

# T3 – Redes de Área Personal Inalámbricas

Redes de Comunicaciones  
Móviles

Curso 2025 - 2026

# Índice

- *Introducción*
- *Redes Bluetooth, IEEE 802.15.1*
- *Redes de sensores*
  - *IEEE 802.15.4 (Low Rate WPAN)*
  - *ZigBee*
  - *6LoWPAN*
- *VLC, IEEE 802.15.7*

# Introducción

- *IEEE802.15 pertenece a la familia IEEE802, que especifica tecnologías de redes inalámbricas de área personal (WPAN)*
  - <http://standards.ieee.org/about/get/802/802.15.html>
- *Desarrollo de estándares de comunicación sobre distancias cortas, bajo consumo y tasas bajas de transmisión\**
- *Actualmente hay 10 subgrupos (task group) implicados en el desarrollo de diferentes estándares*

# Introducción

- **802.15.1: WPAN /Bluetooth**
  - Define la capa física y de enlace de la especificación Bluetooth
- **802.15.2: Coexistencia**
  - Recomendaciones prácticas para la coexistencia de WPAN y otras redes inalámbricas en bandas no licenciadas como WLAN
- **802.15.3: High Rate WPAN**
  - Define la capa física y de enlace para WPAN con tasas altas de transferencia (11 – 55 Mbps)
- **802.15.4: Low Rate WPAN**
  - Define la capa física y de enlace para WPAN con tasas bajas de transferencia (hasta 250 kbps) y consumo bajo de energía

# Introducción

- **802.15.5: Mesh networking**
  - Define la arquitectura para que los dispositivos WPAN puedan trabajar en redes mesh (multihop, direccionamiento, broadcast fiable,...)
- **802.15.6: Body Area Networks**
  - Estándar de bajo consumo y distancias cortas para dispositivos trabajando alrededor del cuerpo
- **802.15.7: Visible Light Communication**
  - Estándar de la capa física y de enlace para la comunicación óptica en el espectro visible (400nm – 700nm)
- **802.15.8 (com. por pares), 802.15.9 (KMP: Gestión de claves),**
- **802.15.10 (enrutamiento en capa 2)**

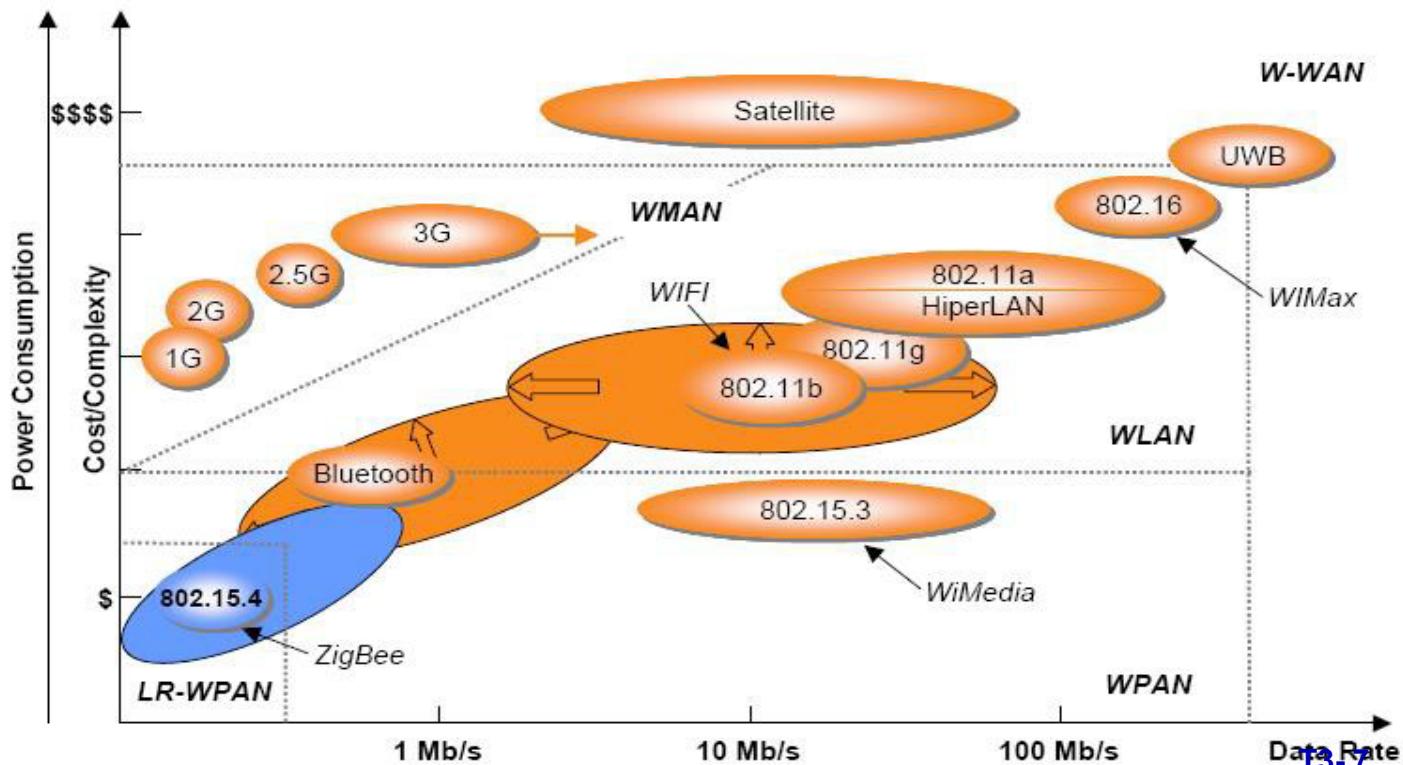
# Introducción

- *Aplicaciones*

|                    |  |
|--------------------|--|
| <i>Domótica</i>    | <i>Calefacción, aire acondicionado, seguridad, control de apertura/cierre, luces</i> |
| <i>Industria</i>   | <i>Detección de situaciones de emergencia, control de maquinaria</i>                 |
| <i>Automoción</i>  | <i>Distancia a objetos cercanos, parámetros de vehículos, presión de neumáticos</i>  |
| <i>Agricultura</i> | <i>Niveles de PH, temperatura, humedad, contaminantes</i>                            |

# Introducción

- Comparación de tecnologías inalámbricas



# T3 -Tecnologías Inalámbricas: **802.15.1 / BLUETOOTH**

Redes de Comunicaciones  
Móviles

Curso 2025 - 2026

# Índice

- Introducción a Bluetooth
- Arquitectura de Protocolos Bluetooth
  - Pila de Protocolos
  - Perfiles

Resumen: Define Capa física y capa de Enlace

# Introducción a Bluetooth

## Motivación

La **computación ubicua** significa la omnipresencia de computadores muy pequeños interconectados sin cables, que se incrustan de forma casi invisible en cualquier tipo de objeto cotidiano

Es la posibilidad de conectar todo lo que hay en el mundo a Internet, para proporcionar información acerca de “cualquier cosa, en cualquier momento, en cualquier lugar”

# Introducción a Bluetooth

## *Definición*

Tecnología que usa enlaces de radio de corto alcance, pudiendo transmitir a través de objetos sólidos no metálicos, destinados a reemplazar las conexiones de cable entre equipos informáticos y telefónicos

# Introducción a Bluetooth

## *Características relevantes*

- Alcance nominal depende de la clase de dispositivo

| Clases  | Potencia máxima permitida | Rango                       |
|---------|---------------------------|-----------------------------|
| Clase 1 | 100 mw                    | 20 dBm<br>aprox. 100 metros |
| Clase 2 | 2.5 mw                    | 4 dBm<br>aprox. 10 metros   |
| Clase 3 | 1 mw                      | 0 dBm<br>aprox. 1 metro     |
| Clase 4 | 0,5 mw                    | -3 dbm<br>aprox. 0,5m       |

# Introducción a Bluetooth

## Características relevantes

- Alcance nominal depende de la clase de dispositivo
  - Se ofrece acceso a Internet
  - Comunicaciones de voz y datos
  - Utilización de la banda ISM de 2,4 GHz (sin licencia)
  - Cada enlace es codificado y protegido contra interferencias e intrusiones
  - Velocidad máxima de 1 Mbps (721 Kbps) en bluetooth 1.2, hasta 3Mbps (1.4 Mbps) en bluetooth 2.1 y hasta 24Mbps en bluetooth 3.0
  - Bluetooth 4.0, Low Energy, 1 Mbps, AES 128
  - Bluetooth 5.0, con 4x cobertura, 2x velocidad
- Utiliza la misma que la Wi-Fi, por eso va lesto cuando conectas Wi-Fi + Bluetooth*

## Evolució:

- ▷ 2003 → 1.0 y 1.2 → 72Mbps → 10m
- ▷ 2004 - 2007 → 2.0 y 2.1 → 20Mbps → 30m
- ▷ 2009 → 3.0 → 24Mbps → 50m
- ▷ 2010 - 2014 → 4.1 y 4.2 → 24Mbps → 100m  
4.0 → low Energy → 1Mbps
- ▷ 2015 → 5.0 → 50Mbps → 100m
- ▷ 2019 → 5.1 → 50Mbps → 200m
- ▷ 2020 → 5.2 → 50Mbps → 240m
- ▷ 2022 → 5.3 → 50Mbps → 240m → Menor consumo que 5.2
- ▷ 2023 → 5.4 → Permite comunicació bidireccional
- ▷ 2024 → 6.0
- ▷ 2025 (Mayo) → 6.1

# Introducción a Bluetooth

## Características relevantes

| Rev        | Date          | Comments  |
|------------|---------------|---|
| 5.0        | Dec 06 2016   | Updated to include architectural aspects of new features added. Incorporated errata.  |
| 4.2        | Dec 02 2014   | Updated to include architectural aspects of new features added. Incorporated errata.  |
| 4.1        | Dec 03 2013   | Updated to include architectural aspects of new features added to CSA2, CSA3, CSA4 and v4.1.  |
| 4.0        | June 30 2010  | Updated to support Low Energy. and ATT and GATT over BR/EDR.  |
| 3.0 + HS   | April 21 2009 | Updated to integrate the Alternate MAC/PHY and Unicast Connectionless Data features.  |
| v2.1 + EDR | July 26 2007  | Added definitions for new features: Encryption Pause and Resume, Erroneous Data reporting, Extended Inquiry Response, Link Supervision Timeout Event, Packet Boundary Flag, Secure Simple Pairing, Sniff Subrating.   |
| v2.0 + EDR | Oct 15 2004   | This version of the specification is intended to be a separate Bluetooth Specification that has all the functional characteristics of the v1.2 Bluetooth Specification that adds the Enhanced Data Rate (EDR) feature which incorporates changes to Volume 1, Part B, Acronyms and Abbreviations. |
| v1.2       | Nov 05 2003   | New volume with informational content. This volume will always be updated in parallel with the Core System volumes.   |

# Introducción a Bluetooth

## Comparativa

| Bluetooth                |                       | WLAN                            | Zigbee      | Infrared                                       |
|--------------------------|-----------------------|---------------------------------|-------------|--|
| Frecuencia               | 2,4 GHz               | 2,4 GHz                         | 2,4 GHz     | Banda de infrarrojos                           |
| Régimen binario de datos | 1 Mbps                | 11 Mbps                         | 250 Kbps    | 4 Mbps   |
| Alcance                  | 10 m. (100 m.)        | Hasta 150 m.                    | Hasta 75 m. | Hasta 1m.                                      |
| Estándar                 | Bluetooth             | 802.11b                         | 802.15.4    | IrDa   |
| Técnica de comunicación  | FHSS                  | DSSS                            | DSSS        | -  |
| Modelo de uso            | Sustitución del cable | Red de acceso de alta velocidad | Domótica    | Transmisión punto a punto y con visión directa |

