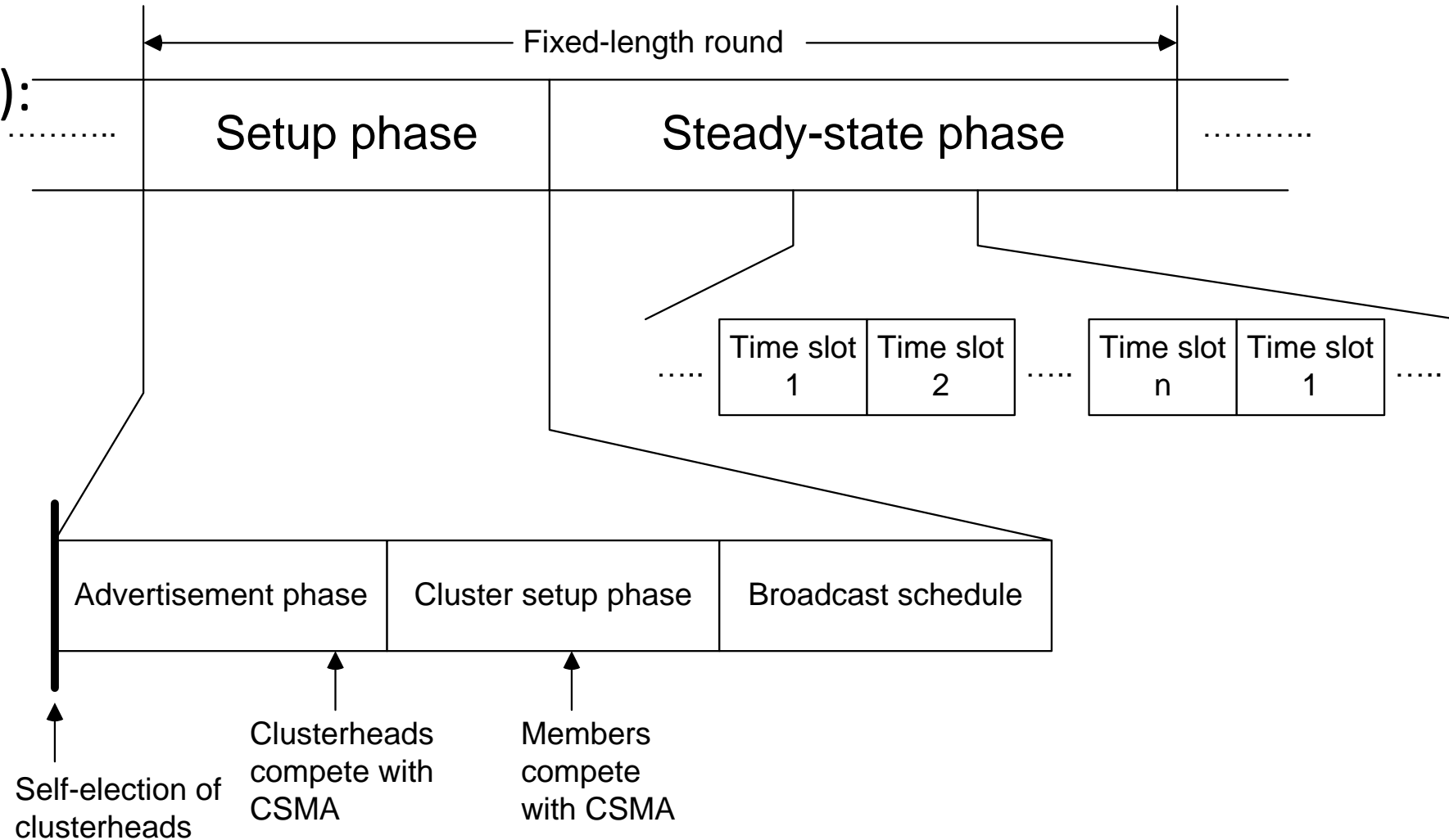
- B-MAC II:
- Escucha con bajo consumo (Preamble sampling)
- CCA, Timeout
- No usa sincronización, ni RTS/CTS, es simple.

# Redes: Capa MAC

- LEACH (Schedule):
- Si hay una red densa, con un Sink, cada nodo puede llegar al Sink directamente.
- Idea: Agrupar a los nodos en clusters, controlados por un líder del cluster.
- Tiene una etapa de Setup
- Un 5% de los nodos son líderes
- El rol de líder es rotado
- Los líderes se anuncian, los nodos eligen al líder con la señal más fuerte.

# Redes: Capa MAC

- LEACH (Schedule):

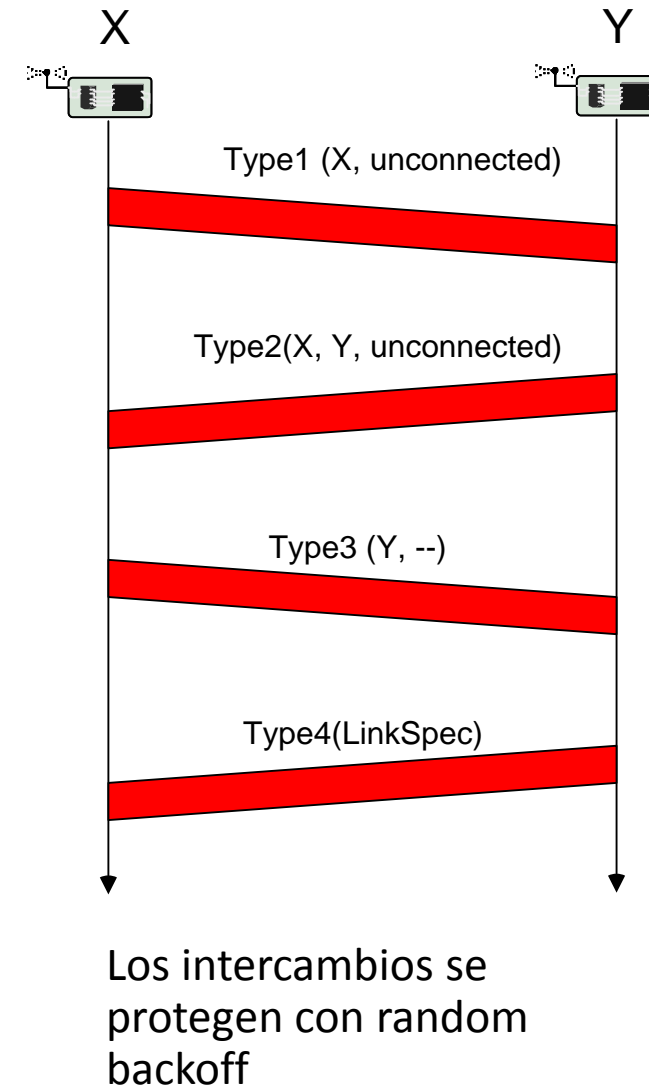


# Redes: Capa MAC

- SMACS
- Si existen múltiples canales, superframes de largo conocido (incluso sin coincidir temporalmente)
- La idea es definir enlaces direccionales entre nodos vecinos
- El enlace se define como el canal y el timeslot tanto en el tx como en el rx.
- El receptor no tiene colisiones
- El canal es elegido al azar, el slot es elegido de manera codiciosa (egoísta) hasta que encuentre un slot sin colisión
- Los receptores solo se despiertan cuando les corresponde
- Se construye un Schedule local.

# Redes: Capa MAC

- Setup de un enlace en SMACS, casos:
- 1) X invita, Y responde diciendo que no está conectado con nadie, X le pide que elija frecuencia y slot, Y informa su decisión
- 2) X tiene vecinos, Y no: X construye un Schedule y le dice a Y que lo use.
- 3) X no tiene vecinos, Y si: Y decide la especificación
- 4) Los dos tienen vecinos: Intercambian schedules, encuentran los libres.



# Redes: Capa MAC

- TRAMA:
- Los nodos están sincronizados
- El tiempo se divide en ciclos, con periodos de acceso aleatorio y acceso con Schedule.
- Los nodos intercambian listas de vecinos, para aprender quiénes están a la distancia de dos saltos.
- Se actualiza incrementalmente
- Los nodos intercambian sus schedules
- Usa un sistema de prioridades para decidir qué slot utilizar.

# Especificaciones

- 802.15.4
- Origen: Estandarización de WSN
- Contexto: Investigación -> Industria
- Organismo: IEEE802 Standards
- Disponibilidad: Gratuita (Publicación>6meses)
- Objetivo: MAC y PHY
- Última versión completa: 2011
- Revisiones 2012: e (tsch), f (RFID)  
g (Smart Meters)

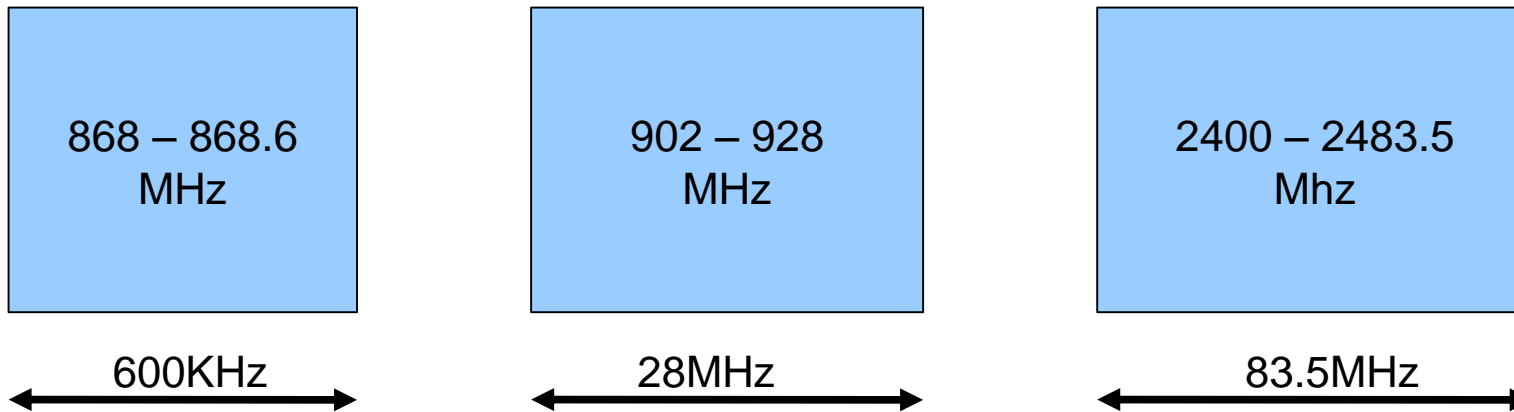
# Introducción

- 802.15: Wireless Personal Area Networks
- 802.15.4: Low Rate WPANs
- Equipos fijos / móviles
- Baja potencia de transmisión
- Bajo consumo – Gran autonomía
- Distancias cortas
- Poca o nula infraestructura (no Aps)



