

Seminario de Investigación

“Análisis del Protocolo IEEE 802.15.4e en modo DSME para Aplicaciones IoT”

Jonathan Andrés Hernández Jaimes, Brigitte Camargo Reina, Cristian David Prada Suárez,

Gabriel Fernando Aparicio Chacón

Trabajo de Grado para Optar el título de Ingeniero Electrónico

Director

Óscar Mauricio Reyes Torres

Doctor en Ingeniería Electrónica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones E3T

Bucaramanga

2018

### **Dedicatoria**

Esta dedicatoria va a nuestras familias, en especial a nuestros padres que nos han dado todo su apoyo, que nos han guiado y han estado ahí con nosotros en cada etapa de la vida, a ellos le debemos las personas que somos hoy; todos nuestros logros y triunfos son para ustedes.

Los queremos mucho.

A nuestros compañeros y amigos de carrera, que de cierta manera recorrieron este camino con nosotros, que nos ayudaron, nos apoyaron y nos dieron ánimos para continuar, gracias por compartir momentos alegres, tristes, desesperados y tranquilos, siempre los recordaremos.

A los muchos maestros que nos acompañaron en esta etapa de la vida, para formarnos como personas íntegras.

Jonathan, Cristian, Gabriel y Brigitte

## **Agradecimientos**

Agradecemos de todo corazón a:

A Dios por ser nuestro guía.

A nuestras familias, amigos, colegas y demás personas que nos apoyaron durante la carrera.

A nuestro director el Dr. Óscar Mauricio Reyes Torres por brindarnos su apoyo y por estar ahí apoyándonos para culminar de una manera exitosa este trabajo.

A los profesores Pedro Trujillo y Homero Ortega, que compartieron con nosotros sus conocimientos y nos brindaron correcciones oportunas.

Muchas gracias por su compañía y apoyo incondicional.

**Tabla de Contenido**

	Pág.
Introducción	16
1. Objetivos	19
1.1 Objetivo General	19
1.2 Objetivos Específicos	19
2. Generalidades sobre la modalidad seminario de investigación	20
2.1 Estructuración del Seminario	20
2.1.1 Temas Seleccionados.	20
2.1.2 Planteamiento de las Sesiones.	22
2.1.3 División de Roles.	22
3. Análisis del protocolo ieee 802.15.4e en modo DSME	22
3.1 Alcance y Objetivo del Protocolo IEEE 802.15.4e	23
3.1.1 TSCH (Time Slotted Channel Hopping).	24
3.1.2 DSME (Deterministic and Synchronous Multi-channel Extension).	24
3.1.3 LLDN (Low Latency Deterministic Network).	25
3.1.4 AMCA (Asynchronous Multi-channel Adaptation).	25
3.1.5 BLINK (Radio Frequency Identification Blink).	25
3.2 Conceptos Básicos y Descripción General del modo DSME	26
3.2.1 Dispositivos.	26
3.2.2 Topologías de Red.	26
3.2.3 Red sincronizada por <i>beacons</i> .	26

3.2.4 Estructura Utilizada para Acceder al Medio.	27
3.2.5 Algoritmo de Acceso al Medio.	29
3.2.6 Primitivas y Entidades para Manejo de Información con Capas Superiores.	30
2.2.7 Tramas MAC.	31
3.3 Ejemplo de Establecimiento y Funcionamiento de una Red bajo DSME usando la Implementación OpenDSME	33
3.3.1 Inicio de una PAN.	36
3.3.2 La primera trama dentro de la estructura de datos. La trama beacon.	40
3.3.3 Establecimiento y funcionamiento de una PAN.	42
3.4 Procesos importantes que no lograron observarse en el ejemplo de la simulación	51
3.4.1 Escaneo huérfano.	51
3.4.2 Conflicto con el ID PAN.	52
3.4.3 Retransmisiones.	53
3.5 Aspectos de Seguridad Implementados en la Subcapa MAC.	54
4. Trabajos relacionados	55
4.1 Análisis del agendamiento de beacon en DSME y propuesta de mejora	56
4.2 Un modelo específico para redes de sensores inalámbricos en topología estrella usando el protocolo IEEE 802.15.4e en modo DSME.	62
4.3 Un algoritmo eficiente para el agendamiento de ranuras en redes que presenten movilidad en sus nodos, basado en el modo DSME.	67
4.4 Evaluación del IEEE 802.15.4e DSME y TSCH mediante simulación en escenarios de automatización de procesos.	73
4.5 Mejora en la formación de la red en IEEE 802.15.4e DSME	78

5. Conclusiones, oportunidades y retos

82

Referencias bibliográficas

86

**Lista de Tablas**

	Pág.
Tabla 1. Principales Constantes y Atributos MAC	35
Tabla 2. Resultados del porcentaje de mensajes perdidos para los modos TSCH y DSME para distintos valores del exponente de pérdida de trayecto	75
Tabla 3. Parámetros de la emulación	79

### Lista de Figuras

Figura 1 Ejemplo de multisupertrama	28
Figura 2. Secuencia de mensajes entre dos dispositivos usando CSMA/CA ranurado	30
Figura 3. Formato general de la trama MAC del IEEE.802.15.4e	32
Figura 4. Red utilizada para la simulación	34
Figura 5. Secuencia de primitivas ejecutadas por el dispositivo que iniciara la PAN	38
Figura 6. Secuencia seguida en el escaneo activo	39
Figura 7. Envío de la primera trama <i>beacon</i> por parte del coordinador PAN después de finalizar el establecimiento de la red	39
Figura 8. Composición general de la trama <i>beacon</i>	40
Figura 9. Estructura del campo de control de una trama MAC	41
Figura 10. Secuencia de primitivas y mensajes en una asociación	43
Figura 11. Estructura general de una trama de comandos MAC	44
Figura 12. Proceso de asociación en una red simulada en OpenDSME	45
Figura 13. Algoritmo para el agendamiento de <i>beacon</i>	47
Figura 14. Proceso para la asignación de una ranura GTS entre dos dispositivos	48
Figura 15. Forma en que quedaron establecidos los coordinadores en la simulación del ejemplo	50

Figura 16. Número de paquetes de información enviados con éxito por cada nodo en la simulación de ejemplo.	51
Figura 17. Proceso de asignación propuesto utilizando una nueva estructura de la supertrama	58
Figura 18. Algoritmo mejorado para agendamiento de ranuras <i>beacon</i> en DSME	60
Figura 19. Tasa de éxito de asignación y tiempo en completar el proceso de asignación para redes de 10, 20, 30 y 40 nodos	61
Figura 20. Probabilidad de transmisión exitosa para diferente BO al aumentar el número de nodos	65
Figura 21. Comparación de la confiabilidad de la red entre el modelo propuesto y el estándar	66
Figura 22. Proceso de agendamiento distribuido	69
Figura 23. Resultados para una red de nodos ubicados aleatoriamente. A) rendimiento. B) retardo extremo-extremo	70
Figura 24. Velocidad de la red A) sin movilidad. B) movilidad del 30% de los nodos. C) movilidad del 50% de los nodos	71
Figura 25. A) Tiempo acumulativo de colección de paquetes. B) Consumo de energía	72
Figura 26. Retardo de extremo a extremo al aumentar el número de nodos de la red	77
Figura 27. Procedimiento transmisión de datos con tiempo finalización activo	81

## Lista de Apéndices

**(Ver apéndices adjuntos en el CD y pueden visualizarlos en la Base de Datos de la Biblioteca UIS)**

Apéndice A. Memoria sesión 1: Presentación y generalidades del protocolo IEEE 802.15.4e DSME.

Apéndice B. Memoria sesión 2: Descripción de funcionamiento de la subcapa MAC, parte 1.

Apéndice C. Memoria sesión 3: Descripción de funcionamiento de la subcapa MAC, parte 2.

Apéndice D. Memoria sesión 4: Descripción de funcionamiento de la subcapa MAC en DSME.

Apéndice E. Memoria sesión 5: Formatos de la trama MAC.

Apéndice F. Memoria sesión 6: Servicios de la subcapa MAC.

Apéndice G. Memoria sesión 7: Seguridad y cierre de primera parte del seminario.

Apéndice H. Memoria sesión 8: Análisis y mejora del agendamiento del *beacon* en modo DSME.

Apéndice I. Memoria sesión 9: Un modelo para redes de sensores inalámbricos en topología estrella usando el protocolo IEEE 802.15.4e en modo DSME.

Apéndice J. Memoria sesión 10: Un algoritmo distribuido de agendamiento eficiente para soporte de movilidad en IEEE 802.15.4e para redes de sensores inalámbricas industriales basadas en DSME.

Apéndice K. Memoria sesión 11: *Simulative assessments of the IEEE 802.15.4e DSME and TSCH in realistic process automation scenarios.*

Apéndice L. Memoria sesión 12: Cierre de las sesiones del seminario de investigación.

Apéndice M. Presentación sesión 1: Presentación y generalidades del protocolo IEEE 802.15.4e DSME.

Apéndice N. Presentación sesión 2: Descripción de funcionamiento de la subcapa MAC, parte 1.

Apéndice O. Presentación sesión 3: Descripción de funcionamiento de la subcapa MAC, parte 2.

Apéndice P. Presentación sesión 4: Descripción de funcionamiento de la subcapa MAC en DSME.

Apéndice Q. Presentación sesión 5: Formatos de la trama MAC.

Apéndice R. Presentación sesión 6: Servicios de la subcapa MAC.

Apéndice S. Presentación sesión 7: Seguridad y cierre de primera parte del seminario.

Apéndice T. Presentación sesión 8: Análisis y mejora del agendamiento del *beacon* en modo DSME.

Apéndice U. Presentación sesión 9: Un modelo para redes de sensores inalámbricos en topología estrella usando el protocolo IEEE 802.15.4e en modo DSME.

Apéndice V. Presentación sesión 10: Un algoritmo distribuido de agendamiento eficiente para soporte de movilidad en IEEE 802.15.4e para redes de sensores inalámbricas industriales basadas en DSME.

Apéndice W. Presentación sesión 11: *Simulative assessments of the IEEE 802.15.4e DSME and TSCH in realistic process automation scenarios.*

**RESUMEN**

**TITULO:** SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN: ANÁLISIS DEL PROTOCOLO IEEE 802.15.4e EN MODO DSME PARA APLICACIONES IoT <sup>1</sup>

**AUTORES:** JONATHAN ANDRES HERNANDEZ JAIMES <sup>2</sup>  
BRIGITTE CAMARGO REINA <sup>2</sup>  
CRISTIAN DAVID PRADA SUAREZ <sup>2</sup>  
GABRIEL FERNANDO APARICIO CHACÓN <sup>2</sup>

**PALABRAS CLAVES:** DSME, CONTROL DE ACCESO AL MEDIO, IoT, PROTOCOLO

**DESCRIPCIÓN:**

Desde antes que se empleara por primera vez el término de “Internet de las cosas”, ya se venían trabajando tecnologías de sensores y la manera en qué los diferentes objetos podrían proporcionar información útil acerca de su posición, tiempos de uso o simplemente su entorno. Cuando se quiere realizar una comunicación entre sensores, controladores y actuadores, se debe tener en cuenta el comportamiento que tendrá cada uno de los elementos en una red al enviar y/o recibir información.

En los últimos años ha crecido el interés por las tecnologías que nos permitan tener interconectados todos nuestros dispositivos electrónicos, debido a esto el número de dispositivos que se pueden asociar en redes ha aumentado y los modelos tradicionales para el manejo de las comunicaciones inalámbricas no son suficientes; además, en diferentes escenarios se requiere de un gran número de sensores los cuales deben transmitir sus datos de forma segura y confiable a un centro de control.

Este trabajo de grado se ha desarrollado en la modalidad de seminario de investigación, buscando hacer un análisis del protocolo IEEE 802.15.4e, enfocado en el modo DSME, el cual se basa en el uso de un esquema de ranuras de tiempo para lograr el establecimiento de redes altamente confiables y de bajo consumo de potencia; aplicado específicamente a los retos que surgen al trabajar en aplicaciones de escenarios dinámicos como el Internet de las cosas (IoT), para lograr un pleno conocimiento y comprensión de este protocolo y de la subcapa de control de acceso al medio, su funcionamiento, estructura, topologías de red que utiliza, las oportunidades y limitaciones que presenta para aplicaciones IoT.

---

<sup>1</sup> Trabajo de Grado

<sup>2</sup> Facultad de Ingeniería Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Dr. Óscar Mauricio Reyes Torres.

**ABSTRACT**

**TITLE:** RESEARCH SEMINAR: ANALYSIS OF IEEE PROTOCOL 802.15.4e IN DSME MODE FOR IoT APPLICATIONS <sup>3</sup>

**AUTHORS:** JONATHAN ANDRES HERNANDEZ JAIMES <sup>4</sup>  
BRIGITTE CAMARGO REINA <sup>4</sup>  
CRISTIAN DAVID PRADA SUAREZ <sup>4</sup>  
GABRIEL FERNANDO APARICIO CHACÓN <sup>4</sup>

**KEYWORDS:** DSME, MEDIA ACCESS CONTROL, IoT, PROTOCOL

**DESCRIPTION:**

Before the concept of “Internet of things” was used for the first time, sensor technologies were already being worked on and in what way the different objects could provide useful information about their position, time of use or simply their environment. When you want to communicate between sensors, controllers and actuators, you must take into consideration the behavior that each of the elements in the network while sending and/or receiving information.

In the last years there has been growing interest in the technologies that allow us to have all our electronic devices interconnected, due to this the number of devices that can be associated in a network has increased and the traditional models for the handling of wireless communications weren't enough; besides, in different scenarios a large number of sensors is required, which must transmit their data in a safe and reliable way to the control center.

This graduation's work, developed in the modality of seminar of investigation, looks for to do an analysis of the protocol IEEE 802.15.4e, focused in the DSME mode, which is based on the use of a scheme of slots of time to achieve the establishment of networks highly reliable and low power consumption; applied specifically to the challenges that arise when working in applications of dynamic scenarios such as Internet of Things (IoT), and thus achieve full knowledge and understanding on this protocol and the media access control sublayer, its operation, structure, network topologies that it uses, the opportunities and limitations it presents for IoT applications.

---

<sup>3</sup> Bachelor Thesis

<sup>4</sup> Facultad de Ingeniería Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Dr. Óscar Mauricio Reyes Torres.

## Introducción

En los últimos años ha crecido el interés por las tecnologías que nos permitan tener conectados todos nuestros dispositivos electrónicos, debido a esto el número de dispositivos ha aumentado y los modelos tradicionales para el manejo de las comunicaciones inalámbricas entre estos dispositivos no es suficiente, por este motivo El Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (IEEE) creó el grupo de trabajo 802.15.4 para enfocarse en resolver este problema y en el 2004 presentaron la primera versión de este protocolo para el manejo de redes de área personal inalámbricas (WPAN) que tienen una tasa de envío de datos, latencia y consumo de energía bajos. Una de las posibles aplicaciones de este protocolo es el Internet de las Cosas (IoT) que se encuentra bajo estudio.

Desde entonces se han realizado actualizaciones y enmiendas para adaptarse al continuo cambio, en la revisión del 2012 se agregó una enmienda en la cual se proponían cinco modos de trabajo de la subcapa de control de acceso al medio (MAC), cada uno de estos modos enfocado en optimizar el rendimiento para aplicaciones específicas, dos modos que han resultado particularmente interesantes son Salto de Canal en Tiempo Ranurado (TSCH) y Extensión Multicanal Determinista y Síncrona (DSME) los cuales están enfocados en aplicaciones industriales y de automatización pues presentan un mayor grado de estabilidad y confianza que es necesario en estas redes.

Particularmente el modo DSME tiene una estructura sobre la cual se realiza todo el proceso de administración de acceso al medio, esta estructura se conoce como multisupertrama, la cual usa un *beacon* para sincronizar periódicamente el acceso de los dispositivos al medio y dos tipos de zonas especializadas en manejar ciertos tipos de información y solicitudes. Cada zona utiliza

métodos y algoritmos específicos para la transmisión de la información, algunos de estos son: el algoritmo de Acceso Múltiple por Detección de Portadora y Prevención de Colisiones (CSMA/CA), multiplexación por división de tiempo y frecuencia, la técnica de salto de canal para disminuir pérdidas por ruido o interferencias entre otros.

Hay circunstancias que son inherentes de las redes inalámbricas como lo es la presencia de nodos ciegos entre sí, que puede causar efectos como colisiones, pérdida de información e interferencias. Pese a que el estándar implementa muchas técnicas para disminuir estos efectos, en algunos casos, como en el proceso de mejora de agendamiento de *beacons* se puede obtener mejores resultados; en este aspecto es donde se está trabajando hoy en día, en optimizar para ciertas condiciones el funcionamiento de la red, además de tratar de llevar este conjunto de reglas a un escenario físico. En la actualidad, los proyectos más avanzados están en la etapa de simulación e implementación como lo es el framework desarrollado por investigadores del *Institute of Telematics*, de la *Hamburg University of Technology* en Alemania, llamado OpenDSME (Meier, Koestler & Backhauss, 2017).

Este documento está estructurado en cuatro capítulos. El primer capítulo muestra una descripción general de la modalidad seminario de investigación, selección de temas, planificación de las sesiones y la división de roles para los integrantes. El segundo capítulo abarca todo el análisis del protocolo IEEE 802.15.4e en modo DSME, como lo es su alcance, el objetivo, los conceptos básicos y descripción general de los principales procesos que se llevan a cabo en una red. Esto acompañado de un ejemplo utilizando la implementación del protocolo de OpenDSME en el simulador OMNeT++ (Opensim Ltd, 2017). El tercer capítulo recopila una serie de trabajos de investigación estudiados durante el desarrollo del seminario que analizan el

comportamiento del protocolo en escenarios específicos y realizan algunas propuestas para que funcione de una mejor manera y el cuarto capítulo presenta las conclusiones.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Analizar, a través de un seminario de investigación, el protocolo IEEE 802.15.4e, en modo DSME, como alternativa de control de acceso al medio en aplicaciones IoT.

### **1.2 Objetivos Específicos**

El cumplimiento del objetivo general del trabajo de grado comprende:

- Realizar una revisión de la literatura, sobre: el protocolo IEEE 802.15.4e DSME, propuestas para su implementación y algoritmos para su uso.
- Exponer las características que definen el protocolo en modo DSME, basados en la documentación más relevante identificada mediante la revisión de la literatura.
- Identificar retos, oportunidades o limitaciones del protocolo IEEE 802.15.4e DSME para aplicaciones IoT.

## 2. Generalidades sobre la Modalidad Seminario de Investigación

### 2.1 Estructuración del Seminario

El seminario sobre el análisis del protocolo IEEE 802.15.4e en modo DSME para aplicaciones IoT tuvo una estructura que constó de doce sesiones de dos horas cada una. En cada sesión el relator asignado expuso el tema seleccionado dando espacios para preguntas y discusiones sobre el tema del que se estuviera hablando.

**2.1.1 Temas Seleccionados.** Para cada sesión se seleccionaron diferentes temas sobre el protocolo IEEE 802.15.4e. Para dar un orden al desarrollo de los temas, se dividió el seminario en dos grandes bloques. En las primeras siete sesiones se trataron temas donde se explicaba la norma en sí, dividiendo los temas en los siguientes ejes temáticos. (IEEE Std 802.15.4-2015).

- Generalidades del protocolo.
- Descripción del funcionamiento de la subcapa MAC.
- Análisis del funcionamiento de la subcapa MAC en modo DSME (*Deterministic and Synchronous Multi-channel Extension*).
- Formatos de la trama MAC.
- Servicios de la subcapa MAC.

