

**ALGORITMO DE PLANIFICACIÓN PARA REDES DE SENSORES
INALÁMBRICAS CON SOPORTE PARA TIEMPO REAL**

SIXTO ENRIQUE CAMPAÑA BASTIDAS

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA
DOCTORADO EN INGENIERÍA – ÁREA TELECOMUNICACIONES
MEDELLIN
2018

**ALGORITMO DE PLANIFICACIÓN PARA REDES DE SENSORES
INALÁMBRICAS CON SOPORTE PARA TIEMPO REAL**

SIXTO ENRIQUE CAMPAÑA BASTIDAS

Tesis de Doctorado para optar el título de:
Doctor en Ingeniería – Área Telecomunicaciones

Director

PhD. Jorge Mario Londoño Peláez

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA
DOCTORADO EN INGENIERÍA – ÁREA TELECOMUNICACIONES
MEDELLIN

2018

DECLARACION DE ORIGINALIDAD

“Declaro que esta tesis (o trabajo de grado) no ha sido presentada para optar a un título, ya sea en igual forma o con variaciones, en esta o en cualquier otra Universidad”. Art. 82 Régimen Discente de Formación Avanzada. Universidad Pontificia Bolivariana.



Firma Autor _____

Sixto Enrique Campaña Bastidas

C.C. 98.392.398

Medellín, junio 5 de 2018.

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos a:

Mi asesor y director de trabajo de investigación doctoral: PhD Jorge Mario Londoño Peláez, quien guío e hizo parte de todo el proceso desarrollado, su excelente dirección, conocimiento y experiencia fue vital para el logro de los objetivos alcanzados.

A la Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD, mi querida universidad, por el apoyo económico y tiempo asignado para el desarrollo de mi proceso de formación doctoral.

A la Doctora Macarena Espinilla de la Universidad de Jaén - España, quien me permitió expandir la investigación más allá de las fronteras colombianas y ser parte de un proyecto Internacional con la Comisión Europea, que inició con la formulación de esta investigación y ahora se ha consolidado como una oportunidad para hacer mucho más.

Al proyecto REMIND de la convocatoria H2020, que gracias a las movilidades y personas que hacen parte del mismo, se logró comprender muchos de los conceptos expuestos en esta tesis.

A todas las personas e Instituciones, que de una u otra forma se vincularon con el desarrollo de la investigación propuesta, su apoyo fue fundamental para aprender cada día más.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo y toda mi vida de formación a mis padres, motor e impulso en mi desarrollo personal y profesional. A mi tía Rosalba por su apoyo incondicional, a mis hermanos Ximena y Wilson por su acompañamiento constante e incondicional. De manera especial a mi esposa Amanda, quien es mi fuente de inspiración y motivación para hacer muchas más cosas día a día, a Juan Diego una excelente persona, gracias por su amistad. Y a mi hijo Sebastián quien es mi orgullo y razón para dejar huella en este mundo, con el firme propósito de invitarle en cada momento a cultivar su mente y espíritu con el conocimiento y la ciencia, pero siempre para el servicio de los demás.

Sixto Enrique Campaña Bastidas

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	4
DEDICATORIA.....	5
CONTENIDO	6
LISTA DE TABLAS.....	10
LISTA DE FIGURAS	12
LISTA DE ECUACIONES.....	13
ACRONIMOS Y ABREVIATURAS	14
RESUMEN	17
ABSTRACT	18
INTRODUCCIÓN	19
1. LAS REDES DE SENSORES INALÁMBRICAS Y LOS ALGORITMOS DE PLANIFICACIÓN PARA LA TRANSMISIÓN DE DATOS.....	21
1.1. DEFINICIÓN Y APLICACIONES DE LAS REDES DE SENSORES INALÁMBRICAS	21
1.1.2. Aplicaciones WSN en la agricultura y medio ambiente:	22
1.1.4. Aplicaciones WSN en entornos industriales:	23
1.2. ESTÁNDARES Y PROTOCOLOS DE LAS REDES DE SENSORES INALÁMBRICAS	23
1.2.1. Bluetooth:.....	23
1.2.2. WiFi (Wireless Fidelity):.....	23
1.2.3. IEEE 802.15.4:.....	24
1.2.4. ZigBee:.....	24
1.2.5. IEEE 802.15.6:.....	24
1.2.6. WirelessHART:	25
1.3. EL ESTÁNDAR IEEE 802.15.4.	26
1.3.1 Definición IEEE 802.15.4:.....	26
1.3.2 Características generales de IEEE 802.15.4:	26
1.3.3. Topologías para IEEE 802.15.4:.....	27
1.3.4 Tipos de dispositivos para IEEE 802.15.4:	27
1.3.5. Capa de Acceso al Medio del Protocolo IEEE 802.15.4:	28
1.4. ALGORITMOS DE PLANIFICACIÓN PARA LA TRANSMISIÓN DE DATOS EN WSN – ESTADO DEL ARTE TIEMPO REAL.	31
1.4.1 Estudios Relacionados con el Rendimiento del Protocolo IEEE 802.15.4:	32

1.4.2 Estudios relacionados que consideran el manejo de GTS en las soluciones propuestas:	35
1.4.3 Estudios relacionados con métodos alternativos en la búsqueda de soluciones para la transmisión en tiempo real:	39
1.4.4. Estudios Relacionados con la asignación de GTS en WSN con Topologías Malla o Árbol:	41
2. LA TRANSMISIÓN DE DATOS EN TIEMPO REAL PARA WSN	44
2.1. SISTEMAS DE TRANSMISIÓN DE DATOS EN TIEMPO REAL	44
2.1.1. Sistemas de tiempo real críticos y acríticos:	45
2.2. DIFERENCIAS ENTRE LOS ALGORITMOS DE PLANIFICACIÓN DE DATOS EN TIEMPO REAL PARA WSN	46
2.3. TRANSMISIÓN DE DATOS EN TIEMPO REAL BAJO EL ESTÁNDAR IEEE 802.15.4	48
2.3.1. El problema de planificación para WSN:	49
3. ALGORITMO DE PLANIFICACIÓN (PEMM) PARA LA TRANSMISIÓN DE DATOS EN TIEMPO REAL PARA WSN	53
3.1. SOLUCIÓN A LOS REQUERIMIENTOS PLANTEADOS	53
3.1.1. Solución Restricción 1.....	53
3.1.2. Solución Restricción 2:	54
3.1.3. Solución Restricción 3.....	55
3.1.4. Solución Restricción 4.....	55
3.1.5. Solución Restricción 5.....	55
3.1.6. Solución Restricción 6.....	56
3.2. ESTRUCTURA FINAL DEL ALGORITMO (PEMM) Y FORMA DE FUNCIONAMIENTO	56
3.3. ANÁLISIS COMPARATIVO: ALGORITMO PEMM VS ALGORITMOS DE PLANIFICACIÓN REFERENCIADOS.....	60
3.3.1. Algoritmo PEMM Vs I-Game [65]:	62
3.3.2. Algoritmo PEMM Vs EGSA.....	66
3.3.3. Algoritmo PEMM Vs Algoritmo de Haque.....	71
3.3.4. Algoritmo PEMM Vs Yoo et al	75
3.3.5. Algoritmo PEMM Vs GAS.....	81
3.3.6. Algoritmo PEMM Vs ADA-MAC	86
3.3.7. Algoritmo PEMM Vs FieldBus.....	91
4. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO DE PLANIFICACIÓN PARA WSN	96
4.1. DISEÑO EXPERIMENTAL	96
4.2. APLICACIÓN DEL ALGORITMO PEMM EN UNA WSN CON 10 NODOS – EXPLICACIÓN PASO A PASO	97

Se tiene una red que está compuesta por los siguientes nodos caso [101], ver tabla 20:	97
4.3 ESCENARIOS DE SIMULACIÓN PARA VALIDACIÓN DEL ALGORITMO VERSUS OTROS ALGORITMOS.....	103
4.4 ESCENARIOS DE SIMULACIÓN PARA VALIDACIÓN DEL ALGORITMO – CASOS DE APLICACIÓN REAL CON NÚMERO DE SENSORES AMPLIADO.....	107
4.5. ESCENARIOS DE SIMULACIÓN PARA VALIDACIÓN DEL ALGORITMO PEMM – EN FUNCIÓN DE LOS PERIODOS DE MUESTREO (TI) MÁXIMOS Y MÍNIMOS QUE PERMITE EL ESTÁNDAR, ASOCIADOS TAMBIÉN AL TAMAÑO DE LOS PAQUETES (PI)	112
4.6. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO – APLICACIÓN EN UNA WSN REAL.....	116
4.6.1. Descripción hardware experimentación práctica	117
4.6.2. Experimentación WSN con IEEE 802.15.4 por defecto	122
4.6.3. Experimentación WSN con IEEE 802.15.4 con GTS y PEMM.....	125
CONCLUSIONES.....	131
TRABAJOS FUTUROS	132
REFERENCIAS.....	133
ANEXOS	143
Anexo 1: Tablas de datos de los sensores tomados para las simulaciones.	144
Anexo 2: Tablas de datos con el número de sensores ampliados para las simulaciones.	146
Anexo 4: Publicación Artículo: Scheduling the Real-Time Transmission of Periodic Measurements in 802.15.4 Wireless Sensor Network	150
Anexo 5: Publicación Artículo: Fuzzy Intelligent System for Patients with Preeclampsia in Wearable Devices.....	151
Anexo 6: Secondment Proyecto REMIND – COMISIÓN EUROPEA.....	152
Anexo 7: Aprobación Proyecto Remind – Comisión Europea	153
Anexo 8: Publicación Artículo: Computing protoforms from high-rate sensor streams	154
Anexo 9: Publicación Artículo: Fuzzy Intelligent System for Supporting Preeclampsia Diagnosis from the Patient Biosignals	155
Keywords: Fuzzy logic Fuzzy linguistic intelligent systems Biomedical systems Preeclampsia	155
Anexo 10: Publicación Artículo: Sistema en tiempo real para el monitoreo de variable médicas en pacientes hospitalizadas con redes WSN.....	156
Anexo 11: Publicación Artículo: REVIEW: ALGORITMOS DE PLANIFICACIÓN PARA LA TRANSMISIÓN DE DATOS EN TIEMPO REAL EN REDES DE SENSORES INALÁMBRICAS IEEE 802.15.4.....	157
Anexo 12: Participación Evento: ECOSISTEMAS DIGITALES: REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS, INTERNET DE LAS COSAS Y AMBIENTES INTELIGENTES	158

Anexo 13: Publicación Artículo: A Characterization of data transfer modes in Wireless Sensor Networks based on IEEE 802.15.4.....	159
Anexo 14: Publicación Artículo: ESTUDIO DE REDES DE SENSORES Y APLICACIONES ORIENTADAS A LA RECOLECCIÓN Y ANÁLISIS DE SEÑALES BIOMÉDICAS.	160
Anexo 15: Participación evento: “Estudio de la transmisión en tiempo real de señales medicas con redes WSN y sensores ECG entre otros”	161

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Diferencias IEEE 802.15.4 e IEEE 802.15.6.....	24
Tabla 2 Periodos de símbolo IEEE 802.15.4.....	30
Tabla 3 Estudios y algoritmos para MAC IEEE 802.15.4.	46
Tabla 4 Características Generales Algoritmo de Planificación PEMM	60
Tabla 5 Características Generales Algoritmo I-Game [65] Vs PEMM	62
Tabla 6 Diferencias I-Game vs Algoritmo PEMM	65
Tabla 7 Características Generales Algoritmo EGSA [75].....	66
Tabla 8 Diferencias EGSA vs Algoritmo Propuesto.....	69
Tabla 9 Características Generales Algoritmo de Haque [76].....	71
Tabla 10 Diferencias Algoritmo de Haque vs Algoritmo PEMM.....	74
Tabla 11 Características Generales Algoritmo Yoo et al [82].....	76
Tabla 12 Diferencias Yoo et al vs Algoritmo PEMM	79
Tabla 13 Características Generales Algoritmo GAS [37]	81
Tabla 14 Diferencias GAS vs Algoritmo PEMM.....	84
Tabla 15 Características Generales Algoritmo ADA-MAC [68].....	86
Tabla 16 Diferencias ADA-MAC vs Algoritmo PEMM.....	89
Tabla 17 Características Generales Algoritmo FieldBus [69]	91
Tabla 18 Diferencias FieldBus vs Algoritmo PEMM	93
Tabla 19 Elementos Experimentación momento 1	97
Tabla 20 Parámetros iniciales WSN con 10 nodos	97
Tabla 21 Calculo de BO y SO algoritmo PEMM WSN 10 nodos	98
Tabla 22 Cantidad time-slot por nodo WSN 10 sensores.....	98
Tabla 23 Disminución BO para WSN 10 sensores.....	99
Tabla 24 Iteraciones con dos grupos de sensores para WSN 10 nodos	99
Tabla 25 Resultado tres grupos de sensores WSN de 10 nodos	100
Tabla 26 Estudios y algoritmos para MAC IEEE 802.15.4.	103
Tabla 27 Resultados simulación casos reales con PEMM y Algoritmos en comparación.....	104
Tabla 28 Relación de algoritmos que pueden transmitir en tiempo real con GTS106	
Tabla 29 Relación de algoritmos que utilizan CSMA/CA para la transmisión de datos	107
Tabla 30 Casos simulados con número de sensores ampliado	108
Tabla 31 Resultados simulación casos reales con PEMM y Algoritmos en comparación.....	108
Tabla 32 Relación de algoritmos que pueden transmitir en tiempo real con GTS con WSN aumentadas en nodos.....	110
Tabla 33 Relación de algoritmos que utilizan CSMA/CA para la transmisión de datos con WSN aumentadas en nodos	111
Tabla 34 Tabla de periodos y paquetes WSN variables ambientales de 14 nodos caso [99].....	112

Tabla 35 Casos de aplicación algoritmo propuesto – Tablas de periodos y tiempos	113
Tabla 36 Casos de aplicación algoritmo propuesto – Resultados ejecución del algoritmo.....	114
Tabla 37 Elementos Experimentación Aplicación Práctica.....	116
Tabla 38 Características Kit de sensores utilizados en la implementación	117
Tabla 39 Características generales WSN a implementar	118
Tabla 40 Características sniffer.....	119
Tabla 41 Características WSN modo RF básico por defecto	122
Tabla 42 Parámetros WSN modo RF básico.....	123
Tabla 43 Resultados ejecución WSN modo RF básico	123
Tabla 44 Resultados estadísticos aplicación práctica WSN por defecto	124
Tabla 45 Campos archivos de salida implementación GTS	127
Tabla 46 Registros de salida archivo de texto generado.....	128
Tabla 47 Resultados ejecución WSN modo GTS con PEMM	129
Tabla 48 Resultados estadísticos aplicación práctica WSN con GTS.....	129
Tabla 49 Diferencias experimentos prácticos realizados	130

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Topologías WSN.....	27
Figura 2 Cluster-tree topology.....	27
Figura 3 Estructura Supertrama IEEE 802.15.4.....	29
Figura 4 k-ésima supertrama.....	50
Figura 5 Algoritmo I-Game - Management.....	64
Figura 6 Algoritmo I-Game – Admission Control.....	64
Figura 7 Algoritmo EGSA.....	69
Figura 8 Algoritmo de Haque.....	73
Figura 9 Algoritmo Yoo et al.....	78
Figura 10 Algoritmo GAS.....	84
Figura 11 Algoritmo ADA-MAC.....	88
Figura 12 Algoritmo FieldBus.....	93
Figura 13 Comportamiento WSN Caso [101].....	101
Figura 14 Comportamiento WSN Caso [100].....	102
Figura 15 Radio del Sensor.....	117
Figura 16 Board del sensor.....	117
Figura 17 Kit Sensores.....	118
Figura 18 Kit de sensores.....	118
Figura 19 Nodo Coordinador.....	118
Figura 20 Nodos Finales.....	119
Figura 21 Dispositivo Sniffer CC2531.....	119
Figura 22 Trama de comando.....	120
Figura 23 Trama de datos.....	120
Figura 24 Trama ACK.....	121
Figura 25 Trama de Beacon.....	121
Figura 26 WSN Implementada.....	123
Figura 27 Captura tramas nodo 0x102B.....	125
Figura 28 Captura tramas nodo 0x52FB.....	125
Figura 29 Programación nodos LabView.....	126
Figura 30 Sniffer capturando datos nodo final 1.....	128
Figura 31 Sniffer capturando datos nodo final 2.....	128
Figura 32 Diferencias resultados aplicación práctica WSN con CSMA y con PEMM.....	130

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Beacon Interval (BI)	29
Ecuación 2. Superframe Duration (SD)	29
Ecuación 3. Relación SO y BO.....	30
Ecuación 4. Relación Kbps y Símbolos.....	30
Ecuación 5. Periodo símbolo en segundos	30
Ecuación 6 Relación supertramas WSN	49
Ecuación 7 Intervalo Activo Supertrama	50
Ecuación 8 Tamaño Reservado Supertrama.....	50
Ecuación 9 Asignación excluyente	51
Ecuación 10 Total, disponible de time-slot Supertrama	51
Ecuación 11 Reservas GTS Supertrama	51
Ecuación 12 Obtención de BO	54
Ecuación 13 SD más mínimo CAP.....	54
Ecuación 14 Obtención SO	55

ACRONIMOS Y ABREVIATURAS

ADA-MAC: Adaptive MAC Protocol for Real Time – Método de planificación para redes de sensores

ACK: Acknowledgement – Acuse de recibo cuando se envía un paquete en una transmisión de datos en redes de computadores.

aMinCAPLength: Mínimo tamaño de CAP en el estándar IEEE 802.15.4

BI: Beacon Interval – Intervalo de Beacon

BO: Beacon Order – Orden de beacon, variable para calcular BI

BSFD: Basic Super Frame Duration – Duración básica de la super trama

BS-MAC: Bitmap Assisted Shortest Job First based MAC – Método de planificación

CAP: Contention Access Period – Periodo de acceso por contención

CC2530: Tecnología de microprocesadores para sensores de Texas Instrument

CFP: Contention Free Period – Periodo libre de contención

Contiki: Sistema operativo para sensores

CPAGA: Control Protocol for Any to Any GTS Allocation – Método de planificación de GTS.

CPS: Cyber Physical System – Sistema ciber físico

CSMA/CA: Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance – Acceso múltiple con detección de portadora / Prevención de colisiones

DIID: Dynamic Inflation Implicit Deflation Protocol – Método para manejar eventos esporádicos con WSN.

ECG: Electrocardiograma

EDF: Earliest Deadline First – Método de planificación

EDCF-mGTS: Earliest Delay Constraint with Minimum Guaranteed Time – Método de planificación.

EGSA: Explicit GTS Allocation Algorithm – Método de planificación para WSN.

FCFS: First Come First Served – Técnica de planificación: Primero en llegar, primero en atenderse

FFD: Full Function Device – Dispositivo con funciones completas

GAS: GTS Allocation and Scheduling algorithm – Algoritmo de planificación para WSN.

GHz: Giga Hertz

GTS: Guaranteed Time Slots – Espacios de tiempo garantizados

ID: Identificador de time-slot en el algoritmo PEMM

IEEE: Instituto de ingenieros eléctricos y electrónicos

I-GAME: Implicit GTS Allocation Mechanism – Método de planificación para redes de sensores

IoT: Internet of Things – Internet de las cosas

K: k-ésima supertrama en el algoritmo PEMM

KB: KiloBytes

Kbps: Kilobits por segundo

MAC: Media Access Control – Control de acceso al medio

Mbps: Megabits por Segundo

MCD: Máximo Común Divisor

MCM: Mínimo Común Múltiplo

MHz: Mega Hertz

MicaZ: Plataforma tecnológica de sensores

M2M: Machine to Machine – Maquina a maquina

ms: Milisegundos

N: Número de nodos en el algoritmo PEMM

NesC: Lenguaje de programación para sensores

Nts: Número máximo de time-slot por supertrama en el algoritmo PEMM.

NS2: Software para simular el comportamiento de redes de computadores

OpenZB: Sistema operativo para sensores

OSI: Open System Interconnection – Estándar para la Interconexión de sistemas abiertos

P: Tamaño del paquete de cada sensor en el algoritmo PEMM

PAN: Personal Area Network – Redes de área personal

PEMM: Algoritmo de planificación para WSN con Planificación Estática, utilizando técnicas matemáticas MCD y MCM en sus cálculos.

PSD: Extensión del archivo que genera el Sniffer cuando se capturan paquetes de una WSN.

RF: Radio Frecuencia

RFD: Reduced Function Device – Dispositivo con funciones reducidas

Round Robin: Método de planificación

Rts: Rango de time-slot que soporta el estándar para la asignación de los sensores en el algoritmo PEMM.

s: Segundos

S: Tamaño en bits de cada time-slot en el algoritmo PEMM

SD: Superframe Duration – Duración de supertrama

SJF: Shortest Job First – Método de planificación

SO: Superframe Order – Orden de supertrama, variable para calcular SD

ST: Tiempo de inicio de transmisión de la supertrama en PEMM

TDCS: Time Division Cluster Schedule – Método de planificación para WSN

TDMA: Time Division Multiple Access – Técnica de transmisión de datos

Time-Slot: Espacio de tiempo en una supertrama

TinyOS: Sistema Operativo Tiny de sensores

TKN15.4: Sistema Operativo para sensores

TR: Cantidad de reservas de GTS permitidas en el algoritmo PEEM.

Ts: Periodo de transmisión en el algoritmo PEMM

UART: Universal Asynchronous Receiver Transmitter – Conector de tarjeta de sensores

USB: Univeral Serial Bus – Puerto de conexión de sensores y otros dispositivos

VGTS: Virtual GTS – Espacios de tiempo garantizados virtuales

WBAN: Wireless Body Area Network – Red de área corporal inalámbrica.

WBASN: Wireless Body Area Sensor Network – Red de sensores de área corporal

WIFI: Wireless Fidelity – Fidelidad inalámbrica, consorcio de redes inalámbricas.

WSN: Wireless Sensor Network – Red de sensores inalámbrica

RESUMEN

Las redes de sensores inalámbricas (WSN: Wireless Sensor Network en inglés), son una tendencia tecnológica que ha tenido un gran protagonismo en los últimos años, sobre todo con el surgimiento de nuevas tecnologías como Internet de las cosas (*Internet of Things* - IoT), los sistemas ciberfísicos (Cyber Physical System - CPS), las aplicaciones máquina a máquina (Machine to Machine - M2M), entre otras. Una WSN es una alternativa que proporciona la infraestructura de internetworking sobre la cual se soportan muchas de estas tecnologías. Algunos ejemplos de aplicaciones de WSN se pueden encontrar en los campos de la telemedicina, la industria, en el monitoreo de eventos sísmicos, en el sector de la construcción, en aplicaciones agrícolas, entre muchas otras. Considerando la importancia de este tipo de redes, esta tesis se ha enfocado en el problema de la transmisión de datos en tiempo real sobre WSN. La revisión del estado del arte del tema ha permitido evidenciar, que aún faltan soluciones apropiadas en el área elegida. De manera particular en la solución de la siguiente pregunta de investigación ¿Cómo implementar mecanismos para garantizar la transmisión de datos en tiempo real, cuando los nodos en una WSN tienen requerimientos periódicos? Aunque problemas similares han sido extensivamente estudiados en la literatura científica, aún no hay un modelo que sea satisfactorio para aplicaciones con requerimientos de periodicidad de las transmisiones. En la presente tesis se ha desarrollado una solución al problema planteado en varias etapas. En primer lugar, se realizó una formulación formal del problema de planificación de un sistema de transmisión inalámbrico, que utiliza espacios de tiempo para garantizar la transmisión de datos, como un problema de satisfacción de restricciones. En segundo lugar, se diseñó un algoritmo de planificación, el cual arroja una planificación factible si es posible o indica que no es factible la instancia del problema presentada. Por último, se desarrolló una simulación y una implementación real del algoritmo, utilizando para ello el estándar IEEE 802.15.4, explotando principalmente el mecanismo de intervalos de tiempo garantizados (GTS), definido en el estándar. En el desarrollo de esta tesis, se ha denominado PEMM a la técnica de programación diseñada para la solución del problema abordado en la investigación. Los resultados obtenidos en el desempeño del algoritmo propuesto en las diferentes pruebas realizadas, fueron satisfactorios y permitieron validar la solución formulada.

ABSTRACT

Wireless Sensor Networks (WSN) are a technological trend that has played a major role in recent years, especially with the emergence of new technologies such as Internet of Things (IoT), Cyber Physical Systems (CPS), Machine to Machine (M2M) applications, among others. A WSN is an alternative to provide the networking infrastructure that supports many of these technologies. Some examples of WSN applications can be found in the fields of telemedicine, industry, monitoring seismic events, construction, agricultural applications, among many others. Considering the importance of these networks, this thesis addresses the problem of real-time data transmission over a WSN. The review of the state of the art has shown a lack of appropriate solutions in this area. In particular, the question addressed in this thesis is: How to implement mechanisms to guarantee data transmissions when the nodes in a WSN have periodicity requirements? Although similar problems have been extensively studied in the literature, there is still no model that is satisfactory for applications with periodicity requirements. This thesis develops a solution to this problem in various stages. In the first place, we give a formal formulation of the scheduling problem on a time-division wireless transmission system as a constraint satisfaction problem. In the second stage, we design a scheduling algorithm that produces a feasible schedule or reports that the problem is unfeasible for the given inputs. In the third stage, we developed both, a simulation and an actual implementation on an IEEE 802.15.4 network, exploiting the Guaranteed Time Slots (GTS) mechanism defined by this standard. We call PEMM the scheduling technique devised as a solution to the problem addressed in this thesis. The results obtained in the performance of the algorithm proposed in the different tests were satisfactory and allowed to validate the formulated solution.

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 ([37], [65], [68-69], [75-76] y [82], entre otros), en la comunidad científica internacional, pero que aún no dispone de una solución satisfactoria [110], por lo que se puede afirmar que la transmisión de datos en tiempo real en WSN aún es un tema abierto [112]. Lo anterior motivó al desarrollo de un nuevo procedimiento para garantizar la transmisión de datos en tiempo real en una WSN, particularmente a partir de la planificación de los recursos con los cuales se cuenta para la transmisión de datos en red, aprovechando los mecanismos que para tal fin se definen en la capa MAC de un determinado estándar. Para efectos de aplicación y pruebas del proceso propuesto, se ha tomado como referente la norma IEEE 802.15.4.

El algoritmo de planificación propuesto, se ha denominado PEMM, cuya sigla significa Planificación Estática con técnicas matemáticas MCD y MCM, el cual parte de una evaluación de la factibilidad que tiene una WSN de transmitir en tiempo real, a partir del número de nodos que la conforman, el tamaño de los paquetes a transmitir, los periodos de transmisión y la cantidad de recursos disponibles en la capa MAC de la misma. El diseño propuesto 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 ranuras de tiempo (*time-slots*) para la transmisión de datos.

El mecanismo GTS de IEEE 802.15.4, permite una asignación tipo *first-come first-served* [95] de cada uno de los time-slot disponibles, función bajo la responsabilidad del nodo coordinador de la red. Este esquema en su forma básica no es suficiente en muchos casos, pues se dispone de un conjunto de recursos muy limitado (7 GTS y 16 time-slot), que no explota la posibilidad de lograr un mejor aprovechamiento en función de los distintos requerimientos de cada nodo sensor, obligando a trabajar con métodos de contención como el que viene por defecto en el protocolo IEEE 802.15.4, denominado CSMA/CA [112]. Por lo anterior en este trabajo se ha desarrollado un mecanismo de planificación (PEMM) a nivel de capa MAC que permite establecer garantías de tiempo real para la transmisión de paquetes cuando los nodos presentan diferentes periodos de muestreo en la transmisión de datos y sobrepasan los límites establecidos en el protocolo.

La propuesta realizada fue comparada con otras soluciones desarrolladas, con el fin de establecer similitudes y diferencias del algoritmo propuesto versus trabajos previos que han sido documentados. El algoritmo PEMM fue diseñado en pseudocódigo y programado en SCILAB [96]. Este algoritmo, basa sus resultados en la simulación de diferentes casos de situaciones reales documentadas por otros autores, también el algoritmo PEMM fue implementado a manera demostrativa en una WSN real con tres nodos, leyendo dos variables ambientales y un nodo coordinador que dirige el proceso, que, si bien no explota toda la capacidad del

algoritmo, presenta una propuesta real de la implementación referente del funcionamiento de este tipo de redes, con el algoritmo diseñado.

Este documento presenta el desarrollo de la investigación propuesta, el cual se encuentra dividido en cuatro secciones: en la primera sección están las definiciones relacionadas con WSN, el estado del arte y los algoritmos previos diseñados con respecto al problema que se planteó para el desarrollo de esta investigación; en la segunda sección se encuentra la descripción del proceso de la transmisión de datos en tiempo real en WSN, en la parte final de esta sección se ha definido el problema que concierne a la planificación en WSN y las restricciones que hacen parte del mismo; en la tercera sección se encuentra el algoritmo propuesto (PEMM), donde se parte de la explicación de la forma en que se solucionan los requerimientos planteados en el problema de la sección anterior y se termina con un análisis comparativo del algoritmo diseñado (PEMM) y las soluciones más importantes referenciadas en el estado del arte del documento; por último, en la sección cuatro se describe el proceso de implementación, donde se describen las simulaciones realizadas y tomadas como referente para el funcionamiento de PEMM y el caso real implementado.

En la parte final de documento se pueden encontrar las conclusiones del trabajo realizado, los trabajos futuros propuestos y los referentes consultados para el desarrollo del proceso investigativo. Como anexos se tienen algunos de los diferentes artículos y publicaciones realizados durante el desarrollo de esta investigación.

1. LAS REDES DE SENSORES INALÁMBRICAS Y LOS ALGORITMOS DE PLANIFICACIÓN PARA LA TRANSMISIÓN DE DATOS

Las redes de sensores inalámbricas (WSN) se han constituido en una tecnología emergente y relativamente nueva [111], donde día a día aparecen nuevas aplicaciones, por ejemplo, en el desarrollo de sistemas de inteligencia ambiental [1], en el tratamiento de plantas hidrológicas [2], en el monitoreo de la humedad y temperatura en cultivos [3], en la prevención de incendios [4], en la medición de variables climáticas [5], en el monitoreo de personas mayores [6], en el cuidado de la salud [7], entre otras. Para algunas de estas aplicaciones se requiere la transmisión de datos en tiempo real, más aún cuando se está migrando de un paradigma de monitoreo en ciclo abierto a un paradigma de control en ciclo cerrado, como lo definen los sistemas ciber-físicos [8]; donde el primero se refiere al monitoreo de variables mediante sensores sin mayor control sobre el tiempo y recursos que utilizan para la transmisión de datos, obedeciendo generalmente a los métodos que por defecto utilizan las WSN o la tecnología asociada a las mismas; por otra parte un ciclo cerrado se refiere a acotar la forma de controlar la transmisión de datos, haciendo que esta sea más precisa, tanto en el tiempo programado, como en los recursos que utiliza para dicho proceso. Por tanto, se ha hecho necesario partir de algunas definiciones importantes, las cuales permiten comprender la relación entre las WSN, la transmisión de datos en tiempo real y los algoritmos de planificación.

