

**Trabajo Final de Máster**  
**Máster Universitario de Ingeniería de Telecomunicación**

# **Implementación del Mecanismo de Acceso al Medio (MAC) IEEE 802.15.4e CSL (Coordinated Sampled Listening) sobre OpenWSN y Plataforma OpenMote**

Autor: **Sergio Gonzalo San José**

Fecha: **18/01/2015**



**Universitat Oberta  
de Catalunya**



# Tabla de Contenidos

## Índice

1. **Formulación del Problema**
2. Objetivos Principales
3. IEEE802.15.4 Std & IEEE802.15.4E Amendment
4. OpenWSN & Plataforma OpenMote
5. Implementación CSL
  - Descripción Funcional
  - Extensión de OpenWSN
  - Metodologías de Desarrollo, Gestión y Seguimiento
  - Entorno y Herramientas de Desarrollo
  - Maquina de Estados CSL de TX y RX
  - Secuencia Wake-Up de TX y RX
6. Escenario de Pruebas y Depuración CSL
7. Conclusiones y Líneas Futuras

# Formulación del Problema

- ❑ La formulación del problema está enraizada en el **concepto IoT**
  - ❑ Cualquier dispositivo físico tendrá la capacidad para comunicarse con su entorno, transmitiendo y recibiendo datos.
  - ❑ Apertura al desarrollo de nuevos **servicios adicionales de valor añadido**.
  
- ❑ Los **retos** de este escenario son:
  - ❑ Reducir el consumo de energía.
  - ❑ Incrementar la autonomía y movilidad de los nodos (motas).
  
- ❑ **Para hacer frente a estos retos, el problema puede formularse de la siguiente manera:**

***"Implementar el modo estandarizado CSL de bajo consumo sobre la implementación más importante de código abierto del estándar IEEE 802.15.4 (OpenWSN) con el fin de ampliar la aplicabilidad y usabilidad de la solución y optimizar el grado de autonomía de las motas."***

# Tabla de Contenidos

## Índice

1. Formulación del Problema
2. **Objetivos Principales**
3. IEEE802.15.4 Std & IEEE802.15.4E Amendment
4. OpenWSN & Plataforma OpenMote
5. Implementación CSL
  - Descripción Funcional
  - Extensión de OpenWSN
  - Metodologías de Desarrollo, Gestión y Seguimiento
  - Entorno y Herramientas de Desarrollo
  - Máquina de Estados CSL de TX y RX
  - Secuencia Wake-Up de TX y RX
6. Escenario de Pruebas y Depuración CSL
7. Conclusiones y Líneas Futuras

# Objetivos Principales



## Investigación y Conocimiento

- Estudio y análisis de especificación CSL y modos de operación TX & RX,
- Técnicas *preamble sampling*.
- Desarrollo, pruebas y depuración sobre **sistemas empotrados**.
- **Arquitectura HW** y operación de **sistemas empotrados**.
- **Modo de funcionamiento a nivel funcional y radio de OpenWSN**.
- **Pruebas V&V** sobre hardware real (OpenMote-CC2538).

## Desarrollo, Innovación y Cumplimiento del Estándar

- Contribución al **desarrollo de IEEE 802.15.4** en el campo de **proyectos de software libre** (OpenWSN).
- Implementación del **modo CSL sobre OpenWSN**, incrementando el **grado de cumplimiento del estándar**.
- **Validación Funcional** de Comportamiento.

# Tabla de Contenidos

## Índice

1. Formulación del Problema
2. Objetivos Principales
3. IEEE802.15.4 Std & IEEE802.15.4E Amendment
4. OpenWSN & Plataforma OpenMote
5. Implementación CSL
  - Descripción Funcional
  - Extensión de OpenWSN
  - Metodologías de Desarrollo, Gestión y Seguimiento
  - Entorno y Herramientas de Desarrollo
  - Maquina de Estados CSL de TX y RX
  - Secuencia Wake-Up de TX y RX
6. Escenario de Pruebas y Depuración CSL
7. Conclusiones y Líneas Futuras

# IEEE802.15.4 Std & Enmienda IEEE802.15.4E

## ❑ IEEE 802.15.4 Standard

- ❑ Desarrollado por el IEEE, diseñado principalmente para redes LR-WPAN.
- ❑ Define las capas PHY y MAC en interfaces de bajo consumo.
- ❑ Redes con transmisiones poco frecuentes y poca cantidad de datos.
- ❑ El principal objetivo del estándar es el bajo consumo de energía dado que los dispositivos están conectados a baterías o fuentes limitadas de energía (**bajo consumo de energía para incrementar el tiempo de vida**).

