

Planificación estática para la transmisión de datos en tiempo real con WSN

Sixto Enrique Campaña Bastidas¹, Jorge Mario Londoño Peláez²

sixto.campana@unad.edu.co, jorge.londono@upb.edu.co

¹ Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD, Calle 14 No 28 – 45, C. P. 520001 - Pasto - Nariño, Colombia

² Universidad Pontificia Bolivariana, Circular 1 No 70 – 01, C.P. 050031, Medellín - Antioquia, Colombia

DOI: 10.17013/risti.34.54-67

Resumen: Este documento presenta un método (algoritmo) de planificación para la transmisión de datos en tiempo real con redes de sensores inalámbricas (WSN), basado en técnicas de planificación estática y aplicado a redes que utilicen espacios de tiempo (time-slot) para la transmisión de datos en eventos periódicos, donde se garantice un tiempo acotado de transmisión. El documento presenta en primera instancia la revisión de algunos algoritmos existentes para transmisión en tiempo real con WSN, para luego explicar el algoritmo desarrollado y los resultados encontrados que permitieron validar la solución propuesta.

Palabras-clave: Redes de sensores inalámbricas; Algoritmos de planificación; GTS; IEEE802.15.4.

Static Scheduling for Real-Time Data Transmission with WSN

Abstract: This document presents a planning method (algorithm) for the transmission of data in real time with wireless sensor networks (WSN), based on static planning, applied to networks that use time slots for the transmission of data in periodic events, guaranteeing a limited time of transmission. The document presents in the first instance the review on techniques for transmission in real time with WSN, to then explain the developed algorithm and the results found that allowed validating the proposed solution.

Keywords: Wireless Sensor Networks; Planning Algorithms; GTS; IEEE802.15.4.

1. Introducción

El problema de la transmisión de datos en redes de sensores inalámbricas (WSN), con garantías de tiempo real, es un tema que tiene referentes importantes en la comunidad científica internacional, pero que aún no dispone de una solución, que satisfaga este requerimiento completamente (Campaña & Londoño, 2016), por lo que se ha

considerado que la transmisión de datos en tiempo real con WSN es un tema abierto y con muchas posibilidades de mejora. Por lo anterior este documento presenta un nuevo procedimiento para garantizar este tipo de transmisión con WSN, particularmente a partir de la planificación de los recursos con los cuales se cuenta para la transmisión de datos en la red, tomando como referente a la norma IEEE 802.15.4.

El algoritmo de planificación que se desarrolló (PEMM, planificación estática con técnicas matemáticas MCD (Máximo común divisor) y MCM (Mínimo común múltiplo)), parte de realizar una evaluación de la factibilidad a partir de un número de nodos que participan en una WSN, el tamaño de los paquetes a transmitir, los periodos de transmisión y la cantidad de recursos disponibles en la capa MAC. El diseño de PEMM, se basa en el concepto de supertrama definido por el estándar IEEE 802.15.4 y en particular del modo de operación por intervalos de tiempo garantizados (Guaranteed Time Slots - GTS), que establece un mecanismo para la reserva de particiones de tiempo (time-slots) para la transmisión de datos.

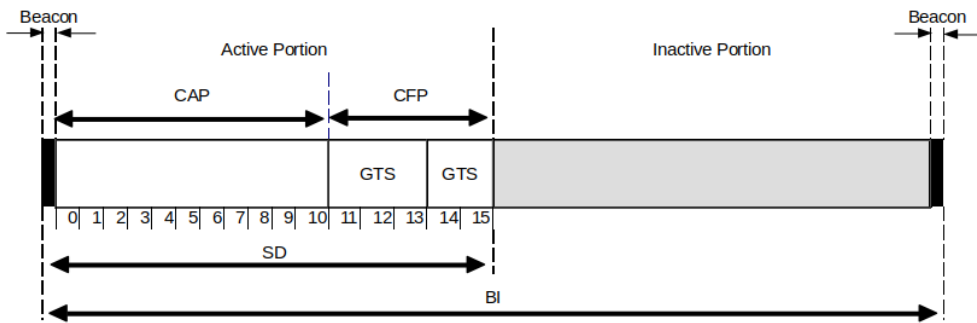


Figura 1 – Supertrama IEEE802.15.4 (Campaña, 2018)

PEMM fue comparado con otras soluciones, mencionadas más adelante, con el fin de establecer similitudes y diferencias con las mismas, además fue diseñado en pseudocódigo y programado en SCILAB (Campbell, Chancelier, & Nikoukhah, 2006), que es un programa de análisis matemático de tipo software libre, por ello los resultados presentados se basan en la simulación de casos de situaciones reales. Por otra parte, PEMM basa sus cálculos en las variables de la supertrama que maneja el estándar IEEE802.15.4, ver Figura 1. La estructura del documento parte de la comparación de algunos algoritmos previos existentes versus el algoritmo PEMM, luego se explica el funcionamiento del algoritmo a partir de un ejemplo que fue simulado y se termina con las conclusiones, resultado de la investigación.