1.1. DEFINICIÓN Y APLICACIONES DE LAS REDES DE SENSORES INALÁMBRICAS

Partiendo de la definición de [9], una WSN es una red de dispositivos, equipados con sensores, los cuales colaboran en una tarea común. Este tipo de redes son comunes en contextos donde se quieren medir variables de forma automática, es decir sin ninguna o con poca intervención humana. Estas tecnologías han sido objeto en los últimos años de muchos estudios, relacionados principalmente con la adquisición y tratamiento de datos [111 - 112]. Situación que se mantiene vigente con muchas posibilidades de mejora en cuanto a la implementación de los protocolos y técnicas que componen las mismas. Sobre todo, en lo relacionado con la planificación de los recursos que disponen para la transmisión de datos y con más requerimientos si se trata de situaciones en donde es indispensable hacerlo en tiempo real.

Para contextualizar y hacerse a una idea del alcance de este tipo de redes, a continuación, se nombran algunas aplicaciones de las WSN y las soluciones que

con base en estas redes se han propuesto. La descripción se ha realizado desde los aspectos relacionados con temas militares y seguridad, agricultura y medio ambiente, salud y situaciones de aplicación industrial.

1.1.1. Aplicaciones WSN en temas militares y de seguridad: Esta temática se ha tomado como referente inicial dada su importancia en la evolución de este tipo de tecnologías, pues fue precisamente en la búsqueda de soluciones militares donde inició la investigación y desarrollo de la tecnología WSN [10], al igual que muchos otros avances que se han dado en los últimos años a nivel redes y telecomunicaciones. Las aplicaciones a nivel militar de las WSN se dan gracias a su versatilidad de despliegue. Se pueden implementar sin una infraestructura rígida, colocando unos cuantos sensores en diferentes espacios e iniciar la captura de datos rápidamente. Un ejemplo de aplicación se describe en [10], donde se menciona un escenario de un ataque a un lugar con un gas contaminante, el cual puede afectar seriamente la salud de las personas y generar situaciones de alarma y atención inmediata. En el caso descrito la WSN tendrá la función de dar a conocer la trayectoria de la combinación de los gases que componen el ataque, la velocidad y forma de propagación, con el fin de ayudar a mitigar la situación. En el ejemplo se hace referencia a una red denominada: SensorNetSwats [11]. Otros ejemplos adicionales se presentan en [12-14].

1.1.2. Aplicaciones WSN en la agricultura y medio ambiente: Algunas aplicaciones de las WSN en esta área incluyen: la detección de incendios forestales, la detección de inundaciones, el monitoreo de animales, el monitoreo de glaciares para comprender el cambio climático [10], entre otros. Un ejemplo de aplicación específico se describe en [15], donde se expone la implementación de una WSN para agricultura de precisión, la cual busca la gestión del recurso hídrico y la mejora en la productividad de los cultivos, midiendo para ello continuamente las variables del estado del suelo, estado del agua y de las plantas a nivel general. Con el fin de controlar el riego y aplicación de abono sobre las mismas. Otros ejemplos en este tipo de aplicaciones se pueden encontrar en [16-18].

1.1.3. Aplicaciones WSN en Salud: Con respecto a este tipo de aplicaciones son muchas las que se han realizado [19], además continuamente se están desarrollando nuevas. No es un secreto que la búsqueda de soluciones que propendan por mejorar las condiciones de vida y atención a las personas es una prioridad mundial, de allí que las investigaciones en este tipo de aplicaciones sean muy comunes. Un ejemplo específico se tiene en [20], donde se describe una aplicación llamada Cardio Sentinal, que corresponde a una WSN que se encarga del monitoreo remoto de señales cardiacas, vinculando en la iniciativa el uso de teléfonos inteligentes y un servicio de atención las 24 horas. La idea de la red es sensar continuamente a los pacientes con los dispositivos cardiacos diseñados, utilizando un sensor ECG y en caso de una emergencia o alteración de las variables

normales del paciente informar al centro médico a cargo y activar un protocolo de atención si así es necesario.

1.1.4. Aplicaciones WSN en entornos industriales: Este es otro de tipo de aplicaciones muy comunes en las WSN, además gracias a este tipo de desarrollos se ha vinculado otras tecnologías complementarias o principales según sea el caso, tales como IoT, M2M, entre otras. Ejemplos específicos en este tipo de aplicaciones se tiene en el desarrollo de automóviles con o sin funciones de inteligencia [9], control domótico de edificios [21], manejo de plantas químicas para la producción de elementos de belleza [22], manejo de bandas en la producción en serie de partes industriales [23], entre otros.

1.2. ESTÁNDARES Y PROTOCOLOS DE LAS REDES DE SENSORES INALÁMBRICAS

Tomando como referencia a [24], una WSN se constituye como una agrupación de múltiples sensores, dispersos en un determinado espacio, con un fin específico, con la característica de ser redes de bajo costo, con poco consumo de energía y que transmiten señales a cortas distancias. Este tipo de redes se puede implementar mediante diferentes normas y protocolos, por ejemplo, con: Bluetooth (IEEE 802.15.1), WiFi (IEEE 802.11x), IEEE 802.15.4, IEEE 802.15.6, ZigBee y WirelessHart.

1.2.1. Bluetooth: Con respecto a este protocolo, es amplia la literatura al respecto, por lo tanto y para fines de la situación que se describe, se mencionarán de manera general algunas limitaciones que tiene esta tecnología con respecto a la implementación como red de sensores, que según [26] corresponden a:

- Requieren de un nodo maestro que constantemente realice operaciones de consulta a los sensores (polling), en donde el nodo esclavo siempre debe permanecer encendido, por cuanto no se puede predecir cuándo será interrogado por el maestro.
- Cantidad limitada de esclavos en la red.
- Para redes de sensores de gran tamaño se requeriría una gran cantidad de nodos maestros. Además, sólo se admiten siete nodos esclavos activos, si un octavo nodo quiere pasar de pasivo a activo será rechazado por el maestro.
- Es una tecnología de transmisión de datos de corto alcance.

1.2.2. WiFi (Wireless Fidelity): Su funcionamiento se basa en el protocolo IEEE 802.11x, también es una tecnología de amplia difusión y aplicación. Presenta algunas limitaciones para aplicaciones de WSN. Según [26] son:

- Requiere que los nodos estén escuchando permanentemente el medio, dado que pueden recibir un paquete en cualquier momento.
- Están orientados a la transmisión de altas tasas de datos, por lo tanto, requieren niveles de energía relativamente altos, que para las redes de sensores usualmente no son prácticos.
- Utilizan el protocolo CSMA/CA para acceder al medio, que trabaja sobre contención y no asigna canales directos para la transmisión.

1.2.3. IEEE 802.15.4: Este protocolo se explica con mayor detalle en el siguiente apartado de este capítulo. Es importante mencionar que es considerado como el referente principal en el estudio de las WSN, su definición y características son a su vez la base de otras tecnologías como ZigBee.

1.2.4. ZigBee: Es una tecnología que se basa en las capas física y de acceso al medio de IEEE 802.15.4, aparte de las cuales también define las capas de servicios de red, aplicación y seguridad [27]. El enfoque principal de este tipo de redes es dirigido hacia aplicaciones que requieren comunicaciones seguras, con baja tasa de envío de datos y maximización de la vida útil de sus baterías [28]. Como se mencionó anteriormente a parte de las capas de servicio de red, aplicación y seguridad, es un protocolo que extiende sus funcionalidades en IEEE 802.15.4, por lo tanto, es una tecnología factible para transmisión de datos en tiempo real con el algoritmo propuesto en este trabajo.

1.2.5. IEEE 802.15.6: Define las redes de sensores de área corporal (WBAN: Wireless Body Area Network) [29], es decir son un tipo especial de WSN, pero con una aplicación específica en temas de salud para el ser humano. En este nuevo estándar se proponen nuevas capas física y de enlace. La capa física no es una sola, sino que tiene tres alternativas, dependiendo de la necesidad o aplicación donde se utilice [30]: Narrowband (NB), Ultra wideband (UWB) y Human Body Communications (HBC). De acuerdo con [29], la capa de enlace o MAC utiliza también tres métodos para acceder al canal y transmitir datos: modo beacon con límites de supertramas, modo sin beacon, con límites de supertramas y sin límites de supertramas; la diferencia principal con respecto al estándar IEEE 802.15.4, es que no utiliza GTS, aunque persiste el uso de time-slot de igual tamaño, supertramas y el uso de CAP con control de acceso de CSMA/CA. Este estándar debido a que incorpora el uso de supertramas y estructura de beacons, también hace posible, que a futuro se pueda hacer una adaptación del algoritmo propuesto a este tipo de tecnologías. Por otra parte, es importante mencionar que mientras las WSN son de aplicación general, las WBAN son más de aplicaciones dirigidas a la biomedicina [30]. en la tabla 1, se pueden apreciar algunas diferencias entre IEEE 802.15.4 e IEEE 802.15.6.

Tabla 1 **Diferencias IEEE 802.15.4 e IEEE 802.15.6**

Característica	IEEE 802.15.4	IEEE 802.15.6
Nodos	Pequeños con posibilidad de cambiar sus baterías,	Mucho más pequeños y con recursos más limitados en

	con recursos de memoria y procesamiento bajos.	cuanto a memoria y procesador que los se usa en IEEE 802.15.4.
	Existen tres tipos: Coordinador, Dispositivos finales y routers.	Sólo existen dos tipos: sensores y coordinadores.
	Los nodos pueden tener varias funcionalidades al tiempo: coordinador o sensor.	Cada tipo de nodo sólo puede ejercer el rol que le corresponde.
Despliegue y densidad	Se utilizan nodos redundantes en la medición de las variables, en algunos contextos importa mucho la ubicación en otros no es significativa. Muchos nodos generalmente.	Los nodos generalmente se ubican de forma estratégica en diferentes partes del cuerpo. Pocos nodos.
Tasas de transmisión	Sus dispositivos generalmente son homogéneos y manejan tasas de 250kbps.	Se requieren dispositivos de alta fiabilidad y bajo retardo, son a menudo heterogéneos. Las tasas van desde los 10kbps hasta los 10Mbps.
Rango	Hasta 75 metros	Rango limitado: desde milímetros hasta centímetros.
Topología	Estrella, árbol y malla	Variable de acuerdo a la complejidad del cuerpo humano.
Acceso a sensores	Fácilmente reemplazables, incluso desechables.	Dificultad cuando son implantados, además pueden ser más costosos de acuerdo a lo que sensen en el cuerpo humano.

Fuente: [30]

1.2.6. WirelessHART: Es una tecnología cuya sigla significa: Wireless Highway Addressable Remote Transducer, y que según [31], corresponde al primer estándar abierto de comunicación inalámbrica específicamente diseñado para aplicaciones de control de procesos, liberado en el año 2007. Este estándar se compone de las siguientes capas: Física, Enlace (MAC), Red, Transporte y Aplicación. En cuanto a los nodos que componen una red con WirelessHART se tiene: dispositivos de campo, dispositivos de mano, gateway y administrador de red. Soporta topologías en estrella y malla principalmente. Este estándar se diseñó pensando en características de robustez y confiabilidad para aplicaciones industriales, pero, según [32], debido al control y necesidad de confirmación de envío y recepción de

información para garantizar una comunicación efectiva, no es recomendado para procesos con tiempo real. Sin embargo, debido a que utiliza la base de IEEE 802.15.4 en la capa física [38], podría tener situaciones donde se adapte el algoritmo propuesto.

1.3. EL ESTÁNDAR IEEE 802.15.4.

1.3.1 Definición IEEE 802.15.4: Es el referente que se ha utilizado como ejemplo de aplicación de la técnica de planificación desarrollada para WSN descrita en este documento, que se apoya en la implementación de mecanismos de acceso al medio por división en el tiempo que ofrece este estándar. Esta norma se ha definido como un protocolo de radio frecuencia, de naturaleza inalámbrica [39]. Se considera la base de la tecnología denominada de manera comercial como “Zigbee”, acorde con [40], es un conjunto de protocolos de alto nivel, abiertos y globales para comunicación inalámbrica en las redes de área personal (PAN) y de sensores inalámbricos (WSN). En los últimos años ha incursionado en diferentes aplicaciones, en campos como el militar, la domótica, la industria, la salud, el entretenimiento, el monitoreo y control inteligente de sistemas de generación y distribución de energía, denominados como Smart Grid. Una diferencia importante entre IEEE 802.15.4 y ZigBee es que el primero sólo define las capas: física y de enlace, mientras que ZigBee define las capas superiores partiendo de la capa de red.

1.3.2 Características generales de IEEE 802.15.4: De acuerdo con [40], IEEE 802.15.4 fue diseñado con las siguientes especificaciones:

- Pueden trabajar tanto en las bandas de 2.4 GHz como en la de 868/915 MHz.
- Tasa de transmisión de hasta 250 kbps en 2.4 GHz, 40kbps en 915MHz y 20 kbps en 868 MHz.
- Para acceder al canal de comunicaciones utilizan, CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access Collision Avoidance) cuando se trabaja por contención y GTS si se lo hace sin contención.
- Producen alto rendimiento y baja latencia para dispositivos de bajo ciclo de trabajo, muy adecuado para sensores y actuadores.
- Baja potencia. Es muy útil para equipos que utilizan baterías.
- 64 bits de direccionamiento que determinan la cantidad máxima de dispositivos.
- 16 bits para identificar redes que determina un total de 65536 redes.
- Permite el uso de ranuras de tiempo (time slots) para posibilitar aplicaciones de baja latencia.
- Rango: hasta 75 mts (valor típico, depende del ambiente).
- Este estándar ofrece diferentes modos de transmisión de datos en la capa MAC, donde está la opción de hacerlo por contención con CSMA/CA y mediante técnicas de acceso en tiempo real por medio de GTS, que es un método que permite hacer reservas de time-slots para garantizar la

transmisión de datos por parte de los nodos que conforman la WSN.

1.3.3. Topologías para IEEE 802.15.4: Se utilizan básicamente dos tipos de topologías [40], las cuales corresponden a: Topología Estrella (star topology) y Topología en malla (mesh topology), ver figura 1.



Figura 1 Topologías WSN.
Fuente [40]

Con las topologías mencionadas el estándar busca que se cumplan con las características básicas de una WSN [40], donde la principal característica es la operación a cortas distancias, reducida velocidad y baja potencia. Con las dos topologías antes mencionada también se pueden crear configuraciones denominadas “cluster-tree topology”, ver figura 2.

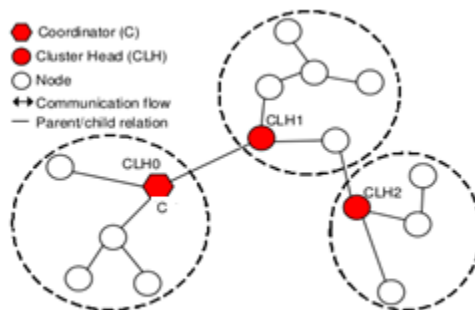


Figura 2 Cluster-tree topology
Fuente [40]

1.3.4 Tipos de dispositivos para IEEE 802.15.4: De acuerdo con [40], los dispositivos se pueden clasificar en:

- Dispositivo FFD (Full Function Device): Controla el ruteado y la administración de la red, este dispositivo generalmente es el nodo coordinador en una WSN.
- Dispositivo RFD (Reduced-function device): Es un elemento pasivo de la red, dispone de una funcionalidad mínima para ser capaz de responder a peticiones de dispositivos superiores.

1.3.5. Capa de Acceso al Medio del Protocolo IEEE 802.15.4: Los diferentes dispositivos que conforman una WSN, se ubican en la parte eléctrica, electrónica y de configuración básica para establecer la conectividad entre los sensores de una WSN y conforman en conjunto con sus características propias la denominada capa física. Mientras que los procesos que comprenden el acceso al medio y la transmisión de datos a otros dispositivos de nivel intermedio (para que luego dicha información llegue a las aplicaciones finales), se dan en la denominada capa de acceso al medio o MAC. La capa MAC funciona mediante dos mecanismos para acceder al canal de comunicaciones [41], los cuales corresponden a:

1.3.5.1. Mecanismo de contención básico CSMA/CA: Es la forma por defecto para acceder al medio, donde un nodo sensor (RFD o FFD) sensa el canal antes de iniciar una transmisión. Este modo se define con dos variables de estado: BE que es el exponente utilizado por el algoritmo de *backoff* y NB que es quien determina el número de veces que el algoritmo requiere el backoff para acceder al medio. Con estas dos variables opera el mecanismo que busca encontrar el canal libre para transmitir, donde en caso de no encontrar disponibilidad de canal libre, intentará nuevamente el proceso mediante la ampliación de un tiempo aleatorio, acorde con la expresión 2^{BE-1} , hasta obtener un canal libre y poder transmitir. En este mecanismo pueden existir colisiones cuando dos nodos acceden al mismo tiempo y en esos casos se aplica el algoritmo de *backoff (de tiempo aleatorio)*. NB tiene un valor máximo ($macMaxCSMABackoffs=4$), cuando se aplica este algoritmo y se supera este valor, se desestima continuar intentando enviar el paquete.

1.3.5.2. Modo Beacon-Activo: En este modo el coordinador de la red, que es un dispositivo FFD y único en la WSN para topologías en estrella, se encarga de administrar y sincronizar los nodos, enviando periódicamente pequeñas tramas a los dispositivos RFD, denominadas *beacons*, las cuales permiten a cada nodo identificarse y sincronizarse con el nodo coordinador en la WSN. El procedimiento anterior basa su funcionamiento en una estructura denominada *Supertrama*, la cual está constituida por dos partes: una denominada “activa”, que la componen un campo de beacon y 16 time-slots de igual tamaño. La otra se denomina “inactiva”, y durante esta el dispositivo RFD entra en reposo o modo dormido. El límite entre una supertrama y otra lo definen las *beacons*, las cuales siempre se envían al inicio de la mismas.

La parte activa se divide en dos periodos en los que se utilizan distintos métodos de acceso al medio: por contención (CAP: *Contention Access Period*) y libre de contención (CFP: *Contention Free Period*). El periodo CAP utiliza CSMA/CA como mecanismo de acceso al medio, mientras que en el acceso CFP se utiliza una técnica denominada intervalo de tiempo garantizado o GTS (*Guaranteed Time Slots*). Para esto, el estándar IEEE 802.15.4 reserva hasta 7 GTS, los cuales se asignan de manera directa por el coordinador de la red, ya sea en una topología estrella o malla. En una transmisión que opera en el modo beacon-activo, pueden habilitarse: sólo el acceso CAP, el acceso CFP o ambos, según lo defina el

coordinador y existan condiciones especiales para cada requerimiento, por ejemplo si se trabaja sólo con acceso por contención con la técnica de acceso al medio CSMA/CA, se puede trabajar sólo con CAP, si se quiere hacer uso de GTS en situaciones de transmisión en tiempo real, lo recomendable será trabajar con CFP y si se trabaja con GTS, pero se tienen algunos nodos que no dispondrán de GTS se puede habilitar también CSMA/CA, por lo que se puede hacer uso de CAP y CFP. En la figura 3 se pueden identificar las partes antes mencionadas:

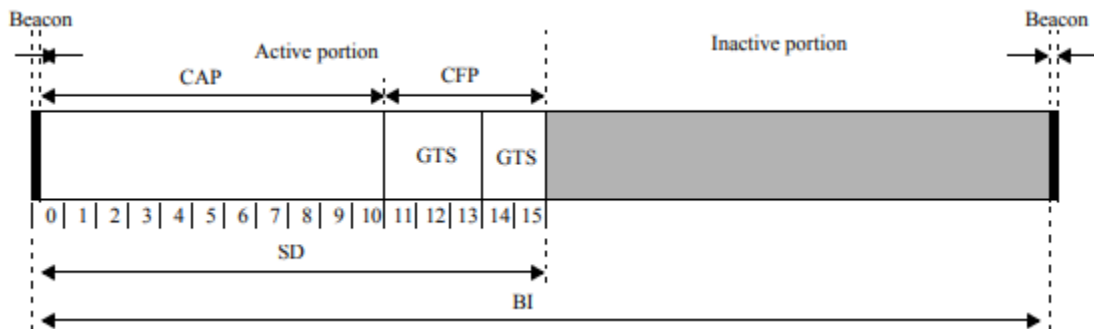


Figura 3 Estructura Supertrama IEEE 802.15.4
Fuente: [113]

En el modo beacon-activo se definen los parámetros que determinan el tamaño y tiempo de la supertrama, que también establecen las características de los slots. Según [42], estos parámetros son: BI (*Beacon Interval*), que corresponde al intervalo de beacon y es el tiempo total que dura la supertrama. Esta variable se define con la siguiente expresión (Ecuación 1):

$$BI = BSFD * 2^{BO}$$

Ecuación 1. Beacon Interval (BI)

Donde BSFD (Base Super Frame Duration) es el valor definido por el estándar y puede constituirse como el valor mínimo que puede tomar el intervalo de beacon, viene dado en símbolos y es igual 960 de acuerdo con el estándar IEEE 802.15.4 [113]. Beacon Order (BO) es un valor entre 0 y 14, que determina el tamaño del intervalo de *beacon* y se define al configurar la red.

Otra variable que interviene en este proceso es Superframe Duration (SD), que determina la longitud de la parte activa de la supertrama (dada en símbolos), esta variable se define con la siguiente expresión (Ecuación 2):

$$SD = BSFD * 2^{SO}$$

Ecuación 2. Superframe Duration (SD)

Donde, BSFD es igual a 960 símbolos. *Superframe Order* (SO), es un valor entre 0

y 14, que determina el tamaño y tiempo de los slots que componen la parte activa. Al igual que BO es una variable configurable en el nodo coordinador.

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

$$0 \leq SO \leq BO$$

Ecuación 3. Relación SO y BO

Las ecuaciones (1) y (2) se dan en función de la transmisión de un símbolo en la capa física, el cual es definido por el estándar IEEE 802.15.4 [113] y permite establecer una correspondencia con la duración de la supertrama y el intervalo de *beacon* (BI). De acuerdo con [43 - 44] un símbolo corresponde a 4 bits.

El periodo de símbolo depende de la frecuencia con la cual trabaja el estándar, que a su vez define la tasa de transmisión permitida, por ejemplo: para la frecuencia 2.4 GHz se tiene una tasa de transmisión de 250 kbps, lo que significa que dicho valor transformado a símbolos es 62.500 símbolos (Ecuación 4) y el valor en segundos de un periodo de símbolo 0,000016 s (Expresión 5).

$$250\text{kbps} = 62.500 \frac{\text{símbolos}}{\text{s}}$$

Ecuación 4. Relación Kbps y Símbolos

$$P_s = 0,000016\text{s}$$

Ecuación 5. Periodo símbolo en segundos

En la tabla 2 se pueden apreciar los periodos de símbolo de acuerdo con las frecuencias y tasas de transmisión que permite el estándar IEEE 802.15.4.

Tabla 2 **Periodos de símbolo IEEE 802.15.4**

Frecuencia	Tasa de Transmisión	No. Bits por símbolo	Periodo de símbolo
868 Mhz	20 kbps	4	0,2 ms
915 Mhz	40 kbps	4	0,1 ms
2,4 Ghz	250 kbps	4	0,016 ms

Fuente: esta investigación.

Cuando el nodo coordinador establece que se trabajará con GTS, se hará uso de CFP para la asignación de los time-slot, donde de acuerdo con el estándar IEEE 802.15.4, pueden existir hasta máximo 7 GTS, los cuales pueden agrupar varios time-slot de forma contigua. Si se utilizan todas las ranuras para GTS, sólo quedará la parte de CAP mínima obligatoria que define el estándar [113].

Mediante el modo CFP se pueden establecer mecanismos que buscan garantizar la latencia en la transmisión, debido a que se puede asignar de manera directa uno o más *time-slot* para un dispositivo que requiera transmitir información prioritaria, evitando la variabilidad inherente al acceso al medio, que se presenta cuando se hace por medio de los protocolos por contención. El proceso descrito implica que sea necesario el análisis de los recursos con los que se cuenta en la red y la forma en que serán asignados dichos recursos. Es decir, en esta situación es donde se debe evaluar la aplicación de una técnica o procedimiento que permita una eficiente asignación y planificación de los *time-slots* que conforman la supertrama en forma de GTS, analizando la posibilidad de poder hacerlo para que permitan garantizar una transmisión de datos en tiempo real.

1.4. ALGORITMOS DE PLANIFICACIÓN PARA LA TRANSMISIÓN DE DATOS EN WSN – ESTADO DEL ARTE TIEMPO REAL.

El problema que relaciona el presente documento se enfocó hacia el estudio de soluciones que permitieran a los nodos de una WSN, garantizar una transmisión de datos en tiempo real, como se ha mencionado anteriormente este tema tiene muchos trabajos relacionados entorno a la literatura científica, pero también se ha constatado que el problema sigue abierto a nuevas soluciones y mejoras que ayuden a disminuir la latencia y congestión en la transmisión de datos [112]. En este apartado del documento se ha realizado una revisión bibliográfica de algunos trabajos relacionados con el problema planteado, identificando las soluciones que por sus características se asemejan a la solución planteada o que por sus resultados han servido como referentes.

Se han utilizado WSN en diferentes aplicaciones y áreas que relacionan al hombre, por ejemplo, en lo que refiere a situaciones médicas, se pueden mencionar las que tratan en: [45], donde se describe la aplicación de una WSN para entornos cerrados, que habla acerca del funcionamiento de esta tecnología y se evalúa su rendimiento con respecto al espacio y medio utilizado. En investigaciones, como las mencionadas en [46-47], se puede apreciar la aplicación de WSN con características de transmisión en tiempo real, en la configuración de una red corporal (WBSN) y en la aplicación de WSN para pacientes con enfermedades crónicas. Las dos investigaciones permiten evaluar los beneficios de utilizar WSN en campos de la salud. Otras referencias importantes son [19], [41] y [48-49], donde los autores hacen un estado del arte con respecto a los sistemas WSN y la captura de señales biomédicas, evaluando las características para poder realizar la transmisión en tiempo real. Estos estudios han permitido identificar algunas aplicaciones que ya se han probado en términos de WSN para la salud y las características sobre todo del medio y protocolos en la capa MAC para poder realizar la transmisión en tiempo real. Un aporte importante de los trabajos mencionados corresponde al estudio y aplicación de GTS en el manejo del canal para transmitir datos en tiempo real. En [112], se analiza el control de congestión en redes sensores inalámbricas en relación con sus diferentes formas de transmisión

de datos, en especial cuando se hacen en tiempo real, en esta referencia se hace un estudio de las diferentes aplicaciones que se han realizado con respecto a la temática propuesta y considera que la transmisión de datos en tiempo real y control de la congestión en este tipo de redes es un tema abierto y con muchos problemas por solucionar. Por otro lado en [50] se puede encontrar una tesis doctoral que analiza los problemas asociados con la transmisión en tiempo real y la planificación en la asignación de recursos para el proceso, el problema se analiza desde la capa MAC, aplicado a topologías en malla, utilizando principalmente la técnica EDF (Earliest Deadline First), que constituye un algoritmo de mejor esfuerzo y no da garantías de cumplimiento en tiempo real, por ello utiliza para acceder al medio CSMA/CA y manejo de prioridades por sensor para asignar el recurso necesario para la transmisión de datos. Teniendo en cuenta lo anterior y la variedad de estudios que existen alrededor del tema, a continuación, se presenta el estado del estado del arte de estudios relacionados con la aplicación de IEEE 802.15.4, pero haciendo especial énfasis en la transmisión de datos y manejo de la información desde la capa MAC, clasificando este estudio desde diferentes tópicos: los relacionados con el rendimiento del protocolo (latencia y pérdida de paquetes), los que manejan GTS, aquellos que proponen métodos alternativos y los que utilizan topologías diferentes a la de estrella.

1.4.1 Estudios Relacionados con el Rendimiento del Protocolo IEEE 802.15.4:

Existen diferentes estudios que analizan y miden el rendimiento del protocolo IEEE 802.15.4, en relación con el acceso al medio. En esta sección se consideran aquellos que ponderan la eficiencia del protocolo con respecto a métricas tales como: consumo de energía, latencia de las tramas, tasa de transmisión¹ y pérdida de paquetes. A continuación, se hace una relación de algunas publicaciones importantes alrededor de esta problemática.

1.4.1.1. Soluciones que abordan la latencia en la transmisión como prioridad:

La latencia en la transmisión es un factor ampliamente considerado en la literatura científica, la cual puede estar asociada a diferentes situaciones, tales como el manejo del tamaño de los paquetes que se transmiten, el tiempo de duración de la supertrama y el número de sensores asociados a un coordinador, entre otros.

En el estudio de Chao [35], se prefiere sacrificar el tiempo de reposo de un sensor haciendo que las variables antes definidas, las cuales controlan el intervalo de transmisión (BO) y tamaño de supertrama (SO), sean iguales en el valor de 0, lo que significa que $BO=SO$, con el fin de lograr atender todos los requerimientos, sobre todo cuando es necesaria una transmisión inmediata, con lo que se aumenta el consumo de energía. Esta solución no considera las necesidades de las aplicaciones, las cuales podrían permitir operar con periodos activos menores o mayores. En Ramesh [51], por el contrario, no se igualan las variables en mención (SO y BO), sino que se estudia la forma de encontrar el mejor valor para la variable BO, proceso que se basa en el modelo de cadenas de Markov, aunque también

relaciona la distribución de Poisson y el método de Montecarlo, entre otros. En [51] con las técnicas utilizadas se logra reducir el tiempo de procesamiento y la pérdida de paquetes principalmente, encontrando que el valor de BO entre 0 y 3 es el más efectivo para evitar mayores retardos en la transmisión, esto debido a que la supertrama con dichos valores será mucho más pequeña, lo que hace que se disminuya los tiempos de espera para la transmisión de paquetes. Así mismo se identifica que la pérdida de paquetes es alta; mientras que el valor de BO entre 4 y 14 aumenta el retardo y se pierden menos paquetes, pero se desperdicia mucho ancho de banda. Estudios similares, que modelan mediante las cadenas de Markov, se pueden encontrar en [35] y [52-54]. Una conclusión similar presenta [43], donde mediante técnicas de simulación encuentra que entre mayor sea el valor de BO con respecto a un valor de $SO=0$, la latencia es mayor. Por otro lado en [55], se presenta una investigación que trabaja con la parte de contención de una supertrama, pero introduciendo el concepto de servicio diferencial, es decir si bien cuando se trabaja con supertramas, los time-slot que proporciona el estándar son iguales, hay situaciones en las cuales se puede requerir tamaños diferentes y prioridades diferentes, la solución de [55] trata este tipo de situaciones, no tiene en cuenta GTS, dado que no lo considera como una buena opción en el proceso de planificación, sino que trabaja con contención y el uso de la parte CAP de la supertrama, el proceso se desarrolló mediante el uso de un modelo basado en cadenas Markov.

