

## **Modelo Simulink<sup>®</sup> IEEE 802.15.4 para aplicación en red de sensores**

Dario O. Tamburi<sup>(1)</sup>, Mario R. Modesti<sup>(2)</sup>, Dimas A. Benasulin<sup>(3)</sup>.

<sup>(1)</sup>Maestría en Redes de datos, Universidad Nacional de La Plata.  
tamburi@arnet.com.ar

<sup>(2)</sup>Laboratorio de Sensores e Instrumentación.  
Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Córdoba.  
mmodesti@scdt.frc.utn.edu.ar

<sup>(3)</sup>Maestría en Ingeniería en Control Automático Universidad Tecnológica Nacional –  
Facultad Regional Córdoba.  
dimasbenasulin@gmail.com

**RESUMEN:** El estándar IEEE 802.15.4 define las especificaciones de la capa física y la capa control de acceso al medio de una red de área personal de baja tasa de transmisión – LR WPAN. Con el propósito de contar con una plataforma de simulación donde se puedan evaluar las prestaciones de algoritmos de ruteo, se propone desarrollar un modelo de IEEE 802.15.4 en Simulink<sup>®</sup> [1] que permita simular las comunicaciones de una Red de Sensores Inalámbrico, existiendo otras herramientas como son OMNeT++[2], OPNET[3], entre otras. El modelo consiste en dos módulos uno para la capa MAC y otro para la física con capacidad de soportar una topología de malla. Construido conforme a la última versión del estándar IEEE 802.15.4 – 2006.

**Palabras claves:** IEEE 802.15.4, modelo de simulación, Simulink<sup>®</sup>, WSN.

### **1. Introducción.**

El estándar 802.15.4 diseñado para red de área personal de baja tasa de transmisión – LR WPAN – define las especificaciones de las capas físicas y la de control de acceso al medio. Las características más sobresalientes de este tipo de red son: rango de operación de corto alcance, la velocidad de transmisión de datos no supera los 250 Kbs, el hardware es de bajo costo y de limitada capacidad de cómputo, potencia de transmisión y energía.

Los nodos son alimentados por algún tipo de pila y el recambio de la misma no se lo considera un hecho posible. La característica más destacable es que carecen de infraestructura de red, son red del tipo Ad Hoc con capacidad de auto organización y auto gestión.

La tecnología LR WPAN surge como alternativa a los estándares de WiFi y Bluetooth ya que estos no se adecúan a la baja tasa de transmisión de datos, bajo ciclo

de servicio de conectividad y bajo costo. Está enfocado principalmente para satisfacer aplicaciones de domótica, juegos interactivos, sensor y automatizar. Un ejemplo de esta tecnología en el mercado es ZigBee[4], para entender cómo trabaja 802.15.4 y ZigBee puede leer [5].

### **1.1 Red de Sensores**

Los avances en sistemas microelectromecánicos (MEMS), comunicaciones inalámbricas, electrónica y la disponibilidad de sofisticados algoritmos de procesamiento de señales, han permitido la producción de nodos sensor multifuncional, de pequeño tamaño, baja potencia y económico. Los sensores inalámbricos son compactos pero capaces de sensar, procesar datos y comunicarse con otros sobre un canal de radio frecuencia. La disponibilidad de estos micros sensores permitirá desarrollar redes de sensores para un amplio rango de aplicaciones. A diferencia de la redes tradicionales y dependiendo de lo densa y coordinada que este la red, los sensores serán capaces de realizar su tarea con mayor exactitud optimizando la adecuada toma de datos mediante la colaboración entre sensores y el procesamiento en línea.

En un futuro las redes inalámbricas de sensores serán usadas ampliamente porque ellas extienden la capacidad de supervisar y controlar ambientes físicos desde una ubicación remota.

La simulación y bancos de prueba son herramientas indispensables para el entorno WSN. El desarrollo e implementación de banco de pruebas supone un mayor esfuerzo. Los simuladores son usados para la evaluación de nuevos protocolos de red y algoritmos permitiendo la repetibilidad ya que son independiente del aspecto físico.

Diferentes enfoques son usados para simular y modelar WSN, existe más de cuarenta simuladores activos operando en diferentes niveles de simulación: emuladores de hardware, sistemas operativos y nivel de aplicación. El hardware del nodo de WSN son principalmente TmoteSky, MSB, Mica, Mica2, Micaz. El sistema operativo que corre es este hardware son Contiki o TinyOSs y los programas de aplicación están escritos en C++, Java, Phyton. En [6] se utiliza Matlab® para simular y evaluar las prestaciones de WSN.