# Pila de Protocolos

## Grupo de Aplicación

Aplicaciones Audio

Aplicaciones de Datos

## Grupo de Middleware

Grupo Middleware

## Grupo de Transporte

HCI

Audio

L2CAP

Control

LM

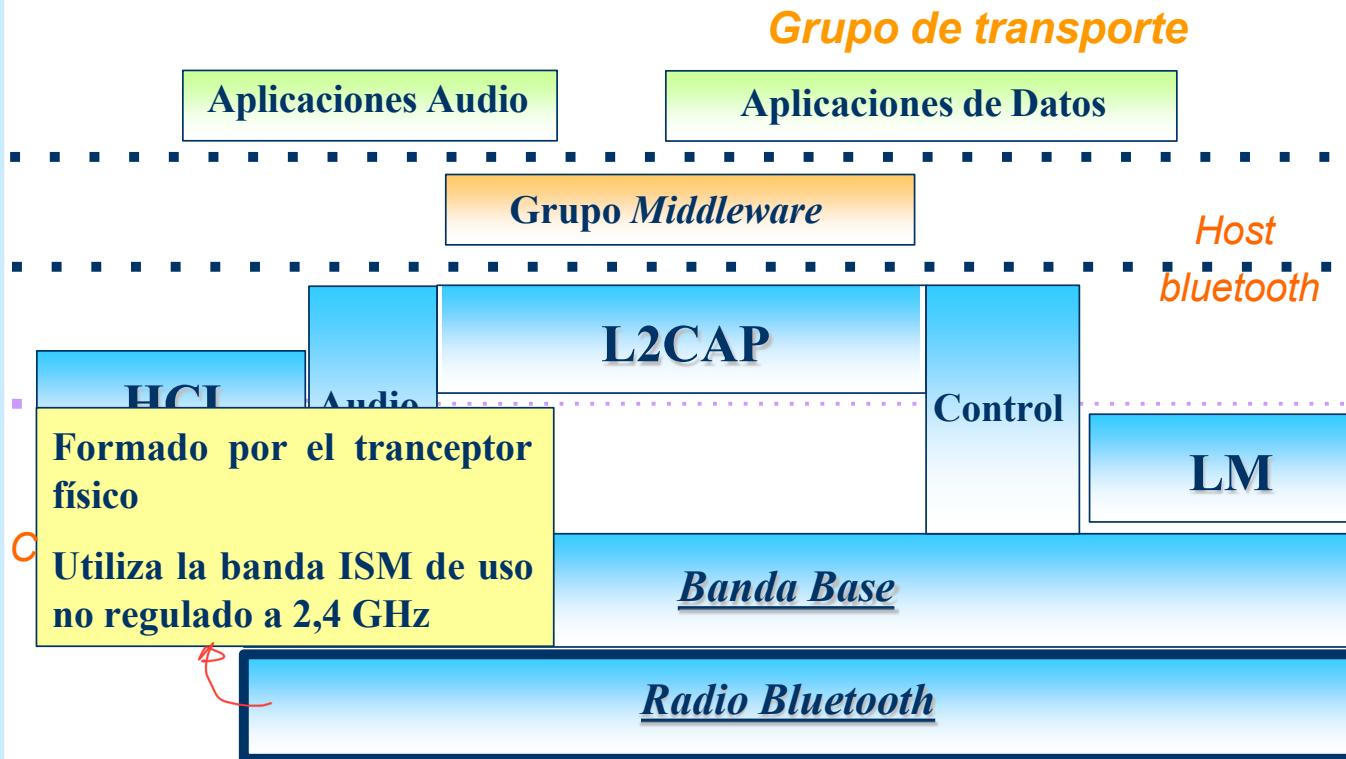
Controlador  
bluetooth

Banda Base

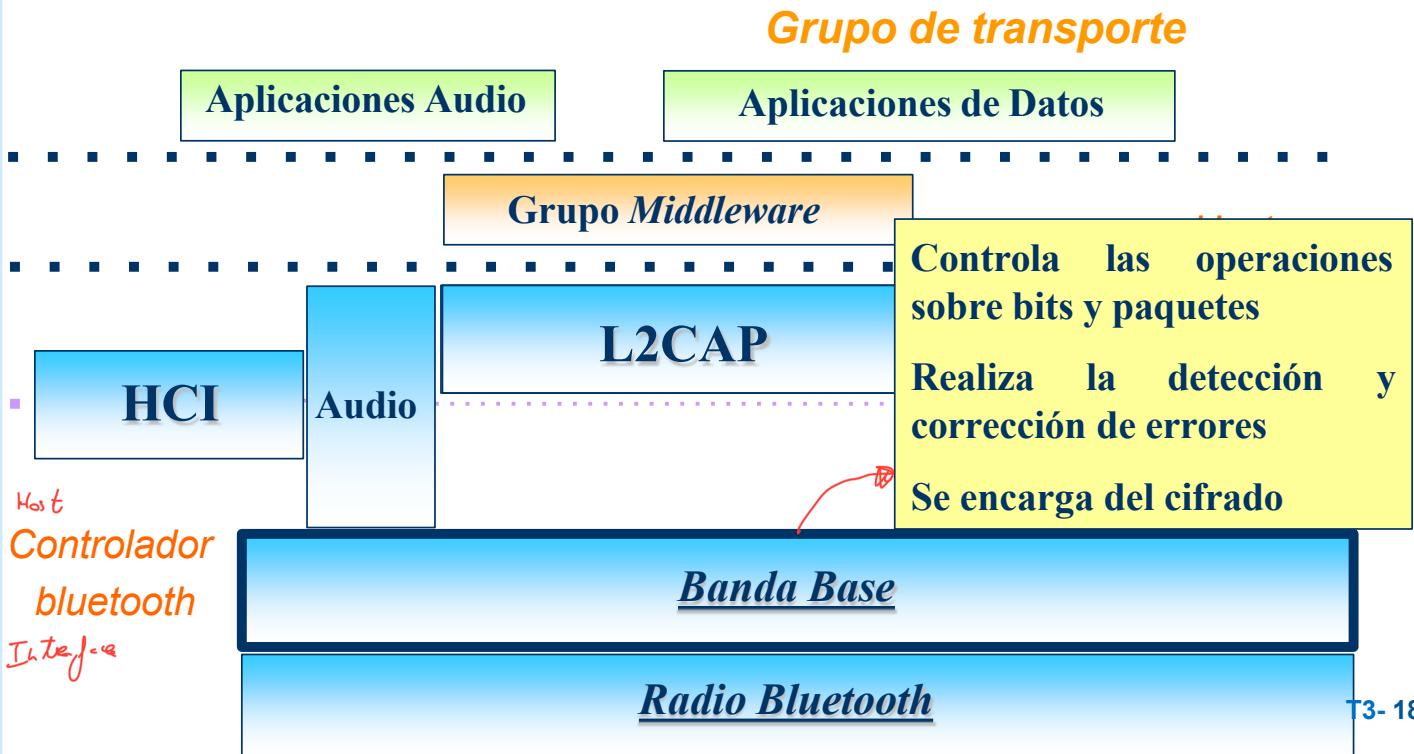
Radio Bluetooth

Host  
bluetooth

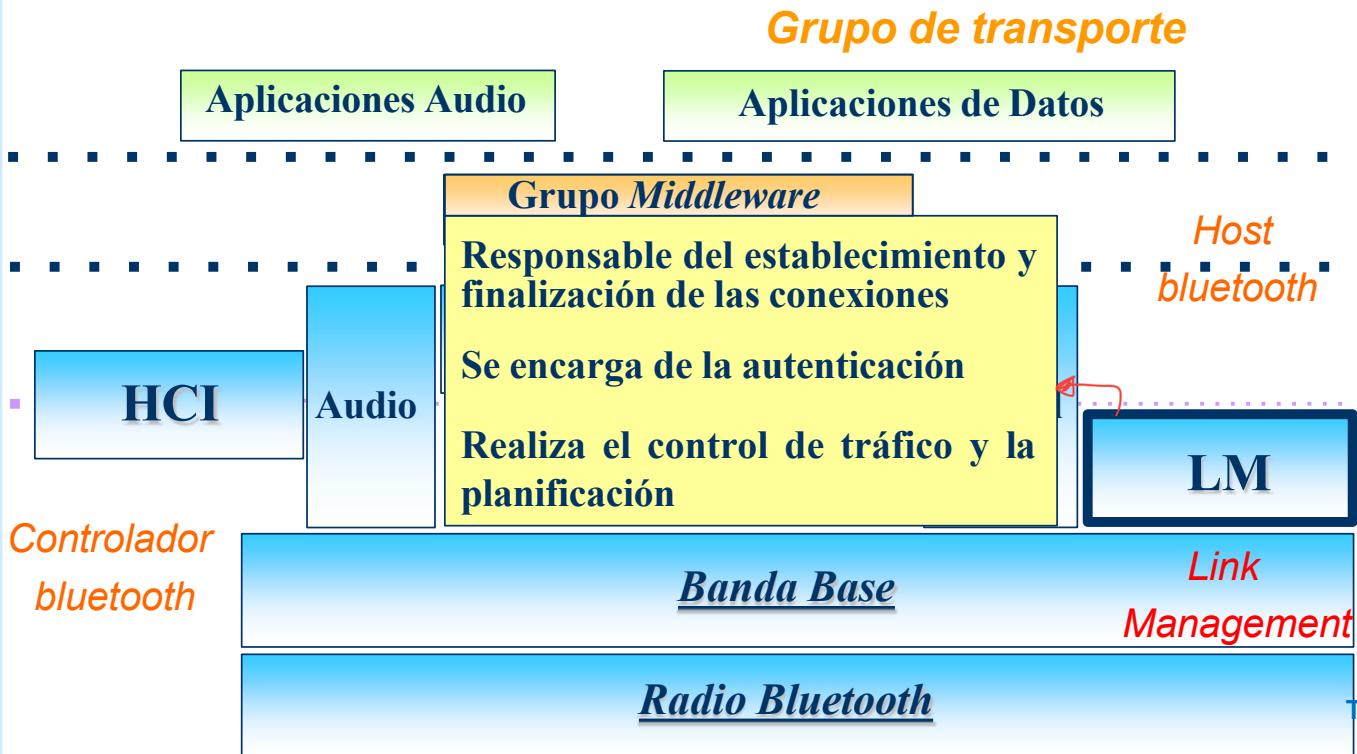
# Pila de Protocolos



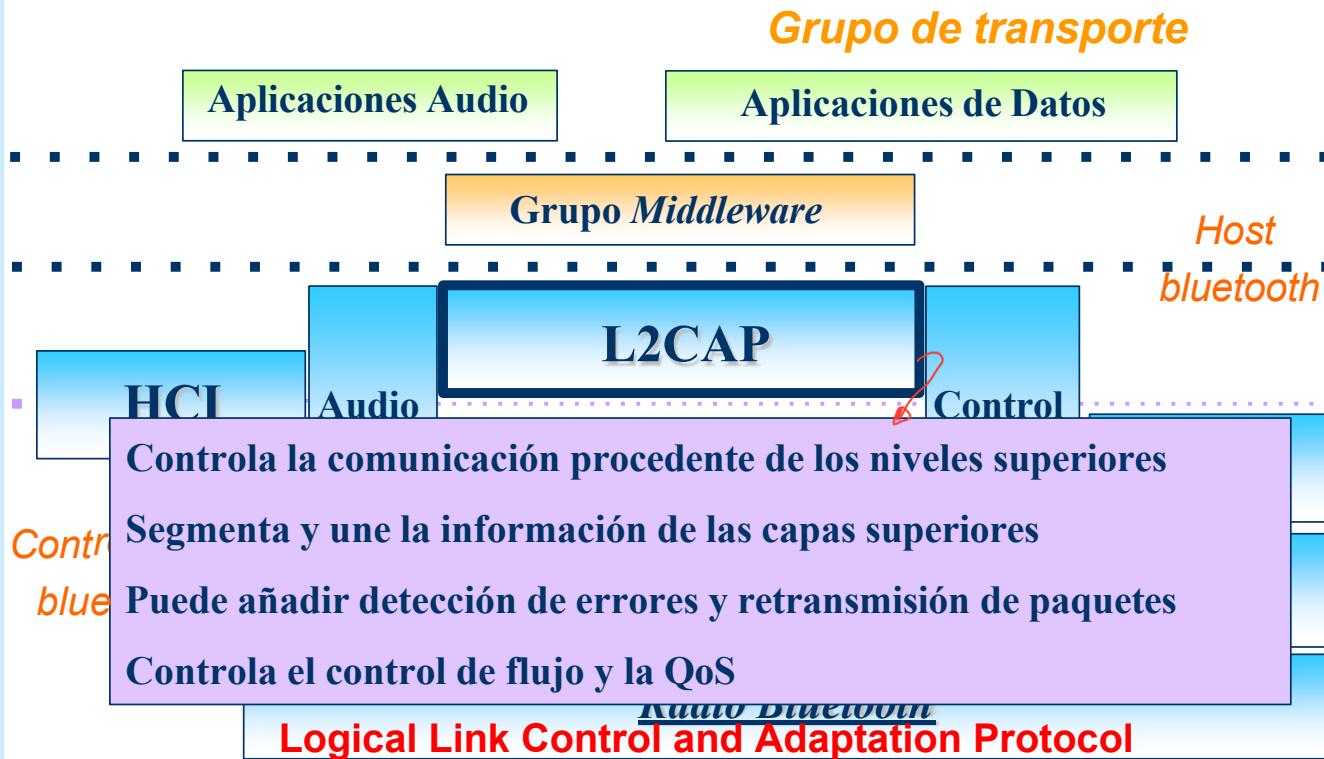
# Pila de Protocolos



# Pila de Protocolos



# Pila de Protocolos

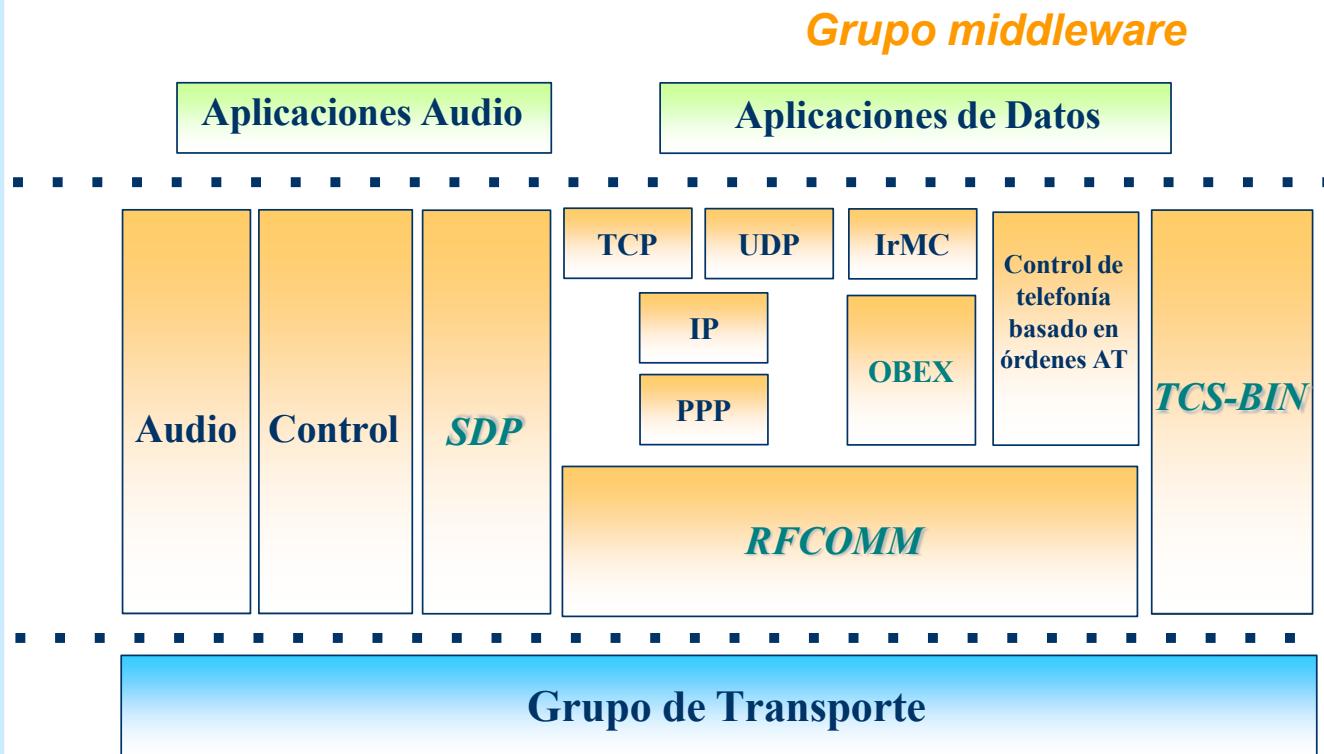


# Pila de Protocolos

## *Grupo de transporte*

- ✓ Permiten a los dispositivos Bluetooth localizar a otros
- ✓ Configuración y mantenimiento de enlaces lógicos y físicos
- ✓ Transporte de los datos desde las capas superiores
- ✓ Soportan transmisión asíncrona de datos y síncrona de voz
- ✓ El audio se transmite con alta prioridad para mantener QoS

# Pila de Protocolos



# Pila de Protocolos

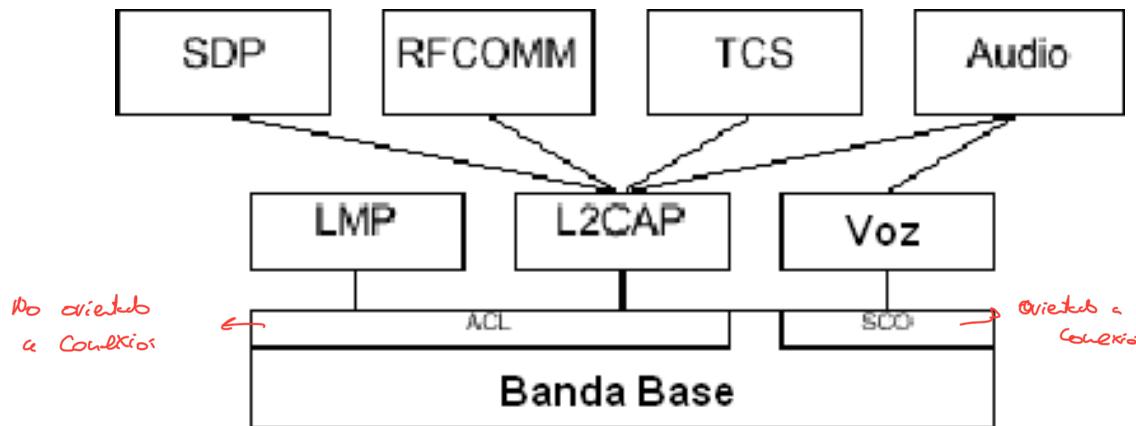
## Grupo middleware

- ✓ Presenta a las aplicaciones los interfaces estándar que pueden utilizar en las transmisiones (Host Controller Interface)
- ✓ Incluye protocolos externos al SIG (relacionados con Internet) y protocolos del SIG (diseñados para Bluetooth)
  - ✓ RFCOMM (protocolo que emula un puerto serie)
  - ✓ TCS (protocolo para el control de señales telefónicas de datos y de audio)
  - ✓ SDP (protocolo de descubrimiento de servicios)

# Pila de Protocolos

## Grupo middleware

L2CAP debe soportar multiplexación de protocolos, debido a que el protocolo de banda base es incapaz de distinguir a los protocolos de orden superior



# Pila de Protocolos

*Grupo de aplicación*

Aplicaciones Audio

Aplicaciones de Datos

**PLATAFORMA API's**

Adaptación Bluetooth

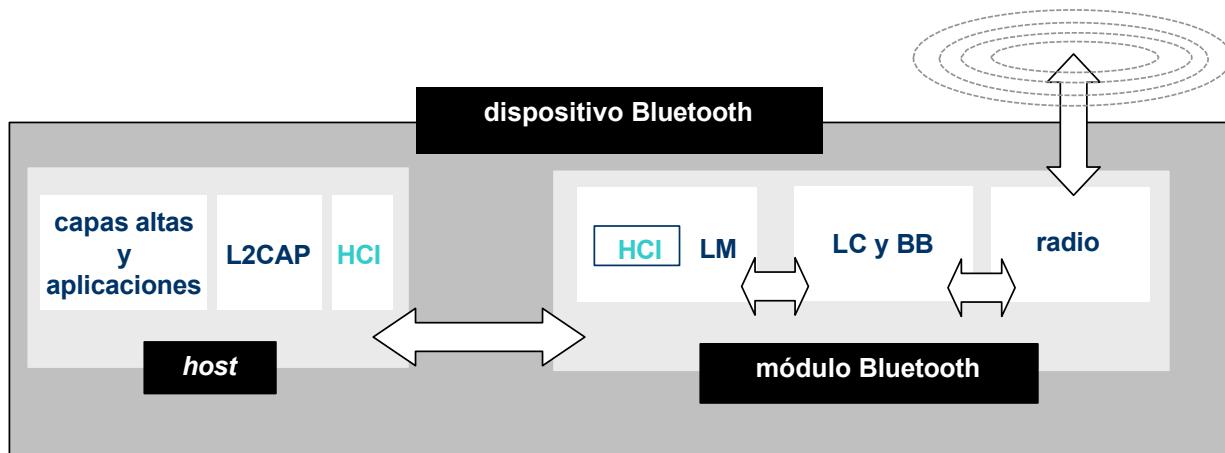
Servicios comunes

*Grupo Middleware*

*Grupo de Transporte*

# Pila de Protocolos

*Dispositivo Bluetooth*



# Pila de Protocolos

## Capa Radio

- Banda ISM de 2,4 GHz  2,400 GHz – 2,4835 GHz
- 79 canales de 1 MHz, excepto BLE → utiliza 40 canales  
*Bluetooth Low Energy*

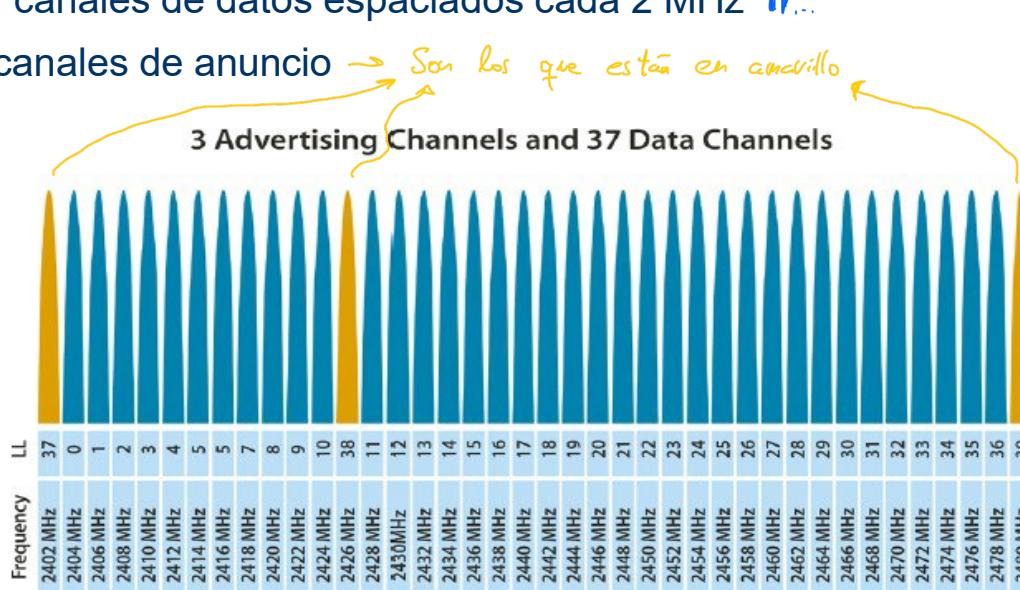
### RESTRICCIONES:

- **Limitación de potencia transmitida máxima**
- **Técnica de comunicación especial (*Ensanchado de Espectro por Salto de Frecuencia (FHSS)*)**
  - Transmisor y receptor acuerdan el esquema de salto
    - Reducción de las interferencias y las colisiones
    - Mayor seguridad

# Pila de Protocolos

## Capa Radio

- BLE: Banda ISM de 2,4 GHz  2,402 GHz – 2,480 GHz
- 37 canales de datos espaciados cada 2 MHz //
- 3 canales de anuncio



# Pila de Protocolos

## Capa Radio

*Soluciones a los problemas de ruidos (interferencias):*

- Ensanchado de Espectro por Salto de Frecuencia (**FHSS**)
  - ❖ División de la banda en 79 canales de 1MHz
- Utilización de **paquetes pequeños**
  - ❖ Sólo se pierde un paquete
- Utilización de técnicas de corrección (**FEC**) sobre los paquetes de datos para evitar retransmisiones
  - ❖ Los datos se pueden recuperar incluso en canales ruidosos sin retransmisión (se replican los bits)

# Pila de Protocolos

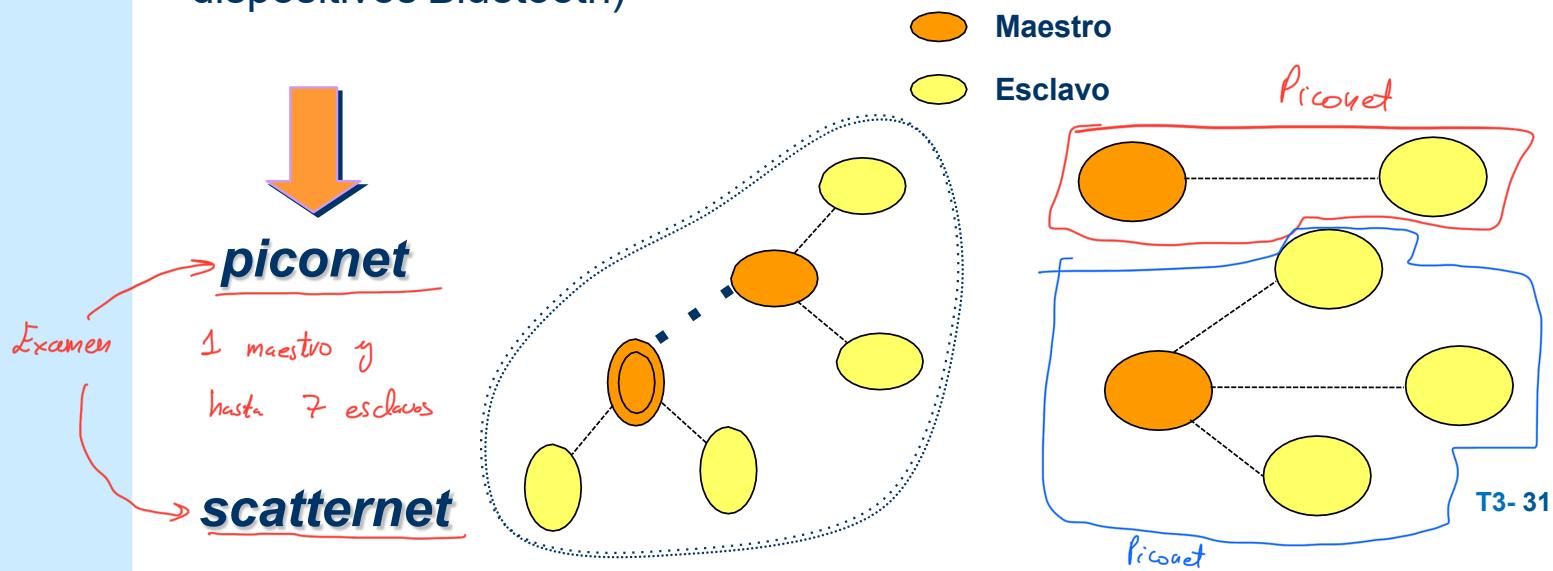
## *Capa Banda Base*

- Maneja los canales y los enlaces físicos además de otros servicios como la corrección de errores, fallos en los datos, selección del salto y seguridad
- Funciona como un controlador de la conexión del enlace y de la potencia

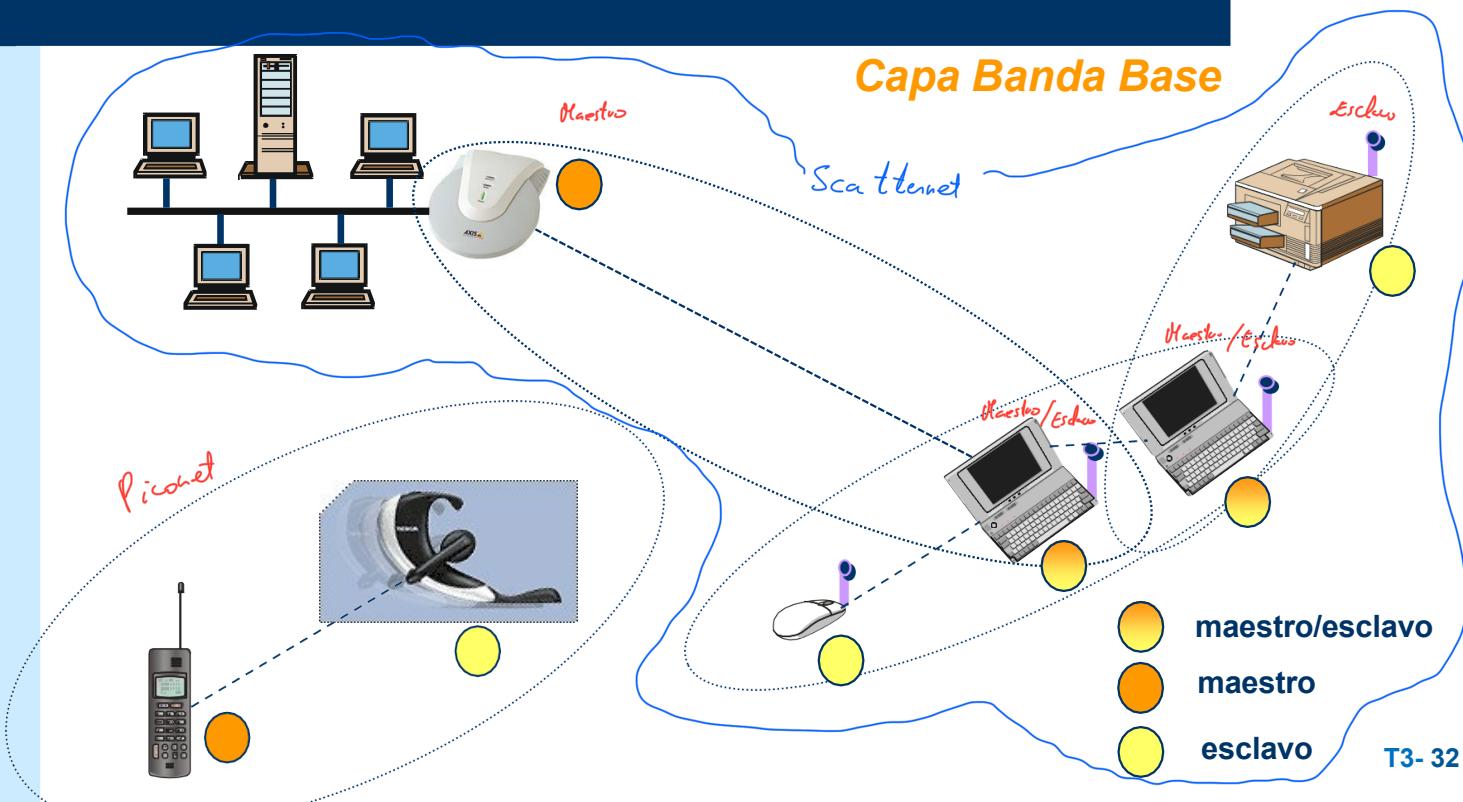
# Pila de Protocolos

## Capa Banda Base

El sistema Bluetooth proporciona conexiones punto a punto y punto a multipunto (el canal está compartido por varios dispositivos Bluetooth)



# Pila de Protocolos



# Pila de Protocolos

## Capa Banda Base: Canal Físico

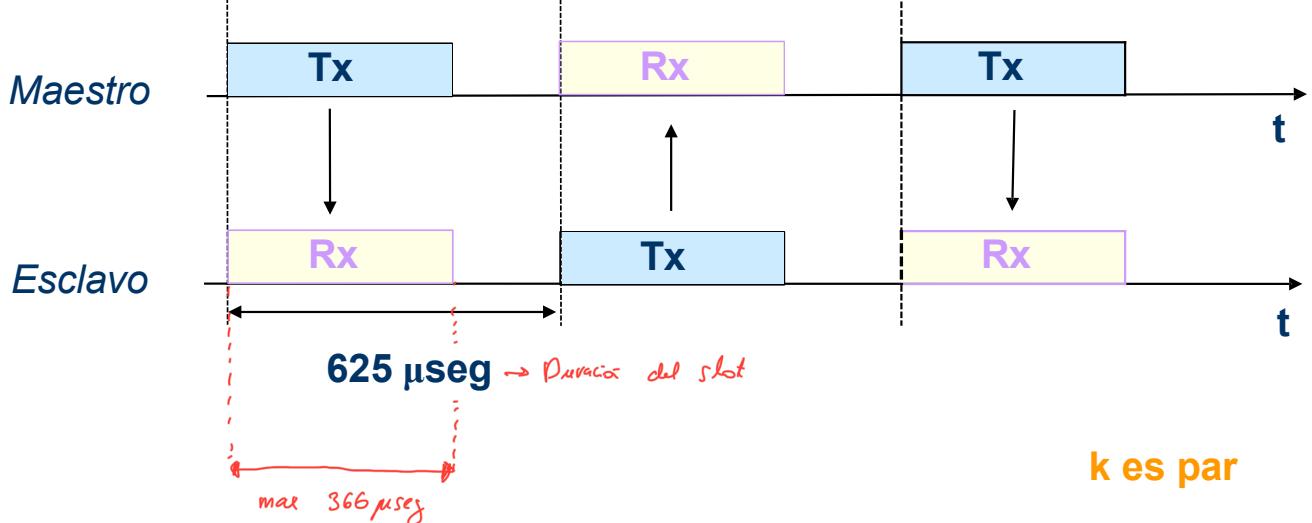
$f$  = Frecuencia

$f_k$

$f_{k+1}$

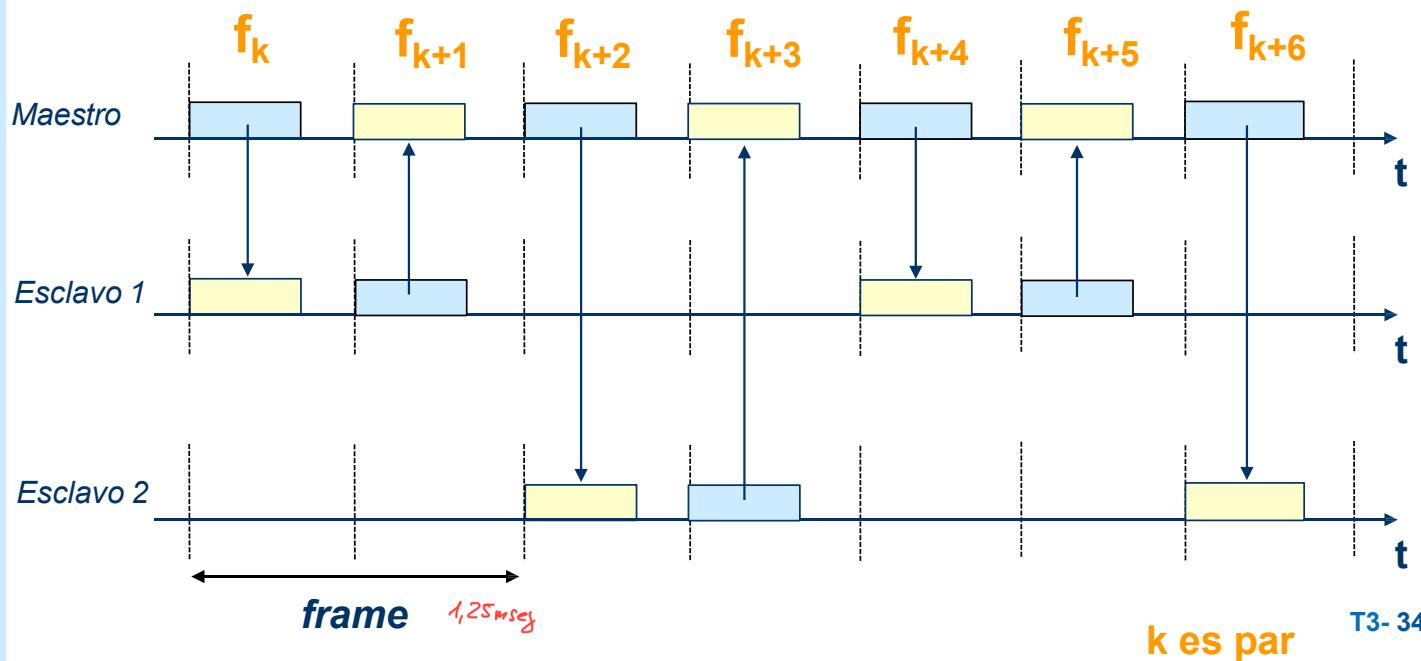
$f_{k+2}$

"En las frecuencias pares, el maestro transmite y el esclavo escucha"  
 "En las frecuencias impares, el esclavo transmite y el maestro escucha"



# Pila de Protocolos

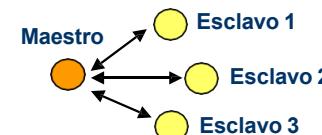
## Capa Banda Base: Canal Físico



# Pila de Protocolos

## Capa Banda Base: Enlace Físico

- Se establece entre un maestro y un esclavo
- Dos tipos de enlaces:
  - Orientado síncrono (*Synchronous-Connection-Oriented* o **SCO**)
  - No orientado asíncrono (*Asynchronous-Connection Less* o **ACL**)



Enlace ACL  
(entre un maestro  
y todos sus esclavos)

# Pila de Protocolos

## Capa Banda Base: Enlace Físico



- **Punto a punto**. Se reservan parejas de *slots* para la transmisión
- Normalmente se transmite **voz**
- Los paquetes SCO usan transmisión de **64 Kbps**
- Por ellos sólo se transmiten paquetes de 1 slot
- No se aplica retransmisión ni reconocimiento
- El maestro puede soportar hasta 3 enlaces simultáneos al mismo o diferentes esclavos
- El esclavo puede soportar hasta 3 enlaces simultáneos del mismo maestro

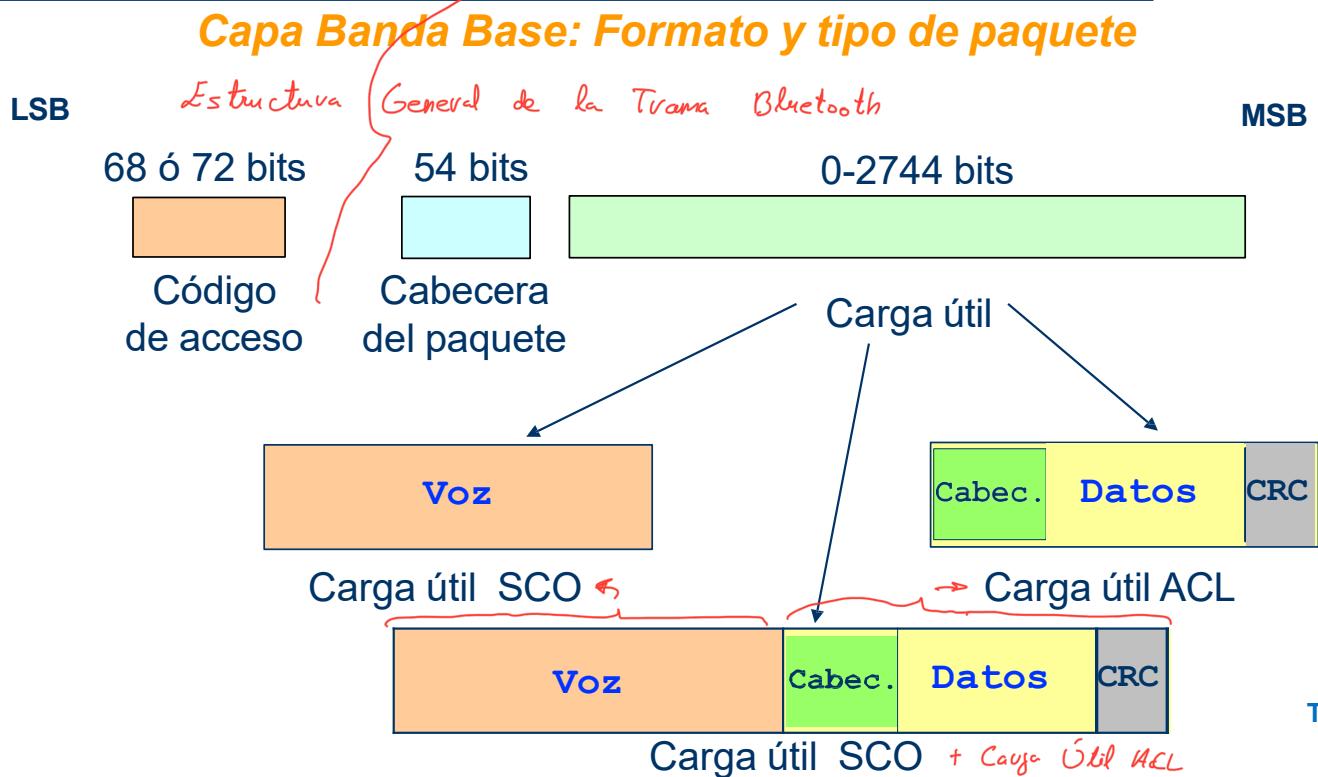
# Pila de Protocolos

## Capa Banda Base: Enlace Físico

- **Punto – multipunto** (entre el maestro y cada uno de sus esclavos)
- Utiliza los *slots* no reservados para los enlaces SCO y los paquetes transmitidos pueden ser de 1, 3 ó 5 slots
- Sólo se transmite **datos**
- Se aplica retransmisión y reconocimiento
- Soportan *broadcast* (no tienen reconocimiento)
- Sólo puede haber un único enlace de este tipo entre un maestro y un esclavo
- Transmisión de **721 Kbps** en una dirección y 57.6 Kbps en ambas **T3-37** direcciones



