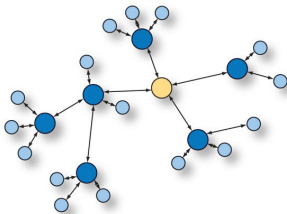


# Protocolos de Comunicación en Sistemas Embebidos

## 802.15.4 LR-WPAN

**Carrera de Especialización en Sistemas Embebidos - FIUBA**

Ing. Patricio Bos  
Esp. Ing. Juan Montilla





# Organización de la presentación

802.15.4  
LR-WPAN

Introducción

IEEE 802  
IEEE 802.15.4

LR-WPAN

Dispositivos  
Topología  
Arquitectura  
Transferencia de  
datos  
CSMA/CA  
Tramas  
Modulación

Mote LSE

Mote  
TI CC2520

Referencias

## 1 Introducción

- Grupo de trabajo IEEE 802
- IEEE 802.15.4 LR-WPAN

## 2 LR-WPAN

- Tipos de Dispositivos
- Topología de la red
- Arquitectura del estándar
- Modelo de Transferencia de datos
- CSMA/CA
- Estructura de las Tramas
- Modulación

## 3 Mote LSE

- Mote
- TI CC2520

## 4 Referencias



# Grupos de trabajo IEEE

802.15.4  
LR-WPAN

Introducción

IEEE 802

IEEE 802.15.4

LR-WPAN

Dispositivos

Topología

Arquitectura

Transferencia de  
datos

CSMA/CA

Tramas

Modulación

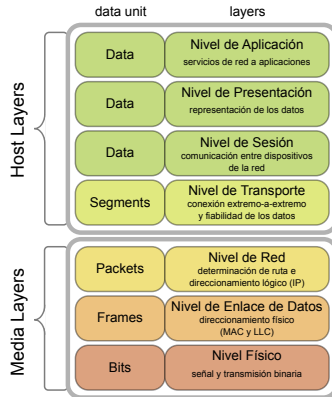
Mote LSE

Mote

TI CC2520

Referencias

- IEEE 802: Desarrollar estándares para redes de área local y metropolitana (LAN y MAN)
  - IEEE 802.3: Ethernet
  - IEEE 802.11: Wi-fi
  - ...
- IEEE 802.15: Redes inalámbricas de área personal (WPAN)
  - IEEE 802.15.1: Bluetooth
  - IEEE 802.15.3: WPANs de alta tasa de transferencia de datos (HR-WPAN)
  - IEEE 802.15.4: WPANs de baja tasa de transferencia de datos (LR-WPAN)





# IEEE 802.15.4

## LR-WPAN

802.15.4  
LR-WPAN

Introducción

IEEE 802  
IEEE 802.15.4

LR-WPAN

Dispositivos  
Topología  
Arquitectura  
Transferencia de  
datos  
CSMA/CA  
Tramas  
Modulación

Mote LSE

Mote  
TI CC2520

Referencias

- Versiones: 802.15.4:2003, 802.15.4:2006 y **802.15.4:2011**
- Define:
  - Nivel físico (PHY)
  - Control de acceso al medio (MAC)
- Características:
  - Comunicaciones simples de bajo costo.
  - Bajas tasas de transferencia (throughput).
  - Para aplicaciones con limitaciones de potencia.
  - Confiabilidad en la transferencia de datos.
  - Opera en una banda de frecuencia sin licencia.



# IEEE 802.15.4

Mercado

802.15.4  
LR-WPAN

Introducción

IEEE 802  
IEEE 802.15.4

LR-WPAN

Dispositivos  
Topología  
Arquitectura  
Transferencia de  
datos  
CSMA/CA  
Tramas  
Modulación

Mote LSE

Mote  
TI CC2520

Referencias

- Uso doméstico e industrial.
- Dispositivos con fuente de alimentación autónoma.
  - Batería.
  - Panel solar.
- Extremadamente bajo consumo de potencia (Ciclo de Trabajo).
- Principales áreas:
  - Domótica y seguridad.
  - Productos electrónicos de consumo.
  - Cuidado de la salud.
  - Control y monitoreo de vehículos.
  - Agricultura.