Se puede referir a [6] y [7] para obtener una clasificación y detalles de: simuladores genéricos, específicos como así también bancos de prueba y emuladores.

Un modelo es una abstracción de la realidad, se requiere que el mismo sea adecuado basado en una hipótesis sólida y apropiada que evite poner en riesgo los resultados obtenidos.

Teniendo en cuenta esto y aspectos claves de la simulación [8] como son la fidelidad del modelo con la realidad y la utilización de la herramienta apropiada para construirlo y, considerando que no existe un modelo a utilizar que satisfaga con lo requerido para este trabajo; esto es: independencia de hardware y sistema operativo, se propone la construcción de un nuevo modelo que implemente el concepto de diseño

cross layer. En [9] se puede obtener una referencia al diseño cross layer y la utilización de OPNET como herramienta de simulación y ZigBee como plataforma de prueba.

Con respecto a la herramienta a utilizar para construir el modelo que se propone, se opta por Simulink® que provee un entorno gráfico interactivo con librerías de bloques que se pueden adecuar facilitando el diseño; la implementación y la simulación.

El modelo permite simular los dispositivos – nodos - de una red inalámbrica de sensores del tipo Ad-Hoc, con una topología malla y una comunicación entre pares multi salto con independencia total del hardware y el software utilizados en WSN. Otros trabajos no ofrecen tales características.

De esta manera se logra una herramienta que se constituye en una plataforma de simulación que posibilita la investigación y estudio de procedimientos en las capas altas del modelo OSI.

## **2 Estándar IEEE 802.15.4-2006[10]**

En esta sección se describen las partes del estándar que están relacionada con el modelo. Una red 802.15.4 puede trabajar en la frecuencia de 2.4GHz con capacidad de soportar 16 canales. Utiliza dispositivos del tipo FFD – Full Function Device – lo que permite una comunicación entre pares, todos los dispositivos son iguales no hay jerarquía de roles.

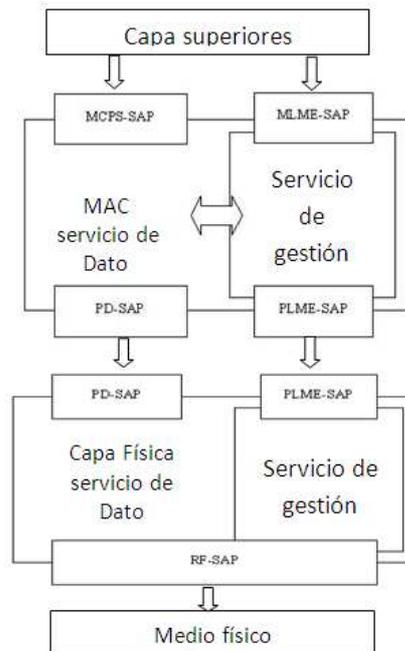
Soporta dos tipos de topología de red: estrella y entre pares. El modelo implementa la topología entre pares donde al igual que la topología estrella hay un coordinador pero se diferencia de esta última posibilitando la comunicación entre dispositivos que estén en el rango de operación del alcance de radio dando lugar a la formación de red más complejas como lo es la red malla.

Aplicaciones como control industrial y monitoreo, redes de sensores, seguimiento de inventario, agricultura de precisión o inteligente, seguridad, se ven beneficiada por la implementación de dicha topología que se tiene en cuenta para el diseño del modelo. La transmisión del mensaje es multi salto. La norma permite dos tipos de direccionamiento de 64 o 16 bit utilizándose el direccionamiento corto de 16 bit.

### **2.1 Arquitectura.**

La arquitectura está definida en términos de bloques para simplificar el estándar, los bloques son capas las cuales son responsables de una parte del estándar y de ofrecer servicios a las capas más alta. Las capas están basadas en el modelo OSI y las interfaces entre capas definen los enlaces lógicos.

Un dispositivo LR – WPAN comprende dos capas, física y control de acceso al medio. En la figura 1 se observa la arquitectura.



**Fig. 1** Arquitectura de LR-WPAN

## 2.2 Capa Física

Esta capa contiene el transceiver y es la responsable de la transmisión y recepción de datos, en un canal de radio.

Esta capa provee dos servicios. El servicio de datos: que soporta el transporte MPDU entre entidades pares de capa MAC a través de PD-SAP y que comprende a tres primitivas.

El servicio de gestión de la capa física a través del PLME-SAP.