# Introducción

- ***Capa PHY: Bandas***



- + medición de distancias con 1m precisión
- Más bandas en China y Japón

# Introducción

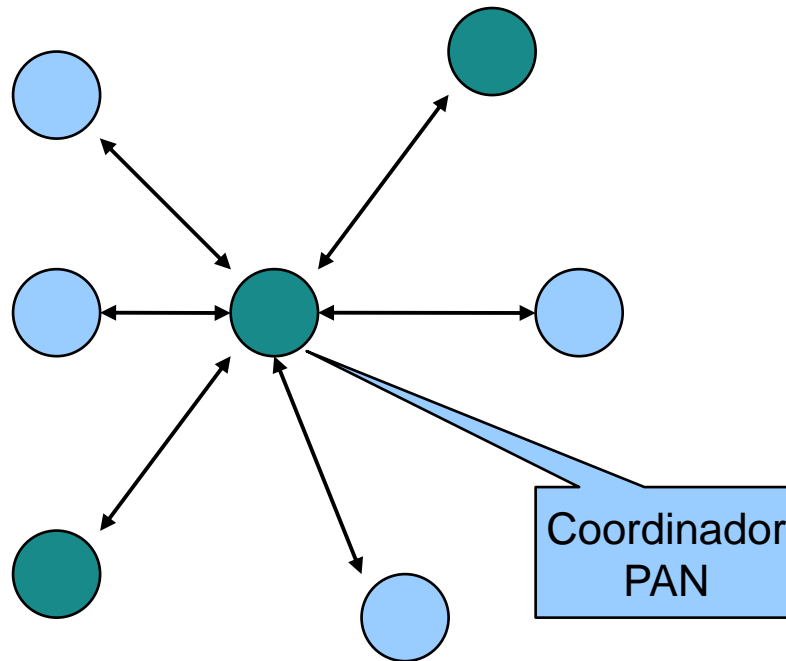
- ***MAC: Características Principales***
- Topología: Estrella / P2P
- Direccionamiento 64bits único / 16bits definido
- Time Slots garantizados (opcional)
- CSMA/CA o ALOHA
- ACK de paquetes
- Bajo consumo
- Detección de Energía remanente
- Indicador de calidad de enlace

# Introducción

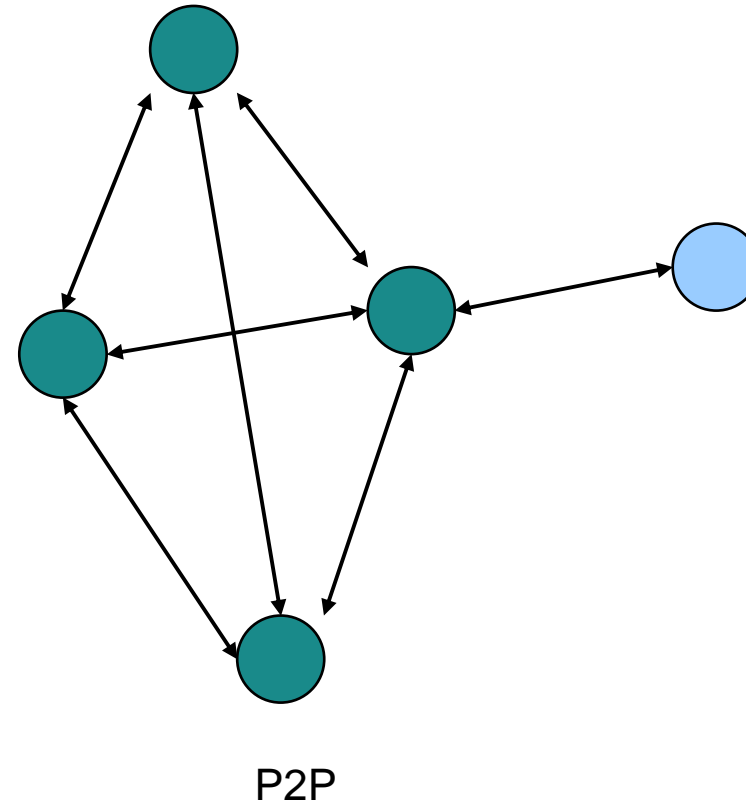
- ***Clasificación de dispositivos:***
- FFD: Full Function Device
  - Coordinador PAN
- RFD: Reduced Function Device
  - Elemento simple: sólo sensado / actuación
  - Se asocia a un solo FFD a la vez.
- Una WPAN: Al menos un FFD y  $n^*$ RFDs

# Introducción

## ■ *Topologías:*



Estrella



P2P

 Full Function Device

 Reduced Function Device

# Introducción

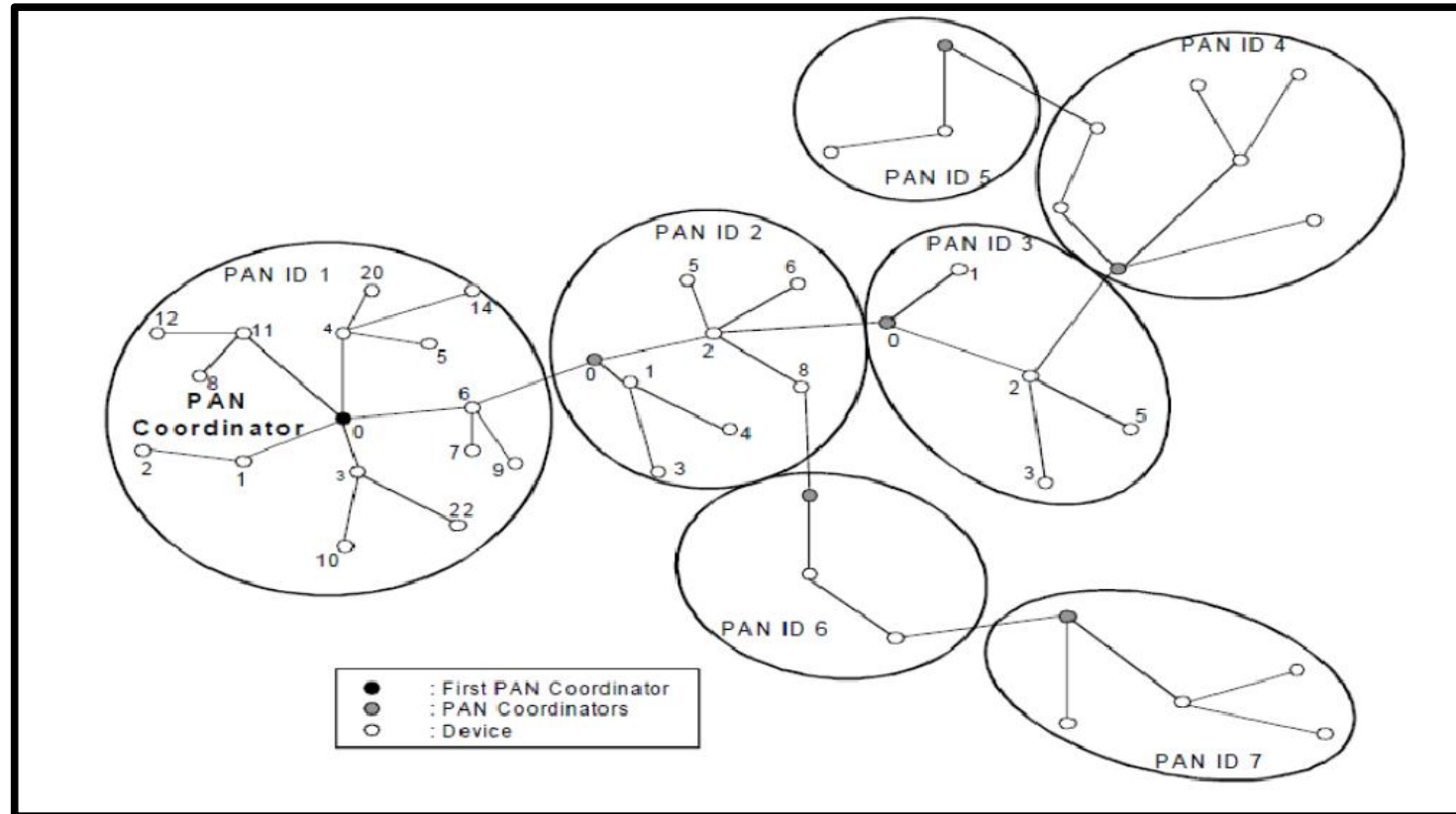
- ***Topología Estrella:***
- RFDs se comunican con FFD
- El FFD inicia o termina o enruta comunicaciones, el RFD no enruta.
- La red puede tener direccionamiento:
  - Absoluto
  - Corto, asignado por el Coordinador
- El coordinador elige el PAN ID de la red (escuchando a sus PAN vecinas)
- Las PANs son independientes entre sí

# Introducción

- ***Topología P2P:***
- Todos pueden comunicarse contra todos
- Uno se elige coordinador (ej. El primero)
- Ejemplo:
  - Cluster tree: la mayoría son FFDs
  - Los RFDs se conectan como leafs (hojas)
- El coordinador elige un PAN ID y envía beacons
- El coordinador recibe pedidos y asocia a los vecinos como child devices
- Childs generan beacons y puede asociar a otros

# Introducción

- **Multicluster:**
- Un coordinador le dice a un Child que sea coordinador del grupo vecino:



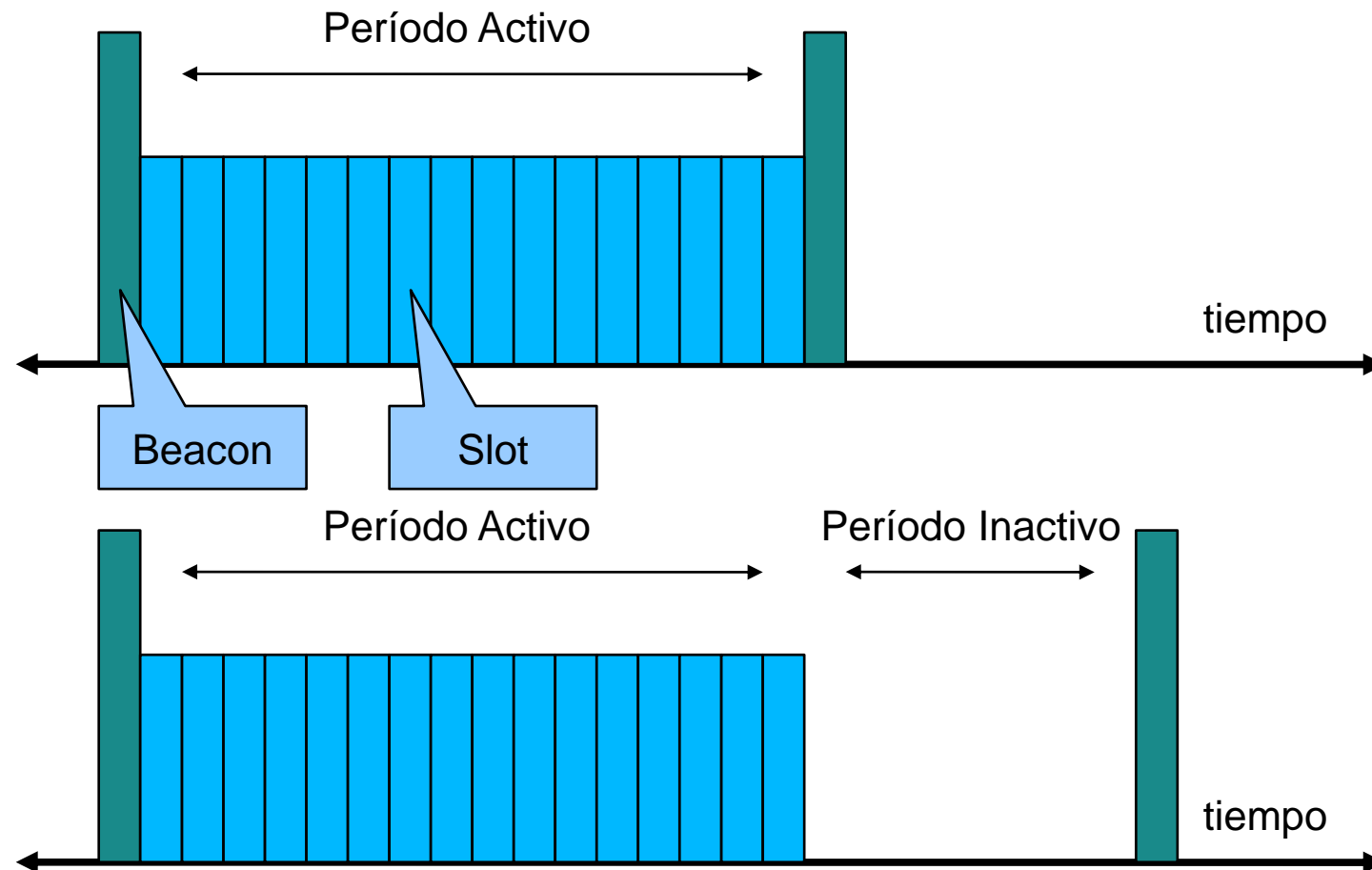
# La capa MAC

- ***Funciones:***
- Manejo de Beacons (balizas)
- Acceso al canal
- Administración de Time Slot garantizado
- Validación de frames
- ACKnowledges
- Asociación y Des-asociación
- Servicios para seguridad



# La capa MAC

- ***Estructura de SuperFrame (coordinador)***



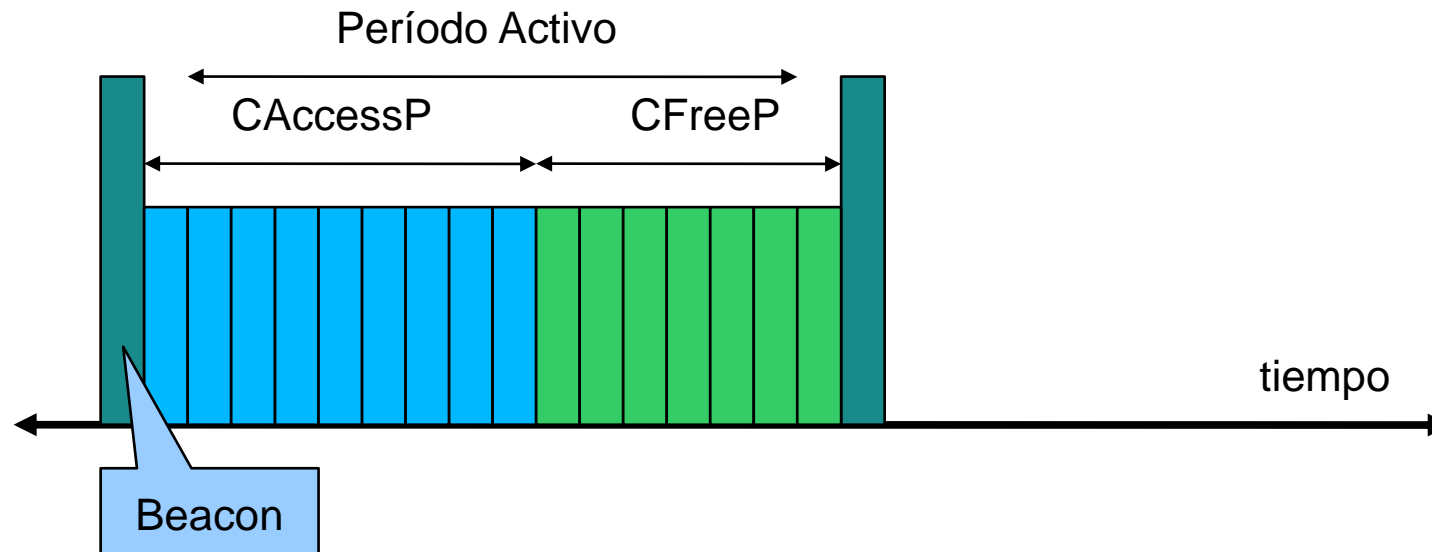
# La capa MAC

- ***Beacons (balizas):***
- Sincronización de dispositivos asociados
- Identificador de PAN
- Descripción de estructura de superframes

tiempo

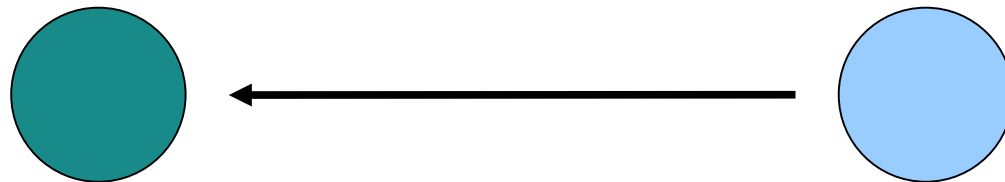
# La capa MAC

- **Contención:**
- Nodo compite con los demás usando Slotted-CSMA o ALOHA
- Coordinador puede asignar GTS a una aplicación sensible al retardo (máx 7)



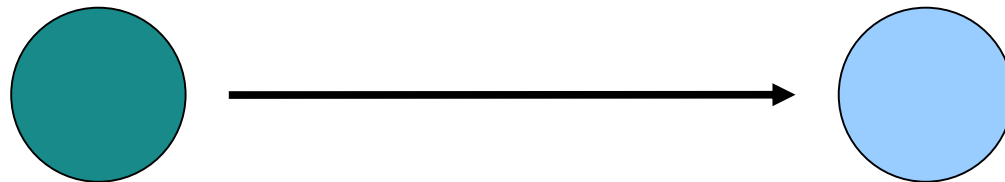
# La capa MAC

- ***Transmisión al coordinador:***
  - 1.El nodo espera a sincronizarse con el Beacon
  - 2.El nodo transmite en un período de contención
  - 3.El coordinador responde con ACK, si fue solicitado.
  - Si no hay Beacon, se transmite en cualquier momento.



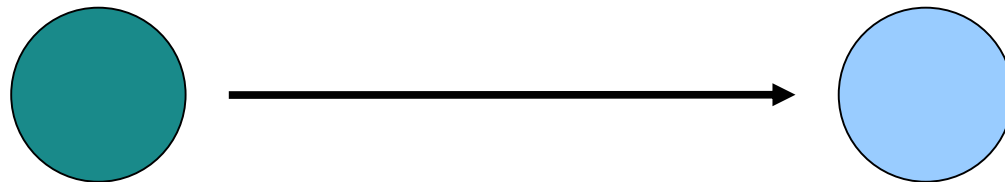
# La capa MAC

- ***Transmisión del coordinador:***
- 1.El coordinador avisa en el Beacon que hay un mensaje pendiente
- 2.El nodo solicita el mensaje al coordinador
- 3.El coordinador responde con ACK
- 4.El coordinador envía el dato al nodo.
- 5.El nodo manda ACK si es solicitado



# La capa MAC

- ***Transmisión del coordinador (sin Beacon):***
- 1.El nodo solicita al coordinador el mensaje
- 2.El coordinador envía ACK
- 3.El coordinador envía el dato si estaba pendiente.
- 4.Si no había dato pendiente, puede avisar en ACK o con el campo de datos vacío.
- 5.El nodo manda ACK si es solicitado

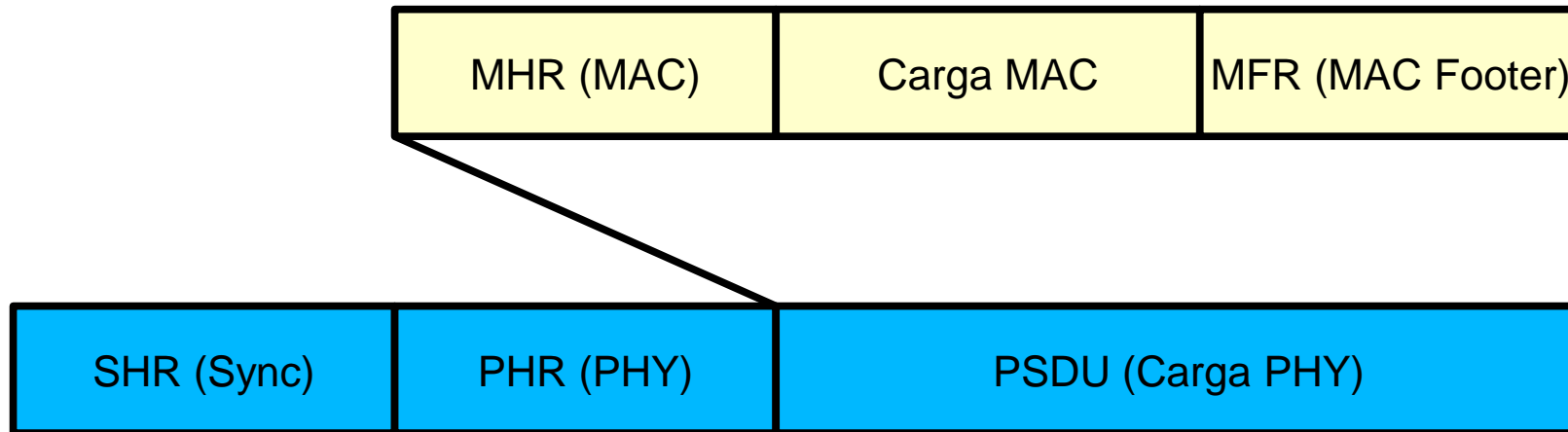


# La capa MAC

- ***Tipos de paquete***
- Beacon
- Data
- ACKnowledgement
- MAC command (control de transferencias entre pares)

# La capa MAC

- ***Estructura del paquete***



tiempo

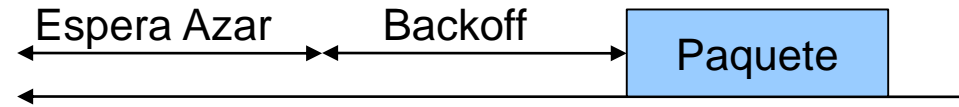


# La capa MAC

- **CSMA-CA**

- Sin Beacons:

- 1. Espera un tiempo al azar
- 2. Si el canal está desocupado, espera el *random backoff*
- 3. Si aún sigue desocupado transmite.
- 4. Si está ocupado, espera otro tiempo al azar y vuelve a empezar el ciclo.
- El ACK no usa CSMA-CA



# La capa MAC

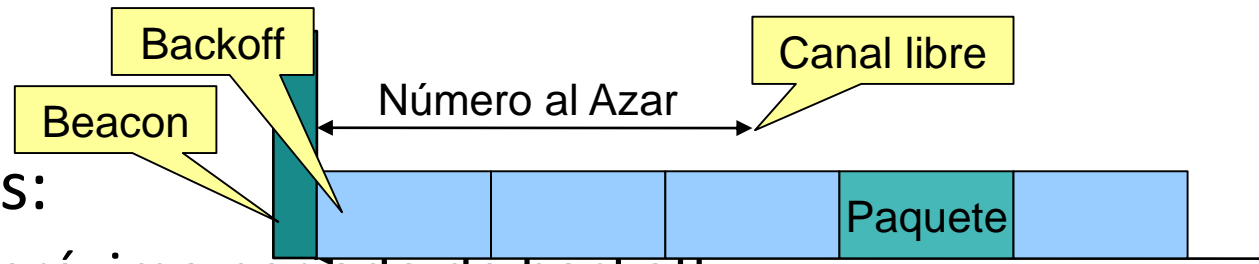
- **CSMA-CA**
- Con Beacons:
  - Usa slotted CSMA-CA
  - Los períodos de backoff → alineados con el inicio del Beacon
  - Todos los períodos de backoff están alineados entre los nodos de una PAN.