En las cinco sesiones siguientes, se realizó un estudio de diferentes trabajos de investigación realizados en base al estándar. Cada estudio se enfocó en mejorar el rendimiento del estándar para alguna aplicación específica. Los trabajos estudiados fueron los siguientes:

- Un modelo para el agendamiento de la ranura *beacon* para los coordinadores de la red en modo DSME. (Hwang, K.-I., & Nam, S.-W. 2014) Donde se plantea un algoritmo para realizar este proceso de forma más eficiente.
- Un modelo para redes de sensores inalámbricos en topología estrella usando el protocolo IEEE 802.15.4e en modo DSME. (Sahoo, P. K., Pattanaik, S. R., & Wu, S.-L. 2017) Donde se realizan unas pequeñas modificaciones sobre lo planteado por el estándar para mejorar el funcionamiento de las redes que trabajan en esta topología.
- Un algoritmo de agendamiento distribuido, eficiente para soporte de movilidad en IEEE 802.15.4e para redes de sensores inalámbricos industriales basado en DSME. (Lee, Y.-S., & Chung, S.-H. 2016) Con este algoritmo se mejora la fiabilidad de las redes industriales donde los sensores no están ubicados en un lugar fijo, además se logra realizar el proceso de asociación más rápido.
- Evaluación mediante simulaciones del desempeño de los modos DSME y TSCH en escenarios de automatización de procesos.(Alderisi G., Patti G., Mirabella O., LoBello L. 2015) Donde se comparan estos dos modos desde dos puntos de vista, una es la fiabilidad al implementar en la red características reales de sensores observando la tasa de pérdida de información y el tiempo de retardo máximo y el otro punto de vista es la escalabilidad que es la característica para adaptarse a cambios sin perder su calidad de red como por ejemplo el aumento de nodos asociados.
- Mejora en la formación de la red en IEEE 802.15.4e DSME (Vallati, C., Brienza, S., Palmieri, M., & Anastasi, G. 2017) En este trabajo analizan el proceso de asignación de ranuras, reducción del periodo de acceso al medio con contención (CAP) y el impacto que estos tienen en el establecimiento de la red. También se realizan diferentes

propuestas respecto a estos procesos buscando disminuir el tiempo de establecimiento de la red y el consumo de energía.

**2.1.2 Planteamiento de las Sesiones.** Para cada sesión se planteó el uso de diapositivas que le servían de guía al relator del tema a exponer. Cada sesión iniciaba con un pequeño resumen de lo visto en la sesión anterior y se resolvieron las dudas y preguntas que no habían tenido una respuesta. Después se procedía a explicar el tema asignado a la sesión del día, estableciendo espacios para realizar preguntas sobre el tema y dándose la oportunidad a los presentes para dar aportes generando discusiones cortas.

**2.1.3 División de Roles.** Para el desarrollo del seminario se establecieron tres roles importantes, el primero es el rol de relator, este tiene la función de preparar y exponer el tema de la sesión respectiva, el siguiente es el rol de moderador que tiene la función llevar el control de la sesión además de realizar el resumen de la sesión anterior así como la introducción a la sesión respectiva a darse y por último está el rol de memorias que tiene la función de llevar registro de todo los aportes importantes que se dieron en el transcurso de la sesión como ideas, solución de dudas y cronograma de la sesión. Para cada sesión se estableció que una persona tomará el rol de relator, otra de moderador y dos que tuvieran el rol de memorias, estos roles iban cambiando de persona cada sesión.

### **3. Análisis del protocolo IEEE 802.15.4e en modo DSME**

### 3.1 Alcance y Objetivo del Protocolo IEEE 802.15.4e

Con el auge de la “Era Digital” el concepto de Internet de las cosas (IoT) ha tomado mayor importancia, pues se busca que todos los dispositivos estén conectados a la red. Esto no solo ha tenido impacto en la población, las cuales tienen acceso a aplicaciones como la televisión, telefonía móvil y la domótica, sino también ha impactado en la industria, permitiendo nuevas formas de controlar plantas de producción pues los dispositivos de identificación, localización y rastreo, sensores y actuadores pueden estar conectados a la web, permitiendo monitorear y controlar la planta desde cualquier parte del mundo. Estas nuevas posibilidades traen consigo retos importantes como lo son la seguridad de estas redes para evitar que intrusos afecten el funcionamiento del proceso, también lograr una mayor autonomía de la red, permitiendo que ante una situación como lo puede ser la lectura anormal de un sensor, el sistema pueda dar una alarma detallada sobre este caso o inclusive solucionarlo, además, otro reto es lograr que la red mejore su desempeño en distintos aspectos como lo puede ser un menor tiempo de respuesta, un menor consumo de energía, entre otras.

Los sistemas inalámbricos son cada vez más utilizados gracias a su comodidad, fácil instalación y a la amplia gama de posibilidades que genera la comunicación entre dispositivos de forma inalámbrica, pero a medida que aumenta el número de aparatos que utilizan este medio de comunicación, se hace necesario administrar efectivamente el ancho de banda asignado a sistemas con dichas características. Para afrontar este reto, la IEEE creó un grupo de trabajo encargado de diseñar un protocolo que permita que todos los dispositivos accedan al medio de forma ordenada, permitiendo una comunicación eficiente entre ellos. De esta manera en el 2003 salió la primera versión del protocolo IEEE 802.15.4 y con el paso de los años se ha ido

actualizando para ajustarse a las nuevas necesidades y solventando algunas debilidades que presentaba. Así en los años 2006, 2011 y 2016 se publicaron las respectivas revisiones del protocolo.

El estudio del presente trabajo se centró en la última revisión hecha al protocolo, conocido como IEEE 802.15.4e. En esta revisión se incorporaron cinco modos de trabajo de la subcapa MAC. Cada modo de trabajo presenta sus ventajas y desventajas lo cual hace que para ciertas aplicaciones unos modos sean mejores que otros, por ejemplo, los modos TSCH y DSME están enfocados en aplicaciones industriales debido a que presentan una robustez, fiabilidad, volumen de información y escalabilidad que son requisitos esenciales en este tipo de aplicaciones. A continuación, se menciona una breve descripción de cada uno de los modos.

**3.1.1 TSCH (Time Slotted Channel Hopping).** Es un método de acceso a canales para redes de medios compartidos, combina el acceso múltiple por división de tiempo y frecuencia, y esta diversidad proporciona confiabilidad a las capas superiores; se centra principalmente en el soporte de aplicaciones de automatización de procesos con un enfoque particular en el monitoreo de equipos y procesos.

**3.1.2 DSME (Deterministic and Synchronous Multi-channel Extension).** Está enfocado a aplicaciones industriales y comerciales con requisitos estrictos en términos de puntualidad y fiabilidad, combina el acceso al medio por división del tiempo (basado en algoritmos de contención) y la división de frecuencia. Está específicamente diseñado para redes de múltiples saltos y en topologías tipo malla.

**3.1.3 LLDN (Low Latency Deterministic Network).** Está principalmente pensado para aplicaciones de automatización industrial, son utilizados principalmente en maquinaria móvil y que interactúe con la línea de producción en la fábrica automatizada. Como requerimientos para el uso de este modo en aplicaciones se tienen una baja latencia, un alto determinismo cíclico y un desempeño esperado de diseñar un sistema basado en este tipo de red es que permite la transmisión de hasta 20 sensores a un solo coordinador en un lapso de 10 ms, y esto es gracias a un sistema de acceso por división de tiempo, fino, granular y determinístico.

**3.1.4 AMCA (Asynchronous Multi-channel Adaptation).** Este modo se enfoca en redes que presentan un gran tamaño y que presentan dispersión geográfica como por ejemplo redes de monitoreo de infraestructuras, redes de servicios inteligentes y redes de control de procesos.

**3.1.5 BLINK (Radio Frequency Identification Blink).** Este modo se enfoca en dominios de aplicaciones tales como identificación de elementos/personas, ubicación y seguimiento. Permite a un dispositivo comunicar su ID a otros nodos sin asociación previa y sin reconocimiento. Los paquetes BLINK generalmente son enviados por dispositivos de solo transmisión.

Durante el desarrollo de este trabajo nos centraremos en el modo de trabajo DSME. Para esto primero se darán unas cortas definiciones de los principales conceptos que están implicados como el de multisupertrama, algoritmo CSMA/CA, primitivas, entidades de la subcapa MAC, tramas MAC y seguridad de la red. Después se explican los principales procesos que se llevan a cabo en el establecimiento y funcionamiento de una red operando bajo DSME, como el escaneo

pasivo y activo, el agendamiento del *beacon* y solicitud de ranuras GTS. Para esto nos apoyaremos en la implementación de IEEE 802.15.4e de código abierto llamado OpenDSME.

### 3.2 Conceptos Básicos y Descripción General del modo DSME

**3.2.1 Dispositivos.** Hay dos clases de dispositivos básicos. Los dispositivos de función completa (FFD) que pueden ser dispositivos finales, coordinador o coordinador de red de área personal (PAN) y los dispositivos de función reducida (RFD) que por tener una capacidad limitada se encuentran localizados en las terminales de la red, se les denominan dispositivos finales y solo puede asociarse a un FFD.

**3.2.2 Topologías de Red.** Solo hay dos topologías. Una es la topología estrella que se basa en un dispositivo FFD, que actúa como coordinador PAN de todos los demás dispositivos. La segunda es la topología *peer to peer* que tiene el coordinador PAN, coordinadores y dispositivos finales y pueden estar conectados entre sí. Con la topología *peer to peer* se pueden construir redes en malla o en árbol dependiendo la forma en que se conecten los dispositivos.

**3.2.3 Red sincronizada por *beacons*.** El modo DSME utiliza *beacons* para mantener sincronizada la red. Estos paquetes de datos llamados *beacons* son transmitidos periódicamente por un dispositivo que actúa como coordinador PAN. A este periodo de tiempo entre la transmisión de dos *beacons* consecutivos del coordinador PAN se conoce como intervalo *beacon* (BI). La trama *beacon* contiene información referente al tipo de estructura que usa la red para acceder al medio y el número de ranuras que lo componen; también el periodo con el que se va a

transmitir el *beacon*. El coordinador PAN utiliza la información transmitida en la trama *beacon* para administrar el acceso al canal (esta administración se refiere ordenar los tiempos e intervalos en los que cada dispositivo usa el canal de transmisión) y las transmisiones de los dispositivos que pertenecen a la red. Una red al ser sincronizada por *beacon* permite un uso más eficiente de energía por parte de los dispositivos, que en su mayoría funcionan con baterías, pues permite que estos permanezcan en estado de reposo la mayor parte del tiempo y solo se encienda para recibir el *beacon* o realizar una transmisión en alguna ranura que tenga asignada dentro del intervalo *beacon*.

**3.2.4 Estructura Utilizada para Acceder al Medio.** El modo DSME utiliza la estructura de la multisupertrama mostrada en la Figura 1. Cada multisupertrama se compone de un número determinado de supertramas y varias multisupertramas conforman un intervalo de *beacon* que es el periodo con el que se repite la estructura. Este *beacon* es transmitido por el dispositivo que funciona como coordinador PAN y sirve para mantener la sincronización de la red. El número de multisupertramas y supertramas que conforman un intervalo de *beacon* se establece a partir de los parámetros orden de *beacon* (BO), orden de multisupertrama (MO) y orden de supertrama (SO). Estos parámetros pueden tomar valores entre 0 y 14 respetando siempre la siguiente relación.  $SO \leq MO \leq BO \leq 15$ . Dependiendo que tan mayor sea un parámetro que otro, define la cantidad de supertramas y multisupertramas que componen un intervalo *beacon*. El BO también define la cantidad de símbolos presentes en un intervalo *beacon* definidos por la siguiente relación.  $BI = aBaseSuperframeDuration \times 2^{macBeaconOrder}$ . Por lo que con un BO grande se obtiene un mayor número de símbolos; esto incrementa la duración de cada ranura y del intervalo *beacon*.

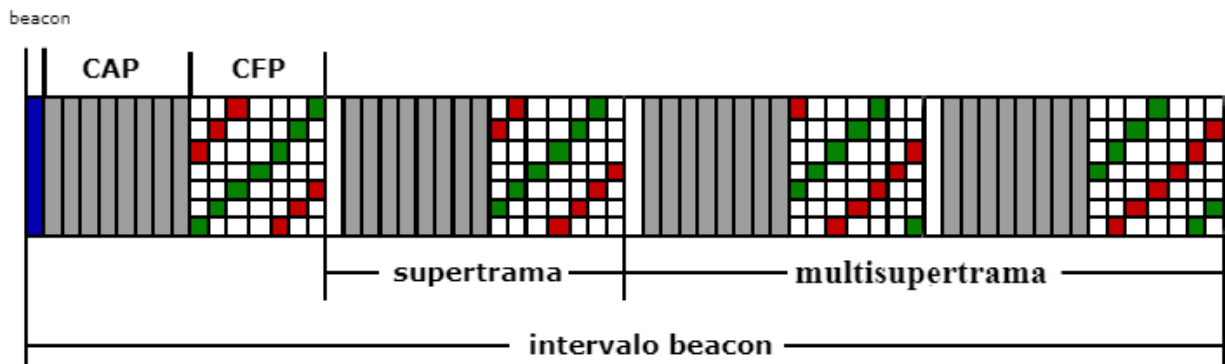


Figura 1 Ejemplo de Multisupertrama.

Cada supertrama tiene una ranura *beacon*, ubicada al inicio. Estas ranuras *beacon* son utilizadas por los dispositivos que funcionarán como coordinadores o coordinador PAN. Después de la ranura *beacon* se ubican ocho ranuras que conforman el periodo de acceso al medio con contención (CAP). En este intervalo los nodos envían diferentes solicitudes como las de asociación y disociación, asignación y desasignación de ranuras de tiempo garantizadas (GTS), solicitud de envío de datos entre otras. Finalmente, las últimas siete ranuras conforman el periodo libre de contención (CFP) donde se ubican las ranuras GTS, que son ranuras que solicitan los nodos para transmitir sus datos ya sea con otros nodos o con el coordinador. En el periodo CFP hay diversidad de canal; que a diferencia de las ranuras *beacon* y los periodos CAP donde las transmisiones se realizan utilizando un único canal que es común para toda la red. Esta diversidad de canal presente en el periodo CFP permite que en una misma ranura GTS, dos dispositivos puedan transmitir su información utilizando canales diferentes. En este periodo se implementó la diversidad de canal como medida para reducir las pérdidas de información por interferencias o deterioro del canal. La diversidad de canal puede implementarse de dos formas. La primera es utilizando una secuencia de salto de canal predefinida que se le asigna a cada

dispositivo asociado, un ejemplo se puede observar en la figura 1. La segunda forma es la adaptabilidad de canal donde los dispositivos dependiendo de las mediciones de potencia, ruido y disponibilidad de canal, se selecciona un canal con óptimas condiciones para establecer comunicación.

Una función para mejorar el consumo de energía es la reducción de CAP, cuando se encuentra habilitada, solo la primera supertrama de cada multisupertrama tiene el periodo CAP, las demás supertramas se componen de la ranura *beacon* y quince ranuras del periodo libre de contención (CFP).

**3.2.5 Algoritmo de Acceso al Medio.** Durante el periodo CAP, todos los dispositivos tratan de transmitir sus solicitudes usando un mismo canal. Para controlar el acceso y disminuir la cantidad de colisiones en este periodo, se implementa el algoritmo de acceso múltiple por detección de señal con detección de colisión ranurado (CSMA/CA).

En el algoritmo CSMA/CA, como se explica en la figura 2, cada nodo calcula un tiempo aleatorio de espera inicial. Por ejemplo, para un nodo A después de su tiempo de espera hace una evaluación de disponibilidad de canal, si el canal está libre envía una solicitud de transmisión de datos (RTS) al coordinador, la cual en este caso es escuchada por el dispositivo B, quien entra en estado de espera (NAV) para evitar interferencias; en caso contrario, entra en un nuevo tiempo de espera. En caso de encontrar el canal libre y la solicitud es recibida por el coordinador, éste envía una trama *broadcast* de confirmación de transmisión (CTS) informando que iniciara una transmisión con A, así los nodos que reciben dicha trama no inician una nueva transmisión y entran en un tiempo de espera aleatorio hasta recibir una nueva trama *broadcast* del coordinador informando que ya está disponible. El nodo A después de recibir la trama del coordinador inicia

la transmisión con este, enviando la información por tramas, agregando una nueva solicitud implícita en la trama que envía (RTS). El coordinador recibe la información y envía una trama de reconocimiento *broadcast* indicando que la transmisión fue correcta (ACK) y que continúa la transmisión con A (CTS). Este proceso se repite durante las ranuras que A necesite, al finalizar el coordinador envía una trama de reconocimiento *broadcast* indicando que la transmisión fue correcta y que ahora está disponible para que un nuevo dispositivo inicie la transmisión.

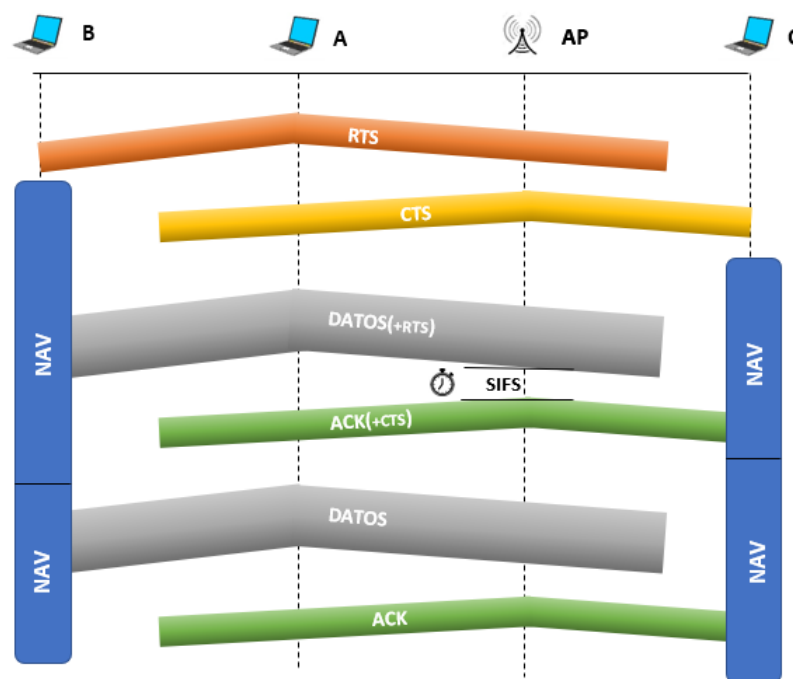


Figura 2. Secuencia de mensajes entre dos dispositivos usando CSMA/CA ranurado.

**3.2.6 Primitivas y Entidades para Manejo de Información con Capas Superiores.** Las primitivas son los mensajes que se dan entre dos capas consecutivas del modelo de comunicación dentro de cada dispositivo. Como el protocolo IEEE 802.15.4e está centrado en la capa de control de acceso al medio (MAC) las primitivas utilizadas son para comunicar la subcapa MAC con la siguiente capa superior, que siguiendo el modelo de capas OSI, la capa superior

corresponde a la capa de red. Dependiendo de la función que cumple la primitiva puede ser de un tipo o de otro. Los cuatro principales tipos de primitivas son: Las de solicitud que son usadas para iniciar un proceso o solicitar alguna información. Las de indicación que son usadas para mostrar el cumplimiento de un evento dentro del proceso; por ejemplo, indicando los datos recibidos y los datos que se solicitan para continuar con el proceso. Las de respuesta que son usadas para completar un procedimiento previamente invocado por una primitiva de indicación y las de confirmación que se usan para corroborar si el proceso fue llevado de forma correcta o no. No todos los procesos cuentan con estos 4 tipos de primitivas y para cada proceso las primitivas son distintas y solicitan información diferente.

Para el manejo de las primitivas se utilizan dos entidades. La primera es la entidad de administración de la subcapa MAC (MLME) que maneja todas las primitivas relacionadas con el control de la red como lo es el manejo de solicitudes de asociación de dispositivos, las solicitudes de ranuras *beacon* o GTS y el manejo de diversidad de canal. La segunda es la entidad de partes comunes de la subcapa MAC (MCPS) que maneja los datos de un nodo entre la capa física y superior del mismo. Por ejemplo, en una red de sensores, cada sensor mide cierto parámetro cada cierto tiempo y lo coloca en paquetes de información de determinado tamaño; con las primitivas de la entidad MCPS cada nodo maneja de manera local esta información y por ejemplo, si fue transmitida por fragmentos en múltiples ranuras con esta entidad se maneja la fragmentación y desfragmentación de dicha información.