# IEEE 802.15.4

## Características Generales

802.15.4  
LR-WPAN

Introducción

IEEE 802  
IEEE 802.15.4

LR-WPAN

Dispositivos  
Topología  
Arquitectura  
Transferencia de  
datos  
CSMA/CA  
Tramas  
Modulación

Mote LSE

Mote  
TI CC2520

Referencias

- Área de operación: 10m
- Tasa de transferencia: 250kbs
- Adecuación a aplicaciones de tiempo real: *Guaranteed Time Slots* (GTSs)
- Mecanismo para evitar colisiones:  
*Carrier Sense Multiple-Access / Collision Avoidance* (CSMA/CA)
- Control de consumo de energía:
  - *Link Quality Indicator* (LQI)
  - *Energy Detection* (ED)



# Componentes

## Tipos de dispositivos

802.15.4  
LR-WPAN

Introducción

IEEE 802  
IEEE 802.15.4

LR-WPAN

Dispositivos

Topología

Arquitectura

Transferencia de  
datos

CSMA/CA

Tramas

Modulación

Mote LSE

Mote

TI CC2520

Referencias

- Full-function device (FFD):  
Capaz de ser PAN coordinator o coordinator.
- Reduced-function device (RFD):  
Sólo puede comunicarse con un FFD.  
Requerimientos mínimos de recursos.





# Topología de la Red

## Estrella o punto a punto

802.15.4  
LR-WPAN

Introducción

IEEE 802  
IEEE 802.15.4

LR-WPAN

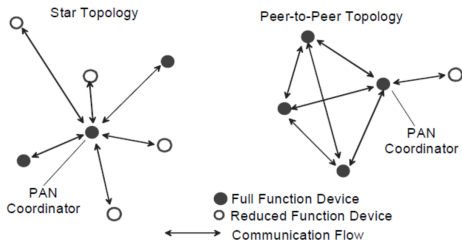
Dispositivos  
Topología  
Arquitectura  
Transferencia de  
datos  
CSMA/CA  
Tramas  
Modulación

Mote LSE

Mote  
TI CC2520

Referencias

- Estrella (Star)
  - PAN coordinator.
  - Comunicaciones centralizadas.
  - Ej: Automatización del hogar, Periféricos de PC, Juegos,...
- Punto a punto (Peer-to-Peer)
  - PAN coordinator.
  - Permite redes más complejas.
  - Multi-Hop routing.
  - Ej: Control industrial, WSNs, Tracking de inventario,...







# Topología Punto a punto

## Árbol de Cluster

802.15.4  
LR-WPAN

Introducción

IEEE 802  
IEEE 802.15.4

LR-WPAN

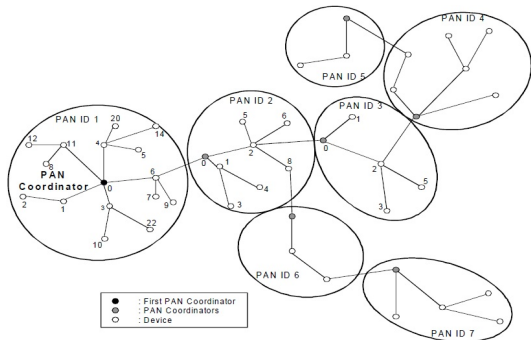
Dispositivos  
Topología  
Arquitectura  
Transferencia de datos  
CSMA/CA  
Tramas  
Modulación

Mote LSE

Mote  
TI CC2520

Referencias

- Mayoría de FFDs.
- 1 *overall PAN coordinator*.
- RFDs al final de una rama.
- Aumenta el área de cobertura.
- Aumenta la latencia de la red.