## 2.3 Capa Control de Acceso al Medio –MAC

Esta capa provee una interfaz entre las capas superiores y la capa física proporcionando dos servicios. Servicios de datos: a través de MCPS-SAP y Servicio de gestión a través de MLME-SAP. Además existe una interfaz entre la entidad de gestión y el servicio de datos - Parte Común de la Sub capa Mac - que permite a la entidad de gestión usar el servicio de datos de la capa MAC.

## 2.4 Transferencia de dato

El mecanismo para la transferencia de datos depende si la red soporta la transmisión de “beacon”. Una red con capacidad de beacon se usa cuando se requiere sincronización o baja latencia. Si la red no necesita sincronización o soporte de baja latencia y requiere la existencia de un coordinador. Se puede elegir no usar beacon para la transferencia de datos, aunque es requerido para el procedimiento de descubrimiento de red.

El modelo no usa beacon, quiere decir; que no existe coordinar que lo transmita aunque si se lo utiliza en el proceso de descubrimiento de red; como se menciono. Esto influye directamente sobre el mecanismo de acceso al medio.

## 2.5 Mecanismo CSMA-CA

El mecanismo de acceso al medio depende del uso de beacon o no. Al no usar beacon se implementa el acceso al medio no ranurado. Cada vez que un dispositivo desea transmitir espera un periodo de tiempo aleatorio. Si el canal esta libre, transmite. Si está ocupado espera otro periodo de tiempo aleatorio antes de tratar de acceder nuevamente al canal. Las confirmaciones son transmitidas sin usar este mecanismo.

## 3 Modelo de simulación 802.15.4 propuesto

El modelo es construido en Simulink<sup>®</sup>, una herramienta de la suite de Matlab<sup>®</sup>. Esta herramienta es un entorno de programación visual que permite la simulación de modelos o sistemas con cierto grado de abstracción de los fenómenos físicos involucrados. Su funcionamiento se basa en eventos y cajas negras que realizan alguna operación.

Para trabajar con Simulink<sup>®</sup> primero se define y construye el modelo gráficamente, al ejecutarlo el resultado se puede mostrar directamente en Simulink<sup>®</sup> o enviarlo al entorno de trabajo de MatLab<sup>®</sup>.

El modelo construido constituye una máquina de estado finito que basa su funcionamiento en eventos. Las figura 2 y 3 muestran el modelo construido, el que está siendo utilizado para evaluar el comportamiento de un nuevo algoritmo de encaminamiento para WSN. En el mismo se observa el modulo de lógica de capa superior, el módulo transmisor y receptor. La figura 4 se muestra la utilización del modelo conectado a una WSN.