2. Estado del Arte: algoritmos previos versus PEMM

Los algoritmos con los que se hizo el comparativo fueron los de: I-Game (Koubaa, Alves, & Tovar, 2008), EGSA (Chen, Ferreira, & Tovar, 2011), Haque (Haque, 2012), Yoo (Yoo et al., 2010), GAS (Na, 2011), ADA-MAC (Xia, et al., 2012) y FieldBus (Choi &

Kim, 2008); los cuales se seleccionaron por la similitud con el método de planificación propuesto, dado que todos trabajan con time-slot en su planificación. La comparación realizada parte definiendo las características de PEMM, ver Tabla 1.

Característica	Descripción
Modificaciones al estándar	Toma el estándar propuesto IEEE802.15.4 original sin cambios
Maneja Requerimientos de tiempo Real	Si
Obtiene los valores de SO y BO para configurar supertrama (Ver Figura 1)	Si, los calcula para aprovechar mejor los recursos de cada una de las supertramas que se generan con el manejo de estas variables. Este es uno de los elementos preponderantes del algoritmo, puesto que manejando estas variables se puede ampliar la cantidad de time-slot por supertrama, posibilitando el manejo de más dispositivos en tiempo real.
Utiliza técnicas de planificación para asignar Time-Slot	Si, utiliza la planificación estática, que refiere al uso de MCD y MCM para definir los microciclos y macrociclos del proceso (Zamorano, 1995).
Topología de funcionamiento	Estrella
Objetivo del algoritmo	Es un algoritmo que mejora el manejo de los periodos de beacon (BI) y el tamaño de la supertrama, con el fin de ajustarse a la necesidad de transmitir en tiempo real con las mismas garantías para todos los nodos que conforman la WSN. Siempre que los periodos de los sensores y las variables BO y SO lo permitan se ampliará la capacidad de time-slot por BI, ampliando la cantidad de supertramas por segundo y así permitiendo transmitir a más nodos en tiempo real.
Técnica referente utilizada para el algoritmo propuesto	Planificación estática (Zamorano, 1995).
VARIABLES del algoritmo	N = Sensores; BI = intervalo de beacon; T = periodo de los nodos para transmitir paquetes; BO = beacon order; SO = superframe order; SD = Supertrame duration; P = Tamaño de los paquetes.
Funcionamiento	El algoritmo parte de tres variables de entrada: N, T y P, con las cuales determina el BI y SD, identificando en primera instancia los valores de BO y SO, luego analiza los microciclos y macrociclo de transmisión de la WSN, con el fin de determinar la factibilidad de transmitir en tiempo real con los nodos que conforman la red.
Tipo de solución que ofrece el algoritmo	Garantiza solución, si es factible.
Tratamiento casos no factibles	Se considera como caso no factible a una situación que luego de validar los diferentes valores de BO y SO no genera una asignación factible de time-slot a los sensores que requieren transmisión en tiempo real, ya sea por falta de time-slot para suplir el proceso o por exceso de sensores en la red, que superan la capacidad del algoritmo.

Tabla 1 – Características Generales Algoritmo de Planificación PEMM

Ahora se procede a la comparación del algoritmo PEMM (ver tabla 1), con los algoritmos que se tomaron para el estudio. A continuación, se encontrarán las tablas (2-8), donde se pueden apreciar las diferencias más importantes entre estos algoritmos.