**2.2.7 Tramas MAC.** En una trama MAC a la información útil que se va a transmitir se le agregan todos los datos que la subcapa MAC necesita para mantener el orden de la red y se transmite como un paquete de información de tamaño determinado dependiendo del tipo de

trama MAC. La estructura general de una trama MAC del IEEE.802.15.4e se observa en la figura 3. Donde se puede observar que se compone de un encabezado (MHR) que contiene información sobre el tipo de trama, número de secuencia, campos de direcciones que contiene las direcciones de la red, dispositivo de origen y de destino, un campo de seguridad que indica la información necesaria para identificar el tipo y nivel de seguridad implementado en la subcapa MAC. La carga útil (*Payload*) que se compone de la información que el nodo va a enviar y finalmente el pie de trama (MFR) que contiene una secuencia de chequeo (FCS) para verificar los datos.

Octets: 1/2	0/1	0/2	0/2/8	0/2	0/2/8	variable	variable		variable	2/4
Trama de Control	Número de Secuencia	Destino PAN ID	Dirección Destino	Fuente PAN ID	Dirección Fuente	Encabezado de Seguridad Auxiliar	Elemento de Información (IE)		Trama de Carga Útil	Secuencia de Chequeo (FCS)
		Campos de Direccionamiento					Encabezado IEs	Carga Útil IEs		
ENCABEZADO (MHR)							CARGA ÚTIL MAC		PIE (MFR)	

Figura 3. Formato General de la Trama MAC del IEEE.802.15.4e.

Dependiendo del proceso o utilidad, hay diferentes tipos de tramas MAC. El primero son las tramas *beacon*, que se transmiten en las ranuras *beacon* y son usadas por los coordinadores para enviar información sobre el estado de la red, la estructura de la multisupertrama, dispositivos asociados, información de las ranuras GTS y nodos para los cuales hay información por transmitir. La trama de datos que son usadas por los nodos de la red para enviar la información de cada nodo; estas tramas, por ejemplo, son utilizadas en la transmisión de información en las ranuras GTS en los periodos de acceso de libre contención CFP. Las tramas de reconocimiento que son usadas por los todos los nodos de la red para dar el reconocimiento o confirmación que

una transmisión fue realizada correctamente. La trama de comandos MAC son usadas por los diferentes dispositivos de la red para realizar las diferentes solicitudes mediante las cuales se llega a conformar la red, como lo son las solicitudes de asociación y disociación, solicitudes de ranuras *beacon* o GTS, escaneos activos o huérfanos, reajuste de red o cualquier otra función de administración de la subcapa MAC. Finalmente las tramas multipropósito que como su nombre lo indica pueden ser usadas para cualquier propósito que no cubran los demás tipos de tramas.

### **3.3 Ejemplo de Establecimiento y Funcionamiento de una Red bajo DSME usando la Implementación OpenDSME**

Para comprender de una mejor manera cómo funciona el protocolo IEEE 802.15.4e en modo DSME. Se explicarán los principales procesos que se llevan a cabo en la conformación y funcionamiento de una red, explicando de forma más detallada cómo se utilizan las diferentes ranuras de la multisupertrama, las tramas que se envían y las primitivas utilizadas en cada parte de los diferentes procesos. Por eso se usó de apoyo una simulación hecha con la implementación OpenDSME(Meier *et al.*, 2017).

Para el ejemplo se utilizó una red de 8 nodos, como se muestra en la figura 4, en la que el nodo host [0] funciona como coordinador PAN. Los círculos alrededor de cada nodo representan el área de cobertura que cada uno tiene, por ejemplo, la cobertura del host [7] no alcanza para transmitir directamente al coordinador PAN, pero puede transmitir información o asociarse con los nodos host [1], host [2] y host [6] si alguno de estos llega a funcionar como coordinador.

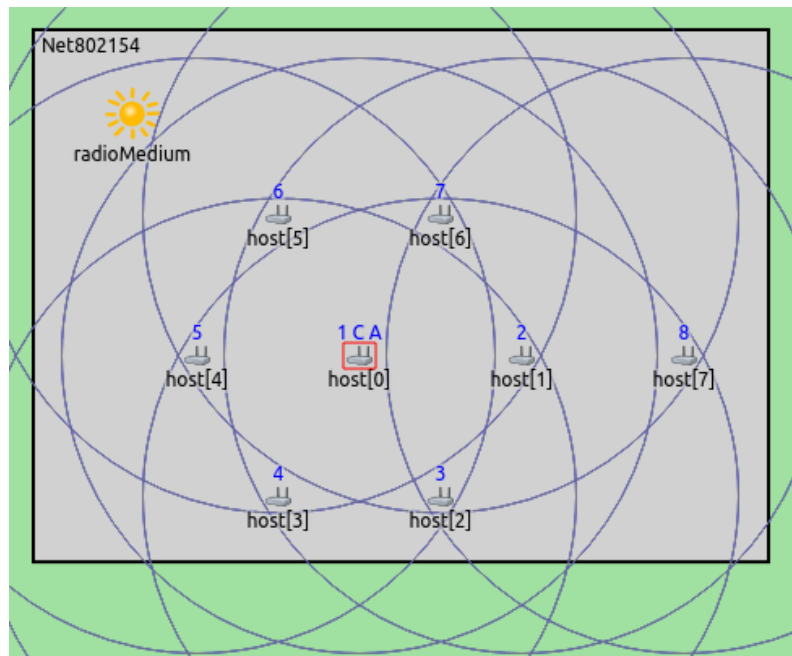


Figura 4. Red utilizada para la simulación de ejemplo.

Para la estructura de la multisupertrama se seleccionaron valores de  $BO=6$ ,  $MO=5$  y  $SO=4$ . Dando una estructura de multisupertrama como la de la figura 1, que consta de dos supertramas por multisupertrama y dos multisupertramas en cada intervalo de *beacon* calculados de la siguiente manera.

$$\text{Número de supertramas en cada multisupertrama} = 2^{(MO-SO)} = 2^{(5-4)} = 2.$$

$$\text{Número de multisupertramas en un intervalo } beacon = 2^{(BO-MO)} = 2^{(6-5)} = 2.$$

En la tabla 1 se muestran los valores que pueden tomar los principales parámetros con los que se construye la multisupertrama. De ahí tomamos el *aBaseSlotDuration*, que nos indica que el número de símbolos por ranura debe ser de 60 para un orden de supertrama igual a cero. Con

esto tenemos que la duración base de una supertrama con orden cero es de 960 símbolos ( $aBaseSuperframeDuration = aBaseSlotDuration \times aBaseNumSuperframeSlots$ ). Con esto un intervalo *beacon* tendría una duración de 61440 símbolos calculada de la siguiente forma.  $BI = aBaseSuperframeDuration \times 2^{macBeaconOrder} = 960 \times 2^6 = 61440$  símbolos. Teniendo en cuenta que la velocidad de transferencia de estas redes es de 250 Kbits/s y usando dos bits por símbolo el intervalo *beacon* es de 491.52 ms.

Tabla 1.

*Principales Constantes y Atributos MAC*

Constantes y Atributos	Descripción	Valor por Defecto	Tipo	Rango
<i>aBaseSlotDuration</i>	El número de símbolos que forman una ranura de supertrama cuando el orden de la supertrama es igual a cero	60	--	--
<i>aBaseSuperframeDuration</i>	El número de símbolos que forman una supertrama cuando el orden de la supertrama es igual a cero	$aBaseSlotDuration \times aNumSuperframeSlots$	--	--
<i>aNumSuperframeSlots</i>	La cantidad de ranuras contenidas en cualquier supertrama	16	--	--
<i>macBeaconOrder (BO)</i>	Indica la frecuencia con que se transmite el <i>beacon</i>	15	Entero	0-15
<i>macMultisuperframeOrder (MO)</i>	La longitud de una multisupertrama, que es un ciclo de las supertramas repetidas	15	Entero	0-15

<i>macSuperframeOrder (SO)</i>	La longitud de la porción activa de la supertrama saliente, incluida la trama <i>beacon</i>	15	Entero	0-15
--------------------------------	---	----	--------	------

---

Los atributos BO, MO y SO pueden tomar cualquier valor entre 0 y 15 respetando la siguiente relación  $SO \leq MO \leq BO$ .

**3.3.1 Inicio de una PAN.** El primer paso para establecer una PAN es realizar un reinicio de la subcapa MAC en el dispositivo que iniciara la red. En nuestro ejemplo este proceso lo realiza el host [0]. Esto se realiza utilizando la primitiva MLME-RESET. Esto con el fin de establecer la subcapa MAC a un estado inicial conocido. Este comando tiene un parámetro llamado *SetDefaultPIB* que permite establecer si los valores de los parámetros se tienen que establecer en su valor por defecto o se mantiene en los que estaban establecidos con anterioridad, para este caso como se va a inicializar una PAN este parámetro será establecido en TRUE. La secuencia de primitivas ejecutadas por el dispositivo que iniciara la red se muestran en la figura 5.

Después del reinicio de la subcapa MAC y su confirmación a la capa superior se realiza el proceso de escaneo de detección de energía (ED) y escaneo activo iniciados por la primitiva MLME-SCAN. En el escaneo ED el dispositivo realiza un escaneo a todos los canales midiendo los niveles de energía para determinar cuál es el mejor canal; y en el escaneo activo el dispositivo recorre todos los canales realizando una solicitud de petición de tramas *beacon* en cada canal y esperando recibir las tramas *beacon* de los diferentes coordinadores que están operando en cada canal como se ve en la figura 6. Con la información obtenida en los escaneos, las capas superiores establecen la ID PAN que manejará el dispositivo, esta tiene que ser diferente de las ID PAN que fueron recibidas durante el proceso de escaneo activo. Luego de establecerse la ID PAN ejecuta la primitiva MLME-SET que establece en la subcapa MAC del

dispositivo los valores que usará para establecer la red como son el ID PAN, el número de canal a utilizar, la página del canal, los parámetros *BeaconOrder*, *SuperframeOrder* entre otros. El parámetro *PanCoordinator* se establece en TRUE para indicar que este dispositivo cumplirá la función de un coordinador PAN y no simplemente un dispositivo asociado. Como último paso se ejecuta la primitiva MLME.START para solicitar al dispositivo FFD que inicie la nueva PAN con los parámetros establecidos, después de lo cual se procederá a enviar el primer *beacon* por parte del FFD para que los demás dispositivos que se encuentran en escaneo pasivo lo reciban y se sincronicen con él, también se realiza la confirmación a las capas superiores que el proceso se ha iniciado. En la figura 7 podemos observar el momento en el que el host [0] envía la primera trama *beacon* después de terminar el proceso de establecimiento de la red.

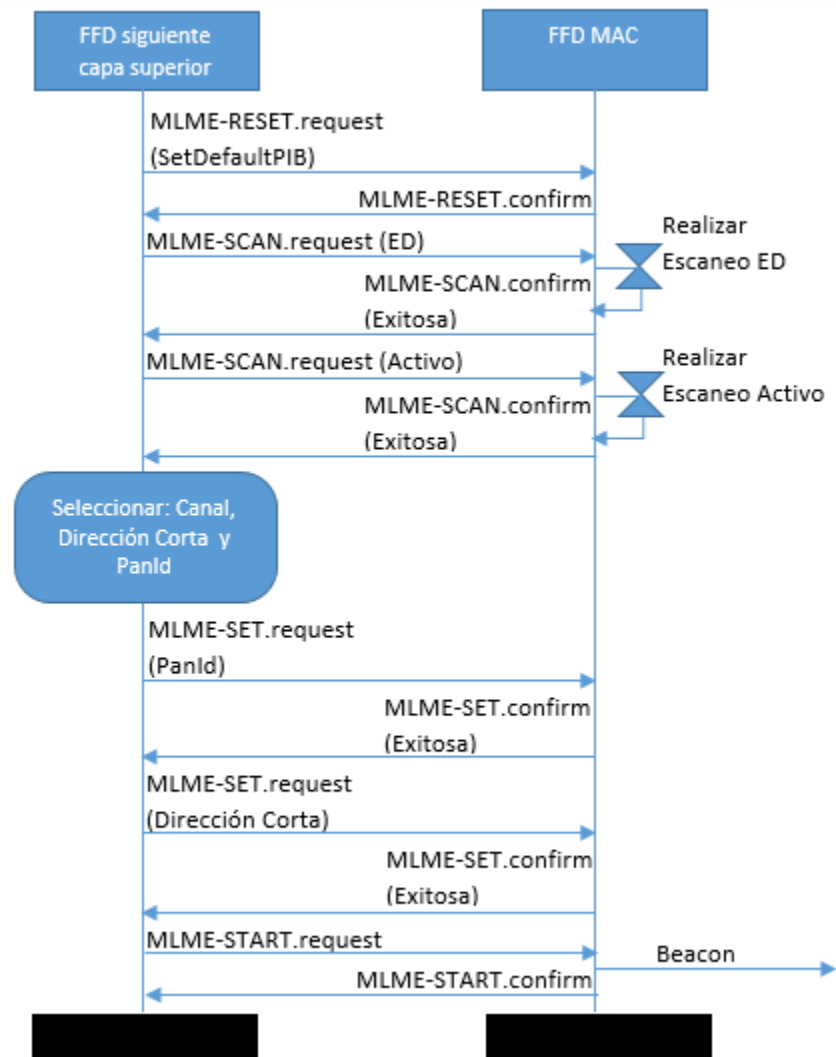


Figura 5. Secuencia de primitivas ejecutadas por el dispositivo que iniciara la PAN.

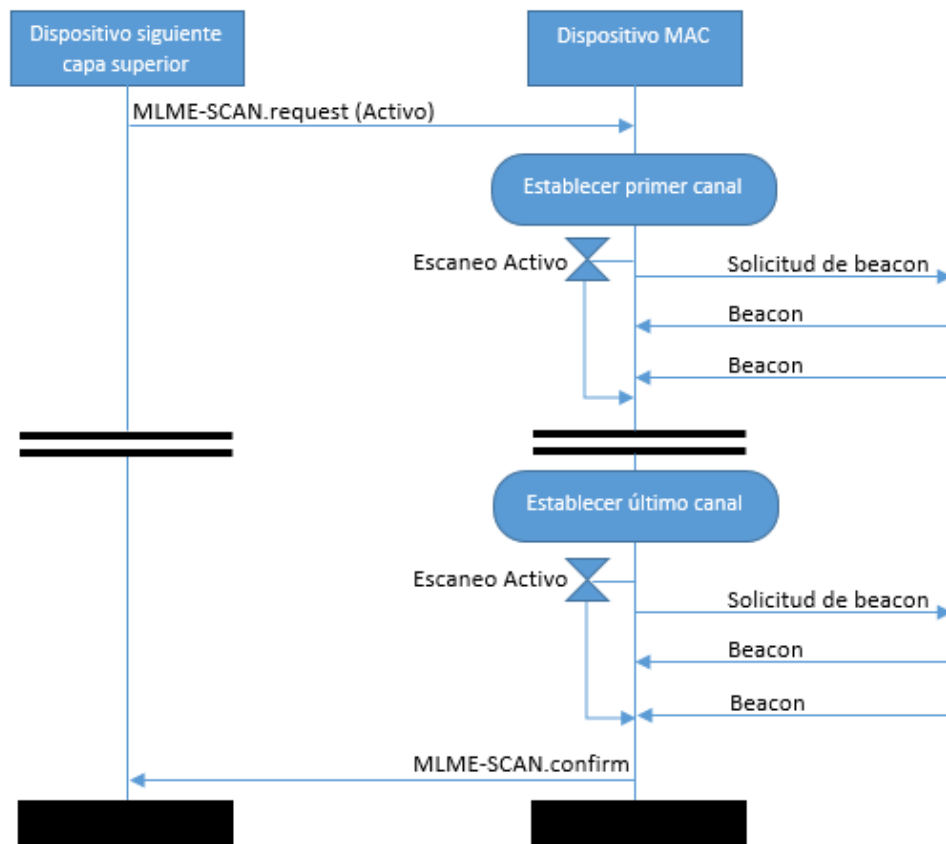


Figura 6. Secuencia seguida en el escaneo Activo.

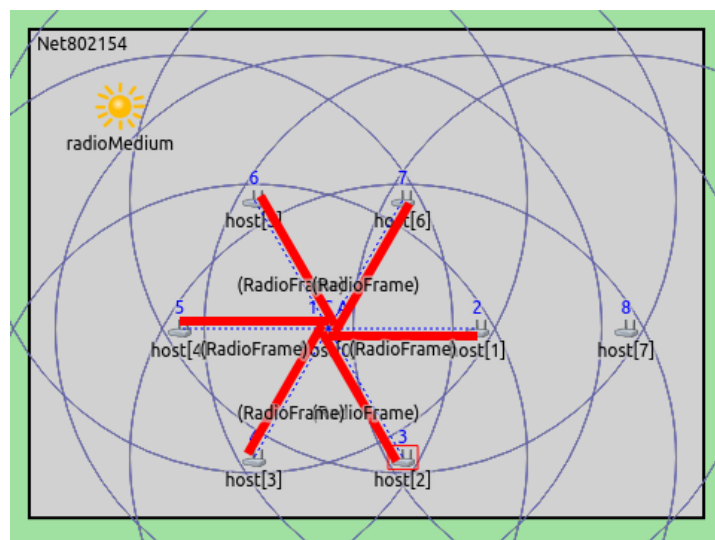


Figura 7. Envío de la primera trama beacon por parte del coordinador PAN después de finalizar el establecimiento de la red.

Los dispositivos que no funcionan como coordinador PAN inician en un estado de escaneo pasivo. En el escaneo pasivo los dispositivos activan su receptor y van haciendo un recorrido por todos los canales y esperando recibir una trama *beacon*. Después que reciben la trama *beacon* del coordinador PAN, se sincronizan y pueden empezar a realizar solicitudes de asociación estableciendo la red. En nuestro ejemplo los dispositivos host [1], host [2], host [3], host [4], host [5] y host [6] reciben la trama *beacon* pero el host [7] como no está dentro de rango no recibirá la trama *beacon* y continuará en escaneo pasivo como se ve en la figura 7.

**3.3.2 La primera trama dentro de la estructura de datos. La trama beacon.** La primera ranura que se encuentra en la multisupertrama es la ranura *beacon*. En esta ranura se transmite la trama *beacon* que es la primer trama MAC transmitida en la red, y en redes que operan en modo DSME se utiliza la trama *beacon* mejorada, pues esta incluye campos extras que permiten la gestión y sincronización de este tipo de redes. Ahora detallaremos más en su contenido para identificar dónde y cómo se ubica toda la información que esta contiene. La forma general de una trama MAC de *beacon* mejorado se muestra en la figura 8.

Octets: 2	0/1	variable	variable	variable		variable	2/4
Trama de Control	Número de Secuencia	Campos de Direccionamiento	Encabezado de Seguridad Auxiliar	Elemento de Información (IE)		Carga Útil Beacon	Secuencia de Chequeo (FCS)
				Encabezado IEs	Carga Útil IEs		
ENCABEZADO (MHR)				CARGA ÚTIL MAC		PIE (MFR)	

Figura 8. Composición general de la trama *beacon* mejorado.

En el MHR se encuentran los mismos tres campos globales que cualquier otro tipo de trama MAC. El primero es el campo de control y contiene los valores mostrados en la figura 9. Estos sirven para identificar el tipo de trama y los distintos campos que están o no presentes en la trama como el de seguridad, número de secuencia y elementos de información, también se encuentran los campos para indicar qué direcciones son usadas y si son direcciones cortas o extendidas. Los valores que se utilizan pueden ser consultados directamente en la norma en la sección 7.2.1 (LAN/MAN Standards Committee 2015, pág. 151).