# La capa MAC

- **CSMA-CA**

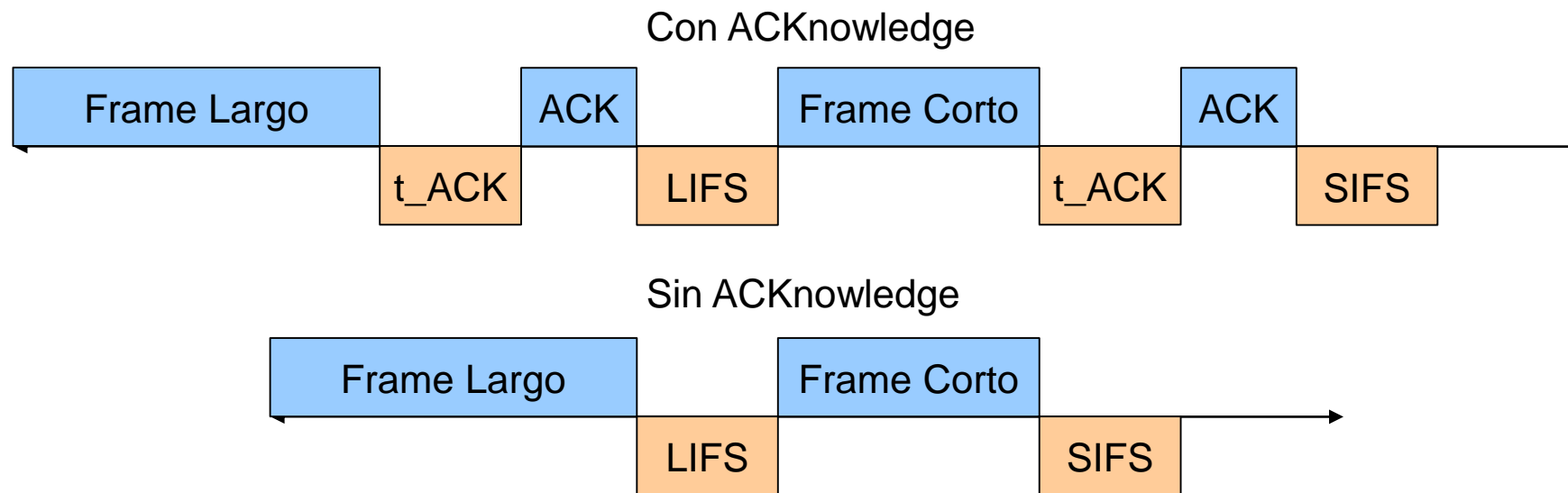
- Con Beacons:

- 1. Ubica el próximo período de backoff
- 2. Espera un número al azar de períodos de backoff
- 3. Si el canal está ocupado, espera otra vez un número al azar de períodos de backoff
- 4. Si el canal está libre, transmite al inicio del próximo período de backoff.
- Los ACK no usan CSMA-CA



# La capa MAC

- ***Tiempos:***
- Deben respetarse tiempos mínimos entre frames.



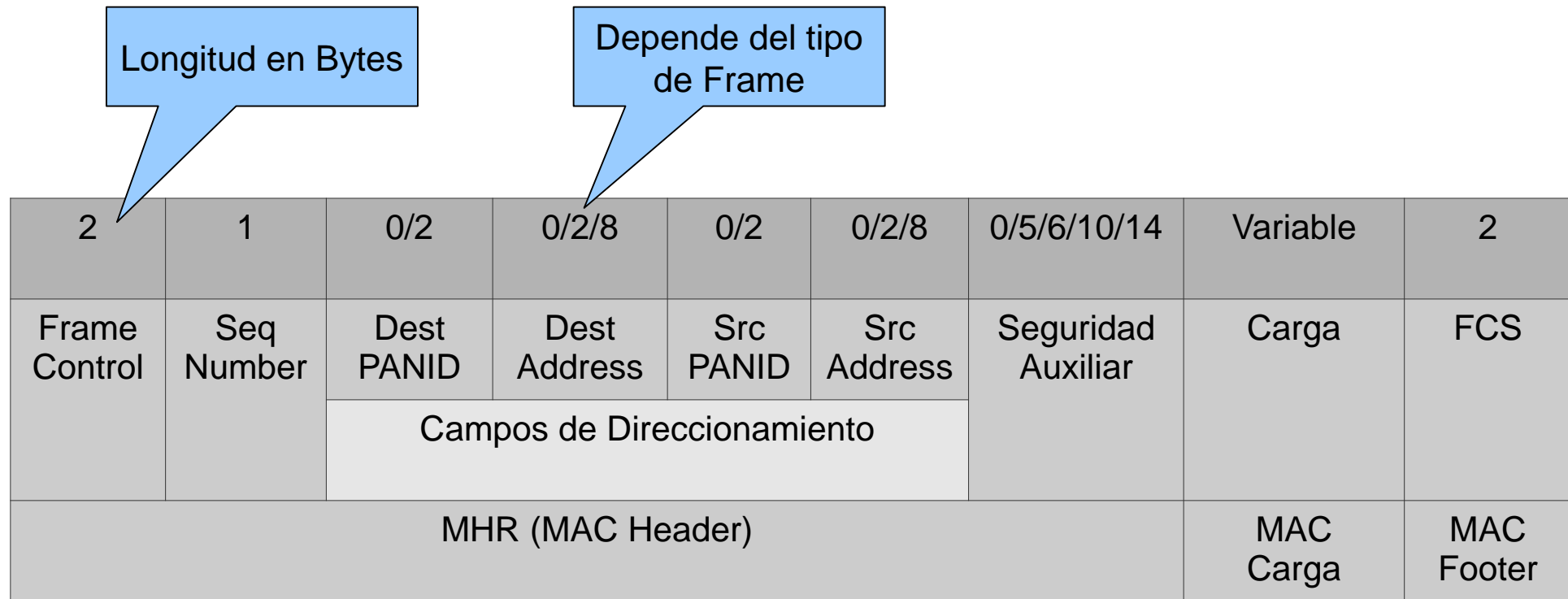
# La capa MAC

- ***Actividades***

- Descubrimiento: Channel Scan
- Selección de canal: ED (Energía en el canal)
- Scan Activo: Pide el Beacon al coordinador
- Scan Pasivo: Escucha Beacons
- Usa un PANID de 0xFFFF para escuchar a todos los Beacons de los vecinos
- Scan Huérfano: Cuando el nodo se desincroniza del coordinador
- Adquisición de Sincronismo: Beacon

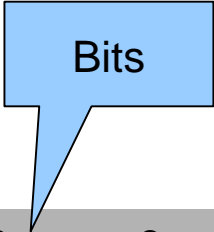
# La capa MAC

## ■ *Frame genérico*



# La capa MAC

- ***Campo Frame Control***



0-2	3	4	5	6	7-9	12-13	14-15
Tipo de Frame	Seguridad Habilitada	Frame Pendiente	ACK Requerido	Compresión de PANID	Reservado	Versión del Frame	Source Addressing Mode

# La capa MAC

- **Beacon**

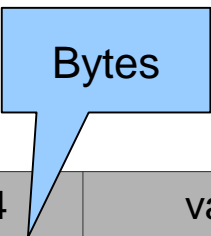
2	1	4/10	0/5/6/10/14	2	variable	variable	variable	2
Frame Control	Sequence Number	Addressing Fields	Aux Security	Superframe Spec	GTS	Pending Address	Carga	FCS
MHR (MAC Header)				Carga MAC				MFR (MAC Footer)



# La capa MAC

## ■ **Data**

2	1	variable	0/5/6/10/14	variable	2
Frame Control	Sequence Number	Adressing Fields	Aux Security	Carga	FCS
MHR (MAC Header)				Carga MAC	MFR (MAC Footer)