Característica	Descripción
Modificaciones al estándar IEEE 802.15.4	I-Game si lo hace, PEEM No.
Obtiene los valores de SO y BO para configurar supertrama (Ver figura 1)	I-Game no tiene este aspecto como relevante. PEEM es la base de su funcionamiento
Utiliza técnicas de planificación para asignar Time-Slot	I-Game utiliza Round Robin, que es un método equitativo ordenado. PEEM utiliza planificación estática.
Objetivo del algoritmo	Los dos buscan lo mismo. La diferencia está en la forma como lo hacen. PEEM lo hace planificando el uso de los recursos y analizando el comportamiento de la WSN antes de su funcionamiento, mientras que I-Game lo hace modificando el estándar para cumplir con los requerimientos de tiempo real.
Técnicas utilizadas en la capa MAC	PEEM utiliza planificación estática (Zamorano, 1995). I-Game utiliza como referente a Network Calculus theory (Le Boudec & Thiran, 2001).
Técnica referente utilizada para el algoritmo propuesto	N = Sensores; BI = intervalo de beacon; T = periodo de los nodos para transmitir paquetes; BO = beacon order; SO = superframe order; SD = Supertrama duration; P = Tamaño de los paquetes.
Garantía de solución para transmitir en tiempo real.	El I-Game no garantiza una solución para todos los nodos de la WSN, trabaja con el mejor esfuerzo, mientras que PEEM busca ofrecer una solución con las mismas garantías para todos los nodos.
Tratamiento casos no factibles	En el I-Game cuando un nodo no puede transmitir en tiempo real está la opción de CSMA/CA, mientras que PEEM evalúa las variables BO y SO principalmente, validando valores posibles que den factibilidad.

Tabla 2 – Algoritmo PEEM Vs I-GAME (Koubaa et al., 2008)

Característica	Descripción
Modificaciones al estándar IEEE 802.15.4	EGSA amplía el número de time-slot. PEEM ninguna
Obtiene los valores de SO y BO para configurar supertrama (Ver figura 1)	EGSA determina el valor de SO para establecer el mayor tamaño posible, luego iguala BO a SO (lo que deja al nodo coordinador activo permanentemente).
Utiliza técnicas de planificación para asignar Time-Slot	Los dos utilizan la misma técnica en la asignación de time-slot FCFS (Primero en llegar, primero en ser atendido), pero difieren en que PEEM, basa su funcionamiento en la planificación estática para establecer el comportamiento de la WSN.
Objetivo del algoritmo	La diferencia está en que EGSA modifica el estándar para cumplir con los requerimientos de tiempo real de la WSN.
Técnica referente utilizada para el algoritmo propuesto	PEEM utiliza planificación estática (Zamorano, 1995), mientras que EGSA no utiliza ninguna técnica externa, sólo modifica el estándar para cumplir con su objetivo.
Garantía de solución para transmitir en tiempo real.	EGSA no garantiza una solución para todos los nodos de la WSN, trabaja con el mejor esfuerzo, basado en la ampliación de time-slot que propone, mientras que PEEM ofrece una solución con las mismas garantías para todos los nodos de la red.
Tratamiento casos no factibles	En EGSA cuando un nodo no puede transmitir en tiempo real está la opción de CSMA/CA, su funcionamiento se basa principalmente en el tamaño de SO, mientras que para PEEM se evalúa las variables BO y SO principalmente, validando valores posibles que den factibilidad.

Tabla 3 – Algoritmo PEEM Vs EGSA (Chen et al., 2011)

Característica	Descripción
Modificaciones al estándar IEEE 802.15.4	Haque amplía el número de time-slot.
Obtiene los valores de SO y BO para configurar supertrama (Ver figura 1)	Con Haque estas variables se asignan de forma discreta, atendiendo sólo las recomendaciones de tomar valores entre 0 y 7 como los de mejor rendimiento.
Utiliza técnicas de planificación para asignar Time-Slot	Los dos utilizan la misma técnica en la asignación de time-slot FCFS.
Objetivo del algoritmo	Haque modifica el estándar para cumplir con los requerimientos de tiempo real de la WSN.
Técnica referente utilizada para el algoritmo propuesto	Haque no utiliza ninguna técnica externa, sólo modifica el estándar para cumplir con su objetivo.
Garantía de solución para transmitir en tiempo real.	Haque garantiza una solución de tiempo real en WSN de hasta 13 nodos, modificando el estándar con respecto a la cantidad de time-slot, mientras que PEMM ofrece una solución con las mismas garantías para todos los nodos de la red.
Tratamiento casos no factibles	Haque no trabaja de forma exclusiva con GTS, si la WSN no cumple con las condiciones para transmisión en tiempo real, se utiliza CAP y por ende CSMA/CA.