## ❑ Enmienda IEEE 802.15.4E (subcapa MAC)

- ❑ Enmienda al estándar para la subcapa MAC con el fin de proporcionar soporte y cobertura a mercados industriales.
- ❑ Incluye la definición de los modos MAC de bajo consumo (**low-energy**) para entornos LR-WPAN.
  - ✓ Coordinated Sampled Listening (CSL)
  - ✓ Receiver Initiated Transmissions (RIT)
- ❑ Permite que los dispositivos puedan trabajar bajo ciclos de trabajo de radio del 1%.

# Tabla de Contenidos

## Índice

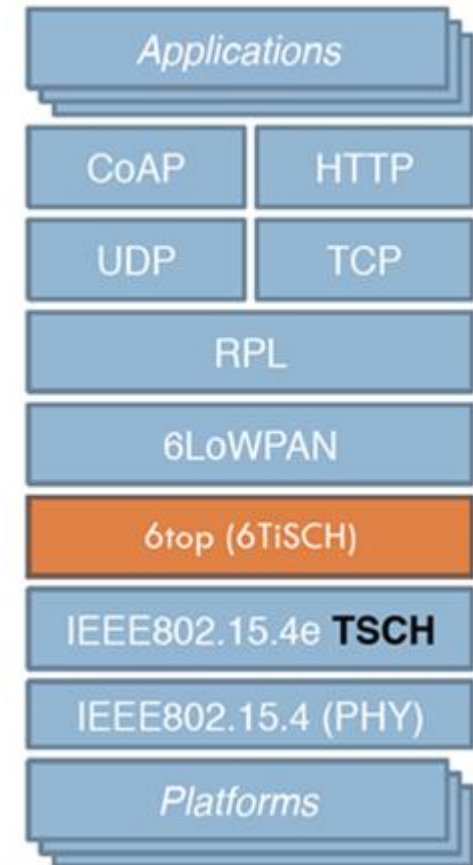
1. Formulación del Problema
2. Objetivos Principales
3. IEEE802.15.4 Std & IEEE802.15.4E Amendment
4. OpenWSN & Plataforma OpenMote
5. Implementación CSL
  - Descripción Funcional
  - Extensión de OpenWSN
  - Metodologías de Desarrollo, Gestión y Seguimiento
  - Entorno y Herramientas de Desarrollo
  - Máquina de Estados CSL de TX y RX
  - Secuencia Wake-Up de TX y RX
6. Escenario de Pruebas y Depuración CSL
7. Conclusiones y Líneas Futuras



# OpenWSN & Plataforma OpenMote (I)

## □ OpenWSN

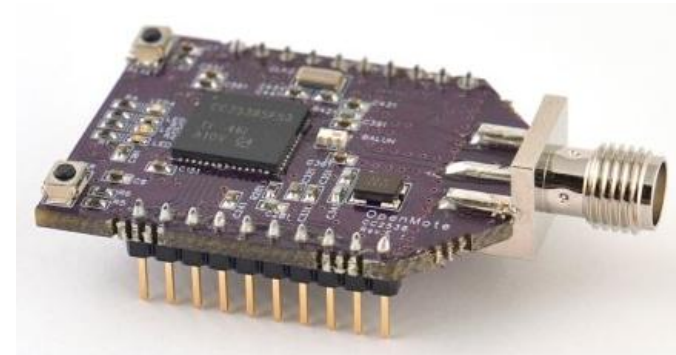
- Primera (y más importante) implementación de software libre del estándar IEEE802.15.4.
- Pila de protocolos completamente funcional, basada en estándares de redes capilares y enraizada en el mecanismo TSCH.
- IEEE 802.15.4e junto a otros estándares IoT como 6LoWPAN, RPL y CoAP posibilita la creación de redes altamente fiables, conectadas a Internet y de bajo consumo.
- Completamente desarrollada en lenguaje C, y soportada bajo múltiples plataformas Hw (desde antiguos microcontroladores de 16 bits hasta las recientes arquitecturas Cortex-M de 32 bits).



# OpenWSN & Plataforma OpenMote (II)

## ❑ OpenMote CC2538

- ❑ Elemento central del hardware OpenMote.
- ❑ Arquitectura de microcontrolador Cortex **ARM M3**.
- ❑ Conectada a una placa **OpenBattery**, permite la interconexión de varias motas y trabajar de manera autónoma.
- ❑ Conectada a placa **OpenBase**, es posible interconectar distintas redes y funcionar como pasarela (*gateway*).
- ❑ Actualmente soportada por las **implementaciones del estándar líderes** y de software libre como **Contiki, OpenWSN y FreeRTOS**.