## ■ **ACK**

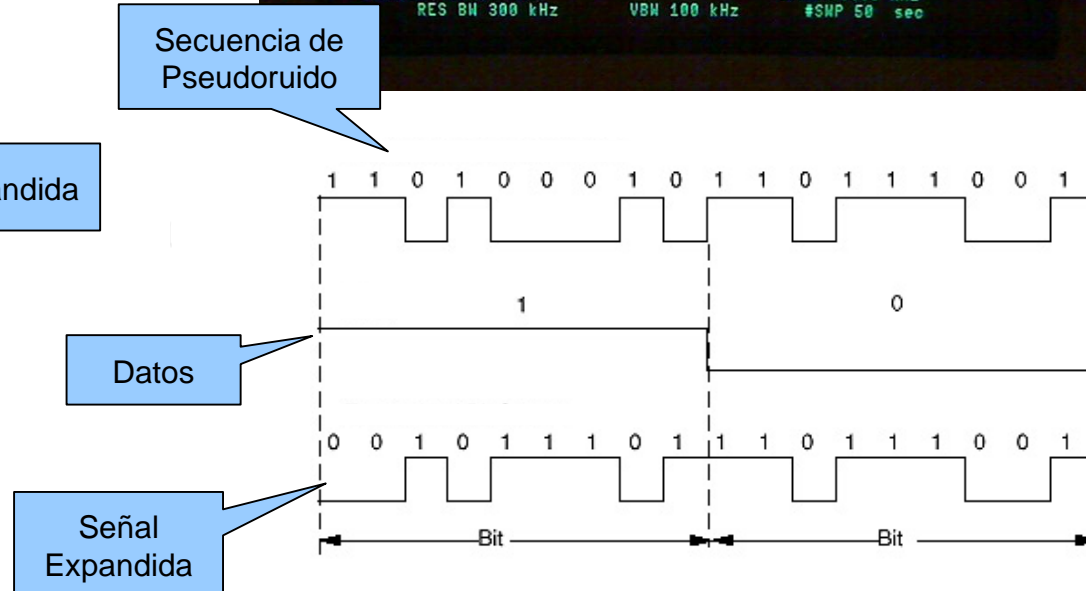
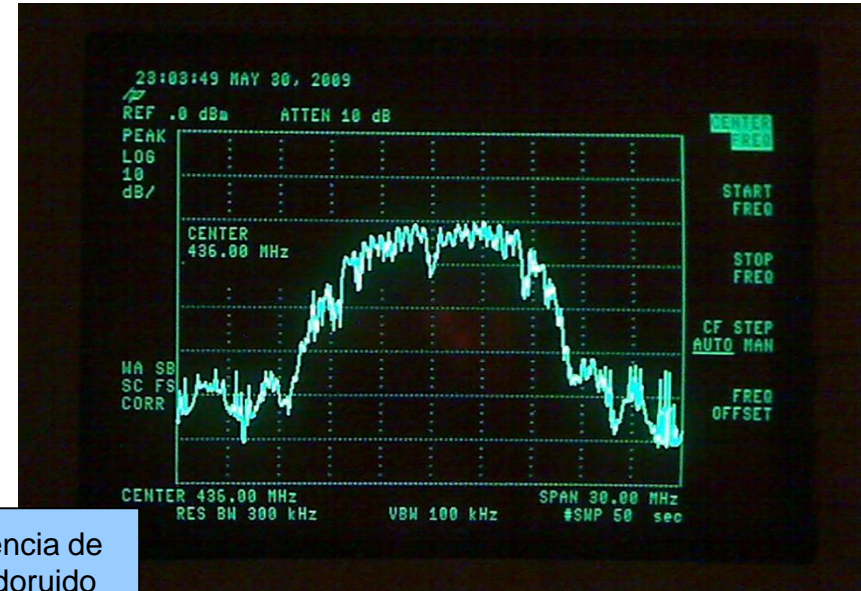
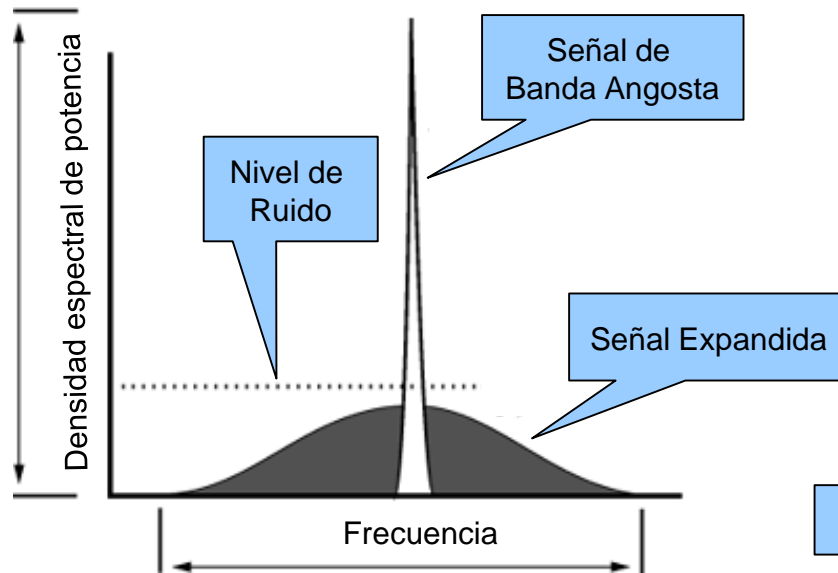
2	1	2
Frame Control	Sequence Number	FCS
MHR (MAC Header)		MFR (MAC Footer)

# La capa PHY

- ***Responsabilidades:***
- Activación / Desactivación del transceiver RF
- Detección de Energía en el canal (ED)
- Indicador de calidad de Enlace (LQI)
- Verificación de Canal Libre para CSMA-CA
- Selección de frecuencia de canal
- Transmisión y recepción de datos
- Medición de distancia con UWB

# La capa PHY

- **Modulaciones:**
- Con o sin Espectro Expandido



# La capa PHY

- **Modulaciones:**
- Con distintas bandas de frecuencias:
- 780MHz (779-787) 250Kbps
- 868MHz (868-868.6) [1ch]
  - 20Kbps / 100Kbps (O-QPSK) / 250Kbps (ASK)
- 915MHz (902-928) 40Kbps / 250Kbps (ASK) [10ch]
- 950MHz (950-956) 100Kbps / 20Kbps (DSSS)
- 2450MHz (2400-2483.5) 250Kbps [16ch]
- 3-10GHz (UWB)



Coincide con WiFi y Bluetooth

# La capa PHY

- ***Modulaciones:***
- O-QPSK: Offset Quadrature Phase Shift Keying con DSSS
- BPSK: Binary Phase Shift Keying con DSSS
- ASK: Amplitude Shift Keying con PSSS (Parallel Sequence Spread Spectrum)

# La capa PHY

- ***Modulaciones:***
- CSS: DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying) con Chirp Spread Spectrum
- UWB: Ultrabanda Ancha, BPSK con Burst Position Modulation
- M-PSK: M-ary Phase Shift Keying
- GFSK: Gaussian Frequency Shift Keying

# La capa PHY

- ***Modulaciones:***
- CSS: DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying) con Chirp Spread Spectrum
- UWB: Ultrabanda Ancha, BPSK con Burst Position Modulation
- M-PSK: M-ary Phase Shift Keying
- GFSK: Gaussian Frequency Shift Keying

# La capa PHY

- ***Funciones:***

- Medición de ED: Energía estimada dentro del ancho de banda del canal.
  - Se mide durante 8 tiempos de símbolo
- Cálculo de LQI: Caracterización de la potencia de recepción / calidad de un paquete.
  - Escala de 0x00 a 0xFF, con al menos 8 niveles



# La capa PHY

- ***Funciones:***
- Clear Channel Assessment:
  - Modo 1: Energía por encima de un umbral
  - Modo 2: Sólo detección de portadora
  - Modo 3: Energía por encima de un umbral y detección de portadora

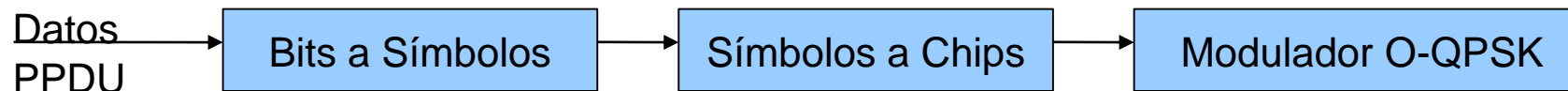
# La capa PHY

- **Modulación – ejemplo: O-QPSK**
- Paquete:

		Bytes		
		1		variable
Preámbulo	Delimitador Inicio de Frame (SFD)	Longitud de Frame (7 bits)	Reservado (1 bit)	PSDU (Carga)
SHR		PHR		CargaPHY

# La capa PHY

- **Modulación – ejemplo: O-QPSK**
- Preámbulo: 8 símbolos (4 bytes) en cero.
- Start of Frame Delimiter: 1110 0101
- Expansión y Modulación:
  - 1.4 bits seleccionan una secuencia de pseudoruido
  - 2.Se concatenan las secuencias
  - 3.Se modula con O-QPSK
- Velocidad de bit: 250Kbps



# La capa PHY

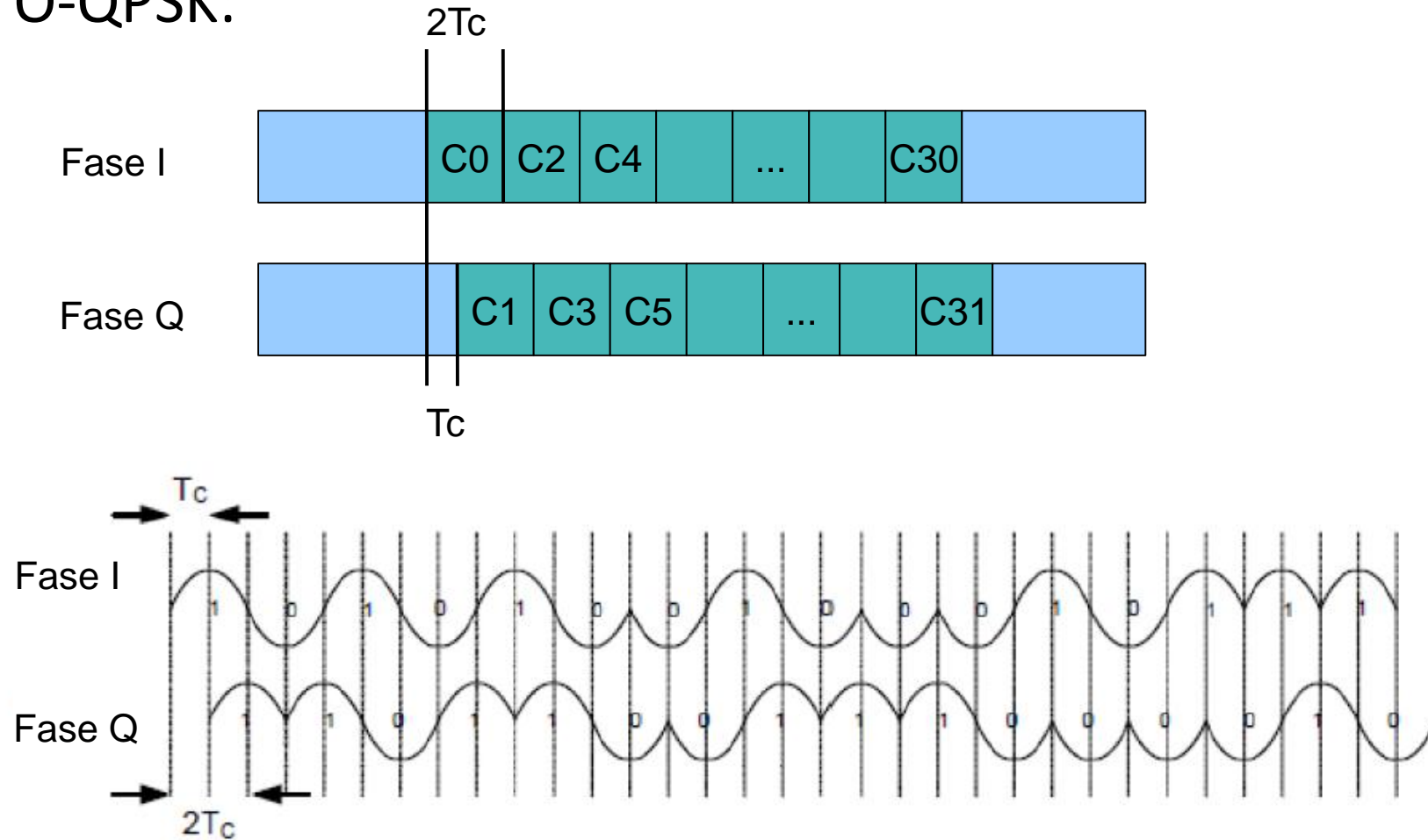
- **Modulación – ejemplo: O-QPSK**
- Símbolos a Chips:

Data symbol	Chip values (c <sub>0</sub> c <sub>1</sub> ... c <sub>30</sub> c <sub>31</sub> )
0	1 1 0 1 1 0 0 1 1 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0
1	1 1 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1 1 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0
2	0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1 1 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1 0
3	0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1 1 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1
4	0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1 1 1 0 0 0 0 1 1
5	0 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1 1 1 0 0
6	1 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1
7	1 0 0 1 1 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1
8	1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1
9	1 0 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1
10	0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1 0 0 0 0 0 0 1 1 1
11	0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1 0 0 0 0 0
12	0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1 0
13	0 1 1 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1
14	1 0 0 1 0 1 1 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0
15	1 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0 0