Tabla 4 – Algoritmo PEMM Vs Algoritmo de Haque (Haque, 2012)

Característica	Descripción
Modificaciones al estándar IEEE 802.15.4	En este aspecto los dos algoritmos conservan la estructura del estándar sin modificaciones.
Maneja Requerimientos de tiempo Real	Los dos algoritmos tienen el mismo enfoque, pero la diferencia radica en que PEMM establece los casos no factibles y busca facilitar una posibilidad de trabajo para los mismos, mientras que Yoo et al. no lo hace. En PEMM se busca ampliar la cantidad de nodos que pueden transmitir en tiempo real, no limitándose a 7 nodos, mientras que Yoo et al., trabaja en términos de cantidad de mensajes.
Obtiene los valores de SO y BO para configurar supertrama (Ver figura 1)	Los dos algoritmos buscan calcular las variables BO y SO, la diferencia radica en la forma. PEMM lo hace mediante el uso de MCM y MCD, como lo propone la técnica de planificación estática, mientras que el algoritmo de Yoo et al., lo hace partiendo del mínimo periodo de los sensores (situación que se analizó en PEMM, pero que podría generar una incompatibilidad cuando un periodo no sea múltiplo de otro para poder cumplir con la transmisión de los mensajes que envían los nodos) para obtener la variable BO, verificando que se cumpla la restricción del estándar para obtener BI, luego parte de $SO=0$ y va subiendo en una unidad hasta lograr soportar el ancho de banda requerido por la WSN (situación que tampoco se puede garantizar, dado que se puede llegar a agotar la cantidad de time-slot y no cumplir con el requerimiento) en la transmisión de datos en tiempo real.

Característica	Descripción
Utiliza técnicas de planificación para asignar Time-Slot	Los dos utilizan la misma técnica en la asignación de time-slot FCFS, pero difieren en que PEMM basa su funcionamiento en la planificación estática para establecer el comportamiento de la WSN y planificar mejor el uso de recursos a la hora de transmitir paquetes en tiempo real.
Objetivo del algoritmo	Buscan transmitir en tiempo real y mejorar el manejo de los recursos.
Técnica referente utilizada para el algoritmo propuesto	En PEMM se utiliza planificación estática (Zamorano, 1995), mientras que Yoo et al. utiliza técnicas que han denominado de armonización matemática.
Garantía de solución para transmitir en tiempo real.	El algoritmo de Yoo et al. y PEMM, son similares en ofrecer soluciones que garanticen tiempo real, cuando las condiciones no se cumplen se declara no factible. La diferencia está en la forma de intentar la factibilidad.
Tratamiento casos no factibles	Yoo et al., trabaja de forma que se garantice la transmisión en tiempo real de los mensajes que envían los nodos sensores, sino se cumple la red es no factible, algo similar se hace en PEMM, la diferencia está, que en este último se busca una solución factible de diversas maneras, ya sea disminuyendo el BI o evaluando el MCD de los periodos que tienen la WSN, manejando de esta manera los casos no factibles, mientras que Yoo et al., no lo hace.

Tabla 5 – Algoritmo PEMM Vs Algoritmo de Yoo et al. (Yoo et al., 2010)

Característica	Descripción
Modificaciones al estándar IEEE 802.15.4	GAS desarrolla un nuevo método de planificación basado en EDF y denominado EDCF-mGTS.
Obtiene los valores de SO y BO para configurar supertrama (Ver figura 1)	GAS maneja valores fijos estimados (Dentro de sus trabajos futuros esta analizar el comportamiento de estas variables), en el documento utilizan el valor de 8.
Utiliza técnicas de planificación para asignar Time-Slot	GAS, propone un nuevo modelo basado en EDF.
Objetivo del algoritmo	GAS trabaja buscando una solución de tiempo real online y trabaja con tareas esporádicas.
Técnica referente utilizada para el algoritmo propuesto	GAS basa su funcionamiento en EDF (Earliest Deadline First), diseñando un modelo de planificación ajustado a las necesidades del mismo.
Garantía de solución para transmitir en tiempo real.	GAS no garantiza transmisión en tiempo real para todos los nodos de una WSN, hace una selección de quienes cumplen con los requerimientos para poder asignarles GTS y estos serán los que transmita en tiempo real.
Tratamiento casos no factibles	Los casos no factibles de GTS se tratan con CSMA/CA y se trabaja por contención.