# Tabla de Contenidos

## Índice

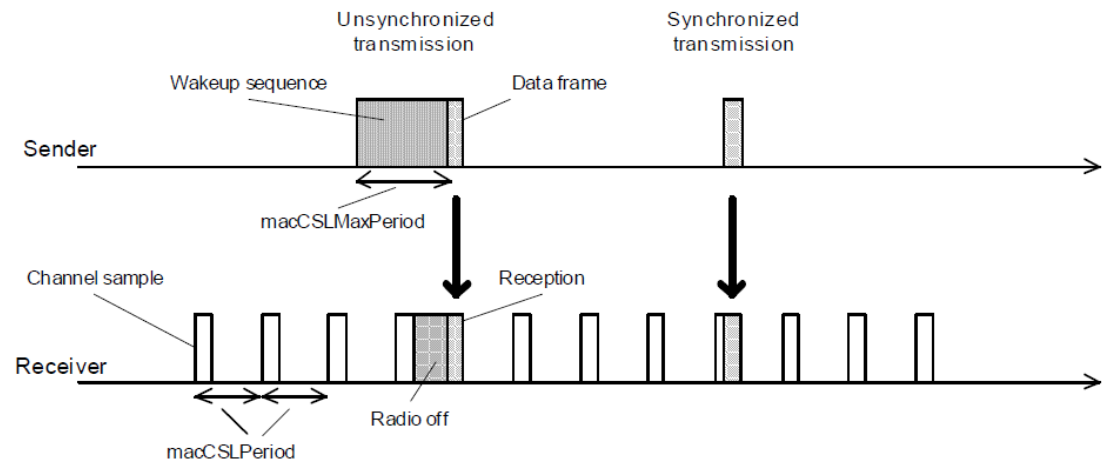
1. Formulación del Problema
2. Objetivos Principales
3. IEEE802.15.4 Std & IEEE802.15.4E Amendment
4. OpenWSN & Plataforma OpenMote
5. Implementación CSL
  - Descripción Funcional
  - Extensión de OpenWSN
  - Metodologías de Desarrollo, Gestión y Seguimiento
  - Entorno y Herramientas de Desarrollo
  - Maquina de Estados CSL de TX y RX
  - Secuencia Wake-Up de TX y RX
6. Escenario de Pruebas y Depuración CSL
7. Conclusiones y Líneas Futuras

# Implementación CSL

## Descripción Funcional

- ❑ El dispositivo receptor **escucha periódicamente el canal** para detectar solicitudes de transmisión.
  - ❑ Si la **escucha del canal no detecta energía**, se deshabilita el receptor hasta la siguiente escucha.
  - ❑ Si la **escucha del canal detecta energía** (trama wake-up), se verifica la dirección destino.
    - ❑ Si **coincide**, deshabilita el receptor un tiempo igual a **RZ Time** en la trama wake-up tras lo cual habilita el receptor para recibir la trama de datos.
    - ❑ Si **no coincide**, deshabilita el receptor un tiempo igual a  $RZ\ Time + TX\ MTU\ Datos + TX\ MTU\ ACK$ , reiniciando a continuación el proceso de escucha periódica.

- ❑ **Receptor y Transmisor están coordinados** para reducir la sobrecarga de TX.