Bits: 0-2	3	4	5	6	7	8	9	10-11	12-13	14-15
Tipo de Trama	Seguridad Habilitada	Trama Pendiente	Solicitud de Reconocimiento (AR)	PAN ID Compresión	Reservado	Supresión de número de secuencia	Elementos de Información Presente	Modo de direccionamiento de destino	Versión de Trama	Modo de direccionamiento de origen

Figura 9. Estructura del campo trama de control de una trama MAC *beacon* mejorada.

Los campos de seguridad y número de secuencia pueden estar presentes o no, dependiendo si se habilitan o no en el campo de control. En el campo de direcciones se ubican las direcciones de red y del dispositivo tanto del dispositivo de origen como de destino. No siempre están presentes las cuatro direcciones o puede ser una combinación de direcciones cortas y largas dependiendo de lo que se establezca en el campo de control. Las direcciones cortas se usan con el fin de utilizar menor cantidad de bits en la trama a transmitir y esta dirección corta se establece cuando un dispositivo se asocia a la red.

En el campo de carga útil se agrega información establecida por capas superiores. La información que en la trama *beacon* normal tiene campos establecidos, como especificación de la

trama, información de los GTS y direcciones pendientes, en las tramas *beacon* mejorado se agrega como elementos de información (IE). Así la información como BO, SO y MO que indican la estructura de la multisupertrama se agrupa en un IE. La información respecto al estado del coordinador frente a nuevas asociaciones en otro IE y la información de las ranuras GTS como la disponibilidad para asignar nuevas ranuras, las ranuras ocupadas y las direcciones de los dispositivos a las que se asignaron estas ranuras se agrupa en otro IE. El uso de IE's hace que el *beacon* sea más flexible pues la longitud de cada IE puede variar de acuerdo a la información que contenga, esto es indicado en el encabezado de cada IE. También se evita el uso de bits extra que extienden la longitud de *beacon* de forma innecesaria, como es el caso del campo de direcciones pendientes, que al usarse como un IE solo se agrega en la trama *beacon* mejorada cuando el coordinador tenga información por enviar a algún dispositivo, de lo contrario no se agrega este IE.

**3.3.3 Establecimiento y funcionamiento de una PAN.** Después de enviarse la trama *beacon*, los dispositivos que realizaban un escaneo pasivo reciben esta trama, con la información recibida que ya se pueden sincronizar y en el siguiente intervalo *beacon* empezar a realizar solicitudes al coordinador que envió la trama *beacon*. Los principales procesos que se llevan a cabo durante el establecimiento y funcionamiento de una PAN son la asociación y disociación de los dispositivos, agendamiento de *beacon*, agendamiento de ranuras GTS y la transmisión de información.

**3.3.3.1 Asociación de un dispositivo a la PAN.** El dispositivo después de recibir y procesar la trama *beacon* en las capas superiores, genera la solicitud de asociación usando la primitiva

MLME-ASSOCIATE y envía esta solicitud en el siguiente periodo CAP en una trama de comandos MAC usando CSMA/CA. El coordinador al recibir la solicitud de asociación, procesa la información y envía un mensaje con la respuesta al dispositivo en el mismo periodo CAP. El proceso completo se observa en la figura 10.

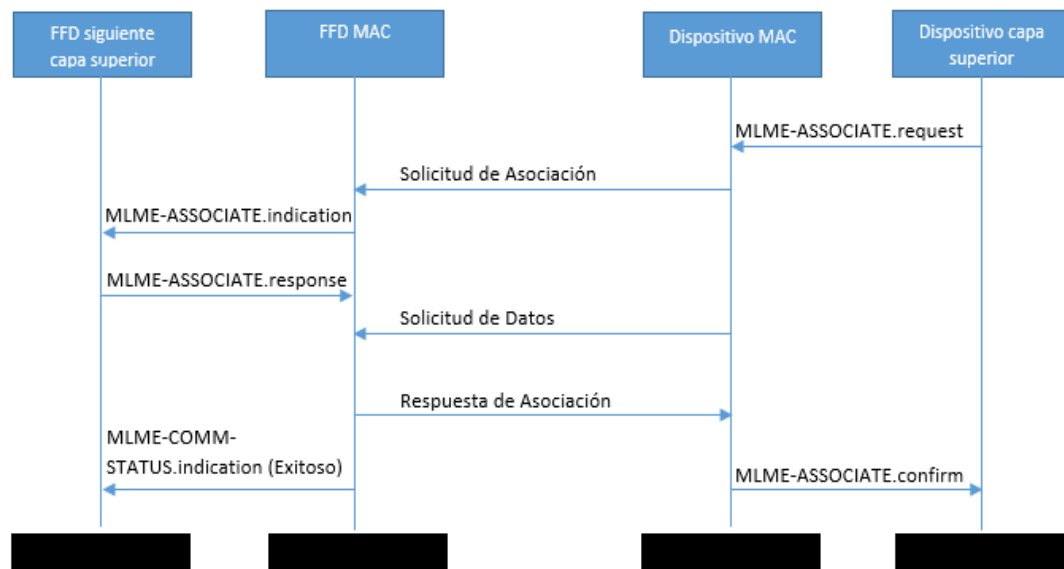


Figura 10. Secuencia de primitivas y mensajes en una asociación.

La estructura general de las tramas de comandos MAC se muestra en la figura 11. La característica principal de este tipo de tramas son los campos ID de comando y el campo de contenido, el ID sirve para identificar qué tipo de comando se solicita ejecutar que en este caso es el de asociación en DSME. En el contenido se agrega la información que necesita dicho comando en este caso se incluye información como el tipo de dispositivo, si el dispositivo está alimentado con corriente alterna, baterías o con otro tipo de alimentación externa, el tipo de asociación, la capacidad del dispositivo para encriptar información en la subcapa MAC, si va a

usar dirección corta, el ID de la secuencia de salto de canal que usará el dispositivo si usara la secuencia de salto por defecto o la que le asigne el coordinador o una dada por las capas superiores y el *offset* de canal del dispositivo. En la primitiva y trama de respuesta se agrega información indicando si se pudo asociar el dispositivo o no y la causa de la falla, la dirección que usará ya sea la corta o extendida y la secuencia de salto que usará el dispositivo. En la tabla 7.49 del protocolo pueden consultarse todos los identificadores (ID) de los diferentes comandos (LAN/MAN Standards Committee 2015, pág. 222).

Octets: 2	0/1	variable	variable	variable		1	variable	2/4
Trama de Control	Número de Secuencia	Campos de Direccionamiento	Encabezado de Seguridad Auxiliar	Elemento de Información (IE)		Comando ID	Contenido	Secuencia de Chequeo (FCS)
				Encabezado IEs	Carga Útil IEs			
ENCABEZADO (MHR)				CARGA ÚTIL MAC			PIE (MFR)	

Figura 11. Estructura general de una trama de comandos MAC.

En nuestro ejemplo el primer dispositivo en realizar la solicitud de asociación es el host [4] o dispositivo 5 por el número en azul ubicado sobre él como se ve en la figura 12. Debido a que todos los dispositivos están usando el mismo medio (aire) todos dentro del rango reciben la trama de solicitud, por eso la línea roja se dirige a todos los dispositivos. Ya cada dispositivo recibe la trama e identifica que la dirección a la cual va dirigida es diferente a la de él y la ignora. Así el único que termina procesándola es el coordinador que es al cual va dirigida y le envía al host [4] una trama de reconocimiento informando que la solicitud llegó correctamente. Después que el coordinador procesa la información y asigna los valores al nuevo dispositivo, envía la respuesta al host [4] el cual después de procesarla cambia su estado a asociado mostrado como

una A junto al número 5 y envía al coordinador la trama de reconocimiento para indicarle que el proceso de asociación fue terminado correctamente.

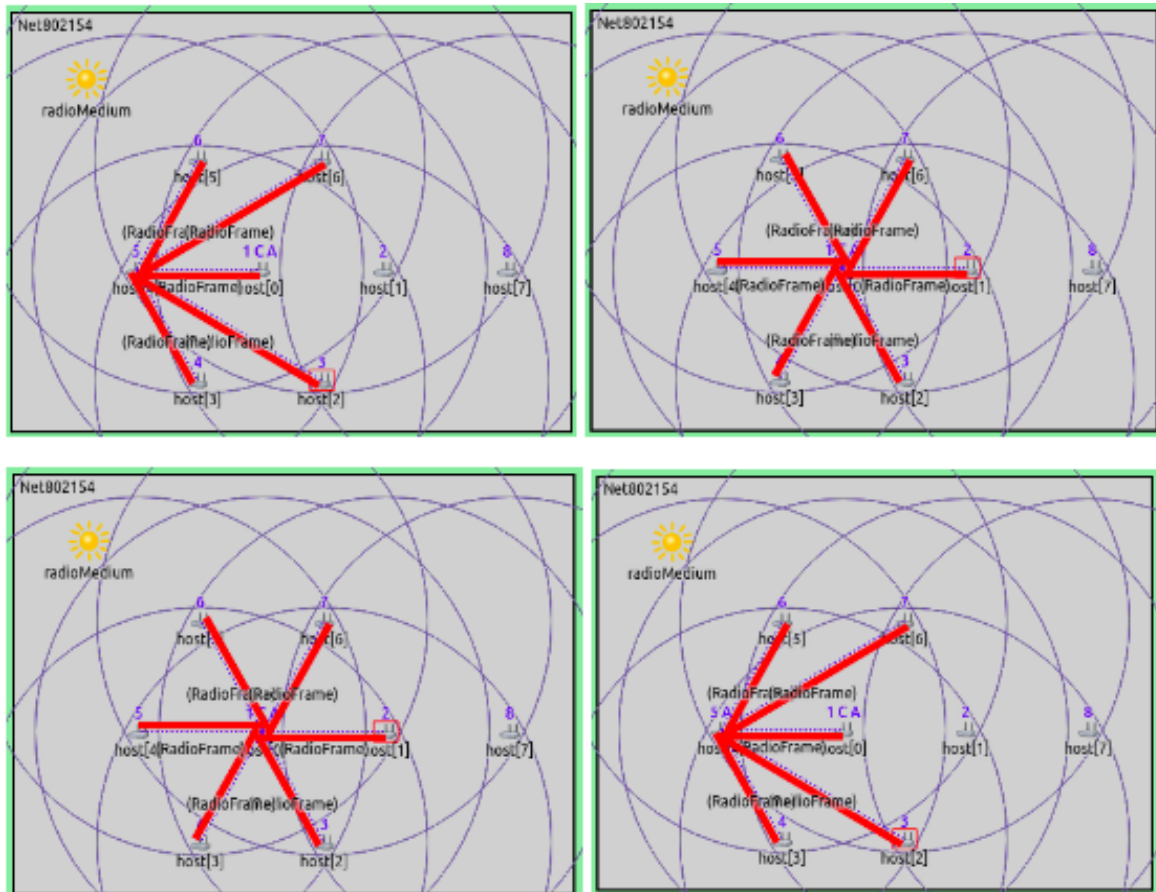


Figura 12. Proceso de asociación en una red simulada en OpenDSME.

El proceso de disociación de un dispositivo de la red es manejado por la primitiva MLME-DISASSOCIATE y puede ser iniciada por el coordinador o por el propio dispositivo. En el caso que el coordinador sea el que inicie la disociación primero en la trama *beacon* coloca la indicación de datos pendientes para el dispositivo que va a desasociar. El dispositivo recibe la trama *beacon* y realiza la solicitud de datos a lo que el coordinador le envía una trama de comandos MAC de notificación de disociación y el dispositivo responde con el reconocimiento.

En el caso que el dispositivo sea el que busque la disociación envía la indicación de disociación al coordinador el cual le responde con una trama de reconocimiento.

**3.3.3.2 Agendamiento de beacon.** En el modo DSME, se permite que los dispositivos de función completa (FFD) puedan funcionar como coordinadores, permitiendo que usen alguna de las ranuras *beacon* disponibles en la multisupertrama para realizar procesos de control, funcionamiento y coordinación de dispositivos cercanos a él. El procedimiento que se realiza cuando un dispositivo solicita una ranura *beacon* es mostrado en la figura 13. El proceso se inicia cuando el dispositivo inicia un escaneo activo de la red y como respuesta todos los dispositivos que funcionan como coordinadores envían un *beacon* mejorado en el que agregan la información de la ranura *beacon* que ocupan y las que están libres, esto viene representado en un mapa de bits, donde una ranura *beacon* se establece con un “1” si se encuentra ocupada y en “0” si está libre. El dispositivo que solicitó la ranura recibe las tramas *beacon* mejoradas, selecciona una de las ranuras disponibles y envía una trama de comando MAC de notificación de asignación de *beacon* a un coordinador, indicando el índice de la ranura *beacon* seleccionada. El coordinador recibe la solicitud y comprueba que no exista conflicto en la asignación de esta ranura. En el caso de no haber conflicto, se actualiza el mapa de bits y envía la respuesta de asignación al dispositivo. En el caso de existir conflicto en la asignación de dicha ranura y otro dispositivo envió su solicitud antes, el coordinador envía una notificación de colisión al dispositivo que envió su solicitud más tarde. El dispositivo que tuvo una asignación exitosa recibe la respuesta, actualiza su información y envía una notificación *broadcast* para informar a los nodos vecinos que la ranura *beacon* fue asignada y actualicen su mapa de bits. El dispositivo empieza a enviar su trama *beacon* en la ranura asignada y a partir de ese momento cualquier nodo puede asociarse

a él y solicitar ranuras GTS de la supertrama correspondiente. En el caso de no asignarse la ranura beacon, se debe repetir todo el proceso.

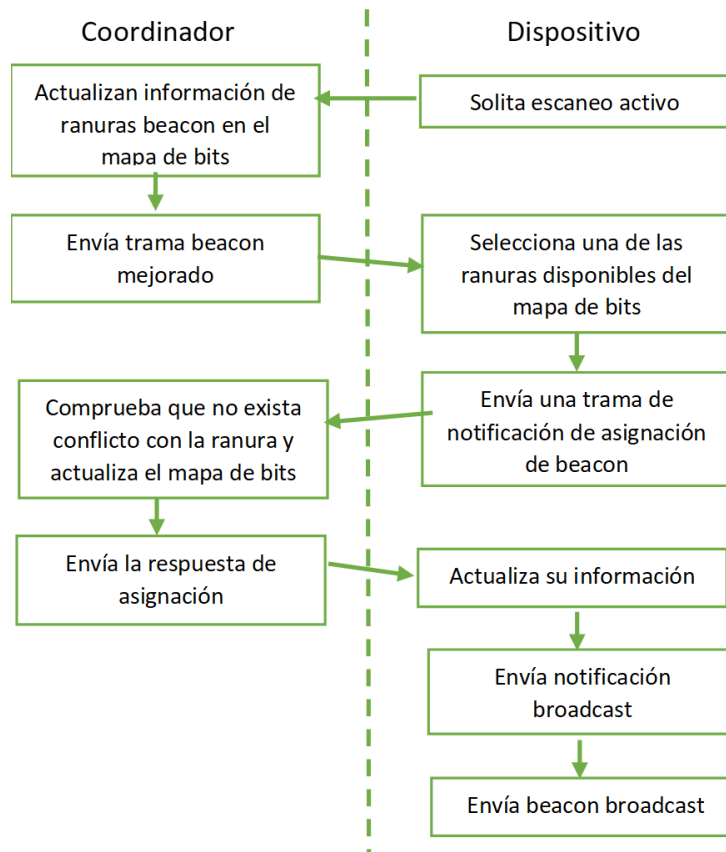


Figura 13. Algoritmo para el agendamiento de *beacon*.

La multisupertrama utilizada en la simulación permite que además del coordinador PAN, tres dispositivos funcionen como coordinadores seleccionados entre los índices 1, 2 y 3 de las ranuras *beacon* disponibles en la multisupertrama, como se ve en la figura 1. En la sección de envío de información se muestra que nodos funcionan como coordinadores y qué implicaciones tienen sobre el resultado final de la simulación.

**3.3.3.3 Agendamiento de GTS.** El siguiente paso en el establecimiento de una PAN en DSME, es la asignación de ranuras GTS. Para que un par de dispositivos utilicen una GTS esta debe asignarse primero, este proceso se realiza en los periodos CAP. La primitiva que gestiona estas solicitudes es la MLME-DSME-GTS la cual inicia el proceso en un dispositivo A, el cual utiliza una trama de comando MAC para transmitir la petición al dispositivo B. Este dispositivo B recibe la solicitud y determina la asignación o no de la ranura dependiendo de los parámetros establecidos en la solicitud y de la disponibilidad de la ranura, después el dispositivo B envía la respuesta en modo *broadcast* con los índices de ranura, supertrama, multisupertrama y número de canal donde se asignará la ranura; el dispositivo A, al recibir la respuesta envía una trama *broadcast* de indicación informando a todos los nodos vecinos de la ranura GTS asignada para que actualicen su información de disponibilidad de ranuras. este proceso se puede observar en la figura 14.

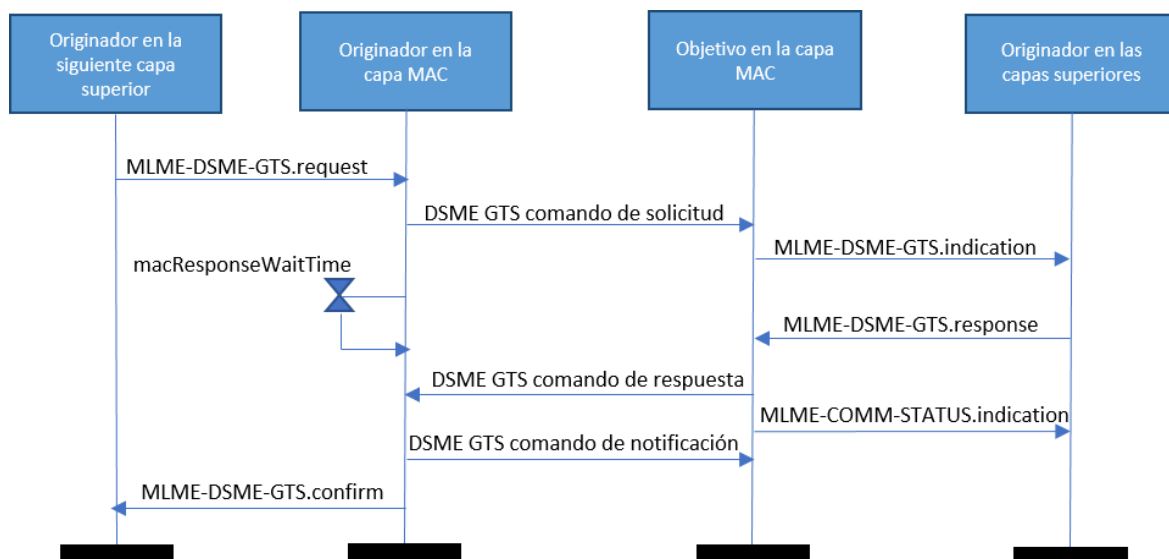


Figura 14. Proceso para la asignación de una ranura GTS entre dos dispositivos.

Un bloque importante en estas tramas es el bloque SAB (Mapa de Bits de Asignación de Ranura) pues en este bloque es donde se registra la información de los índices de las ranuras, si están ocupadas o no y en los canales que están trabajando. Así con la información que reciben de los vecinos el bloque SAB se va actualizando minimizando los problemas de doble asignación.

El proceso de desasignación de GTS es similar a la asignación y es llevado a cabo cuando el par de dispositivos que tienen asignada la GTS determinan que no la necesitan más. En la respuesta y la indicación que son transmitidas *broadcast* se actualiza la información de la ranura que queda disponible para que los nodos vecinos también actualicen el campo SAB de ranuras GTS.

**3.3.3.4 Envío de información.** Una vez asignadas la GTS entre dos dispositivos, estos ya pueden empezar a transmitirse entre ellos tramas de datos y los respectivos reconocimientos. En estas tramas de datos en el campo de carga útil, las capas superiores colocan la información a transmitir. En muchos casos el destino final de esta información es el nodo que funcionara como controlador del proceso o mando central y puede ser el coordinador PAN o un dispositivo que esté conectado en la PAN.