# Pila de Protocolos



# Perfiles

## GAP (*Generic Access Profile*)

Especifica los términos genéricos que deben ser usados con los terminales Bluetooth, ~~éstos son~~: *Se encarga de controlar las conexiones y los anuncios en BLE*

- **Dirección de dispositivo Bluetooth (BD\_ADDR)**

Corresponde con 12 caracteres hexadecimales separados de dos en dos por dos puntos (0C:AF:23:1A:DD:56)

- **Nombre de dispositivo (user-friendly name)**

Corresponde con 248 caracteres como máximo codificado en UTF-8

- **Clave (Bluetooth pin)**

Utilizado para la autenticación de dispositivos Bluetooth que no hayan intercambiado claves previamente. Se usa en el *pairing*

- **Clase de dispositivo**

Indica el tipo de dispositivo y qué servicios son soportados por él

# Perfiles

## GAP

- **Pairing**

- Este proceso se lleva a cabo cuando dos dispositivos se quieren conectar
- Ambos formarán una pareja de *pairing* (*trusted-pair*)
- Cuando dos dispositivos que forman una *trusted-pair* se encuentran y quieran comunicarse, lo harán de forma automática

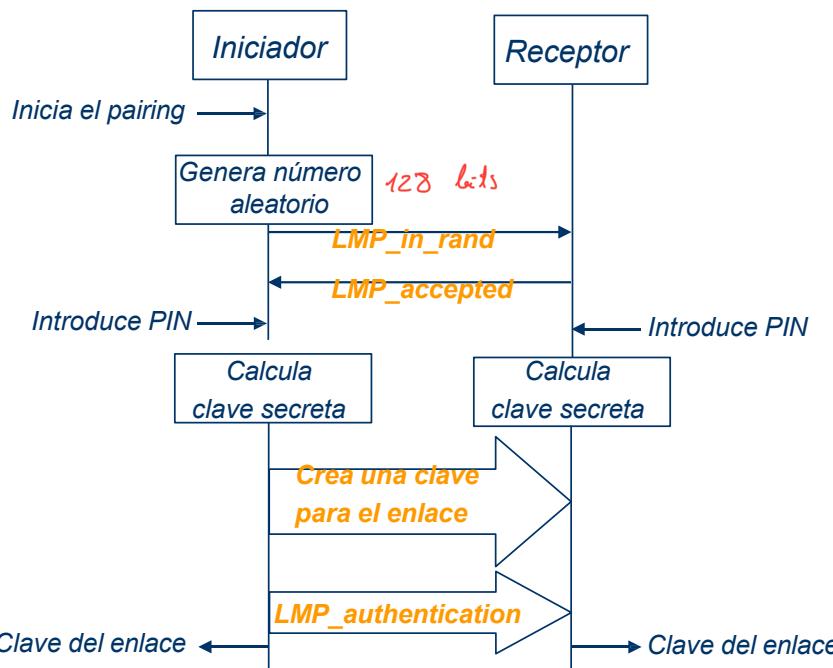
El *pairing* (entre el dispositivo A y el dispositivo B) consta de los siguientes pasos:

- El dispositivo A descubre al dispositivo B
- El dispositivo A solicita la clave al usuario (tener en cuenta que puede ser fija)
- El dispositivo A envía la clave al dispositivo B
- [El dispositivo B solicita la clave al usuario]
- Si no hay error, el dispositivo B envía la clave al dispositivo A

# Perfiles

GAP

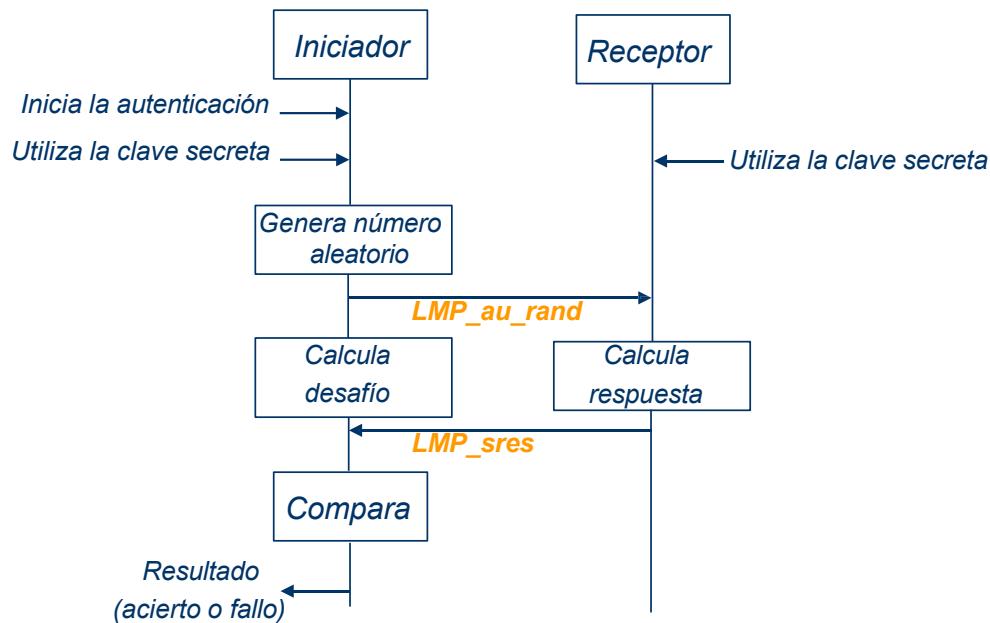
El proceso de *pairing* sigue el siguiente esquema:



# Perfiles

## GAP

El GAP define un proceso de **autenticación** que sigue el siguiente esquema:



# Perfiles

## GAP

Especifica los modos de funcionamiento en el que se puede encontrar un dispositivo Bluetooth, éstos son:

- **Modo no descubierto (*Non-discoverable mode*)**  
Nunca entrará en el estado *Inquiry-Response*
- **Modo de descubrimiento limitado (*Limited-discoverable mode*)**  
Sólo puede ser descubierto durante un tiempo limitado si está en el estado *Inquiry-Scan* (código de acceso **LIAC**)
- **Modo de descubrimiento general (*General-discoverable mode*)**  
Hace que un dispositivo pueda ser descubierto en cualquier momento si está en el estado *Inquiry-Scan* (código de acceso **GIAC**)

# Perfiles

GAP

- **Modo no conectado (*Non-connectable mode*)**

Nunca entrará en el estado *Page-Scan*

- **Modo conectado (*Connectable mode*)**

Entrará periódicamente en el estado *Page-Scan*

- **Modo pairing (*Bondable mode*)**

El dispositivo acepta la creación de un *trusted-pair*

- **Modo pairing no permitido (*Non-bondable mode*)**

El dispositivo no acepta la creación de un *trusted-pair*

# Perfiles

## GAP

El GAP define tres modos de **seguridad**. Éstos son:

- **Modo de seguridad 1:** no seguro (no se inicia ningún proceso de seguridad)
- **Modo de seguridad 2:** seguridad impuesta a nivel de servicio (se inicia el proceso de seguridad después de que el canal haya sido establecido). La seguridad afecta a cada servicio individual
- **Modo de seguridad 3:** seguridad impuesta a nivel de enlace (se inicia el proceso de seguridad antes de que el canal haya sido establecido). La seguridad afecta a toda la aplicación

Existen dos posibilidades de acceso a los servicios:

- **Dispositivos de confianza** (acceso sin restricción a los servicios)
- **Dispositivos de no confianza** (acceso limitado a los servicios)

# Low Rate WPAN

## Introducción

- *No todas las aplicaciones de red necesitan tasas altas de throughput →coste elevado*
- *Sensores de temperatura y luz, de gases, dispositivos de seguridad,... son sencillos →consumen poca energía, bajo coste y el ciclo de trabajo es pequeño.*



- **802.15.4 define una capa física y de enlace para dispositivos con características**
  - *Low power*
  - *Low data rate*
  - *Low duty cycle*

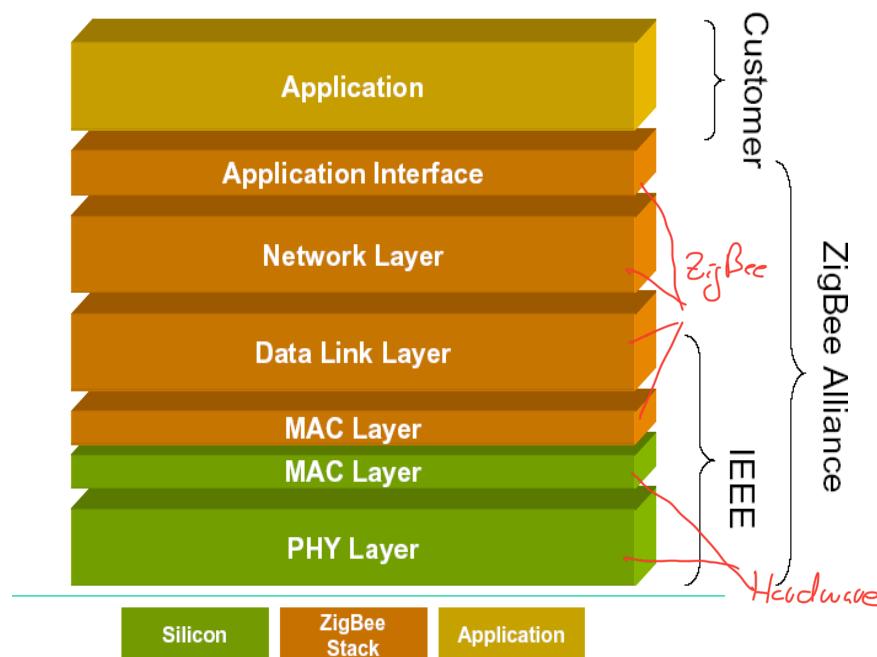
# Low Rate WPAN

## Introducción

- Características generales
  - Tasas de 20, 40, 100 y 250 kbps
  - Topología en estrella o punto a punto
  - CSMA/CA (Acceso en contención)
  - Acceso sin contención (GTS-Guaranteed Time Slots)
    - Opcional
  - Soporte para dispositivos de baja latencia
  - Consumo energético reducido
  - Tres bandas de frecuencias
    - 16 canales en 2.4GHz
    - 10 canales en 915MHz (América)
    - 1 canal en 868MHz (Europa)

# Low Rate WPAN

## Introducción



# Low Rate WPAN

## Introducción

- **Componentes de red**
  - **Coordinador PAN**
    - Se encarga de establecer *la red* y definir *la estructura y el modo de operación*
    - Sólo existe *uno en la red*
    - Cualquier dispositivo de red se puede unir a la red previa autorización del coordinador PAN
  - **Coordinador/Routers**
    - Proporciona servicios de coordinación a otros dispositivos de red, tal como, proxy de dispositivos que no están dentro del rango de cobertura del coordinador
  - **Dispositivo de red**
    - Implementa la funcionalidad básica de la capa física y control de acceso al medio de 802.15.4
- **Una red 802.15.4 consta al menos de un coordinador PAN y un dispositivo de red**

# Low Rate WPAN

## Introducción

- **Tipos de dispositivos**

- **Full function device (FFD)**

- *En cualquier topología*
    - *Capacidad para ejercer como coordinador PAN*
    - *Se comunica con cualquier dispositivo*
    - *Implementa los servicios de la capa MAC al completo*
    - *Puede ser cualquiera de los componentes de red*

- **Reduced function device (RFD)**

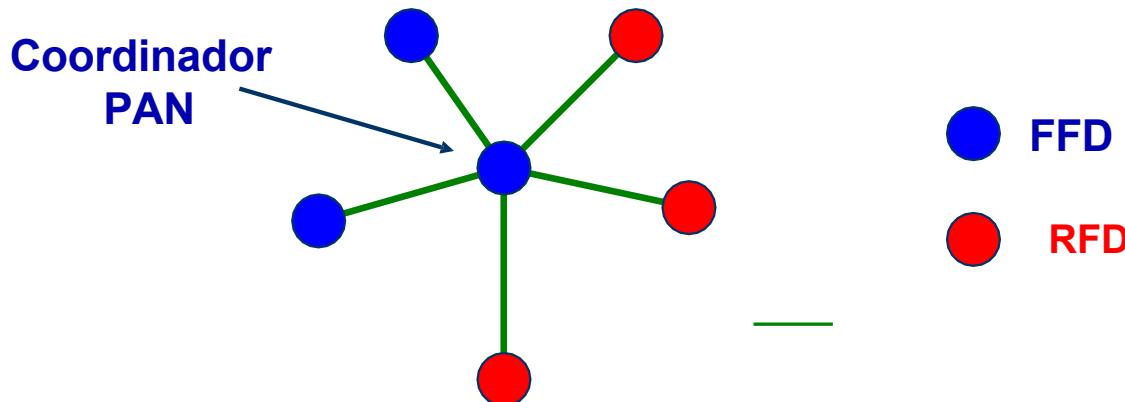
- *Limitado a la topología estrella o como dispositivo final en una red punto a punto*
    - *No puede ser coordinador de una PAN*
    - *Implementación reducida de los servicios MAC*
    - *Sólo puede ser dispositivo de red*

# Low Rate WPAN

## Introducción

- *Topología en estrella*

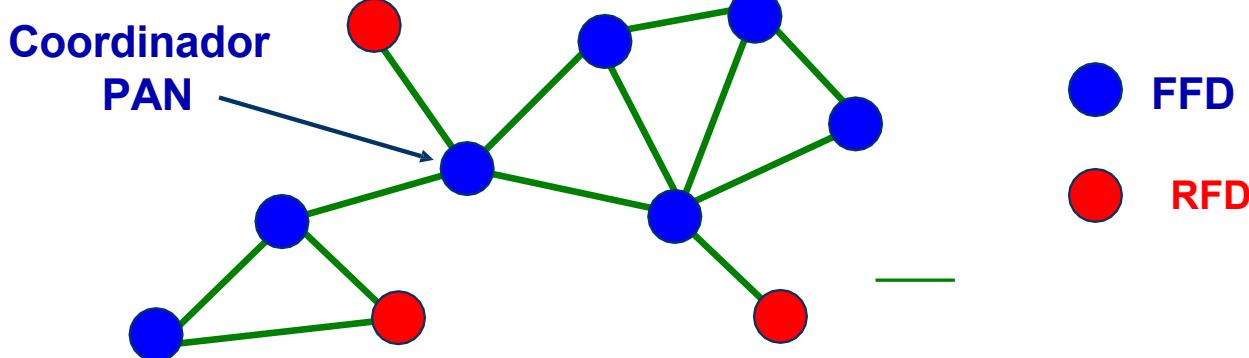
- *Después de que un FFD se activa, éste puede establecer su propia red y ser el coordinador PAN*
- *Elige un identificador PAN (PAN ID) diferente a las redes vecinas*
- *El coordinador PAN permite a otros dispositivos (FFD o RFD) unirse a la red*



# Low Rate WPAN

## Introducción

- *Topología punto a punto*
  - *Tiene que existir un coordinador PAN*
  - *Cada dispositivo se puede comunicar con otro dentro de su área de cobertura*
  - *Se realiza un broadcast del PAN ID (beacon frame)*
  - *Cualquier dispositivo que escuche el beacon puede solicitar unirse a la red (al coordinador PAN)*
  - *Dispositivos RFD sólo pueden ser dispositivos finales*