Tabla 6 – Algoritmo PEMM Vs Algoritmo de GAS (Na, 2011)

Característica	Descripción
Modificaciones al estándar IEEE 802.15.4	ADA-MAC cambia la estructura de la supertrama y el orden de las secciones que la componen.
Obtiene los valores de SO y BO para configurar supertrama (Ver figura 1)	ADA-MAC deja que los valores de BO y SO sean discretos y configurables por el usuario.
Utiliza técnicas de planificación para asignar Time-Slot	ADA-MAC propone un nuevo modelo basado en prioridades definidas en el algoritmo, descartando y no dando las mismas garantías a todos los nodos de la WSN.
Objetivo del algoritmo	ADA-MAC aumenta la cantidad de time-slot, maneja prioridades y utiliza CSMA cuando los nodos no requieran tiempo real.
Técnicas utilizadas en la capa MAC	ADA-MAC trabaja con beacon enable y también utiliza CSMA/CA cuando es necesario para paquetes que no requieren transmisión en tiempo real.
Técnica referente utilizada para el algoritmo propuesto	ADA-MAC utiliza como referente al protocolo TTP
Garantía de solución para transmitir en tiempo real.	ADA-MAC no garantiza transmisión en tiempo real para todos los nodos de una WSN, de acuerdo con la prioridad asignará GTS a quien lo necesite y rechazará los otros nodos.
Tratamiento casos no factibles	Los casos no factibles de GTS se tratan con CSMA/CA y se trabaja por contención.

Tabla 7 – Algoritmo PEMM Vs Algoritmo de ADA-MAC (Xia, et al., 2012)

Característica	Descripción
Modificaciones al estándar IEEE 802.15.4	Según la propuesta de FieldBus, se modifica el estándar para que trabaje con TDMA y EDF.
Obtiene los valores de SO y BO para configurar supertrama (Ver figura 1)	FieldBus establece periodo inactivo = 0, con lo que BO = SO. Lo que no da lugar a generar más posibilidades de cambiar el BI inicialmente planteado, dejando fija e inflexible la posibilidad de generar más supertramas y time-slot por segundo.
Utiliza técnicas de planificación para asignar Time-Slot	FieldBus trabaja con EDF y con las especificaciones del modelo Fieldbus, de donde deriva su nombre.
Objetivo del algoritmo	FieldBus maneja prioridades y utiliza CSMA cuando los nodos no requieran tiempo real y es más de tipo industrial.
Técnicas utilizadas en la capa MAC	FieldBus trabaja con beacon enabled y también utiliza CSMA/CA cuando es necesario para paquetes que no requieren transmisión en tiempo real.
Técnica referente utilizada para el algoritmo propuesto	FieldBus (Thomessse, 1998) trabaja con control distribuido, buscando la conexión punto a punto en todo momento.
Garantía de solución para transmitir en tiempo real.	FieldBus no garantiza transmisión en tiempo real para todos los nodos de una WSN, de acuerdo con la prioridad asignará GTS a quien lo necesite, utilizando EDF en la planificación y rechazará los otros nodos.
Tratamiento casos no factibles	Los casos no factibles de GTS se tratan con CSMA/CA y se trabaja por contención.

Tabla 8 – Algoritmo PEMM Vs Algoritmo FieldBus (Choi & Kim, 2008)

3. Funcionamiento Algoritmo PEMM

PEMM toma como entradas las características de una WSN con una cantidad finita de nodos y un nodo coordinador de la red, conectados en topología estrella. También asume que el coordinador de la WSN hizo el proceso de sincronización previo y cuenta con las variables que trabaja el algoritmo, que corresponden a: N, que define el número de nodos; P, que es el tamaño de los paquetes que envían los nodos y T que son los periodos en los que deben transmitir los nodos para enviar los datos al coordinador. Las variables Rts y Nts corresponden al rango de time-slot (time-slots que se asignan en la transmisión, indicando el inicio y final en la supertrama) y número máximo de timeslots, respectivamente, valores que dependerán del estándar con el que se esté trabajando. Para el caso de IEEE 802.15.4, que ha sido el ejemplo utilizado para la solución propuesta, corresponden a: Rts = [3, 4 ...16] y Nts = 13. Por otra parte, BSFD (Mínimo tamaño de un time-slot) es igual 960 símbolos y en tiempo a 0,01536 sg.

Cuando se tiene una WSN con siete o menos nodos, PEMM valida principalmente el tamaño de los time-slot y busca los valores que permitan la asignación de GTS a cada uno de los sensores que conforman la red, acorde con la planificación propuesta. Pero cuando hay más de siete sensores en la WSN, PEMM busca una planificación que garantice la transmisión en tiempo real. Para estos casos se analiza el intervalo de beacon y la relación de transmisión de datos de cada sensor, con el fin de encontrar un posible valor de BO y SO que se ajuste a los requerimientos de la aplicación. En los dos casos anteriores PEMM busca determinar si es factible o no la transmisión en tiempo real.