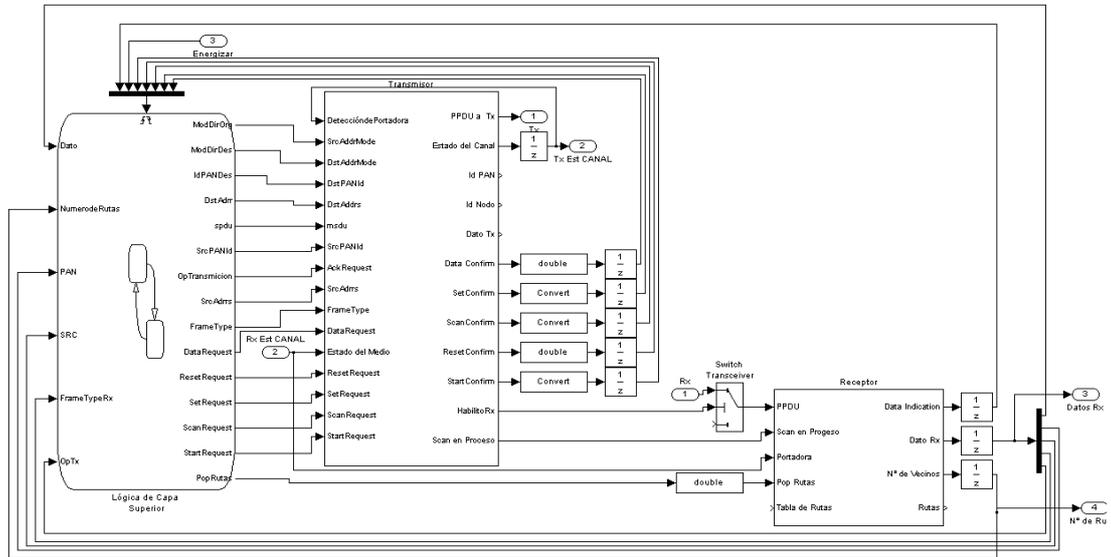


Fig.2 Primer nivel de detalle del modelo

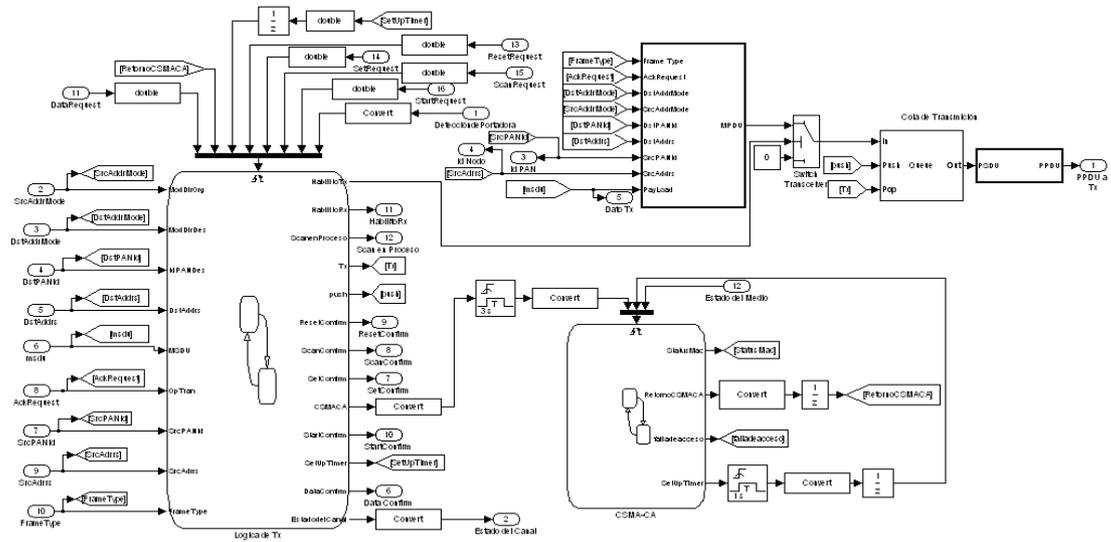
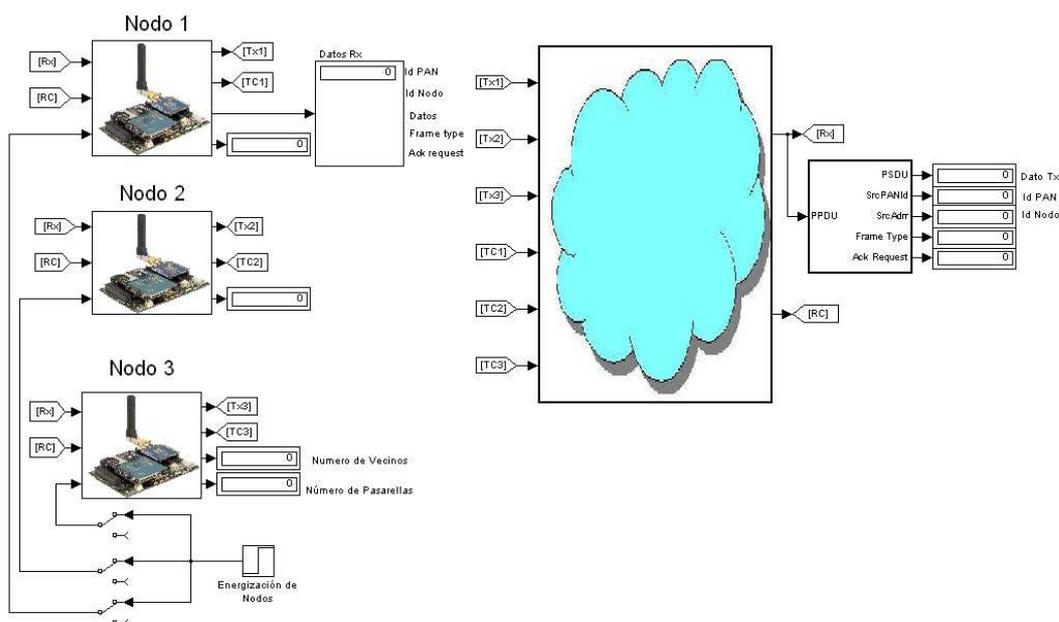


Fig.3 Segundo nivel de detalle del modelo



**Fig.4** Utilización del modelo en WSN

### 3.1 Capa Física propuesta:

Esta capa provee una interfaz entre el medio físico y la capa MAC. Incluye una entidad de gestión llamada PLME que provee la interfaz a través de la cual las funciones de gestión de dicha entidad pueden ser invocadas. Implementa un total de 9 primitivas según se describe a continuación.