En nuestra simulación todos los nodos están diseñados para transmitir 100 paquetes de datos al coordinador PAN y en el caso del host [7] cómo está fuera del área de cobertura del coordinador PAN, tiene que enviar su información en una serie de saltos enviando los datos primero al host [1], host [2] o al host [6] y de estos al host [0] que es el coordinador PAN. Dependiendo de la semilla usada por el coordinador PAN para asignar los coordinadores puede que ni el host [1], host [2] o el host [6] lleguen a funcionar como coordinadores como es el caso que se muestra en la figura 15 donde los tres dispositivos que llegan a funcionar como

coordinadores son el host [3], host [4] y el host [5]. Debido a esto los dispositivos host [1], host [2] y host [6] solo funcionan como dispositivos terminales y el host [7] queda fuera del área de cobertura de los tres coordinadores y del coordinador PAN por lo que no le llega en ningún momento una trama *beacon* y no se pudo asociar a la red y mucho menos transmitir sus datos. Como se ve en la figura 16, donde se ve que el host [1], host [2], host [3], host [4], host [5] y host [6] enviaron correctamente sus 100 paquetes. Pero el host [7] no pudo enviar ningún paquete y el para el host [0] se estableció para esta simulación que fuera el coordinador PAN y solo recibiera paquetes.

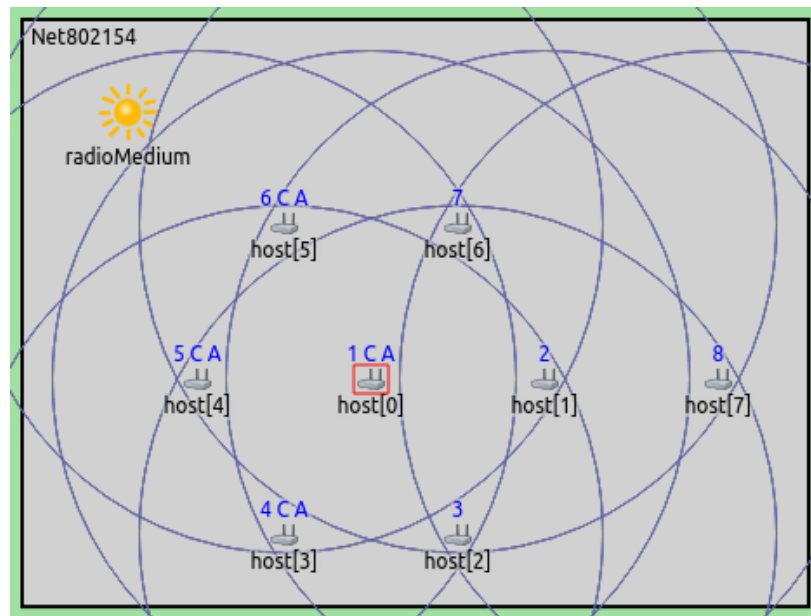
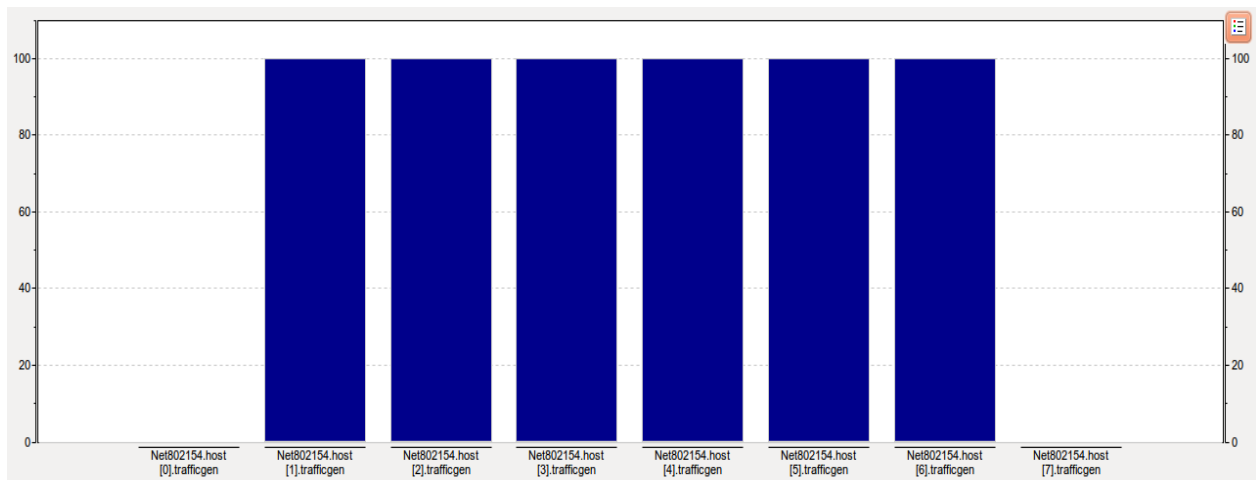


Figura 15. Forma en que quedaron establecidos los coordinadores en la simulación de ejemplo.



*Figura 16.* Número de paquetes de información enviados con éxito por cada nodo en la simulación de ejemplo.

### 3.4 Procesos importantes que no lograron observarse en el ejemplo de la simulación

En la sección anterior se explicó cómo funciona una PAN en modo DSME, pero no se mostraron ni tuvieron en cuenta algunos casos y efectos que dificultan el funcionamiento de la red, uno de las principales dificultades que se presenta en las redes inalámbricas es el efecto de nodo ciego que puede generar problemas de colisiones o de doble asignación. Otro efecto es el de interferencias o ruido en el canal lo cual genera transmisiones fallidas. Debido a estos efectos adversos se deben realizar procesos específicos para corregir estas fallas. algunos de estos procesos son mostrados a continuación.

**3.4.1 Escaneo huérfano.** Cuando se habla de un dispositivo huérfano se relaciona con aquellos dispositivos que por algunas razones, por ejemplo, continuas transmisiones o recepciones fallidas de información o pérdida de sincronización pierde a su coordinador o se

desincroniza de él. El escaneo huérfano tiene la función de explorar los canales para encontrar a su coordinador anteriormente asociado y volver a sincronizarse.

El escaneo huérfano inicia con el comando primitiva *MLME-SCAN.request* con el parámetro *ScanType* establecido en ORPHAN, después el dispositivo irá cambiando de canal y en cada canal enviará una notificación de huérfano que contiene la dirección origen del dispositivo. El proceso de escaneo huérfano termina cuando el dispositivo recibe un comando de realineación por parte del coordinador o realiza el escaneo por todos los canales sin recibir respuesta.

Cuando el coordinador recibe una notificación huérfana, el coordinador enviará a sus capas superiores la primitiva *MLME-ORPHAN.indication*. En las capas superiores se busca la dirección del dispositivo que envía la notificación de huérfano y se comprueba si este dispositivo efectivamente se encontraba asociado, luego se envía la primitiva *MLME-ORPHAN.response* en donde se define si el dispositivo se encontraba asociado o no por medio del parámetro *AssociatedMember*, y por tanto se enviará o no el comando de realineación por parte del coordinador.

**3.4.2 Conflicto con el ID PAN.** El conflicto con el ID PAN ocurre cuando dos redes, cuyos rangos de comunicación llegan a coincidir en el mismo espacio físico, y por los mecanismos de selección de ID utilizados por sus respectivos coordinadores PAN terminan seleccionando una misma PAN ID, creando conflictos de comunicación entre los dispositivos asociados y sus respectivos coordinadores, como por ejemplo asociando un nodo a una red y enviando sus tramas a la otra.

Se concluye que hay un conflicto de ID por parte del coordinador PAN si se cumplen las siguientes condiciones:

- Uno de los coordinadores recibe una trama *beacon* de otro dispositivo que indica que es un coordinador y la ID PAN de este dispositivo es la misma que él está utilizando.
- Uno de los coordinadores recibe una notificación de conflicto de ID PAN enviada desde otro dispositivo.
- Un dispositivo que se encuentra asociado recibe una trama *beacon* con la ID PAN a la que está asociado, pero tiene la dirección de dispositivo diferente.

Tras haberse generado el comando de notificación de conflicto de ID PAN, el coordinador confirmará al dispositivo la recepción de este a través de una trama de reconocimiento. Después tanto el coordinador PAN como el dispositivo enviará una primitiva *MLME-SYNC-LOSS.indication* con el parámetro *LossReason* establecido en *PAN\_ID\_CONFLICT* para que en las capas superiores hagan el respectivo proceso, el coordinador PAN realiza un escaneo activo y en base a los resultados, selecciona un nuevo ID PAN y el dispositivo hará nuevamente el proceso de asociación e iniciar nuevamente el proceso de establecer la red PAN.

**3.4.3 Retransmisiones.** Para algunas transmisiones, como lo son solicitudes de asociación, disociación y reconocimiento, o de una manera más general, las transmisiones donde sea necesaria una confirmación de que el mensaje fue recibido de forma correcta por parte del dispositivo de destino, se activa el campo de solicitud de reconocimiento. Al activarse este campo se le solicita al dispositivo de destino que envíe una trama de reconocimiento como respuesta indicando que recibió correctamente la información, si el dispositivo después del tiempo de espera establecido no recibe la trama de reconocimiento o recibe una trama con un número de secuencia diferente al de la trama que el envió, reenviará la trama, esto lo hará hasta

que llegue al número máximo de retransmisiones o hasta que reciba la trama de reconocimiento. Si llega al número máximo de retransmisiones dará por fallida la transmisión indicándolo a las capas superiores y esperando hasta la siguiente supertrama. Se debe resaltar que hay dos métodos de transferencia de datos de un coordinador a un dispositivo y son:

- La transmisión directa: El coordinador envía una trama de datos directamente al dispositivo y este al recibir dichos datos, envía una trama de reconocimiento al coordinador.
- La transmisión indirecta: El coordinador mantiene los datos hasta que sean solicitados por el dispositivo; el dispositivo hace un sondeo al coordinador para determinar si hay datos disponibles enviando una solicitud de datos, y si el coordinador determina que los hay envía el paquete de datos.

### **3.5 Aspectos de Seguridad Implementados en la Subcapa MAC.**

En entornos industriales es de gran importancia que los datos estén asegurados y protegidos frente a los diferentes tipos de ataques y por esto la subcapa MAC ofrece diferentes servicios para ofrecer confidencialidad y autenticidad de la información y la repetición de los mismos.

Para esto, se utilizan claves simétricas de enlace entre las comunicaciones entre dos dispositivos de red, con el fin de identificar los dispositivos pertenecientes a la misma red y claves maestras que son con las que se establecen las claves de red y de enlace.

Como todo el sistema de seguridad depende de las claves, estas solo deben transmitirse a los dispositivos usando un canal seguro, por lo tanto, como mínimo la clave maestra debe estar preinstalada en cada dispositivo o transportarse a cada dispositivo de forma local. En algunos casos la administración de la seguridad de la red se le asigna a un dispositivo específico que es el

que se encarga de generar y distribuir las claves de toda la red y puede o no ser un coordinador. Cuando la seguridad de la red no es prioritaria, las claves pueden ser transmitidas inicialmente por el dispositivo encargado de la administración de seguridad al nuevo dispositivo que busca unirse a la red. Pero se debe tener en cuenta que esta transmisión puede ser interceptada, comprometiendo las claves.

El proceso de seguridad requiere de las tres claves, el nivel de seguridad y la trama a encriptar; con estos parámetros la trama se procesa antes de enviarse haciendo que la trama que se envía está encriptada.

Como se vio en la figura 3, en las tramas MAC hay un espacio de seguridad que es donde se agrega toda la información referente a la seguridad de dicha trama.

#### **4. Trabajos relacionados**

Este estudio no estaría completo si no se hiciera una revisión del estado del arte. Para esto sobre una preselección de artículos se escogieron los más relevantes respecto al modo de funcionamiento DSME. En cada trabajo de investigación se proponen ciertas modificaciones o algoritmos que pretenden mejorar el funcionamiento de la red trabajando bajo ciertas circunstancias, ya sea porque presenta una topología específica, una aplicación requiere que la transmisión de datos sea realizada rápidamente, la red pueda ser escalada fácilmente o se adapte rápidamente a la movilidad presente en los nodos. También se busca que la red responda de una forma más adecuada a las diferentes situaciones, fallos o efectos adversos inherentes de toda red inalámbrica, como por ejemplo el efecto de nodo ciego, las colisiones, las interferencias y las retransmisiones.

#### 4.1 Análisis del agendamiento de beacon en DSME y propuesta de mejora (Hwang *et al.*, 2014)

Como ya se vio, el agendamiento de ranuras *beacon* es el proceso mediante el cual el coordinador PAN asigna las ranuras *beacon* a los diferentes coordinadores de la red. Las solicitudes de agendamiento de *beacon* son hechas durante el periodo CAP. En este proceso se pueden presentar diferentes inconvenientes como la doble asignación, que ocurre cuando a dos nodos en una misma red se les asocia un mismo ID, y las colisiones que pueden ser causadas por la presencia de uno o más nodos ciegos.

Debido a que el estándar solo da una abstracción de los procesos que se deben llevar a cabo y cómo deben funcionar, no se establece un código o algoritmo fijo, lo cual permite que un proceso pueda llevarse a cabo de una u otra forma dependiendo del diseñador. Uno de estos procesos es el de selección de ranura *beacon*. En el estándar se define el uso de un mapa de bits el cual sirve para identificar el número de ranuras y si están ocupadas o disponibles con un '1' o un '0' respectivamente. Pero no se establece un algoritmo específico para que un dispositivo seleccione una ranura de las disponibles. En la primera parte de este trabajo se analizan tres algoritmos de selección de ranura. El bit menos significativo disponible (LAB) que busca el cero más cercano al bit menos significativo, y asume esta posición como su ranura para asociarse. El bit más significativo disponible (MAB) que busca el cero más cercano al bit más significativo y asume esta ranura para su asociación. Y selección aleatoria (*Random*) en el que se elige una posición al azar y revisa si es un '0' o un '1', de ser un '1' realiza una nueva búsqueda hasta encontrar un '0' y lo selecciona como su posición deseada para solicitar asignación.

Para comprobar cuál de estos métodos de selección presenta mejor desempeño se simuló en dos escenarios uno con una densidad de nodos baja donde los nodos se encuentran lo suficientemente lejos los unos de los otros para que su cobertura alcance para comunicarse solo con su vecino más cercano y otro escenario con una densidad de nodos alta donde todos los nodos pueden comunicarse entre sí. Los resultados indicaron que la selección MAB es más efectivo en los dos escenarios, debido a que se repite menor cantidad de veces para seleccionar una ranura de forma correcta.

Pero en el agendamiento del *beacon* la selección de ranura es sólo una parte, también hay que afrontar las dificultades que se presentan debido a la presencia de nodos ciegos. Uno de estos casos puede ser cuando dos dispositivos ciegos entre si seleccionan la misma ranura y pueden enviar su solicitud al mismo tiempo al coordinador, presentándose una colisión, a lo que el coordinador responde enviando una notificación *broadcast* de colisión, por lo que los nodos entran en un tiempo de espera para enviar nuevamente la solicitud con la misma ranura seleccionada anteriormente. Todo esto genera un mayor retraso en la asignación y disminuye la tasa de éxito de asociación. Buscando mejorar este aspecto se propone lo siguiente.

Cuando se presente una colisión porque varios nodos envían su solicitud al mismo tiempo, se le responde solo a uno de los nodos, enviando la notificación de asignación en la ranura solicitada. Los demás nodos al no recibir ninguna notificación, actualiza su mapa de bits asumiendo que la ranura que solicitaron está ocupada y seleccionan una nueva.

Al realizar la simulación con las modificaciones propuestas, El nivel de asignaciones correctas disminuye. Esto es debido a que dos coordinadores distintos, pueden asignar la misma ranura *beacon* a dos nodos ciegos entre sí. Así estos dos nodos transmiten su trama *beacon* en la misma ranura, generando un mal funcionamiento en la red pues dispositivos que estén entre estos

dos nodos recibirán las dos tramas *beacon* generando una colisión. Por lo que los nodos tienen que desasignar la ranura y volver a seleccionar una nueva ranura, realizar la solicitud de asignación de ranura nuevamente. Todo esto se observó en los resultados pues por ejemplo para el método de selección MAB en una red de nodos dispersos usando la asignación como se plantea en el protocolo se obtuvo cerca de un 100% de asignaciones satisfactorias. Mientras que al utilizar esta primera propuesta el porcentaje de asignaciones con el método MAB en una red de nodos dispersos bajo hasta el 70%. Debido a este mal resultado de la primera propuesta se propone una segunda, en esta se limita que la asignación de ranura solo la pueda hacer el coordinador que transmitió la trama *beacon*. Así otro coordinador cercano no puede asignar ninguna ranura durante esa supertrama, evitando la doble asignación. Además, para agilizar el proceso de asignación se propone una modificación a la estructura de la supertrama, permitiendo que el proceso se realice de forma repetitiva. La nueva estructura se muestra en la Figura 17.

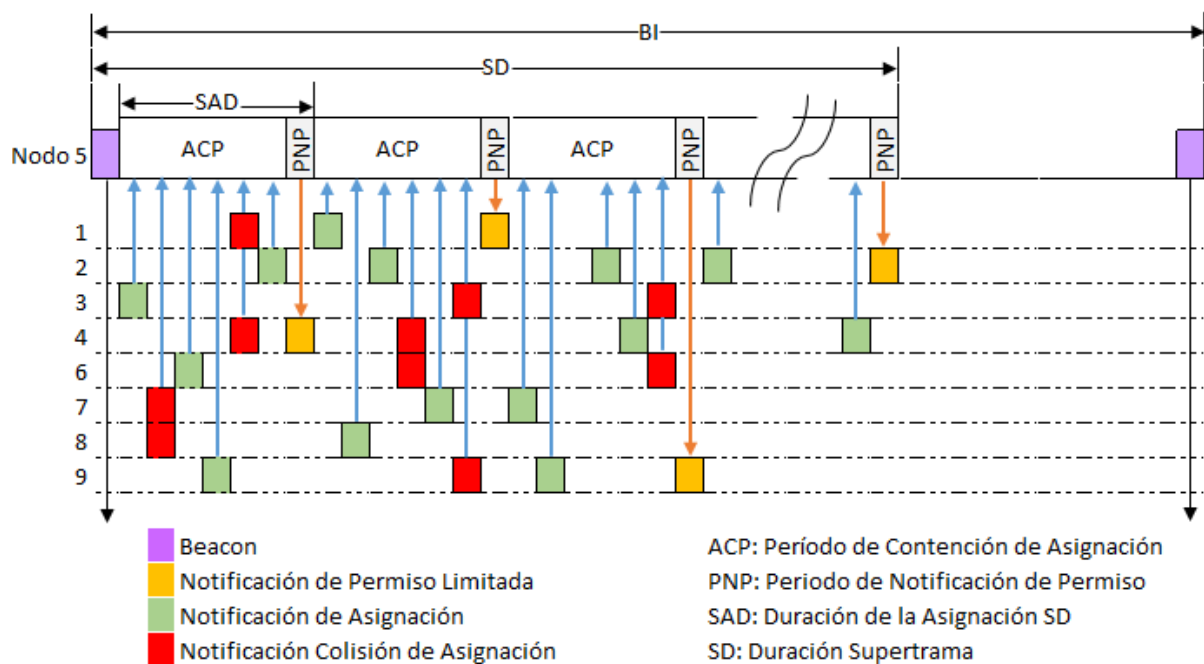


Figura 17. Proceso de asignación propuesto utilizando una nueva estructura de la supertrama.