# Arquitectura del estándar

802.15.4  
LR-WPAN

Introducción

IEEE 802  
IEEE 802.15.4

LR-WPAN

Dispositivos  
Topología

Arquitectura

Transferencia de  
datos

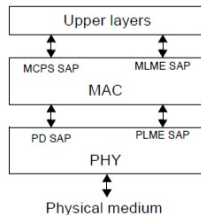
CSMA/CA  
Tramas  
Modulación

Mote LSE

Mote  
TI CC2520

Referencias

- MAC Sublayer
  - Beacon management
  - Channel access
  - GTSs management
  - Frame validation, ACKs
  - Asociación y desasociación de dispositivos
- Physical Layer (PHY):
  - Activación/Desactivación de RF
  - ED, LQI, Clear Channel Assessment (CCA)
  - Channel selection
  - Tx y Rx de paquetes a través del medio físico





# MAC: Beacons, Supertramas y GTSs

802.15.4  
LR-WPAN

Introducción

IEEE 802  
IEEE 802.15.4

LR-WPAN

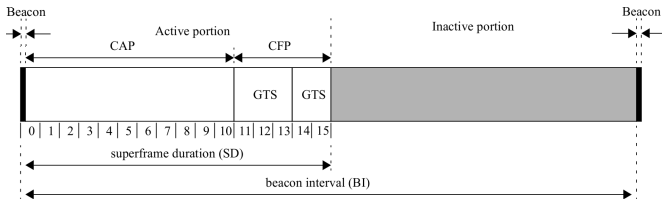
Dispositivos  
Topología  
**Arquitectura**  
Transferencia de  
datos  
CSMA/CA  
Tramas  
Modulación

Mote LSE

Mote  
TI CC2520

Referencias

- 16 time slots.
- Contention Access Period (CAP) **con CSMA/CA.**
- Contention Free Period (CFP) para los GTSs, **sin CSMA/CA.**
- Los GTSs son opcionales y reducen el CAP.
- Tiempo inactivo → modo bajo consumo.

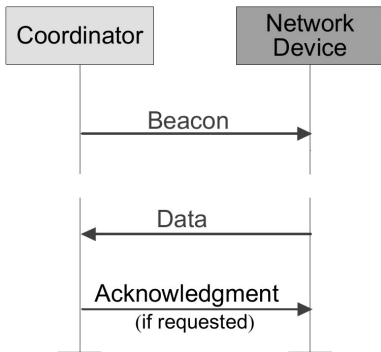




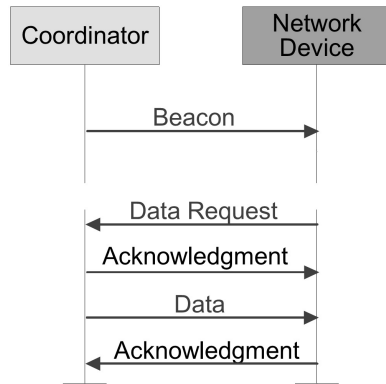
# Transferencia de Datos

802.15.4  
LR-WPAN

## Con beacon



Device → Coordinator



Coordinator → Device

Introducción

IEEE 802  
IEEE 802.15.4

LR-WPAN

Dispositivos  
Topología  
Arquitectura  
Transferencia de  
datos  
CSMA/CA  
Tramas  
Modulación

Mote LSE

Mote  
TI CC2520

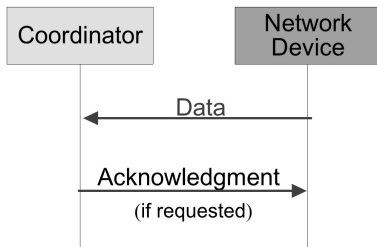
Referencias



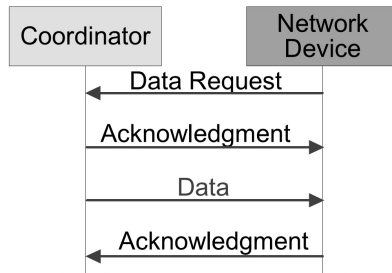
# Transferencia de Datos

802.15.4  
LR-WPAN

## Sin beacon



Device → Coordinator



Coordinator → Device

Introducción

IEEE 802  
IEEE 802.15.4

LR-WPAN

Dispositivos  
Topología  
Arquitectura  
Transferencia de  
datos  
CSMA/CA  
Tramas  
Modulación