En el estudio que presenta Martínez [56], se encuentra que una de las mejores maneras de disminuir la latencia es mediante el uso de intervalos de tiempo garantizado (GTS). Donde Martínez, clasifica los requerimientos de los nodos sensores en dos grupos: uno los de alto desempeño y otro con los de bajo desempeño. Para los primeros se recomienda el uso de GTS, mientras que para los segundos utiliza los métodos de contención con CSMA/CA. En [56] se modela el sistema mediante redes Petri y se exponen las ventajas del uso de esta técnica validando el ejercicio mediante simulaciones, logrando evidenciar que priorizar los requerimientos ayuda en la elección de la técnica a utilizar en la transmisión de datos. Por otro lado, en [57] sostienen también que valores de SO por encima de 7, tienden a ralentizar el proceso de transmisión de datos y por ende disminuye el rendimiento de la red, dado que se cuenta con un posible exceso de ancho de banda que será subutilizado. El autor del estudio, mediante las diferentes simulaciones aplicadas, propone como valores adecuados el rango entre 2 y 5 para SO, con lo cual se puede evidenciar una menor latencia en la transmisión de datos.

En Kim et al. [58-59] exponen, que la latencia es un factor crítico en la transmisión de datos, sobre todo en aplicaciones relacionadas con el sector salud y cuidado de pacientes. Por lo anterior se identifica la necesidad de hacer una eficiente planificación de la asignación de GTS a los nodos sensores que así lo requieran, proponiendo una asignación de prioridades a los sensores, de acuerdo a los datos que transmiten, con el fin de generar transmisiones preferenciales. En el estudio de [57-58], se trabaja con diferentes tipos de variables biomédicas (ECG: electrocardiograma, EEG: electroencefalograma y EMG: electromiografía), con la condición que todas son importantes para transmitir, pero unas con mayor urgencia que otras. El estudio propone el uso de CFP con GTS, pero también tiene en cuenta

CAP con CSMA/CA. La investigación se basa principalmente en trabajar con las prioridades de los sensores y usar CFP para las de mayor importancia y dejar a CAP para las que no revistan requerimientos de transmisión en tiempo real. Otro estudio relacionado con este tipo de aplicaciones se encuentra en [36], donde se propone un método para disminuir la latencia en la asignación automática que hace el protocolo de los *time-slot*. Este método propone una mejora al funcionamiento de CSMA/CA por ende solo se aplica en el periodo CAP en modo beacon. El método utiliza $BO=SO$, con un valor estimado en 3 para estas variables, este resultado se originó a partir de varias simulaciones en el software NS2, la propuesta presentada por el autor pondera principalmente las solicitudes que llegan al nodo coordinador. Los resultados en el estudio realizado fueron: menor pérdida de paquetes, mejor rendimiento de la red y disminución de los retardos, soluciones que se aplicaron a los casos planteados, que no consideran la generalización a otras situaciones. En el trabajo de Shen [60], se propone un protocolo de acceso al medio basado en prioridades (PriorityMAC), para WSN, el cual consiste en analizar la planificación de asignación de *time-slot* y acceso al canal, utilizando CSMA/CA y GTS, es decir propone un híbrido en el tratamiento de las peticiones de los sensores, para casos donde la latencia no sea estricta se usa CSMA/CA, con algunas variaciones en su funcionamiento propuestas por el autor de la investigación. Mientras que en los casos que se requiera transmisión en tiempo real se usa GTS. El enfoque es para aplicaciones industriales principalmente, donde cada petición es tratada acorde al requerimiento y procesada con el mínimo retardo posible; el ejercicio se hizo mediante simulaciones. Un estudio similar con el manejo de acceso al medio por contención CAP y mediante CFP es presentado por Alvi et al. [61], quienes proponen un nuevo protocolo denominado BS-MAC (Bitmap-Assisted Shortest Job First Based MAC). Este protocolo busca que siempre haya suficientes *time-slot* para satisfacer los requerimientos de los sensores al nodo coordinador. En este estudio se utilizó el algoritmo de planificación SJF (Shortest Job First). Según los resultados del estudio los autores manifiestan que se logra transmitir más datos con menor retardo y disminuir el consumo de energía en el proceso. Otro estudio que busca mejorar el rendimiento se relaciona en [62], donde los autores analizan el rendimiento de las WSN utilizadas en el ser humano, aplicadas a la salud. En el estudio relacionado se maneja las variables para obtener el BI y SD de las supertramas, pero se aplica para un mejor uso de la energía de los nodos que conforman la red. Este estudio trabaja con CSMA/CA, por lo tanto, no ofrece garantías de transmisión en tiempo real.

1.4.1.2. Soluciones que abordan la pérdida de paquetes como elemento principal: A continuación, se referencian estudios centrados principalmente en la pérdida de paquetes en WSN y que tienen relación directa con el manejo de las variables que determinan el intervalo de beacon y tamaño de la supertrama principalmente.

En primera instancia se tiene a Hernández [63], quien evalúa el comportamiento del protocolo con diferentes sistemas operativos para sensores, tales como: Contiki, TinyOS, OpenZB y TKN15.4. El análisis se hace considerando los valores de la variable BO entre 0 y 14. La investigación utiliza diferentes implementaciones en los

sistemas antes mencionados, donde el autor del estudio, identifica que el sistema con mejores prestaciones es TKN15.4, situación que se explica teniendo en cuenta las diferencias que tienen cada uno de los sistemas estudiados en referencia con: los algoritmos, plataformas de hardware que aceptan, técnicas y protocolos de acceso al medio principalmente. Otro estudio que evalúa la asignación eficiente de *time-slot* se encuentra en [46], donde el autor de la investigación, propone un algoritmo basado en la denominada lógica difusa (fuzzy logic en inglés). En este estudio se propone un método que permite identificar el mejor valor para SO a partir de un valor por defecto de BO, y las características de la topología de la WSN, el número de sensores, el tamaño de los paquetes a enviar y el número de paquetes por sensor. El algoritmo trabaja con intervalos definidos y tamaños de paquete conocidos antes de iniciar la transmisión, con la particularidad de que el algoritmo basa sus cálculos para encontrar el valor de SO en 30 reglas de lógica difusa, cerrando las posibilidades de convertirse en una solución abierta, puesto que se aplica para unos casos específicos. Los resultados indicados en el estudio permiten evidenciar que hay menores pérdidas de datos y menor latencia en la transmisión, de acuerdo con las condiciones especificadas en el mismo cuando se trabaja con valores intermedios de SO, debido principalmente a que el tamaño del buffer para atender los requerimientos es adecuado para la demanda de canal de los sensores, lo que permitirá que se puedan atender más sensores en el momento de la transmisión. Por el contrario, cuando se trabaja con valores de SO pequeños, las pérdidas de paquetes, tanto en reintentos de acceso al medio, como en descarte de paquetes son mayores, debido a que no hay tiempo suficiente para retransmisiones, lo que genera pérdida de paquetes e incremento de la latencia. Rane [57] también estudia el comportamiento del tráfico de la WSN y la pérdida de paquetes. Entre sus conclusiones encuentra que, valores mayores a siete (7) en la variable SO generan un mayor ciclo de trabajo y exigen mayor procesamiento debido a que pueden generarse más solicitudes de *time-slot*, llenando las colas para atender requerimientos. Si no se cuenta con los recursos necesarios y la cola de transmisión aumenta indiscriminadamente, habrá mayor pérdida de paquetes. Una situación similar presenta Sarairoh [64], donde se puede encontrar un análisis del rendimiento que puede tener una WSN y la pérdida de paquetes que se puede presentar con el uso de GTS en varios escenarios: principalmente cuando los nodos no tienen interferencia y cuando tienen algún tipo de interferencia. El ejercicio se hace con varias simulaciones, donde el número de paquetes varía de 14 a 30 por segundo, en periodos de tiempo de 50 segundos cada una. En el estudio el autor encontró que el valor que menos pérdida de paquetes presentó es el de tres *time-slot* por GTS, el cual sólo se aplica a los escenarios planteados.

1.4.2 Estudios relacionados que consideran el manejo de GTS en las soluciones propuestas: En esta clasificación se presentan estudios que intentan manejar de manera eficiente la transmisión de datos en la capa MAC, principalmente cuando la latencia es uno de sus requerimientos importantes. En esta parte se ha dividido la exploración de los estudios en cuatro grupos, en primera instancia se tiene los que priorizan el control de admisión en la planificación de GTS; en segundo lugar, están los que tienen en cuenta la variación del comportamiento de CAP y CFP de la supertrama; en tercer lugar, se ubican los que tienen en cuenta

el algoritmo de planificación de GTS y por último los que modifican la estructura de la supertrama en el estándar IEEE 802.15.4. En todos los casos se busca disminuir la latencia, mejorar el manejo de ancho de banda y los tiempos de procesamiento.

1.4.2.1. Soluciones con control de admisión: En este apartado se tiene a Koubaa et al. [65], quienes presentan el diseño de un mecanismo denominado i-GAME (Implicit GTS Allocation Mechanism), el cual fue implementado bajo el sistema operativo para sensores denominado TinyOS y desarrollado en el lenguaje de programación NesC. El mecanismo funciona en la capa de acceso al medio del protocolo IEEE 802.15.4, donde tiene la función de administrar el control de admisión y asignación de requerimientos de GTS. El objetivo del desarrollo propuesto fue manejar eventos sensibles al retardo en redes WSN. Por ello dentro del mismo se incluyó un algoritmo para la gestión del mecanismo, que contiene la función de control de admisión, encargada de admitir o rechazar las peticiones de los sensores con respecto a GTS. El funcionamiento del algoritmo se basa principalmente en las prioridades que puedan tener los sensores con respecto a la función que desempeñan, en especial las que son sensibles al tiempo. En un segundo estudio [105], los mismos autores presentan la implementación del mecanismo, este segundo trabajo se realiza considerando el funcionamiento con tareas periódicas. Para el nuevo estudio aparte de i-GAME, aplican el modelo de análisis matemático denominado Network Calculus [106], que trabaja con el análisis de sistemas de colas deterministas con un flujo de datos de características conocidas. En la implementación se permite que varios dispositivos compartan un mismo conjunto de GTS a través del algoritmo de planificación Round Robin, teniendo en cuenta las siguientes premisas: a. los nodos candidatos a GTS comparten la misma ranura en diferentes momentos, pero con tasas de llegada similares y b. las tareas no hacen uso de la reserva de recursos adicionales que se hace en cada supertrama al inicio del proceso de planificación, las cuales se utilizarán para eventos esporádicos obligatoriamente. De acuerdo con los autores del estudio, la implementación del mecanismo (i-GAME) con las herramientas matemáticas y de planificación propuestas en la investigación, permitieron hacer un mejor manejo del uso del ancho de banda en WSN que utilizan IEEE 802.15.4 y GTS en el acceso al medio, donde concluyeron que el método fue funcional en la planificación de recursos y control de admisión. Por otro lado, en [66], se propone una técnica que emplea TDMA basada en el IEEE 802.15.4 modificado, trabajando con topología estrella manejando principalmente los retardos de los nodos en relación con su ciclo de trabajo y el manejo de ancho de banda del canal; en la propuesta se trabaja con un CSMA/CA modificado y no trabajan de forma directa con GTS.

1.4.2.2. Soluciones que ajustan CAP y CFP: Esta revisión parte de los estudios de [67-68], donde se desarrolla un algoritmo denominado ADA-MAC (Adaptive MAC Protocol for Real-time), el cual define una nueva versión del acceso al medio para IEEE 802.15.4. Trabaja con 64 *mini-time-slot* e invierte la forma de la supertrama, haciendo que primero se utilice el espacio para CFP y luego para CAP. En el proceso de asignación de GTS se tienen en cuenta las prioridades de los requerimientos, los que son agrupados en tres colas así: prioridad alta que corresponde a la cola de

ráfagas de información esporádica con prioridad y retardos mínimos; colas de datos periódicos, las cuales se programan en el momento de sincronizar con el nodo coordinador y se utiliza para los datos que se transmiten en tiempo real; y por último las colas de prioridad normal o baja, que se utiliza para datos con tolerancia a retardos mayores. En las dos primeras colas se usa siempre CFP y sólo para datos no sensibles al retardo se usa CAP. El estudio concluye que el uso de los mini-time-slots ayudan en el manejo eficiente de la asignación de GTS, sobre todo cuando se utiliza para requerimientos de tiempo real, dejando que la parte de la supertrama de CAP se encargue de los requerimientos menos críticos. Con respecto al manejo de las partes CAP y CFP de la supertrama se tiene en [69], un estudio de Choi y Kim, quienes proponen un protocolo denominado "FieldBus", el cual según sus autores es capaz de transmitir datos periódicos con requerimientos de tiempo real, esporádicos con diferente prioridad y sin requerimientos de tiempo real. Fieldbus modifica el estándar IEEE 802.15.4 original, dado que propone trabajar con la parte inactiva de la supertrama para tomarla como una ampliación de CAP y atender así solicitudes por contención en los casos que sea necesario, con lo que se busca incrementar el tamaño de almacenamiento disponible en los time-slots. La transmisión de eventos periódicos se hace durante el CFP. El CAP se utiliza para la transmisión de eventos esporádicos y que no tienen requerimientos de tiempo real. El protocolo se implementó mediante simulaciones y acorde con los resultados presentados por los autores del estudio revisado, concluyeron que se logró mejorar la transmisión de datos en las situaciones propuestas. En el estudio también se considera que un trabajo futuro y complemento al mismo sería la redirección hacia una asignación y planificación eficiente de los GTS en sistemas con múltiples coordinadores. Por otro lado, Chen et al. [70] proponen mejorar el estándar IEEE802.15.4 modificando la estructura de la supertrama, disminuyendo el tiempo de cada mini time-slot y eliminando el periodo de acceso al medio por contención (CAP); dejando así sólo la parte libre de contención (CFP). Los autores concluyen que, con estos cambios en la estructura de la supertrama, se tienen más ventajas, puesto que se aumenta el número de time-slot y se trabaja directamente con GTS en el periodo CFP, lo que permite una planificación factible de los time-slot, logrando así reducir la latencia y permitiendo mayor disponibilidad y respuesta a requerimientos críticos de los sensores.

1.4.2.3. Soluciones que proponen algoritmos de planificación para GTS: Para esta parte del estado del arte se inicia con Na [37], quien propone un algoritmo denominado GAS (GTS Allocation and Scheduling algorithm), que según su autor se diseñó para resolver los problemas que aquejan la asignación eficiente de GTS en una WSN con IEEE 802.15.4. El algoritmo intenta proporcionar de manera eficiente la forma en que se ubican los time-slot garantizados, a aplicaciones sensibles al retardo, mediante una adecuada organización del proceso de asignar GTS, con el fin de evitar la escasez y subutilización de los mismos. Este algoritmo se basa en el modelo de planificación EDF (Earliest Deadline First), que asigna los time-slot en orden de los mensajes que se encuentren más cercanos a su límite de tiempo (deadline). Partiendo de este método el autor presenta una variación denominada EDCF-mGTS (Earliest Delay Constraint with Minimum Guaranteed Time), en la cual se tiene en cuenta la prioridad a la hora de asignar los recursos.

En el estudio se propone manejar las variables SO y BO con el mismo valor (SO=BO), como una condición general, por lo que los sensores están en continuo funcionamiento sin periodo de reposo, pero en atención constante a los requerimientos que se presenten. El algoritmo se valida en diferentes simulaciones y acorde con las conclusiones del estudio se logró manejar eficientemente la planificación en la asignación de GTS en requerimientos sensibles al retardo. El autor del estudio, también expone que en un futuro trabajo sería importante manejar correctamente los valores SO y BO, principalmente el de SO, que determina la longitud de la supertrama y el tiempo de los time-slot. Comparativamente con la presente tesis doctoral, este estudio se diferencia en el manejo de las variables SO y BO, dado que en el diseño del nuevo algoritmo se tendrá en cuenta el tiempo de reposo de los sensores y por tanto no se tiene como opción hacer BO=SO como única opción.

En [71-72], se encuentra una implementación de un sistema para la planificación de transmisiones periódicas con el estándar IEEE 802.15.4, mediante un algoritmo basado en EDF. En los estudios relacionados se utilizan las capas básicas del estándar (física y de acceso al medio), pero usan la tecnología WirelessHart en la implementación de la solución completa, que es una tecnología que incorpora un protocolo para redes inalámbricas con topología tipo malla, usada principalmente para procesos de automatización industrial. La solución propuesta además de buscar transmitir en tiempo real, también busca reducir el consumo de energía, mejorar el uso del ancho de banda y disminuir la latencia en el proceso, objetivos que, según los autores del estudio revisado, se logran mediante la solución propuesta. En este nuevo estudio los autores distan de la propuesta de tesis doctoral en el uso de WirelessHart, que es una tecnología externa a estándar IEEE 802.15.4, donde interactúan aplicaciones de procesos de control con el protocolo Hart, diseñado para dichas funciones.

1.4.2.4. Soluciones que proponen modificar la estructura de la supertrama de IEEE 802.15.4: En este apartado se inicia con el trabajo de Semprebom et al. [83-84], donde el número de time-slot GTS que se definen por defecto en el estándar IEEE 802.15.4 no es suficiente, debido a que se quedan muchos requerimientos sin atender, sobre todo cuando se tiene una tasa de paquetes alta y por ende los retardos en la entrega de los mismos pueden ser cada vez mayores. Por lo anterior los autores proponen un modelo dinámico para el manejo de tareas en tiempo real basado en la forma (m, k)-firm constraints, donde m son los mensajes a transmitir y k los plazos consecutivos en los cuales se deben transmitir. El modelo propone un sistema polinomial en el manejo de los time-slot, de manera que se puedan asignar los GTS eficientemente. El estudio se probó en diferentes simulaciones y también en experimentaciones con sensores MicaZ, evidenciando resultados factibles con respecto al logro de transmitir en tiempo real, aun cuando se debe modificar el estándar. Otro estudio que relaciona la asignación dinámica de time-slot para GTS, la cual puede aumentar o disminuir se presenta en [73], donde Wavage y Kaushik, proponen una modificación a la supertrama por defecto que ofrece el estándar IEEE 802.15.4. Esta modificación consiste en utilizar la parte inactiva de la misma para asignar lo que los autores denominan GTS virtuales o VGTS, que corresponden a

time-slot que se asignarán cuando se presenten requerimientos adicionales, principalmente en eventos esporádicos, so pena de reducir el periodo inactivo del sensor coordinador, sin afectar los tiempos de los demás sensores.

Por otro lado, se tiene a Cheng et al [74], quienes proponen una modificación al estándar IEEE 802.15.4, que consiste en manejar 16 mini time-slot durante el CFP, con lo cual se logra atender más peticiones y de esta manera disponer de más time-slot para transmitir la información de los nodos de la WSN. Otros autores que siguen con esta misma línea de modificar la cantidad de time-slots y asignación de GTS, se referencian en [75], quienes presentan un enfoque del manejo de CFP, donde al igual que [74], proponen el uso de 16 mini time-slot, pero con la variante de manejar eventos periódicos y mensajes en tiempo real. En esta propuesta los requerimientos y restricciones con respecto al retardo son la prioridad, por ello se hace una planificación del ancho de banda antes del proceso de transmisión, pero la constante es que se debe hacer una asignación de más time-slot para GTS, desviándose por lo tanto del estándar IEEE 802.15.4.

En esta misma línea de subdivisión de time-slot se encuentra Haque [76], quien propone un nuevo algoritmo para la asignación eficiente de GTS en el estándar IEEE 802.15.4, el cual reduce el tamaño de los time-slot a la mitad, manejando 32 mini time-slot, en lugar de los 16 del protocolo original. El cambio en la cantidad y tamaño de los time-slot que propone el autor del estudio revisado, lo basa en que una ranura de CAP acorde al protocolo original es igual a una ranura de CFP, pero en esta última, para la supertrama: la transmisión no entra en contención; sino que se asigna de forma directa, lo que da mayor velocidad al proceso, teniendo en cuenta esto el autor de la investigación revisada, afirma que se podría mejorar esta parte de la supertrama, si se subdividen los time-slot en ranuras más pequeñas, específicamente en una relación de SD/32, lo que significa, que en este nuevo modelo no sólo se podrían asignar 7 GTS, sino que podrían ser hasta 14. El estudio indica que los resultados obtenidos, producto de simulaciones realizadas trabajando con más time-slot para los requerimientos de los sensores, mejoraron el aprovechamiento del canal y aumentaron la velocidad de procesamiento. Como también se evidenció que la modificación propuesta incrementa el consumo de energía con respecto al estándar original. Este trabajo presenta un comparativo con respecto a los algoritmos i-GAME [65] y GAS [37], previamente descritos, y sus resultados fueron superiores en rendimiento y velocidad principalmente. Estudios similares a los expuestos se encuentran en [67-68], cuyo algoritmo ADA fue explicado en el apartado anterior. Este algoritmo se aplicó a sistemas ciberfísicos relacionados con el área de la salud.

1.4.3 Estudios relacionados con métodos alternativos en la búsqueda de soluciones para la transmisión en tiempo real: Para esta parte del estudio se parte de las referencias de [77-78], donde Hayashi y Takai, presentan un algoritmo que trabaja con un método alternativo en la planificación y asignación de GTS, el cual se denomina *dinámica de consenso*. En este método se cuenta con un nodo coordinador de la red que tiene una comunicación directa con los nodos de la misma red, denominados agentes. Esta propuesta se basa en la modificación del estándar

IEEE 802.15.4, específicamente en el manejo de la supertrama para transmisiones en tiempo real, proponiendo una supertrama múltiple que puede abarcar varias supertramas, es decir propone una ampliación a la estructura actual del estándar y que funcionará mediante un periodo de tiempo determinado, el cual puede contener varios intervalos de beacon internamente. Mediante el algoritmo propuesto, se busca garantizar que las tareas en lo máximo posible logren completar su ejecución, para ello asignan time-slot y GTS, según sea necesario. En este algoritmo también se contemplan tareas no preferentes las cuales pueden ser interrumpidas, pero son casos excepcionales y buscan que con la múltiple supertrama definida todas las tareas pueden tener garantizado su tiempo de transmisión. El proceso propuesto tiene varias fases, una offline donde se planifica los GTS, otra de comunicación entre agentes y coordinador mediante la supertrama múltiple; y una más de control de acceso y ejecución de las tareas. El algoritmo se probó en una simulación que tiene una WSN con topología estrella, con un nodo coordinador y varios nodos que funcionan como agentes en la planificación por consenso de los GTS. El algoritmo propuesto trabajó con eventos periódicos y buscó que se manejen en tiempo real. Según los autores del estudio y los resultados encontrados en las pruebas realizadas en las simulaciones, se concluye que el algoritmo logra una planificación eficiente acorde con la múltiple supertrama, para la ejecución de las tareas y asignación de GTS; pero que aún quedan temas importantes por resolver como son: la pérdida de paquetes y el control de retrasos en el manejo de los requerimientos de nodos sensores, lo que aún no posibilita la transmisión en tiempo real; que según la publicación serán tema de posteriores estudios.

Siguiendo con la línea de métodos alternativos Anbagi et al. [79-80] proponen el diseño de un nuevo algoritmo para la asignación de GTS, denominado AGTS (Allocation GTS), el cual se basa en combinar las redes WSN con Smart-Grids (Redes inteligentes) con el propósito es reducir la latencia, realizar una asignación eficiente de GTS y si es necesario desasignar un GTS en caso de que un dispositivo no lo requiera. Este proceso como se ha mencionado es alternativo, no toma el concepto de WSN de manera específica, sino que reúne otras tecnologías asociadas para encontrar una solución al problema de transmitir en tiempo real. El proceso se realizó en una WSN con topología en malla, se basa en manejar los dispositivos FFD de manera inteligente y se proponen a futuro trabajar con el nodo coordinador en diferentes clusters, para de esta manera poder centralizar el control del algoritmo propuesto y obtener un mejor rendimiento.

Por otro lado, Zhang et al. [81] proponen el diseño de un algoritmo adaptativo que busca disminuir la latencia, mejorar la equidad en la asignación de GTS y la utilización del ancho de banda en redes WBASN (Wireless Body Area Sensor Network). En el estudio los autores, buscan manejar eficientemente la energía de los sensores y asignar prioridades a los paquetes, de acuerdo con la variable que estén midiendo. El algoritmo trabaja con la parte CFP de la supertrama, definiendo como constantes los valores para las variables de SO y BO (3 y 4 respectivamente). El ejercicio se valida mediante diferentes pruebas, basadas en un modelo de simulación que utiliza la distribución de Poisson para modelar la llegada de los paquetes en diferentes tiempos, evidenciando que se disminuye el consumo de

energía de los nodos y se planifica correctamente la asignación de espacios de tiempo a los sensores cumplen las prioridades que se han definido. El algoritmo y la aplicación en sí, están enfocados hacia sistemas médicos y de apoyo a la salud. Otro algoritmo que busca realizar la planificación y asignación eficiente de GTS en tiempo real y que va en la misma línea del anterior se encuentra en [82], donde los autores proponen aplicar el algoritmo en una WSN con topología en estrella y varios nodos conectados al nodo coordinador. El proceso consiste en desarrollar procedimientos que les permita calcular los valores de BO y SO, donde parten del supuesto que los nodos envían mensajes con periodo y longitud conocidos, utilizando la cantidad de GTS necesarios en el proceso. Mediante otro procedimiento hacen la planificación de los GTS a partir del BO y SO, aunque según las simulaciones y pruebas realizadas logran una eficiente planificación, aún en el tema de asignación de GTS tienen problemas, debido a que la cantidad de ese tipo de recursos es limitada y no se puede asignar este elemento a todos los nodos que lo soliciten.

1.4.4. Estudios Relacionados con la asignación de GTS en WSN con Topologías Malla o Árbol: Así como existen estudios que se han concentrado en el análisis del comportamiento de WSN con el estándar IEEE 802.15.4 con topología estrella, también se han adelantado algunas investigaciones que relacionan la topología malla o árbol. A continuación, se mencionan algunos referentes en este aspecto. Se han adicionado estudios relacionados con la topología, debido a que la forma en que los nodos operan no es la misma y estos cambios pueden afectar la transmisión de datos en tiempo real. Si bien no es el fin de este trabajo proponer una solución en este tipo de situaciones, es importante conocer el manejo de este tipo de situaciones para trabajos futuros.

1.4.4.1. Soluciones sensibles al tiempo: En este apartado se inicia con Azzeem et al [89], quienes proponen un protocolo de control que busca la articulación en la transmisión de la información, desde un nodo a otro en una topología malla, principalmente con eventos periódicos y esporádicos sobre múltiples saltos. Este algoritmo se denomina CPAGA (Control Protocol for Any to Any (A2A) GTS Allocation). El estudio se realizó y validó mediante simulaciones (con el programa OPNET). La principal característica del algoritmo propuesto es que está enfocado hacia tiempo real, con nodos en posiciones fijas y el uso de GTS para la transmisión de paquetes. El protocolo parte de una planificación offline de los posibles GTS a requerir y luego hace la asignación en el intervalo de beacon correspondiente. Los autores del estudio revisado concluyen que el algoritmo permite una asignación factible de los recursos disponibles en el nodo coordinador, sobre todo para requerimientos en tiempo real, en el manejo de eventos periódicos y esporádicos que se puedan presentar. Otro estudio con este mismo enfoque se encuentra en Choi y Lee [90], donde se hace referencia a un mecanismo de propagación de eventos multisalto en redes con topología malla o árbol, con la particularidad de hacerlo mediante modificaciones a la trama de beacon para conocer la relación con el anterior y próximo salto y así determinar el número de coordinadores en la red, que según los autores del estudio revisado, corresponde a $N = 2^{(BO-SO)}$, donde N sería el número de coordinadores necesarios en este tipo de redes y que debido a

la relación que BO siempre será mayor o igual que SO, se garantizaría un número exponencial de posibles coordinadores, que puedan satisfacer la atención a los nodos de la red. El estudio se realizó bajo una simulación con el programa NS2 y los principales objetivos del estudio se enfocaron hacia la reducción de la latencia y manejo eficiente del ancho de banda. En el estudio se concluye que el mecanismo propuesto es efectivo, puesto que en los resultados obtenidos se identificó una considerable reducción en la latencia, de hasta un 95% comparado con el CSMA/CA y un manejo eficiente en la entrega de paquetes de hasta un 100% de confiabilidad.

1.4.4.2. Soluciones que relacionan la disminución del consumo de energía:

Para este caso, un referente importante es Hanzalek y Jurcik [85], quienes proponen un algoritmo para una técnica de distribución de tiempo para transacciones de nodos con topología tipo malla o árbol en redes WSN multisalto denominada TDCS (Time Division Cluster Schedule). TDCS está enfocada hacia eventos periódicos principalmente, el objetivo del algoritmo propuesto es cumplir con todos los plazos de tiempo extremo a extremo, dados a los requerimientos en los clusters definidos, reduciendo al máximo el consumo de energía en el proceso. La metodología propuesta en [85] trabaja con clusters de nodos en una WSN, donde cada cluster aplica GTS, definiendo un periodo de Beacon, pero que en el contexto general de la WSN se maneja el máximo valor posible del mismo, mientras que con respecto al SD se parte del mínimo valor posible, con el fin de buscar un equilibrio en el tiempo de trabajo de los nodos y el tiempo de reposo de los mismos, buscando principalmente reducir el consumo de energía, si bien se busca cumplir con los requerimiento extremo a extremo, el tiempo real no es la prioridad principal. Otro trabajo relacionado con este tipo de WSN es el de Azzem et al [86], donde se diseña un nuevo protocolo denominado DIID (dynamic inflation implicit deflation protocol), que modifica la estructura original de IEEE 802.15.4, con el fin de poder manejar eventos esporádicos y periódicos de manera eficiente. Según los autores del estudio, el proceso consiste en reservar espacios de *time-slot* para futuros eventos esporádicos, con la salvedad de no utilizar dichos espacios, sino cuando el evento se presente, el cual debe cumplir con unos criterios determinados que relacionan los recursos a asignar. Este procedimiento hace que todo evento esporádico sea sometido a una prueba de aceptabilidad, lo que le permitirá la asignación del GTS requerido, mientras que la otra parte de la supertrama se usará para los eventos periódicos previamente identificados. La propuesta intenta también disminuir el consumo de energía de los dispositivos y hacer una eficiente asignación de los recursos de la red.

