

# REVIEW: ALGORITMOS DE PLANIFICACIÓN PARA LA TRANSMISIÓN DE DATOS EN TIEMPO REAL CON IEEE 802.15.4

## REVIEW: ALGORITHMS OF PLANNING FOR DATA TRANSMISSION IN REAL TIME WITH IEEE 802.15.4



<sup>1</sup>Sixto Enrique Campaña Bastidas, <sup>2</sup>Jorge Mario Londoño Peláez

<sup>1</sup>Escuela de Ciencias Básicas Tecnología e Ingeniería, Universidad Nacional Abierta y a Distancia-UNAD, Pasto, Colombia,

<sup>2</sup>Escuela de Ingeniería, Universidad Pontificia Bolivariana – UPB, Medellín, Colombia

<sup>1</sup>sixto.campana@unad.edu.co

<sup>2</sup>jorge.londono@upb.edu.co

Recibido: 16/05/2014 • Aprobado: 22/06/2014

### RESUMEN

Las redes de sensores inalámbricas (WSN) se están extendiendo a muchos campos de aplicación, tales como ciudades inteligentes, ambientes inteligentes, internet de las cosas, entre otras tecnologías. Para muchas de estas tendencias es esencial establecer métodos para la entrega de paquetes, sobre todo aquellos que presenten garantías de tiempo real. En este trabajo se presenta un estudio de los avances recientes publicados en la literatura científica, considerando principalmente las técnicas de acceso al medio y la planificación de transmisión de datos con garantías de tiempo real en WSN basadas en el estándar IEEE 802.15.4. Este estudio presenta las características más importantes, así como las principales diferencias entre las distintas técnicas. Al final se presentan algunas conclusiones y se proponen futuras líneas de investigación que buscan con interés la aplicación de WSN en ambientes con restricciones de tiempo real.

**Palabras clave:** beacon order (BO), beacon intervalo (BI), capa MAC, GTS, IEEE 802.15.4, redes de sensores inalámbricas, superframe duration (SD), superframe order (SO).

### ABSTRACT

Wireless Sensor Networks (WSN) are spreading to many fields of application, such as intelligent cities, intelligent environments, Internet of things, among other technologies. For many of these trends it is essential to establish methods for delivery of packages, especially those that have real-time guarantees. In this work we present a study of the recent advances published in the scientific literature, considering mainly the techniques of access to medium and the planning of data transmission with real-time guarantees in WSN, based on the standard IEEE 802.15.4. This study also presents the most important features, as well as the major differences between the different techniques. At the end are presented some conclusions and are proposed future lines of research, that seek with interest the implementation of WSN in environments with real time restrictions.

**Keywords:** beacon interval (BI), beacon order (BO), GTS, IEEE 802.15.4, superframe duration (SD), superframe order (SO), wireless MAC layer, wireless sensor networks.



# I. INTRODUCCIÓN

Las WSN, cuya sigla en inglés significa: *Wireless Sensor Networks*, en los últimos años han ido tomando mayor protagonismo y sus aplicaciones son evidenciables en diferentes campos que atañen a la vida del hombre [1]. Sin embargo, hay situaciones que demandan más atención y los requerimientos son más exigentes; tal es el caso de algunas situaciones relacionadas con el sector salud, especialmente en la captura de señales biomédicas, campo en el que la transmisión de datos en tiempo real es de suma importancia, puesto que el incumplimiento de los requerimientos de latencia puede hacer la diferencia entre la vida o la muerte de una persona.

Teniendo en cuenta lo anterior, en el presente artículo se relacionan los estudios de algunas metodologías, modelos, algoritmos y protocolos, que a nivel de la capa MAC del estándar IEEE 802.15.4 permiten planificar y manejar la transmisión de datos en tiempo real, identificando principalmente: las fortalezas del estándar; los cambios que se han propuesto por parte de la comunidad científica para mejorarlo; las aplicaciones en las cuales se encuentra un mejor rendimiento y las futuras líneas de acción que permitirán mejorar el proceso de transmisión de datos en las condiciones señaladas.

Es importante resaltar que este campo de investigación evidencia algunos estudios relacionados, pero todavía el tema propuesto, presenta muchos requerimientos por cumplir, más aún con las nuevas tendencias tecnológicas (Internet de las cosas: IoT, *Machine to Machine*: M2M, entre otras), que actualmente están emergiendo y posicionándose como alternativas viables en la transmisión de datos en tiempo real, demandando mayores exigencias tecnológicas.

El artículo se ha dividido en cuatro capítulos, incluida la introducción, los cuales relacionan los siguientes temas: en el capítulo II, correspondiente al

desarrollo del contenido, se hace una descripción del funcionamiento del protocolo IEEE 802.15.4, de manera específica con respecto a la capa de acceso al medio y en especial en el manejo de transmisiones de datos en tiempo real. La idea del capítulo es contextualizar al lector y facilitar la comprensión de los retos y las soluciones propuestas en los estudios revisados y enunciados en este documento; en el capítulo III, en el cual se abordan los resultados, se presenta un análisis comparativo de algunas metodologías, modelos, algoritmos y protocolos existentes con relación a la planificación y transmisión de datos en tiempo real con el estándar IEEE 802.15.4; si bien, el fin principal es la transmisión en tiempo real, el capítulo también contiene algunos estudios relacionados y que de forma directa o indirecta inciden en la transmisión de datos, por lo que se han incluido algunos estudios que involucran manejo energético de los sensores y ancho de banda, entre otros. Finalmente, en el capítulo IV se presentan las conclusiones y los trabajos futuros propuestos a partir de los estudios revisados.

## II. CONTENIDO

En este capítulo se exponen las características del protocolo IEEE 802.15.4, específicamente en relación con el funcionamiento y modo de operación de la capa de acceso al medio. Lo anterior, con el fin de que el lector se contextualice con respecto al funcionamiento del protocolo en revisión, con sus variables y métodos y, de esta manera, pueda identificar más fácilmente los desafíos que reviste la temática propuesta y las soluciones que los investigadores citados en el estudio proponen.

### **A. Capa de acceso al medio del protocolo IEEE 802.15.4**

En el estándar IEEE 802.15.4 se definen dos capas: la física y la de acceso al medio; también se definen dos tipos de dispositivos [2]: los que tienen dos funciones o completas en las WSN

(FFD por sus siglas en inglés *Full Function Device*), que pueden actuar como coordinadores de la red (*Sink*) o enrutadores en una topología (estrella o malla principalmente), y los dispositivos con una sola función principal, también llamados de funciones reducidas (RFD por sus siglas en inglés *Reduced Function Device*), que trabajan como nodos de recepción y envío de datos en el medio donde se ubiquen.

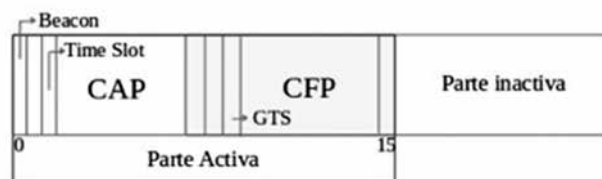
Los dispositivos antes mencionados se ubican en la parte eléctrica, electrónica y de configuración básica para establecer la conectividad entre los diferentes sensores de una WSN y conforman en conjunto con sus características propias la denominada capa física. Mientras que los procesos que comprenden el acceso al medio y la transmisión de datos a otros dispositivos de nivel intermedio se dan en la denominada capa de acceso al medio o MAC.

La capa MAC funciona mediante dos mecanismos para acceder al canal de comunicaciones, que acorde con [3] corresponden a:

**1) Mecanismo de contención básico CSMA/CA:** es la forma por defecto para acceder al medio, donde un nodo sensor (RFD o FFD) hace el censado al canal antes de iniciar una transmisión. Este modo se define con dos variables de estado: BE que es el exponente utilizado por el algoritmo de *backoff*, y NB que es el número de *backoffs* asociados a la transmisión activa. Con estas dos variables opera el mecanismo que buscará encontrar el canal libre para transmitir; en el caso de no encontrar disponibilidad de canal libre, intentará nuevamente el proceso mediante la ampliación de un tiempo aleatorio, acorde con la expresión  $2^{BE-1}$ , hasta obtener un canal libre y poder transmitir. En este mecanismo pueden existir colisiones cuando dos nodos acceden al mismo tiempo y en esos casos se aplica el algoritmo de *backoff*.

**2) Modo beacon-activo:** en este modo, el coordinador de la red, que es un dispositivo FFD y único en la WSN, se encarga de administrar y sincronizar los nodos, enviando periódicamente pequeñas tramas a los dispositivos RFD, denominados *beacons*, las cuales permiten a cada nodo identificarse y sincronizarse con el *Sink* en la WSN. El procedimiento anterior basa su funcionamiento en una estructura denominada *Supertrama*, la cual está constituida por dos partes: una, denominada activa, que la componen la trama de *Beacon* y 16 *time-slots* de igual tamaño; y la otra, llamada inactiva, en la cual el dispositivo entra en reposo o modo dormido. El límite entre una supertrama y otra lo definen las *beacons*, las cuales siempre se envían al inicio de las mismas.