Mote LSE

Mote  
TI CC2520

Referencias

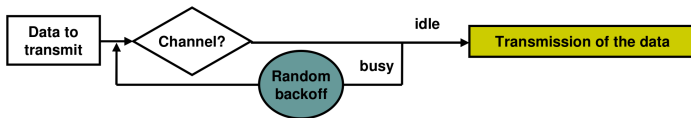


# Carrier Sense multiple Access with Collision Avoidance

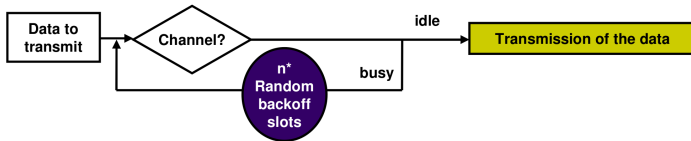
802.15.4  
LR-WPAN

## Slotted CSMA/CA vs Unslotted CSMA/CA

- Unslotted CSMA-CA for nonbeacon-enabled PANs:



- Slotted CSMA-CA for beacon-enabled PANs:



Introducción

IEEE 802

IEEE 802.15.4

LR-WPAN

Dispositivos

Topología

Arquitectura

Transferencia de  
datos

CSMA/CA

Tramas

Modulación

Mote LSE

Mote

TI CC2520

Referencias

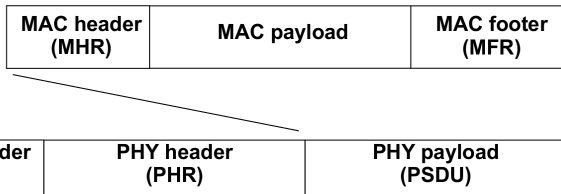


# Estructura de las Tramas

802.15.4  
LR-WPAN

Se definen 4 tipos de trama MAC:

- Beacon
- Data
- Acknowledgement
- MAC Command



Introducción

IEEE 802  
IEEE 802.15.4

LR-WPAN

Dispositivos  
Topología  
Arquitectura  
Transferencia de  
datos  
CSMA/CA  
Tramas  
Modulación