Por otro lado, Ahmad et al. [87] presentan una propuesta de un nuevo algoritmo que permite manejar una red de sensores WSN con topología en árbol, mediante un modelo polinomial el cual se basa en la planificación por cluster. En este modelo, cada rama del árbol es un cluster y el algoritmo busca la forma de asignar de la mejor manera los GTS y reducir el consumo de energía. Esta propuesta basa su funcionamiento en un BI lo más grande posible e igual para el cluster, que hacen parte de la red, con lo cual se pretende disminuir el ciclo de trabajo de cada uno de los nodos coordinadores en contienda. Los SD de los cluster serán variables y estarán asociados a los tamaños y periodos de los paquetes que se transmiten. En

resumen, el algoritmo determina la parte activa y el BI de cada cluster y encuentra los tamaños de los SD por cluster. Se basa en el problema del camino más corto para encontrar la solución a la planificación en desarrollo, y con respecto a este último aspecto intenta hacer una planificación de GTS efectiva. Por último, se tiene a Kim et al. [88], donde proponen un algoritmo para mejorar el manejo del tiempo de vida de una WSN, en cuanto a la energía que consumen sus dispositivos, la cual utiliza GTS en la transmisión de paquetes entre sus nodos, la propuesta está dirigida a redes de sensores con topología árbol y el énfasis principal que analizan los autores del estudio, es la planificación del uso de ciclo de trabajo en la asignación de GTS de cada uno de los clusters que forman la WSN en árbol. El método usado es holístico y se enfoca en la solución de tres problemas: la construcción lógica de los clusters en la topología árbol de la red WSN; una efectiva configuración de cada uno de los sensores con respecto al uso de la energía; y la planificación del ciclo de trabajo de cada cluster y en general de la red. Según los autores al solucionar los problemas planteados se logró mejorar el funcionamiento de la red en tiempo real y el ahorro en el consumo de energía por parte de los nodos, esto debido en términos generales a la mejora del ciclo de trabajo de los sensores en la WSN.

2. LA TRANSMISIÓN DE DATOS EN TIEMPO REAL PARA WSN

2.1. SISTEMAS DE TRANSMISIÓN DE DATOS EN TIEMPO REAL

Son sistemas informáticos, donde la respuesta de aplicación ante requerimiento externos, debe realizarse dentro de un plazo de tiempo establecido [91], es decir se planea y se exige un cumplimiento de las actividades que desarrolla el sistema en el tiempo, donde generalmente hasta una diferencia en milisegundos es significativa y del cumplimiento del mismo se establece la fiabilidad o no, de una transmisión de datos en tiempo real. Este tipo de sistemas intentan determinar el comportamiento en la ejecución de los procesos que lo conforman, dependiendo de la predictibilidad del tiempo de respuesta que tenga el sistema ante la llegada de un determinado requerimiento, donde se puede determinar si el sistema es capaz de ofrecer una respuesta correcta en un tiempo acotado [91]. Esta característica permite conocer el posible comportamiento del sistema de transmisión de datos en tiempo real, donde de acuerdo a las condiciones que se presenten, se puede analizar los posibles tiempos de respuesta que pueda tener.

Con respecto a las WSN, cuando se habla de sistemas de transmisión de datos en tiempo real, se hace referencia a la forma en que este tipo de redes pueden configurarse para poder garantizar a los nodos, una transmisión de datos cumpliendo los requerimientos de tiempo que se ha fijado para ellos. Donde se espera que la latencia garantizada esté dentro de los parámetros asociados a la configuración física de los dispositivos utilizados y no se vea afectada por otros factores lógicos que puedan ampliarla, por ejemplo, un tiempo de espera adicional debido a la no disponibilidad de espacio en el canal de transmisión, o por el exceso de nodos en la red, entre otros. En términos de [92], en los sistemas de tiempo real, el funcionamiento es correcto, cuando las acciones se ejecutan según lo planeado en términos de la acción que deben hacer (aspecto funcional), pero sobre todo dentro del intervalo de tiempo especificado (aspecto no funcional).

Por otra parte, es importante mencionar que esta investigación relaciona la forma en que la planificación permite el manejo de la latencia garantizada proporcionando para ello los recursos de transmisión necesarios a los nodos en una WSN, lo que permite la transmisión de datos en tiempo real. Es decir, se parte de la premisa que si un nodo en una WSN, tiene garantizado uno o un conjunto de time-slots (acorde con IEEE 802.15.4 denominado GTS) necesarios para la transmisión de datos, sin ningún tipo de negociación, o acceso al medio para llegar a una asignación por contención, es factible garantizar que este nodo pueda transmitir en tiempo real de acuerdo con la planificación que se haya realizado. Lo anterior también permite deducir que cuando los nodos de una WSN tienen que competir por los recursos en

el medio (time-slots), para poder transmitir en tiempo real no hay garantías de que siempre estén los recursos disponibles, haciendo que en algún momento un nodo tenga que esperar para poder hacer su transmisión, introduciendo latencia adicional en el sistema, (es importante mencionar que para el caso de WSN con IEEE 802.15.4 se manejan periodos de tiempos mínimos que son determinados por el estándar y una solución que intente proponer una planificación que los involucre debe sujetarse a los mismos, como es el caso del algoritmo propuesto en esta investigación, que maneja estos tiempos en función del BFSD) y en algunos casos hasta pérdida de paquetes.

2.1.1. Sistemas de tiempo real críticos y acrílicos: Dentro de los sistemas de tiempo real existen diferentes clasificaciones de acuerdo al funcionamiento de los mismos, dentro de estas clasificaciones se tiene a los sistemas críticos que corresponde a sistemas que obedecen a unas restricciones específicas con respecto a su funcionamiento, entre las cuales se encuentran [92]:

- Deben ejecutar sus acciones en un plazo de respuesta estricto
- El comportamiento temporal está determinado por el entorno
- El comportamiento del sistema en sobrecargas es predecible
- Manejan requisitos de seguridad críticos
- Operan con redundancia activa
- Manejan un volumen de datos reducido.

Por otra parte, se tiene los sistemas de tiempo real que se configuran como no críticos, donde algunas características principales de los mismos son [92]:

- Manejan un plazo de respuesta flexible
- Comportamiento temporal determinado por el computador
- Comportamiento en sobrecargas degradado
- Requisitos de seguridad acrílicos
- Recuperación de fallos
- Gran volumen de datos

2.1.2. Sistemas de tiempo real con respuesta garantizada y del mejor esfuerzo:

Se refiere a los sistemas que se caracterizan por su grado de determinismo temporal, es decir se basan en cumplir con grado estricto las condiciones de tiempo con las cuales fueron configurados o en manejar algunas consideraciones que los pueden hacer menos estrictos. Con respecto a los sistemas que manejan respuesta garantizada se puede destacar lo siguiente [92]: el comportamiento de un sistema se hace en el tiempo, con garantías de cumplimiento como las analizadas en la sección 2.1.1, donde se caracteriza con precisión la carga máxima y los posibles fallos.

Con respecto a los sistemas que manejan el denominado mejor esfuerzo, se tienen las siguientes características [92]: su comportamiento temporal es de tipo “lo mejor que se pueda hacer”, no hay una caracterización precisa de carga y fallos y están diseñados para trabajar principalmente, en sistemas de tiempo real acrícos.

Teniendo en cuenta lo anterior es preciso señalar, que la propuesta del algoritmo de planificación para WSN con características de transmisión en tiempo real, que se describe en este documento, tomó como referencia la clasificación de sistemas acrícos, principalmente por el manejo de respuesta flexible y el comportamiento temporal determinado por la configuración que se hace en los nodos sensores; además se trabaja con clasificación de respuesta garantizada., por cuanto se planifica cumplir con precisión la carga máxima que manejará el nodo coordinador en respuesta de los requerimientos de los nodos sensores que conforman la WSN, garantizando recursos para cumplir con los tiempos de transmisión de datos programados.

2.2. DIFERENCIAS ENTRE LOS ALGORITMOS DE PLANIFICACIÓN DE DATOS EN TIEMPO REAL PARA WSN

Tomando como base las definiciones descritas anteriormente y el estado del arte acerca de los algoritmos de planificación para sistemas de tiempo real con WSN, descrita en la sección 1.4 de este documento, se ha generado la tabla 3, la cual resume los estudios y algoritmos identificados, destacando principalmente las siguientes variables: técnicas que se enfocan en tiempo real, topología sobre la cual se hace el estudio, el tipo de enfoque del algoritmo, los valores propuestos para las variables BO y SO, finalizando con la cantidad de time-slot que maneja el algoritmo propuesto.

Tabla 3 Estudios y algoritmos para MAC IEEE 802.15.4.

Topología	Tipo Evento	Estudio / Algoritmo	Tiempo Real	Enfoque	BO	SO	Time-Slot
Estrella	Periódico	EGSA [75]	Si	Planificación – (Respuesta garantizada)	0-14	0-14	16 mini
		Haque [76]	Si	Planificación – (Respuesta garantizada)	8	6	32
		Martinez [56]	Si	Energía y Latencia (Metodología)	ND	ND	16

		Yoo et al [82]	Si	Planificación – (Mejor esfuerzo)	Calcula	Calcula	16
	Periódico / Esporádico	I-GAME [65]	Si	Planificación – Round Robin (Mejor esfuerzo)	ND	ND	16
		GAS [37]	Si	Planificación – EDF (Mejor esfuerzo)	8	8	16
		ADA-MAC [68]	Si	Planificación – (Mejor Esfuerzo)	4	4	64 mini
		FieldBus [69]	Si	Planificación – (Mejor Esfuerzo)	ND	ND	16
Árbol / Malla	Periódico / Esporádico	DIID [86]	Si	Planificación – (Mejor esfuerzo)	4	0-1	16
		AGTS [88]	Si	Planificación – (Mejor Esfuerzo)	Variab le	Variab le	16
		PriorityMA C [60]	Si	Planificación – (Mejor Esfuerzo)	Variab le	Variab le	16

Fuente: esta investigación.

En la tabla 3, se puede observar que todos los algoritmos estudiados, tienen como objetivo la transmisión de datos en tiempo real, de los cuales se identifica que tres (3) estudios ([68] y [75-76]) proponen una modificación en la estructura de la supertrama propuesta en el estándar tomado como caso de aplicación IEEE 802.15.4. Los demás estudios siguen con la subdivisión de la supertrama en máximo 16 time-slot. Tres (3) de los estudios ([60], [86] y [88]) proponen alternativas de planificación en topologías árbol o malla con características de tiempo real, el resto trabaja con la topología en estrella. Cuatro (4) estudios ([56], [75-76] y [82]) proponen algoritmos para manejar sólo eventos periódicos. Todos los estudios tienen en cuenta la planificación en el momento de proponer un nuevo algoritmo o mejora en las WSN, específicamente a la norma IEEE 802.15.4 original. Identificándose, que si bien, en los estudios revisados se encuentra que los autores proponen soluciones al problema identificado en esta investigación que refiere a la transmisión de datos en tiempo real para WSN, aún las mismas no resuelven el problema completamente, principalmente en lo relacionado con el uso de técnicas

de planificación y conservación de las características iniciales del estándar (IEEE 802.15.4) que se ha tomado como caso de estudio. En el caso de [65], [68], [75-76] y [82], se modifica el estándar para cumplir con los requerimientos de tiempo real; en [65] se cambia la forma de asignar los time-slot, en donde no son exclusivos para un nodo en una transmisión, sino que se comparten para lograr una mayor asignación de los mismos; en [68] se trabaja con mini-time-slot, que resultan de disminuir el tamaño de los 16 time-slot originalmente definidos en el estándar; en [75-76] y [82] se cambia principalmente la cantidad y tamaño de los time-slot, que si bien son una solución que puede ayudar a minimizar el inconveniente estudiado, no constituyen una solución que permita resolver completamente el problema. Las soluciones estudiadas son una parametrización del mismo problema, pero con diferencias marcadas con respecto al algoritmo planteado (más adelante se hace un comparativo pormenorizado). En [56], se propone un diseño de arquitectura de nodo y métodos de planificación que obedecen a la estructura específica de hardware propuesta, sin ser general para todo tipo de WSN. En [37], se manejan varios sensores y prioridades en la transmisión con GTS, lo que hace que algunos sensores no logren la transmisión en tiempo real, también en situaciones donde sea necesario, se propone hacer BO=SO, lo que significa que no habría tiempo de reposo para los sensores con el fin de lograr los requerimientos fijados. En general los algoritmos estudiados y resumidos en la tabla 3, propenden por la transmisión en tiempo real, pero no de la forma como se propone en esta investigación, sobre todo en lo relacionado con: buscar una solución que dé las mismas posibilidades a todos los nodos de la WSN, sin excluir alguno por prioridades, buscando no sacrificar el tiempo de reposo de los sensores con el fin de lograr más tiempo y longitud para GTS, partiendo de los periodos de los sensores con el fin de obtener un BI que satisfaga los mismos y administre de forma adecuada los recursos que se necesitan para la transmisión en tiempo real y evitando modificar el estándar de la WSN propuesto, pero que es adaptable a otro tipo de estándares que utilicen la transmisión de datos en su capa MAC haciendo uso de time-slots principalmente.

2.3. TRANSMISIÓN DE DATOS EN TIEMPO REAL BAJO EL ESTÁNDAR IEEE 802.15.4

En esta parte del documento se hace referencia al problema que aborda la presente investigación, que se refiere al manejo de una latencia garantizada en la transmisión de datos en tiempo real con WSN. La situación que se describe en esta investigación, se ubica en la capa de enlace según el modelo OSI, que hace referencia a la capa MAC (Media Access Control); donde la información se adquiere de los sensores, en su interacción con el contexto donde se hayan programado, y se organiza de forma que pueda ser llevada a la siguiente capa para su procesamiento y actuación con otros elementos de la red, tales como sensores coordinadores, puertas de enlace, servidores, entre otros. En esta instancia se ha identificado que pueden existir diferentes factores que afectan el rendimiento de la

red, como son el aumento en el tiempo de respuesta y procesamiento, debido principalmente a una baja velocidad de transmisión por parte de los sensores hacia el nodo coordinador [35][43][51], situaciones que se pueden dar por la falta de canales disponibles para la transmisión o insuficiencia de recursos (time-slot) en el canal asignado [46]; aumentando la probabilidad de pérdida de paquetes [63], así como incremento en el tiempo de procesamiento y transmisión de datos por parte de los dispositivos de la WSN, principalmente cuando el proceso a atender es en tiempo real, como el caso que se ha analizado en este documento. La situación descrita anteriormente, si bien se puede presentar por la limitación de los espacios de tiempo requeridos para transmitir datos por parte de los sensores al nodo coordinador en una WSN, también puede presentarse por la falta de procedimientos [37], que permitan planificar mejor los recursos existentes, o por la excesiva cantidad de nodos en una WSN, situación que puede hacer que la red se congestione y no permita la transmisión de datos en tiempo real. A continuación, se describe en términos técnicos el problema de planificación que relaciona esta investigación.

2.3.1. El problema de planificación para WSN: Partiendo de un modelo de reserva de time-slots agrupados en supertramas para establecer los periodos de actividad/no-actividad de la WSN, el problema de planificación se puede expresar en los siguientes términos: Encontrar una asignación de time-slots para toda supertrama (Ecuación 6):

$$k(ST_k) = k.BI.T_s, , x_{ij}^k \in \{0, 1\},$$

Ecuación 6 Relación supertramas WSN

Que asigne el time-slot $j \in \{Rts\}$, a cada uno de los sensores $i \in 1, \dots, N$, donde, (ver figura 4)

k , es k-ésima supertrama,

BI , es el Intervalo de beacon

$ST_{k,}$ es el tiempo de inicio de la transmisión de la supertrama

T_s , representa el periodo de transmisión por símbolo.

Rts , es el rango de time-slot que soporta el estándar para la asignación a los sensores (Para IEEE 802.15.4 es de 13 time-slot, quitando los de uso especial).

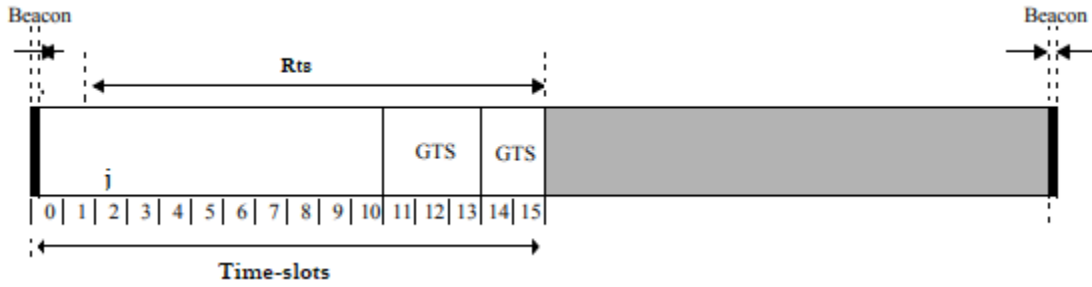


Figura 4 k-ésima supertrama
Fuente: [113]

De forma que se cumplan las siguientes restricciones:

1. El intervalo activo de la supertrama ocurre en el periodo de muestreo de cada sensor (Ecuación 7):

$$ST_k \leq I.T_i \leq ST_k + SD.ST_s,$$

Ecuación 7 Intervalo Activo Supertrama

donde

$$k = 0, 1, \dots$$

I es el *i* – ésimo periodo de muestreo del sensor.

2. El tamaño de la supertrama (expresado en bits) reservado debe satisfacer el requerimiento del sensor (Ecuación 8):

$$\sum_{j=pts}^{Nts} x_{ij}^k S \geq P_i,$$

para todo sensor $i \in 1, \dots, N$ y toda supertrama $k = 0, 1, \dots,$

Ecuación 8 Tamaño Reservado Supertrama

donde

Nts, es el número máximo de time-slot por supertrama,

pts, es el primer time-slot disponible para asignación (para el caso que se ha tomado de IEEE 802.15.4, sería tres (3))

S , corresponde tamaño en bits de cada time-slot

P_i , es el tamaño del paquete de cada sensor.

3. Los time-slots asignados al sensor i son consecutivos.
4. La asignación de time-slot dentro de la supertrama es mutuamente excluyente entre sensores (Ecuación 9):

$$\sum_{i=0}^N x_{ij}^k \leq 1,$$

para todo time-slot $j \in Rts$ y toda supertrama $k = 0, 1, \dots$

Ecuación 9 Asignación excluyente

5. El número de time-slots asignados dentro de la supertrama k no debe superar el total disponible (Ecuación 10):

$$\sum_{j=3}^{Nts} x_{ij}^k \leq Nts,$$

Para todo sensor $i \in 1, \dots, N$ y toda supertrama $k = 0, 1, \dots$

Ecuación 10 Total, disponible de time-slot Supertrama

6. Solo se permiten TR , reservas GTS por supertrama (Ecuación 11):

$$\sum_{i=0}^N I_{ik}(x|ij^k) \leq TR, k = 0, 1, \dots$$

Ecuación 11 Reservas GTS Supertrama

donde

TR , es la cantidad de reservas permitidas (para IEEE 802.15.4 es siete (7)).

$I_{ik}(x|ij^k) \in \{0, 1\}$, se define como la variable indicadora:

$$\left(\sum_{j=0}^{Nts} x_{ij}^k \right) \geq 1.$$

Acorde a lo anterior, se puede observar que en la restricción uno (1), se permite una tolerancia para la transmisión del paquete igual al intervalo activo de la supertrama, lo cual es razonable bajo el supuesto que los periodos de muestreo de los sensores son grandes comparados con la duración de los time-slot. Resulta importante aclarar que no toda instancia del problema tiene solución. En aquellos casos que no existe una solución del problema de planificación se dice que la instancia del problema no es factible.

3. ALGORITMO DE PLANIFICACIÓN (PEMM) PARA LA TRANSMISIÓN DE DATOS EN TIEMPO REAL PARA WSN

3.1. SOLUCIÓN A LOS REQUERIMIENTOS PLANTEADOS

En esta sección se presenta una solución al problema de planificación de transmisiones periódicas en una WSN en forma de un algoritmo denominado PEMM (Planificación estática utilizando técnicas matemáticas de MCD y MCM) el cual obtiene una solución que satisface las restricciones del problema o reporta la no existencia de una solución factible.

3.1.1. Solución Restricción 1: $ST_k \leq I.T_i \leq ST_k + SD.ST_s$,

El sistema de planificación debe garantizar la transmisión de datos de cada sensor en sus respectivos periodos de muestreo. Este objetivo se puede lograr ajustando el periodo de la supertrama, el cual es establecido por el nodo coordinador. En términos más específicos se refiere a la definición del BI, teniendo como referente los periodos de los sensores que tiene la red. Para lograr este propósito en la investigación realizada se utilizó la técnica de “Planificación Estática” [93], cuyo modelo permite asignar recursos (los *time-slots*) a las tareas de transmisión de datos periódicos de los sensores. La planificación estática ha sido usada generalmente en la planificación de tareas en procesadores. Un modelo de planificación estática para procesos periódicos define una secuencia de microciclos y macrociclos. Los microciclos corresponden a tiempos en los cuales se debe atender un conjunto de tareas por parte del procesador. La secuencia de microciclos se repite periódicamente en lo que constituye un macrociclo.

El microciclo en la planificación estática [94], se obtiene a partir del máximo común divisor (MCD) de los periodos de las tareas. En el caso de los sensores, el microciclo obtenido con el MCD de los T_i se asigna al intervalo de beacon BI. Esto garantiza cumplir con la restricción uno (1), para todos los sensores. El proceso parte de obtener T_m que es el MCD de los T_i^2 , valor que luego se utiliza para despejar B_0 (Ecuación 12), con lo que se busca validar que esté dentro de los tiempos mínimos y máximos que acepta el estándar que se utilice, en la investigación realizada se ha tomado a IEEE 802.15.4, que maneja:

$$BI = BSFD * 2^{B_0}, BSFD = 960 \text{símbolos}, \text{ entonces:}$$

$$BI = 960 \text{Símbolos} * 2^{B_0}$$

² T_i y T_m de acuerdo con el algoritmo PEMM deben expresarse como múltiplos enteros de BSFD, para garantizar que sean valores enteros y que el MCM y MCD estén bien definidos.

Donde: $T_m = MCD(T_i)$,

si $T_m \geq BFSD$, entonces

$$BO = \ln \left(\frac{T_m}{BFSD} \right) / 0,69$$

Ecuación 12 Obtención de BO

(Según el estándar IEEE 802.15.4, un BFSD es igual 960 símbolos). En este caso la restricción también obliga a que los valores mínimos de los periodos de transmisión de los sensores que conforman la WSN, no puedan estar por debajo del valor mínimo que acepta el estándar donde se aplique el algoritmo. Por otra parte, en la ecuación 12, se expresa la forma de obtener el máximo valor factible de BO, que, según el estándar, no puede ser superior a 14. Es importante mencionar que, dentro de la configuración de las WSN, los valores menores a este máximo y que estén entre 0 y 14 son válidos, siempre y cuando se cumpla la condición de ser mayor o igual a SO.

3.1.2. Solución Restricción 2: $\sum_{j=pts}^{Nts} x_{ij}^k S \geq P_i$,

Esta restricción permite garantizar la capacidad en tamaño de cada supertrama en el manejo de los datos que transmiten los sensores, teniendo en cuenta para ello el tamaño de los paquetes que manejan. Para esta restricción, se debe obtener el SD que maneja la supertrama definida por el coordinador. El procedimiento aplicado para lograr el cumplimiento de la restricción consiste en evaluar los tamaños de los paquetes que enviarán los nodos en la WSN al coordinador y luego acorde a esta evaluación determinar el posible tamaño de SD y el parámetro asociado a SO.

Para realizar este procedimiento se parte del tamaño de los paquetes (P_i) de los nodos, tomando como referencia la cota superior (sumatoria) que dan dichos tamaños en un periodo en el que coincidan todos los sensores. Adicional a lo anterior, el estándar IEEE 802.15.4 define un parámetro denominado: $aMinCAPLength$, que corresponde al tamaño mínimo de la parte CAP de la supertrama, que es igual 1720 bits (mínimo 2 time-slot). Quedando entonces el periodo activo de la forma (Ecuación 13):

$$SD = \sum(P_i) + aMinCAPLength.$$

Ecuación 13 SD más mínimo CAP

Teniendo en cuenta lo anterior el parámetro SO se obtiene según IEEE 802.15.4 de la siguiente manera (Ecuación 14):

$$SO = \ln\left(\frac{SD}{3840\text{bits}}\right)/0,69.$$

Ecuación 14 Obtención SO

En caso de que se incumpla: $SO > BO$ o $SO > 14$, entonces no es factible la planificación de las tareas.

3.1.3. Solución Restricción 3: Los time-slots asignados al sensor i son consecutivos.

La norma exige que los intervalos de tiempo asignados a GTS sean consecutivos. Para garantizar el cumplimiento de este requisito, asignamos intervalos de tiempo de forma consecutiva a cada sensor. La técnica propuesta en esta investigación lleva a cabo esta asignación mediante el uso de un ID, que está dentro del rango Rts (Para el caso de IEEE 802.15.4 va de 3 a 14) a intervalos de tiempo (ID 0 es para beacon y 1 y 2 están reservados para el período aMinCAPLength), y luego se marca los identificadores consecutivos para cada sensor.

3.1.4. Solución Restricción 4: $\sum_{i=0}^N x_{ij}^k \leq 1$,

Esta restricción asegura la asignación exclusiva de intervalos de tiempo a cada sensor. El mecanismo utilizado en la restricción 3, utiliza una variable denominada consecutive_time_slot, que asigna IDs en orden creciente y esto asegura el cumplimiento de las restricciones 3 y 4.

3.1.5. Solución Restricción 5: $\sum_{j=3}^{Nts} x_{ij}^k \leq Nts$,

Esta restricción se refiere a que la cantidad de time-slot asignados, no debe superar la cantidad de time-slot disponibles, de acuerdo con las especificaciones del estándar, teniendo en cuenta el aMinCAPLength, no debe ser superior a Nts (13 para IEEE 802.15.4). En este caso en las instrucciones del algoritmo propuesto se ha definido un ciclo, en el cual se obtiene previamente la cantidad de time-slot por sensor a partir del SD y tamaño de los paquetes; como también las iteraciones o cantidad de supertramas que tiene el mismo según el BI, para luego asignar los time-slot y configuración de los GTS según corresponda.

El estándar define que los time-slot y GTS que se componen a partir de los mismos, se asignan de forma contigua en la medida que van llegando (first-come first-served [95]), por lo tanto la restricción se cumple en la medida que existan los recursos para asignar a los sensores que conforman la WSN, la cual se valida en función de los microciclos y macrociclos de la red en el ciclo propuesto en el algoritmo, los microciclos como se mencionó anteriormente en cada BI y los macrociclos en la obtención de la supertrama que puede llegar a necesitar más de los recursos disponibles en una determinada iteración; si se da este último caso y no hay una solución factible, se considera que la WSN no es viable para la transmisión en

tiempo real.

3.1.6. Solución Restricción 6: $\sum_{i=0}^N I_{ik}(x|ij^k) \leq 7, k = 0, 1, \dots$

El número máximo de GTS por supertrama es siete, para el caso de IEEE 802.15.4. Si hay más de ocho sensores, el algoritmo propuesto busca una solución factible, que permita transmitir datos que cumplan con esta restricción. El algoritmo valida primero el número de sensores de la WSN, si es menor de siete no hay ningún problema. Pero si excede este número, modifica el valor de BI hasta donde SO y BO lo permitan, con el fin de aumentar la tasa de supertramas por segundo, lo cual conlleva a disponer más time-slot disponibles para asignar a los sensores y cumplir con la cantidad máxima de GTS por BI. Este proceso se hace evaluando el macrociclo, usando principalmente el MCM de los periodos de los sensores. Si BO se puede disminuir, cumpliendo con la restricción de ser mayor o igual a SO se lo hace, luego se planifica el BI y los periodos de los sensores de la WSN, si se encuentra una solución factible se lo informa, caso contrario se declara a la WSN como no factible y se busca una solución opcional, donde se busca un MCM con un tiempo probable de operación de la WSN.

Con el cumplimiento de las anteriores restricciones, se tiene una WSN que planifica una transmisión de datos sin contención, es decir no habrá una negociación (Sin CSMA/CA), ni espera para la asignación del canal de transmisión, sino que de acuerdo con los recursos que se disponga y una cantidad determinada de nodos, con unas variables definidas y que cumplen con las restricciones antes definidas, se garantizará espacios de tiempo en la supertrama de transmisión de datos (time-slot y GTS), los cuales serán garantizados para la transmisión inmediata en el intervalo de beacon (BI) determinado para ello, cumpliendo así con la premisa de hacerlo en tiempo real. El *Algoritmo 1* presenta el proceso de completo de planificación de acuerdo con el análisis previo.

3.2. ESTRUCTURA FINAL DEL ALGORITMO (PEMM) Y FORMA DE FUNCIONAMIENTO

El algoritmo PEMM presentado en esta sección, fue codificado mediante el software Scilab [96]. El programa 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 se asume que el coordinador de la WSN ya hizo el proceso de sincronización previo y se cuenta con las variables que trabaja el algoritmo, las cuales corresponden a: N, que define el número de nodos; P_i, que corresponde al tamaño de los paquetes que envían los nodos y T que son los periodos de tiempo en los cuales inician la transmisión de datos los nodos sensores al coordinador. Las variables R_{ts} y N_{ts}, las cuales corresponden al rango de time-slot y número máximo de time-slot, respectivamente, dependen 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: R_{ts} = [3, 4 ...16] y N_{ts}=13.

Como se ha mencionado anteriormente BSFD es igual 960 símbolos y en tiempo a 0,01536 s.