# Low Rate WPAN

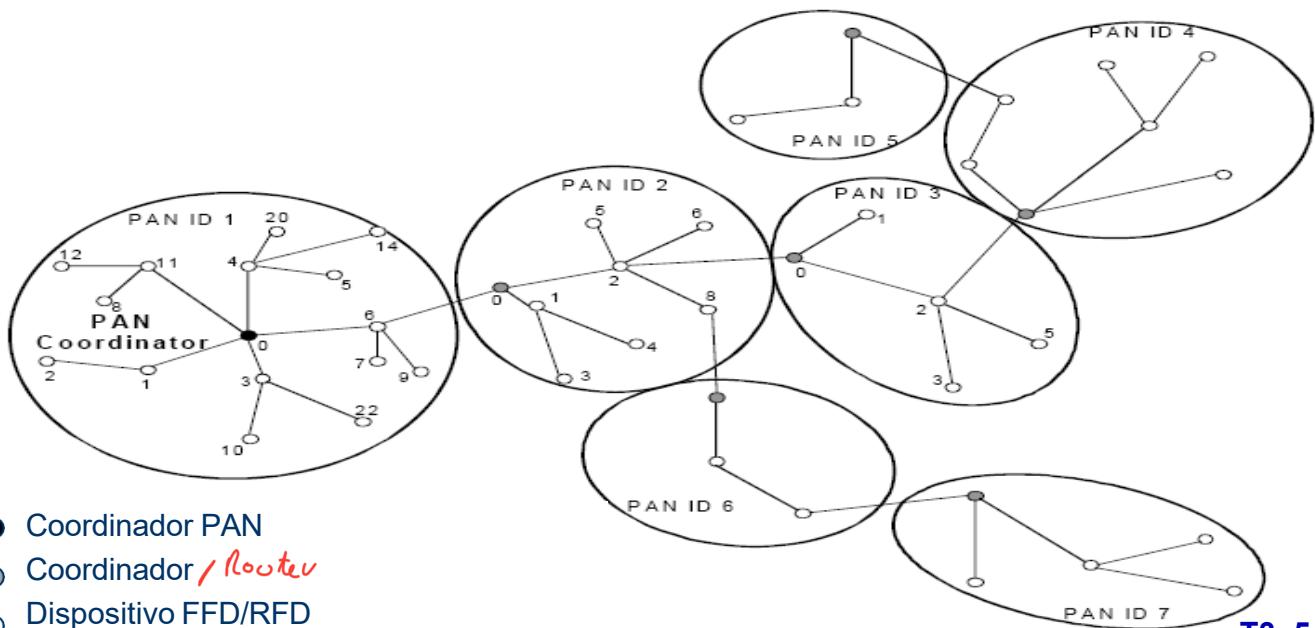
## Introducción

- *Topología punto a punto*
  - Si el coordinador PAN admite al nuevo dispositivo, éste lo añade a una lista de vecinos
  - El nuevo dispositivo envía beacons periódicos y otros dispositivos pueden unirse a la red a través de éste
  - La capacidad de formar enlaces directos permite crear rutas redundantes (*fault tolerance*)
  - Una vez que se establece la red, el coordinador PAN puede indicar a otros dispositivos que sean coordinadores de clusters adyacentes

# Low Rate WPAN

## Introducción

- *Topología cluster-tree*
  - No forma parte de la especificación 802.15.4



# Low Rate WPAN

Capa Física

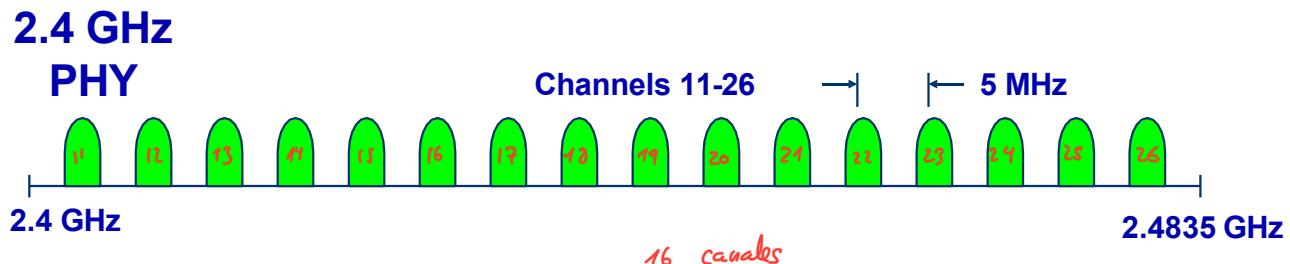
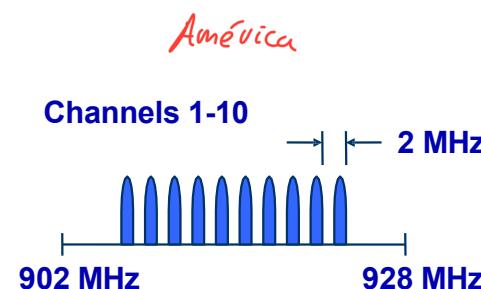
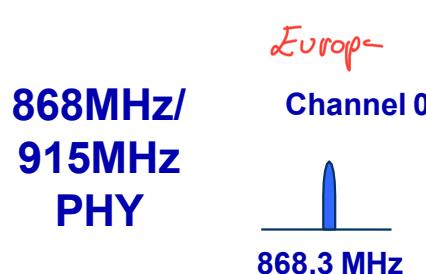
- *Funcionalidades*

- *Encendido y apagado de la radio*
- *Detección de nivel de energía*
- *Indicación de la calidad de enlace en los paquetes recibidos*
- *“Sensado del canal” para el CSMA/CA*
- *Selección de frecuencia*
- *Transmisión y recepción de datos*

# Low Rate WPAN

## Capa Física

- Bandas de frecuencias



# Low Rate WPAN

## Capa Física

- Tasa de datos

*Direct sequence*

| Banda de Frecuencia | Canales | Bit Rate | Modulación (DSSS)<br><i>Especro expandido por secuencia directa</i> |
|---------------------|---------|----------|---|
| 868 – 868.6 MHz     | 1       | 20 Kbps  | Binary Phase Shift Keying (BPSK)                                    |
|                     |         | 100 Kbps | Offset Quadrature Phase Shift Keying (O-QPSK)                       |
|                     |         | 250 Kbps | Parallel Sequence Spread Spectrum (PSSS)                            |
| 902 – 928 MHz       | 10      | 40 Kbps  | Binary Phase Shift Keying (BPSK)                                    |
|                     |         | 250 Kbps | Offset Quadrature Phase Shift Keying (O-QPSK)                       |
|                     |         | 250 Kbps | Parallel Sequence Spread Spectrum (PSSS)                            |
| 2.4 – 2.4835 Ghz    | 16      | 250 Kbps | Offset Quadrature Phase Shift Keying (O-QPSK)                       |

# Low Rate WPAN

## Capa Física

- *Encabezado*
  - *Cabecera de sincronización*
    - Preámbulo de 32 bits (cero binario)
    - Start of Frame delimiter de 8 bits:  $11100101$   
 $\rightarrow 2^7 = 128$  de longitud máxima para el campo de datos
  - *Cabecera física (7+1 bits): Longitud del PHY payload*
    - 5 bytes → Paquete de reconocimiento MAC
    - 9 o más → MPDU payload
  - *PHY Payload: MPDU de longitud variable*

| Sync Header                        |                                   | PHY Header           |                 |   | PHY Payload |
|------------------------------------|-----------------------------------|----------------------|-----------------|---|-------------|
| Preamble                           | Start of Frame Delimiter          | Frame Length (7 bit) | Reserve (1 bit) | PHY Service Data Unit (PSDU)  |             |
| 4 Octets<br><small>32 bits</small> | 1 Octets<br><small>8 bits</small> | 1 Octets             |                 |   |             |
|                                    |                                   |                      |                 | <u>0-127 Bytes</u><br><small><math>\rightarrow 128</math> bytes</small> | T3- 58      |

# Low Rate WPAN

## Capa Física

- **Especificaciones de radio**

- **Potencia de transmisión**
    - Al menos  $-3 \text{ dBm}$  ( $0.5 \text{ mW}$ )

$$-85 \text{ dBm} = 316 e^{-\frac{m}{10}} \text{ mW}$$

"mili vatios"

- **Sensibilidad del receptor**

- $-85 \text{ dBm}$  en  $2.4 \text{ Ghz}$  y  $-92 \text{ dBm}$  en  $868/915 \text{ Mhz}$

- **Índice de calidad de enlace**

- Se caracteriza la fuerza o calidad del paquete recibido
    - Detección de energía en el receptor
    - Estimación de la relación señal a ruido

# Low Rate WPAN

Capa MAC

- **Características:**

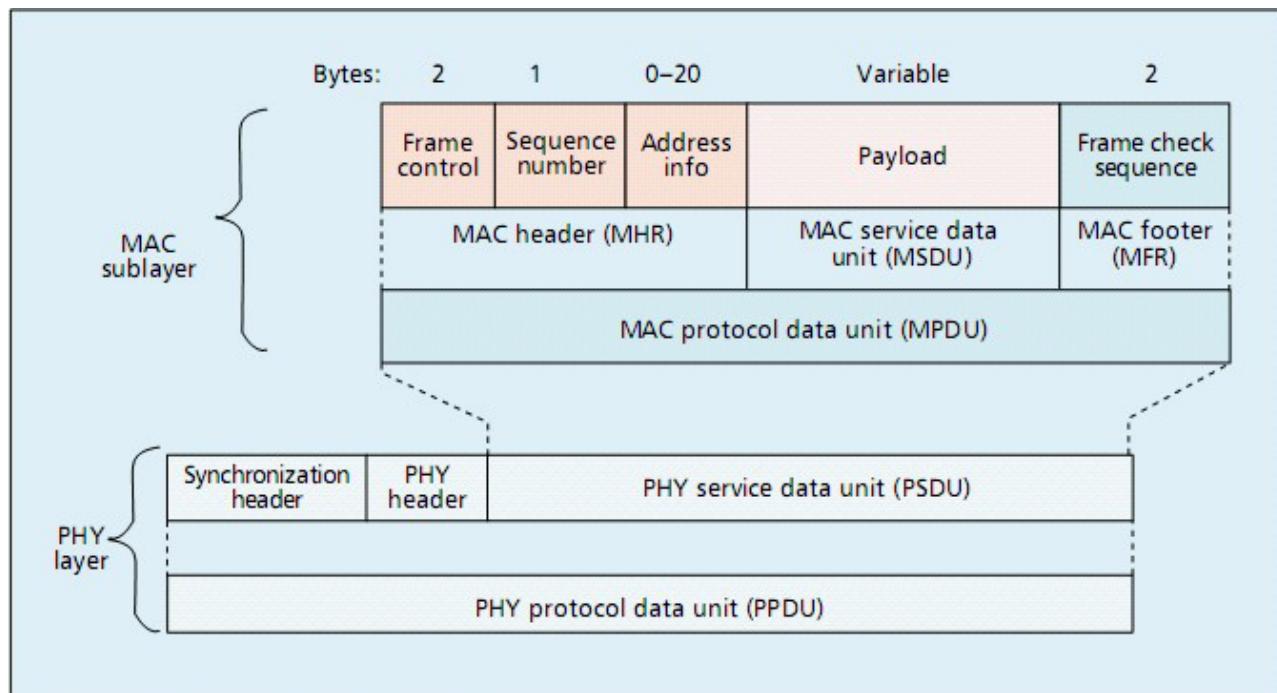
- *Gestión de beacons*
- *Acceso al medio*
- *Gestión de Guaranteed Time Slot (GTS)*
- *Validación y reconocimiento de frames*
- *Asociación y de-asociación*
- *Proporciona mecanismos de seguridad*

# Low Rate WPAN

Capa MAC

- Estructura general de un Frame

! IMPORTANTE!



# Low Rate WPAN

**Capa MAC**

- *Estructura general de un Frame*

| Octets:2          | 1                | 0/2                        | 0/2/8               | 0/2                   | 0/2/8          | variable              | 2                    |                        |
|-------------------|------------------|----------------------------|---------------------|-----------------------|----------------|-----------------------|----------------------|------------------------|
| Frame control     | Sequence number  | Destination PAN identifier | Destination address | Source PAN identifier | Source address | Frame payload         | Frame check sequence |                        |
| Addressing fields |                  |                            |                     |                       |                |                       |                      |                        |
| MAC header        |                  |                            |                     |                       |                |                       | MAC payload          |                        |
|                   |                  |                            |                     |                       |                |                       | MAC footer           |                        |
| Bits: 0-2         | 3                | 4                          | 5                   | 6                     | 7-9            | 10-11                 | 12-13                | 14-15                  |
| Frame type        | Security enabled | Frame pending              | Ack. Req.           | Intra PAN             | Reserved       | Dest. addressing mode | Reserved             | Source addressing mode |

**Campo Frame Control**

# Low Rate WPAN

## Capa MAC

- **Frame control**
  - Indica el tipo de frame transmitido
  - Especifica el formato del campo de dirección
  - Controla los reconocimientos
  - Seguridad,...
- **El número de secuencia se incrementa con cada frame transmitido**
- **El payload es de longitud variable, pero el frame completo de la capa MAC (MPDU) no puede exceder de 127 bytes**
  - El contenido del payload depende de tipo de frame

# Low Rate WPAN

## Capa MAC

- *El campo de dirección puede variar entre 0 y 20 bytes*
  - *Puede contener información de fuente y destino*
  - *Los frames de reconocimiento no contienen información de dirección*
  - *El beacon sólo contiene la dirección fuente*
  - *La dirección de los dispositivos puede ser de:*
    - *16 bits, asignada por el coordinador en la asociación*
    - *64 bits (dirección extendida)*
  - *Estructura eficiente para reducir el tamaño de los paquetes*
- *El campo FCS se utiliza para verificar la integridad de la trama*

# Low Rate WPAN

Capa MAC

- *Tipos de frame*
  - *Beacon Frame*
  - *Data Frame*
  - *Acknowledgment Frame*
  - *MAC Command Frame*

# Low Rate WPAN

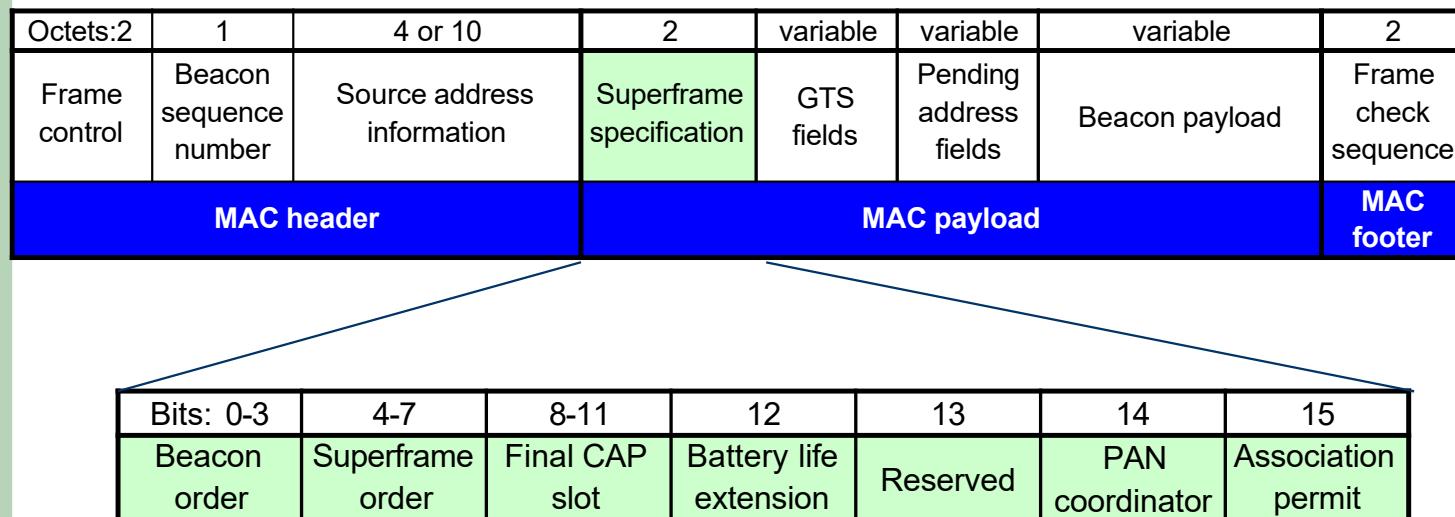
Capa MAC

- **Beacon frame (sólo en dispositivos FFD)** ~~EID~~ FFD
  - Utilizado para el descubrimiento de red
  - Opcionalmente utilizado para la coordinación y sincronización de una red activa, beacon-enabled PAN (asignación de GTS)
  - Para minimizar la latencia entre coordinador y dispositivo, ya que éste último puede chequear si tiene datos disponibles en el coordinador
  - Puede ser suprimido en redes con poco tráfico para minimizar el consumo energético
  - La dirección fuente contiene el PAN ID y la dirección del dispositivo
  - Proporciona un tiempo de referencia para establecer los límites y estructuras de un superframe

# Low Rate WPAN

## Capa MAC

- **Beacon frame (sólo en dispositivos FFD)**
  - Campos para GTS (Gestión para tiempo de slot Garantizado)
  - Direcciones de dispositivos con datos pendientes en el coordinador



# Low Rate WPAN

Capa MAC

- *Data frame (todos los dispositivos)*

127 Bytes

| Octets:2      | 1                    | 4 to 20             | variable     | 2                    |
|---------------|----------------------|---------------------|--------------|----------------------|
| Frame control | Data sequence number | Address information | Data payload | Frame check sequence |
| MAC header    |                      |                     | MAC Payload  | MAC footer           |

- *Acknowledgment frame (todos los dispositivos)*

| Octets:2      | 1                    | 2                    |
|---------------|----------------------|----------------------|
| Frame control | Data sequence number | Frame check sequence |
| MAC header    |                      | MAC footer           |

# Low Rate WPAN

## Capa MAC

- **MAC Command frame (todos los dispositivos)** *FFD y RFD*

| Octets:2      | 1                    | 4 to 20             | 1            | variable        | 2                    |
|---------------|----------------------|---------------------|--------------|-----------------|----------------------|
| Frame control | Data sequence number | Address information | Command type | Command payload | Frame check sequence |
| MAC header    |                      |                     | MAC payload  |                 |                      |
|               |                      |                     | MAC footer   |                 |                      |

- *Association request*
- *Disassociation notification*
- *PAN ID conflict notification*
- *Beacon request*
- *GTS request*

- *Association response*
- *Data request*
- *Orphan Notification*
- *Coordinator realignment*