Mote LSE

Mote  
TI CC2520

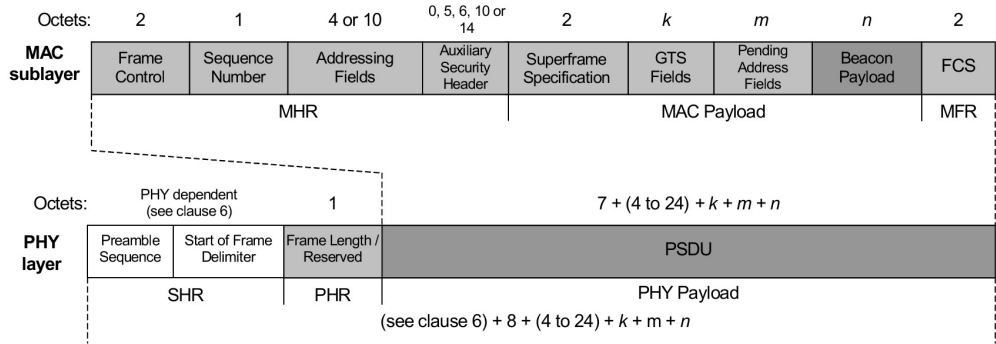
Referencias



# Tramas

802.15.4  
LR-WPAN

## Tipo de Frame: **Beacon**



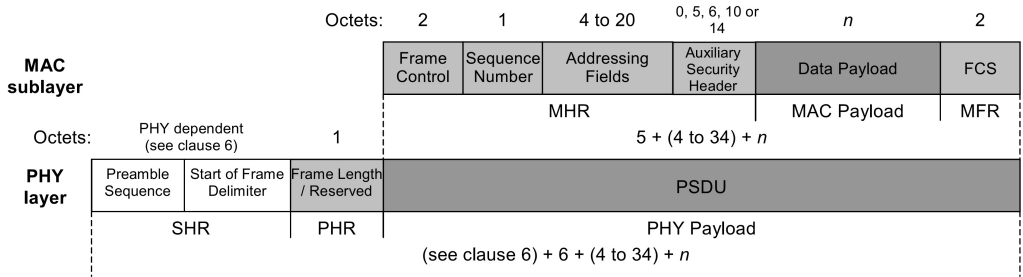




# Tramas

802.15.4  
LR-WPAN

## Tipo de Frame: **Data**



Introducción

IEEE 802  
IEEE 802.15.4

LR-WPAN

Dispositivos  
Topología

Arquitectura  
Transferencia de  
datos

CSMA/CA  
**Tramas**  
Modulación

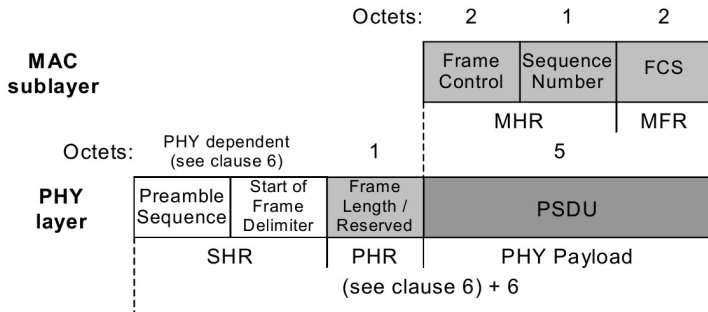
Mote LSE

Mote  
TI CC2520

Referencias



## Tipo de Frame: **Acknowledgement** (Ack)

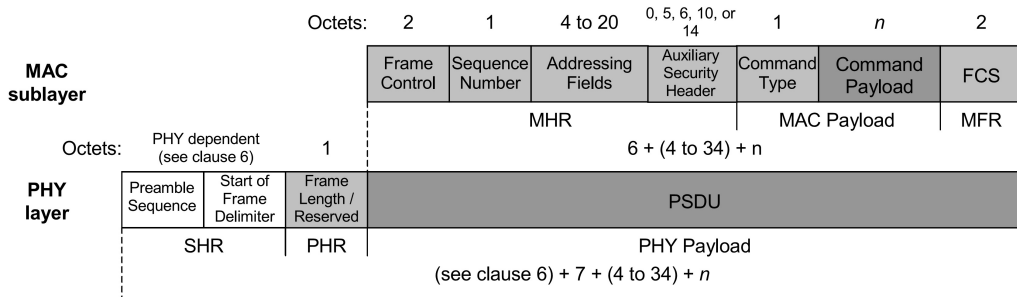




# Tramas

802.15.4  
LR-WPAN

## Tipo de Frame: **MAC Command**



Introducción

IEEE 802  
IEEE 802.15.4

LR-WPAN

Dispositivos  
Topología  
Arquitectura  
Transferencia de datos  
CSMA/CA  
Tramas  
Modulación

Mote LSE

Mote  
TI CC2520

Referencias



# Tramas

802.15.4  
LR-WPAN

## Frame Control Field

Bits: 0-2	3	4	5	6	7-9	10-11	12-13	14-15
Frame Type	Security Enabled	Frame Pending	Acknowledge request	Intra PAN	Reserved	Destination addressing mode	Reserved	Source addressing mode

### Format of the Frame Control Field (FCF)

Frame type value $b_2 b_1 b_0$	Description
000	Beacon
001	Data
010	Acknowledgment
011	MAC command
100–111	Reserved

Addressing mode value $b_1 b_0$	Description
00	PAN identifier and address fields are not present.
01	Reserved.
10	Address field contains a 16-bit short address.
11	Address field contains a 64-bit extended address.

Introducción

IEEE 802  
IEEE 802.15.4

LR-WPAN

Dispositivos  
Topología  
Arquitectura  
Transferencia de  
datos  
CSMA/CA  
Tramas  
Modulación