Algoritmo 1. Algoritmo de planificación PEMM, propuesto para el estándar IEEE 802.15.4

```

1: // Algoritmo de planificación IEEE 802.15.4 V1.0
//Variables
//N = Número de sensores
//T = Arreglo con los periodos de los sensores
//P = Arreglo con los tamaños de los paquetes que envían los sensores
//Min_BI = Mínimo valor permitido de BI para IEEE 802.15.4 = BSFD
//Nts = Número total de time-slot disponibles

2: Inicio
3: Min_BI = 0.01536 //Valor en Segundos

4: Procedimiento_Obtener_BI (T, Nts)
5: SI BI == 0 Entonces //Verificación de que el proceso de configuración y definición de variables inicia.
6: MCD_T = MCD (T) //Se obtiene el MCD de todos los periodos de los sensores
7: BI_inicial = Min_BI * MCD_T
8: SI (BI_inicial >= Min_BI) Entonces //Validación que el MCD obtenido es mayor al mínimo permitido por el estándar
9: BO_logaritmo = ln(MCD_T)
10: BO = BO_logaritmo / 0.69 //Se obtiene el valor de la variable BO – Configurable en el coordinador
11: BO = Round(BO)

12: SI (BO >= 0) y (BO <= Nts)
13: BI = Min_BI * 2^BO //Se toma el valor de 0.01536 sg que corresponde a la frecuencia a la 2.4 Ghz
14: Fin_si
15: SINO SI BO < 0
16: BO = 0
17: BI = Min_BI
18: Fin_sino
19: SINO
20: Escribir: "WSN trabajará sin modo GTS" //Si el valor de BO es superior a 14 significa que se trabaja sin Beacon ni GTS
21: Fin_sino
22: Retorna (BI)
23: Fin_si
24: FIN_Si
25: Fin_Procedimiento //Con las instrucciones 3 – 22 se da cumplimiento a la restricción 1

26: Procedimiento Obtener_SD (N, P)
27: Pt = 0 //Pt = Total tamaño paquetes
28: Desde i=1 hasta N hacer //N = Número de sensores
29: Pt = Pt + P(i) //Se obtiene la sumatoria total de los paquetes de los sensores
30: Fin_desde
31: Pt = Pt + 1760 //Se suma el aMinCAPLength
32: SO = Ln(Pt / 3840) / 0,69 //Se obtiene el valor de la variable SO – Configurable en el coordinador
33: SO = RoundMax(SO)
34: Si (SO <= BO)
35: SD = 3840 * 2^SO //Se obtiene el tamaño de SD que soporta la capacidad requerida por los sensores
36: Fin_Si
37: SINO
38: Escribir "No factible, se está superando el tamaño máximo permitido"
39: Fin_sino
40: Retornar (SD)
41: Fin_procedimiento //Con las instrucciones 26 – 40 se cumple la restricción 2.

42: MCM_Periodos = MCM(T) //Obtenemos el MCM de los periodos de los sensores para validar macrociclo
43: Macro_ciclo_nodos = MCM_periodos

44: tot_time_slot_requeridos_iteracion = 0;
45: Desde i=1 hasta N hacer
46: cant_time_slot_sensor (i) = P(i) / Tam_time_slot //Se obtiene la cantidad time-slot necesarios por sensor
47: cant_time_slot_sensor(i) = redondeomax(cant_time_slot_sensor(i));
48: itera_sensor(i) = T(i) / BI //Se obtiene la iteración del nodo según BI
49: itera_sensor(i) = round(itera_sensor(i))
50: tot_time_slot_requeridos_iteracion = tot_time_slot_requeridos_iteracion + cant_time_slot(i);
51: Fin_desde

```

```

52: Si (tot_time_slot_requeridos <= Nts) y (N <= 7) Entonces //Se valida el cumplimiento de las restricciones 5 y 6.
53: consecutivo_time_slot = Rts1; // Se inicializa el consecutivo de time-slot para validar restricción 3
54: Desde j = 1 hasta N hacer
55: Desde k = 1 hasta cant_time_slot_sensor(j) hacer
56: GTS_sensor(j) = GTS_sensor(j) + time_slot(consecutivo_time_slot) //Se valida restricción 3 slot contiguos
57: consecutivo_time_slot = consecutivo_time_slot + 1 //Se valida restricción 4 excluyentes
58: Fin_desde
59: Fin_desde
60: P_GTS = Factible_directo
61: Fin_Si
62: SINO //Significa que la WSN tiene más de siete sensores o más de 13 time-slot en cada asignación de supertrama
63: P_GTS=No_factible_directo
64: solucion1_menos7=0 //Inicializamos variable de solución inactiva
65: cant_cam_tot_time_slot = tot_time_slot_requeridos; //Inicializamos variable cambio total time-slot
66: solucion1_encontrada=0 //Iniciamos variable para encontrar solución factible
67: Si (N<=7) & (tot_time_slot_requeridos>13) y (SO<BO) Entonces //Se valida restricción 5
68: tot_time_slot_requeridos=0 //Inicializamos contados cantidad time-slot
69: Mientras (cant_cam_tot_time_slot>13) y (solucion1_encontrada==0)
70: SO = SO+1 //aumentamos en uno SO para duplicar tamaño time-slot
71: SD = 3840*2^SO //Recalculamos SD
72: CFP = SD - CAP //Obtenemos de nuevo CFP
73: tam_Time_slot=SD/16 //Obtenemos el nuevo tamaño de cada time-slot
74: tam_Time_slot = round(tam_Time_slot)
75: Desde i=1 hasta N Hacer
76: cant_time_slot(i) = Pk(i) / tam_Time_slot //Recalculamos la cantidad time-slot por Nodo
77: cant_time_slot(i) = ceil(cant_time_slot(i)); //Redondear al entero más próximo
78: tot_time_slot_requeridos = tot_time_slot_requeridos + cant_time_slot(i);
79: matriz_nodos_time_slot(i)(1)=i;
80: matriz_nodos_time_slot(i)(2)=cant_time_slot(i);
81: Fin_desde
82: Si (tot_time_slot_requeridos<=13) Entonces
83: solucion1_encontrada=1;
84: Fin_si
85: Si (SO==BO) y (cant_tam_tot_time_slot<=13) Entonces
86: solucion1_encontrada=2;
87: Fin_si
88: Si (SO==BO) y (cant_tam_tot_time_slot>13) Entonces
89: solucion1_encontrada=3
90: Fin_si
91: cant_cam_tot_time_slot=tot_time_slot_requeridos
92: Fin_mientras
93: tot_time_slot_BI=0
94: salir=0
95: k=0
96: Mientras (k<= Macro_ciclo_nodos) y (salir==0) y (solucion1_encontrada==1)
97: asigna_GTS(k,1)= k
98: asigna_GTS(k,2)=k*BI
99: col_matriz=3 //inicializo para que se ubique en la columna 3 de la matriz a crear
100: Desde t=1 hasta NHacer
101: Division=T(t)/MCD_T;
102: Modulo_div=modulo(k,Division)
103: Si (Modulo_div==0) Entonces
104: asigna_GTS(k,col_matriz)=matriz_nodos_time_slot(t,2) //Ubico la cantidad de time-slot por sensor en trama
105: Sino
106: asigna_GTS(k,col_matriz)=0 //No hay nodo sensor en esta iteración de BI
107: Fin_si
108: col_matriz=col_matriz+1 //Aumento en uno las columnas para el siguiente nodo
109: tot_time_slot_BI = tot_time_slot_BI + matriz_nodos_time_slot(t,2) //contabilizo la cantidad de time-slot
110: Fin_desde
111: Si (tot_time_slot_BI>13) Entonces
112: salir=1
113: Fin_si
114: k=k+1
115: Fin_Mientras
116: FIN_SINO

//Cuando hay más de siete nodos
117: solucion3_mas7=0 //Inicializamos variable de solución inactiva
118: cant_cam_tot_time_slot = tot_time_slot_requeridos; //Inicializamos variable cambio total time-slot
119: solucion3_encontrada=0; //Iniciamos variable para encontrar solución factible

```

```

120: Si (N>7) Entonces //Verificamos que no se haya encontrado solución anteriormente
121: tot_time_slot_BI=0
122: mitad_n=0
123: tercera_n=0
124: viejo_BO = BO
125: nodos=0
126: Mientras (cant_cam_tot_time_slot>Nts) y (solucion2_encontrada==0) & (SO<BO)
127: BO = BO-1; //Disminuimos en 1 BO para reducir a la mitad BI
128: BI = Min_BI * 2^BO; //Recalculamos BI
129: Si (mitad_n==0) Entonces
130: mitad_nodos= N/2
131: mitad_nodos=round(mitad_nodos)
132: mitad_n=1
133: Fin_si
134: tot_time_slot_BI=0
135: salir2=0
136: k=1
137: L=0
138: Mientras (k<= Macro_ciclo_nodos) y (salir2==0) y (mitad_n==1) //Proceso cuando se disminuye en 1 y se trabaja con la mitad
139: asigna_GTS(k,1)= L
140: asigna_GTS(k,2)=L*BI
141: col_matriz=3 //inicializo para que se ubique en la columna 3 de la matriz a crear
142: tot_time_slot_BI=0
143: nodos=0
144: Desde t=1 hasta N Hacer
145: Si (t<=mitad_nodos) Entonces
146: Division=T(t)/MCD_T
147: Modulo_div=modulo(L,Division)
148: Si (Modulo_div==0) Entonces
149: asigna_GTS(k,col_matriz)=matriz_nodos_time_slot(t,2) //Ubico la cantidad de time-slot por sensor en trama
150: b=matriz_nodos_time_slot(t,2)
151: tot_time_slot_BI = tot_time_slot_BI + b //contabilizo la cantidad de time-slot por iteración
152: nodos = nodos+1
153: SINO
154: asigna_GTS(k,col_matriz)=0 //No hay nodo sensor en esta iteración de BI
155: Fin_si
156: Fin_si
157: Si (t>mitad_nodos) Entonces
158: Division=T(t)/MCD_T
159: desplazo=L-1
160: Modulo_div=modulo(desplazo,Division)
161: Si (Modulo_div==0) Entonces
162: asigna_GTS(k,col_matriz)=matriz_nodos_time_slot(t,2) //Ubico la cantidad de time-slot por sensor en trama
163: b=matriz_nodos_time_slot(t,2)
164: tot_time_slot_BI = tot_time_slot_BI + b //contabilizo la cantidad de time-slot por iteración
165: nodos=nodos+1
166: SINO
167: asigna_GTS(k,col_matriz)=0 //No hay nodo sensor en esta iteración de BI
168: Fin_si
169: Fin_si
170: col_matriz=col_matriz+1 //Aumento en uno las columnas para el siguiente nodo
171: Fin_desde
172: Si (tot_time_slot_BI>13)|(nodos>7) Entonces
173: Escribir("\n La cantidad de time-slot no es soportada en BO igual a (segunda): %d",BO)
174: salir2=1
175: Fin_si
176: k=k+1
177: L=L+1
178: Fin_mientras
179: Si (salir2==0) Entonces
180: Escribir("\n La cantidad de time-slot es soportada en BO igual a: %d",BO)
181: solucion2_encontrada=1
182: Fin_si
183: Fin_mientras
184: FIN_Algoritmo

```

//Se puede adicionar más divisiones a la asignación de time-slot en un intervalo de tiempo, en los ejercicios realizados se llegó hasta cuatro subdivisiones.

Fuente: Esta investigación

3.3. ANÁLISIS COMPARATIVO: ALGORITMO PEMM VS ALGORITMOS DE PLANIFICACIÓN REFERENCIADOS

Con el fin de identificar de forma más clara, las diferencias del algoritmo PEMM, propuesto en esta investigación y otros estudios realizados en la misma línea de trabajo; en esta parte del documento se presenta una comparación de las características de estos estudios y la propuesta desarrollada. Los algoritmos con los cuales se hizo el comparativo fueron: I-Game [65], EGSA [75], Haque [76], Yoo et al [82], GAS [37], ADA-MAC [68] y FieldBus [69]; los cuales se seleccionaron por la similitud en el manejo de la solución propuesta.

Para iniciar con el comparativo propuesto, en la tabla 4, se presentan las características generales del algoritmo PEMM, propuesto en esta investigación, las cuales fueron los elementos referentes, para la comparación con los otros estudios mencionados anteriormente.

Tabla 4 **Características Generales Algoritmo de Planificación PEMM**

Característica	Descripción
Modificaciones al estándar tomado como referencia (IEEE 802.15.4)	No se hacen modificaciones, se mantiene el estándar según la definición original, además se puede adaptar para trabajar con cualquier sistema que utilice reservar de time-slots para la transmisión de datos en tiempo real.
Maneja Requerimientos de tiempo Real	Si
Obtiene los valores de SO y BO para configurar supertrama	Si, se hace con el fin de cumplir con las restricciones propuestas. Este es uno de los elementos preponderante del algoritmo, puesto que manejando estas variables se puede utilizar mejor los time-slot de cada supertrama, posibilitando de acuerdo a las condiciones de cada WSN manejar más dispositivos en tiempo real.
Utiliza técnicas de planificación para asignar Time-Slot	Sí, utiliza la planificación estática [94], muy común en el manejo de microprocesadores. Debido a que no se cambia el estándar, en el momento de asignar los GTS se utiliza la técnica FCFS, acorde con la disponibilidad que se tenga de este recurso en la red, administrado por el nodo coordinador.
Topología de funcionamiento	Estrella

Objetivo del algoritmo	Es un algoritmo que busca mejorar 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.
Técnicas utilizadas en la capa MAC	Beacon enabled and GTS
Técnica referente utilizada para el algoritmo propuesto	Planificación estática [94]
Variables del Algoritmo	N = Sensores; BI = intervalo de beacon; T = periodo de los nodos para transmitir paquetes; BO = beacon order; SO = superframe order; SD = Superframe duration; Pi = Tamaño de los paquetes;
Funcionamiento	El algoritmo parte de tres variables de entrada: N, T y P, con las cuales busca determinar el BI y SD, identificando para ello 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 o no de transmitir en tiempo real con los nodos que conforman la red. Si las condiciones de factibilidad se cumplen se dice que la red es factible y se puede iniciar el proceso, si las condiciones no se cumplen se dice que la red no es factible para transmisión en tiempo real.
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.
Seudocódigo	Ver Algoritmo 1

Fuente: esta investigación.

3.3.1. Algoritmo PEMM Vs I-Game [65]:

Teniendo como referente la tabla 4, el algoritmo I-Game tiene las siguientes características, ver tabla 5.

Tabla 5 **Características Generales Algoritmo I-Game [65] Vs PEMM**

Característica	I-Game	PEMM
Modificaciones al estándar tomado como referencia (IEEE 802.15.4)	Si (Propone compartir time-slot para los nodos en determinados intervalos de tiempo donde están libres, no dejando una asignación fija como lo propone el estándar)	No, el algoritmo planteado es aplicable a sistemas de reservas que utilicen time-slot sin importar la cantidad que manejen, se adapta ellos.
Maneja Requerimientos de tiempo Real	Si	Si
Obtiene los valores de SO y BO para configurar supertrama	No	Si
Utiliza técnicas de planificación para asignar Time-Slot	Si (Round Robin)	Sí, utiliza la planificación estática [94].
Topología de funcionamiento	Estrella	Estrella
Objetivo del algoritmo	Busca asignar GTS a los nodos que lo necesiten, buscando transmitir en tiempo real. Para ello propone una modificación al estándar que consiste en hacer un mejor uso del tiempo ocioso que tiene un time-slot en la configuración de una supertrama	Es un algoritmo que busca mejorar 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.
Técnicas utilizadas en la capa MAC	Slotted CSMA/CA y GTS	Beacon enabled and GTS

Técnica referente utilizada para el algoritmo propuesto	Network Calculus theory [106]	Planificación estática [94]
Variables del Algoritmo	N = Sensores; K = Time-slot; F = Flujo de tráfico; b = tamaño del flujo; r = Tasa de llegada; D = retardo estimado; Rkts = Garantía de ancho de banda por cada time-slot; Ukts = Utilización de ancho de banda de un GTS.	N = Sensores; BI = intervalo de beacon; T = periodo de los nodos para transmitir paquetes; BO = beacon order; SO = superframe order; SD = Superframe duration; Pi = Tamaño de los paquetes;
Funcionamiento	El algoritmo evalúa los requisitos de ancho de banda de los nodos y lo compara con la disponibilidad de la misma en la red a la hora de transmitir al nodo Coordinador. Si hay disponibilidad con la modificación al estándar propuesta y un nodo tiene un ancho de banda pequeño que pueda compartir más de un time-slot con otro nodo, lo hace, caso contrario se declara rechazado	El algoritmo parte de tres variables de entrada: N, T y P, con las cuales busca determinar el BI y SD, identificando para ello 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 o no de transmitir en tiempo real con los nodos que conforman la red.
Seudocódigo	Ver Figuras 5 y 6	Ver Algoritmo 1
Tipo de solución que ofrece el algoritmo	Mejor esfuerzo	Garantiza solución si es factible.
Tratamiento casos no factibles	No garantiza transmisión en tiempo real para todos sus nodos en una solución encontrada, en caso de no cumplir con los requerimientos rechaza la petición. Para los nodos sin requerimientos de tiempo real utiliza CSMA/CA.	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.

Fuente: esta investigación.


```

i-GAME Management Algorithm
1  type Flow = (id, b, r, D) //traffic specification and delay requirement
2  type FlowSetType = (Fi , where Fi requests a time slot in the CFP)
3  int N = 0; // the number of flow sharing a GTS
4  int k = 1; // the number of shared time slot
5  FlowSetType FlowSet; Flow F;
6  On (arrival of a new flow F) do {
7      N = N + 1;
8      if (admission_control (k, N, FlowSet, F) == false) {
9          if (k == 7) { //the maximum number of GTSs is reached
10             reject_request(F);
11             N = N - 1; break;
12         }
13         else { // k < 7
14             k = k + 1; //increase the length of the CFP
15             goto line 8;
16         }
17     }
18     else {
19         accept_request(F); //accept the new flow to share the GTS
20         FlowSet_Add(FlowSet, F); //add the new flow to the GTSset
21     }

```

Figura 5 Algoritmo I-Game - Management
Fuente [65]

```

i-GAME Admission Control Function
1  RTS = guaranteed bandwidth by one time slot
2  Ts = time slot duration
3  boolean admission_control (int k, int N, FlowSetType FlowSet,
                             Flow F)
4  {
5      boolean adm_crt = true;
6      if (k <= N) {
7          p = cell (N / k);
8          q = N - p * k - 1;
9          for (int i = 1, i++; i<=N)
10             if (( Di < (( bi / (k * RTS / N)) + ( p * Bi - q * Ts))) or
                (ri > k * RTS / N))
11                 adm_crt = false;
12     } else //the case (k > N) is considered as explicit allocation
13         adm_crt = false;
14 }

```

Figura 6 Algoritmo I-Game – Admission Control
Fuente [65]

Teniendo en cuenta lo anterior, en la tabla 6, se pueden observar las diferencias principales de este algoritmo con el PEMM, propuesto en esta investigación.

Tabla 6 Diferencias I-Game vs Algoritmo PEMM

Característica	Diferencias
Modificaciones al estándar tomado como referencia (IEEE 802.15.4)	El algoritmo PEMM no propone modificaciones al estándar, sino que se puede parametrizar para funcionar con cualquier estándar que maneje time-slots, independientemente del número y duración de los mismos; mientras que I-Game si lo hace.
Obtiene los valores de SO y BO para configurar supertrama	El algoritmo propuesto basa su funcionamiento en el cálculo de estas variables, mientras que el I-Game no tiene este aspecto como relevante.
Utiliza técnicas de planificación para asignar Time-Slot	En este aspecto el algoritmo propuesto trabaja con planificación estática y utiliza la técnica por defecto del estándar FCFS, mientras que I-Game utiliza sólo Round Robin. Con el algoritmo propuesto en esta investigación se busca ampliar la cantidad de time-slot disponibles por segundo, ampliando la cantidad de supertramas en este intervalo y por ende la cantidad de nodos que pueden transmitir en tiempo real.
Objetivo del algoritmo	Buscan transmitir en tiempo real y mejorar el manejo de los recursos. La diferencia está en la forma como logran los objetivos. El algoritmo propuesto 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 de la WSN.
Técnicas utilizadas en la capa MAC	El algoritmo propuesto enfoca toda su atención en el uso de GTS únicamente para garantizar transmisiones en tiempo real garantizadas, mientras que I-Game, permite trabajar con Slotted CSMA/CA y GTS.

Técnica referente utilizada para el algoritmo propuesto	En el algoritmo propuesto se utiliza planificación estática [94], mientras que I-Game utiliza como referente a Network Calculus theory [106].
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 algoritmo propuesto intenta ofrecer una solución con las mismas garantías para todos los nodos de la red.
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 para el algoritmo propuesto se evalúa las variables BO y SO principalmente, validando valores posibles que den factibilidad.

Fuente: Esta investigación

A partir de la tabla 6, como también comparando las figuras 5 y 6, y el Algoritmo PEEM (Tabla 4), se puede evidenciar que I-Game, es completamente diferente a la solución que se ha planteado. Puesto que I-Game propone la modificación del estándar, lo cual puede traer complicaciones adicionales, que están relacionadas principalmente con la compatibilidad de los dispositivos que se fabrican actualmente y que no soportarían la nueva propuesta, además la solución que se propone en esta investigación intenta antes que cambiar, aprovechar las características que tiene el estándar y mejorar así el uso de los recursos, antes que diseñar uno nuevo. En el algoritmo propuesto reduciendo el valor de BO, siempre que su relación con SO lo permita, se logrará ampliar la cantidad de supertramas por segundo, disponiendo de más time-slot para realizar el proceso, cumpliendo con los requerimientos definidos anteriormente.

3.3.2. Algoritmo PEMM Vs EGSA [75]:

El algoritmo EGSA se refiere a la solución denominada: Explicit GTS Allocation Algorithm for IEEE 802.15.4, el cual tiene las siguientes características, ver tabla 7.

Tabla 7 **Características Generales Algoritmo EGSA [75]**

Característica	EGSA	PEMM
Modificaciones al estándar tomado como referencia (IEEE 802.15.4)	Si (Propone maneja bloques de 15 mini time-slot por cada time-slot, para ampliar	No, el algoritmo planteado es aplicable a sistemas de reservas que utilicen time-slot sin importar la

	la capacidad de CFP en la Supertrama,)	cantidad que manejen, se adapta ellos.
Maneja Requerimientos de tiempo Real	Si	Si
Obtiene los valores de SO y BO para configurar supertrama	Sí, pero hace que BO sea igual a SO, según los requerimientos del algoritmo planteado. Lo que significa que los sensores, en este caso el coordinador no tendrá un tiempo para pasar a estado sleep o dormir, lo que supone más gasto de energía y menos durabilidad de la batería o pila que lo alimenta.	Si
Utiliza técnicas de planificación para asignar Time-Slot	Si (La que maneja por defecto el estándar: primero en llegar, primero en atenderse) FCFS	Sí, utiliza la planificación estática [94].
Topología de funcionamiento	Estrella	Estrella
Objetivo del algoritmo	Busca transmitir en tiempo real y garantizar este tipo de comunicación a los nodos que conforman una red y así lo requieren, también maneja nodos que no tienen este requerimiento, a los cuales se les aplica CSMA/CA para asignar el canal de transmisión.	Es un algoritmo que busca mejorar 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.
Técnicas utilizadas en la capa MAC	Beacon enabled and GTS	Beacon enabled and GTS
Técnica referente utilizada para el algoritmo propuesto	Ninguna	Planificación estática [94]
Variables del Algoritmo	n = Conjunto de sensores sin requerimiento de time-real; m = conjunto de sensores con requerimiento de time-real; TS = Time-slot; Dts = Duración time-slot en bits; Tp = Periodo de	N = Sensores; BI = intervalo de beacon; T = periodo de los nodos para transmitir paquetes; BO = beacon order; SO = superframe order; SD =

	transmisión de los nodos; B = Longitud de un paquete a transmitir; d = retardo permitido.	Supertrame duration; P_i = Tamaño de los paquetes;
Funcionamiento	Hace la asignación de time-slot y GTS off line, de manera que se planifica antes de la ejecución, pero supone que $BO = SO$, eliminando el periodo inactivo de los nodos. El algoritmo parte de asignar el mínimo tamaño posible de espacio a CAP, maximizando CFP en el valor máximo posible. Para obtener BO y SO, parte de calcular el valor factible de SO, el cual garantice ancho de banda para los nodos que conforman la WSN.	El algoritmo parte de tres variables de entrada: N, T y P, con las cuales busca determinar el BI y SD, identificando para ello 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 o no de transmitir en tiempo real con los nodos que conforman la red.
Seudocódigo	Ver Figura 7	Ver Algoritmo 1
Tipo de solución que ofrece el algoritmo	Mejor esfuerzo	Garantiza solución si es factible.
Tratamiento casos no factibles	Este algoritmo busca cumplir con los requerimientos de las redes ampliando sus time-slot, optando por crear mini-time-slot y evaluando el tamaño de SO principalmente, pero en caso de no cumplir con los requerimientos de tiempo real utiliza CSMA / CA trabajando con el mejor esfuerzo.	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.

Fuente: esta investigación.

```

Algorithm 1
1: System = {m, n, B, Tp, d}
2: Determine Dmts;
3: Determine the set of possible SO values
   {SOmin: SOmax}
4: SO = SOmax;
5: Sh = False;
   // if the allocation succeeds or fails
6: While (SO ≥ SOmin) {
7:   Determine the CPP, CAP and mTS duration
8:   Determine the number of blocks
9:   Allocate the blocks;
10:  If (d ≥ dq,mtsa) { // allocation finished
11:    Sh=True;
12:  } else {
13:    Obtain the starting mTS of blocks
14:  }
15:  if (Sh=True) break; // success.
16:  SO = SO - 1;
17: }
18: if Sh = True {
19:   adjust the CAP length
20: }

```

Figura 7 Algoritmo EGSA
Fuente [75]

Teniendo en cuenta lo anterior, en la tabla 8, se pueden observar las diferencias principales de este algoritmo con el PEMM, propuesto en esta investigación.

Tabla 8 **Diferencias EGSA vs Algoritmo Propuesto**

Característica	Diferencias
Modificaciones al estándar tomado como referencia (IEEE 802.15.4)	El algoritmo PEMM no propone modificaciones al estándar, sino que se puede parametrizar para funcionar con cualquier estándar que maneje time-slots, independientemente del número y duración de los mismos; mientras que EGSA si lo hace. Específicamente amplía el número de time-slot, creando mini-time slot para manejar más sensores en tiempo real.
Obtiene los valores de SO y BO para configurar supertrama	El algoritmo PEMM basa su funcionamiento en el cálculo de estas variables, partiendo de BO, para luego obtener SO. Mientras que EGSA determina el valor de SO para establecer el mayor tamaño posible, luego iguala BO a SO (lo que deja al nodo coordinador activo

	<p>permanentemente, sin lugar a reposo y con mayor cantidad de consumo de energía) e inicia el proceso de asignación de recursos.</p>
<p>Utiliza técnicas de planificación para asignar Time-Slot</p>	<p>Los dos utilizan la misma técnica en la asignación de time-slot FCFS, pero difieren en que el algoritmo PEMM, basa su funcionamiento en la planificación estática para establecer el comportamiento de la WSN y planifica mejor el uso de recursos a la hora de transmitir paquetes en tiempo real cumpliendo con los requerimientos de transmisión en tiempo real, mientras que EGSA no garantiza esto. Con el algoritmo propuesto en esta investigación se busca ampliar la cantidad de time-slot disponibles por segundo, ampliando la cantidad de supertramas en este intervalo y por ende la cantidad de nodos que pueden transmitir en tiempo real.</p>
<p>Objetivo del algoritmo</p>	<p>Buscan transmitir en tiempo real y mejorar el manejo de los recursos. La diferencia está en la forma como logran los objetivos. El algoritmo PEMM lo hace planificando el uso de los recursos y analizando el comportamiento de la WSN antes de su funcionamiento, mientras que EGSA lo hace modificando el estándar para cumplir con los requerimientos de tiempo real de la WSN.</p>
<p>Técnica referente utilizada para el algoritmo propuesto</p>	<p>En el algoritmo PEMM se utiliza planificación estática [94], mientras que EGSA no utiliza ninguna técnica externa, sólo modifica el estándar para cumplir con su objetivo.</p>
<p>Garantía de solución para transmitir en tiempo real.</p>	<p>El 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 algoritmo PEMM intenta ofrecer una solución con las mismas garantías para todos los nodos de la red.</p>

Tratamiento casos no factibles	En el 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 el algoritmo PEMM se evalúa las variables BO y SO principalmente, validando valores posibles que den factibilidad.
--------------------------------	---

Fuente: Esta investigación

A partir de la tabla 8 y la figura 7, se puede apreciar que EGSA, es diferente al algoritmo PEMM, principalmente en la forma de abordar la solución al problema identificado que refiere a la transmisión en tiempo real con WSN. Como aspecto relevante se tiene, que EGSA al igual que I-Game, también propone modificar el estándar, por otra parte, la forma en que calculan las variables BO y SO, es completamente distinta, en el algoritmo PEMM estas variables determinan el funcionamiento de la red y la factibilidad o no de la transmisión en tiempo real, mientras que este algoritmo se constituyen en elementos que determinan el ancho de banda para la asignación de time-slot, los cuales han sido modificados por mini time-slot. Por otro lado, EGSA también sacrifica el tiempo de reposo de los sensores al hacer $BO=SO$, lo que supone que los dispositivos estarán siempre activos.

3.3.3. Algoritmo PEMM Vs Algoritmo de Haque [76]:

El estudio de Haque [76], se refiere al algoritmo denominado: Efficient GTS Allocation Schemes for IEEE 802.15.4, el cual tiene las siguientes características generales, ver tabla 9.

Tabla 9 **Características Generales Algoritmo de Haque [76]**

Característica	Haque	PEMM
Modificaciones al estándar tomado como referencia (IEEE 802.15.4)	Si, parte del estándar original de IEEE 802.15.4, pero hace mejoras al mismo. En primera instancia reduce el tamaño de los time-slot para asignar GTS en CFP. Se manejan 32 time-slot	No, el algoritmo planteado es aplicable a sistemas de reservas que utilicen time-slot sin importar la cantidad que manejen, se adapta ellos.
Maneja Requerimientos de tiempo Real	Si	Si
Obtiene los valores de SO y BO para configurar supertrama	Propone el uso de valores de BO y SO entre 0 y 7 como los de mejor rendimiento, evitando al máximo los	Si

	valores entre 8 y 14, debido según el estudio a los resultados obtenidos en las pruebas realizadas.	
Utiliza técnicas de planificación para asignar Time-Slot	Si (La que maneja por defecto el estándar: primero en llegar, primero en atenderse) FCFS	Sí, utiliza la planificación estática [94].
Topología de funcionamiento	Estrella	Estrella
Objetivo del algoritmo	Es un algoritmo que intenta aprovechar al máximo los time-slot del estándar, pero dado que con el original se pierde mucho espacio y tiempo en la asignación de los mismos, los cambia haciéndolos más pequeños y funcionales.	Es un algoritmo que busca mejorar 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.
Técnicas utilizadas en la capa MAC	Slotted CSMA/CA y GTS	Beacon enabled and GTS
Técnica referente utilizada para el algoritmo propuesto	Ninguna	Planificación estática [94]
Variables del Algoritmo	Tdata = Duración de la transmisión de información con GTS; SD = Duración supertrama; BI = Intervalo de Beacon;	N = Sensores; BI = intervalo de beacon; T = periodo de los nodos para transmitir paquetes; BO = beacon order; SO = superframe order; SD = Superframe duration; Pi = Tamaño de los paquetes;
Funcionamiento	El algoritmo es un aporte que busca mejorar el rendimiento y la asignación de GTS a los dispositivos de una WSN, logrando que no solo se asigne GTS a 7 nodos, sino que se amplíe hasta 13 según los experimentos de la investigación.	El algoritmo parte de tres variables de entrada: N, T y P, con las cuales busca determinar el BI y SD, identificando para ello 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 o no de transmitir en tiempo

		real con los nodos que conforman la red.
Seudocódigo	Ver Figura 8	Ver Algoritmo 1
Tipo de solución que ofrece el algoritmo	Garantiza tiempo real hasta 13 nodos, cumpliendo los requisitos y cambiando el estándar.	Garantiza solución si es factible.
Tratamiento casos no factibles	Este algoritmo busca cumplir con los requerimientos de las redes modificando la cantidad de time-slot. En caso de no cumplir con los requerimientos utiliza la parte de CAP de la supertrama, cuando se genera esta situación ya no hay garantías de tiempo real y se trabaja con el mejor esfuerzo.	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.