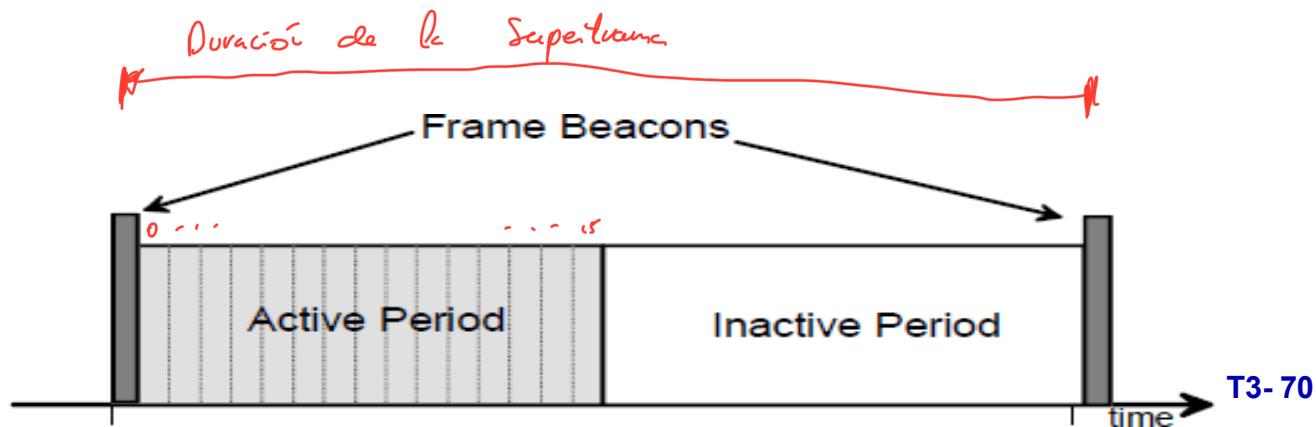
↳ Indica pendiente de sincronización de dispositivos con el coordinador PAN y necesita reasociación

# Low Rate WPAN

Capa MAC

- **Estructura SuperFrame** *Importante*

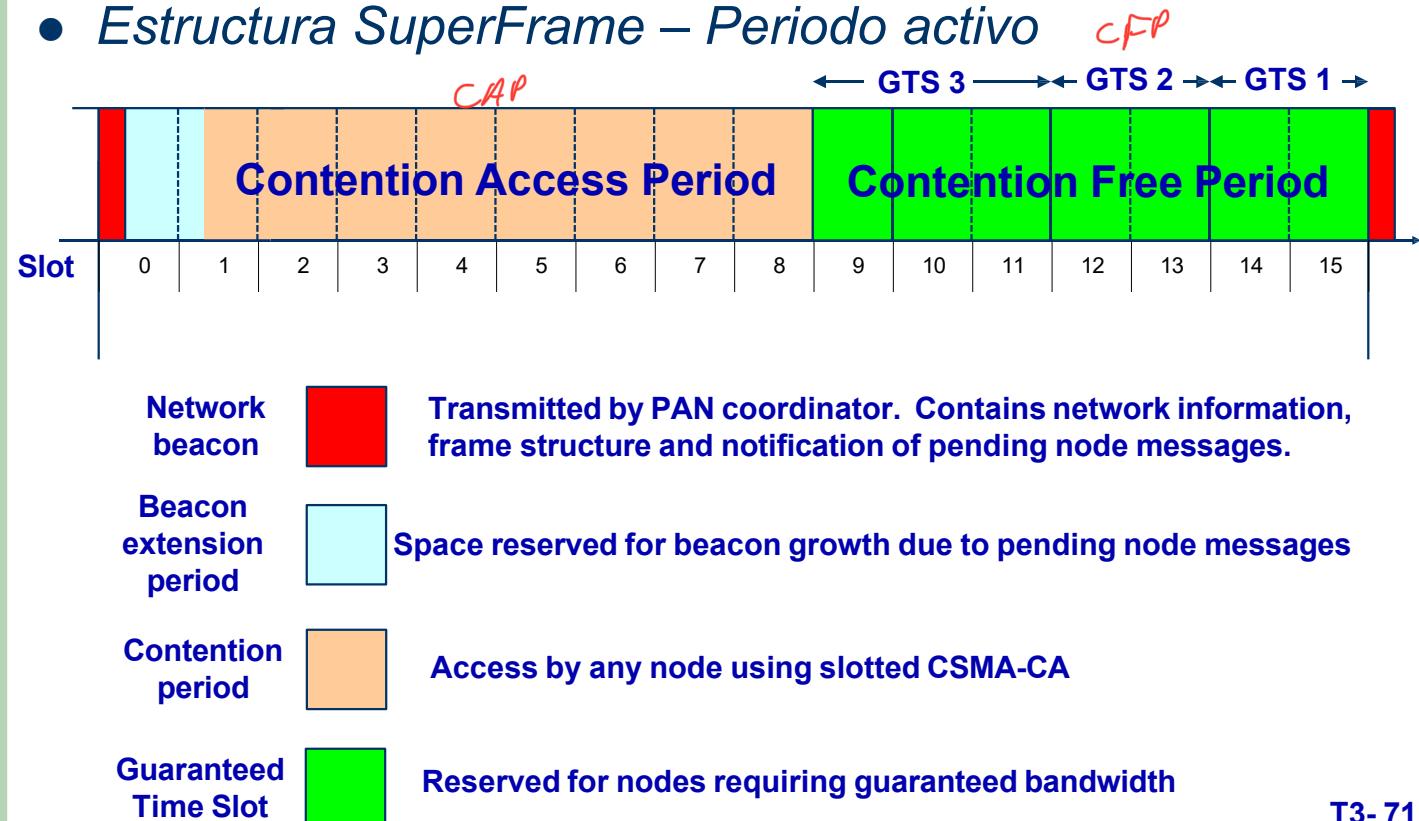
- Los beacons pueden ser utilizados para sincronizar los dispositivos, identificar la PAN y definir la supertrama
- El periodo activo está dividido en 16 slots de igual tamaño
- Durante el periodo inactivo, el coordinador puede entrar en modo de consumo reducido (low power mode)
- La duración de la supertrama es el intervalo entre beacons



# Low Rate WPAN

Capa MAC

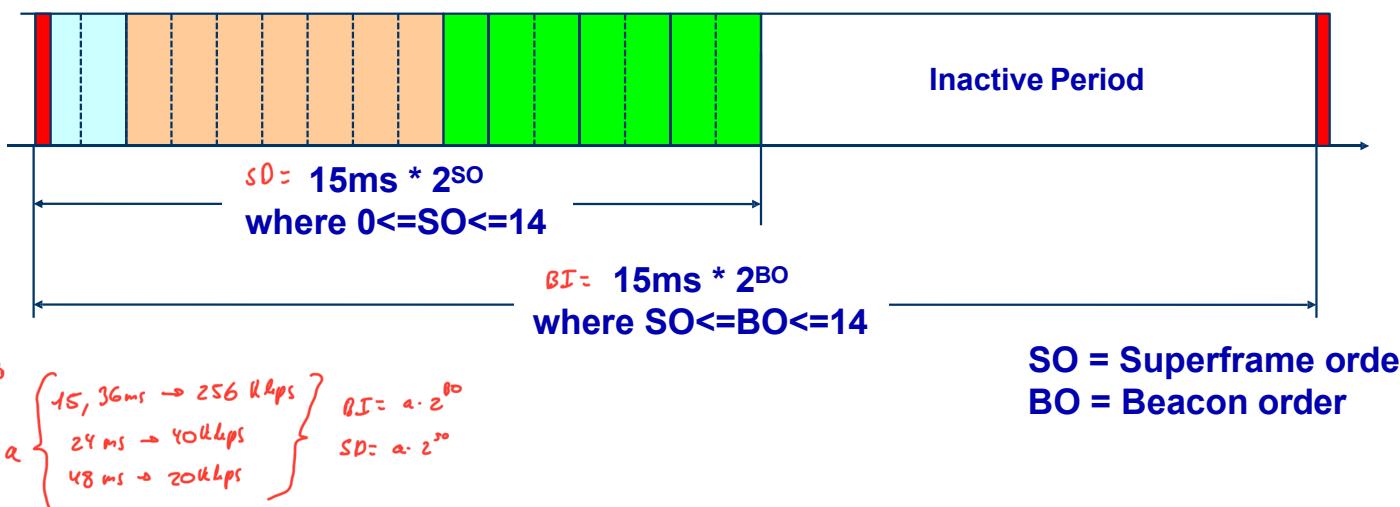
- Estructura SuperFrame – Periodo activo



# Low Rate WPAN

Capa MAC

- Estructura SuperFrame – Duración



# Low Rate WPAN

Capa MAC

- *Estructura SuperFrame – GTS*
  - *GTS*
    - *Para aplicaciones que requieren baja latencia o un ancho de banda específico*
    - *El coordinador PAN decide qué porciones o slots de la supertrama dedica a esas aplicaciones.*
    - *Puede asignar hasta 7 GTS, y un GTS puede ocupar más de un slot (en este caso todos los slots son asignados al mismo dispositivo)*
    - *Un dispositivo que ha sido asignado a un GTS puede también operar en CAP (Debe existir un periodo de contención mínima en la supertrama)*
    - *Cada dispositivo puede solicitar al coordinador PAN transmitir y/o recibir utilizando GTS*

# Low Rate WPAN

Capa MAC

- *Mecanismo de acceso al medio*
  - *Según la configuración de red, se utilizan dos mecanismos:*
    - *En redes non-beacon-enabled → unslotted CSMA/CA channel access mechanism*
    - *En redes beacon-enabled networks → slotted CSMA/CA channel access mechanism*
      - *Se utiliza la supertrama*

# Low Rate WPAN

Capa MAC

- *unslotted CSMA/CA channel access mechanism*
  - Cada vez que un dispositivo quiere transmitir frames de datos o comandos MAC espera un tiempo aleatorio
  - Si el canal está libre, después del tiempo de espera, el dispositivo transmite los datos
  - Si el canal está ocupado, el dispositivo espera otro periodo aleatorio antes de volver a intentar acceder al canal

# Low Rate WPAN

Capa MAC

- *slotted CSMA/CA channel access mechanism*
  - Los slots de backoff son alineados con el comienzo del beacon de transmisión
  - El dispositivo se sincroniza con el siguiente slot de backoff y entonces espera un número aleatorio de slots
  - Si el canal está ocupado, el dispositivo espera otro número de slots aleatorio antes de volver a intentar acceder al canal
  - Si el canal está libre, el dispositivo comienza a transmitir en el siguiente slot de backoff

# Low Rate WPAN

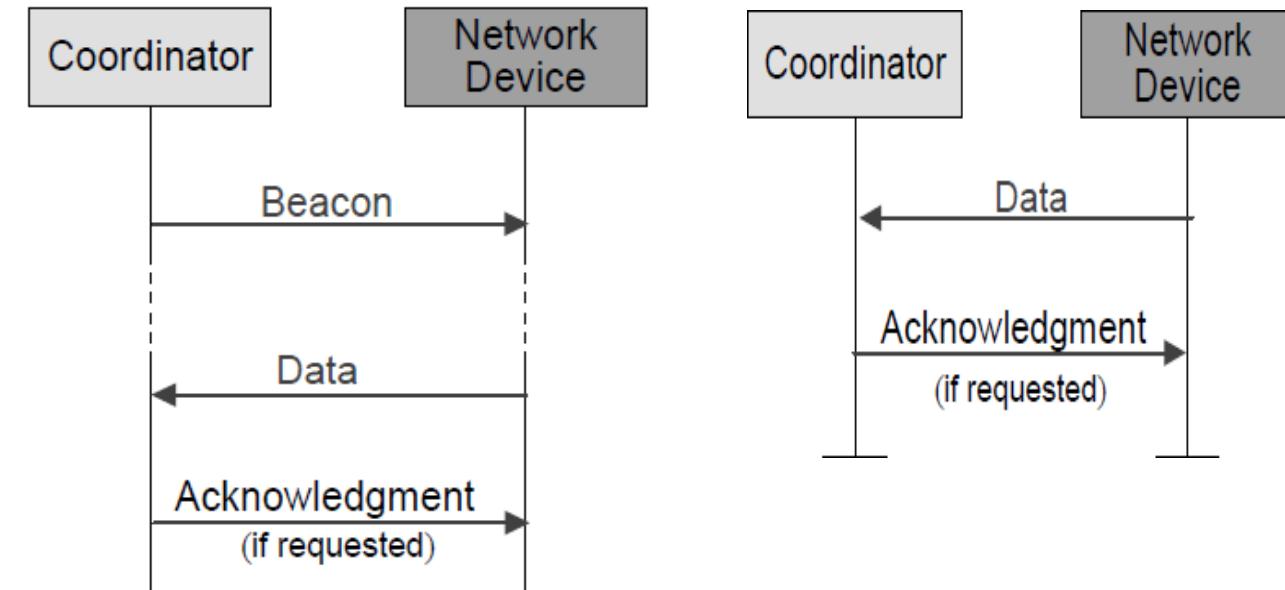
Capa MAC

- *Transferencia de datos*
- *Hay tres tipos:*
  - 1) – *Hacia un coordinador*
  - 2) – *Desde un coordinador*
  - 3) – *Entre dos dispositivos (punto a punto)*
- *Las dos primeras son sólo válidas en una topología en estrella*
- *Los mecanismos empleados en cada tipo de transferencia depende si la red es beacon-enabled o no*

# Low Rate WPAN

Capa MAC

- *Transferencia de datos – Hacia un coordinador*



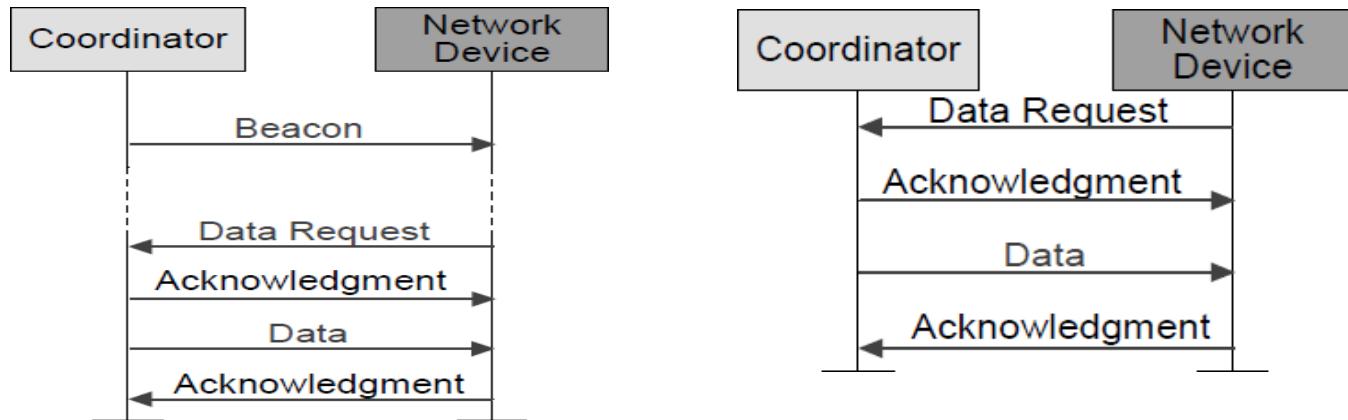
- Beacon-enabled PAN
- Slotted CSMA-CA
- Non beacon-enabled PAN
- Unslotted CSMA-CA

# Low Rate WPAN

Capa MAC

- *Transferencia de datos – Desde un coordinador*

2



- *El coordinador indica que hay un mensaje pendiente en el beacon frame*
- *El dispositivo escucha el beacon y envía un MAC command*
- *El dispositivo solicita los datos*
- *Si el coordinador tiene datos pendientes los envía, si no, envía un frame con longitud cero*

# Low Rate WPAN

Capa MAC

- *Transferencia de datos – Punto a punto* 3
  - *Se utiliza mecanismo unslotted CSMA/CA*
  - *Envío de beacons periódicos para sincronizarse con otros dispositivo*

# Low Rate WPAN

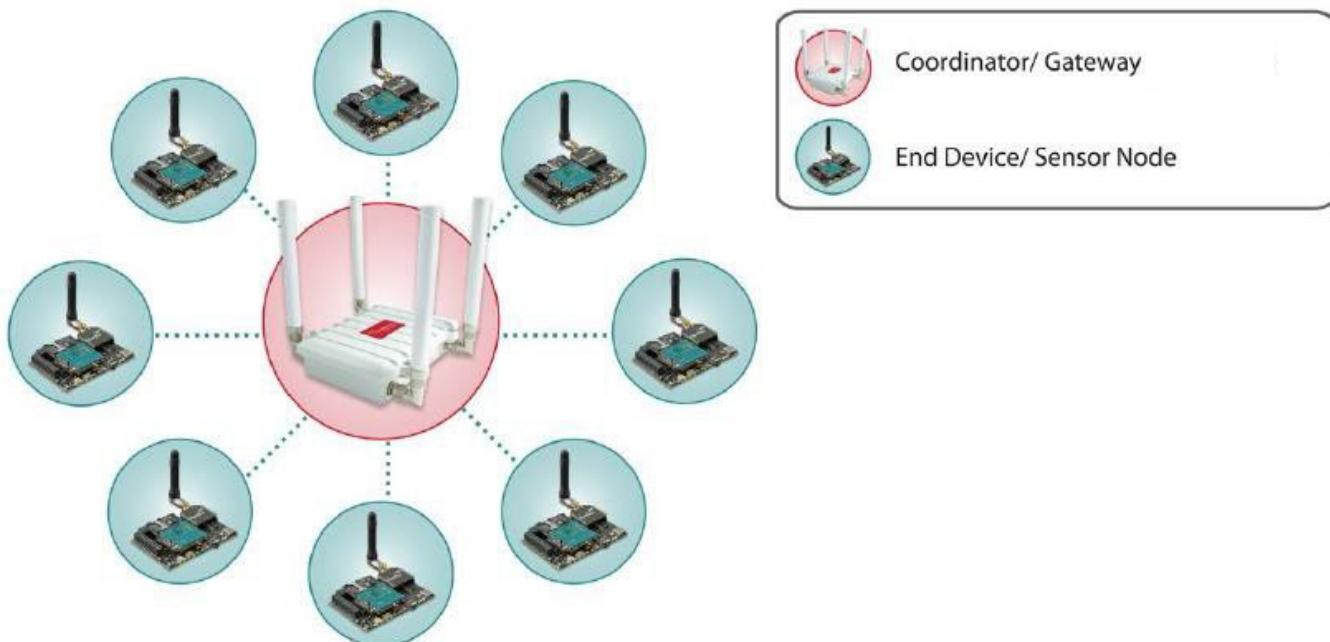
Capa MAC

- *Seguridad*
  - *Los dispositivos pueden tener la capacidad de:*
    - *Gestionar una lista de control de acceso*
    - *Utilizar cifrado simétrico (AES-128)*
    - *Añadir al mensaje un código de integridad*
  - *Servicios de seguridad*
    - *Control de acceso*
    - *Cifrado de datos*
    - *Integridad de frames*