La parte activa se divide en dos periodos en los que se utilizan distintos métodos de acceso al medio: por contención, denominado CAP: *Contention Access Period*, y libre de contención, denominado CFP: *Contention Free Period*. El periodo CAP utiliza CSMA/CA como mecanismo de acceso al medio, mientras que en el acceso CFP se utiliza una técnica denominada intervalo de tiempo garantizado o GTS (*Guaranteed Time Slot*). Para esto, el estándar IEEE 802.15.4 reserva hasta 7 *time-slot*, los cuales los asigna de manera directa el coordinador de la red (*Sink*) [4]. En una transmisión que opera en el modo *beacon-activo*, puede habilitarse solo el acceso CAP, el acceso CFP o ambos, según lo defina el *Sink*. En la figura 1 se pueden identificar las partes antes mencionadas:



**Fig 1.** Estructura Supertrama IEEE 802.15.4

En el modo *beacon-activo* se definen los parámetros que determinan el tamaño y tiempo de la supertrama, los cuales también establecen las características de los *slots*. Acorde con [5], estos

parámetros corresponden a BI, *Beacon Interval*, intervalo de *beacon*, que es el tiempo total, en segundos o milisegundos, y que determina la duración de la supertrama. Esta variable se define con la siguiente expresión (1):

$$BI = 960 \text{ Símbolos} * 2^{BO} \quad (1)$$

Donde BO, *Beacon Order*, es un valor entre 0 y 14 símbolos, que determina el tamaño del intervalo de *beacon* y se define al configurar la red.

Otra variable que interviene en este proceso es SD, *Superframe Duration*, la cual establece la longitud de la parte activa de la supertrama, también dada en símbolos. Esta variable se define con la siguiente expresión (2):

$$SD = 960 \text{ Símbolos} * 2^{SO} \quad (2)$$

Donde SO, *Superframe Order*, es un valor entre 0 y 14 símbolos, el cual determina el tamaño en *bits* y tiempo en segundos o milisegundos de los *slots* que componen la parte activa. Al igual que BO, es una variable configurable en el *Sink*.

Las dos variables anteriores, SO y BO, están supeditadas al cumplimiento de la siguiente restricción (3):

$$0 \leq SO \leq BO \leq 14 \quad (3)$$

La definición de símbolo, que es una parte de las expresiones (1) y (2), está directamente relacionada con la tasa de transmisión del estándar IEEE 802.15.4, y a partir de esta última se puede obtener el periodo de símbolo, que permite calcular el valor del tiempo de la supertrama y del intervalo de *beacon* (BI). Tomando como referencia a [6,7], un símbolo tiene una equivalencia a 4 bits, valor que permite realizar los cálculos correspondientes para obtener la longitud y el tiempo de duración de la supertrama.

El periodo de símbolo depende de la frecuencia con la cual trabaja el estándar que, a su vez, define la tasa de transmisión permitida. Por ejemplo: para la frecuencia 2.4 Ghz se tiene una tasa de transmisión de 250 kbps, lo que significa que dicho valor transformado a símbolos es de 62,5 ksímbolos (4) y el valor en segundos de un periodo de símbolo es 0,000016 sg (5).

$$250 \text{ kbps} = 62,5 \text{ ksímbolos /sg} \quad (4)$$

$$Ps = 0,000016 \text{ sg} \quad (5)$$

En la tabla 1 se pueden apreciar los periodos de símbolo acordes con las frecuencias y tasas de transmisión que permite el estándar IEEE 802.15.4.

TABLA I.

PERIODOS DE SÍMBOLO IEEE 802.15.4

Frecuencia	No. canales permitidos	Tasa de transmisión	No. bits por símbolo	Periodo de símbolo
868 Mhz	1	20 kbps	4	0,2 ms
915 Mhz	10	40 kbps	4	0,1 ms
2,4 Ghz	16	250 kbps	4	0,016 ms

Cuando el nodo coordinador establece que se trabajará con CFP, se puede hacer uso de la asignación de GTS; de acuerdo con el estándar IEEE 802.15.4, pueden existir hasta máximo 7 GTS, los cuales agrupan varios *time-slot*. Si se utilizan todos

los *slots* para GTS puede desaparecer CAP y el nodo coordinador trabajará solo en modo CFP.

Mediante el modo CFP se puede garantizar la latencia en la transmisión, dado que se asignan

de manera directa uno o más *time-slot* para un dispositivo que requiera transmitir información prioritaria, evitando la variabilidad inherente al acceso al medio, que se presenta cuando se hace por medio de los protocolos por contención. El proceso descrito implica el análisis de los recursos con los que se cuenta en la red, la forma en que serán asignados dichos recursos, los tiempos en los cuales debe hacerse la asignación y las prioridades que debe obedecer en un determinado caso. En resumen, se requiere la definición y aplicación de un algoritmo o procedimiento que permita una eficiente asignación y planificación de GTS, situación que ha llevado a diferentes estudios y aplicaciones a utilizar CFP con GTS como una forma de implementar la transmisión de datos en tiempo real.

En este artículo se describen algunos modelos, metodologías, algoritmos y protocolos que trabajan con este mecanismo en el modo GTS, así como otros aspectos que inciden de forma directa o indirecta en la transmisión de datos, temas que se abordan en el siguiente capítulo.

### III. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se reseñan los estudios relacionados con la optimización de transmisión de datos en la capa de acceso al medio de IEEE 802.15.4, haciendo énfasis en las metodologías, modelos, algoritmos y protocolos existentes con relación a la planificación y transmisión de datos en tiempo real con el estándar mencionado; también se abordan algunos aspectos que inciden de manera directa e indirecta en el proceso.

#### A. Estudios relacionados con el rendimiento del protocolo IEEE 802.15.4.

Existen diferentes estudios que analizan y miden el rendimiento del protocolo IEEE 802.15.4, en relación con el acceso al medio. Entre los más importantes se encuentran los que hacen la evaluación de las variables de asignación de

GTS y uso del espacio libre de contención (CFP) y con contención (CAP). También se considera la eficiencia del protocolo con respecto a métricas, tales como: consumo de energía [8], latencia de las tramas [9], tasa de transmisión (*throughput*) y pérdida de paquetes, entre otros. Si bien, en algunos casos no se abordan como estudios dirigidos al manejo de la transmisión de datos en tiempo real, inciden en el proceso. A continuación se describen algunos estudios que relacionan lo mencionado.

**1) Del consumo de energía:** esta clasificación parte de estudios como los enunciados por [6], [9], [10] y [11], los cuales coinciden en la necesidad de optimizar el comportamiento del protocolo, facilitando un eficiente proceso de transmisión, pero, sobre todo, orientándolo hacia un bajo consumo de energía.

[4] analiza el comportamiento del valor de la variable SO con respecto a la variable BO, encontrando que entre mayor sea la diferencia de BO con respecto a SO, menor será el consumo de energía, debido principalmente a que los sensores tendrán más tiempo de reposo y, por ende, menos actividad que desgaste las baterías de los mismos.

[9] maneja la variable  $SO=(BO-1)$ , para casos en los que se requiera ahorrar energía, mientras que para casos críticos en los que prime la latencia antes que la energía, propone el uso de  $SO=BO$ ; en este caso, como consecuencia importante por tener en cuenta, es el hecho de que no habría tiempo de reposo y el ahorro de energía sería prácticamente nulo. Una solución al problema planteado puede ser operar con periodos activos menores; que SO sea menor y cumplir los requerimientos de latencia y *throughput*, sin sacrificar el tiempo de reposo de los sensores.

Por otra parte, [10] hace un análisis de los posibles protocolos y técnicas que se pueden utilizar para ahorrar energía. El estudio se centra en la

propuesta de una metodología que analiza los diferentes factores que pueden incidir en el momento de implementar una WSN y [10] expone que es muy importante manejar en la capa de acceso al medio, protocolos que permitan utilizar la parte inactiva de la supertrama, sobre todo en los casos en los que no se use GTS, sino que se trabaje con el acceso por contención, con lo cual se puede establecer tiempos de reposo para los sensores, como ocurre con T-MAC (*Timeout-MAC*). En este tipo de situaciones, el autor referenciado también especifica que se pueden generar mayores retrasos en la comunicación, aunque se logra eficiencia energética. Por lo anterior, en el estudio se clasifican los sensores en categorías de acuerdo con el uso y la necesidad a la cual satisfagan.

Para [11], el análisis del consumo de energía en una WSN es algo más complejo; manifiestan que la energía que consume un dispositivo sensor tiene asociados diferentes factores que inciden en un mayor o menor consumo.