Fuente: esta investigación.

```

1: if the device using old IEEE 802.15.4 then
2:   GTS slot size = Superframe Duration /16
3: else
4:   GTS slot size = Superframe Duration /32
5: end if
6: Calculate data transmission duration in GTS
7: if device using new IEEE 802.15.4 then
8:   if number_of_GTS_slots_needed < 16 then
9:     reserved = 01
10:    request GTS according to new GTS slot size
11:   else
12:     reserved = 02
13:    request GTS according to standard GTS slot size
14:   end if
15: else
16:   request GTS according to standard GTS slot size
17: end if

```

GTS SLOT SPLITTING ALGORITHM - GTS ALLOCATION AT COORDINATOR

```

1: if reserved = 00 || reserved = 02 then
2:   allocate slots according to standard GTS slot size
3:   GTS_start_slot = current_GTS_start_slot - GTS_slots_requested
4: else
5:   allocate slots according to new GTS slot size
6:   GTS_start_slot = current_GTS_start_slot - GTS_slots_requested
7: end if
8: if GTS_start_slot is fractional then
9:   if reserved = 01 || reserved = 02 then
10:    GTS_start_slot = integer_part_of GTS_start_slot
11:    final_CAP = GTS_start_slot - 1 // final_CAP is always an integer for backward compatibility
12:    GTS_slot_allocated = GTS_length_requested + 1
13:   else
14:    GTS_start_slot = integer_part_of GTS_start_slot
15:    GTS_slot_allocated = GTS_length_requested
16:    final_CAP = GTS_start_slot - 1
17:   end if
18: else
19:   GTS_slot_allocated = GTS_length_requested
20:   final_CAP = GTS_start_slot - 1
21: end if
22: adjust GTS_start_slot of devices if there are holes in CFP //optional
23: add GTS_start_slot and GTS_slot_allocated to beacon descriptor

```

Figura 8 Algoritmo de Haque
Fuente [76]

Teniendo en cuenta lo anterior, en la tabla 10, se pueden observar las diferencias principales de este algoritmo con el PEMM, propuesto en esta investigación.

Tabla 10 **Diferencias Algoritmo de Haque vs Algoritmo PEMM**

Característica	Diferencias
Modificaciones al estándar tomado como referencia (IEEE 802.15.4)	El algoritmo PEMM no propone modificaciones al estándar, sino que se puede parametrizar para funcionar con cualquier estándar que maneje time-slots, independientemente del número y duración de los mismos; mientras que Haque si lo hace. Específicamente amplía el número de time-slot.
Obtiene los valores de SO y BO para configurar supertrama	El algoritmo PEMM basa su funcionamiento en el cálculo de estas variables, partiendo de BO, para luego obtener SO. Mientras que para 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, pero difieren en que el algoritmo PEMM basa su funcionamiento en la planificación estática para establecer el comportamiento de al WSN y mejorar 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. La diferencia está en la forma como logran los objetivos. El algoritmo PEMM lo hace planificando el uso de los recursos y analizando el comportamiento de la WSN antes de su funcionamiento, mientras que Haque lo hace modificando el estándar para cumplir con los requerimientos de tiempo real de la WSN.
Técnicas utilizadas en la capa MAC	El algoritmo PEMM trabaja con GTS exclusivamente, mientras que Haque trabaja con CSMA y GTS.
Técnica referente utilizada para el algoritmo propuesto	En el algoritmo PEMM se utiliza planificación estática [94], mientras que 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 algoritmo PEMM intenta ofrecer una solución con las mismas garantías para todos los nodos de la red, evaluando la cantidad permitida en función del periodo que transmiten los sensores y el tamaño de los paquetes que transmiten.
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, mientras que para el algoritmo PEMM se evalúa las variables BO y SO principalmente, validando valores posibles que den factibilidad.

Fuente: Esta investigación

A partir de la tabla 10 y la figura 8, se puede apreciar que el algoritmo de Haque, es diferente al algoritmo PEMM, al igual que los algoritmos anteriores propone una modificación al estándar, lo cual como se ha dicho antes no garantiza solucionar el problema completamente, sino por el contrario puede traer nuevas dificultades asociadas a un nuevo diseño. Por otra parte, en este algoritmo (de Haque), se puede apreciar que las variables BO y SO no son fundamentales en el diseño del mismo, sino que se toman por defecto o de manera discreta en la planificación y asignación de GTS, mientras que, para el algoritmo PEMM, como se ha dicho anteriormente son fundamentales. En conclusión, estos dos algoritmos son completamente distintos en la forma que dan solución al problema, preponderando la propuesta realizada por cuanto busca planificar de manera eficiente lo que existe, sin cambios, sino mediante un análisis de comportamiento de los nodos de una WSN y los recursos que se disponen.

3.3.4. Algoritmo PEMM Vs Yoo et al [82]:

El algoritmo que propone Yoo et al [82], se denomina: Guaranteeing Real-Time Services for Industrial Wireless Sensor Networks With IEEE 802.15.4 y tiene las siguientes características, ver tabla 11.

Tabla 11 **Características Generales Algoritmo Yoo et al [82]**

Característica	Yoo et al	PEMM
Modificaciones al estándar tomado como referencia (IEEE 802.15.4)	No, mantiene la estructura original del estándar, busca mejorar la asignación de GTS a los mensajes que transmiten los sensores de una WSN. Habla en términos de cantidad de mensajes que son generados en momentos periódicos y la capacidad del algoritmo para planificarlos en tiempo real.	No, el algoritmo planteado es aplicable a sistemas de reservas que utilicen time-slot sin importar la cantidad que manejen, se adapta ellos.
Maneja Requerimientos de tiempo Real	Si	Si
Obtiene los valores de SO y BO para configurar supertrama	Si los obtiene a partir del mínimo periodo del conjunto de mensajes que envían los sensores, para generar BI y a partir del máximo ciclo de trabajo de la red para obtener SD. Con respecto a SO se busca el valor mínimo que genere poco consumo de energía, por ello parte de con $SO = 0$. En los casos donde el periodo es muy grande toma a $BO = 14$.	Si
Utiliza técnicas de planificación para asignar Time-Slot	Si (La que maneja por defecto el estándar: primero en llegar, primero en atenderse) FCFS	Sí, utiliza la planificación estática [94].
Topología de funcionamiento	Estrella	Estrella
Objetivo del algoritmo	Es un algoritmo para aplicaciones industriales, que busca garantizar tiempo real para un determinado conjunto de mensajes que se envían periódicamente por parte de los sensores.	Es un algoritmo que busca mejorar 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.
Técnicas utilizadas en la capa MAC	Beacon enabled and GTS	Beacon enabled and GTS
Técnica referente utilizada para el algoritmo propuesto	Ninguna	Planificación estática [94]
Variables del Algoritmo	M = Conjunto de paquetes o mensajes que envían los sensores, que incluye periodo y longitud de cada paquete; SS = Tamaño time-slot; N = número de paquetes; L = Longitud de un paquete; P = periodo de un mensaje;	N = Sensores; BI = intervalo de beacon; T = periodo de los nodos para transmitir paquetes; BO = beacon order; SO = superframe order; SD = Superframe duration; Pi = Tamaño de los paquetes;
Funcionamiento	Funciona partiendo del mínimo valor de los periodos de los mensajes que desean transmitir para luego partir de SO = 0 e ir subiendo en la medida que el tamaño de los paquetes lo necesite.	El algoritmo parte de tres variables de entrada: N, T y P, con las cuales busca determinar el BI y SD, identificando para ello 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 o no de transmitir en tiempo real con los nodos que conforman la red.
Seudocódigo	Ver Figura 9	Ver Algoritmo 1
Tipo de solución que ofrece el algoritmo	Garantiza tiempo real hasta con el cumplimiento de los requerimientos que ha implementado en el algoritmo.	Garantiza solución si es factible.
Tratamiento casos no factibles	El algoritmo se probó con redes de cinco nodos a nivel experimental, donde se cumple con la transmisión en tiempo real. No hay un análisis, ni referencia a casos no factibles en esta situación, En las simulaciones realizadas se	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.

	<p>determina que la transmisión en tiempo real es no factible sino se cumple con los requerimientos.</p>	
--	--	--

Fuente: Esta investigación

Schedulable (BO, SO, MF, PH, L, ACKR, Slot4BNC, OVH, S_{SO}, BT)

```

1. //Total utilization  $U_T = U_{BCAP} + \rho(\text{MF}) + U_{IP}$ 
  1-1. //Utilization of beacon frame and CAP
    BI  $\leftarrow aBaseSuperframeDuration \times 2^{BO}$ ;
    SS  $\leftarrow aBaseSuperframeDuration \times 2^{SO} / aNumSuperframeSlots$ ;
    UBCAP  $\leftarrow Slot4BNC_{S_{SO}}(BI/SS)$ ;
  1-2. //Density or utilization of MF,
     $\rho(\text{MF}) \leftarrow \sum_{i=1}^N (LF_i/PF_i)$ ;
  1-3. //Utilization of inactive portion, UIP
    UIP  $\leftarrow (2^{BO} - 2^{SO}) / 2^{BO}$ ;
  1-4. //Total utilization (or duty cycle)
    UT  $\leftarrow U_{BCAP} + \rho(\text{MF}) + U_{IP}$ ;
2. if (UT ≤ 1)
  if (AllocateSlots (SS, Slot4BNCSSO, MF, PH, L, ACKR, OVH, BT)
    != SUCCESS)
    SSO  $\leftarrow$  SHORTGTSORSLOT; //Num of required GTS slots > 7
  else
    SSO  $\leftarrow$  FEASIBLE;
  end if
else
  SSO  $\leftarrow$  EXCEEDUBOUND; //exceed utilization bound
end if

```

Input:

- BO, SO: The specified superframe order and beacon order.
- MF: set of the messages in slot (harmonized)
- PH: set of the messages' periods, in symbol (harmonized)
- L : set of length (in bytes) of message set
- ACKR: set of the messages' ACK requests
- Slot4BNC: Allocated slots for beacon frame and CAP
- OVH: the overhead set

Output:

- S_{SO}: the result of schedulability

Figura 9 Algoritmo Yoo et al
Fuente [82]

Teniendo en cuenta la información expuesta en la tabla 11 y la figura 9, se pueden encontrar las siguientes diferencias del algoritmo de Yoo et al y el algoritmo PEMM, propuesto en esta investigación, ver tabla 12.

Tabla 12 **Diferencias Yoo et al vs Algoritmo PEMM**

Característica	Diferencias
Modificaciones al estándar tomado como referencia (IEEE 802.15.4)	En este aspecto los dos algoritmos conservar la estructura del estándar sin modificaciones. Pero PEMM se puede parametrizar para funcionar con cualquier estándar que maneje time-slots, independientemente del número y duración de los mismos.
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	Los dos algoritmos buscan calcular las variables BO y SO, la diferencia radica en la forma. El algoritmo 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.
Utiliza técnicas de planificación para asignar Time-Slot	Los dos utilizan la misma técnica en la asignación de time-slot FCFS, pero

	<p>difieren en que el algoritmo PEMM basa su funcionamiento en la planificación estática para establecer el comportamiento de al WSN y planificar mejor el uso de recursos a la hora de transmitir paquetes en tiempo real.</p>
Objetivo del algoritmo	<p>Buscan transmitir en tiempo real y mejorar el manejo de los recursos. La diferencia está en la forma como logran los objetivos. En el algoritmo PEMM se hace con métodos matemáticos y formas distintas para calcular las variables BO y SO, que son las que determinan el comportamiento de las supertramas y asignación de GTS.</p>
Técnica referente utilizada para el algoritmo propuesto	<p>En el algoritmo PEMM se utiliza planificación estática [94], mientras que Yoo et al utiliza técnicas que han denominado de armonización matemática.</p>
Garantía de solución para transmitir en tiempo real.	<p>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.</p>
Tratamiento casos no factibles	<p>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 el algoritmo 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.</p>

Fuente: Esta investigación

Tomando como referente la información de la tabla 12 y la figura 9, se puede observar que este algoritmo de Yoo et al, es él que más se asemeja a la propuesta que se realiza en esta investigación, principalmente porque trabajan sin modificar el estándar, mejoran la asignación de los recursos que dispone la supertrama y asigna

los GTS mediante la técnica por defecto que tiene la norma (FCFS). Pero son diferentes en la forma en que se realizan los procedimientos. Mientras que el algoritmo PEMM, propuesto en esta investigación realiza la asignación de recursos buscando calcular BO y SO, mediante el uso de la técnica de planificación estática, identificando el MCD de los periodos para obtener el BI y luego encontrando el MCM de los mismos para obtener el macrociclo; Yoo et al, calcula el BO a partir del mínimo periodo de los sensores de la red, lo cual trae como dificultad que no siempre se podrá cumplir con el requerimiento de todos los nodos de la WSN, puesto que pueden haber periodos que no estén contemplados en el ciclo que se está imponiendo (Periodos de mensajes que no sean múltiplos de otros). Mientras que con el uso del MCD se garantiza que todos los periodos están dentro de las posibilidades del ciclo del BI que se ha calculado. Por otra parte, Yoo et al, calcula el SO, partiendo de 0, luego de acuerdo con los requerimientos de ancho de banda de la WSN va aumentando de acuerdo a lo que se necesite, es decir se asemeja a un cálculo de ensayo y error, que tampoco es muy factible. Mientras que con el algoritmo propuesto que propone manejar el tamaño de SO que satisfaga la totalidad de los paquetes que conforman la WSN, lo que garantiza que todos los nodos, si cumplen con todos los requerimientos, tengan el tamaño suficiente en la supertrama para poder transmitir los paquetes que generan. El trabajo de Yoo et al, es un referente importante de la necesidad de mejorar la transmisión de datos en tiempo real con WSN.

3.3.5. Algoritmo PEMM Vs GAS [37]:

El algoritmo GAS, denominado: GTS Scheduling and service differentiation, tiene las siguientes características, ver tabla 13.

Tabla 13 **Características Generales Algoritmo GAS [37]**

Característica	GAS	PEMM
Modificaciones al estándar tomado como referencia (IEEE 802.15.4)	Si, cambia la forma de asignar los GTS que por defecto vienen con FCFS y utiliza EDF con prioridades en la aplicación.	No, el algoritmo planteado es aplicable a sistemas de reservas que utilicen time-slot sin importar la cantidad que manejen, se adapta ellos.
Maneja Requerimientos de tiempo Real	Si	Si
Obtiene los valores de SO y BO para configurar supertrama	No, maneja valores fijos estimados (lo que puede generar sobredimensión de las capacidades	Si

	planificadas para la red o no cumplimiento con los mínimos para su funcionamiento). En las simulaciones realizadas toma el valor de 8, para BO y SO.	
Utiliza técnicas de planificación para asignar Time-Slot	Si se basa en EDF, pero para el algoritmo se ha modificado denominándose (EDCF-mGTS). Este proceso consiste en encontrar una distribución adecuada de GTS, para los nodos que los requieren en cada supertrama generada.	Sí, utiliza la planificación estática [94].
Topología de funcionamiento	Estrella	Estrella
Objetivo del algoritmo	Es un algoritmo que trabaja en línea con el estándar. Trabaja principalmente con tareas esporádicas y de acuerdo a los requerimientos va asignado los recursos.	Es un algoritmo que busca mejorar 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.
Técnicas utilizadas en la capa MAC	Beacon enabled and GTS	Beacon enabled and GTS
Técnica referente utilizada para el algoritmo propuesto	EDF	Planificación estática [94]
Variables del Algoritmo	N = sensores; BO y SO que son determinadas por el usuario. Las redes son estacionarias. Cada tarea se denomina transacción en el algoritmo y se compone de: d = retardo máximo permitido, P = Longitud de los paquetes en bytes y p = prioridad de la transacción.	N = Sensores; BI = intervalo de beacon; T = periodo de los nodos para transmitir paquetes; BO = beacon order; SO = superframe order; SD = Superframe duration; Pi = Tamaño de los paquetes;
Funcionamiento	El algoritmo permite trabajar con diferentes nodos que	El algoritmo parte de tres variables de entrada: N, T y

	<p>componen una WSN, el cual tiene un sistema de control de admisión, donde se evalúa que nodo se acepta para que tenga GTS (maneja la restricción de sólo poder aceptar 7 GTS al mismo tiempo) y cual se rechaza, se utiliza la técnica mejorada de EDF en cada generación de supertrama, la cual trabaja un sistema de prioridades que se ha definido en el algoritmo.</p>	<p>P, con las cuales busca determinar el BI y SD, identificando para ello 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 o no de transmitir en tiempo real con los nodos que conforman la red.</p>
Seudocódigo	Ver Figura 10	Ver Algoritmo 1
Tipo de solución que ofrece el algoritmo	Mejor esfuerzo, evalúa los requerimientos por nodo y de acuerdo a los mismos les asigna GTS o los rechaza.	Garantiza solución si es factible.
Tratamiento casos no factibles	<p>Dado que es un algoritmo que trabaja con eventos periódicos y esporádicos, existirán casos no factibles de tiempo real, en estos casos de maneja CSMA/CA. Es importante recalcar que el algoritmo trabaja con prioridades, por lo tanto, existirán nodos que no tengan GTS y que posiblemente sean manejados por contención, por lo tanto, dentro del algoritmo no hay una solución evidente para casos no factibles.</p>	<p>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.</p>

Fuente: Esta investigación

```

Algorithm 4: GTS Allocation and Scheduling Algorithm (GAS)
/* Called at the beginning of each beacon interval */
1 Input :  $\mathcal{T}$ 
2 Output: None
3 Data:  $\sigma$ , needReallocation
4 needReallocation ← FALSE
5 If Some transactions will be completed in this beacon interval then
6 | needReallocation ← TRUE
7 end
8 If Some transactions were completed in previous beacon interval then
9 | Remove completed transactions from  $\mathcal{T}$ 
10 | needReallocation ← TRUE
11 end
12 If Arrival of new transactions in the previous beacon interval then
13 | foreach new transaction  $T_j$  do
14 | | Insert  $T_j$  to  $\mathcal{T}$ 
15 | | SortTrByEDCF( $\mathcal{T}$ )
16 | | If CheckFeasibility( $\mathcal{T}$ ) = infeasible then Remove  $T_j$  from  $\mathcal{T}$ 
17 | | else needReallocation ← TRUE
18 | end
19 end
20 If needReallocation = TRUE then
21 | SortTrByEDCF( $\mathcal{T}$ )
22 |  $\sigma$  ← GTSAllocNSchedule( $\mathcal{T}$ )
23 end
24 Allocate GTSs to transactions according to  $\sigma$ 

```

Figura 10 Algoritmo GAS
Fuente [37]

Teniendo en cuenta la información anterior, se han podido identificar las siguientes diferencias con el algoritmo PEMM, propuesto en esta investigación, ver tabla 14.

Tabla 14 **Diferencias GAS vs Algoritmo PEMM**

Característica	Diferencias
Modificaciones al estándar tomado como referencia (IEEE 802.15.4)	El algoritmo PEMM no propone modificaciones al estándar, sino que se puede parametrizar para funcionar con cualquier estándar que maneje time-slots, independientemente del número y duración de los mismos; mientras que GAS, desarrolla un nuevo método de planificación basado en EDF y denominado EDCF-mGTS.
Obtiene los valores de SO y BO para configurar supertrama	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; mientras que algoritmo PEMM calcula estos valores, que son

	la base para la asignación de GTS y transmisión en tiempo real.
Utiliza técnicas de planificación para asignar Time-Slot	El algoritmo PEMM maneja la planificación estática para determinar los valores de BO y SO, pero mantiene la asignación del estándar que es FCFS, mientras que GAS, propone un nuevo modelo basado en EDF.
Objetivo del algoritmo	Buscan transmitir en tiempo real y mejorar el manejo de los recursos. La diferencia está en la forma como logran los objetivos. En el algoritmo PEMM se hace off line, planificando el BI y SD antes de iniciar el funcionamiento de al WSN. Mientras que GAS lo hace online y trabaja más con tareas esporádicas.
Técnica referente utilizada para el algoritmo propuesto	En el algoritmo PEMM se utiliza planificación estática [94], mientras que GAS basa su funcionamiento en EDF diseñando un modelo 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, mientras que el algoritmo PEMM intenta garantizar tiempo real a todos los nodos, caso contrario la red es no factible.
Tratamiento casos no factibles	Los casos no factibles de GTS se tratan con CSMA/CA y se trabaja por contención, mientras que en el algoritmo PEMM se intenta buscar una opción de factibilidad antes de declarar la red no factible para tiempo real.

Fuente: Esta investigación

Teniendo en cuenta la información consignada en la tabla 14 y la figura 10, se puede observar que GAS y el algoritmo PEMM son diferentes. Partiendo del modo de operación On-line que maneja GAS, versus Off-line que maneja el algoritmo PEMM. Por otro lado, el cálculo de BO y SO son fundamentales para el algoritmo desarrollado en esta investigación, mientras que GAS utiliza un valor alto de 8 para

las dos variables, lo que en primera instancia hace que se elimine el tiempo de reposo y por otro lado que se maneje un valor fijo para la supertrama y su intervalo de beacon (BI). Otra diferencia importante es que el algoritmo PEMM intenta dar garantías de asignación del canal y transmisión en tiempo real a todos los nodos que conforman la WSN, para ello evalúa los recursos y características de los paquetes que transmitirá la WSN, mientras que GAS maneja prioridades y según la técnica EDF mejorada, algunos lograrán tener GTS, mientras que otros serán descartados.

3.3.6. Algoritmo PEMM Vs ADA-MAC [68]:

El algoritmo ADA-MAC, denominado: An Adaptive MAC Protocol for Real-Time and Reliable Health Monitoring, tiene las siguientes características, ver tabla 15.

Tabla 15 **Características Generales Algoritmo ADA-MAC [68]**

Característica	ADA-MAC	PEMM
Modificaciones al estándar tomado como referencia (IEEE 802.15.4)	Si, propone mejoras al estándar original. Maneja mini Time-slot, propone 64 en lugar de los 16 por defecto del estándar. Cambia el orden de los periodos de la supertrama, inicia con CFP, luego CAP y por último periodo inactivo.	No, el algoritmo planteado es aplicable a sistemas de reservas que utilicen time-slot sin importar la cantidad que manejen, se adapta ellos.
Maneja Requerimientos de tiempo Real	Si	Si
Obtiene los valores de SO y BO para configurar supertrama	No, maneja valores discretos que configura el usuario.	Si
Utiliza técnicas de planificación para asignar Time-Slot	Si, propone un algoritmo que se basa en prioridades y los tipos de paquetes que manejan los sensores.	Sí, utiliza la planificación estática [94].
Topología de funcionamiento	Estrella	Estrella
Objetivo del algoritmo	Transmitir en tiempo real con GTS, manejando nodos que tenga mayor prioridad sobre otros. Su enfoque es para el cuidado de la salud.	Es un algoritmo que busca mejorar 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.
Técnicas utilizadas en la capa MAC	CSMA/CA y Beacon enabled and GTS	Beacon enabled and GTS
Técnica referente utilizada para el algoritmo propuesto	Utiliza como referente para el diseño del algoritmo propuesto al protocolo: TTP (Time-Triggered Protocol)	Planificación estática [94]
Variables del Algoritmo	GR = Requerimientos de GTS, compuestos de: Longitud paquetes, Dirección MAC, tipo de paquete; GL = Asignación GTS, compuesto de: Slot inicial, longitud, Dirección MAC.	N = Sensores; BI = intervalo de beacon; T = periodo de los nodos para transmitir paquetes; BO = beacon order; SO = superframe order; SD = Superframe duration; Pi = Tamaño de los paquetes;
Funcionamiento	<p>El algoritmo cambia la cantidad de siete GTS, para asignar una cantidad mayor dado que ahora tiene 64 mini-time slot (Igual que otros algoritmos modifica el estándar para ampliar su capacidad en el tratamiento de transmisión de datos en tiempo real).</p> <p>También trabaja con CSMA/CA en el periodo CAP con los nodos que no requieren transmisión en tiempo real. El algoritmo maneja tres tipos de paquetes: ráfagas de datos, datos periódicos y datos normales. Sólo los últimos no requieren transmisión en tiempo real y utilizaran CAP</p>	<p>El algoritmo parte de tres variables de entrada: N, T y P, con las cuales busca determinar el BI y SD, identificando para ello 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 o no de transmitir en tiempo real con los nodos que conforman la red.</p>
Seudocódigo	Ver Figura 11	Ver Algoritmo 1
Tipo de solución que ofrece el algoritmo	Mejor esfuerzo, evalúa los requerimientos por nodo y de acuerdo a los mismos les asigna GTS o los rechaza, dependiendo del tipo de paquete que llegue.	Garantiza solución si es factible.

Tratamiento casos no factibles	Este algoritmo trabaja con nodos que requieren tiempo real y otros que no, para los primeros intenta garantizar GTS y de acuerdo a las prioridades que tenga le asignará el recurso, caso contrario trabajará con CSMA/CA.	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.
--------------------------------	--	---

Fuente: esta investigación.

```

1: startslot = 1, j = 0;
2: set maxslot // the max number
3: GR = {length, MacAddress, brust, periodic}
4: GL = {startslot, length, MacAddress}
5: while GR ≠ NULL do
6:   index = 0;
7:   N = length of GR
8:   for i = 0, 1, 2, ..., N - 1 do // N means the length of GR
9:     if GR[i].brust > GR[index].brust then
10:       index = i;
11:     end if
12:     if GR[i].brust == GR[index].brust then
13:       if GR[i].periodic > GR[index].periodic then
14:         index = i;
15:       end if
16:     end if
17:   end for
18:   if startslot < maxslot then
19:     Assign length muni-slots to the slave node and start in
       startslot
20:     GL[j].startslot = startslot;
21:     GL[j].length = G[index].length
22:     GL[j].Macaddress = G[index].Macaddress
23:     delete G[i] from G;
24:     j = j + 1;
25:     startslot = startslot + GL[j].length;
26:   end if
27: end while

```

Figura 11 Algoritmo ADA-MAC
Fuente [68]

Teniendo en cuenta lo anterior el algoritmo ADA-MAC, presenta las siguientes diferencias con el algoritmo PEMM, ver tabla 16.

Tabla 16 **Diferencias ADA-MAC vs Algoritmo PEMM**

Característica	Diferencias
Modificaciones al estándar tomado como referencia (IEEE 802.15.4)	El algoritmo PEMM no propone modificaciones al estándar, sino que se puede parametrizar para funcionar con cualquier estándar que maneje time-slots, independientemente del número y duración de los mismos; mientras que ADA-MAC si lo hace, dado que maneja un sistema de planificación con prioridades, también ampliando el número de time-slot a 64, 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	El algoritmo PEMM basa su funcionamiento en el cálculo de BO y SO, mientras que ADA-MAC no lo hace, deja que este valor sea discreto y configurable por el usuario.
Utiliza técnicas de planificación para asignar Time-Slot	El algoritmo PEMM maneja la planificación estática para determinar los valores de BO y SO, pero mantiene la asignación del estándar que es FCFS, mientras que 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	Buscan transmitir en tiempo real y planificar mejor el manejo de los recursos. La diferencia está en la forma como logran los objetivos. En el algoritmo PEMM se hace manteniendo la configuración del estándar, planificando los recursos y asignando GTS de acuerdo a la disponibilidad. Mientras que 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	El algoritmo PEMM trabaja con GTS en el modo beacon enable. 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	En el algoritmo PEMM se utiliza planificación estática [94], mientras que 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. En el algoritmo PEMM se busca garantizar tiempo real a todos los nodos, caso contrario maneja los casos no factibles y sino se encuentra solución se declara la red como no factible para tiempo real.
Tratamiento casos no factibles	Los casos no factibles de GTS se tratan con CSMA/CA y se trabaja por contención, mientras que en el algoritmo PEMM se busca una opción de factibilidad antes de declarar la red no factible para tiempo real.

Fuente: Esta investigación

Teniendo en cuenta la información consignada en la tabla 16 y la referida en la figura 11, se puede establecer que el algoritmo PEMM y ADA-MAC son distintos en su funcionamiento y forma de administrar los recursos de una WSN cuando utiliza IEEE 802.15.4. En primer lugar, dado que mientras ADA-MAC cambia el estándar, el algoritmo PEMM lo mantiene sin variación, por otra parte, en el algoritmo PEMM la garantía y búsqueda de que todos los nodos tengan las mismas posibilidades de transmitir en tiempo real es un referente importante, mientras que en ADA-MAC se manejan prioridades y si un nodo está por debajo de otro en prioridad, será descartado y no podrá transmitir en tiempo real. El algoritmo PEMM, no cambia el estándar, sino que busca administrar de manera eficiente las variables BO y SO, que son las encargadas de definir el periodo de tiempo en que se transmiten las supertramas y el tamaño de las mismas respectivamente; disminuyendo hasta donde sea posible y necesario BO, con el fin de ampliar la cantidad de supertramas que se puedan transmitir en un segundo y por ende la cantidad de time-slot y GTS disponibles para asignar a los sensores en su proceso de transmisión. Logrando con lo anterior contar con más posibilidades de disponer los recursos necesarios para garantizar la transmisión de tiempo real en un determinado momento y atendiendo los requerimientos planteados.

3.3.7. Algoritmo PEMM Vs FieldBus [69]:

El algoritmo FieldBus, denominado así por el uso de la técnica FieldBus [107] y que se denomina: Wireless FieldBus for Networked Control Systems using LR-WPAN, tiene las siguientes características, ver tabla 17.

Tabla 17 **Características Generales Algoritmo FieldBus [69]**

Característica	FieldBus	PEMM
Modificaciones al estándar tomado como referencia (IEEE 802.15.4)	Si, propone manejar la asignación de GTS como TDMA, utiliza EDF para manejar la llegada de paquetes y maneja el periodo inactivo en 0.	No, el algoritmo planteado es aplicable a sistemas de reservas que utilicen time-slot sin importar la cantidad que manejen, se adapta ellos.
Maneja Requerimientos de tiempo Real	Si	Si
Obtiene los valores de SO y BO para configurar supertrama	No, hace el periodo inactivo igual a 0, por lo que se deduce que BO = SO.	Si
Utiliza técnicas de planificación para asignar Time-Slot	Utiliza EDF para asignar los GTS, los cuales son reservados para los paquetes periódicos que requieren tiempo real, los esporádicos y demás paquete se manejan con CAP. Los paquetes para transmisión en tiempo real no pueden ser superiores a 5 bytes según la definición de la solución propuesta.	Sí, utiliza la planificación estática [94].
Topología de funcionamiento	Estrella	Estrella
Objetivo del algoritmo	Transmitir en tiempo real con GTS, manejando nodos que tenga mayor prioridad sobre otros. Maneja tres tipos de paquetes: periódicos, esporádicos y sin necesidad de tiempo real.	Es un algoritmo que busca mejorar 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.