Mote LSE

Mote  
TI CC2520

Referencias



# Modulación

802.15.4  
LR-WPAN

Introducción

IEEE 802  
IEEE 802.15.4

LR-WPAN

Dispositivos  
Topología  
Arquitectura  
Transferencia de  
datos

CSMA/CA

Tramas

Modulación

Mote LSE

Mote  
TI CC2520

Referencias

PHY (MHz)	Frequency band (MHz)	Spreading parameters		Data parameters		
		Chip rate (kchip/s)	Modulation	Bit rate (kb/s)	Symbol rate (ksymbol/s)	Symbols
780	779–787	1000	O-QPSK	250	62.5	16-ary orthogonal
780	779–787	1000	MPSK	250	62.5	16-ary orthogonal
868/915	868–868.6	300	BPSK	20	20	Binary
	902–928	600	BPSK	40	40	Binary
868/915 (optional)	868–868.6	400	ASK	250	12.5	20-bit PSSS
	902–928	1600	ASK	250	50	5-bit PSSS
868/915 (optional)	868–868.6	400	O-QPSK	100	25	16-ary orthogonal
	902–928	1000	O-QPSK	250	62.5	16-ary orthogonal
950	950–956	—	GFSK	100	100	Binary
950	950–956	300	BPSK	20	20	Binary
2450 DSSS	2400–2483.5	2000	O-QPSK	250	62.5	16-ary orthogonal
UWB sub-gigahertz (optional)	250–750	As defined in 14.4.1				
2450 CSS (optional)	2400–2483.5	As defined in 13.2		250	167 (as defined in 13.4.2)	
		As defined in 13.2		1000	167 (as defined in 13.4.2)	
UWB low band (optional)	3244–4742	As defined in 14.4.1				
UWB high band (optional)	5944–10 234	As defined in 14.4.1				



# Nodo Mote LSE-FIUBA

802.15.4  
LR-WPAN

Introducción

IEEE 802  
IEEE 802.15.4

LR-WPAN

Dispositivos  
Topología  
Arquitectura  
Transferencia de  
datos  
CSMA/CA  
Tramas  
Modulación

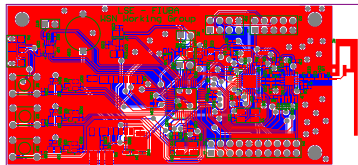
Mote LSE

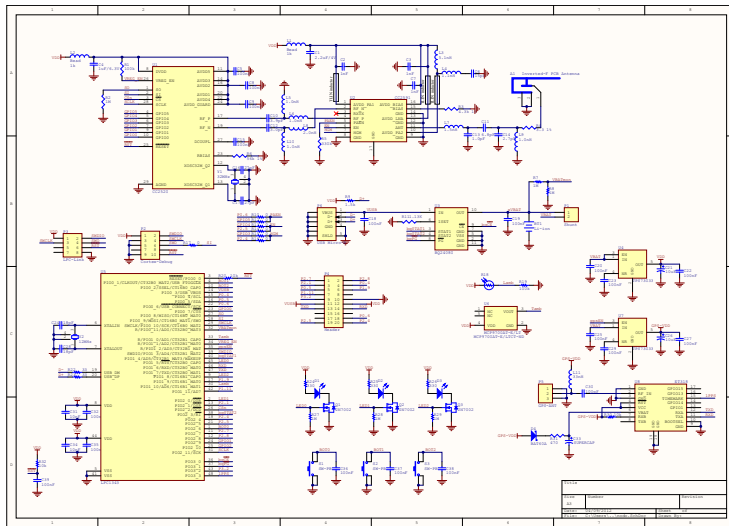
Mote  
TI CC2520

Referencias

## ■ Nodo Mote desarrollado en el LSE-FIUBA

- LPC1343 ARM Cortex-M3 @72MHz
- Transceptor TI-2520
- Extensor de rango TI-2591
- 3 Pulsadores
- 3 leds
- Antena y balun en microstrip







# Transceptor DSSS TI CC2520

802.15.4  
LR-WPAN

Introducción

IEEE 802  
IEEE 802.15.4

LR-WPAN

Dispositivos  
Topología  
Arquitectura  
Transferencia de  
datos  
CSMA/CA  
Tramas  
Modulación

Mote LSE

Mote  
TI CC2520

Referencias

- 2394-2507 MHz
- Muy bajo consumo de corriente
  - RX: 18.5 - 22.3 mA.
  - TX: 25.8 - 33.6 mA.
- Interfaz de usuario
  - SPI
  - 6 GPIOs
  - Respuestas automáticas a diferentes eventos
  - Modo de Packet Sniffer embebido