#### 3.1.1 Servicio de datos propuesto

Soporta el transporte de MPDU entre pares MAC. Las primitivas que implementa se pueden observar en la tabla 1.

**Tabla 1:** primitivas – servicio de datos - bloque físico.

PD-Data.Request:	transmite un MPDU.
PD-Data.Confirm:	confirma el fin de la transmisión de un MPDU

### 3.1.2 Servicio de gestión propuesto

Permite el transporte de comando de gestión entre la entidad de gestión de la capa MAC y la capa física. Las primitivas que se implementan son las que se observan en la tabla 2.

**Tabla 2.** Primitivas – servicio de gestión - bloque físico.

PLME-CCA.Request:	requiere que se ejecute un CCA - Clear channel Access -. En el modelo el estado del canal se determina por el valor de una variable Rx Est CANAL. El valor 1 indicara canal ocupado el valor 0 canal libre.
PLME-CCA.Confirm:	confirma el resultado del procedimiento CCA.
PLME-Set-Trx-State.Request:	solicitud para cambiar el estado de operación del transceiver.
PLME-Set-Trx-State.Confirm:	informa el resultado de una solicitud de cambio de estado del transceiver
PLME-Set.Request:	esta primitiva intenta configurar atributo de la capa física a un valor dado. Se utiliza para configurar la variable phyCurrentChannel del canal por el cual transmitir o recibir
PLME-Set.Confirm:	confirma el resultado de intentar configurar un atributo de la capa física

### 3.2 Capa de control de acceso al medio propuesto

Provee la interfaz entre las capas superiores y la capa física, maneja el acceso al medio, es la responsable de generar beacon, de emplear el mecanismo CSMA-CA no ranurado e incluye el servicio de gestión a través de la cual las funciones de gestión pueden ser invocadas. Se definen 11 primitivas que se detallan a continuación.

#### 3.2.1 Servicio de datos:

Soporta el transporte de un SPDU entre capas pares superiores. Implementado las siguientes primitivas que se describen en la tabla 3.

**Tabla 3.** Primitivas – servicio de datos - del bloque MAC.

DataRequest:	solicita la transferencia de un SPDU
DataConfirm:	informa el resultado de una solicitud de transferencia de un SPDU.
DataIndication:	indica la transferencia de un SPDU de la capa MAC a la capa superior.

### 3.2.2 Servicio de gestión:

Permite el transporte de comandos de gestión entre las capas más alta y el mencionado servicio implementando las siguientes primitivas según la tabla 4.

**Tabla 4:** Primitivas - servicio de gestión - bloque MAC.

ResetRequest:	resetea los valores de la capa MAC.
ResetConfirm:	informa el resultado de una operación Reset.
ScanRequest:	la primitiva scan define como un dispositivo determina la presencia o ausencia de PAN en un canal de comunicación. Esta primitiva lo utiliza el dispositivo para iniciar, sobre una lista de canales dados; la búsqueda de coordinadores transmitiendo beacon dentro del POS.
ScanConfirm:	reporta el resultado del procedimiento ScanRequest
SetRequest:	primitiva que intenta escribir un valor dado e un atributo de la MAC.
SetConfirm:	retorna el resultado de un SetRequest.
StartRequest:	permite el inicio de una nueva PAN.
StartConfirm:	informa el resultado del inicio de una nueva PAN

Las primitivas son eventos que desencadenan procedimientos que son llevados a cabo por distintos módulos en los distintos bloques. En las figuras más abajo se puede observar el nivel en que se origina la primitiva, el evento que representa y el proceso que dispara la primitiva en el destino.

La figura 5 muestra el procedimiento de inicio de una PAN. la figura 6 los mensajes involucrados en la transmisión de dato cuando el transmisor es quien lo origina y la

figura 7 la secuencia de mensajes involucrados en la transmisión de dato cuando el receptor es quien lo origina.