Para un *Sink*, [11] definen que se tienen seis factores asociados a la energía en reposo de los sensores, los cuales son: para transmisión de *beacon*; para recibir información de CSMA/CA en CAP; para recibir requerimientos de asignación de GTS; para recibir información de GTS en CFP; para transmitir ACK si se reciben paquetes correctamente en CAP y para transmitir ACK si se reciben paquetes GTS correctamente en CFP; mientras que para un dispositivo final se tienen 10 factores asociados a la energía, que corresponden a: para *backoff*; para CCA; para el uso de CSMA/CA en CAP; para hacer un requerimiento GTS; para transmitir un paquete con GTS en CFP; de espera debido a la comunicación diferida; en reposo; para recibir un *beacon*; para recibir un ACK en CAP y para recibir un ACK en CFP. Por lo anterior, el manejo eficiente de las variables que determinan el tamaño de la supertrama en una transmisión de datos es fundamental y entre menos retransmisiones se hagan, menor será el consumo de energía.

[11] en términos generales, proponen un algoritmo de planificación para mejorar el uso eficiente de energía y evitar la pérdida de paquetes al cual denominaron, SUDAS, *Superframe duration adjustment scheme*, y que asigna eficientemente los *time-slots* a los dispositivos que así lo soliciten, teniendo en cuenta, principalmente, la longitud de los paquetes por transmitir.

**2) Latencia en la transmisión:** es otro factor ampliamente considerado en la literatura científica, el cual puede estar asociado a diferentes situaciones, tales como, el manejo del tamaño de los paquetes que se transmiten, el tiempo de duración de la supertrama y el número de sensores asociados a un coordinador, entre otros. Por lo anterior, en este apartado se relacionan algunas de las situaciones expuestas y que apuntan a los desafíos de transmisión en tiempo real:

[9] prefiere sacrificar el tiempo de reposo de un sensor haciendo  $BO=SO$ , para lograr atender todos los requerimientos, sobre todo cuando es necesario una transmisión inmediata, con lo cual, evidentemente, se aumenta el consumo de energía. Esta solución no considera las necesidades de las aplicaciones, las cuales podrían permitir operar con periodos activos menores.

En el estudio de [12], por el contrario, no se igualan las variables en mención (SO y BO), sino que se estudia la forma de encontrar el mejor valor para la variable BO, proceso que se basa en el modelo de cadenas de Markov, aunque también relaciona los modelos de Poisson y Montecarlo, entre otros. Igualmente [12], con las técnicas utilizadas, logra reducir el tiempo de procesamiento y la pérdida de paquetes principalmente, encontrando que el valor de BO entre 0 y 3 es el más efectivo para evitar mayores retardos en la transmisión; no obstante, la pérdida de paquetes es alta. Mientras que el valor de BO entre 4 y 14 aumenta el retardo y se pierden menos paquetes, también se desperdicia mucho ancho de banda. Estudios similares que modelan mediante las

cadenas de Markov, se pueden encontrar en [9] y [13-15]. Una conclusión similar presenta [6]; mediante simulaciones encuentra que entre mayor sea el valor de BO con respecto a un valor de  $SO=0$ , la latencia es mayor.

En el estudio que presenta [10], se encuentra que una de las mejores maneras de disminuir la latencia es mediante el uso de intervalos de tiempo garantizado (GTS), clasificando los requerimientos de los nodos sensores en dos grupos: nodos de alto desempeño y nodos de bajo desempeño. Para los primeros se recomienda el uso de GTS, mientras que para los segundos se utilizan los métodos de contención con CSMA/CA. El autor del estudio modela su propuesta mediante redes Petri y expone las ventajas del uso de esta técnica validando el ejercicio mediante simulaciones, logrando evidenciar que priorizar los requerimientos ayuda en la elección de la técnica que se ha de utilizar y evidentemente en la transmisión de datos.

Por otro lado, [16] sostiene que valores de SO por encima de 7 tienden a relentizar el proceso de transmisión de datos y, por ende, disminuyen el rendimiento de la red, dado que se cuenta con un posible exceso de ancho de banda que será subutilizado. Por tanto, mediante las diferentes simulaciones aplicadas, propone como valores adecuados el rango entre 2 y 5 para SO, con lo cual se evidencia un mejor manejo de la latencia en la transmisión de datos.

[17,18] exponen que la latencia es un factor crítico en la transmisión de datos, sobre todo en aplicaciones relacionadas con el sector salud y cuidado de pacientes. Por lo anterior, identifican la necesidad de hacer una eficiente planificación de la asignación de GTS a los nodos sensores que así lo requieran, proponiendo una asignación de prioridades a los sensores de acuerdo con los datos que transmiten, con el fin de generar transmisiones preferenciales. En el estudio en mención, se trabaja con diferentes tipos de variables biomédicas, entre las cuales se

encuentran: ECG, electrocardiogramas; EEG, electroencefalograma y EMG, electromiografía, con la salvedad, que todas son importantes para transmitir, unas con mayor urgencia que otras. El estudio propone el uso de CFP con GTS, pero también tiene en cuenta CAP con CSMA/CA. El proceso se basa principalmente en trabajar con las prioridades de los sensores y usar CFP para las de mayor importancia y dejar a CAP para las que no revistan requerimientos altos en la transmisión.

Otro estudio relacionado con este tipo de aplicaciones se encuentra en [19]; el autor analiza los protocolos de acceso al medio en modo *beacon* habilitado y no habilitado, haciendo énfasis en el consumo de energía y la pérdida de paquetes. Sin embargo, en procesos enfocados hacia redes de sensores para el cuerpo humano (WBAN), el estudio es preliminar y de diagnóstico, principalmente.

Por su parte, [20] propone un método para disminuir la latencia en la asignación de *time-slot*. Este método es una optimización del funcionamiento de CSMA/CA; por ende, solo se aplica en el periodo CAP en modo *beacon*. El método utiliza  $BO=SO$ , con un valor estimado en 3 para estas variables, se originó a partir de varias simulaciones en el software NS2. La propuesta presentada por el autor pondera principalmente las solicitudes que llegan al *Sink*. Los resultados en el estudio realizado fueron: menor pérdida de paquetes, mejor rendimiento de la red y disminución de los retardos, pero aplicado a un estudio muy pormenorizado.

[21] propone un protocolo de acceso al medio basado en prioridades (*PriorityMAC*), para WSN, el cual consiste en analizar la planificación de asignación de *time-slot* y el acceso al canal, utilizando CSMA/CA y GTS; es decir, propone un híbrido en el tratamiento de las peticiones de los sensores. Para casos en los que la latencia no sea estricta se usará CSMA/CA, con algunas variaciones en su funcionamiento propuestas por el

autor de la investigación. Mientras que en los casos que se requiera transmisión en tiempo real se usa GTS. El enfoque es para aplicaciones industriales principalmente, en las que cada petición es tratada acorde con el requerimiento, y procesada con el mínimo retardo posible; el ejercicio se hizo mediante simulaciones.

Un estudio similar con el manejo de acceso al medio por contención CAP y mediante CFP es presentado por [22], quienes proponen un nuevo protocolo denominado BS-MAC (*Bitmap-Assisted Shortest job first based MAC*). Este protocolo busca que siempre haya suficientes *time-slot* para satisfacer los requerimientos de los sensores al *Sink*. En este estudio se utilizó el algoritmo de planificación SJF (*Shortest job first*). Según los resultados del estudio, [22] manifiestan que se logra transmitir más datos con menor retardo y disminuir el consumo de energía en el proceso.

**3) Pérdida de paquetes:** a continuación se mencionan estudios centrados principalmente en la pérdida de paquetes en WSN y que tienen relación directa con el manejo de las variables que determinan el intervalo de *beacon* y el tamaño de la supertrama, principalmente.

En primera instancia, [23] hace referencia al comportamiento del estándar IEEE 802.15.4 durante el proceso de transmisión de datos con respecto a la pérdida de paquetes y la latencia que puedan sufrir los mismos. En el estudio se evalúa el comportamiento del protocolo con diferentes sistemas operativos para sensores, tales como: Contiki, TinyOS, OpenZB y TKN15.4. El análisis se hace considerando los valores de la variable BO entre 0 y 14. En este proceso se encontró que el valor con mejores prestaciones para evitar la pérdida de paquetes, disminuir la latencia y tener un consumo de energía aceptable es BO=6. La investigación utiliza diferentes implementaciones en los sistemas antes mencionados, en los que [23] identifica que el sistema con mejores prestaciones es TKN15.4, situación

que se explica teniendo en cuenta las diferencias de cada uno de los sistemas estudiados en referencia con: los algoritmos, plataformas de hardware que aceptan, técnicas y protocolos de acceso al medio, principalmente.