# La capa PHY

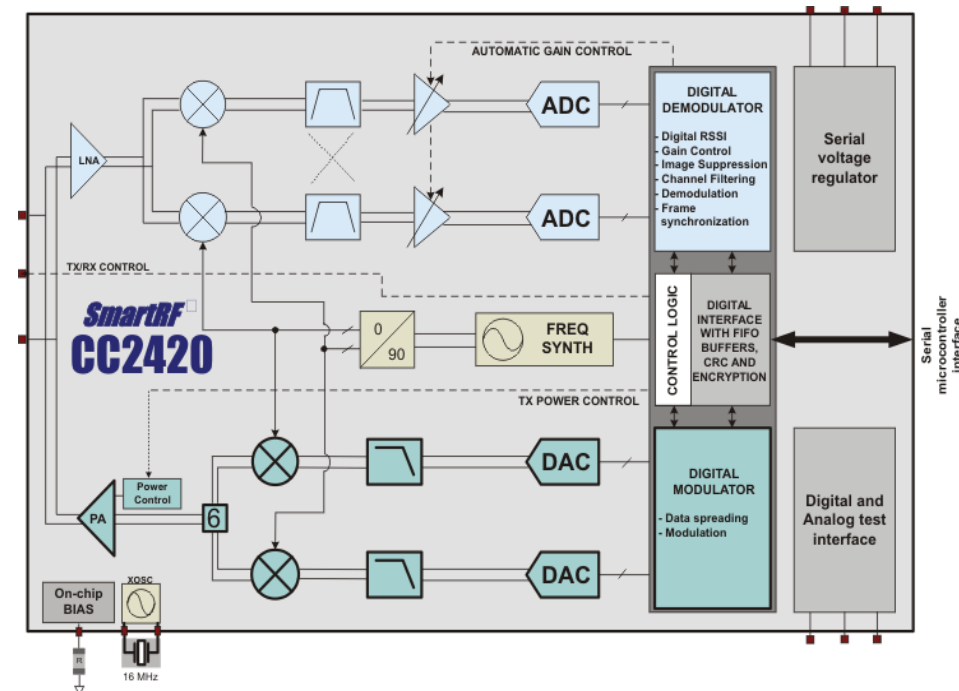
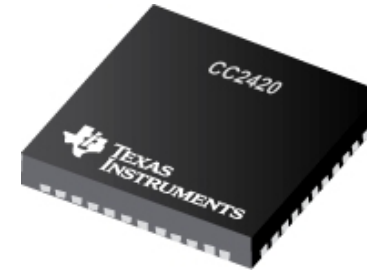
- **Modulación – ejemplo: O-QPSK**

- O-QPSK:



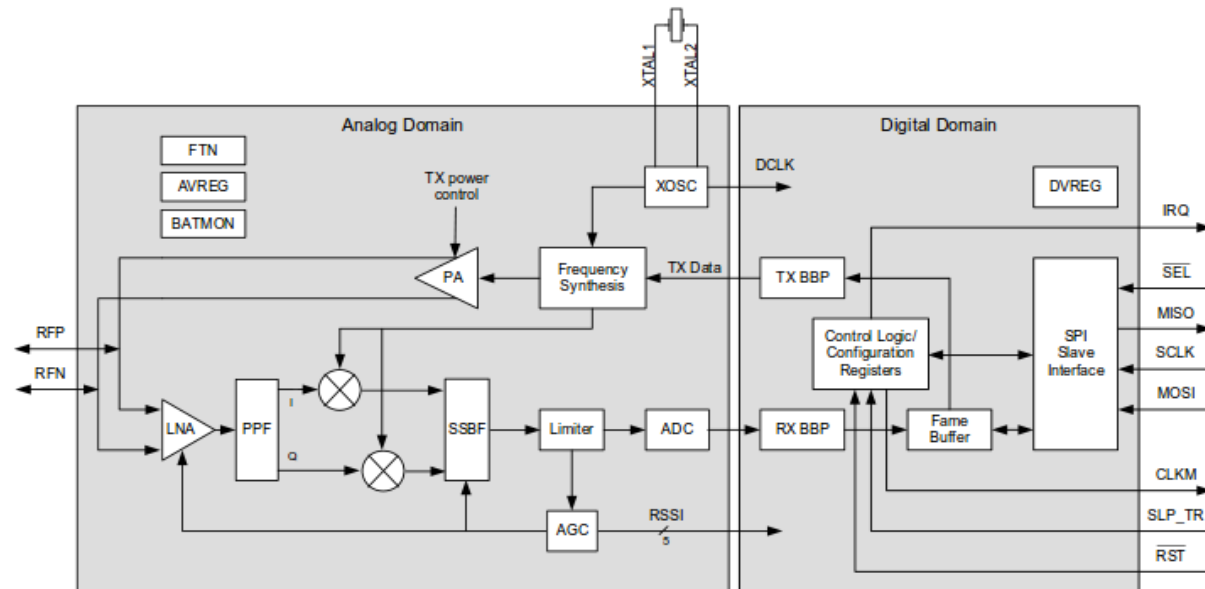
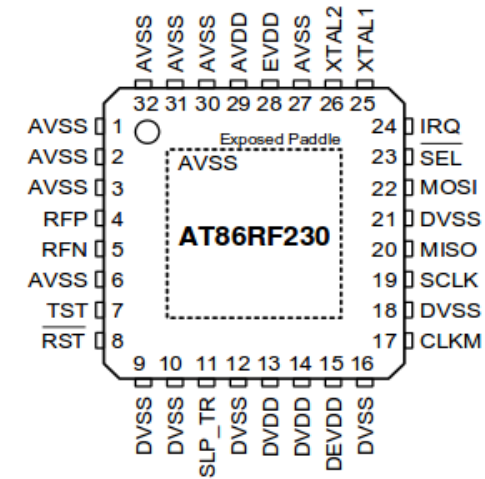
# Dispositivos

- ***Dispositivos Compatibles***
- TI – CHIPCON CC2420
  - Ganancia: 9dB, 250Kbps, SPI
  - RSSI / LQI Digital
  - 17 mA consumo promedio TX/RX



# Dispositivos

- ***Dispositivos Compatibles***
- **ATMEL AT86RF230**
  - 16 mA consumo promedio TX/RX
  - 250Kbps, SPI
  - 20nA SLEEP



# Stacks Industrial IOT

- 802.15.4e / WirelessHART / ISA100.11a

	WirelessHART	ISA100.11a	IEEE/IETF
Application	Comando y respuesta	Objetos y métodos	CoAP
Transport	Servicio sin conexión	UDP	TCP / UDP
Network	Routing	IPv6	RPL IPv6 6tisch
MAC	TSCH	TSCH / Mesh Under routing	IEEE 802.15.4e
PHY	TSCH	TSCH	IEEE 802.15.4e



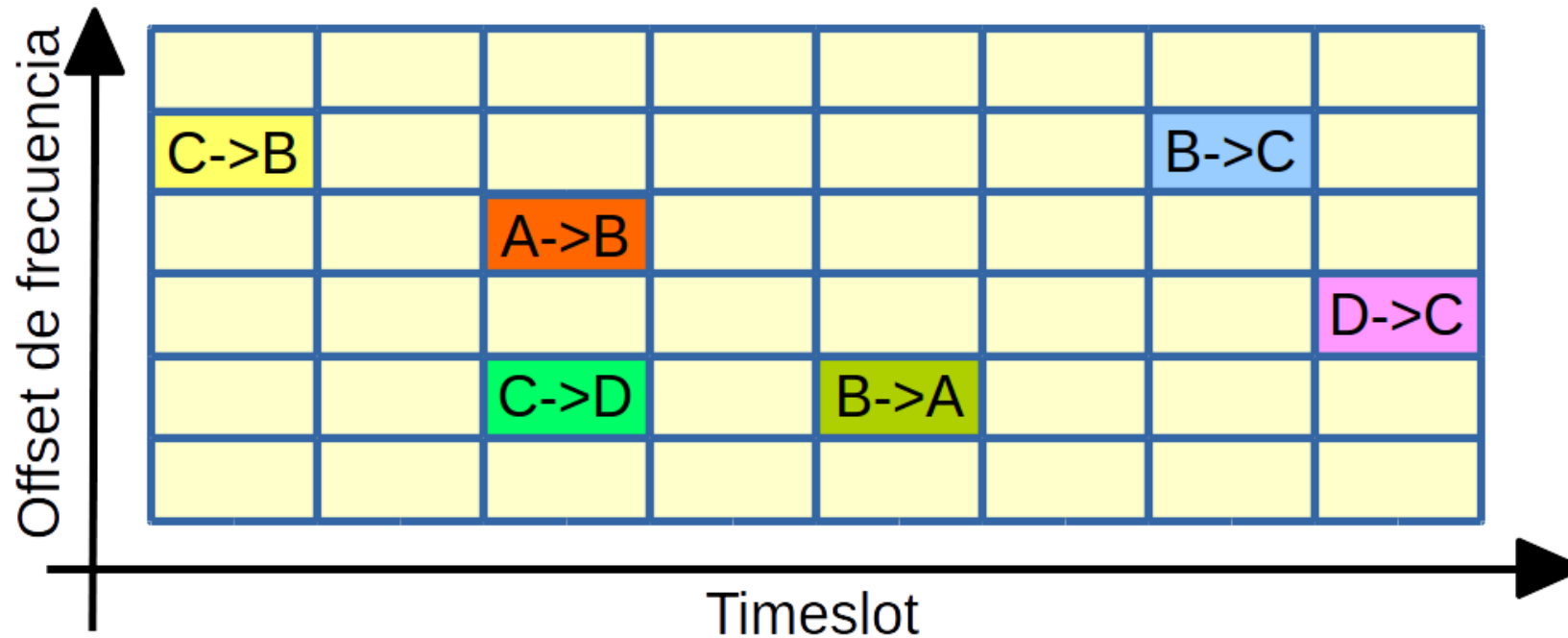
# Stacks Industrial IOT

- Protocolo por capas IETF

PCEP PCC	CoAP DTLS	PANA	6LoWPAN ND	RPL	
TCP	UDP		ICMP		RSVP
IPv6					
6LoWPAN Header Compression					OTF
6top					
IEEE802.15.4e					
IEEE802.15.4 PHY					