Técnicas utilizadas en la capa MAC	CSMA/CA y Beacon enabled with GTS	Beacon enabled and GTS
Técnica referente utilizada para el algoritmo propuesto	FieldBus [107], es una tecnología para transmisión de datos de tipo industrial. Trabaja con control distribuido. Busca la conexión punto a punto en todo momento. Para planificación utiliza EDF.	Planificación estática [94]
Variables del Algoritmo	Define tres tipos de paquetes: esporádicos, periódicos y sin requerimientos de tiempo real.	N = Sensores; BI = intervalo de beacon; T = periodo de los nodos para transmitir paquetes; BO = beacon order; SO = superframe order; SD = Superframe duration; Pi = Tamaño de los paquetes;
Funcionamiento	Funciona analizando los paquetes que llegan y estableciendo una comunicación continua con el nodo coordinador. Se crea una especie de buffer para analizar los paquetes que llegan y de acuerdo a su naturaleza se usa CSMA/CA o GTS	El algoritmo parte de tres variables de entrada: N, T y P, con las cuales busca determinar el BI y SD, identificando para ello 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 o no de transmitir en tiempo real con los nodos que conforman la red.
Algoritmo	Ver Figura 12	Ver Algoritmo 1
Tipo de solución que ofrece el algoritmo	Mejor esfuerzo, evalúa los requerimientos por nodo y de acuerdo a los mismos les asigna GTS o los rechaza, dependiendo del tipo de paquete que llegue.	Garantiza solución si es factible.
Tratamiento casos no factibles	Este algoritmo trabaja con nodos que requieren tiempo real y otros que no, para los primeros intenta garantizar GTS y de acuerdo a las prioridades que tenga le	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

	asignará el recurso, caso contrario trabajará con CSMA/CA.	time-slot a los sensores que requieren transmisión en tiempo real.
--	--	--

Fuente: Esta investigación

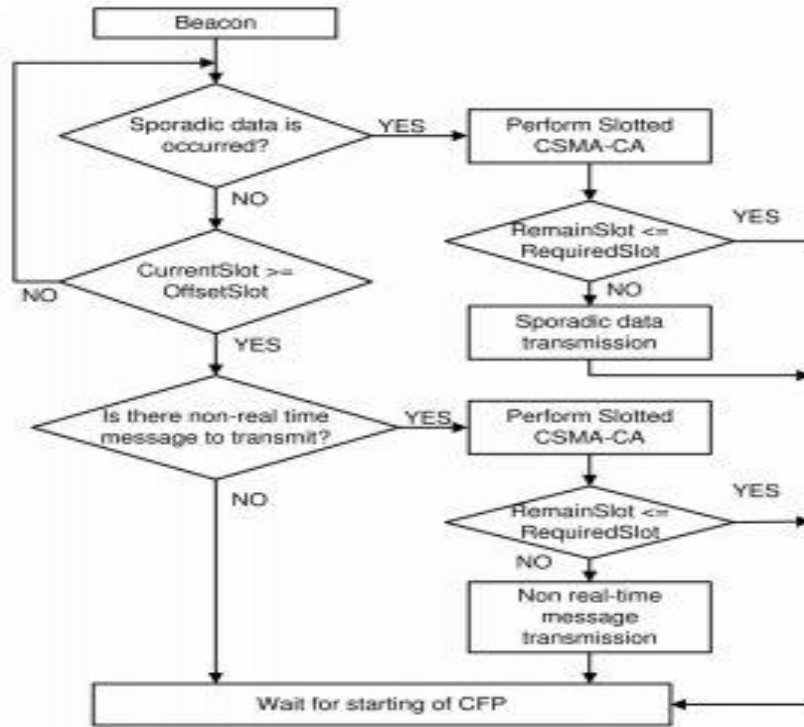


Figura 12 Algoritmo FieldBus
Fuente [69]

Teniendo en cuenta la información antes referenciada acerca del algoritmo FieldBus, a continuación, se presentan las diferencias generales con respecto al algoritmo propuesto, ver tabla 18.

Tabla 18 **Diferencias FieldBus vs Algoritmo PEMM**

Característica	Diferencias
Modificaciones al estándar tomado como referencia (IEEE 802.15.4)	Según la propuesta de FieldBus, se modifica el estándar para que trabaje con TDMA y EDF; mientras que el algoritmo PEMM no propone modificaciones al estándar, sino que se puede parametrizar para funcionar con cualquier estándar que maneje time-slots, independientemente del número y duración de los mismos.

<p>Obtiene los valores de SO y BO para configurar supertrama</p>	<p>El algoritmo PEMM basa su funcionamiento el cálculo de BO y SO, mientras que FieldBus no lo hace, 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.</p>
<p>Utiliza técnicas de planificación para asignar Time-Slot</p>	<p>El algoritmo PEMM, maneja la planificación estática para determinar los valores de BO y SO, pero mantiene la asignación del estándar por defecto, mientras que FieldBus, trabaja con EDF y con las especificaciones del modelo Fieldbus, de donde deriva su nombre.</p>
<p>Objetivo del algoritmo</p>	<p>Buscan transmitir en tiempo real y mejorar el manejo de los recursos. La diferencia está en la forma como logran los objetivos. En el algoritmo PEMM se hace manteniendo la configuración del estándar, planificando los recursos y asignando GTS de acuerdo a la disponibilidad. Mientras que FieldBus, maneja prioridades y utiliza CSMA cuando los nodos no requieran tiempo real y es más de tipo industrial.</p>
<p>Técnicas utilizadas en la capa MAC</p>	<p>El algoritmo PEMM trabaja con GTS en el modo beacon enabled. FieldBus trabaja con beacon enabled y también utiliza CSMA/CA cuando es necesario para paquetes que no requieren transmisión en tiempo real.</p>
<p>Técnica referente utilizada para el algoritmo propuesto</p>	<p>En el algoritmo PEMM se utiliza planificación estática [94], mientras que FieldBus [107], trabaja con control distribuido, buscando la conexión punto a punto en todo momento.</p>
<p>Garantía de solución para transmitir en tiempo real.</p>	<p>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</p>

	rechazará los otros nodos. En el algoritmo PEMM se busca garantizar tiempo real a todos los nodos, caso contrario la red es no factible.
Tratamiento casos no factibles	Los casos no factibles de GTS se tratan con CSMA/CA y se trabaja por contención, mientras que en el algoritmo PEMM se busca una opción de factibilidad antes de declarar la red no factible para tiempo real.

Fuente: esta investigación.

En este análisis comparativo se puede observar que FieldBus, difiere de PEMM, al igual que otros estudios antes mencionados, FieldBus, hace modificaciones al estándar, maneja prioridades, combina el uso de CSMA/CA y GTS para atender los requerimientos de sus nodos y descarta nodos cuando las condiciones del algoritmo así lo permiten. Mientras que el algoritmo PEMM busca todo lo contrario, no maneja prioridades, busca dar las mismas garantías de asignación de canal a todos los nodos, administra los recursos, maneja paquetes de más de 5 bytes si es necesario y mantiene la estructura el estándar sin modificaciones.

4. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO DE PLANIFICACIÓN PARA WSN

La validación del algoritmo PEMM se llevó a cabo mediante la simulación de diferentes casos de WSN aplicadas en entornos reales y casos hipotéticos, así como también se hizo una implementación con sensores reales, donde se configuró la red acorde con las especificaciones que se propuso en el algoritmo. En cada caso se definieron: la cantidad de nodos que conformaron la WSN, los periodos de transmisión por cada sensor y el tamaño de los paquetes que estos envían. Posteriormente se obtuvieron las variables BO y SO según el algoritmo PEMM y se constató su validez y funcionalidad mediante diferentes pruebas. A continuación, se describe el proceso realizado según los casos simulados y la implementación real.

4.1. DISEÑO EXPERIMENTAL

Partiendo de la definición de “experimento diseñado”, de [114], quien sostiene que es una prueba o una serie de pruebas donde se induce a cambios deliberados en las variables de entrada de un proceso o sistema definido, de forma que es posible identificar las causas de los cambios en la respuesta de salida; en la presente investigación se realizaron varias pruebas o experimentos con el fin de validar el funcionamiento del algoritmo PEMM, tomando principalmente para este proceso la simulación de diferentes escenarios de aplicación real de WSN y comparando sus resultados con las posibles salidas que generarían los algoritmos que se tomó como referentes. En estas simulaciones las variables de entrada fueron las definidas para PEMM, acorde con las restricciones establecidas.

La experimentación de acuerdo con [114], tuvo un diseño experimental unifactorial de efectos fijos y de tipo equilibrado, debido a que se manejó un sólo factor, correspondiente al tipo de algoritmo de planificación utilizado para la simulación, cuyos niveles corresponden a los nombres de los algoritmos utilizados: PEMM, I-GAME, EGSA, De Haque, Yoo et al, GAS, ADA-MAC y FieldBus; donde el primero corresponde al diseñado en esta investigación y los demás son los referentes comparativos tenidos en cuenta para determinar la validez de la solución planteada.

El proceso experimental tuvo dos momentos, uno donde se compararon los resultados de las variables de salida que podría generar cada algoritmo ante las variables de entrada propuestas en los casos simulados, este proceso permitió evidenciar el manejo que hace cada algoritmo de los recursos que dispone el estándar IEEE 802.15.4 para la transmisión de datos en tiempo real. En una segunda instancia se aumentó el número de sensores a los casos inicialmente simulados, buscando exigir a PEMM hasta donde fuera posible planificar los

recursos para que este logre el objetivo de transmitir en tiempo real. Con los resultados obtenidos en estos dos momentos se pudo establecer las diferencias con respecto a la eficiencia de los algoritmos estudiados versus PEMM. En la tabla 19 se pueden identificar los elementos tenidos en cuenta para la experimentación.

Tabla 19 **Elementos Experimentación momento 1**

Factor:	Algoritmos de planificación evaluados
Niveles:	PEMM, I-GAME, EGSA, De Haque, Yoo et al, GAS, ADA-MAC y FieldBus
Variables de respuesta:	<ul style="list-style-type: none"> • BO • SO • BI • SD • Posible Cantidad time-slot requerida • Posible Cantidad GTS requerida • Utiliza CSMA/CA: Si o No • Factible tiempo real: Si o No

Fuente: esta investigación.

Antes de proceder con los resultados de la experimentación realizada, a continuación, se explica el funcionamiento de PEMM con un ejemplo de aplicación.

4.2. APLICACIÓN DEL ALGORITMO PEMM EN UNA WSN CON 10 NODOS – EXPLICACIÓN PASO A PASO

Se tiene una red que está compuesta por los siguientes nodos caso [101], ver tabla 20:

Tabla 20 **Parámetros iniciales WSN con 10 nodos**

Etiqueta Nodos	xBSFD	Tamaño Paquete (P) – Bits
1	3000	40
2	4000	1040
3	5000	40
4	3000	1040
5	4000	1040
6	7000	1040
7	9000	40
8	13000	1040
9	10000	40
10	21000	40

Fuente: esta investigación.

Dónde: xBSFD corresponde a las unidades múltiplos de BSFD (que es igual a

0,01536 s). Los pasos que siguen luego de haber obtenido los datos de los sensores que conforman las WSN, son los siguientes:

Paso 1: El primer paso que realiza el algoritmo PEMM es obtener los valores de BO y SO de la WSN propuesta, lo que permitirá conocer el BI y SD respectivamente. Tomando los valores dados en la tabla 20, el resultado de este paso se observa en la tabla 21.

Tabla 21 **Calculo de BO y SO algoritmo PEMM WSN 10 nodos**

Variable	Valor Obtenido
BO	10
SO	1
BI	15,72 s
SD	7680 bits
Tamaño time-slot	480 bits

Fuente: esta investigación.

Paso 2: Con los datos antes calculados y registrados en la tabla 21, el algoritmo procede a calcular la cantidad necesaria de time-slots por nodo sensor y evalúa la factibilidad de transmitir en tiempo real con la asignación de máximo 7 GTS por supertrama, en la tabla 22 se observa el cálculo realizado:

Tabla 22 **Cantidad time-slot por nodo WSN 10 sensores**

Etiqueta Nodos	Cantidad de time-slot requeridos por supertrama
1	1
2	3
3	1
4	3
5	3
6	3
7	1
8	3
9	1
10	1
Total	20

Fuente: esta investigación.

Paso 3: Según los valores obtenidos y registrados en la tabla 22, la WSN con 10 nodos requiere inicialmente de 20 time-slot como mínimo para poder transmitir en tiempo real, situación que no es factible según los parámetros del estándar IEEE 802.15.4, el cual sólo permite 13 time-slot. Los algoritmos que utilizan métodos de contención, cuando se presenta esta situación recurren generalmente a CSMA/CA, lo que hace que se trabaje con técnicas del mejor esfuerzo para asignar los recursos

disponibles en el estándar, pero que no garantizan tiempo real, haciendo que en algunos casos esto genere latencia y hasta pérdida de paquetes, la primera debido a que algún nodo deberá esperar que los recursos estén disponibles para poder transmitir, generando un retardo adicional en el proceso, mientras que el segundo se puede generar cuando hay colisiones entre paquetes que se transmiten al mismo tiempo. Debido a lo anterior, el algoritmo 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 envía los datos según le correspondan en el BI que se adapte a su periodo, mientras que el segundo grupo se desplaza en una unidad de BI con respecto al periodo inicialmente planteado. En la tabla 23 se puede observar los cambios que hace el algoritmo PEMM en este paso.

Tabla 23 **Disminución BO para WSN 10 sensores**

Variable	Valor Inicialmente obtenido	Cambio propuesto PEMM
BO	10	9
SO	1	1
BI	15,72 s	7,86 s
N	Un solo grupo de 10 nodos	Dos grupos de 5 nodos

Fuente: esta investigación.

Paso 4: Cuando se hace el cambio propuesto en el paso 3, el algoritmo 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 siete (7) GTS y 13 time-slot en cada generación de supertrama. Para validar este requerimiento se ejecutan las iteraciones de los BI hasta que se cumpla el Macro ciclo, si en dicho proceso se encuentra que, en cada BI, las supertramas manejaban hasta 7 GTS y máximo 13 time-slot, se determina 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 24 se pueden observar las iteraciones que hizo el algoritmo PEMM.

Tabla 24 **Iteraciones con dos grupos de sensores para WSN 10 nodos**

Iteración	Valor BO	Valor SO	Resultado PEMM
Dos grupos de Sensores – 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

Fuente: esta investigación.

Paso 5: Debido a que no se logró cumplir con el requerimiento del estándar en el paso anterior, el algoritmo 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 obtiene que la red es factible para la transmisión en tiempo real cuando BO = 9, pero trabajando con tres grupos de sensores. En la tabla 25 se observa el resultado obtenido, en la figura 14, se puede observar gráficamente este comportamiento.

Tabla 25 **Resultado tres grupos de sensores WSN de 10 nodos**

Itera	BI (s)	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	Total
0	0	1	3	1	0	0	0	0	0	0	0	5
1	7,86	0	0	0	3	3	3	0	0	0	0	9
2	15,7	0	0	0	0	0	0	1	3	1	1	6
3	23,5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
4	31,4	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	6
5	39,3	0	0	1	0	3	0	0	0	0	0	4
...
39997	314549,2	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0	6
39998	314557,0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
39999	314564,9	1	0	0	0	0	3	0	0	0	0	4

Fuente: esta investigación.

En la tabla 25 se puede observar que se tiene una primera columna con las iteraciones que hace el algoritmo 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 s (Valor que es calculado por el algoritmo PEMM), 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 tres 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 se requerían inicialmente, haciendo que ahora se manejarán grupos que no superan los 13 time-slot, ni los siete (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.

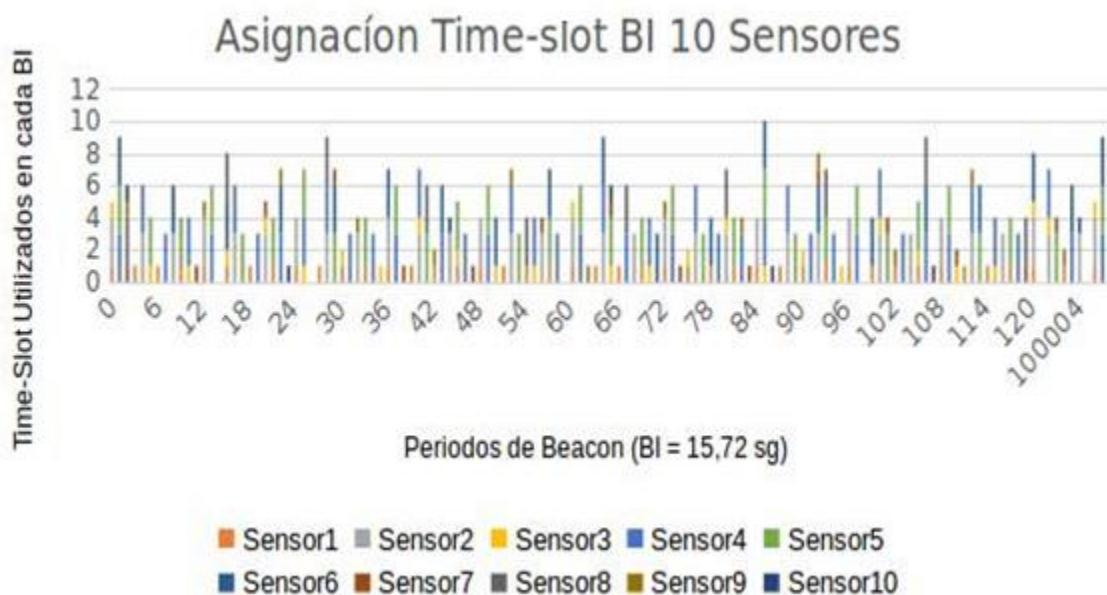


Figura 13 Comportamiento WSN Caso [101]
Fuente esta investigación

En la figura 13 se puede observar como el algoritmo PEMM en su quinto paso logra hacer factible la WSN con 10 sensores, donde de requerir inicialmente 20 time-slots para asignar a los nodos en la transmisión de datos, logra disminuir este valor en máximo 10, tal y como se observa entre los periodos 84 y 90 de la figura 13. También se puede observar que PEMM estableció como BI acorde con los periodos de los sensores el valor de 15,72s, configurándose este valor como el microciclo de la WSN.

Uno de los aspectos que controla el algoritmo propuesto en la simulación realizada y que se observa en la tabla 25, corresponde a la verificación que el número de time-slot no sobrepase el número de 13 por supertrama y que los GTS sean máximo siete (7). En los casos cuando se trabaja con WSN, que se componen de más de

siete (7) nodos, se evalúa el comportamiento de los nodos 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. 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 (Este puede evidenciar en los pasos explicados anteriormente). En la figura 15, se puede observar el comportamiento de los microciclos (BI) y macrociclos del caso [100] simulado, que corresponden a 3 nodos sensores.

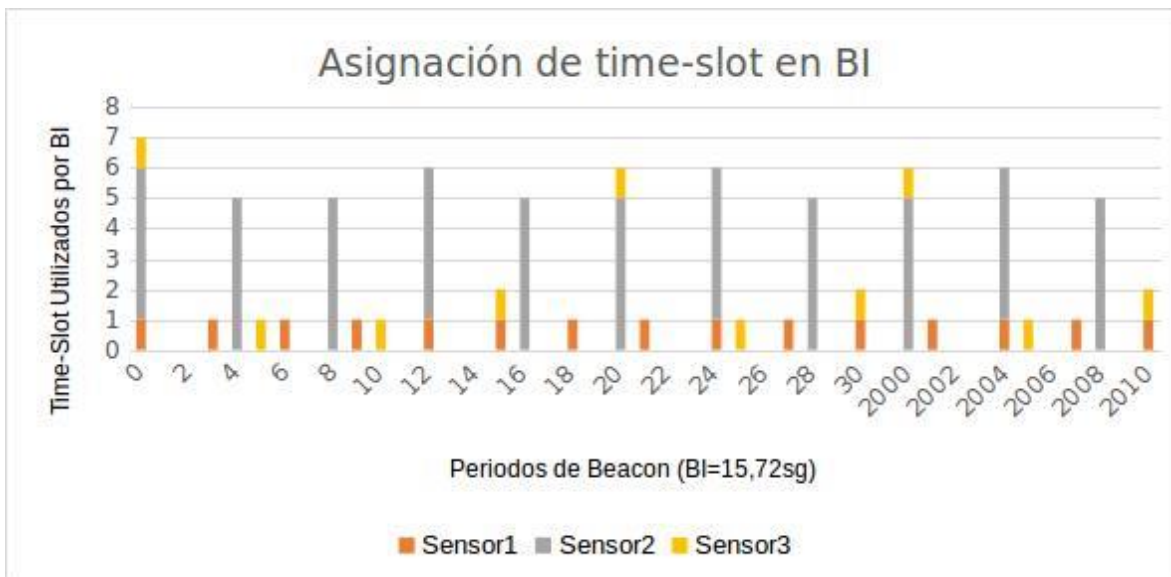


Figura 14 Comportamiento WSN Caso [100]
Fuente esta investigación

En la figura 14 se puede observar que para el caso [100], que constituye una red de sensores de tres nodos y un coordinador, el microciclo que genera el algoritmo es de 15,72 s (BI), donde se puede encontrar que el sensor 1, según su programación interna es el que más se repite en los diferentes microciclos de la WSN (barra color naranja); mientras que los sensores 2 (barra gris) y 3 (barra amarilla), lo hacen en diferentes intervalos, alternándose la transmisión según el periodo que les corresponde, en este caso el macrociclo que ha sido calculado por PEMM, indica que se presentará en la iteración 60000 del BI establecido, donde se generará el mayor uso de time-slot de la supertrama que equivale a 7, es decir todos los time-slot serán requeridos.

Explicado el funcionamiento de PEMM paso a paso, en el siguiente apartado se continua con los escenarios de simulación aplicados para validar el algoritmo de acuerdo con el diseño experimental propuesto.

4.3 ESCENARIOS DE SIMULACIÓN PARA VALIDACIÓN DEL ALGORITMO VERSUS OTROS ALGORITMOS

El algoritmo desarrollado, como se mencionó anteriormente, se aplicó en casos basados en contextos reales, principalmente en aplicaciones específicas relacionadas con áreas críticas que requieren de la atención y respuesta en tiempo real. En la tabla 26 se pueden encontrar algunas situaciones que fueron estudiadas para la simulación con el algoritmo propuesto y los posibles resultados que se obtendrían si se aplican los otros algoritmos que se han tomado como referente de comparación (En el anexo 1, se encuentran los datos para cada caso señalado con los tamaños de los paquetes y los periodos de cada nodo sensor). En la misma tabla se pueden encontrar los casos referenciados con la descripción de la situación en que se aplica la WSN, el número de nodos que se toma para la simulación (N) y los tamaños de los paquetes que se deduce pueden manejar los sensores (Pi_{min} y Pi_{max}).

Tabla 26 Estudios y algoritmos para MAC IEEE 802.15.4.

Aplicación	N	Pi_min	Pi_max
WSN para monitorización volcánica [97]	8	400 bits	1040 bits
Arquitectura de e-Salud basada en Redes Inalámbricas de Sensores [98]	5	300 bits	480 bits
Monitoreo de Calidad Ambiental en base a Redes Inalámbricas de Sensores [99]	7	384 bits	1040 bits
WSN Aplicado a Entornos de Salud – monitoreo señales biomédicas [100]	3	380 bits	816 bits
sensores inalámbricos para la monitorización de infraestructuras críticas de puentes [101]	10	40 bits	1040 bits
Monitorización de entornos submarinos en tiempo real [103]	20	80 bits	320 bits

Fuente: esta investigación.

Tomando los datos consignados en la tabla 26 y aplicando cada caso con el funcionamiento de PEMM y los otros algoritmos en comparación, los resultados obtenidos en el primer momento del diseño experimental se pueden observar en la tabla 27 (Los datos de cada caso con respecto a los sensores tomados para la obtención de los resultados propuestos se pueden encontrar en el anexo 1). En los resultados que se aprecian en la tabla 27, se busca evidenciar como trabaja cada uno de los algoritmos evaluados, indicando los posibles valores que generarían para las variables que maneja PEMM, en algunos casos BO y SO no se pueden calcular porque el algoritmo en evaluación no lo permite, lo que hace que las otras variables que dependen de estos valores no se puedan obtener. Por otro lado, también se ha estimado la cantidad de time-slot (Cant time-slot) que requería el algoritmo en

evaluación por cada caso presentado; esto con el fin de evidenciar la diferencia en el manejo de este valor con respecto al que maneja PEMM, si bien es cierto algunos algoritmos manejan CSMA/CA cuando no hay los recursos suficientes para garantizar la transmisión, es importante conocer la variable que ha generado esta situación, la cual corresponde precisamente a la cantidad de time-slot necesarios para la transmisión y que también daría paso a determinar la posible cantidad de GTS necesarios (Cant. Pos. GTS) en el proceso para los nodos de la WSN. Con respecto a la latencia, como se mencionó en la sección anterior, se parte de la premisa que cuando una WSN utiliza CSMA/CA para acceder al medio y obtener los recursos necesarios (time-slots) para la transmisión de datos, puede suceder que uno o varios nodos sensores que la conforman se vean obligados a esperar un tiempo determinado para obtener un recurso disponible que haga posible la transmisión de datos, lo que puede generar latencia, así como también posibles pérdidas de paquetes, sobre todo cuando sucedan colisiones en la aplicación de este método de acceso al medio. Por lo anterior en la tabla 27, también se ha incluido las columnas que permiten verificar la cantidad de time-slots (Cant. Time-slot) que se requerirían según el algoritmo, la posible cantidad de GTS requeridos (Cant. Pos. GTS) según cada WSN presentada, así como si utiliza o no CSMA/CA para el desarrollo del proceso y si es no factible para transmisiones en tiempo real.

Tabla 27 **Resultados simulación casos reales con PEMM y Algoritmos en comparación.**

WSN para monitorización volcánica [97]: 8 Sensores								
Algoritmo	BO	SO	BI (s)	SD (bits)	Cant. Time-slot	Cant. Pos. GTS	CSMA/CA	Factible Tiempo Real
PEMM	9	1	7,86	7680	13	7	No	Si
I-GAME	ND	ND	30,72	ND	20	8	Si	No
EGSA	5	5	30,72	122880	5	8	Si	No
De Haque	5	1	30,72	7680	32	8	No	Si
Yoo et al	5	1	30,72	7680	20	8	No	No
GAS	5	5	30,72	122880	5	8	Si	No
ADA-MAC	5	2	30,72	15360	32	8	Si	Si
FieldBus	5	5	30,72	122880	5	8	Si	No
Arquitectura de e-Salud basada en Redes Inalámbricas de Sensores [98]: 5 sensores								
Algoritmo	BO	SO	BI (s)	SD (bits)	Cant. Time-slot	Cant. Pos. GTS	CSMA/CA	Factible Tiempo Real
PEMM	5	0	0,49	3840	10	5	No	Si
I-GAME	ND	ND	0,614	ND	10	5	No	Si
EGSA	0	0	0,614	3840	10	5	No	Si
De Haque	0	0	0,614	3840	10	5	No	Si
Yoo et al	0	0	0,614	3840	10	5	No	Si

GAS	0	0	0,614	3840	10	5	No	Si
ADA-MAC	0	0	0,614	3840	10	5	No	Si
FieldBus	0	0	0,614	3840	10	5	No	Si

Monitoreo de Calidad Ambiental en base a Redes Inalámbricas de Sensores [99]: 7 sensores

Algoritmo	BO	SO	BI (s)	SD (bits)	Cant. Time-slot	Cant. Pos. GTS	CSMA/CA	Factible Tiempo Real
PEMM	7	1	1,96	7680	13	7	No	Si
I-GAME	ND	ND	38,4	ND	13	7	No	Si
EGSA	5	5	38,4	122880	7	7	No	Si
De Haque	5	1	38,4	7680	13	7	No	Si
Yoo et al	5	1	38,4	7680	13	7	No	Si
GAS	5	5	38,4	122880	7	7	No	Si
ADA-MAC	5	1	38,4	7680	32	7	No	Si
FieldBus	5	5	38,4	122880	7	7	No	Si

WSN Aplicado a Entornos de Salud – monitoreo señales biomédicas [100]: 3 sensores

Algoritmo	BO	SO	BI (s)	SD (bits)	Cant. Time-slot	Cant. Pos. GTS	CSMA/CA	Factible Tiempo Real
PEMM	9	0	7,86	3840	8	3	No	Si
I-GAME	ND	ND	46,08	ND	8	3	No	Si
EGSA	6	6	46,08	245760	3	3	No	Si
De Haque	6	0	46,08	3840	8	3	No	Si
Yoo et al	6	0	46,08	3840	8	3	No	Si
GAS	6	6	46,08	245760	3	3	No	Si
ADA-MAC	6	0	46,08	3840	8	3	No	Si
FieldBus	6	6	46,08	245760	3	3	No	Si

WSN para la monitorización de infraestructuras críticas de puentes [101]: 10 Sensores

Algoritmo	BO	SO	BI (s)	SD (bits)	Cant. Time-slot	Cant. Pos. GTS	CSMA/CA	Factible Tiempo Real
PEMM	9	1	7,86	7680	13	7	No	Si
I-GAME	ND	ND	46,08	ND	20	10	Si	No
EGSA	6	6	46,08	245760	10	10	Si	No
De Haque	6	1	46,08	7680	20	10	No	Si
Yoo et al	6	1	46,08	7680	20	10	No	No
GAS	6	6	46,08	245760	10	10	Si	No
ADA-MAC	6	1	46,08	7680	20	10	Si	No
FieldBus	6	6	46,08	245760	10	10	Si	No

WSN para monitorización de entornos submarinos en tiempo real [103]: 20 Sensores								
Algoritmo	BO	SO	BI (s)	SD (bits)	Cant. Time-slot	Cant. Pos. GTS	CSMA/CA	Factible Tiempo Real
PEMM	ND	1	ND	7680	ND	7	No	No
I-GAME	ND	ND	768	ND	20	20	Si	No
EGSA	10	10	768	3932160	20	20	Si	No
De Haque	10	0	768	3840	20	20	Si	No
Yoo et al	10	0	768	3840	20	20	Si	No
GAS	8	8	768	983040	20	20	Si	No
ADA-MAC	12	1	768	7680	20	20	Si	No
FieldBus	10	10	768	3932160	20	20	Si	No

Fuente: esta investigación.

A partir de la tabla 27 se han generado dos tablas de resultados, donde se puede evidenciar el comportamiento de PEMM versus los otros algoritmos estudiados, evidenciando que en la mayoría de los casos PEMM encontró una solución factible a la planificación de la WSN propuesta para transmitir en tiempo real, mientras que la mayoría de los otros algoritmos, buscó una solución haciendo uso de CSMA/CA (ver tablas 28 y 29), lo que podría generar mayor latencia en la transmisión y hacer incompatible la transmisión en tiempo real.