[7, 24] evalúan también la asignación eficiente de *time-slot*. Proponen algoritmos basados en la denominada lógica difusa (*fuzzy logic* en inglés). En estos estudios se propone un método que permite identificar el mejor valor para SO a partir de un valor por defecto de BO y las características de la topología de la WSN; el número de sensores; el tamaño de los paquetes por enviar y el número de paquetes por sensor. El algoritmo trabaja con intervalos definidos y tamaños de paquete conocidos antes de iniciar la transmisión, con la particularidad de que el algoritmo basa sus cálculos para encontrar el valor de SO en 30 reglas de lógica difusa. Los resultados indicados en el estudio permiten evidenciar que hay menores pérdidas de datos y menor latencia en la transmisión, cuando SO=5 y los intervalos de tiempo de transmisión están entre 0.1 y 0.5 segundos, lo que evidencia un mejor rendimiento de la red, dado que el tamaño del *buffer* para atender los requerimientos es mayor, lo que permitirá que se puedan atender más sensores en el momento de la transmisión. Por el contrario, cuando SO=0 o SO=1, las pérdidas de paquetes, tanto en reintentos de acceso al medio, como en descarte de paquetes son mayores, debido a que no hay tiempo suficiente para enviar los mismos, lo que genera pérdida de paquetes e incremento de la latencia.

[16] estudia, igualmente, el comportamiento del tráfico de la WSN y la pérdida de paquetes; establece que valores mayores a 7 en la variable SO generan un mayor ciclo de trabajo y exigen mayor procesamiento, debido a que pueden generarse más solicitudes de *time-slot*, llenando las colas para atender requerimientos; y si no se cuenta con los recursos necesarios y las peticiones aumentan indiscriminadamente, habrá mayor pérdida de paquetes.





Una situación similar presenta [25]; un análisis sobre el rendimiento que puede tener una WSN y la pérdida de paquetes que se puede presentar con el uso de GTS en varios escenarios, principalmente cuando los nodos no tienen interferencia y cuando tienen algún tipo de interferencia. El ejercicio se hace con varias simulaciones, en las que el número de paquetes varía de 14 a 30 por segundo, en periodos de tiempo de 50 segundos cada una. En el estudio, el autor encontró que el valor que menos pérdida de paquetes presentó es el de tres *time-slot* por GTS, el cual solo se aplica a los escenarios planteados.

### **B. Estudios relacionados con la asignación eficiente de GTS para disminución de latencia en la transmisión.**

En esta clasificación se presentan estudios que intentan manejar de manera eficiente la transmisión de datos en la capa MAC, en especial, cuando la latencia es uno de sus requerimientos importantes.

En esta parte se ha dividido la exploración de los estudios en cuatro grupos: en primera instancia, se tiene los que priorizan el control de admisión en la planificación de GTS; en segundo lugar, están los que tienen en cuenta la variación del comportamiento de CAP y CFP de la supertrama; en tercer lugar, se ubican los que tienen en cuenta el algoritmo de planificación de GTS y, por último, se han adicionado unos estudios con métodos alternativos que involucran varios elementos como modelos matemáticos y redes inteligentes, entre otros, con el fin de disminuir la latencia y mejorar el manejo de ancho de banda y los tiempos de procesamiento.

**1) Con control de admisión:** en este apartado, [26] presentan el diseño de un mecanismo denominado *i-GAME (Implicit GTS Allocation Mechanism)*, el cual fue implementado bajo el sistema operativo para sensores denominado TinyOS y desarrollado en el lenguaje de programación NesC. El mecanismo funciona en

la capa de acceso al medio del protocolo IEEE 802.15.4, que se encarga del control de admisión en la asignación de requerimientos de GTS. El objetivo del desarrollo propuesto fue manejar eventos sensibles al retardo en WSN. Por ello, dentro del mismo, se incluyó un algoritmo para la gestión del mecanismo, que contiene la función de control de admisión, encargada de admitir o rechazar las peticiones de los sensores con respecto a GTS.

El funcionamiento del algoritmo se basa principalmente en las prioridades que puedan tener los sensores en relación con la función que desempeñan, en especial las que son sensibles al tiempo. En un segundo estudio, [27] presentan la implementación del mecanismo, considerando el funcionamiento con tareas periódicas. Para el nuevo estudio, aparte de *i-GAME*, aplican el modelo de análisis matemático denominado *Network Calculus*, que trabaja con el análisis de sistemas de colas deterministas en un flujo de datos proporcionado. En la implementación se permite que varios dispositivos compartan un mismo conjunto de GTS a través de un algoritmo de planificación *round-robin*, teniendo en cuenta las siguientes premisas:

- Los nodos candidatos a GTS comparten el mismo *slot* en diferentes momentos, pero con tasas de llegada similares.
- Las tareas no hacen uso de la reserva de recursos adicionales (lo que se hace en cada supertrama al inicio del proceso de planificación) las cuales se utilizarán para eventos esporádicos obligatoriamente.

De acuerdo con [27], la implementación del mecanismo *i-GAME* con las herramientas matemáticas y de planificación propuestas en la investigación, permitieron optimizar el uso del ancho de banda en redes con IEEE 802.15.4 con GTS en el acceso al medio; también concluyen que, si bien se hizo una mejor planificación en la asignación

de recursos y control de admisión, aún se debe trabajar mucho más en el diseño de un procedimiento de planificación que permita mayores flujos de datos y tasas de velocidad más altas.

**2) Ajustando CAP y CFP de la supertrama:** se parte de los estudios de [28, 29], en los que se encuentra uno que propone el diseño de un algoritmo denominado ADA-MAC (*Adaptive MAC Protocol for Real-time*) el cual define una nueva versión del acceso al medio para IEEE 802.15.4., trabaja con 64 *mini-time-slot* e invierte la forma de la supertrama, haciendo que primero se utilice el espacio para CFP y luego para CAP. En el proceso de asignación de GTS se tiene en cuenta las prioridades de los requerimientos, los que son agrupados en tres colas así: prioridad alta que corresponde a la cola de ráfagas de información esporádica con prioridad y retardos mínimos; colas de datos periódicos, las cuales se programan en el momento de sincronizar con el *Sink* y se refiere a los datos que se transmiten en tiempo real y, por último, las colas de prioridad normal o baja, que refiere a datos con tolerancia a retardos mayores.

Para las dos primeras colas se usa siempre CFP y solo para datos no sensibles al retardo se usa CAP. El estudio concluye que el uso de los *mini time-slot* ayuda en el manejo eficiente de la asignación de GTS, sobre todo cuando se utiliza para requerimientos de tiempo real, dejando que la parte de la supertrama de CAP se encargue de los requerimientos menos críticos.

Con respecto al manejo de la partes CAP y CFP de la supertrama, [30] proponen un protocolo denominado *FieldBus*, el cual, según sus autores, es capaz de transmitir datos periódicos con requerimientos de tiempo real; esporádicos con diferente prioridad y sin requerimientos de tiempo real. *Fieldbus* modifica el estándar IEEE 802.15.4 original, dado que propone trabajar con la parte inactiva de la supertrama para tomarla como una ampliación de CAP y atender así solicitudes por contención en los casos que sea necesario, con

lo que se busca incrementar el ancho de banda disponible en los *time-slots*. La transmisión de eventos periódicos se hace durante el CFP. El CAP se utiliza para la transmisión de eventos esporádicos y que no tienen requerimientos de tiempo real. El protocolo se implementó mediante simulaciones, y acorde con los resultados presentados por los autores del estudio, se concluye que se logró optimizar la transmisión de datos en las tres posibles situaciones que se enuncian. En el estudio también se considera que un trabajo futuro y complemento al mismo sería la redirección hacia una asignación y planificación eficiente de los GTS en sistemas con múltiples coordinadores.

Por otro lado, [31] proponen optimizar el estándar IEEE 802.15.4 modificando la estructura de la supertrama, disminuyendo el tiempo de cada *mini time-slot* y eliminando el periodo de acceso al medio por contención (CAP), dejando así únicamente la parte libre de contención (CFP). Los autores concluyen que con estos cambios en la estructura de la supertrama, se tienen más ventajas, puesto que se aumenta el número de *time-slot* y se trabaja directamente con GTS en el periodo CFP, lo que permite una óptima planificación de los *time-slot* que componen la misma, logrando así reducir la latencia y permitiendo mayor disponibilidad y respuesta a requerimientos críticos de los sensores.

**3) Con algoritmos de planificación:** [32] propone un algoritmo denominado GAS (*GTS Allocation and Scheduling algorithm*), el cual se diseñó para resolver los problemas que aquejan la asignación eficiente de GTS en una WSN con IEEE 802.15.4. El algoritmo intenta proporcionar de manera eficiente la asignación de *time-slot* garantizado a aplicaciones sensibles al retardo, mediante una adecuada organización de la asignación de GTS, con el fin de evitar la escasez y subutilización de los mismos. Este algoritmo se basa en el modelo de planificación EDF, (*Earliest Deadline First*) que asigna los *time-slot* de acuerdo con el

orden de los mensajes que se encuentren más cercanos a su límite de tiempo (*deadline*).