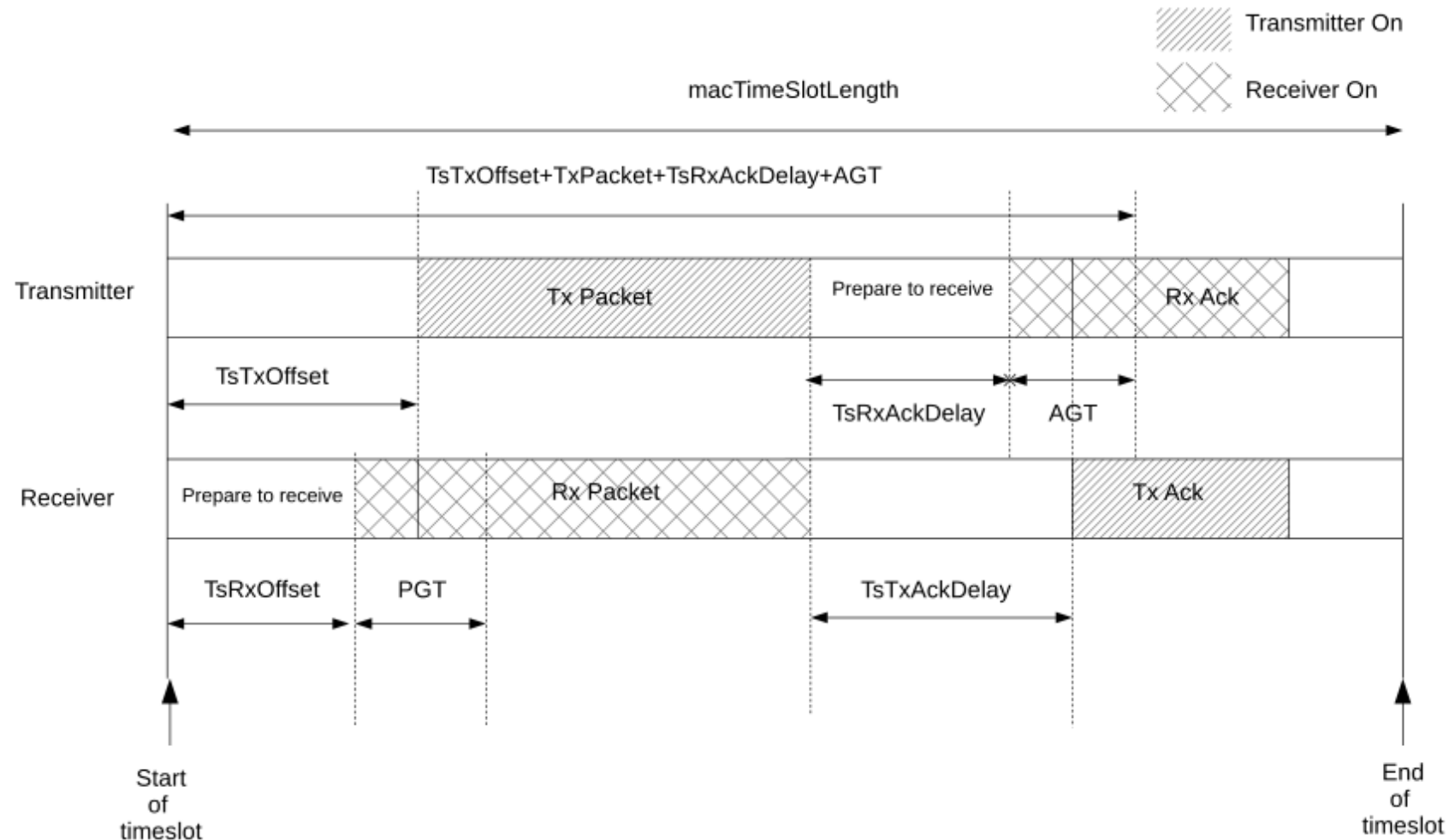
# Stacks Industrial IOT

- TSCH: Time-Slotted Channel Hopping
- Sincronización



# Stacks Industrial IOT

- Qué pasa durante una celda?



# Stacks Industrial IOT

- Consumo TX/RX

Vendor	Product	Sensitivity [dBm]	Transmit current [mA] @ 0 dBm	Receive current [mA]
Atmel	AT86RF231 <sup>a</sup>	-101	14.0	12.3
Dust Networks/ Linear Tech.	LTC5800 <sup>b</sup>	-91	5.4	4.5
Ember	EM357 <sup>b</sup>	-100	27.5	25.0
Freescale	MC13233 <sup>b</sup>	-94	26.6	34.2
Microchip	MRF24J40 <sup>a</sup>	-95	23.0	19.0
NXP/Jennic	JN5148 <sup>b</sup>	-95	15.0 (1.8 dBm)	17.5
Texas Instr.	CC2520 <sup>a</sup>	-98	25.8	18.8

- 2xAA, 3000mAh.
- Con el AT86RF231:
  - 100% Duty cycle, 230 horas.
  - 1% Duty cycle, 32 meses.
- Con el LTC5800, 7 años.

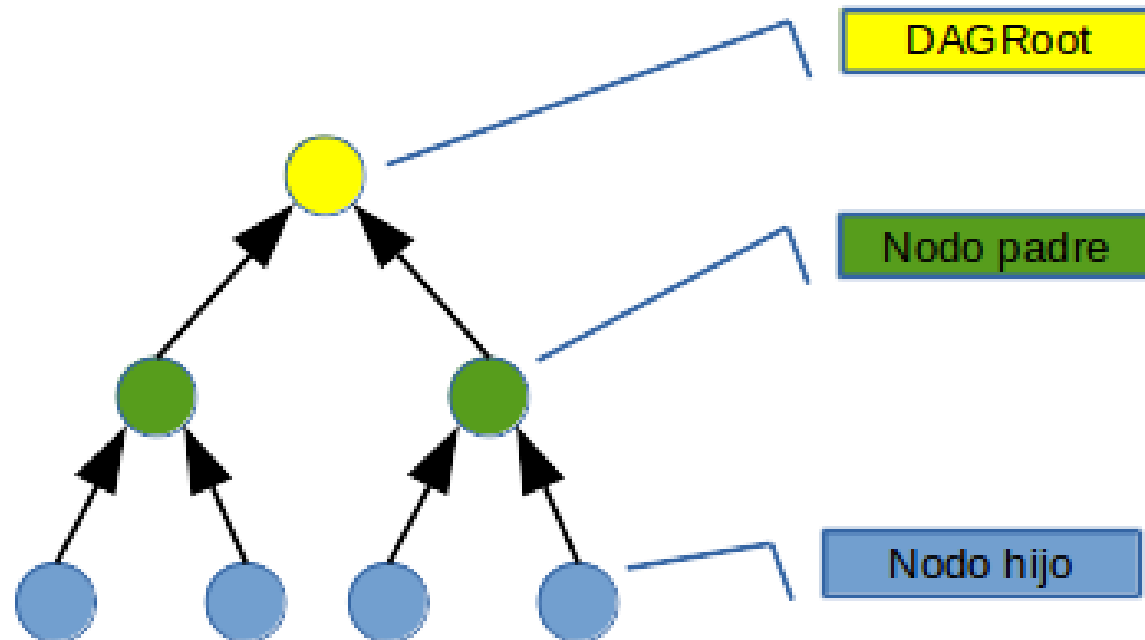
*Palattella, Maria Rita, et al.*

***"Standardized protocol stack for the internet of (important) things."***

*Communications Surveys & Tutorials, IEEE 15.3 (2013): 1389-1406.*

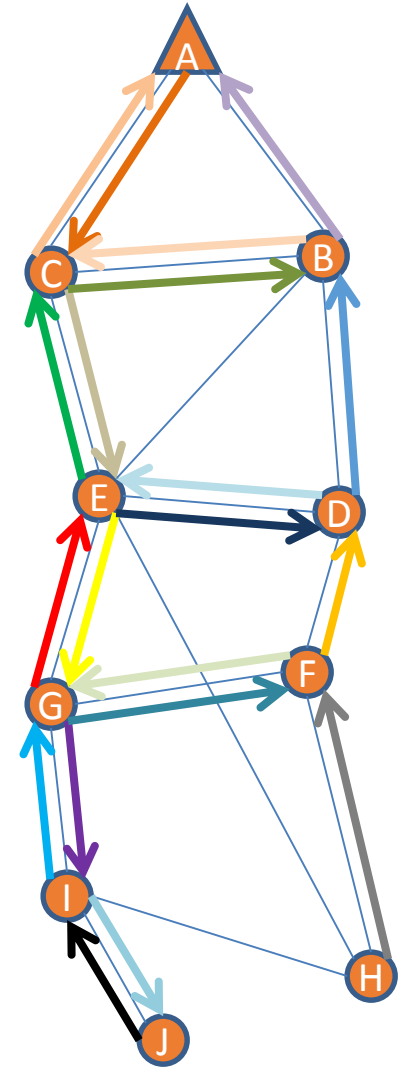
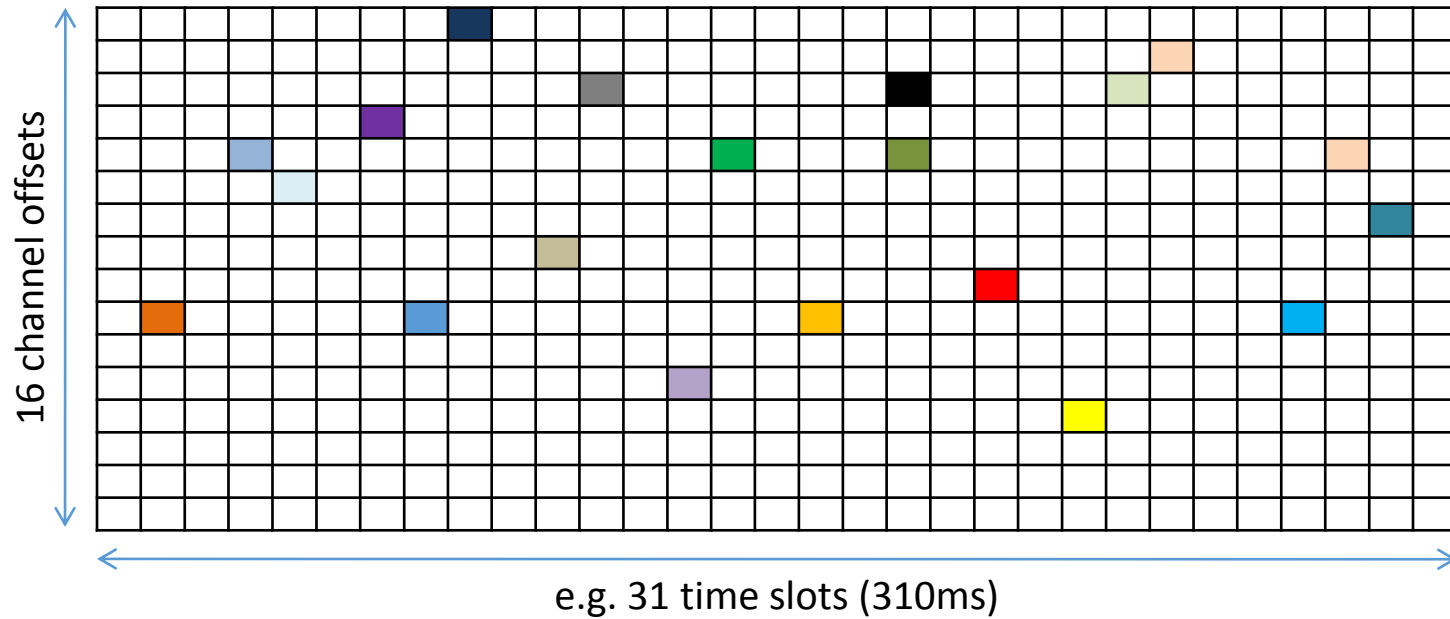
# Estrategias: Industrial IOT

- Enrutamiento: Routing for Low-Power and Lossy Networks (RFC6550)