# ZigBee

## Topologías

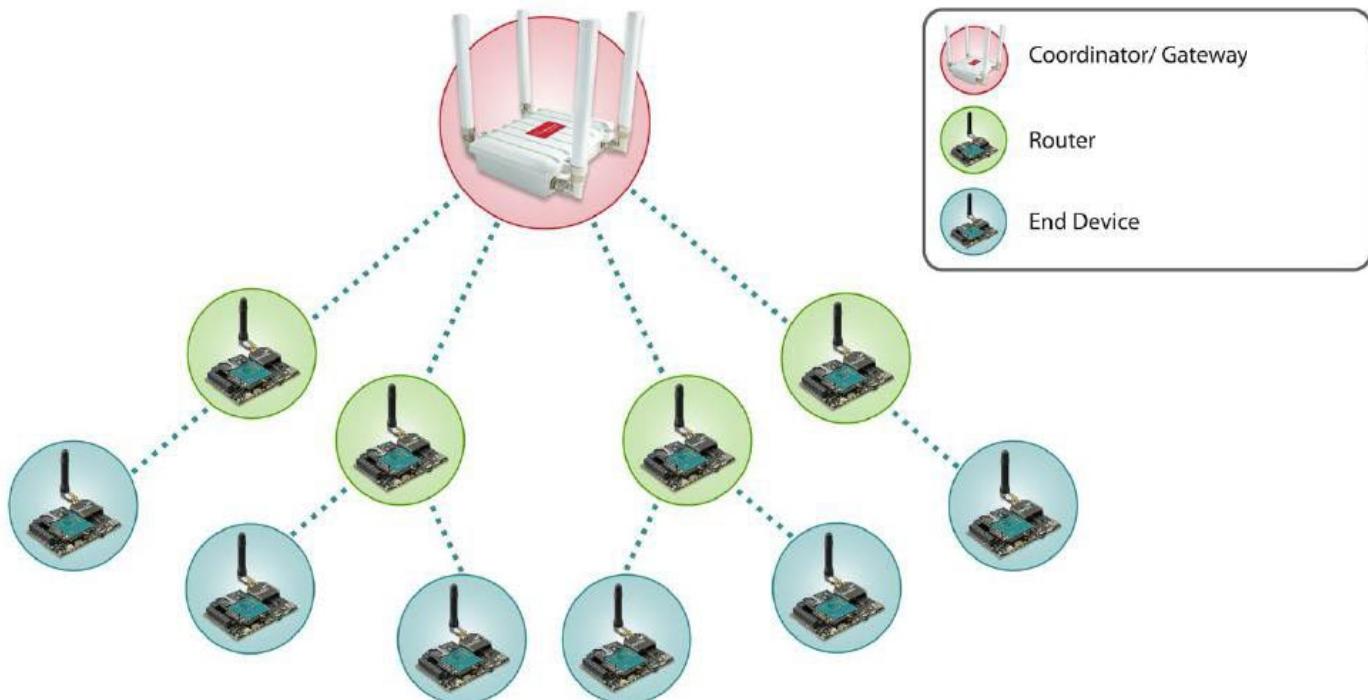
- *Estrella*



# ZigBee

## Topologías

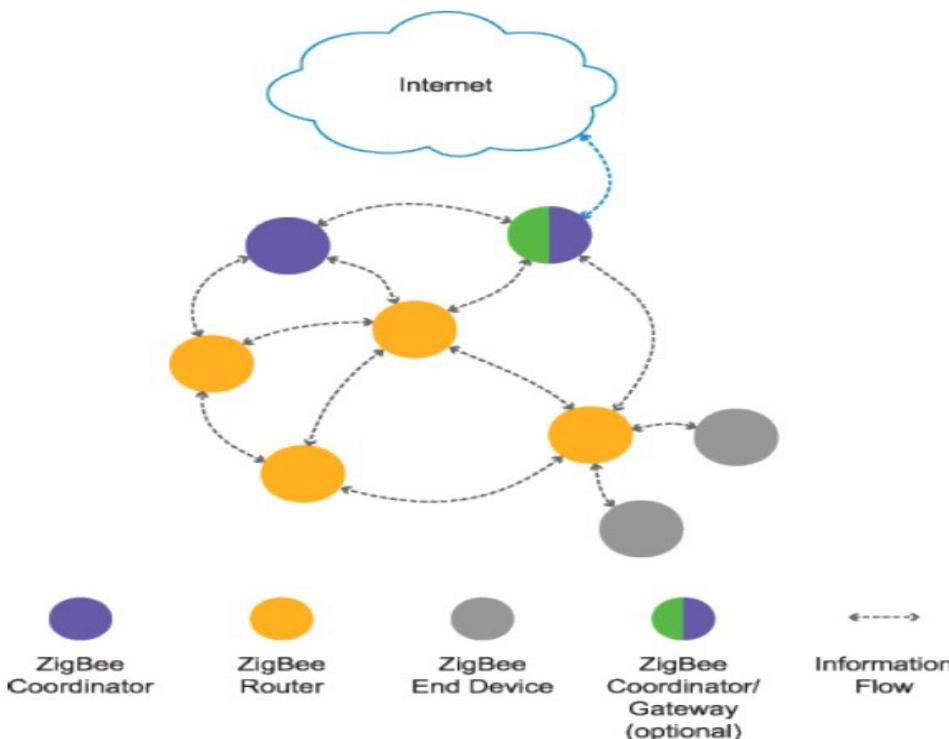
- Árbol



# ZigBee

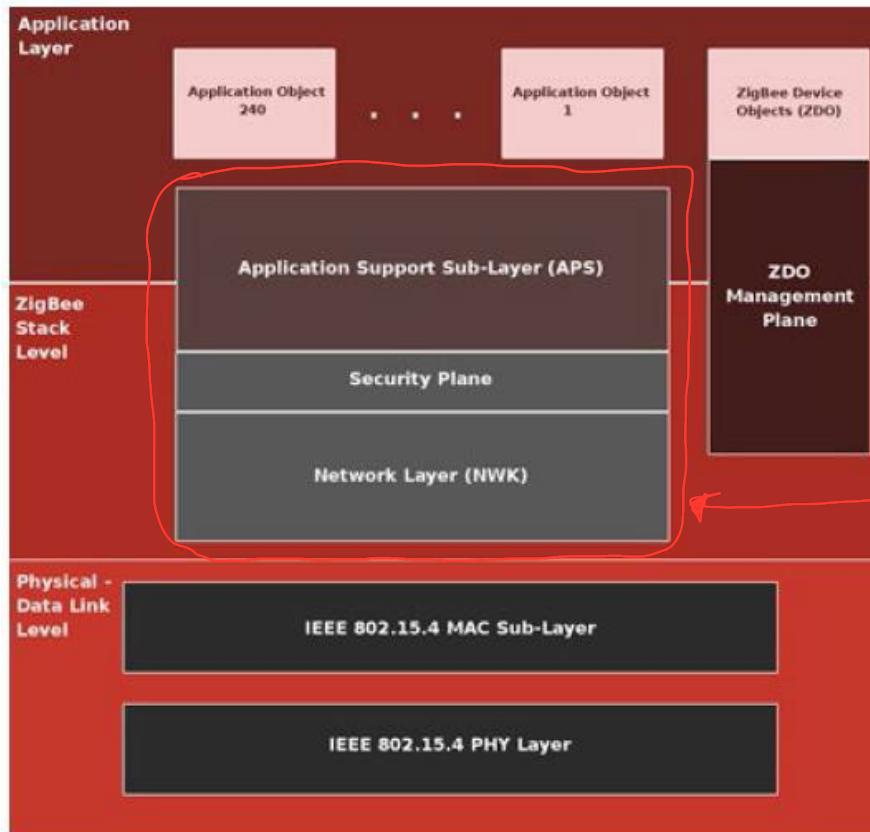
## Topologías

- Con acceso a Internet



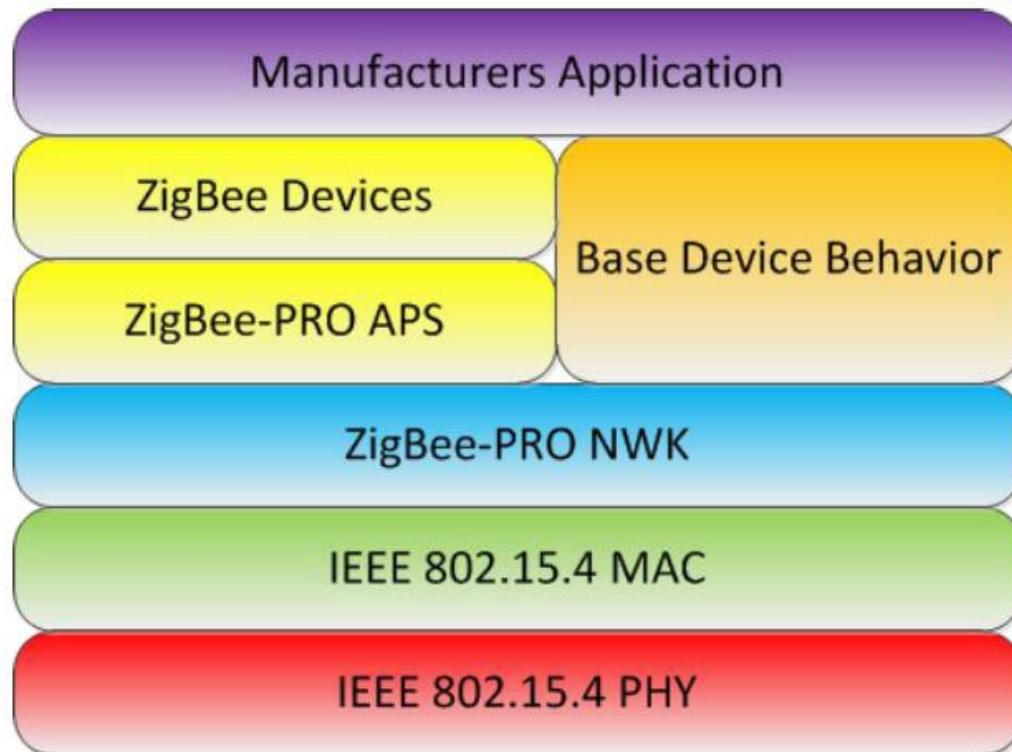
# ZigBee

## Arquitectura



# ZigBee

## Arquitectura



# ZigBee

Arquitectura

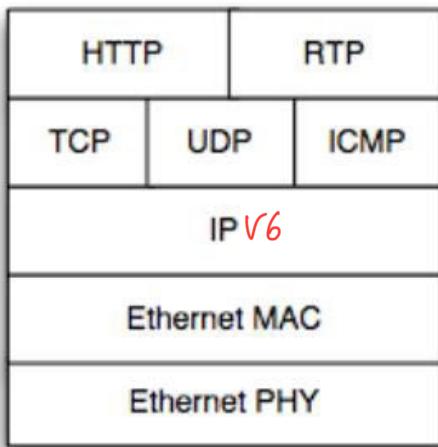
- ZigBee utiliza las ventajas que ofrece la capa física y de enlace especificada en IEEE 802.15.4
- ZigBee añade el nivel de red, seguridad y aplicación
  - Dirección de red de 16 bits asignada por el coordinador cuando el nodo se une a la red
  - Enrutamiento basado en AODV (Vector distancia bajo Demanda ad-Hoc)

# 6LoWPAN

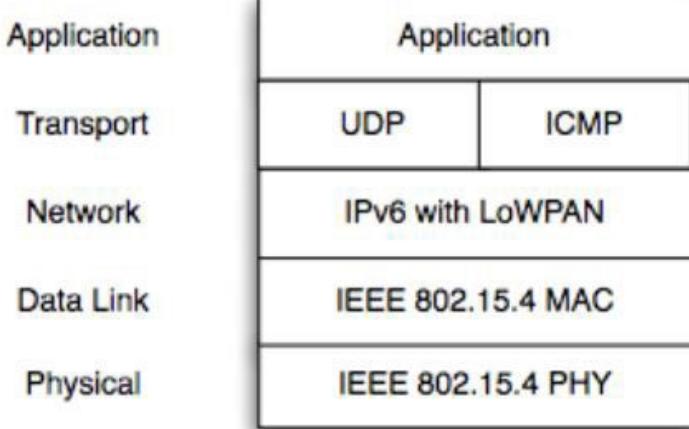
## Introducción

- *IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks*
- *Mecanismo de compresión de cabecera para enviar paquetes IPv6 en redes IEEE 802.15.4 (RFC 6282)*

TCP/IP Protocol Stack



6LoWPAN Protocol Stack



# 6LoWPAN

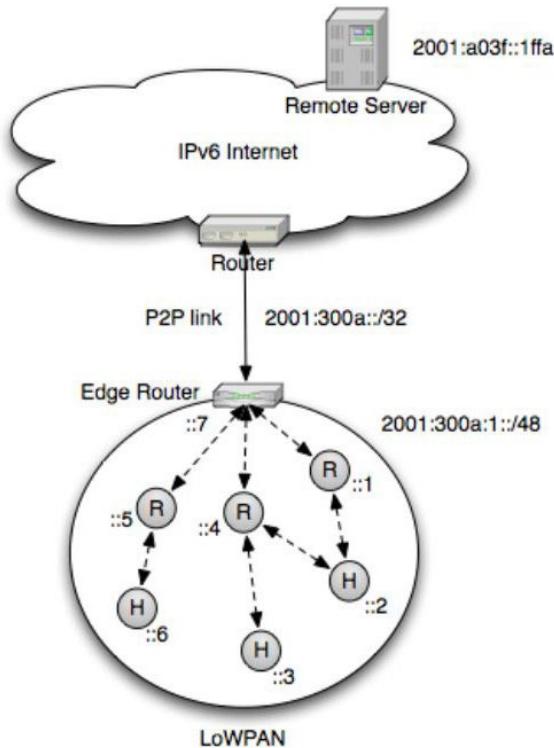
## Introducción

- *Payload 127 bytes en IEEE 802.15.4*
  - ~~40~~<sup>48</sup> bytes cabecera IPv6 → Necesario reducir
- *Direccionamiento*
  - La red inalámbrica es una única red IPv6 con una unica dirección MAC
  - Se omite el prefijo IPv6
  - El prefijo global es conocido por todos los nodos
  - El prefijo local se obtiene por compresión de la cabecera