# Implementación CSL

## Extensión de OpenWSN

### ❑ Extensión OpenWSN para soporte de requisitos CSL:

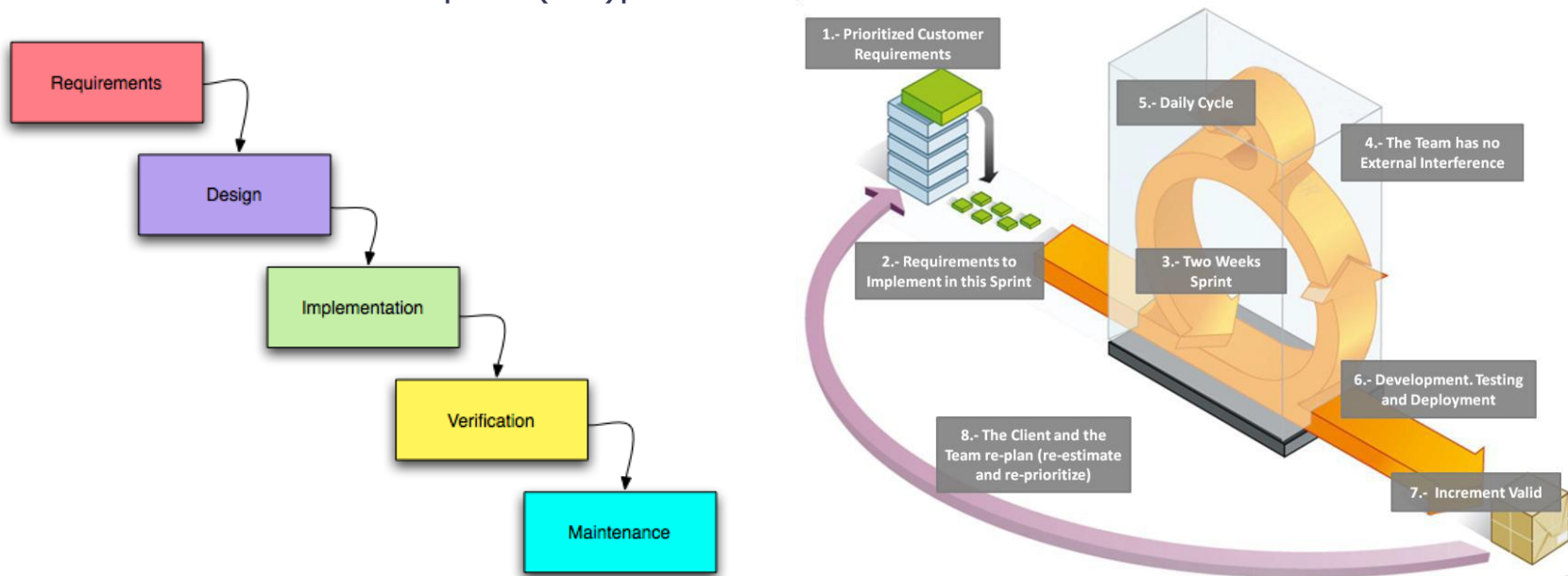
- ❑ **Identificación de Puntos de Extensión OpenWSN capa MAC :** Puntos de extensión en código fuente de la capa MAC dentro de OpenWSN.
- ❑ **Definición de Modos de Trabajo CSL :** Modos de trabajo TX y RX.
- ❑ **Definición de Atributos CSL:** Atributos CSL estándar para definición de comportamiento y rendimiento.
- ❑ **Definición de Tramas Wake-Up:** Trama multipropósito utilizada para notificar al nodo receptor el instante de comienzo de la transmisión de datos.
- ❑ **Definición de Elemento de Información RZ-Time:** Informa al receptor acerca del tiempo restante hasta el comienzo de la transmisión de la trama de datos.
- ❑ **Extensión de Interrupciones y Temporizadores OpenWSN:** Modificaciones y ampliaciones al sistemas de interrupciones y temporizadores de OpenWSN para el soporte de las nuevas actividades CSL.
- ❑ **Extensión de la FSM de OpenWSN para CSL TX y RX:** Modificaciones y extensiones al FSM de OpenWSN para soporte de modos de trabajo CSL para TX y RX.

# Implementación CSL

## Metodología de Desarrollo y Seguimiento

### ❑ Enfoque Metodológico

- ❑ Combinación de metodologías en Cascada (Waterfall) y Ágil (Scrum)
  - ❑ **Metodología en Cascada (Waterfall):**
    - ❑ Mejor opción dado que los requisitos son estáticos y bien definidos.
    - ❑ Trabajo avanza de un modo natural ("downhill").
  - ❑ **Metodología Ágil (Scrum):** (proceso de desarrollo iterativo)
    - ❑ Solamente aplicado a fase de implementación para el segmentado del trabajo y su codificación de manera iterativa.
    - ❑ Flexibilidad para (re-)priorizar requisitos CSL e incrementos de desarrollo.