Partiendo de este método, [32] presenta una variación denominada EDCF-mGTS (*Earliest Delay Constraint with Minimum Guaranteed Time*), en la cual se tiene en cuenta la prioridad a la hora de asignar los recursos. En el estudio se propone manejar las variables SO y BO con el mismo valor ( $SO=BO$ ) como una condición general, por lo que los sensores están en continuo funcionamiento sin periodo de reposo, pero en atención constante a los requerimientos que se presenten. El algoritmo se valida en diferentes simulaciones y, acorde con las conclusiones del estudio, se logró manejar eficientemente la planificación en la asignación de GTS en requerimientos sensibles al retardo. [32] también expone que en un futuro trabajo sería importante manejar correctamente los valores SO y BO, principalmente el de SO, que determina la longitud de la supertrama y el tiempo de los *time-slot*.

[33, 34] implementaron un sistema para la planificación de transmisiones periódicas con el estándar IEEE 802.15.4, mediante un algoritmo basado en EDF. En los estudios relacionados se utilizan las capas básicas del estándar (física y de acceso al medio), pero se usa la tecnología *WirelessHart* en la implementación de la solución completa, que es una tecnología que incorpora un protocolo para redes inalámbricas con topología tipo malla, usada principalmente para procesos de automatización industrial. La solución propuesta, además de intentar transmitir en tiempo real, busca reducir el consumo de energía, mejorar el uso del ancho de banda y disminuir la latencia en el proceso, objetivos que según [33, 34], se logran mediante la solución propuesta y las simulaciones realizadas así lo demuestran.

**4) Con métodos alternativos:** [35, 36] presentan un algoritmo que trabaja con un método alternativo en la planificación y asignación de GTS, denominado *dinámica de consenso*. En este

método se cuenta con un *Sink* de la red que tiene una comunicación directa con los nodos de la misma, conocidos como agentes. La base de la propuesta se fundamenta en la modificación del estándar IEEE 802.15.4, específicamente en el manejo de la supertrama para transmisiones en tiempo real, proponiendo una supertrama múltiple que puede abarcar varias supertramas y que funcionará mediante un periodo de tiempo determinado, el cual puede contener varios intervalos de *beacon* internamente. El fin principal del método es evitar que una tarea que no completa su ejecución en un tiempo determinado, principalmente en el asignado en un *time-slot* o en un GTS, cuente con las garantías de hacerlo. Para ello, en la nueva propuesta se habla de tareas no preferentes, que serán las que no puedan ser interrumpidas por el *Sink* y tendrán garantizada toda su ejecución gracias a la múltiple supertrama. [35, 36] diseñan un algoritmo de planificación de GTS, con la nueva estructura de supertrama múltiple, garantizando que las tareas se ejecutan en los tiempos planeados, sin que por ningún motivo se vean truncados sus procesos por el coordinador de la red.

El proceso propuesto tiene varias fases: una *offline* en la que se planifican los GTS; otra de comunicación entre agentes y coordinador mediante la supertrama múltiple y una más de control de acceso y ejecución de las tareas. El algoritmo se probó en una simulación que tiene una WSN con topología estrella, con un nodo *Sink* y varios nodos que funcionan como agentes en la planificación por consenso de los GTS. Así mismo, trabaja con eventos periódicos e intenta que se manejen en tiempo real.

Según [35, 36] y los resultados encontrados en las pruebas realizadas en las simulaciones, se concluye que el algoritmo logra una planificación eficiente acorde con la múltiple supertrama, para la ejecución de las tareas y asignación de GTS, pero que aún quedan temas importantes por resolver tales como, la pérdida de paquetes y el control de retrasos en el

manejo de los requerimientos de nodos sensores, que, de acuerdo con la publicación, serán tema de posteriores estudios.

[37,38] proponen el diseño de un nuevo algoritmo para la asignación de GTS, denominado AGTS (*Allocation GTS*), el cual se basa en combinar las WSN con *Smart-Grids* (Redes inteligentes), cuyo propósito es reducir el tiempo de transmisión, realizar una asignación eficiente de GTS y, si es necesario, desasignar un GTS en caso de que un dispositivo no lo requiera. El proceso se realizó en una WSN con topología en malla y se basa en manejar los dispositivos FFD de manera inteligente; se propone a futuro trabajar con *Sink* en diferentes *clusters* para, de esta manera, poder centralizar el control del algoritmo propuesto y obtener un mejor rendimiento.

[39] proponen el diseño de un algoritmo adaptativo que busca disminuir la latencia, mejorar la equidad en la asignación de GTS y la utilización del ancho de banda en redes WBASN (*Wireless Body Area Sensor Network*). En el estudio revisado, los autores buscan manejar eficientemente la energía de los sensores y asignar prioridades a los paquetes, de acuerdo con la variable que estén midiendo. El algoritmo trabaja con la parte CFP de la supertrama, definiendo como constantes los valores para las variables de SO y BO (3 y 4, respectivamente).

El ejercicio se valida mediante diferentes pruebas, basadas en un modelo de simulación que utiliza la distribución de Poisson para modelar la llegada de los paquetes en diferentes tiempos y se demuestra la mejora en cuanto a los objetivos perseguidos. El algoritmo y la aplicación en sí, están enfocados hacia sistemas médicos y de apoyo a la salud.

Por otra parte, [40] proponen otro algoritmo que busca realizar la planificación y asignación eficiente de GTS en tiempo real y que va en la misma línea del anterior, el cual consiste en aplicar el algoritmo

en una WSN con topología en estrella y varios nodos conectados al *Sink*. El proceso radica en desarrollar dos procedimientos: uno para calcular los valores de BO y SO, que parte del supuesto que los nodos envían mensajes con periodo y longitud conocidos. A partir de esta información se obtienen los valores de BO y SO y la cantidad de GTS necesarios. Un segundo procedimiento tiene que ver con la planificación de los GTS a partir del BO y SO, garantizando que se logre una transmisión en tiempo real.

### **C. Estudios relacionados con cambios al protocolo en cuanto a la cantidad de GTS permitidos por IEEE 802.15.4.**

Algunos autores trabajan con el estándar IEEE 802.15.4 con sus valores por defecto en SO, BO y número máximo de GTS; sin embargo, se encuentran otros estudios en los que estos valores cambian primordialmente en la búsqueda de mejores condiciones en la transmisión de datos y en atención a los requerimientos de los sensores.

En este apartado se mencionarán algunos estudios que modifican la estructura de la supertrama y en especial en el manejo de los intervalos de tiempo garantizado (GTS), con el fin de mejorar la transmisión de datos en tiempo real.

**1) Asignación dinámica de time-slot para GTS:** en este apartado se inicia con el estudio de [41, 42] en el cual, el número de *time-slot* GTS que se define por defecto en el estándar IEEE 802.15.4 no es suficiente, debido a que se quedan muchos requerimientos sin atender, sobre todo cuando se tiene una tasa de paquetes alta y, por ende, los retardos en la entrega de los mismos pueden ser cada vez mayores.

Por lo anterior, [41, 42] proponen un modelo dinámico para el manejo de tareas en tiempo real basado en la forma  $(m,k)$ -firm constraints, donde  $m$  son los mensajes por transmitir y  $k$  los plazos consecutivos en los cuales se deben transmitir. El modelo propone un sistema polinomial en el

manejo de los *time-slot*, de manera que se puedan asignar los GTS eficientemente. El estudio se probó en diferentes simulaciones y también en experimentaciones con sensores MicaZ, evidenciando resultados óptimos con respecto a los objetivos planteados.

Otro estudio que relaciona la asignación dinámica de *time-slot* para GTS, la cual puede aumentar o disminuir, es el de [43], quienes proponen una modificación a la supertrama por defecto que ofrece el estándar IEEE 802.15.4. Esta modificación consiste en utilizar la parte inactiva de la misma para asignar lo que los autores denominan GTS virtuales o VGTS, que corresponden al *time-slot* que se asignará cuando se presenten requerimientos adicionales, principalmente en eventos esporádicos, so pena de reducir el periodo inactivo del sensor *Sink*, sin afectar los tiempos de los demás sensores.

**2) Definición de mini-time-slot para GTS:** [44] proponen una modificación al estándar IEEE 802.15.4, que consiste en manejar 16 *mini time-slot* durante el CFP, con lo cual, se logra atender más peticiones y mejorar el tiempo de transmisión, resultados que se evidencian en las simulaciones realizadas.

[45] siguen con esta misma línea de modificar la cantidad de *time-slots* y asignación de GTS; presentan un enfoque del manejo de CFP, en el que al igual que [44], proponen el uso de 16 *mini time-slot*, con la variante de manejar eventos periódicos y mensajes en tiempo real. En esta propuesta los requerimientos y restricciones con respecto al retardo son la prioridad; por ello, se hace una planificación del ancho de banda antes del proceso de transmisión, aunque la constante radica en que se debe hacer una asignación de más *time-slot* para GTS, desviándose, por tanto, del estándar IEEE 802.15.4. En el estudio relacionado, los autores del mismo han denominado al algoritmo, EGSA (*Explicit Guaranteed time slot Sharing and Allocation scheme*) con el cual

logran que la exclusividad de un GTS no sea para un solo dispositivo, sino que se comparta con muchos más.