Por otra parte, uno de los aspectos que controla PEMM, corresponde a verificar que el número de time-slot no sobrepase el valor de 13 por supertrama y que los GTS sean máximo siete. En los casos cuando la WSN se componen de más de siete nodos, se evalúa el comportamiento de los mismos hasta llegar al macrociclo de la red, si en dicho tiempo se supera los 13 time-slot o los 7 GTS, se disminuye en 1 el valor de BO, siempre y cuando SO sea menor (ver Figura 1). Cuando se hace este proceso se disminuye el BI y se dispone de otros intervalos disponibles para asignar los periodos de los sensores de la WSN, si se encuentra una opción factible en esta asignación se dice que la WSN es factible para tiempo real, caso contrario es no factible.

4. Resultados

4.1. Aplicación paso a paso del Algoritmo PEMM

Paso 1: Lo primero que realiza PEMM es obtener los valores de BO y SO de la WSN propuesta, lo que permite conocer el BI y SD respectivamente. Para efectos de comprender el proceso se tomará un ejemplo, donde una WSN está compuesta por 10 sensores, en la Tabla 9 se pueden observar los datos iniciales.

Nodos	UmBSFD (Unidades de tiempo periódico en términos de la supertrama)	Tamaño Paquete (P) - Bits
1	3000	40
2	4000	1040

Nodos	UmBSFD (Unidades de tiempo periódico en términos de la supertrama)	Tamaño Paquete (P) - Bits
3	5000	40
4	3000	1040
5	4000	1040
6	7000	1040
7	9000	40
8	13000	1040
9	10000	40
10	21000	40

Tabla 9 – Datos Iniciales WSN Propuesta

Luego de aplicar el paso uno, se obtienen los siguientes resultados, ver Tabla 10:

Variable	Valor Obtenido
BSFD	0,01536
BO	10
SO	1
BI	15,72 sg
SD	7680 Bits
Tamaño Time-slot	480 Bits
Time-slot disponibles	13

Tabla 10 – Resultados primera simulación

Paso 2: Con los datos antes calculados y registrados en la Tabla 10, el algoritmo procede a calcular la cantidad necesaria de time-slot por nodo sensor y evalúa la factibilidad de transmitir en tiempo real con la asignación de máximo 7 GTS por supertrama, en la Tabla 11 se puede observar el cálculo realizado.

Nodos	Cantidad Time-slot requeridos por supertrama
1	1
2	3
3	1
4	3
5	3
6	3

Nodos	Cantidad Time-slot requeridos por supertrama
7	1
8	3
9	1
10	1
Total	20

Tabla 11 – Cálculo Time-slot por nodo

Paso 3: Como se puede observar, según los valores obtenidos y registrados en la Tabla 11, la WSN con 10 nodos requerirá en un determinado momento 20 time-slots, como máximo para poder transmitir en tiempo real, situación que no es factible acorde con los parámetros del estándar IEEE 802.15.4, el cual sólo permite 13 time-slot. En este caso PEMM busca hacer factible la planificación, para lo cual en primera instancia verifica si BO es mayor a SO, si es así disminuye en una unidad BO, lo que permite contar con el doble de periodos de BI, así como también se hace una reorganización de los sensores de la WSN en dos grupos, donde el primer grupo enviará los datos según le corresponda en el BI que se adapte a su periodo, mientras que el segundo grupo se desplazará en una unidad de BI con respecto al periodo inicialmente planteado. En la Tabla 12 se pueden observar los cambios que hizo PEMM en este paso.

Variable	Valor Inicialmente Obtenido	Cambio propuesto PEMM
BO	10	9
SO	1	1
BI	15,72 sg	7,68 sg
N	Un solo grupo de 10 nodos	Dos grupos de 5 nodos

Tabla 12 – Valores segunda iteración Simulación

Paso 4: Cuando se hace el cambio propuesto en el paso 3, PEMM evalúa la factibilidad de cumplir con los requerimientos del mismo para poder transmitir en tiempo real. En este caso lo que se busca es que se transmitan máximo 7 GTS y 13 time-slot en cada generación de supertrama. Para validar este requerimiento se ejecuta las iteraciones de los BI hasta que se cumpla el Macro ciclo, si en dicho proceso se encuentra que, en cada BI, las supertramas manejan hasta 7 GTS y máximo 13 time-slot, se dice que la WSN es factible para transmisión en tiempo real, caso contrario se disminuye nuevamente BO, siempre y cuando SO siga siendo menor. En el caso de la WSN de 10 sensores se hicieron las disminuciones correspondientes hasta llegar BO = SO, y no se cumplió con el requerimiento planteado, por lo anterior se realizó un nuevo paso. En la Tabla 13, se pueden observar las iteraciones que hizo PEMM.