# Implementación CSL

## Entorno y Herramientas de Desarrollo

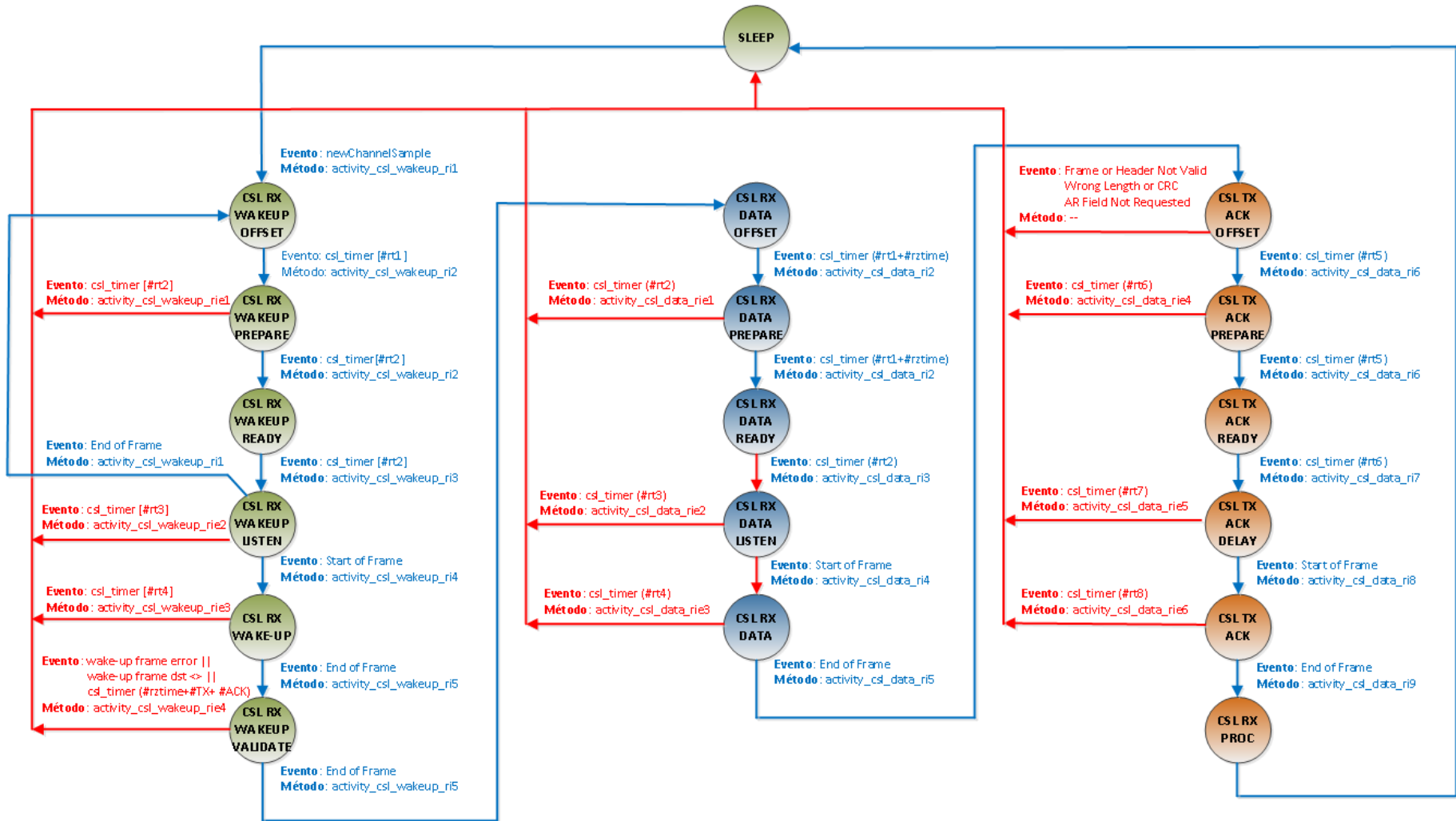
- ❑ **Herramientas y componentes requeridos para proceso de desarrollo CSL**
  - ❑ **Código Fuente OpenWSN:** Código fuente actualizado desde los repositorios GIT de OpenWSN.
  - ❑ **Scons:** Herramienta implementada como script y módulos Python, utilizada para la construcción automática de software.
  - ❑ **GNU ARM Gcc toolchain:** Conjunto de herramientas para la construcción y depuración de firmware para microcontroladores ARM (OpenMote-CC2538).
  - ❑ **SEGGER Jlink Software:** Servidor de depuración (gdb server) y herramientas para el análisis y monitorización del comportamiento de los desarrollos CSL realizados.
  - ❑ **Eclipse CDT:** Entorno de desarrollo C/C++ (IDE) y plugin "GNU ARM C/C++ Cross Development Tools".