La nueva estructura se compone de varios periodos de contención de asignación (ACP), y de igual número de períodos de notificación de permiso (PNP), cada par de periodos componen un periodo de asignación. El proceso de asignación de ranura *beacon* comienza después que el coordinador transmite su trama *beacon* donde está el mapa de bits de las ranuras disponibles. Cada nodo recibe el mapa de bits y selecciona una ranura usando MAB, y en el primer periodo ACP transmite la solicitud de asignación de ranura. El nodo espera el tiempo de duración de un periodo de asignación (SAD), si al finalizar el tiempo no recibe notificación de asociación, aumenta en uno el contador de número máximo de asignaciones posibles, actualiza el mapa de bits colocando la ranura seleccionada anteriormente como ocupada y selecciona una nueva ranura, y envía nuevamente la solicitud de asignación de ranura en el siguiente ACP. Este proceso se repite hasta que le llegue una notificación y asigne de forma correcta la ranura *beacon* solicitada o llegue al número máximo de asignaciones posibles y debe intentarlo nuevamente en la siguiente trama *beacon*. Este proceso puede comprenderse mejor con el diagrama mostrado en la Figura 18.

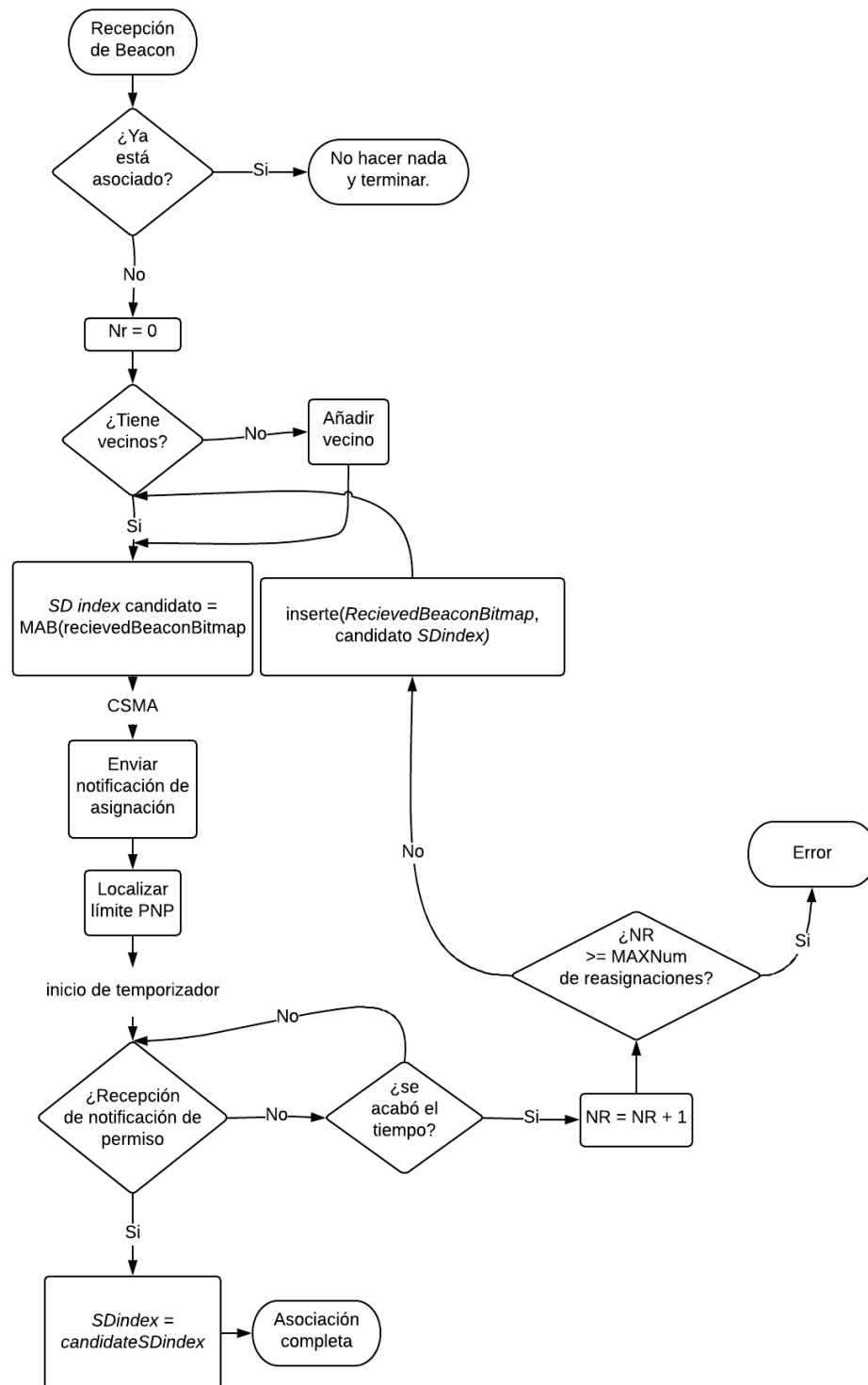
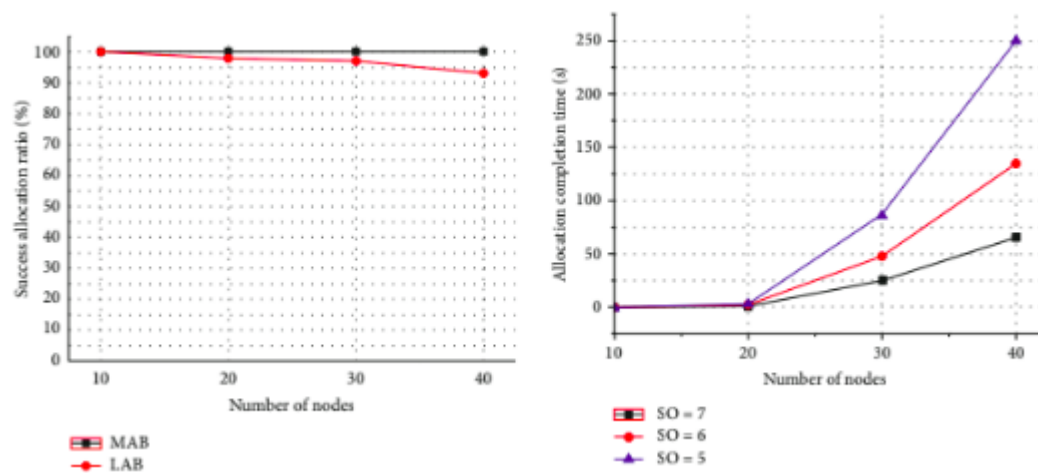


Figura 18. Algoritmo mejorado para agendamiento de ranuras *beacon* en DSME

Con el algoritmo propuesto de agendamiento de *beacon* y utilizando el MAB para selección de ranura se obtuvo un resultado del 100% de éxito en la asignación de ranuras *beacon*. Para verificar si la tasa de éxito disminuye al aumentar el número de nodos se realizaron simulaciones para una red de 10, 20, 30 y 40 nodos, midiendo también el tiempo que se demora en completar la asignación para diferente orden de supertrama (SO). En los resultados el método MAB, siguió manteniendo una tasa de éxito del 100% hasta con 40 nodos. Mientras que el tiempo que se tardó en completar la asignación de las ranuras *beacon* para una red de 40 nodos con un SO=7 fue de cerca de 70 segundos mientras que con un SO=5 fue de 250 segundos. Esto nos indica que en poco más de un minuto una red de 40 nodos quedó establecida. Estos resultados se pueden observar en la figura 19.



*Figura 19.* Tasa de éxito de asignación y tiempo en completar el proceso de asignación para redes de 10, 20, 30 y 40 nodos. Adaptado de “Un modelo para el agendamiento de la ranura *beacon* para los coordinadores de la red en modo DSME” (Hwang, K.-I., & Nam, S.-W. 2014).

Este trabajo de investigación abordó las principales dificultades que se presentan en el proceso de agendamiento de *beacon*, que es un proceso de gran importancia en las redes DSME.

Se pudo determinar que el método MAB para la selección de ranura es más eficiente que el método LAB y el aleatorio tanto en una red de nodos dispersos o nodos muy cercanos entre sí y se propuso un algoritmo que realiza el proceso de agendamiento de *beacon* de una forma más rápida al agregar al inicio de la supertrama una serie de periodos de asignación y de notificaciones que se repiten en la misma supertrama. Así se asignan varias ranuras *beacon* en la misma supertrama. También se disminuye la doble asignación pues el coordinador solo asigna una ranura en cada periodo de asignación, así a medida que van pasando periodos de asignación cada nodo va marcando como asignada la ranura correspondiente a ese ciclo hasta que se le asigne una en alguno de los periodos o llegue al máximo número de asignaciones y tenga que esperar hasta el siguiente intervalo de *beacon* para recibir el nuevo mapa de bits indicando las ranuras que todavía están disponibles y repite el proceso. En nuestra opinión este algoritmo propuesto junto con la modificación a la estructura de la supertrama podría llegar a incorporarse al protocolo en futuras revisiones, pues mejora un proceso esencial en DSME como es el agendamiento de *beacon* ya que al utilizar la nueva propuesta y el método MAB el porcentaje de asignaciones correctas se mantiene en el 100% tanto para una red de nodos dispersos como para una red con nodos muy cercanos entre sí.

#### **4.2 Un modelo específico para redes de sensores inalámbricos en topología estrella usando el protocolo IEEE 802.15.4e en modo DSME. (Sahoo *et al.*, 2017)**

El modo DSME planteado en el protocolo puede ser usado tanto en topologías tipo estrella como en tipo malla, Esta flexibilidad disminuye un poco el rendimiento, por ejemplo, el estándar define que el coordinador PAN solo usa la primera ranura *beacon* de la multisupertrama para

enviar su trama *beacon*. Pero en aplicaciones que usan una topología estrella, el coordinador PAN puede usar las demás ranuras *beacon* para transmitir la trama *beacon* y agilizar procesos que de lo contrario deberían esperar hasta la siguiente multisupertrama para iniciar. También hay efectos que no se presentan en una topología estrella, como por ejemplo puede haber nodos ciegos entre sí, pero no ciegos al coordinador por lo que varios procesos como el de evaluación de canal libre, el manejo de solicitudes o retransmisiones puede modificarse un poco para maximizar el rendimiento en una red de este tipo.

En este artículo se realizan 3 propuestas principales. La primera realiza un pequeño cambio en los espacios de tiempo de evaluación de canal libre (CCA), que en el estándar se ubican consecutivamente uno después del otro, por lo que un dispositivo que va a transmitir evalúa la disponibilidad del canal en estas dos ranuras, si detecta que alguna transmisión se está llevando a cabo, entra en un tiempo de espera aleatorio después del cual vuelve a evaluar la disponibilidad del canal para hacer la transmisión. Pero al estar las dos ranuras juntas no podrían identificar si la transmisión que se está haciendo es una trama de reconocimiento, que aparte de ser cortas son la parte final en una comunicación entre 2 dispositivos. por lo que el canal está próximo a quedar disponible. Para esto se plantea separar las dos ranuras CCA un espacio de tiempo igual a la duración de una trama de reconocimiento. Esto permite identificar cuando una transmisión de otro dispositivo está finalizando, así comenzar la transmisión inmediatamente después.

La segunda modificación permite que el coordinador transmita la trama *beacon* en diferentes canales establecidos a través de las diferentes ranuras de *beacon* en las supertramas establecidas. Esto permite hacer más eficiente el proceso de exploración de canal por parte de un dispositivo que desea asociarse a la red. El caso, por ejemplo, de una exploración pasiva, el dispositivo establecerá un canal y esperará una trama *beacon* del coordinador durante un tiempo, si no recibe

ninguna trama de datos cambiará el canal y repetirá el proceso, esto genera un consumo de energía que se desea reducir debido a las limitaciones de las WSNs. Con esta propuesta, si dispositivo desea unirse a la red, al realizar un escaneo pasivo establecerá un canal aleatorio y esperará una trama del coordinador, como el coordinador está enviando la trama en diferentes canales y en cada una de las ranuras *beacon* disponibles no solo en la primera de la multisupertrama, aumenta la probabilidad que el dispositivo reciba esta trama de datos en un intervalo *beacon*. Junto a la propuesta de transmitir la trama del coordinador en cada una de las ranuras *beacon* disponibles, también se propone distribuir a los diferentes nodos entre las supertramas disponibles. Así cada nodo sólo puede realizar solicitudes al coordinador en el periodo CAP de la supertrama a la que está asignado. Esto evita que muchos nodos queden aglomerados en un mismo periodo CAP y disminuye la probabilidad de que se presenten colisiones.

La tercera modificación tiene que ver con la forma en que se hacen las retransmisiones y debido a la fecha en que fue realizado este trabajo de investigación (antes de la publicación de la nueva revisión) hacen referencia a al uso de la trama de reconocimiento grupal GACK, que estaba vigente en la versión anterior del estándar (IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks 802.15.4e , 2012) y consistía en que el coordinador separaba dos ranuras en las cuales enviaba las tramas de reconocimiento a los dispositivos y si en la primera ranura(GACK1) el dispositivo no reciben reconocimiento, reenvía la información en las ranuras siguientes antes de la segunda ranura (GACK2). En este trabajo de investigación proponen para las retransmisiones habilitar el uso de las primeras ranuras del periodo CAP siguiente a la supertrama anterior, en la que falló la transmisión. Para indicar que ranuras fallaron en la transmisión se sugiere agregar un total de 7 bits a la trama *beacon*, los bits funcionan a manera

de máscara para las ranuras GTS, indicando con un 1 si fue transmitida correctamente o con un 0 en caso de falla, el octavo bit sirve para habilitar el uso de las ranuras del periodo CAP para la retransmisión.

Para evaluar qué tanto afecta el desempeño de la red los cambios propuestos, se evaluaron parámetros como la probabilidad de transmisión exitosa, confiabilidad, retraso punto a punto y consumo de energía, comparándolos con el estándar para diferente número de nodos. También se evalúa el comportamiento de cada uno de estos parámetros al variar el orden de *beacon* y aumentar el número de nodos.

Para todos los parámetros lo más importante que se logró observar fue que dependen de la correcta selección de BO, pues si la cantidad de nodos es grande y se selecciona un BO muy bajo, la multisupertrama resultante dispondrá de muy pocas ranuras que no serán suficientes. Esto se puede observar en la Figura 20. que muestra cómo varía la probabilidad de éxito de la transmisión al aumentar el número de nodos para diferente BO.

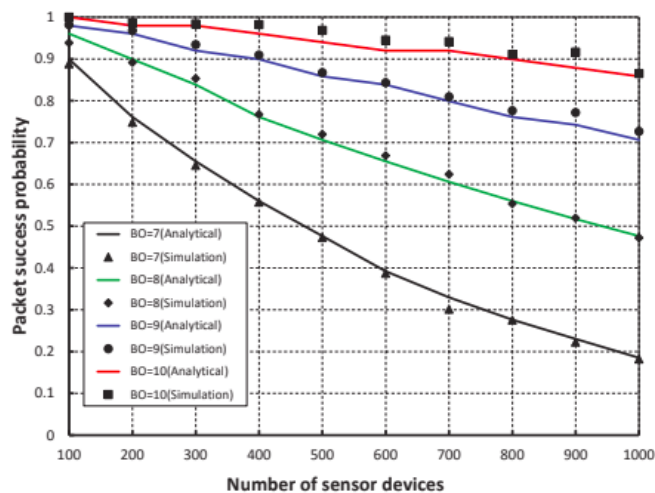


Figura 20. Probabilidad de transmisión exitosa para diferente BO al aumentar el número de nodos. Adaptado de “Un modelo para redes de sensores inalámbricos en topología estrella

usando el protocolo IEEE 802.15.4e en modo DSME” (Sahoo, P. K., Pattanaik, S. R., & Wu, S.-L. 2017)

Al comparar los resultados de cada uno de los parámetros evaluados, entre el estándar básico y las modificaciones propuestas. El método propuesto siempre presentó mejores resultados, esto debido a que se presenta menor cantidad de colisiones al asignar cada dispositivo a un único periodo CAP. También porque se dispone de mayor cantidad de ranuras GTS al no asignar una segunda para retransmisión, sino que cuando sea necesaria una retransmisión se habilite el uso de las primeras ranuras del periodo CAP. En la Figura 21 se muestra la comparación para el nivel de confiabilidad de la red.

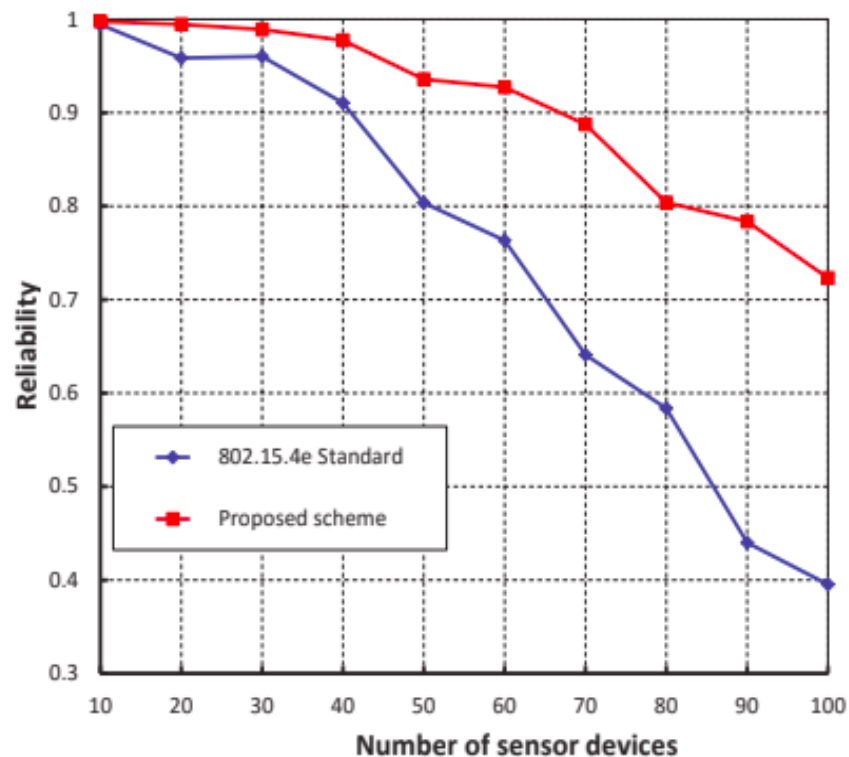


Figura 21. Comparación de la confiabilidad de la red entre el modelo propuesto y el estándar.

Adaptado de “Un modelo para redes de sensores inalámbricos en topología estrella usando el

protocolo IEEE 802.15.4e en modo DSME” (Sahoo, P. K., Pattanaik, S. R., & Wu, S.-L. 2017)

En este trabajo de investigación también se propuso un modelo analítico basado en cadenas de markov, el cual se comprobó en las simulaciones, en la figura 21 se puede observar una comparación entre los resultados obtenidos por el modelo (línea continua) con los del simulador (línea punteada) mostrando que son resultados muy similares.

Este trabajo demostró que a pesar que el modo de trabajo DSME presenta buenos resultados, bajo ciertas condiciones de trabajo como una topología estrella, se pueden hacer unas modificaciones maximizando el rendimiento de la red.

**4.3 Un algoritmo eficiente para el agendamiento de ranuras en redes que presenten movilidad en sus nodos, basado en el modo DSME.** (Lee *et al.*, 2016)

Este artículo se enfoca en determinar las ventajas y desventajas que puede ofrecer el protocolo IEEE 802.15.4e en las fábricas inteligentes. La principal característica que presentan estas fábricas es la movilidad que tienen sus equipos. Para dar mayor soporte a la movilidad se proponen unos ajustes en el agendamiento de ranuras y se evalúa si lo propuesto mejora el rendimiento de la red. Para esto se compara con el protocolo en aspectos como el tiempo que tardó la red en transmitir cierta cantidad de paquetes, el consumo de energía y velocidad de la red.

El proceso de agendamiento establecido en el protocolo para el modo DSME inicia cuando el coordinador PAN envía en modo *broadcast* un *beacon* con los parámetros que establecen la red, un nodo que busca asociarse como coordinador lo recibe y actualiza su tabla de nodos vecinos.