# 6LoWPAN

## Introducción

- *Direccionamiento*

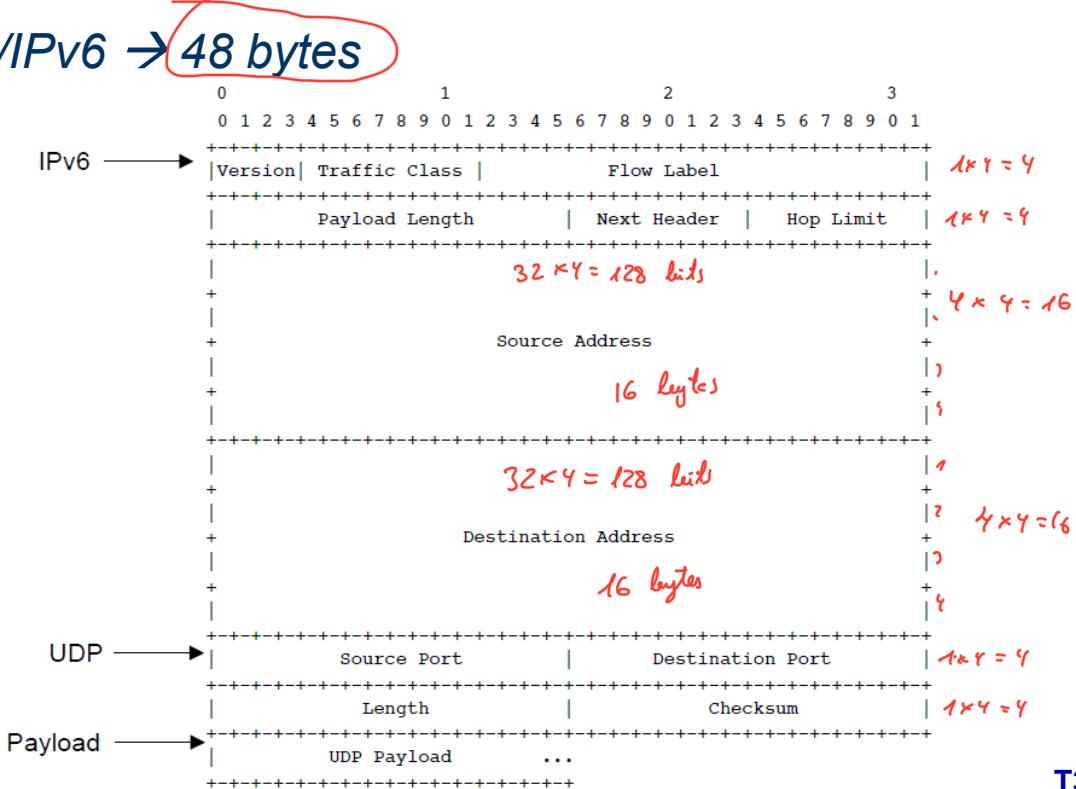


# 6LoWPAN

## Introducción

- Cabecera

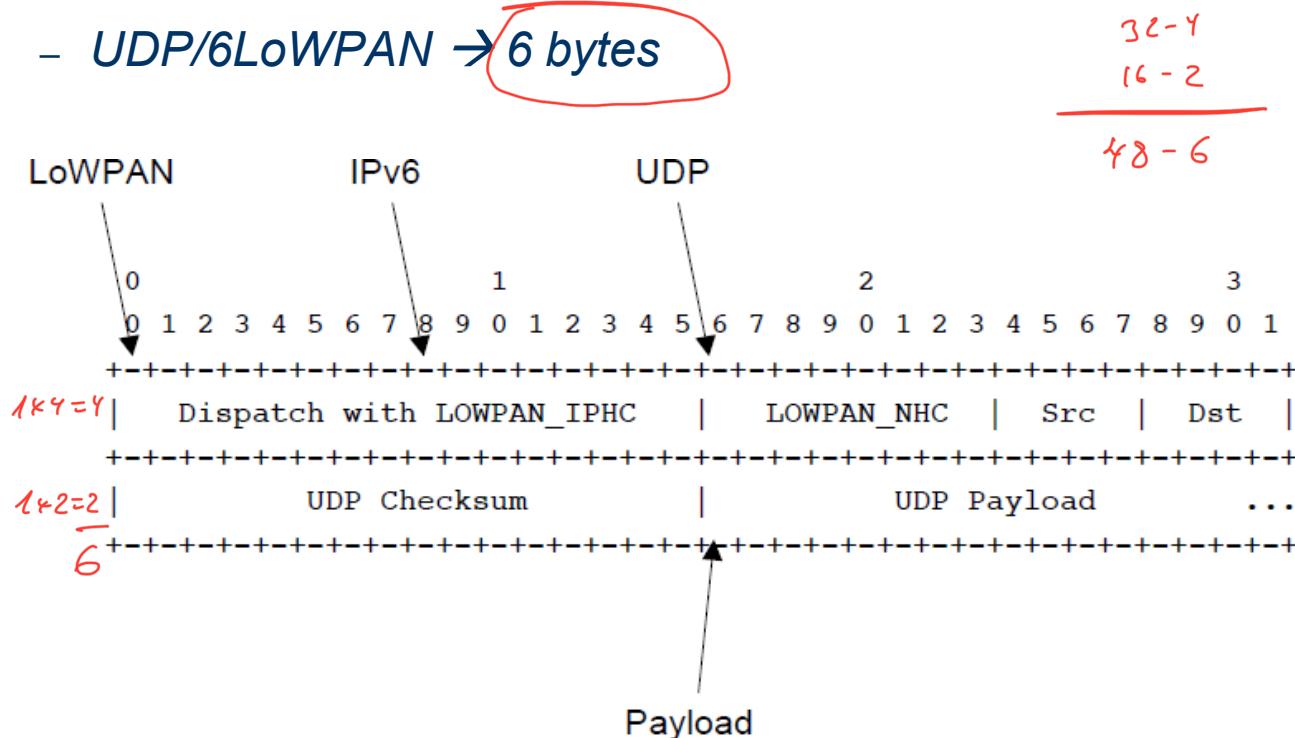
– UDP/IPv6 → 48 bytes



# 6LoWPAN

## Introducción

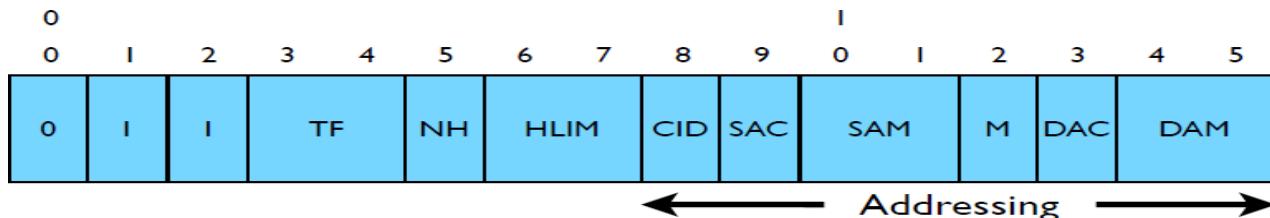
- Cabecera
  - $UDP/6LoWPAN \rightarrow 6 \text{ bytes}$



# 6LoWPAN

## Introducción

- Compresión IPv6
  - IPHC



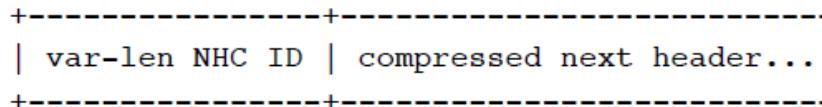
|      |        |                               |
|------|--------|-------------------------------|
| TF   | 2 bits | Traffic Class and Flow Label  |
| NH   | 1 bit  | Next Header                   |
| HLIM | 2 bits | Hop Limit                     |
| CID  | 1 bit  | Context Identifier Extension  |
| SAC  | 1 bit  | Source Address Context        |
| SAM  | 2 bits | Source Address Mode           |
| M    | 1 bit  | Multicast Address Compression |
| DAC  | 1 bit  | Destination Address Context   |
| DAM  | 2 bits | Destination Address Mode      |

# 6LoWPAN

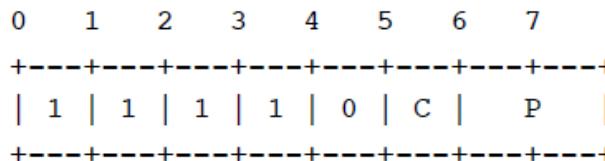
## Introducción

- Compresión IPv6
  - NHC

NHC Format



UDP NHC Encoding

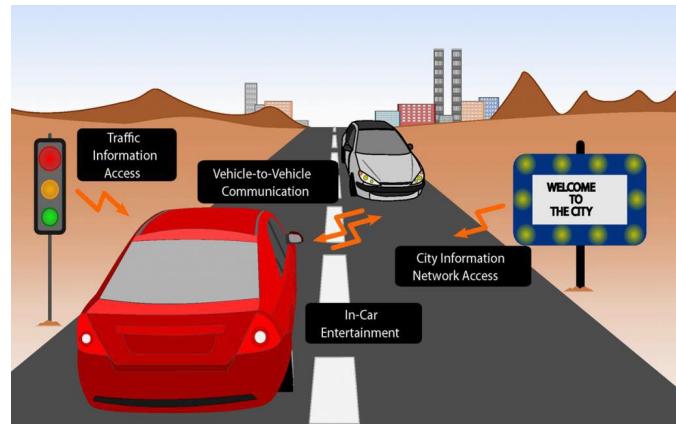
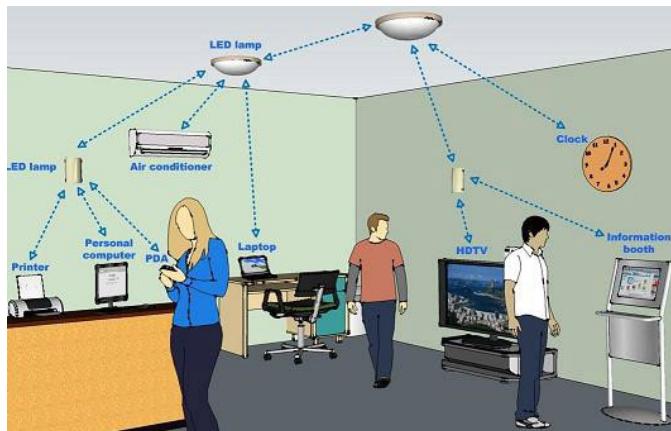


C = Checksum Compression

P = UDP Port Compression

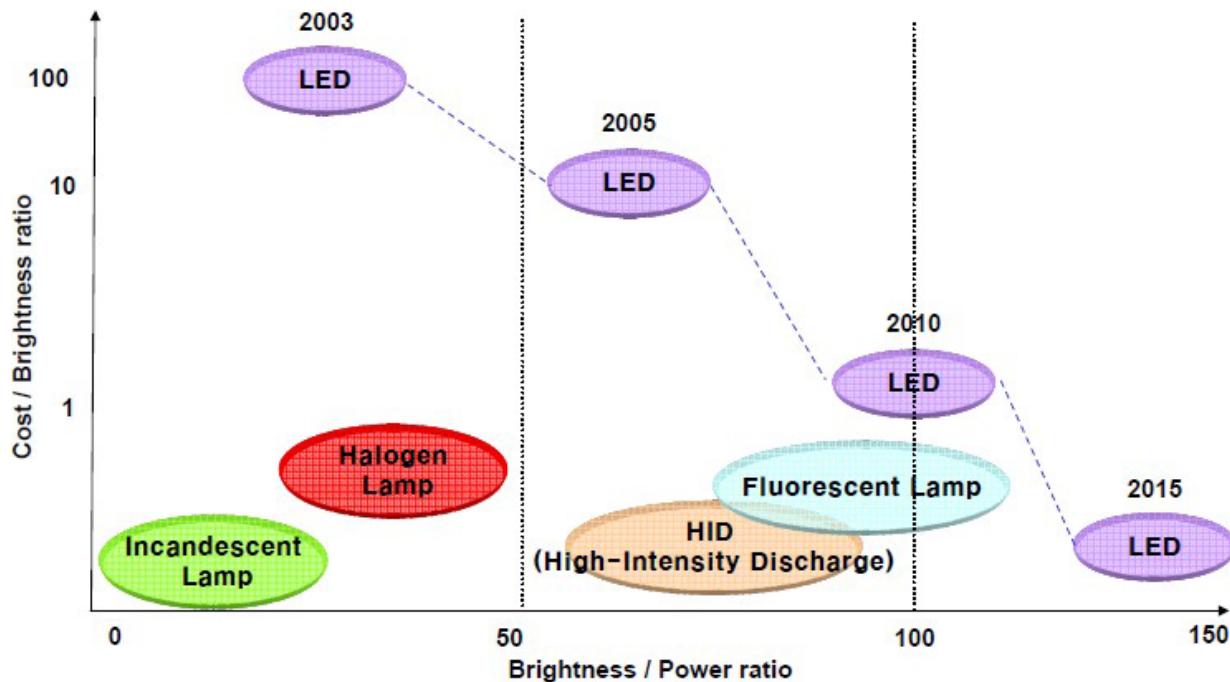
# VLC (Visible Light Communication)

- VLC → iluminación + comunicación



# VLC (Visible Light Communication)

- VLC → iluminación + comunicación



# VLC (Visible Light Communication)

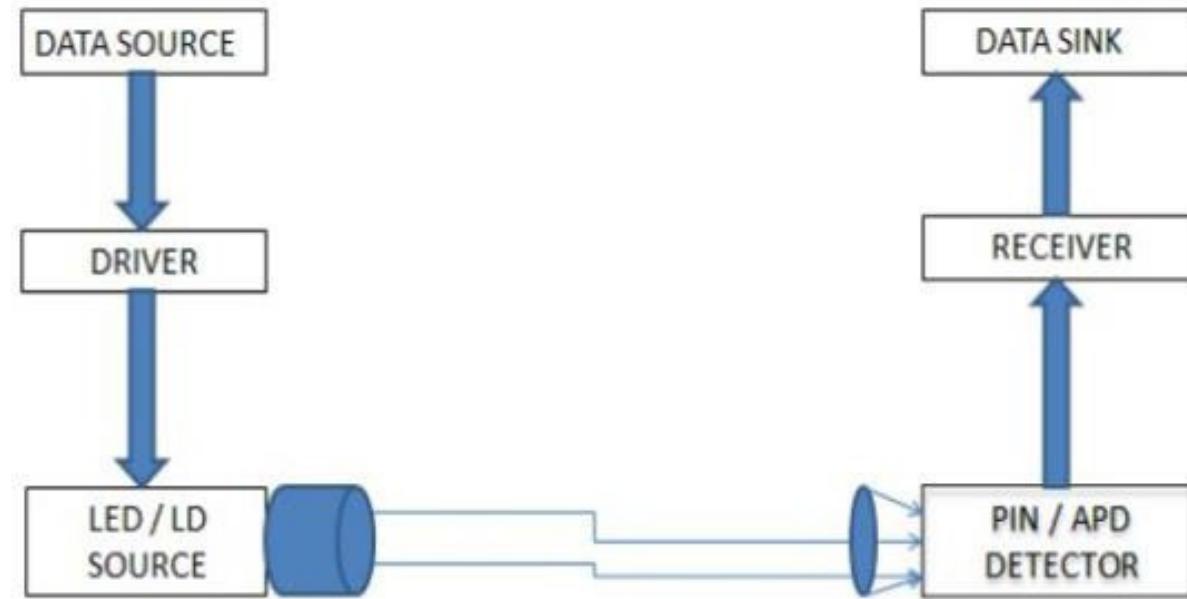
- *Ventajas*

- *No hay regulación respecto al uso de la luz (banda sin licencia)*
  - *La luz es inofensiva al cuerpo humano*
  - *Las ondas electromagnéticas no afecta a la luz*
  - *Las señales no pueden ser interceptadas*

# VLC (Visible Light Communication)

- *Desventajas*
  - *La señal óptica no puede atravesar paredes*
    - *Como ventaja aporta seguridad*
  - *Sólo funciona adecuadamente cuando hay línea de visión directa (LOS) entre transmisor y receptor*
  - *El enlace de subida es difícil de implementar (incómodo visualmente)*

# VLC (Visible Light Communication)



# VLC (Visible Light Communication)

- IEEE 802.15.7 → Diciembre de 2011

a nivel fijo y a nivel de enlace

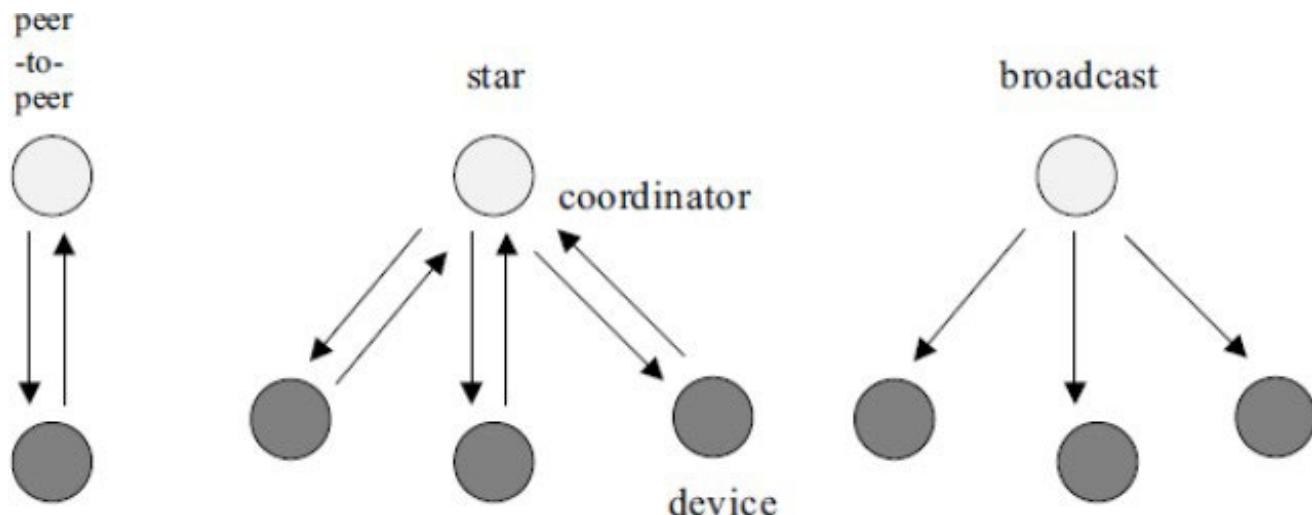
- Define la capa física y MAC para comunicaciones ópticas de corto alcance usando luz visible
- El espectro utilizado es de 780 nm a 380 nm (longitud de onda) → ~400-800 THz
- Soporta enlaces fijos y móviles
- Mitigación de parpadeo (flickering) – Reducir las fluctuaciones por el brillo
- Control de atenuación (dimming)

# IEEE 802.15.7

- *Capa Física. Define 3 tipos:*
  - *PHY I: Destinado al uso en exteriores en aplicaciones de baja tasa de datos. De 11.67 a 266.6 kb/s. Este modo utiliza modulación OOK (on-off keying) y modulación por posición de pulso variable (VPPM).*
  - *PHY II: Destinado a uso en interiores en aplicaciones con tasas de datos moderadas. De 1.25 a to 96 Mb/s. También utiliza modulaciones OOK y VPPM.*
  - *PHY III: Destinado a aplicaciones que utilicen modulación CSK (color-shift keying) con múltiples fuentes de luz con diferentes frecuencias (colores). De 12 a 96 Mb/s*

# IEEE 802.15.7

- Capa Física. Topologías soportadas:



# IEEE 802.15.7

- Capa MAC
  - Toma como base la especificación de 802.15.4
    - Supertrama, VPAN (Visible PAN), formato tramas