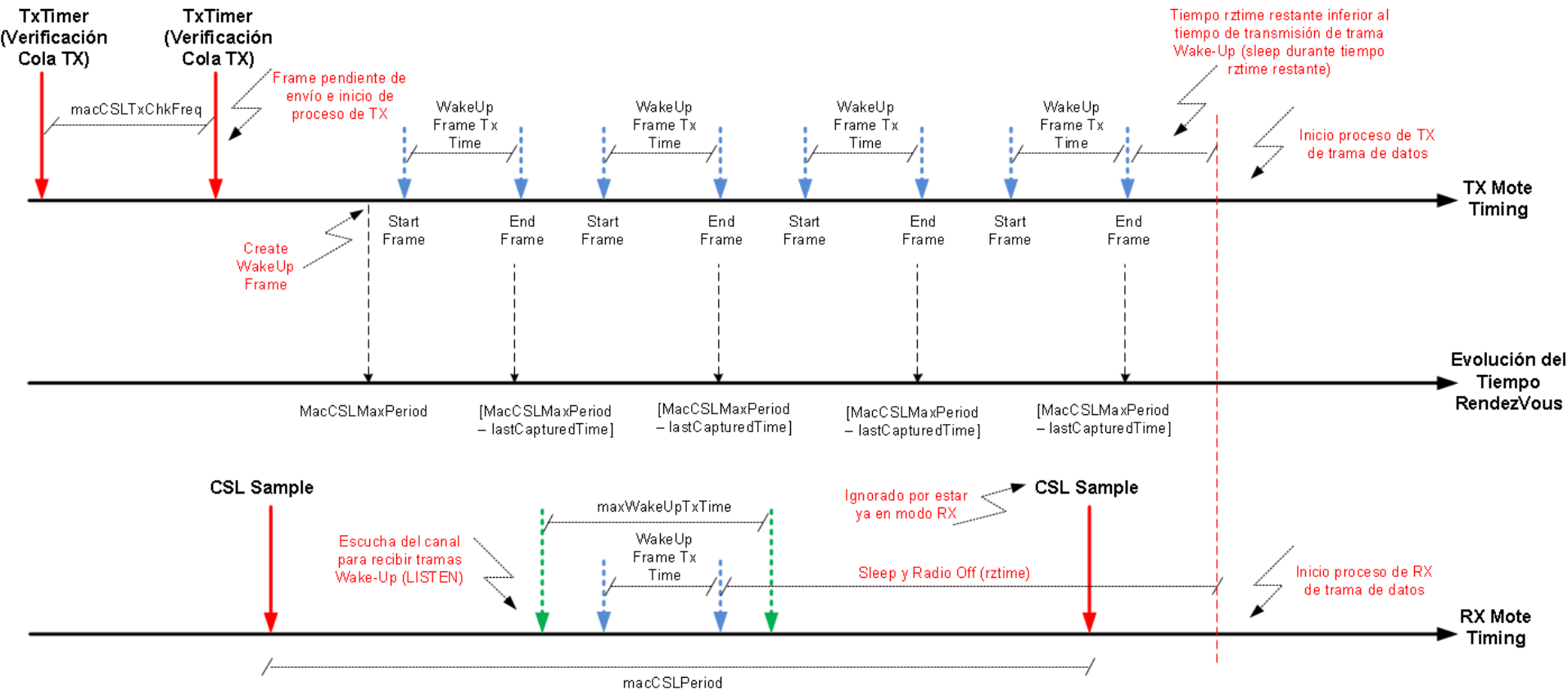
# Implementación CSL

## Máquina de Estados CSL de RX



# Implementación CSL

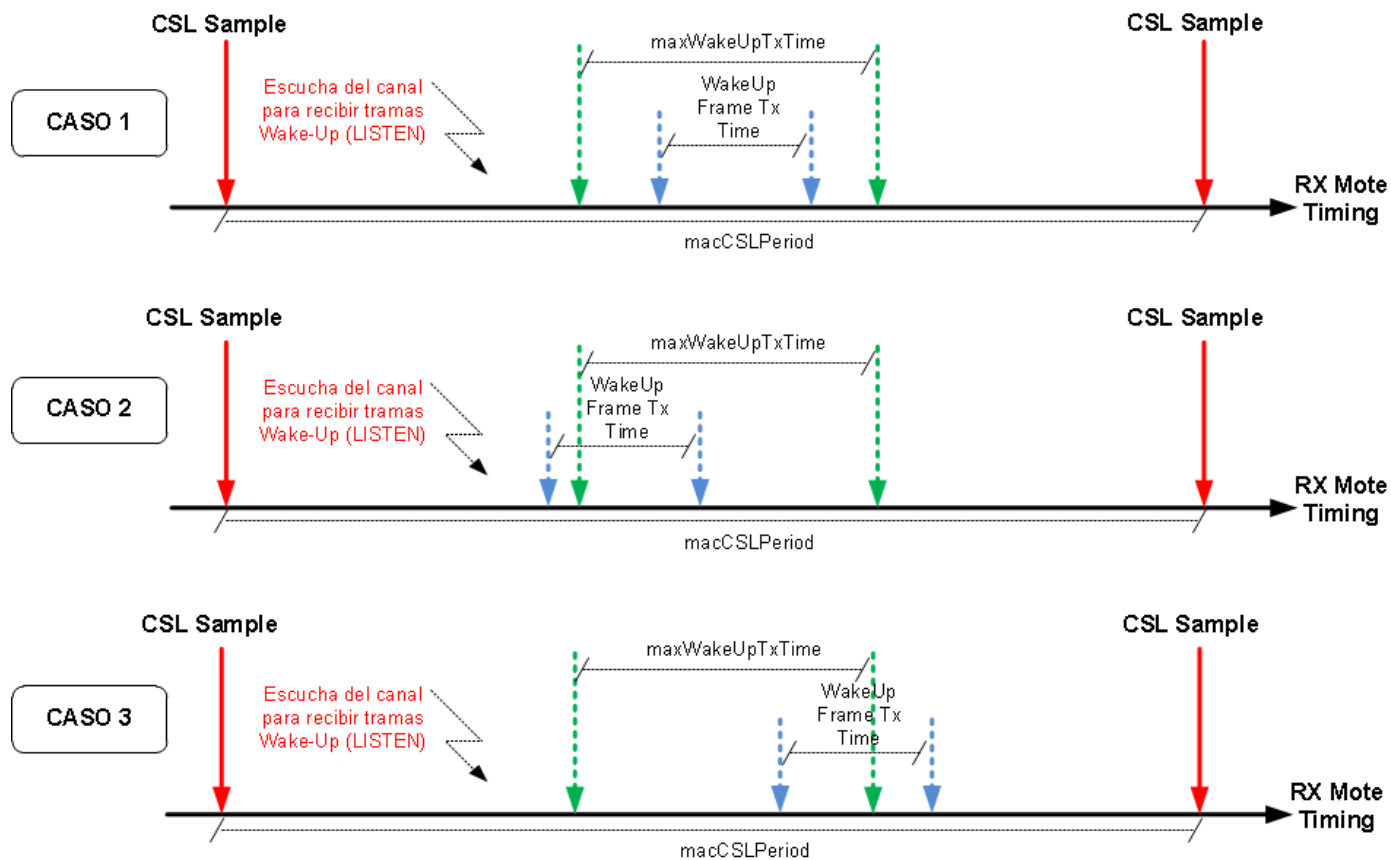
## Secuencia Wake-Up de TX y RX (I)



- macCSLTxChkFreq → 60 ms
- macCSLPeriod = macCSLMaxPeriod → 200 ms

# Implementación CSL

## Secuencia Wake-Up de TX y RX (II)



- $\text{maxWakeUpTxTime} \rightarrow \text{tt1} + \text{tt2} + \text{tt3} + \text{tt4} = 5,8\text{ms} + 3,8\text{ms} + 4,8\text{ms} + 5\text{ms} = 19,4\text{ ms}$
- $\text{WakeUpFrameTxTime} \rightarrow \sim 4,75\text{ ms}$  (aprox. 155 ticks)

# Tabla de Contenidos

## Índice

1. Formulación del Problema
2. Objetivos Principales
3. IEEE802.15.4 Std & IEEE802.15.4E Amendment
4. OpenWSN & Plataforma OpenMote
5. Implementación CSL
  - Descripción Funcional
  - Extensión de OpenWSN
  - Metodologías de Desarrollo, Gestión y Seguimiento
  - Entorno y Herramientas de Desarrollo
  - Maquina de Estados CSL de TX y RX
  - Secuencia Wake-Up de TX y RX
6. Escenario de Pruebas y Depuración CSL
7. Conclusiones y Líneas Futuras

# Escenario de Pruebas CSL

## ❑ Firmware OpenWSN+CSL

- ❑ Desplegado en dos motas.
- ❑ Una mota actúa como TX y la otra mota actúa como RX.