En esta misma línea de subdivisión de *time-slot* se encuentra [46], quien propone un nuevo algoritmo para la asignación eficiente de GTS en el estándar IEEE 802.15.4, el cual reduce el tamaño de los GTS a la mitad, manejando 32 *mini time-slot*, en lugar de los 16 del protocolo original. El cambio en la cantidad y tamaño de los *time-slot* que propone [46], se basa en que un *slot* de CAP acorde con el protocolo original es igual a un *slot* de CFP; no obstante, en esta última, para la supertrama, la transmisión no entra en contención, sino que se asigna de forma directa, lo que da mayor velocidad al proceso. Teniendo en cuenta esto, [46] afirma que se podría optimizar de mejor manera esta parte de la supertrama, si se subdividen los *time-slot* en *slot* más pequeños, específicamente en una relación de SD/32, lo que significa, que en este nuevo modelo no solo se podrían asignar 7 GTS, sino que podrían ser hasta 14.

El estudio indica que los resultados obtenidos, producto de simulaciones realizadas trabajando con más *time-slot* para los requerimientos de los sensores, mejoraron el aprovechamiento del canal y aumentaron la velocidad de procesamiento. Como también se evidenció que la modificación propuesta incrementa el consumo de energía con respecto al estándar original. Este trabajo presenta un comparativo con respecto a los algoritmos i-GAME [27] y GAS [32], previamente descritos; los resultados fueron superiores en rendimiento y velocidad principalmente. Estudios similares a los expuestos se encuentran en [28-29], cuyo algoritmo ADA fue explicado en el ítem anterior (ver sección C.2). Este algoritmo se aplicó a sistemas ciberfísicos relacionados con el área de la salud.

#### **D. Estudio relacionados con la asignación de GTS en WSN con topologías malla o árbol.**

Así como existen estudios que se han concen-

trado en el análisis del comportamiento de WSN con el estándar IEEE 802.15.4 con topología estrella, también se han adelantado algunas investigaciones que relacionan la topología malla o árbol. A continuación se mencionan algunos referentes en este aspecto. Se han adicionado estudios relacionados con la topología malla o árbol, debido a que la forma en que los nodos operan no es la misma y estos cambios pueden afectar la transmisión de datos en tiempo real.

**1) Para requerimientos sensibles al tiempo:** [47] proponen un protocolo de control que busca la articulación en la transmisión de la información, desde un nodo a otro en una topología malla, principalmente con eventos periódicos y esporádicos sobre múltiples saltos. Este algoritmo se denomina CPAGA (*Control Protocol for Any to Any (A2A) GTS Allocation*). El estudio se realizó y validó mediante simulaciones (con el programa OPNET). El algoritmo propuesto se caracteriza principalmente por estar enfocado hacia tiempo real, con nodos en posiciones fijas y el uso de GTS para la transmisión de paquetes.

El protocolo parte de una planificación *offline* de los posibles GTS por requerir y luego hace la asignación en el intervalo de *beacon* correspondiente. [47] concluyen que el algoritmo permite una asignación óptima de los recursos disponibles en el *Sink*, sobre todo para requerimientos en tiempo real, en el manejo de eventos periódicos y esporádicos que se puedan presentar.

Otro estudio con este mismo enfoque se encuentra en [48], en el que se hace referencia a un mecanismo de propagación de eventos multisalto en redes con topología malla o árbol, con la particularidad de hacerlo mediante modificaciones a la trama de *beacon* para conocer la relación con el anterior y próximo salto y así determinar el

número de coordinadores en la red, que según los autores del estudio revisado, corresponde a  $N = 2^{(BO-SO)}$ , donde N sería el número de coordinadores necesarios en este tipo de redes y debido a que BO siempre será mayor o igual que SO, se garantizaría un número exponencial de posibles coordinadores, que puedan satisfacer la atención a los nodos de la red. El estudio se realizó bajo una simulación con el programa NS2 y sus principales objetivos se enfocaron hacia la reducción de la latencia y el manejo eficiente del ancho de banda. En el estudio se concluye que el mecanismo propuesto es efectivo, puesto que en los resultados obtenidos se identificó una considerable reducción en la latencia, de hasta un 95% comparado con el CSMA/CA y un manejo eficiente en la entrega de paquetes de hasta un 100% de confiabilidad.

**2) Algoritmos de planificación que relacionan la disminución del consumo de energía:** [49], referentes importantes para este caso, proponen un algoritmo para una técnica de distribución de tiempo para transacciones de nodos en topología tipo malla o árbol, denominada TDCS (*Time Division Cluster Schedule*), la cual está enfocada hacia eventos periódicos principalmente. El objetivo del algoritmo propuesto es cumplir con todos los plazos de tiempo extremo a extremo dados a los requerimientos en los *clusters* definidos, reduciendo al máximo el consumo de energía en el proceso. Según [49], la técnica es eficiente y funciona con respecto a los objetivos planteados, puesto que se concluye que se logró disminuir el consumo de energía, gracias al control del intervalo de *beacon* (BI) que hace el algoritmo y que permite una óptima planificación en la asignación de GTS para este tipo de topologías.

[50] diseñan un nuevo protocolo denominado DIID (*dynamic inflation implicit deflation protocol*),

que modifica la estructura original de IEEE 802.15.4, con el fin de poder manejar eventos esporádicos y periódicos de manera eficiente. El proceso consiste en reservar espacios de *time-slot* para futuros eventos esporádicos, con la salvedad de no utilizar dichos espacios, sino cuando el evento se presente, el cual debe cumplir con unos criterios determinados que relacionan los recursos por asignar. Este procedimiento hace que todo evento esporádico sea sometido a una prueba de aceptabilidad, lo que le permitirá la asignación del GTS requerido, mientras que la otra parte de la supertrama se usará para los eventos periódicos previamente identificados. La propuesta intenta también disminuir el consumo de energía de los dispositivos y lograr una eficiente asignación de los recursos de la red en cuanto a GTS.

Por otro lado, [51] presentan una propuesta de un nuevo algoritmo que permite manejar una red de sensores con topología en árbol mediante un modelo polinomial, el cual se basa en la planificación por *cluster*. En este modelo, cada rama del árbol es un *cluster* y el algoritmo busca la forma de asignar de la mejor manera los GTS y reducir el consumo de energía. Esta propuesta basa su funcionamiento en un BI lo más grande posible e igual para *cluster* que hacen parte de la red, con lo que se pretende disminuir el ciclo de trabajo de cada uno de los *Sink* en contienda. Los SD de los *cluster* serán variables y estarán asociados a los tamaños y periodos de los paquetes que se transmiten.

En resumen, el algoritmo determina la parte activa, y el BI de cada *cluster* encuentra los tamaños de los SD por *cluster*; se basa en el problema del camino más corto para encontrar la solución a la planificación en desarrollo y, con respecto a este último aspecto, intenta hacer una planificación de GTS efectiva.

Por último, [52] proponen un algoritmo para la optimización del tiempo de vida de una WSN en cuanto a la energía que consumen sus dispositivos, la cual utiliza GTS en la transmisión de paquetes entre sus nodos. La propuesta está dirigida a redes de sensores con topología árbol y el énfasis principal, es la planificación del uso de ciclo de trabajo en la asignación de GTS de cada uno de los *clusters* que forman la WSN en árbol. El método usado es holístico y se enfoca en la solución de tres problemas: la construcción lógica de los *clusters* en la topología árbol de la red WSN; una efectiva configuración de cada uno de los sensores con respecto al uso de la energía y la planificación del ciclo de trabajo de cada *cluster* y en general de la red. Según [52], al solucionar los problemas planteados se logró mejorar el funcionamiento de la red en tiempo real y el ahorro en el consumo de energía por parte de los nodos, debido, en términos generales, a la optimización del ciclo de trabajo de los sensores en la WSN.

#### ***E. Resumen de estudios realizados y relacionados con la capa de acceso al medio en IEEE 802.15.4.***

Teniendo en cuenta los referentes enunciados en las secciones anteriores de este capítulo, se ha generado la tabla 2, la cual resume los estudios y algoritmos identificados, teniendo en cuenta principalmente las siguientes variables: topología sobre la cual se hace el estudio, el tipo de eventos que soporta, si maneja condiciones de tiempo real, el tipo de enfoque del algoritmo, los valores propuestos para las variables BO y SO, finalizando con la cantidad de *time-slot* que maneja el algoritmo o estudio propuesto. Algunos estudios no aparecen debido a que no cumplen con las condiciones precisadas en el resumen propuesto.

TABLA II  
ESTUDIOS Y ALGORITMOS PARA MAC IEEE 802.15.4.