Iteración	Valor BO	Valor SO	Resultado PEMM
Dos grupos de sensors - 1	9	1	La cantidad de time-slot supera el máximo permitido
Dos grupos de Sensores - 2	8	1	La cantidad de time-slot supera el máximo permitido
Dos grupos de Sensores - 3	7	1	La cantidad de time-slot supera el máximo permitido
Dos grupos de Sensores - 4	6	1	La cantidad de time-slot supera el máximo permitido
Dos grupos de Sensores - 5	5	1	La cantidad de time-slot supera el máximo permitido
Dos grupos de Sensores - 6	4	1	La cantidad de time-slot supera el máximo permitido
Dos grupos de Sensores - 7	3	1	La cantidad de time-slot supera el máximo permitido
Dos grupos de Sensores - 8	2	1	La cantidad de time-slot supera el máximo permitido
Dos grupos de Sensores - 9	1	1	La cantidad de time-slot supera el máximo permitido

Tabla 13 – Validación PEMM Condiciones

Paso 5: Debido a que no se logró cumplir con el requerimiento del estándar en el paso anterior, PEMM en un nuevo paso divide el conjunto de sensores en tres grupos, donde el primer grupo trabaja con el periodo inicialmente programado, el segundo grupo trabaja con el desplazamiento en una unidad de BI y el tercer grupo con el desplazamiento de dos unidades de BI, se valida nuevamente según el macrociclo de los periodos del conjunto de sensores que constituyen la WSN y se obtuvo que la red es factible para la transmisión en tiempo real cuando BO = 9, pero trabajando con tres grupos de sensores. En la Tabla 14, se puede observar el resultado obtenido.

Itera	BI (sg)	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
0	0	1	3	1	0	0	0	0	0	0	0
1	7,86	0	0	0	3	3	3	0	0	0	0
2	15,7	0	0	0	0	0	0	1	3	1	1
3	23,5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	31,4	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0
5	39,3	0	0	1	0	3	0	0	0	0	0
...
39997	314549,2	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0
39998	314557,0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
39999	314564,9	1	0	0	0	0	3	0	0	0	0

Tabla 14 – Resultado Final PEMM

En la Tabla 14, se puede observar que se tiene una primera columna con las iteraciones que hace PEMM en el proceso de validación de los valores de BO y SO para hacer factible la transmisión en tiempo real. En la segunda columna se tiene a BI que es el intervalo de beacon de la red y que en el caso que se ha tomado corresponde a 7,86 sg, luego están las columnas de los sensores de S1 a S10, donde se ubica la cantidad de time-slot que requieren para transmitir los datos que capturan, que a su vez se constituyen en los GTS que utiliza la WSN para transmitir en tiempo real. Como se mencionó anteriormente los sensores de la WSN de 10 nodos se organizaron en tres grupos: Grupo 1 (S1, S2, S3), Grupo 2 (S4, S5, S6) y Grupo 3 (S7, S8, S9, S10), los cuales transmiten en el BI que les corresponde, manteniendo sin cambios al Grupo 1, pero para el Grupo 2, se hizo un desplazamiento de una unidad en lo que corresponde a la iteración (itera) y para el Grupo 3 se hizo el desplazamiento de dos unidades, lo que evitó que todos los sensores transmitieran en el mismo BI con los 20 time-slot que requieren, sino por el contrario se manejará grupos que no superan los 13 time-slot, ni los 7 GTS necesarios para la transmisión en tiempo real. Al validarse esta solución se determina que la WSN debe trabajar con $BO = 9$ y $SO = 1$, en una subdivisión de tres grupos de sensores.

5. Discusión y Conclusiones

Las redes de sensores inalámbricas (WSN) brindan un soporte estructural para nuevas tecnologías, tales como el Internet de las Cosas (IoT) o los sistemas ciberfísicos (CPS), donde uno de los requerimientos importantes es la transmisión de datos en tiempo real. Los estándares para WSN se apoyan en mecanismos de acceso al medio como la multiplexación estadística (e.g. CSMA/CA), la multiplexación por división en el tiempo o por división en la frecuencia. Sin embargo, el modelo de multiplexación estadística no permite satisfacer requerimientos de tiempo real debido a la latencia no determinista introducida por el mecanismo de acceso al medio. Por tal motivo, la investigación en esta área se centra en el uso de métodos de multiplexación como mecanismos para brindar garantías de tiempo real. Sin embargo, la revisión del estado del arte arrojó que los métodos disponibles en la literatura aún son muy limitados en cuanto a proporcionar soluciones factibles utilizando los recursos limitados de la red y en cuanto a su capacidad de escalar el sistema cuando se requieren altas cantidades de sensores.