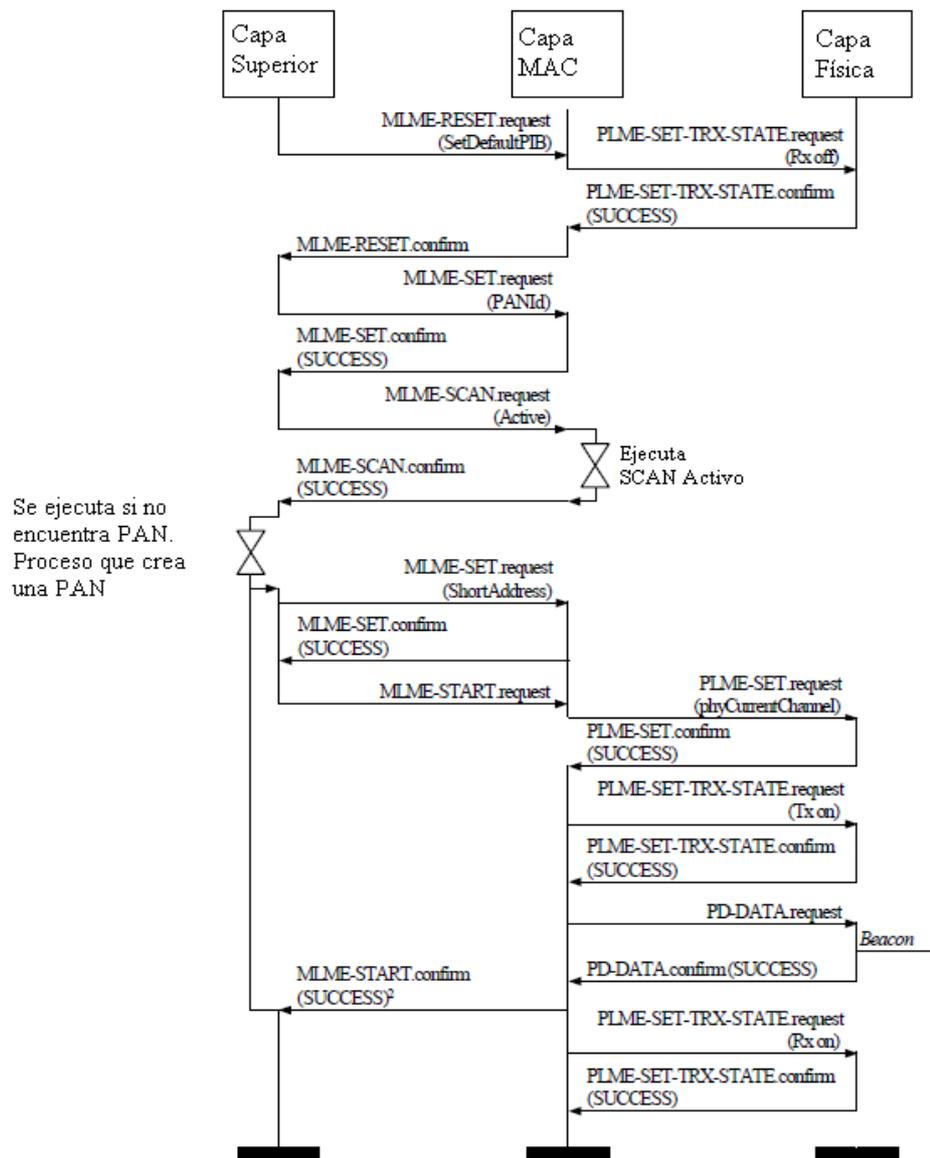
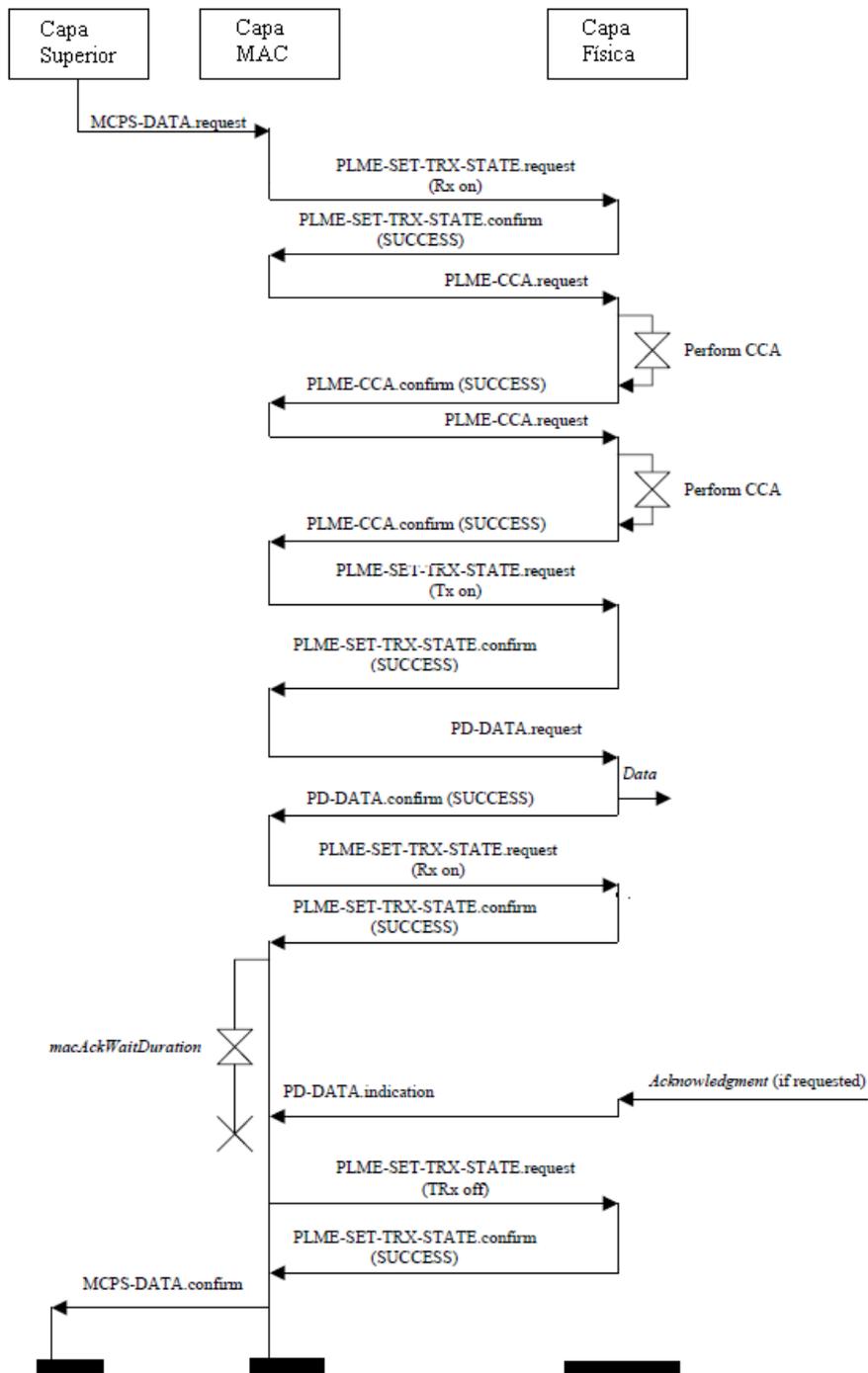