Seguidamente envía una solicitud de asociación y agendamiento de *beacon* para funcionar como coordinador al nodo vecino, que este caso es el coordinador PAN, después de recibir la respuesta a la solicitud de asociación y agendamiento por parte del coordinador PAN puede enviar su trama *beacon* en la ranura asignada, la cual contiene un campo que indica la disponibilidad para asociar dispositivos. Un dispositivo cualquiera que se encuentre dentro del rango, recibe este *beacon* y el dispositivo puede realizar el proceso de asociación con este nuevo coordinador. Después puede iniciar el proceso de asignación de una ranura GTS de ser necesario.

En el algoritmo de agendamiento distribuido propuesto el dispositivo es el que inicia el proceso transmitiendo una trama *broadcast* de información. El coordinador recibe esta información e inicia un ciclo con el coordinador PAN. En este ciclo El coordinador y coordinador PAN actualizan la información de la red y asignan las ranuras del nuevo dispositivo de tal forma que no exista conflictos con los demás nodos. Cuando ya se establecen los valores adecuados, se envía la información al nuevo dispositivo. Este proceso se puede ver más claro en el diagrama de la Figura 22.

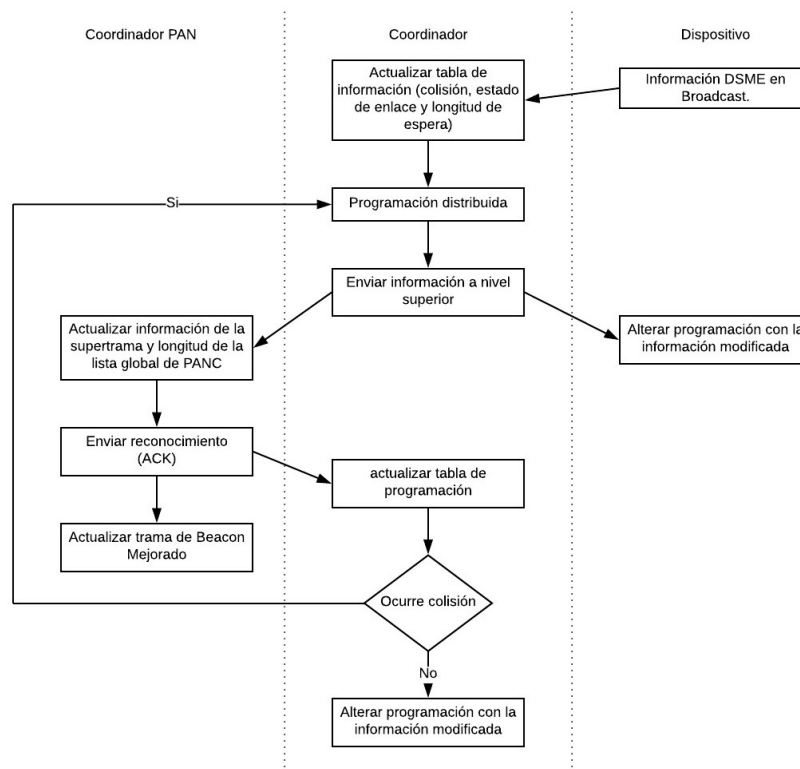


Figura 22. Proceso de agendamiento distribuido

En la parte de simulaciones antes de comprobar el nuevo algoritmo de agendamiento para DSME, se realizaron unas simulaciones para comprobar el algoritmo CSMA/CA del estándar del 2011, con los modos de funcionamiento DSME y TSCH del estándar del 2016. Tanto para una red simétrica como para una donde los nodos se ubican aleatoriamente. los resultados de velocidad y retardo de transmisión punto a punto demostraron que los modos agregados en la nueva revisión mejoran considerablemente el rendimiento de la red en estos aspectos como se muestra en la Figura 23.

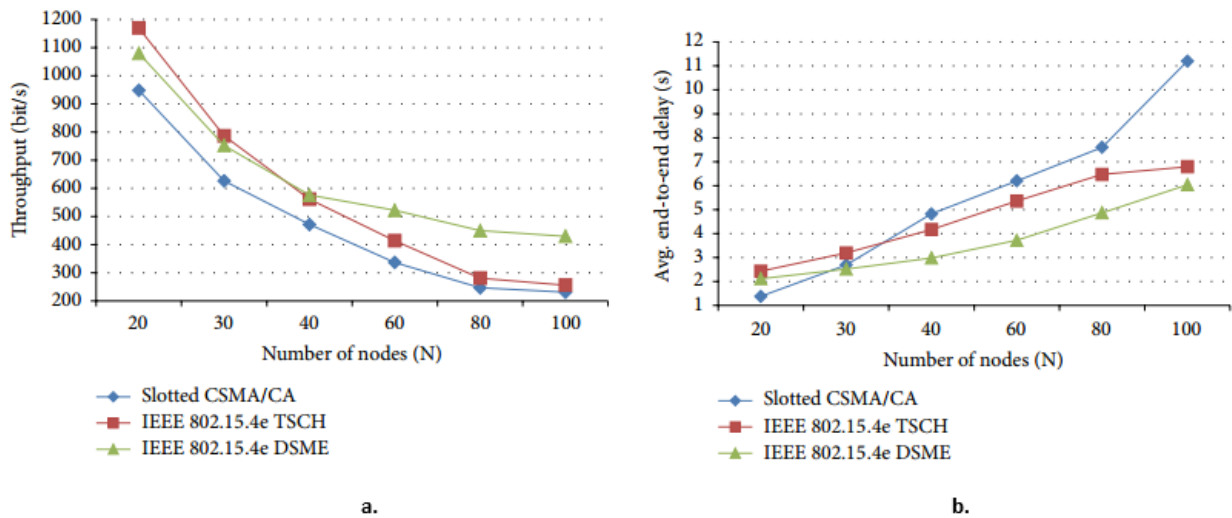


Figura 23. Resultados para una red de nodos ubicados aleatoriamente. A) rendimiento. B) retardo extremo-extremo. Adaptado de “Un algoritmo de agendamiento distribuido, eficiente para soporte de movilidad en IEEE 802.15.4e para redes de sensores inalámbricos industriales basado en DSME” (Lee, Y.-S., & Chung, S.-H. 2016)

En la siguiente simulación se evaluó la velocidad de la red y se compararon el CSMA/CA del 2011, los modos DSME y TSCH del 2016 y el algoritmo propuesto. También se le agregó una movilidad de 1m/s al 30% de los nodos y al 50% de los nodos. Los resultados indicaron que el algoritmo propuesto presenta una velocidad muy similar a los modos DSME y TSCH cuando los nodos no se mueven como se ve en la figura 24a. Pero a medida que se les agrega movilidad a los nodos la velocidad de la red disminuye. Así en una red de 20 nodos el *throughput* pasa de 1600 bits/s sin movilidad a 1300 bits/s con una movilidad del 50% de los nodos, como se ve en la figura 24a y 24c. A pesar de eso el modo DSME y la mejora agregada al DSME presentan una menor disminución de la velocidad de la red en comparación al modo TSCH, sobre todo cuando el número de nodos es alto.

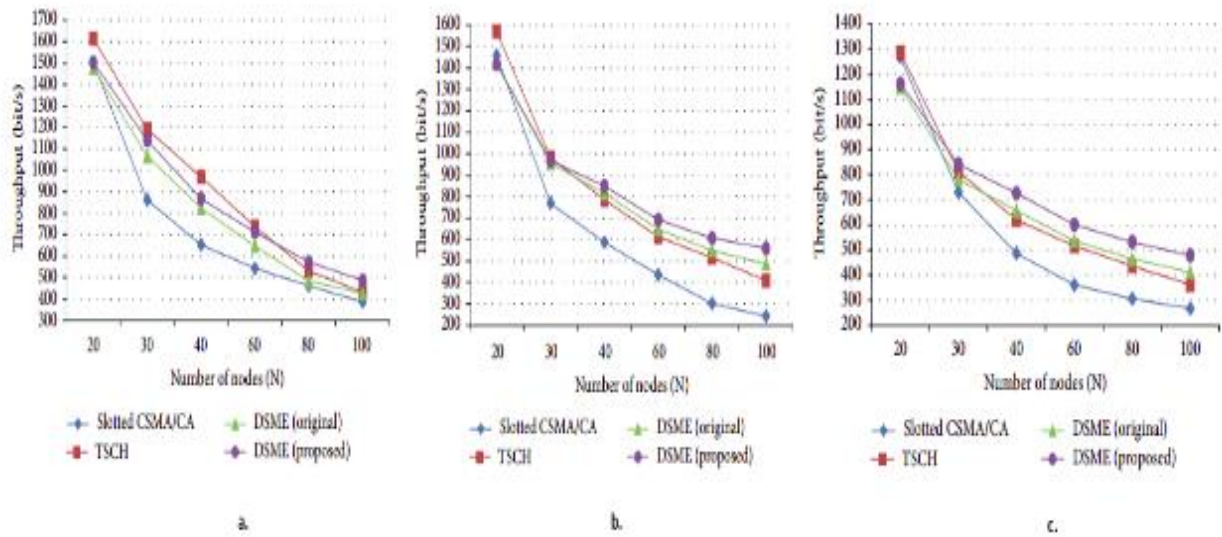


Figura 24. Velocidad de la red A) sin movilidad. B) movilidad del 30% de los nodos. C) Movilidad del 50% de los nodos. Adaptado de “Un algoritmo de agendamiento distribuido, eficiente para soporte de movilidad en IEEE 802.15.4e para redes de sensores inalámbricos industriales basado en DSME” (Lee, Y.-S., & Chung, S.-H. 2016)

Un aspecto que se evaluó fue el tiempo que se tardó la red en transmitir 4000 paquetes. Los resultados se ven en la figura 25a. y muestran que usando el algoritmo propuesto para DSME la red se tarda alrededor de 210 segundos en transmitir los 4000 paquetes mientras que al usar el modo TSCH la red tardó un poco más de 220 segundos lo cual no es una diferencia significativa por lo que en este aspecto tanto la propuesta como el modo TSCH se comportan de forma similar. También se evaluó el consumo de energía. En este aspecto el modo TSCH presenta menor consumo que el modo DSME, pero con el algoritmo propuesto para DSME se logró reducir en un 25% el consumo de energía del modo DSME. Logrando que consuma menos energía que el modo TSCH. Estos resultados se observan en la Figura 25b.

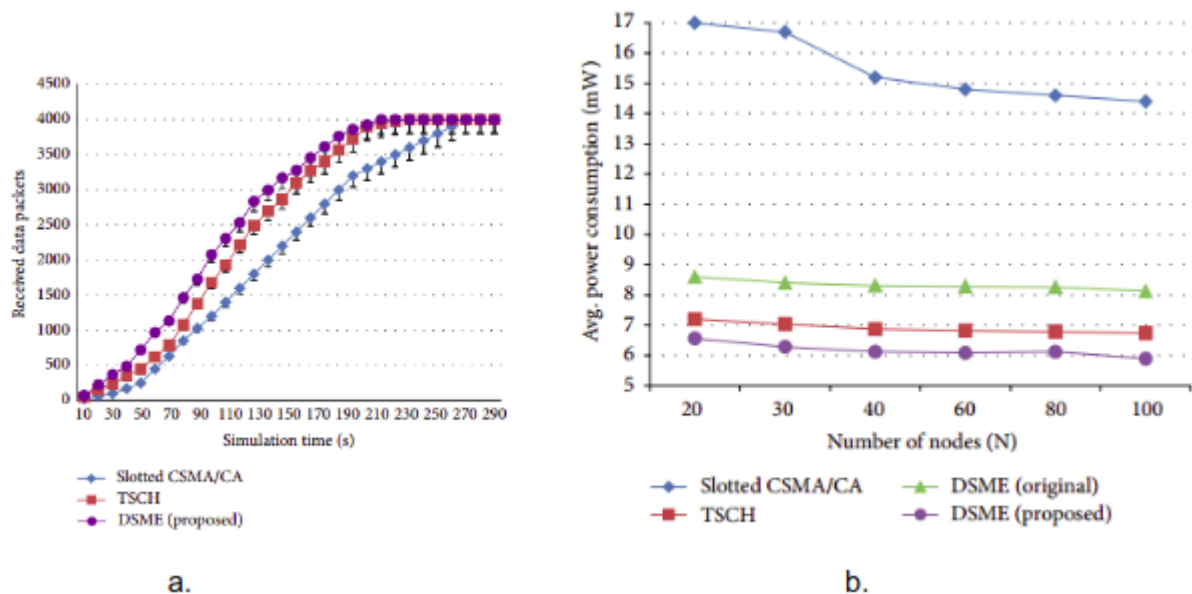


Figura 25. A) Tiempo acumulado de colección de paquetes. B) Consumo de energía. Adaptado de “Un algoritmo de agendamiento distribuido, eficiente para soporte de movilidad en IEEE 802.15.4e para redes de sensores inalámbricos industriales basado en DSME” (Lee, Y.-S., & Chung, S.-H. 2016)

Las mejoras obtenidas al utilizar el algoritmo propuesto se deben a que la mayor parte del proceso de agendamiento es realizado entre el coordinador y el coordinador PAN, ya que evitan que el dispositivo tenga que repetir el proceso desde el inicio si algo falla. Pues después que el coordinador recibe la solicitud del dispositivo. El coordinador y el coordinador PAN entran en un bucle para agendar la ranura al nuevo dispositivo de forma tal que la única forma para salir del bucle es cuando entre el coordinador y el coordinador PAN encuentran una ranura en la que no se presente colisión. Así el nuevo dispositivo es en el primer intento recibe la respuesta con la asignación de la ranura adecuada y concluya el proceso de agendamiento satisfactoriamente.

#### **4.4 Evaluacion del IEEE 802.15.4e DSME y TSCH mediante simulación en escenarios de automatización de procesos.** (Alderisi *et al.*, 2015)

En este trabajo de investigación se busca realizar una comparación entre los modos TSCH y DSME en un entorno industrial de automatización de procesos evaluando los parámetros de fiabilidad, retardo máximo y escalabilidad.

Para evaluar la fiabilidad y retardo máximo se plantea un escenario compuesto de 10 nodos y el coordinador PAN. Estos nodos censan variables como presión, temperatura, torque, flujo y proximidad. Cada tipo de sensor requiere 25, 40 o 50 bytes para representar la información que transmiten como carga útil. También cada tipo de sensor tiene un periodo de envío de datos, para el más rápido es de 150 milisegundos y el más lento es de 5 segundos.

Para medir la fiabilidad se utiliza el parámetro de relación de pérdida de paquetes(PLR), que representa el porcentaje de mensajes que no fueron transmitidos de forma correcta. Para medir el retardo se utiliza el parámetro de retardo de extremo a extremo (E2ED) que es el tiempo que tarda un mensaje en ir de su origen a su destino. Para simular el ambiente, se utilizó el modelo de propagación log-normal *shadowing*. Este modelo además de tener en cuenta la distancia, agrega un término llamado exponente de pérdida de trayecto que dependiendo del valor que tome puede representar una zona abierta, una con muchas interferencias de señales inalámbricas o un laboratorio de comunicaciones con muy pocas pérdidas. Para una fábrica común este valor varía entre 2 y 3, por lo que se realizaron tres simulaciones con valores de exponente de pérdida de trayecto de 2.4, 2.77 y 3.44.

Con el fin de poder realizar una buena comparación entre los modos TSCH y DSME se utilizaron estructuras de acceso al medio que tuvieran periodos similares. Para esto se escogieron

valores de  $BO=4$ ,  $MO=3$  y  $SO=2$ , en DSME y para TSCH se seleccionó una estructura de 20 ranuras donde cada ranura tiene una duración de 10 ms. Así el periodo de TSCH es de 200 ms y el de DSME es de 122.88 ms. También se utiliza la reducción del periodo CAP en el modo DSME para que la estructura dispusiera de mayor cantidad de ranuras GTS para la transmisión de información. Como este estudio se realizó basándose en la versión anterior del estándar también se habilitó la función de reconocimiento en grupo, la cual no está presente en la última revisión.

Los resultados obtenidos para el porcentaje de mensajes perdidos se muestran en la tabla 2. Estos indican una pérdida de datos muy baja, por ejemplo, en una transmisión de 100000 paquetes y con un exponente de pérdida de trayecto de 3.44 en el modo DSME solo se perdieron 10 paquetes mientras que en el modo TSCH solo se pierden 5 paquetes. Esto nos muestra la alta fiabilidad que presentan los dos modos de funcionamiento. En la medición de retardo de extremo a extremo indicaron que el modo TSCH presentaba menor retraso que el DSME, así por ejemplo el retardo máximo en TSCH fue de 187 ms y en DSME el retardo máximo fue de 253 ms. La principal razón por la que el modo DSME presenta un mayor retardo de extremo a extremo se debe principalmente a la estructura multisupertrama fijo y como también se habilitó el grupo de reconocimiento, a cada nodo se le asignan dos ranuras GTS en vez de una sola, esta segunda ranura en muchos casos no es utilizada y no permite que otros dispositivos la usen introduciendo un retardo más alto.

Tabla 2.

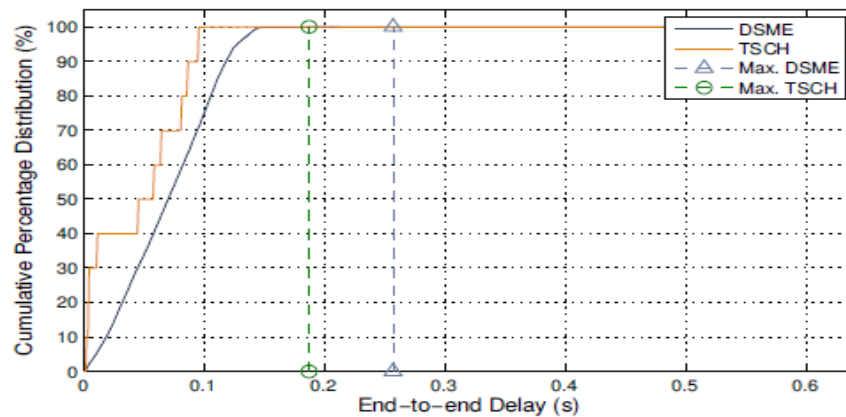
*Resultados del porcentaje de mensajes perdidos para los modos TSCH y DSME para distintos valores del exponente de pérdida de trayecto.*

Exponente de pérdida de trayecto	PLR DSME	PLR TSCH
2.4	0%	0%
2.77	0.005%	0%
3.44	0.01%	0.005%

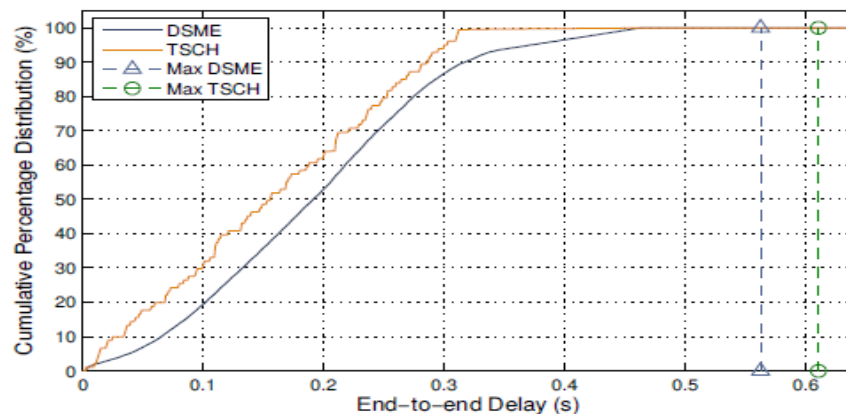
Para determinar el comportamiento que presenta cada uno de los dos modos respecto a la escalabilidad se plantea un escenario donde los sensores envían mensajes de 70 bytes periódicamente cada 500 ms. Se realizaron simulaciones para 10, 30 y 50 nodos, en DSME se utilizaron los mismos parámetros de BO, MO y SO que en la simulación de fiabilidad para los casos de 10 y 30 nodos, pero para 50 nodos se utilizaron los valores de BO=5, MO=4, y SO=2, lo cual aumenta a 4 supertramas en cada multisupertrama y el periodo del intervalo *beacon* en este caso es de 491.52 ms. Mientras que para el modo TSCH la duración de ranura se mantiene en 10 ms, pero para 10 nodos se usan 10 ranuras por supertrama, para 30 nodos se usan 30 ranuras por supertrama y para 50 nodos se usan 50 ranuras por supertrama, teniendo periodos de 100 ms, 300 ms y 500 ms.