# Soporte por Hardware a 802.15.4 MAC

802.15.4  
LR-WPAN

Introducción

IEEE 802  
IEEE 802.15.4

LR-WPAN

Dispositivos  
Topología  
Arquitectura  
Transferencia de  
datos  
CSMA/CA  
Tramas  
Modulación

Mote LSE

Mote  
TI CC2520

Referencias

- Generador automático de preámbulo
- Inserción y detección de palabra de sincronización
- CRC-16 en el MAC payload
- Frame Filtering
- Ack automático
- Clear Channel Assessment (CCA)
- Energy Detection (ED)
- Link Quality Indication (LQI)





# Circuito de Aplicación Típico

802.15.4  
LR-WPAN

Introducción

IEEE 802  
IEEE 802.15.4

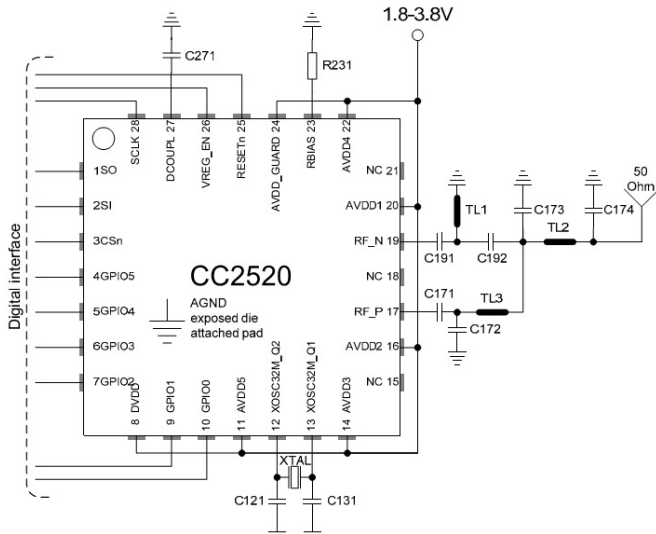
LR-WPAN

Dispositivos  
Topología  
Arquitectura  
Transferencia de  
datos  
CSMA/CA  
Tramas  
Modulación

Mote LSE

Mote  
TI CC2520

Referencias





# Diagrama Funcional

802.15.4  
LR-WPAN

Introducción

IEEE 802  
IEEE 802.15.4

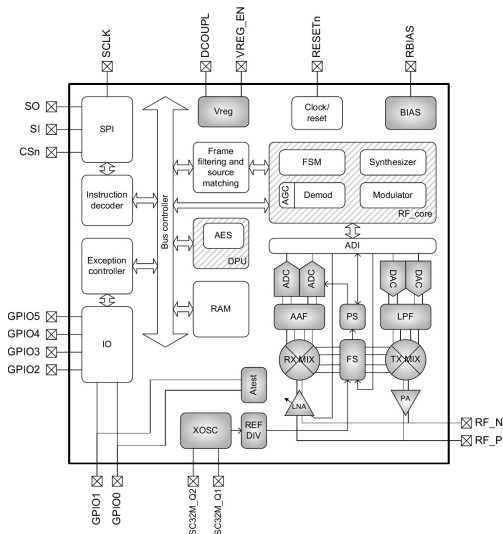
LR-WPAN

Dispositivos  
Topología  
Arquitectura  
Transferencia de  
datos  
CSMA/CA  
Tramas  
Modulación