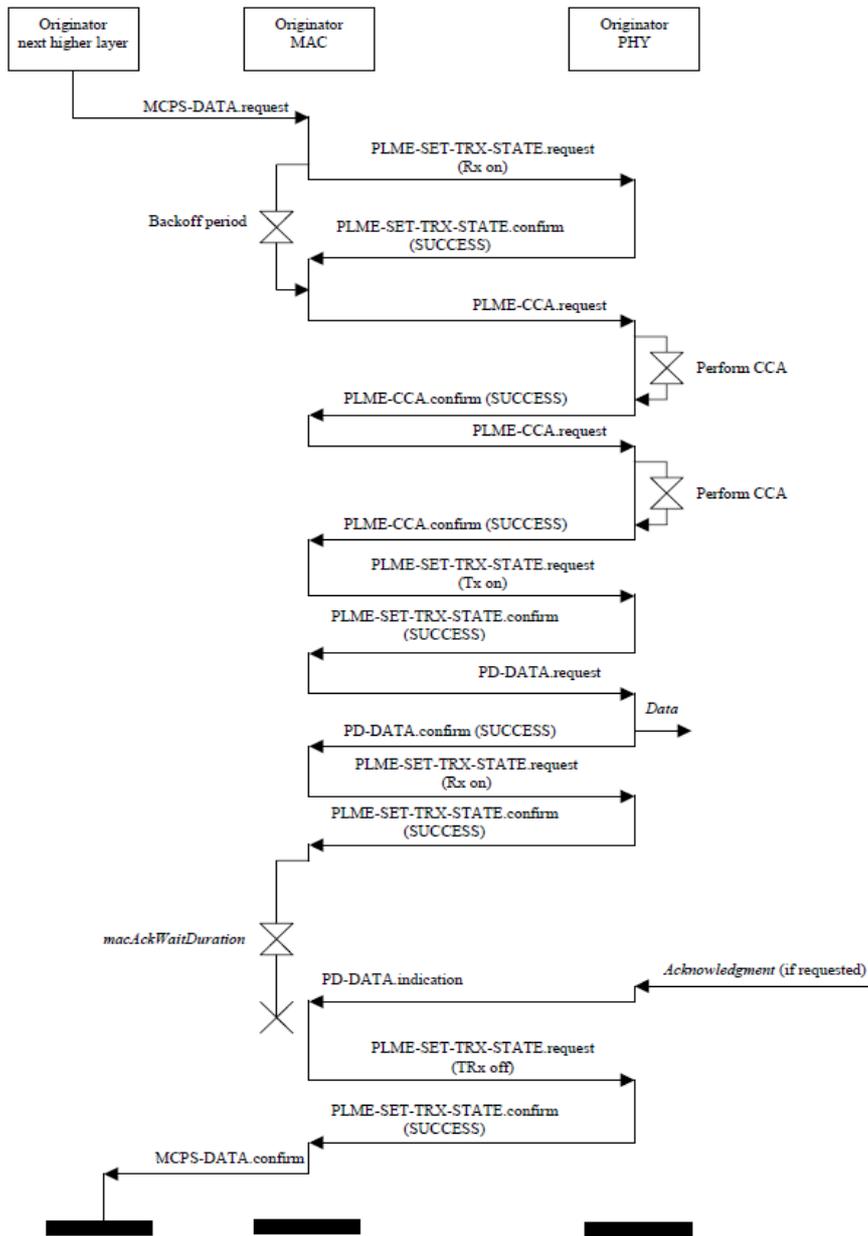