Topología	Tipo eventos	Estudio / Algoritmo	Tiempo Real	Enfoque	BO	SO	Time-Slot	
Estrella	Periódico	Fuzzy-Duty-Cycle [6-7]	No	Transmisión	6	0/1/5	16	
		I-GAME [27]	No	Planificación – Round Robin	ND	ND	16	
		Consenso [35]	No	Transmisión	5	4	16	
		Sistema de Control [33]	Si	Planificación - EDF	ND	ND	16	
		Cheng [44]	No	Planificación	ND	ND	9 GTS	
		EGSA [45]	No	Planificación	0/14	0/14	16 mini	
		Haque [46]	Si	Planificación	8	6	32	
		Chao [9]	No	Energía	6	6	16	
		Hernández [23]	No	Transmisión	6	0	16	
		Amarillo [5]	Si	Energía y latencia	6	1/6/12	16	
		Martínez [10]	Si	Energía y Latencia	Si	ND	ND	16
		Yoo et al [37]	Si	Transmisión	Calcula	Calcula	16	
		Rane [16]	No	Transmisión	Variable	Menor a 7	16	
	Periódico / Esporádico	GAS [32]	Si	Planificación - EDF	8	8	16	
		Markov [12]	No	Planificación	SO	BO	16	
		ADA-MAC [28]	Si	Transmisión	ND	ND	64 Mini	
		FieldBus [31]	Si	Transmisión	ND	ND	16	
		SUDAS [11]	No	Transmisión	Variable	Variable	16	
		BS-MAC [22]	No	Transmisión	Variable	Variable	16	
Árbol / Malla	Periódico	TDCS [49]	No	Planificación	5	0/1	16	
		Choi y Lee [48]	No	Planificación	5	3	16	
Árbol / Malla	Periódico / Esporádico	CPAGA [47]	Si	Transmisión	0/4	1	16	
		DIID [50]	Si	Planificación	4	0/1	16	
		Zhang et al [38]	No	Planificación	4	3	16	
		AGTS [39-40]	Si	Planificación	Variable	Variable	16	
Árbol / Malla	Esporádico	Kim et al. [52]	No	Energía	Variable	Variable	16	
		PriorityMAC [21]	Si	Planificación	Variable	Variable	16	
Árbol	Periódico	Ahmad et al. [51]	No	Transmisión y consumo de energía.	14	Variable	16	



En la tabla 2 se puede observar que 12 de los algoritmos tienen como objetivo la transmisión en tiempo real; también se identifica que cuatro estudios proponen una modificación en la estructura de la supertrama propuesta por la norma IEEE 802.15.4. Los demás estudios siguen con la subdivisión de la supertrama en máximo 16 *time-slot*. Nueve de los estudios, proponen alternativas de planificación en topologías árbol o malla; el resto trabaja con la topología en estrella. Diez estudios proponen algoritmos para manejar eventos periódicos y esporádicos. Trece estudios tienen en cuenta la planificación en el momento de proponer un nuevo algoritmo o mejora a la norma IEEE 802.15.4 original. Tres estudios hacen análisis de las variables BO y SO trabajando con el mismo valor en la asignación de GTS y solo un estudio de los revisados calcula los posibles valores óptimos para estas variables. Con este resumen estadístico termina este capítulo.

En el siguiente apartado se enuncian las conclusiones y propuestas de trabajos futuros.

## IV. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

El presente trabajo evidencia importantes avances para optimizar y mejorar el protocolo IEEE 802.15.4, particularmente desde el punto de vista de su aplicación a la transmisión de datos en tiempo real. Estos avances se han dado en varios frentes: algoritmos de planificación para redes sensibles al tiempo; métodos que permiten el ahorro de energía en la asignación de GTS y la búsqueda de procedimientos que permiten la reducción en la pérdida de paquetes, entre los más importantes.

Frente al tema de algoritmos para la planificación de la asignación de GTS en sistemas sensibles al tiempo, se observa la tendencia que presentan los estudios, de trabajar con redes en

topología estrella que se configura así: un nodo *Sink* como coordinador de la WSN y varios nodos sensores transmitiendo datos hacia el *sink*, siendo este caso de uso, el más común en las investigaciones revisadas.

Otra característica que se identificó en esta revisión investigativa tiene que ver con la propuesta de algunos estudios que proponen soluciones que pueden modificar la estructura actual del protocolo IEEE 802.15.4, principalmente en lo relacionado con la supertrama, lo cual puede ser mediante el aumento de los *time-slot* que la componen, o el aprovechamiento de la parte inactiva, entre otros.

La variedad de propuestas es importante, pero aún la tarea de optimizar las transmisiones y aprovechar la técnica de asignación de espacios garantizados de tiempo (GTS), para transmisiones en tiempo real, es un desafío importante que está en auge, lo cual se corrobora mediante los estudios presentados en este documento, en los que cerca de la tercera parte de los mismos, se enfocan en este objetivo.

Con respecto a los estudios que investigan la planificación de GTS y la optimización del consumo de energía por parte de los sensores, se tiene que el elemento de mayor análisis refiere a la optimización del ciclo de trabajo que controla el proceso, principalmente en el manejo de las variables BO y SO. Lo anterior, con el fin de poder contar con el tiempo inactivo y establecer comunicación con el *sink*, solo cuando sea necesario. Con respecto a este tema existen muchos estudios y los avances han sido significativos, pero también es un desafío que puede marcar la pauta en la popularización de este tipo de tecnologías.

En relación con la pérdida de paquetes, los autores de las diferentes investigaciones revisadas, buscan modelar sistemas confiables. Por lo anterior, es común encontrar que algunos estudios utilizan diferentes sistemas operativos para

sensores; proponen modelos matemáticos para la distribución de recursos y realizan simulaciones e implementaciones, encontrando, en algunos casos, que la eficiencia está en la modificación de la estructura de la supertrama, o en la propuesta de un algoritmo que controle mejor los recursos de asignación de espacio. Otros investigadores proponen métodos alternativos, que pueden incluso incorporar nuevos protocolos complementarios como *WirelessHart* para encontrar una solución óptima.

El trabajo futuro, acorde con lo revisado, debe enfocarse en la optimización de la operación del estándar IEEE 802.15.4, con base en los parámetros de control que ofrece el mismo.

Lo anterior debe tener en cuenta principalmente los siguientes aspectos:

- La transmisión de datos en tiempo real, sobre todo en el manejo que hacen los dispositivos para el acceso al medio, entendido este proceso como una parte fundamental en una transmisión extremo a extremo (*end-to-end*).
- El cálculo de un eficiente intervalo de *beacon* (BI) que involucra a las variables BO y SO, las cuales deben manejarse eficientemente para que permitan un mejor aprovechamiento y rendimiento de la supertrama, sobre todo en el uso de los *time-slot* que la componen.
- El manejo de la energía que consumen los nodos, sobre todo a la hora de modificar o diseñar nuevos algoritmos para la planificación y la asignación de *time-slot* y GTS por parte del *sink* y los nodos sensores.

## REFERENCIAS

- [1] S.E. Campaña, y J.M. Londoño, “Estudio de redes de sensores y aplicaciones orientadas a la recolección y análisis de señales biomédicas”. Gerencia Tecnológica Informática, 12(33), 85-99, 2003.
- [2] M. Kohvakka, M. Kuorilehto, M. Hännikäinen, and T.D. Hämäläinen, *Performance Analysis of IEEE 802.15.4 and ZigBee for Large-Scale Wireless Sensor Network Applications*. PE-WASUN’06, Torremolinos, Malaga, Spain, 2006.
- [3] S.E. Campaña & J.M. Londoño, *A Characterization of data transfer modes in Wireless Sensor Networks based on IEEE 802.15.4 in Real-time*. IEEE LATINCOM 2014. Latin American Workshop, (2014).
- [4] S.A. Desai, P.H. Zope, & S.R. Suralkar, “A Review on IEEE 802.15.4 – Standard for Wireless Body Network, IJIRSET” Vol. 2, Issue 5, 2013.
- [5] A. Koubâa, M. Alves, & E. Tovar, E. “GTS allocation analysis in IEEE 802.15. 4 for real-time wireless sensor networks”. In Parallel and distributed processing symposium, 2006. IPDPS 2006. 20th international (pp. 8-pp). IEEE.
- [6] M. O. Amarillo, “Simulación de redes de sensores inalámbricos: un modelo energético a nivel de nodo-sensor bajo las especificaciones IEEE 802.15. 4tm y ZigBee”, 20012.
- [7] N.S. Bhat, Design and implementation of IEEE 802.15. 4 Mac protocol on FPGA. arXiv preprint arXiv:1203.2167, 2012.
- [8] Z. Hanzálek & P. Jurčík, P. “Energy efficient scheduling for cluster-tree Wireless Sensor Networks with time-bounded data flows: application to IEEE 802.15. 4/ZigBee”. Industrial Informatics, IEEE Transactions on, 6(3), 2010, pp. 438-450.
- [9] C. Ma, C. (2014). “Performance modelling and analysis of multiple coexisting IEEE 802.15. 4 wireless sensor networks” (Doctoral dissertation).
- [10] Martínez Castro, D. Metodología de diseño para minimizar el consumo de potencia y los retrasos en redes inalámbricas de sensores y actuadores con retrasos acotados Doctoral dissertation, 2011.
- [11] B.H. Lee, E. Yundra, H.K. Wu, & M.U.H., Al Rasyid, “Analysis of superframe duration adjustment scheme for IEEE 802.15.4 networks”. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2015, pp. 1-17.
- [12] A. Ramesh, & P. Sumithabhashini, “Analyzing the Performance of GTS Allocation Using Markov Model in IEEE”, 802.15. 4.
- [13] P. Park, et al, “Performance analysis of GTS allocation in beacon enabled IEEE 802.15.” 4. In Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks, 2009. SECON’09. 6th Annual IEEE Communications Society Conference, 2009, pp. 1-9.
- [14] P.R. Grassi, et al, “Knowledge-based design space exploration of wireless sensor networks”. In Proceedings of the eighth IEEE/ACM/IFIP international conference on Hardware/software codesign and system synthesis, 2012, pp. 225-234.
- [15] N. Nordin, and F. Dressler, “Effects and implications of beacon collisions in co-located IEEE 802.15. 4 networks”. In Vehicular Technology Conference (VTC Fall), 2012 pp. 1-5.