Mote LSE

Mote  
TI CC2520

Referencias





# Procesamiento de tramas: Tx

802.15.4  
LR-WPAN

Introducción

IEEE 802  
IEEE 802.15.4

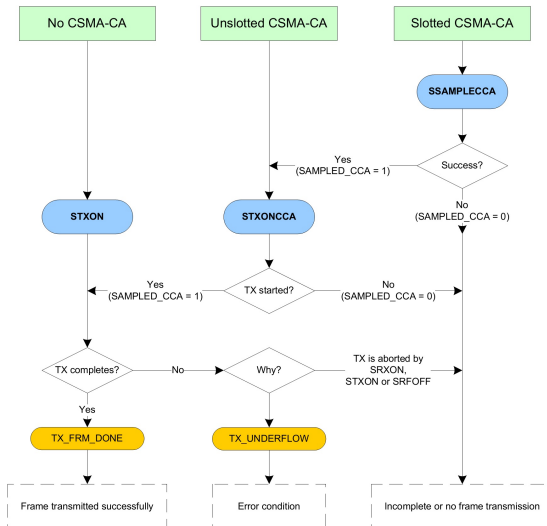
LR-WPAN

Dispositivos  
Topología  
Arquitectura  
Transferencia de  
datos  
CSMA/CA  
Tramas  
Modulación

Mote LSE

Mote  
TI CC2520

Referencias





# Procesamiento de tramas: Rx filtering

802.15.4  
LR-WPAN

Introducción

IEEE 802  
IEEE 802.15.4

LR-WPAN

Dispositivos  
Topología  
Arquitectura  
Transferencia de  
datos  
CSMA/CA  
Tramas  
Modulación

Mote LSE

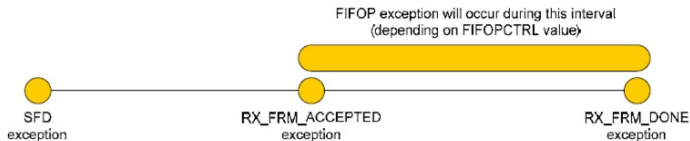
Mote  
TI CC2520

Referencias

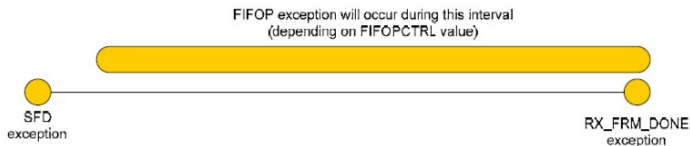
## Filtering is enabled, frame rejected



## Filtering is enabled, frame accepted



## Filtering is disabled





# Procesamiento de tramas: Rx matching

802.15.4  
LR-WPAN

Introducción

IEEE 802  
IEEE 802.15.4

LR-WPAN

Dispositivos  
Topología  
Arquitectura  
Transferencia de  
datos  
CSMA/CA  
Tramas  
Modulación

Mote LSE

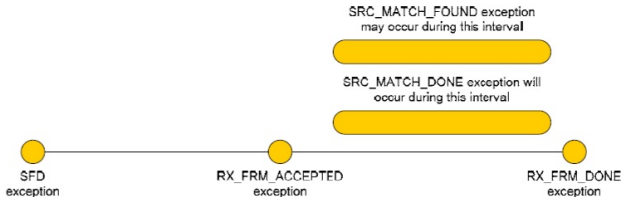
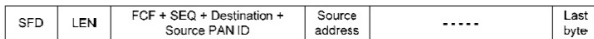
Mote  
TI CC2520

Referencias

**When there is no source address:**



**When there is a source address:**





# Referencias

802.15.4  
LR-WPAN

Introducción

IEEE 802  
IEEE 802.15.4

LR-WPAN

Dispositivos  
Topología  
Arquitectura  
Transferencia de  
datos  
CSMA/CA  
Tramas  
Modulación

Mote LSE

Mote  
TI CC2520

Referencias

- Estándar IEEE 802.15.4:2011
- IEEE 802.15 - Task Group 4 - Home Page
- IEEE Get Program
- LPC1343 - Datasheet
- LPC1343 - User Manual
- Texas Instrument CC2520 - Technical Documents
- Texas Instrument Design Note - 2.4 GHz Inverted F Antenna

# Protocolos de Comunicación en Sistemas Embebidos

## 802.15.4 LR-WPAN

**Carrera de Especialización en Sistemas Embebidos - FIUBA**

Ing. Patricio Bos: [pbos@fi.uba.ar](mailto:pbos@fi.uba.ar)

Esp. Ing. Juan Montilla: [juanvmontillac@gmail.com](mailto:juanvmontillac@gmail.com)