Este trabajo abordó estos problemas en el contexto específico de WSN, donde los requerimientos de los sensores se expresan en función de la periodicidad de sus transmisiones y minimizando la latencia de las transmisiones, eliminando la necesidad de mecanismos de contención para el acceso al medio a través de un esquema de planificación coordinado. Para este efecto se diseñó un algoritmo de planificación que se ha denominado PEMM, el cual toma como entradas los requerimientos de un conjunto de sensores y las restricciones de la tecnología utilizada para la implementación de la WSN, para determinar un esquema de planificación factible en caso de ser posible, o reporta la no factibilidad de la instancia del problema en cuestión. El encontrar una solución factible posibilita el despliegue de la aplicación, garantizando los requerimientos de los sensores y el cumplimiento de las restricciones de la infraestructura de red. En el caso de no ser factible el esquema, PEMM proporciona información que permite al diseñador de

la aplicación revisar sus características, de forma que se convierte en una herramienta que ayuda a ajustar el diseño del sistema para hacerlo factible.

El algoritmo de planificación fue verificado por medio de un conjunto de casos de prueba reales y sintéticos que permiten corroborar la factibilidad o no factibilidad del esquema de planificación obtenido. Este proceso se ha realizado ajustando el algoritmo a las restricciones de un caso concreto de tecnología para la implementación de redes WSN, el estándar 802.15.4. Así mismo, se implementaron y se comprobaron los beneficios del esquema de planificación en redes prototipo basadas en este estándar. Los casos sintéticos permitieron validar que el esquema permite escalar la red de sensores sin necesidad de hacer cambios al estándar, una de las limitaciones que con mayor frecuencia se identificó en el estado del arte.

Referencias

- Campaña, S. (2018). Algoritmo de planificación para redes de sensores inalámbricas con soporte para tiempo real. (Tesis de Doctorado). Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia.
- Campaña, S., & Londoño, J. (2016). Review: Algoritmos de planificación para la transmisión de datos en tiempo real en redes de sensores inalámbricas IEEE 802.15.4. *Revista Publicaciones e investigaciones*, (9), 177–196. DOI: <https://doi.org/10.22490/issn.2539-4088>.
- Campbell, S., Chancelier, J., & Nikoukhah, R. (2006). *Modeling and Simulation in SCILAB*. (pp. 73-105). Springer. New York.
- Chen, J., Ferreira, L., & Tovar, E. (2011). An explicit GTS allocation algorithm for IEEE 802.15. 4. *In Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA), 2011 IEEE 16th Conference*, 1-8. Portugal.
- Choi, D., & Kim, D. (2008). Wireless fieldbus for networked control systems using LR-WPAN. *International Journal of Control Automation and Systems*, 6(1), 119–125.
- Haque, S. (2012). Efficient GTS Allocation Schemes for IEEE 802.15. 4. (Master Thesis). Georgia State University.
- Koubaa, A., Alves, M., & Tovar, E. (2008). An implicit GTS allocation mechanism in IEEE 802.15.4 for time-sensitive wireless sensor networks: theory and practice. *Real-Time Systems*, 39(1-3), 169–204.
- Le Boudec, J., & Thiran, P. (2001). *Network calculus: a theory of deterministic queuing systems for the internet* (1st Ed.). New York, NY: Springer editors.
- Na, C. (2011). IEEE 802.15. 4 Wireless Sensor Networks: GTS Scheduling and Service Differentiation (Doctoral Thesis). Virginia Polytechnic Institute and State University.

- Thomesse, J. (1998). A review of the fieldbuses. *Annual reviews in Control*, (22), 35–45.
- Xia, F., Wang, L., Zhang, D., Zhang, X., & Gao, R. (2012). Ada-MAC: An adaptive MAC protocol for real-time and reliable health monitoring. In *2012 IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)* (pp. 203-208). IEEE.
- Yoo, S., Chong, P., Kim, D., Doh, Y., Pham, M., Choi, E., & Huh, J. (2010). Guaranteeing real-time services for industrial wireless sensor networks with IEEE 802.15. 4. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(11), 3868–76.
- Zamorano, J. (1995). Planificación Estática de Procesos en Sistemas de Tiempo Real Crítico. (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Madrid, España.