- [16] M.S.J. Rane, "Throughput optimization" in IEEE 802.15. 4 using GTS mechanism.
- [17] R.H. Kim, P.S. Kim, & J.G. Kim, "A MAC Protocol for Fair Data Transmission in the WBSN Environment", 2014.
- [18] R.H. Kim, P.S. Kim, & J.G. Kim, J. G. "A study on MAC protocol for urgent data transmission in Wireless Bio Signal Monitoring Environment", 2015.
- [19] B. Singh, B. "A Study on Traffic Adaptive MAC Protocols for Wireless Body Area Network." International Journal of Research, 2(5), 20015, pp. 540-547.
- [20] Y. Gu, "The Improvement of CSMA/CA Based on Dynamic Weighting Algorithm", 2015.
- [21] W. Shen, W. (2014). "A Protocol Framework for Adaptive Real-Time Communication in Industrial Wireless Sensor and Actuator Networks". Doctoral dissertation, Mid Sweden University, 2014.
- [22] A.N. Alvi, S.H. Bouk, S.H. Ahmed, M.A. Yaqub, N. Javaid & d. Kim, D. "Enhanced TDMA based MAC protocol for adaptive data control in wireless sensor networks". Communications and Networks, Journal of, 17(3), 2015, pp. 247-255.
- [23] A. Hernandez, "Wireless process control using IEEE 802.15. 4 protocol." Master Degree Thesis, Royal Institute of Technology, 2010.
- [24] H.A. Abdulmohsin, "Fuzzy Duty Cycle Adaption Algorithm for IEEE 802.15" 4 Star Topology Networks.
- [25] M.S. Saraireh, M. S. "Performance Analysis of Guaranteed Time Slots Allocation in IEEE 802.15. 4 Protocol over Radio". Middle-East Journal of Scientific Research, 13(9), 2013, pp. 1137-1143.
- [26] A. Cunha, A. Koubâa & M. Alves, "Implementation of the i-GAME Mechanism in IEEE 802.15. 4 WPANs", 2006.
- [27] A. Koubâa, M. Alves, E. Tovar, & A. Cunha, A. "An implicit GTS allocation mechanism in IEEE 802.15. 4 for time-sensitive wireless sensor networks: theory and practice". Real-Time Systems, 39(1-3), 2008, pp. 169-204.
- [28] F. Xia, et al, "Ada-MAC: An adaptive MAC protocol for real-time and reliable health monitoring. In Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)", IEEE International Conference, 2012, pp. 203-208.
- [29] F. Xia, L. Wang, D. Zhang, D. He, & X: Kong, X. "An adaptive MAC protocol for real-time and reliable communications in medical cyber-physical systems. Telecommunication Systems, 58(2), 2015, pp. 125-138.
- [30] D. H. Choi, & D.S. Kim, "Wireless fieldbus for networked control systems using LR-WPAN". International Journal of Control Automation and Systems, 6(1), 2008, pp. 119-125.
- [31] F. Chen, et al, "Real-time enabled IEEE 802.15. 4 sensor networks in industrial automation. In Industrial Embedded Systems, 2009. SIES'09. IEEE" International Symposium, 2009, pp. 136-139.
- [32] C.W. Na, "IEEE 802.15. 4 Wireless Sensor Networks: GTS Scheduling and Service Differentiation", Doctoral dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2011.
- [33] J. Araújo, "Design, implementation and validation of resource-aware and resilient wireless networked control systems, 2014.
- [34] J. Araujo, M. Mazo, A. Anta, P. Tabuada, & K.H. Johansson, "System architectures, protocols and algorithms for aperiodic wireless control systems". Industrial Informatics, IEEE Transactions on, 10(1), 2014, pp. 175-184.
- [35] N. Hayashi and S. Takai, "A GTS scheduling for consensus problems over IEEE 802.15. 4 wireless networks". In Control Conference (ECC), European, 2013, pp. 1764-1769.
- [36] N. Hayashi & S. Takai, "GTS-based communication task scheduling for quantized output consensus over IEEE 802.15. 4 wireless networks". Automatica, 55, 2015, pp. 6-11.
- [37] I. Al-Anbagi and H.T. Mouftah, "Adaptive time slots control in wireless sensor networks for delay-aware applications". In Global Communications Conference (GLOBECOM), IEEE, 2014, pp. 222-227.
- [38] I. Al-Anbagi, et al, "Tuning guaranteed time slots of IEEE 802.15. 4 for transformer health monitoring in the smart grid". In Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), IEEE, 2014, pp. 3420-3425.
- [39] X. Zhang, Y. Jin, & K.S. Kwak, "Adaptive GTS allocation scheme with applications for real-time Wireless Body Area Sensor Networks". KSII Transactions on Internet and Information Systems (TIIS), 9(5), 2015, pp. 1733-1751.
- [40] S.E. Yoo, P.K. Chong, D. Kim, Y. Doh, M.L. Pham, E. Choi & J. Huh. "Guaranteeing real-time services for industrial wireless sensor networks with IEEE 802.15. 4". Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 57(11), 2010, pp. 3868-3876.
- [41] T. Semprebom, C. Montez, & F. Vasques, F. "(m, k)-firm pattern spinning to improve the GTS allocation of periodic messages in IEEE 802.15. 4 networks". EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, (1), 2013, pp. 1-15.
- [42] T. Semprebom, et al "Quality of service provision assessment for DDBP approach in IEEE 802.15. 4 networks". In Industrial Informatics (INDIN), 12th IEEE International Conference, 2014, pp. 118-123.
- [43] Wavage, R., & Kaushik, A. (2014). Performance Analysis of Beacon Enabled IEEE 802.15. 4 Using GTS in Zigbee. International Journal of Computer Science & Applications (TIJCSA), 2(12).
- [44] L. Cheng, A.G. Bourgeois & X. Zhang. "A new GTS allocation scheme for IEEE 802.15. 4 networks with improved bandwidth utilization". In Communications and Information Technologies, ISCT'07. International Symposium, 2007, pp. 1143-1148.
- [45] J. Chen Et al, "An explicit GTS allocation algorithm for IEEE 802.15" 4. In Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA), IEEE 16th Conference, 2011, pp. 1-8.

- [46] S.E. Haque, "Efficient GTS Allocation Schemes for IEEE 802.15. 4.", 2012.
- [47] Azeem, M., Khan, M. I., Faheem, Y., Tamimy, M. I., Malik, N. S., Khan, A., & Ahmed, M. (2014). Reactive GTS Allocation Protocol for Sporadic Events Using the IEEE 802.15. 4. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014.
- [48] Choi, W., & Lee, S. (2012). A novel GTS mechanism for reliable multihop transmission in the IEEE 802.15. 4 Network. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2012.
- [49] Z. Hanzálek & P. Jurčík, "Energy efficient scheduling for cluster-tree Wireless Sensor Networks with time-bounded data flows: application to IEEE 802.15. 4/ZigBee." *Industrial Informatics, IEEE Transactions on*, 6(3), 2010, pp. 438-450.
- [50] M. Azeem, M.I. Khan, S.U. Khan & W. Gansterer, "Efficient scheduling of sporadic tasks for real-time wireless sensor networks." *IET Wireless Sensor Systems*, 5(1), 2014, pp. 1-10.
- [51] A. Ahmad, Z. Hanzalek & C. Hanen, "A polynomial scheduling algorithm for IEEE 802.15. 4/ZigBee cluster tree WSN with one collision domain and period crossing constraint," In *Emerging Technology and Factory Automation (ETFA)*, IEEE, 2014, pp. 1-8.
- [52] K.W. Kim, M.G. Park, J. Han & C.G. Lee, "A Holistic Approach to Optimizing the Lifetime of IEEE 802.15. 4/ZigBee Networks with a Deterministic Guarantee of Real-Time Flows." *Journal of Computing Science and Engineering*, 9(2), 2015, pp. 83-97.