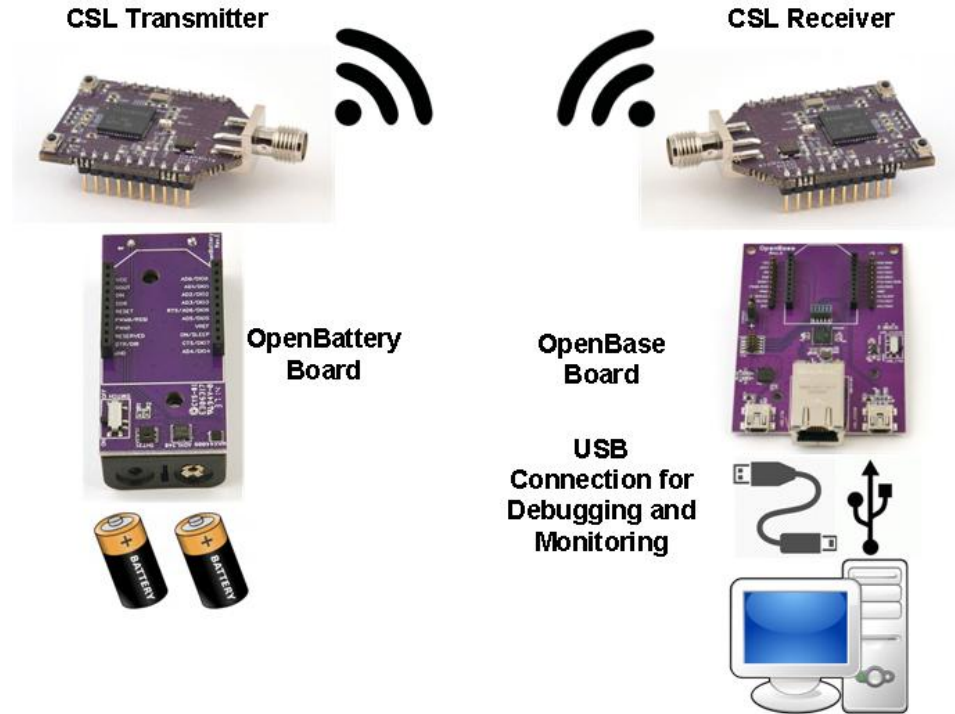
## ❑ Mota Receptor

- ❑ Conectada a PC para monitorización de actividades FSM RX.

## ❑ Mota Transmisor

- ❑ Actividades FSM TX depuradas previamente sobre OpenBase.
- ❑ Modo de funcionamiento autónomo sobre placa OpenBattery.

## ❑ UOC - CSL Testing Architecture



# Tabla de Contenidos

## Índice

1. Formulación del Problema
2. Objetivos Principales
3. IEEE802.15.4 Std & IEEE802.15.4E Amendment
4. OpenWSN & Plataforma OpenMote
5. Implementación CSL
  - Descripción Funcional
  - Extensión de OpenWSN
  - Metodologías de Desarrollo, Gestión y Seguimiento
  - Entorno y Herramientas de Desarrollo
  - Máquina de Estados CSL de TX y RX
  - Secuencia Wake-Up de TX y RX
6. Escenario de Pruebas y Depuración CSL
7. Conclusiones y Líneas Futuras

# Conclusiones y Líneas Futuras

## Conclusiones y Resultados

### ❑ Investigación y Conocimiento

- ❑ Estándares LR-WPAN.
- ❑ Técnicas *preamble sampling*.
- ❑ Análisis e implicaciones de extensión CSL para OpenWSN.
- ❑ Habilitación de nuevas líneas de estudio, evolución, trabajo futuro, y aplicabilidad.

### ❑ Modo CSL Low-Energy

- ❑ Metodología de desarrollo y seguimiento.
- ❑ Especificación, diseño y codificación de modos de operación.
- ❑ Opción factible mediante verificación y validación funcional.

### ❑ Sistemas Empotrados

- ❑ Metodología de validación y pruebas.
- ❑ Depuración y *timing*.
- ❑ Procesamiento en tiempo real.

# Conclusiones y Líneas Futuras

## Líneas Futuras

- ❑ **Transmisión CSL Sincronizada**
- ❑ **Elemento de Información LE CSL IE**
- ❑ **Activación y Desactivación del Modo de Operación y Soporte para Transmisión de Mensajes Urgentes**
- ❑ **Soporte para Envío y Recepción de Varias Tramas (frame pending bit)**
- ❑ **CSL sobre múltiples canales**



# Muchas Gracias

Sergio Gonzalo San José

Email: [sgonzalos@uoc.edu](mailto:sgonzalos@uoc.edu)

[www.uoc.es](http://www.uoc.es)