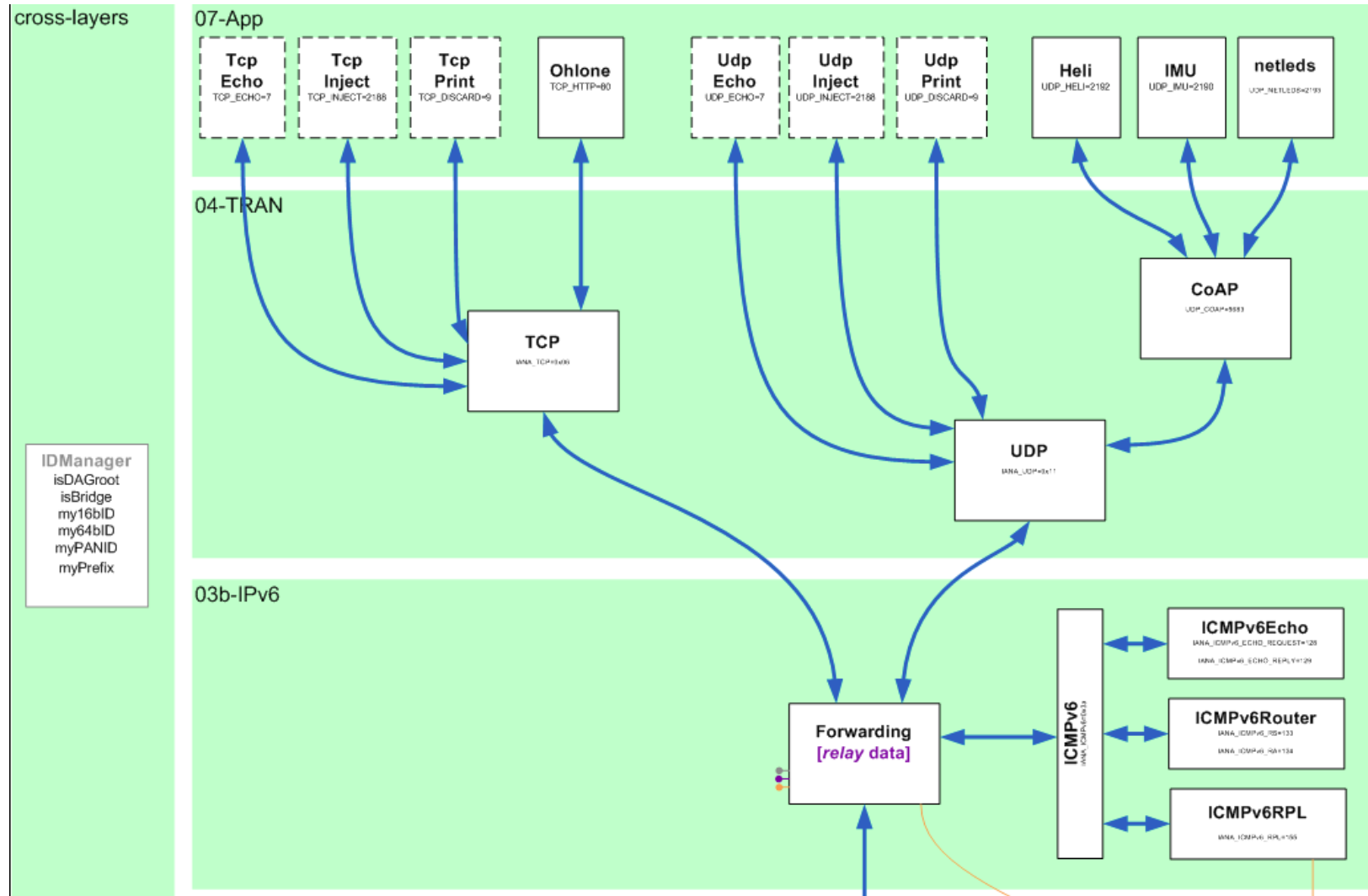


# Estrategias: Industrial IOT

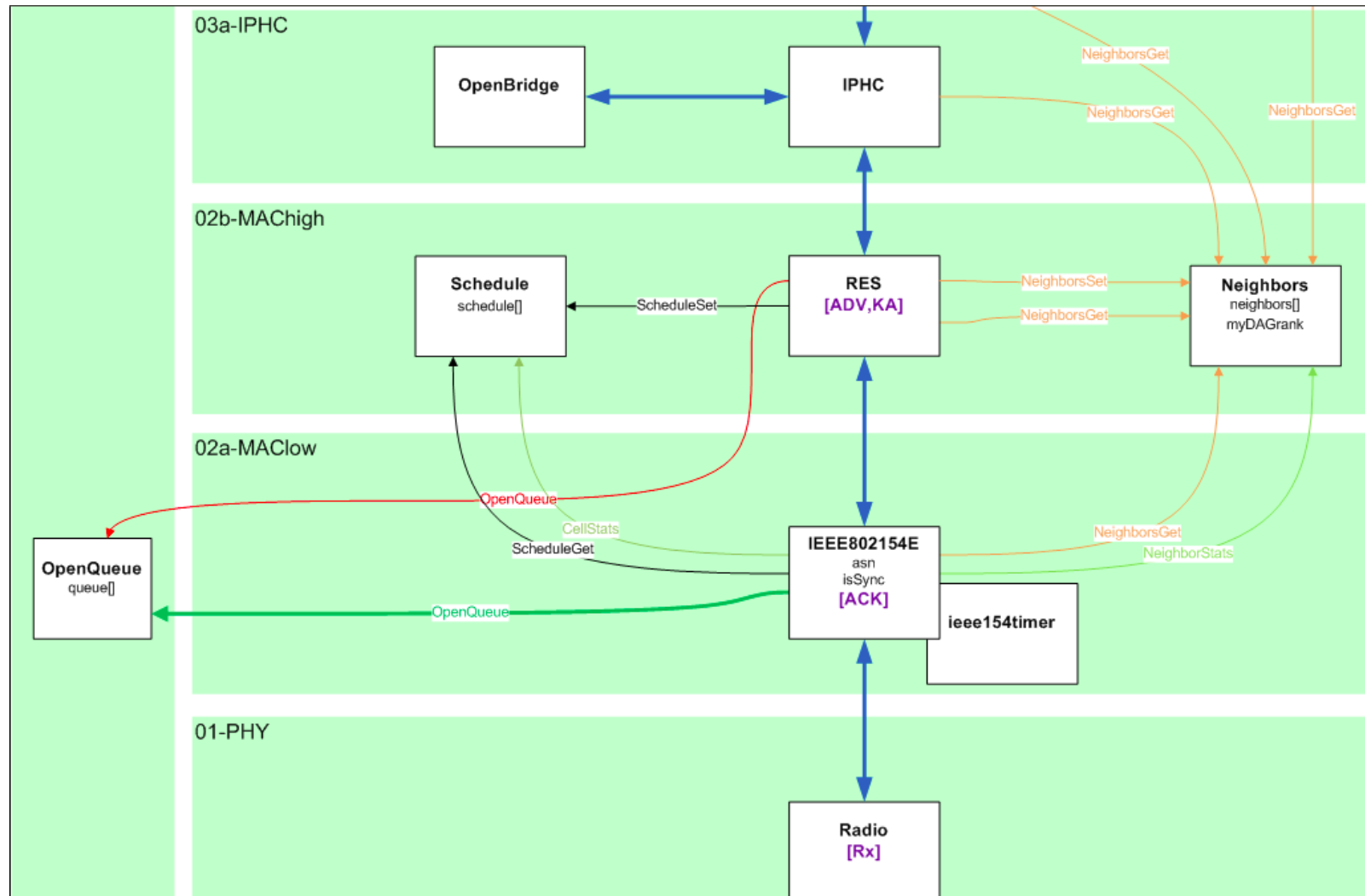
- Estructura TSCH -> Robustez frente a interferencia / bajo consumo / retardo predecible



# IIOT: Software/Firmware OpenWSN



# IIOT: Software/Firmware OpenWSN



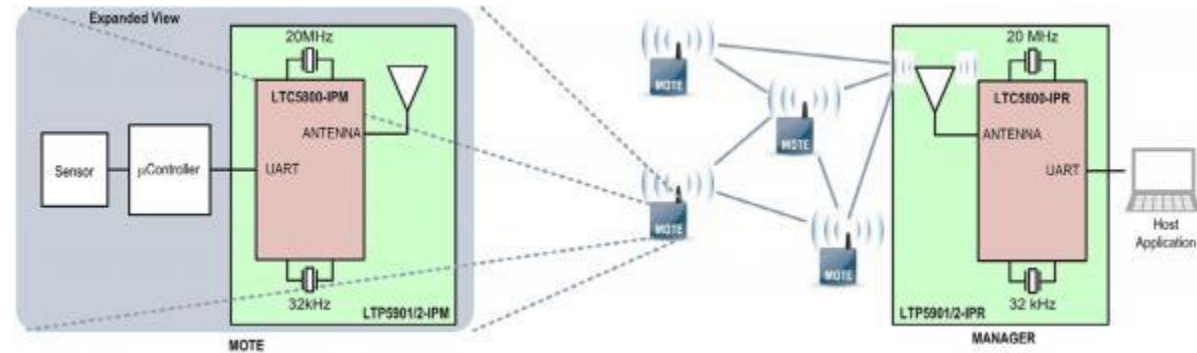


# IIOT: Hardware

- OpenMote (abierto)
- CC2538 (Cortex M3)
- FreeRTOS
- OpenWSN



- Dust Networks
- ASIC, firmware propietario
- Directo para usar en aplicaciones



# IIOT: Plataformas experimentales

- FIT-IOT: Cortex M3, WSN MSP430 (TI)

**FIT** IOT-lab [NEWS](#) [PLATFORM](#) [DEV CENTER](#) [COMMUNITY](#) [GET STARTED](#) [ACTIVITY](#) [TESTBED](#)

[Dashboard](#) [New Experiment](#) [Manage Profiles](#)

## Experiment List

Show  entries Filter:

ID	Name	Date	Duration (min)	Node(s)	State
26418	test_INRIA_July_31_2	31-07-2015 9:12:50	240	5	Terminated
26400	test_INRIA_July_31_1	31-07-2015 7:07:59	120	5	Terminated
26344	test_INRIA_July_29_1	29-07-2015 12:53:28	121	109	Terminated
25754	minimaltest	19-07-2015 11:19:47	10	20	Error
17956	prueba19	13-04-2015 18:28:12	1010	221	Error
17955	prueba21	13-04-2015 18:14:25	13	10	Error
17953	prueba20	13-04-2015 18:01:47	6	15	Error
17951	prueba21	13-04-2015 17:44:37	14	10	Error
17949	prueba20	13-04-2015 17:27:35	14	15	Error
17948	prueba19	13-04-2015 17:20:35	5	221	Error

Showing 1 to 10 of 41 entries

← Previous 1 2 3 4 5 Next →

## Personal dashboard

⚙ Experiments: 41

- 0 running
- 0 upcoming
- 41 terminated

📊 Profiles: 2

Click on an experiment to manage it or click **New Experiment** to start a new one.

# IIOT: Under construction

- Estandarización:
  - IPv6 everywhere:
    - IETF:6tisch: On-the-Fly Scheduling  
Distributed/Hybrid Scheduling  
Security  
CoAP: COMI (Management Interface)
    - IETF:detnet: Gap Analysis