Debido a que los mensajes que serán transmitidos tienen un periodo de 500 ms en el caso de 50 nodos las estructuras utilizadas tanto por DSME y TSCH tienen un periodo igual o muy cercano al periodo de los mensajes a transmitir no se permiten las retransmisiones en estos casos.

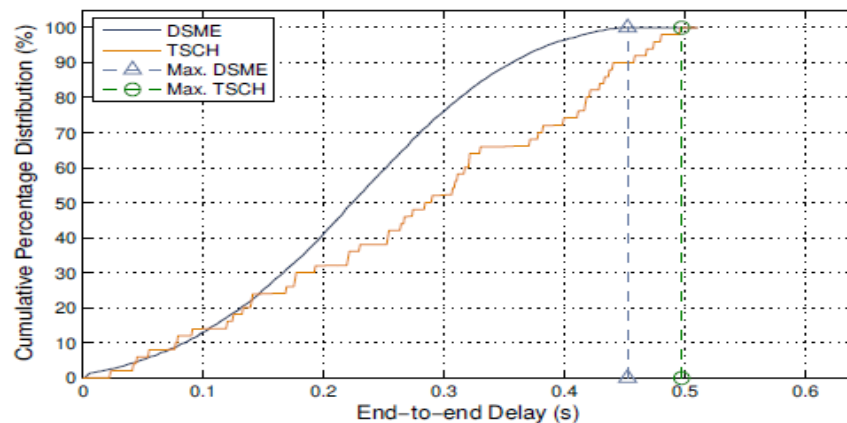
En los tres casos se mide el retardo de extremo a extremo y como se observa en la figura 26 en el caso de 10 nodos el modo TSCH presenta un retardo menor que en DSME mientras que en 30 nodos los dos modos presentan retardos muy similares y ya para cuando se presentan 50 nodos el modo DSME presenta un retardo menor. En el artículo concluyen que esto se debe a que la supertrama del modo TSCH se hace más grande que la estructura rígida de la multisupertrama del modo DSME, en el que el número de supertramas en multisupertramas crece como una potencia de 2 y el número de ranuras en una supertrama es igual a 16.



26a. Retardo extremo a extremo con 10 nodos



26b. Retardo extremo a extremo con 30 nodos



26c.Retardo extremo a extremo con 50 nodos

*Figura 26.* Resultados de retardo de extremo a extremo al aumentar el número de nodos de la red

Después de analizar este trabajo de investigación se determinó que el estudio que se realizó respecto a la escalabilidad llegó a conclusiones que teóricamente son correctas pero que en ciertas situaciones puede que presente un comportamiento distinto. Por ejemplo, en el caso de una red que opera bajo DSME, con 30 nodos tiene unos valores establecidos de BO, MO y SO. Pero el número de nodos puede aumentar y llegar a 50 no podemos cambiar la estructura de la multisupertrama sin reiniciar toda la red. Sería un buen estudio comparar en 50 nodos el retardo que presenta la red utilizando la misma estructura utilizada para 30 nodos en DSME y compararla con TSCH que si puede adaptarse sin realizar un reinicio de la red. También sería interesante determinar el número de nodos donde la estructura de multisupertrama planteada para 30 nodos, se empieza a saturar y empieza a generar menor rendimiento que una red de TSCH.

#### **4.5 Mejora en la formación de la red en IEEE 802.15.4e DSME (Vallati *et al.*, 2017)**

En este trabajo, se realizó un análisis del rendimiento del protocolo IEEE 802.15.4e en modalidad DSME centrándose en su fase inicial de la formación de la red, con este análisis se buscó poder establecer unas directrices sobre los parámetros, para evitar establecerse largos tiempos de inicio de la red. En particular, el análisis se enfocó en cómo mejorar la eficiencia en las operaciones de la etapa de periodo de acceso contenido (CAP) para garantizar bajas demoras en la asignación de ranuras DSME-GTS y llevar al mínimo el tamaño de CAP para reducir el consumo de energía.

Con el fin de obtenerse unos resultados que reflejen un entorno real, se implementó el sistema operativo Contiki para crear el escenario experimental, Contiki es un sistema de código abierto que se desarrolló para uso en pequeños sistemas como lo son microcontroladores y nodos de redes de sensores, entre otros, además que Contiki tiene la ventaja que no requiere muchos recursos para funcionar correctamente, Contiki además posee su propio emulador para WSANs llamado Cooja que permite reproducir el comportamiento del hardware real. Para la simulación se estableció una topología tipo malla uniforme con una cantidad de nodos que varía desde 4 hasta 49, inicialmente todos los nodos se activan simultáneamente y cada nodo genera un flujo de datos hacia un receptor aleatorio, agregando que en una multisupertrama cada nodo envía un paquete de datos con el mayor tamaño de datos permitido según la norma que son de 127 bytes, con esto, se establece un escenario con una gran demanda de tráfico, los parámetros establecidos en la simulación se observan en la tabla 3.

Tabla 3.

*Parámetros utilizados para la emulación de la red.*

Parámetro	Valor
Velocidad de bits	250 kbps
Duración símbolo	4 bits
Tamaño del paquete de datos (carga útil)	140 (127) bytes
Tamaño reconocimiento (ACK)	11 bytes
<i>Beacon</i> Order (BO)	9
Multisuperframe Order (MO)	9
Superframe Order (SO)	5
Consumo de potencia en estado RX $P_{RX}$	56.4 mW
Consumo de potencia en estado TX $P_{TX}$	52.2 mW
Consumo de potencia en estado libre(idle) $P_{idle}$	1.28 mW

Como primera prueba se evaluó el impacto en la formación de la red al tener habilitado la reducción de CAP, a pesar que al tener habilitada la reducción de CAP lleva a reducir en gran medida el consumo de energía cuando la red se encuentra ya establecida, se observó que al iniciarse la red esta configuración aumenta el tiempo de establecimiento de la misma, esto se ve evidenciado en el proceso de asignación de ranuras DSME-GTS debido a que como para la asignación requiere un intercambio de paquetes a través del protocolo CSMA-CA, con tantos nodos compitiendo por asignar ranuras, muchos de estos paquetes de datos se descartan ya que exceden el número máximo de etapas de restitución y/o el número máximo de retransmisiones.

Se observó también que durante el proceso de asignación, al utilizarse el algoritmo CSMA-CA, antes de enviarse un paquete de datos, un nodo espera un tiempo de finalización aleatorio (*backoff time*), durante este tiempo la mayoría de las implementaciones del algoritmo entran en un estado de inactividad para ahorrar energía, pero también durante ese tiempo las otras transmisiones entrantes son descartadas haciendo que el proceso sea más largo. Para reducir estos problemas se proponen dos alternativas.

La primera es hacer un ajuste al establecer los parámetros del algoritmo CSMA-CA, este ajuste consiste en el tiempo de intercambio de mensajes de solicitud-respuesta que sucede en una etapa de CAP, este tiempo se ve definido por el parámetro *macMaxFrameTotalWaitTime* que es el tiempo que se espera para que llegue una respuesta desde que se envía una solicitud, la consideración que se hizo en el artículo es que la transmisiones de solicitud también se deberían enviar dentro de este mismo margen de tiempo, luego así, todas las solicitudes de asignación se completarán en un solo periodo de CAP. Basándose en esto, se deduce que la duración de la duración del periodo CAP debe cumplir que es igual a  $2 \times \text{macMaxFrameTotalWaitTime}$ . con esta ecuación se puede calcular el valor de los parámetros que definen el tiempo de CAP que cumpla con esta condición.

La segunda propuesta se concentra en resolver el problema de inactividad durante el tiempo de finalización aleatorio, para esto se hace unas modificaciones en el comportamiento de los nodos, estableciendo un *active backoff time* (tiempo de finalización activo), que permite la recepción de paquetes de datos durante estos tiempos de inactividad, esto quiere decir que sí por ejemplo un nodo A envía un paquete de datos a un nodo B y el nodo B está en un tiempo de finalización aleatorio, este recibirá el paquete, lo almacenará en un buffer temporal y lo analiza cuando termine este tiempo de finalización para luego mandar su respectiva respuesta,

igualmente sucedería en el caso contrario en el que el nodo B envía paquetes de datos al nodo A. si no tuviera habilitado el tiempo de finalización activo, el nodo A tendría que iniciar otra vez el proceso de transmisión de paquetes de datos hasta que este llegue a nodo B, en la figura 27 se puede ver de manera más clara este ejemplo.

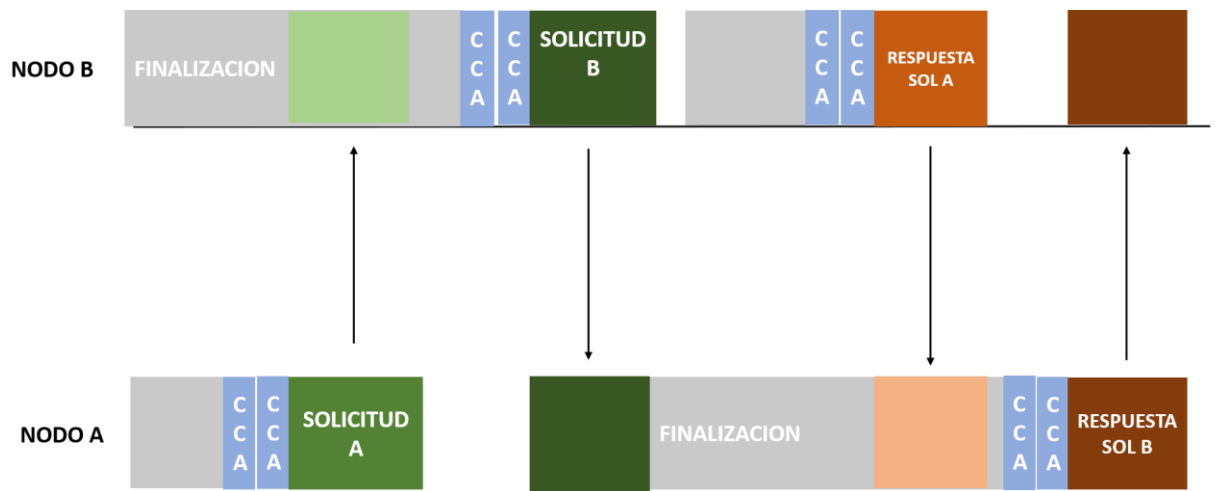


Figura 27. Procedimiento transmisión de datos con tiempo finalización activo.

Implementando estas dos mejoras, se logró reducir la probabilidad de colisión, se aumentó la recepción de los nodos y finalmente se obtuvo en la simulación una reducción en el tiempo de establecimiento de la red en hasta un 60%. Este artículo es bastante interesante ya que abarca un proceso que sucede durante la formación de la red, como lo es la asignación de ranuras GTS viendo cómo afecta el consumo de energía y tiempo de establecimiento, es destacable el análisis realizado sobre el impacto negativo que puede generar un proceso como la reducción de CAP en el proceso de asignación de ranuras GTS al formarse la red, además de observar que las propuestas de mejora dadas no son cambios tan drásticos y aun así generan una mejoría considerable en lo que proponen mejorar.

## 5. Conclusiones, Oportunidades y Retos

Con los nuevos modos de comportamiento de la subcapa MAC planteados en la enmienda IEEE 802.15.4e, se dispone de diferentes opciones de organización y manejo de datos que se ajustan de manera específica a necesidades, escenarios o aplicaciones puntuales, haciendo más eficiente el trabajo de comunicación en diferentes entornos (ver sección 2.1). En el caso específico del modo DSME, en el cual se centra este trabajo de investigación, se ajusta muy bien a entornos de automatización industrial, pues presenta entre otras características, una alta fiabilidad en la transmisión de datos; esto gracias a las ranuras GTS, las cuales permiten que dos dispositivos tengan una ranura asignada y que solo ellos puedan transmitir en ese instante, evitando así colisiones o interferencias con otros dispositivos.

Como se observa en la figura 24, el modo TSCH presenta tiempos de retardo con grandes fluctuaciones mientras se están llevando a cabo transmisiones desde los nodos en la red, mientras que los tiempos de retardo en DSME varían siguiendo una curva suave sin presentar fluctuaciones. Esto se debe a que la estructura de la multisupertrama ya está predefinida, permitiendo así tiempos de transmisión predeterminados, mientras que la estructura de las tramas de datos en TSCH tienden a ser más flexibles generando estos cambios abruptos en los retardos de las transmisiones.

Los recientes trabajos (ver sección 3.5) han encontrado e intentado reducir una dificultad que presenta el modo DSME, la cual se encuentra en el proceso de establecimiento de red. Se ha comprobado (sección 3.4) que el modo DSME responde mejor a la hora de transmitir frente al modo TSCH cuando se tiene un gran número de nodos asociados a la red, pero presenta

problemas en el momento de establecerse dicha red debido a que tomara más tiempo el realizar procesos como la asociación y asignación de dispositivos, pues estos procesos se realizan en el periodo de CAP en donde se tiene un único canal de comunicación. Además, se generan colisiones, llevando a que muchos de los procesos no se puedan realizar en el primer intento y tenga que repetirse una y otra vez hasta lograr concluir satisfactoriamente o esperar hasta la siguiente multisupertrama. Esto agrega una mayor demora en el establecimiento de la red además de un mayor consumo de energía. También se ha observado que procesos como la reducción de CAP que establece que el periodo de CAP solo esté presente en la primera supertrama una mejora del desempeño de la red cuando se encuentra establecida, pero causa un efecto contrario en el momento de establecerse la misma debido a que solo se dispone de un único periodo CAP en un intervalo *beacon* para realizar todos los procesos.

Un aspecto importante en las redes sincronizadas por *beacons*, es la información que contiene el *beacon* y en el modo DSME al usarse *beacons* mejorados permite un mejor aprovechamiento de los bits, pues agrupa la información relevante de la red en elementos de información. Estos varían su longitud de acuerdo a la información que contengan y solo se agregan a la trama *beacon* cuando sean necesarios haciendo más flexible la trama *beacon* y se vaya adaptando según las circunstancias.

Como toda tecnología está en continuo desarrollo y expansión, es correcto suponer que los sistemas de redes de sensores seguirán creciendo, expandiéndose y tornándose más complejos. Se tienen ciertos escenarios a los que el modo DSME debe enfrentarse, como lo son:

- La cantidad máxima de dispositivos (coordinador PAN, coordinadores y RFD) que teóricamente puede soportar una red es de 16384, pero si se intenta implementar en la vida real una red de este tamaño se tendrán intervalos *beacon* con duraciones de hasta

- 4 minutos. Lo que implicaría envío de datos muy lentos y pérdidas de datos en retransmisiones, haciendo que una red incluso no tan grande sea ineficiente, además de costosa en cuanto a implementos utilizados y una gran dificultad a la hora de montar una red tan grande.
- Si se establece una red en modo DSME para una cantidad definidas de nodos y en algún momento esta cantidad de nodos varía (aumenta o disminuye), la red seguirá definida para dicha cantidad de nodos fija, lo que hará que la misma se haga menos eficiente tanto por el uso innecesario de ranuras como por falta de estas, y si para corregir esto, se deseara modificar los parámetros que definen la estructura de la supertrama, sería necesario reiniciar la red, implicando realizar nuevas asociaciones, asignaciones de ranuras GTS, escaneos y demás procesos, lo que conlleva un gasto de tiempo mayor, una posible pérdida de datos e información y una consumo mayor de energía.
  - Como el estándar IEEE 802.15.4e todavía se encuentra en construcción, por lo que se encuentra abierto a cambios y posibilidades de exploración a futuras mejoras. A pesar de esto es cierto afirmar que este estándar llegará en algún punto a un tope, en el que posiblemente se exploren híbridos o tomar algunas ideas del modo DSME para la creación de un nuevo o nuevos modos de funcionamiento de la subcapa MAC. Tal vez más complejos y más adaptables.

Las oportunidades que identificamos en este trabajo de grado es que OpenDSME está implementando actualmente el protocolo IEEE 802.15.4e en la plataforma de hardware “NODO ABIERTO M3” basado en la arquitectura ARM; la idea es lograr implementar el protocolo en el

microcontrolador basado en RISK V desarrollado por el grupo OnCHIP, como una alternativa de modelo de comunicación inalámbrica a nivel de la capa de acceso al medio; otra oportunidad es realizar implementaciones en proyectos de escuela utilizando este protocolo y no soluciones de código cerrado como ZIGBEE, permitiendo que el estudiante entienda el funcionamiento de la capa de enlace y le sea viable la posibilidad de realizar ajustes según sus requerimientos.

Los retos que nos planteamos después de concluir este proyecto de grado es que observando el ejemplo simulado en el este trabajo, el dispositivo 8 (host 7) no logró conectarse debido a que no se le asignó un coordinador cerca, esto nos muestra que se pueden mejorar aspectos en la construcción de la red, por lo cual se debe determinar qué modelo de capa de red se adapta mejor a este tipo de redes y qué información puede agregarse desde la capa de acceso al medio para que junto a las capas superiores, se logre construir una red más óptima y otro reto es que el estándar IEEE 802.15.4e se encuentra aún en construcción, esto implica que está abierto a posibles cambios y modificaciones, y viendo cómo la tecnología está en continuo desarrollo y expansión, es correcto suponer que el modo DSME en un futuro llegará a un tope en el que no sea suficiente para el tráfico de información, por esto se deberán considerar futuras modificaciones y creación de híbridos DSME con otros modos más adaptables.

### Referencias Bibliográficas

- Alderisi, G., Patti, G., Mirabella, O., & Lo Bello, L. (2015). Simulative assessments of the IEEE 802.15.4e DSME and TSCH in realistic process automation scenarios. In *2015 IEEE 13th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*.  
<https://doi.org/10.1109/indin.2015.7281863>
- De Guglielmo, D., Brienza, S., & Anastasi, G. (2016). IEEE 802.15.4e: A survey. *Computer Communications*, 88, 1–24.
- Hwang, K.-I., & Nam, S.-W. (2014). Analysis and Enhancement of IEEE 802.15.4e DSME Beacon Scheduling Model. *Journal of Applied Mathematics*, 2014, 1–15.
- IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks 802.15.4e-(2012) —Part15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LRWPANs) Amendment 1: MAC Sublayer, IEEE Standards Association,2012.
- LAN/MAN Standards Committee of the IEEE Computer Society. (2015). IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks. Revision of IEEE Std 802.15.4-2012.
- Lee, Y.-S., & Chung, S.-H. (2016). An Efficient Distributed Scheduling Algorithm for Mobility Support in IEEE 802.15.4e DSME-Based Industrial Wireless Sensor Networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 12(2), 9837625.
- Meier, F., Koestler, M., & Backhaus, S. (2017). OpenDSME [Framework]. Institute of Telematics, Hamburg University of Technology. Recuperado de <http://opensme.org/>
- Opensim Ltd. (2017). OMNeT++ (5.1.1) [Software]. Recuperado de <https://omnetpp.org/>
- Sahoo, P. K., Pattanaik, S. R., & Wu, S.-L. (2017). A Novel IEEE 802.15.4e DSME MAC for Wireless Sensor Networks. *Sensors* , 17(1). <https://doi.org/10.3390/s17010168>

Vallati, C., Brienza, S., Palmieri, M., & Anastasi, G. (2017). Improving network formation in IEEE 802.15.4e DSME. *Computer Communications*, 114, 1–9.