Fig. 5 Secuencia de mensajes de inicio de PAN



**Fig. 6**

Secuencia de mensajes en la transmisión de dato originado por el transmisor



**Fig 8**  
Secuencia de mensajes en la transmisión de dato originado por el receptor

## 4 Conclusiones y trabajo futuro.

Se presento un modelo de 802.15.4 construido en Simulink<sup>®</sup> diseñado de acuerdo al último estándar emitido por IEEE el cual implementan las primitivas necesarias que permitan simular el funcionamiento de una red inalámbrica de sensores contemplando un diseño cross layer.

Un trabajo futuro utilizara esta herramienta para evaluar las prestaciones de nuevos algoritmos de encaminamiento eficiente en términos de energía para una red de sensores [11, 12]. La evaluación energética se hará en fase de implementación.

### ACRONIMOS y ABREVIATURAS:

FFD	full-function device
LR WPAN	low-rate wireless personal area network.
MAC	medium access control.
MCPS SAP	MAC common part sublayer service access point
MLME SAP	MAC sublayer management entity service access point
PAN	personal area network.
PD SAP	PHY data service access point
PHY	physical layer
PLME SAP	physical layer management entity service access point
POS	personal operating space
WSN	Wireless Sensor Network.

### REFERENCIAS

- 1 <http://www.mathworks.com/products/simulink/>
- 2 <http://www.omnetpp.org/>
- 3 <http://www.opnet.com/>
- 4 Alianza ZigBee. <http://www.zigbee.org>.
- 5 Daintree Networks Inc. [www.daintree.net](http://www.daintree.net)
- 6 Qutaiba I. Ali, Akram Abdulmaowjod, Hussein M. Mohammed. Simulation & Performance Study of Wireless Sensor Network Using Matlab. Iraq. J Electrical and Electronic Engineering. Vol 7 N° 2. 2011.
- 7 Pedro J. Marrón, Stamatis Karnouskos, Daniel Minder and The CONET Consortium. Research Roadmap on Cooperating Objects. [www.cooperating-objects.eu](http://www.cooperating-objects.eu) 2009.
- 8 E. Egea-López, J. Vales-Alonso, A. S. Martínez-Sala, P. Pavón-Mariño, J. García-Haro. Simulation Tools for Wireless Sensor Networks. Summer Simulation Multiconference - SPECTS 2005.

- 9 C. Hager, D.J. Shyy, J. Ma. Cooperative Cross-Layer Design for Wireless Networks. Journal of Communicationes, Vol. 3, N° 4 September 2008.
- 10 IEEE Std 802.15.4 – 2006. ISBN 0-7381-4996-9. Junio 2006.
- 11 Wireless Sensor Network Designs. A. Hac. Jhon Wiley & Sons, Ltd. ISBN 0-470-86736-1. 2003.
- 12 Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks. Holger Karl and Andreas Willig. John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 0-470-09510-5. 2005.