Tabla 28 **Relación de algoritmos que pueden transmitir en tiempo real con GTS**

Algoritmos que transmiten en tiempo real								
Aplicación	PEMM	I-GAME	EGSA	De Haque	Yoo et al	GAS	ADA-MAC	FieldBus
WSN 8 Sensores	Si	No	No	Si	No	No	No	No
WSN 5 Sensores	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
WSN 7 Sensores	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
WSN 3 Sensores	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
WSN 10 Sensores	Si	No	No	Si	No	No	No	No
WSN 20 Sensores	No	No	No	No	No	No	No	No

Fuente: esta investigación.

Como se puede observar en la tabla 28, PEEM es el único algoritmo que busca una alternativa de planificación para la transmisión de tiempo real en casi todos los casos (a excepción del caso de 20 sensores, donde ninguno de los algoritmos propuestos encontró una solución factible). Es importante comprender que se hace

la afirmación de que el algoritmo o los algoritmos transmiten en tiempo real, cuando no utilizan métodos de contención (CSMA/CA) para planificar el proceso de transmisión de datos, es decir de acuerdo con lo mencionado en todo este documento, se refiere a las WSN que utilizan todos sus recursos para garantizar que cada nodo sensor que las constituye tiene asignado un conjunto de time-slot (GTS) que así lo posibilitan. Si esto no ocurre se dice que la WSN no es factible para la transmisión en tiempo real.

Tabla 29 Relación de algoritmos que utilizan CSMA/CA para la transmisión de datos

Algoritmos que utilizan CSMA/CA en la WSN propuesta								
Aplicación	PEMM	I-GAME	EGSA	De Haque	Yoo et al	GAS	ADA-MAC	FieldBus
WSN 8 Sensores	No	Si	Si	No	No	Si	No	Si
WSN 5 Sensores	No	No	No	No	No	No	No	No
WSN 7 Sensores	No	No	No	No	No	No	No	No
WSN 3 Sensores	No	No	No	No	No	No	No	No
WSN 10 Sensores	No	Si	Si	No	No	Si	Si	Si
WSN 20 Sensores	No	Si	Si	Si	No	Si	Si	Si

Fuente: esta investigación.

En la tabla 29, se puede observar que la mayoría de algoritmos estudiados como referente para PEMM, utilizan métodos de contención para planificar la transmisión de datos, a excepción de PEMM, que cuando se presenta el caso no encontrar una planificación que satisfaga el requerimiento de tiempo real (es decir no tiene recursos GTS para garantizar la transmisión a los nodos sensores de la WSN), cataloga la red como no factible para transmitir en tiempo real, pero de acuerdo con el diseño realizado no acude a métodos de contención.

En la siguiente sección de este documento se presentan los mismos casos propuestos en la simulación anterior, pero ahora en este segundo momento ampliando la cantidad de sensores por WSN, el límite ha sido la cantidad de sensores que PEMM ha permitido para redes factibles de transmisión en tiempo real en comparación con los otros algoritmos.

4.4 ESCENARIOS DE SIMULACIÓN PARA VALIDACIÓN DEL ALGORITMO – CASOS DE APLICACIÓN REAL CON NÚMERO DE SENSORES AMPLIADO.

El ejercicio que se planteó en esta sección correspondió a evaluar los casos factibles antes presentados con el algoritmo propuesto, pero variando la cantidad

máxima de nodos que inicialmente se propuso en la red. El objeto de este ejercicio fue, determinar la escalabilidad que podría tener la WSN, si se conservan las condiciones iniciales, pero se adicionan más nodos a la red. La tabla de casos y datos con la cantidad de sensores que se adicionó se puede ver en la tabla 30.

Tabla 30 **Casos simulados con número de sensores ampliado**

Aplicación	Nodos inicio	Nodos adicionados	Total nodos
WSN para monitorización volcánica [97]	8	6	14
Arquitectura de e-Salud basada en Redes Inalámbricas de Sensores [98]	5	2	7
Monitoreo de Calidad Ambiental en base a Redes Inalámbricas de Sensores [99]	7	7	14
WSN Aplicado a Entornos de Salud – monitoreo señales biomédicas [100]	3	18	21
sensores inalámbricos para la monitorización de infraestructuras críticas de puentes [101]	10	8	18
Monitorización de entornos submarinos en tiempo real [103]	20	-5	15

Fuente: esta investigación.

Como se mencionó anteriormente la cantidad de nodos adicionada que se puede observar en la tabla 30, estuvo asociada a la capacidad de PEMM para garantizar una solución factible de transmisión en tiempo real en la WSN propuesta, en el caso [103], se puede observar que en lugar de aumentar se disminuyó el número de sensores, dado que inicialmente no se pudo garantizar planificación para la transmisión en tiempo real. Los resultados de este ejercicio se pueden observar en la tabla 31, en el anexo 2 se encuentran las tablas de datos de los casos simulados.

Tabla 31 **Resultados simulación casos reales con PEMM y Algoritmos en comparación.**

WSN para monitorización volcánica [97]: 14 Sensores								
Algoritmo	BO	SO	BI (s)	SD (bits)	Cant. Time-slot	Cant. Pos. GTS	CSMA/CA	Factible Tiempo Real
PEMM	9	2	7,86	15360	13	7	No	Si
I-GAME	ND	ND	30,72	ND	21	14	Si	No
EGSA	5	5	30,72	122880	21	14	Si	No
De Haque	5	2	30,72	15360	21	14	No	Si
Yoo et al	5	2	30,72	15360	21	14	No	No
GAS	5	5	30,72	122880	21	14	Si	No

ADA-MAC	5	2	30,72	15360	21	14	Si	No
FieldBus	5	5	30,72	122880	21	14	Si	No
Arquitectura de e-Salud basada en Redes Inalámbricas de Sensores [98]: 7 sensores								
Algoritmo	BO	SO	BI (s)	SD (bits)	Cant. Time-slot	Cant. Pos. GTS	CSMA/CA	Factible Tiempo Real
PEMM	5	1	0,49	7680	13	7	No	Si
I-GAME	ND	ND	0,61	ND	14	7	No	Si
EGSA	0	0	0,61	3840	14	7	No	Si
De Haque	0	0	0,61	3840	14	7	No	Si
Yoo et al	1	1	0,61	7680	14	7	No	Si
GAS	0	0	0,61	3840	14	7	No	Si
ADA-MAC	0	0	0,61	3840	14	7	No	Si
FieldBus	0	0	0,61	3840	14	7	No	Si
Monitoreo de Calidad Ambiental en base a Redes Inalámbricas de Sensores [99]: 14 sensores								
Algoritmo	BO	SO	BI (s)	SD (bits)	Cant. Time-slot	Cant. Pos. GTS	CSMA/CA	Factible Tiempo Real
PEMM	6	2	0,98	15360	13	7	No	Si
I-GAME	ND	ND	38,4	ND	26	14	Si	No
EGSA	5	5	38,4	122880	26	14	Si	No
De Haque	5	1	38,4	7680	26	14	No	Si
Yoo et al	5	1	38,4	7680	26	14	No	No
GAS	5	5	38,4	122880	26	14	Si	No
ADA-MAC	5	1	38,4	7680	26	14	Si	No
FieldBus	5	5	38,4	122880	26	14	Si	No
WSN Aplicado a Entornos de Salud – monitoreo señales biomédicas [100]: 21 sensores								
Algoritmo	BO	SO	BI (s)	SD (bits)	Cant. Time-slot	Cant. Pos. GTS	CSMA/CA	Factible Tiempo Real
PEMM	8	2	3,93	15360	13	7	No	Si
I-GAME	ND	ND	99,84	ND	21	21	Si	No
EGSA	7	7	99,84	491520	21	21	Si	No
De Haque	7	2	99,84	15360	21	21	Si	No
Yoo et al	7	2	99,84	15360	21	21	No	No
GAS	7	7	99,84	491520	21	21	Si	No
ADA-MAC	7	2	99,84	15360	21	21	Si	No
FieldBus	7	7	99,84	491520	21	21	Si	No

WSN 14 Sensores	Si	No	No	Si	No	No	No	No
WSN 21 Sensores	Si	No	No	No	No	No	No	No
WSN 18 Sensores	Si	No	No	No	No	No	No	No
WSN 15 Sensores	Si	No	No	No	No	No	No	No

Fuente: esta investigación.

Tabla 33 Relación de algoritmos que utilizan CSMA/CA para la transmisión de datos con WSN aumentadas en nodos

Algoritmos que utilizan CSMA/CA en la WSN propuesta								
Aplicación	PEMM	I-GAME	EGSA	De Haque	Yoo et al	GAS	ADA-MAC	FieldBus
WSN 14 Sensores	No	Si	Si	No	No	Si	Si	Si
WSN 7 Sensores	No	No	No	No	No	No	No	No
WSN 14 Sensores	No	Si	Si	No	No	Si	Si	Si
WSN21 Sensores	No	Si	Si	Si	No	Si	Si	Si
WSN 18 Sensores	No	Si	Si	Si	No	Si	Si	Si
WSN 15 Sensores	No	Si	Si	Si	No	Si	Si	Si

Fuente: esta investigación.

Como se puede observar en la tabla 32, PEEM es el único algoritmo que en la propuesta de ampliar las WSN con más sensores, mantiene la alternativa de planificación para la transmisión de tiempo real en todos los casos propuestos. Por otra parte, en la tabla 33, se puede observar que la mayoría de algoritmos estudiados a excepción de PEMM, utilizan métodos de contención para planificar la transmisión de datos.

De acuerdo a lo anterior (tablas: 31,32 y 33), se puede observar que las WSN fueron aumentadas en la cantidad de nodos que las componen, evidenciando que PEMM hace posible la escalabilidad en una WSN, para la transmisión en tiempo real, situación que depende principalmente de la variación del periodo en que transmitan los nodos y el tamaño de los paquetes que manejen. Por ejemplo, en el caso del monitoreo de variables ambientales [99], la WSN paso de manejar 7 nodos a la posibilidad de tener 14, garantizando máximo 13 time-slot y siete (7) GTS en cada periodo de beacon, en la tabla 34, se puede observar la relación de periodo de transmisión por sensor y el tamaño de los paquetes para este caso específico, donde se puede apreciar que la variabilidad de los datos es importante, se tiene nodos que transmiten en periodos pequeños de mínimo 2500 xBFSD, frente a otros

que pueden llegar hasta los 10000 xBFSD. Con respecto a los paquetes se observa que la situación es similar, se tienen paquetes de mínimo 32 bits, hasta paquetes de tamaño máximo de 1040 bits.

Tabla 34 Tabla de periodos y paquetes WSN variables ambientales de 14 nodos caso [99]

Nodo	Periodo (xBFSD)	Tamaño paquete (bits)
1	5000	384
2	10000	1040
3	2500	384
4	4200	1040
5	6000	500
6	5000	500
7	8000	384
8	5000	384
9	10000	1040
10	2500	384
11	4200	1040
12	6000	500
13	5000	500
14	8000	384

Fuente: esta investigación.

4.5. ESCENARIOS DE SIMULACIÓN PARA VALIDACIÓN DEL ALGORITMO PEMM – EN FUNCIÓN DE LOS PERIODOS DE MUESTREO (TI) MÁXIMOS Y MÍNIMOS QUE PERMITE EL ESTÁNDAR, ASOCIADOS TAMBIÉN AL TAMAÑO DE LOS PAQUETES (PI)

Otros casos en los cuales se evaluó el funcionamiento del algoritmo PEMM, fue en situaciones extremas, en donde se forzó al algoritmo a trabajar con valores máximos [108] y mínimos [109] en sus variables. Con estas pruebas fue posible corroborar el correcto funcionamiento para estas situaciones límite, las cuales están más relacionadas con las restricciones propias que tenga el estándar que con la solución que se ha propuesto en esta investigación, identificando algunos posibles rangos en términos del número de sensores, periodos de tiempo y tamaños de los paquetes, con los cuales podría trabajar el algoritmo para determinar que una WSN es factible para la transmisión en tiempo real. En la tabla 35, se puede observar los valores de los diferentes casos simulados, con los periodos de tiempo utilizados y tamaños de paquetes propuestos.

Tabla 35 **Casos de aplicación algoritmo propuesto – Tablas de periodos y tiempos**

Caso Simulado	Sensores (N)	Periodos (T) Unidades de BI	Tamaño Paquetes (P) Bits
1. Al menos un sensor con el Mínimo valor de BI y con el mínimo valor de Pi.	S1	1	32
	S2	5	32
	S3	10	32
	S4	20	32
	S5	30	32
	S6	40	32
	S7	50	32
	S8	1	32
	S9	5	32
	S10	10	32
	S11	20	32
	S12	30	32
	S13	40	32
	S14	50	32
	S15	1	32
2. Al menos un sensor con el Máximo valor de BI y máximo valor de Pi.	S1	16000	1016
	S2	5000	1016
	S3	16400	1016
	S4	6400	1016
	S5	8200	1016
	S6	5300	1016
	S7	10200	1016
	S8	15300	1016
	S9	16000	1016
	S10	5000	1016
	S11	16400	1016
	S12	6400	1016
	S13	8200	1016
	S14	5300	1016
	S15	10200	1016
	S16	15300	1016
	S17	16000	1016
	S18	5000	1016
	S19	16400	1016
	S20	6400	1016
	S21	8200	1016
	S22	5300	1016
3. Al menos un sensor con el Mínimo valor de BI	S1	1	1016
	S2	5	1016

y el máximo valor de Pi.	S3	10	1016
4. Al menos un sensor con el Máximo valor de BI y mínimo valor de Pi.	S1	16000	32
	S2	5000	32
	S3	16400	32
	S4	6400	32
	S5	8200	32
	S6	5300	32
	S7	10200	32
	S8	15300	32
	S9	16000	32
	S10	5000	32
	S11	16400	32
	S12	6400	32
	S13	8200	32
	S14	5300	32
	S15	10200	32
	S16	15300	32
	S17	16000	32
	S18	5000	32
	S19	16400	32
	S20	6400	32
	S21	8200	32
	S22	5300	32

Fuente: Esta investigación

Luego de ejecutar el algoritmo con los valores de la tabla 35, se encontraron los resultados registrados en la tabla 36.

Tabla 36 **Casos de aplicación algoritmo propuesto – Resultados ejecución del algoritmo**

Aplicación	Nodos	BO	SO	BI (s)	SD (bits)	Cant GTS	Factible Tiempo Real
1. Al menos un sensor con el Mínimo valor de BI y con el mínimo valor de Pi.	15	0	0	0,015	3840	7	Si
2. Al menos un sensor con el Máximo valor de BI	22	6	3	0,983	30720	7	Si

y máximo valor de Pi.							
3. Al menos un sensor con el Mínimo valor de BI y el máximo valor de Pi.	3	0	0	0,015	3840	3	Si
4. Al menos un sensor con el Máximo valor de BI y mínimo valor de Pi.	22	6	3	0,983	30720	7	Si

Fuente: Esta investigación

En la tabla 36, se puede observar algunas situaciones que fueron simuladas con el algoritmo y que generaron resultados importantes. Por ejemplo, en el caso uno (1), cuando una WSN tiene 15 sensores, utilizando al menos un sensor con el mínimo intervalo de beacon ($BI = 0,01536$ s) y trabajando con el mínimo tamaño del paquete permitido (4 bytes = 32 bits [109]), es factible una planificación para lograr una transmisión en tiempo real cuando $BO = 0$ y $SO = 0$, aplicando el algoritmo, el cual encuentra la planificación factible cuando organiza los nodos en tres grupos y hace un desplazamiento en tiempo de los mismos en una unidad para el grupo uno, en dos unidades para el grupo dos y en tres unidades para el grupo tres. Para el caso dos (2), cuando se cuenta con al menos un sensor con el máximo valor de BI y el máximo valor de Pi, se puede planificar y garantizar una transmisión en tiempo real para WSN que tengan hasta 22 nodos, con valores de $BO = 6$ y $SO = 3$, nuevamente el algoritmo de forma heurística valida que se cumplan las restricciones definidas anteriormente en este documento. En el caso tres (3), el algoritmo sólo encontró factible la WSN con tres nodos, puesto que se trabaja con el máximo valor de PI y el mínimo valor de BI, lo que podría generar que SO tienda a ser mayor que BO , lo que según el estándar y las restricciones definidas para el algoritmo no es posible. Por lo anterior cuando $BO = 0$ y $SO = 0$, con los valores propuestos para el caso tres, sólo se admiten máximo tres nodos con una organización de dos grupos de nodos. Por último, en el caso cuatro (4), se presenta una situación similar al caso 2 y la WSN puede soportar hasta 22 nodos con $BO = 6$ y $SO = 3$, aplicando los mismos principios antes mencionados.

Con respecto a los casos simulados y los resultados obtenidos, es importante mencionar que, cuando una WSN supera los siete (7) sensores, el algoritmo propuesto evalúa las condiciones de la red, considerando principalmente parámetros, tales como: tamaño de los paquetes, periodos de transmisión y cantidad de sensores. Luego a partir de las anteriores variables definidas, utiliza los recursos que propone el estándar y busca una planificación factible que posibilite una transmisión en tiempo real. Las formas que emplea el algoritmo PEMM para obtener una solución factible son: reducir el periodo de beacon (BI), esto siempre y cuando BO sea mayor o igual que SO ; organizando en diferentes grupos los

sensores de la WSN que busca ser factible para transmitir en tiempo real, con el fin de evitar que coincidan en un mismo BI todos al mismo tiempo; y validando de forma heurística que en cada iteración o generación de supertramas no se supere los siete (7) GTS, ni los 13 time-slot. En algunos casos es definitivamente imposible encontrar una planificación factible que permita una transmisión en tiempo real, ya sea por el excesivo número de sensores, por tamaños de paquetes muy grandes o periodicidades de transmisión que no admiten flexibilidad en la planificación principalmente. Por otra parte, si ejecutan los casos simulados sin el algoritmo PEMM, sino con IEEE 802.15.4 en su forma por defecto, el resultado será en primera instancia una planificación haciendo uso de métodos de contención (CSMA/CA) y se activa la opción de GTS, se hará combinando el uso de CAP y CFP de acuerdo con el funcionamiento estipulado para este estándar.

4.6. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO – APLICACIÓN EN UNA WSN REAL.

Con el fin de observar el comportamiento del algoritmo propuesto en una WSN real, aparte de la comparación y evaluación del mismo, antes realizada a nivel de simulación, se adquirieron algunos sensores con los cuales se implementó un escenario real de transmisión de datos. Es preciso anotar que la implementación práctica buscó evidenciar el comportamiento del sistema de planificación que aplica para el estándar IEEE 802.15.4, por lo tanto, en ningún momento se buscó evaluar las características de capa física (como, por ejemplo, potencias de transmisión y recepción, efectos de interferencia, entre otros) que corresponde a los dispositivos utilizados. En la tabla 37 se puede observar el diseño experimental de esta aplicación práctica.

Tabla 37 Elementos Experimentación Aplicación Práctica

Factor:	Métodos de implementación práctica
Niveles:	<ul style="list-style-type: none"> • Por defecto con CSMA/CA • Con GTS con PEMM
Variables de respuesta:	<ul style="list-style-type: none"> • Round-Trip Delay Time (RTT) • Packet Delivery Ratio (PDR)

Fuente: esta investigación.

El diseño experimental propuesto en la tabla 37, permite evidenciar que se desea evaluar el comportamiento de una WSN real mediante dos tipos de configuraciones: una con la que viene por defecto y otra utilizando el algoritmo PEMM con GTS, donde al final se indicaran los resultados del experimento en función de las variables de respuesta: RTT y PDR. Es importante mencionar que el RTT se obtiene de calcular la diferencia en tiempo entre un paquete enviado por un nodo final al nodo

coordinador y el ACK que certifica la recepción de dicho paquete [115], este valor permite estimar de manera aproximada la latencia que se genera en la transmisión de datos en la red implementada. Por otra parte, el PDR se refiere a la tasa de paquetes que efectivamente son recibidos por el nodo coordinador cuando un nodo final le ha enviado. A continuación, se menciona el hardware necesario para la implementación propuesta, las características de las WSN implementadas y los resultados obtenidos en cada uno de los experimentos propuestos.

4.6.1. Descripción hardware experimentación práctica

En la tabla 38, se pueden observar las características de los sensores adquiridos para el ejercicio experimental planteado.

Tabla 38 **Características Kit de sensores utilizados en la implementación**






Característica	Descripción
Nombre kit:	CC2530 Eval Kit 4
Fabricantes:	Texas Instrument – Waveshare
Radio:	CC2530F256RHAR  Figura 15 Radio del Sensor
Board:	ZB600  Figura 16 Board del sensor
Frecuencia radio:	2.4GHz
Canales de transmisión disponibles radio:	16
Puertos de conexión Board:	UART y USB
Ensamble Kit:	


	Figura 17 Kit Sensores
Procesador del radio:	8051
Memoria RAM CC2530:	8KB
Memoria Flash CC2530:	256KB

Fuente: <http://www.waveshare.com/cc2530-eval-kit4.htm>

El hardware mencionado en la tabla 38 se complementa con la descripción de las características generales de las WSN a implementar, las cuales se pueden observar en la tabla 39.

Tabla 39 **Características generales WSN a implementar**

Característica	Descripción
Sensores	3 Kit de sensores CC2530 con tarjetas ZB600, los cuales funcionan bajo una plataforma 8120.  <p>Figura 18 Kit de sensores</p>
Topología de red	Estrella
Protocolo de red	IEEE 802.15.4 – ZigBee
Nodo coordinador	Un Kit trabaja como coordinador.  <p>Figura 19 Nodo Coordinador</p>
Nodos finales	Dos Kit CC2530, los cuales hacen las veces de nodos finales

	
	<p>Figura 20 Nodos Finales</p>
Tipos de sistemas de transmisión implementados	<p>Se implementaron dos tipos de transmisión de datos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Transmisión con RF básico por defecto • Red con beacons - GTS
Variable de lectura de los nodos finales	<p>Temperatura ambiente (Tamaño de paquete 48 bits) y Luminosidad ambiental (Tamaño de paquete 40 bits)</p>

Fuente: Esta investigación

Como se puede observar en la tabla anterior, la parte práctica experimental se implementó basada en el protocolo IEEE 802.15.4 con ZigBee, teniendo en cuenta los niveles del factor experimental mencionados en la tabla 37. Por otra parte, para la evaluación del comportamiento de las implementaciones propuestas, se utilizó un dispositivo Sniffer, el cual permitió la captura de paquetes de las WSN, permitiendo verificar el comportamiento de las mismas, según las aplicaciones propuestas. En la figura 21 se puede apreciar este dispositivo.



Figura 21 Dispositivo Sniffer CC2531
Fuente esta investigación

Las características del Sniffer se pueden apreciar en la tabla 40:

Tabla 40 **Características sniffer**

Característica	Descripción
Nombre	CC2531 USB Dongle
Descripción:	Dispositivo que captura paquetes de una WSN en funcionamiento. Permite

	analizar el comportamiento de la red mediante las trazas de datos capturadas. Este dispositivo se conecta mediante el puerto USB a un computador con el software de funcionamiento instalado, luego se ejecuta el programa y comienza la captura. Este programa genera archivos .PSD para su posterior análisis.
Software de funcionamiento:	SmartRF – Software TI
Frecuencia de captura de paquetes:	2.4 GHz IEEE 802.15.4
Memoria Flash:	256 KB – Programable
Memoria RAM:	8 KB
Protocolos que soporta:	ZigBee - IEEE 802.15.4 MAC – CSMA/CA – Beacon GTS

Fuente: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2531.pdf>

Además de la información mencionada en la tabla 40, este dispositivo permite capturar los siguientes tipos de tramas: a. de Comando; b. de Datos; c. de ACK y d. de Beacon. En las figuras, de la 22 a la 25 se pueden observar los diferentes tipos de trama antes mencionados.

P.nbr.	Time (ms)	Length	Frame control field				Sequence number	Dest. PAN	Dest. Address	Beacon request	LQI	FCS
RX	+423		Type	Sec	Pnd	Ack.req	PAN_compr					
943	=227970	10	CMD	0	0	0	0	0xD3	0xFFFF	0xFFFF	23	OK

Figura 22 Trama de comando
Fuente esta investigación

El tipo de tramas como el referido en la figura 22, se puede generar con el sniffer en las siguientes situaciones: requerimiento de asociación (CMD Association req.); respuesta a la asociación solicitada (CMD Association res); solicitud de desasociación (CMD disassociat. not.); requerimiento de beacon (CMD Beacon recuest; requerimiento de GTS (CMD GTS Request.), entre los más importantes. La trama de la figura 22 corresponde a un requerimiento de beacon, que es enviado a todos los nodos de la red mediante una dirección de broadcast: 0xFFFF.

P.nbr.	Time (ms)	Length	Frame control field				Sequence number	Dest. PAN	Dest. Address	Source Address	
RX	+10		Type	Sec	Pnd	Ack.req	PAN_compr				
16397	=405061	79	DATA	0	0	1	1	0x63	0x1740	0x0000	0x102B

MAC payload										APS Profile Id	LQI	FCS																																					
10	1E	29	08	14	03	00	08	0F	14	05	30	2E	36	33	0D	0A	73	2D	30	2E	37	30	0D	0A	73	2D	30	2E	38	33	0D	0A	73	2D	30	2E	39	32	0D	0A	73	2D	30	2E	39	36	0x0000	184	OK

Figura 23 Trama de datos
Fuente esta investigación

En la figura 23 se puede observar una trama que envía un paquete de datos en la traza capturada por el sniffer, en este caso corresponde a un paquete que envió el nodo 0x102B al nodo coordinador 0x0000, en el milisegundo 405061. Este tipo de tramas son las más importantes para el análisis, pues son las que permiten establecer el RTT y las tasas de transmisión correcta de paquetes (PDR - packet delivery ratio), permitiendo identificar el tiempo de recepción del paquete, tomando para ello el campo "Time (ms)", que está en la segunda posición (de izquierda a derecha) en la trama que genera el Sniffer, cuyo valor se complementa con el que se tiene en la trama ACK, la cual se describe a continuación.

P.nbr.	Time (ms)	Length	Frame control field				Sequence number	LQI	FCS	
RX	+2		Type	Sec	Pnd	Ack.req	PAN_compr			
17010	=408478	5	ACK	0	0	0	0	0x63	165	OK

Figura 24 Trama ACK
Fuente esta investigación

En la figura 24 se puede apreciar una trama de ACK, que corresponde a una confirmación de que el paquete enviado por un nodo final, llegó satisfactoriamente al nodo destino, que en la investigación realizada corresponde al nodo coordinador, en este caso se tiene un ACK de la recepción de una trama de datos enviada anteriormente (figura 23), donde la diferencia entre esta trama y la de recepción es de 2ms.

P.nbr.	Time (ms)	Length	Frame control field				Sequence number	Source PAN	Source Address	Superframe specification						
RX	+4		Type	Sec	Pnd	Ack.req	PAN_compr			BO	SO	F.CAP	BLE	Coord	Assoc	
4005	=156155	28	BCN	0	0	0	0	0x4D	0x1740	0x0000	15	15	15	0	1	1

GTS fields		Beacon payload						LQI	FCS	
Len	Permit	00	22	84	9C	BE	AE	0D	00	
0	0	4B	12	00	FF	FF	FF	00		
									162	OK

Figura 25 Trama de Beacon
Fuente esta investigación

En la figura 25 se puede observar el cuarto tipo de trama que captura el sniffer, que en este caso corresponde a una trama de Beacon, la cual generalmente es enviada por el nodo coordinador a los nodos finales de la WSN, indicando la forma de transmisión y tratamiento de los datos que se envían. En la figura 25 se puede observar que la trama de beacon informa que se está trabajando en una WSN con protocolo IEEE 802.15.4, con valores de BO=15 y SO=15, es decir no se hace uso de GTS, sino que se trabaja en el modo por contención con el protocolo CSMA/CA (Ver parte azul de la primera trama figura 25 parte superior).

Con el hardware de WSN, mencionado anteriormente y las tramas que captura el Dongle Sniffer descritas, se procedió a las implementaciones prácticas propuestas, las cuales se describen a continuación.

4.6.2. Experimentación WSN con IEEE 802.15.4 por defecto (CSMA/CA)

En este caso de experimentación no se aplica el algoritmo PEMM, sino que se configura el nodo coordinador y los nodos finales para que la WSN funcione con el protocolo por defecto para la transmisión de datos con IEEE 802.15.4, haciendo uso de CSMA/CA como técnica de acceso al medio (Bo y SO toman el valor de 15). En esta red compuesta por tres nodos, se tiene que dos fueron configurados en modo “end device” o RFD, según las definiciones dadas en este documento y el tercero en modo coordinador. Los tres, operando mediante el protocolo ZigBee. Las características operativas de la WSN implementada se pueden observar en la tabla 41.

Tabla 41 **Características WSN modo RF básico por defecto**

Característica	Descripción
Nodo Coordinador	Dispositivo que coordina y maneja la WSN, envía peticiones y recibe periódicamente los datos de los nodos finales.
Dirección PANID, por defecto:	0x0000
Funcionamiento coordinador:	Es el nodo que inicialmente sincroniza la WSN, determina los nodos finales o RFD que harán parte de la misma, les asigna direcciones e inicia el proceso de transmisión de datos.
Nodos finales (RFD)	Son los nodos que capturan variables del entorno mediante un sensor conectado a ellos, en el caso propuesto cada uno lee una variable de temperatura y envía el valor al nodo coordinador. Este proceso se realiza periódicamente, un nodo lo hace cada 600 ms y el otro cada 400 ms. Las variables que leen son de temperatura y luz ambiental.
Direcciones MAC de los nodos RFD:	0x102B y 0x52FB
Sensores de los nodos RFD:	Para la implementación propuesta se utilizaron dos sensores, uno que captura el valor de la variable temperatura ambiental, cuya referencia es KY-013 y otro sensor de luz ambiental, cuya referencia es KY-018. Los dos son de tipo analógico

Fuente: esta investigación

4.6.2.1. Resultados obtenidos en la primera implementación práctica:

Teniendo en cuenta la descripción del hardware utilizado y las características generales de la WSN implementada, se capturaron diferentes tramas en el proceso de transmisión de datos configurado (De Datos y ACK principalmente para ejercicio investigativo), en la figura 26 se pueden observar los nodos, el Sniffer conectado y el computador que se utilizó para guardar la captura de las tramas generadas.



Figura 26 WSN Implementada
Fuente esta investigación

La captura de paquetes se hizo en diferentes momentos, logrando adquirir diferentes trazas, con el fin de identificar posibles errores y también para encontrar coincidencias en el proceso. Al final se hizo una captura por espacio de 5 horas, donde se obtuvo un archivo PSD con todos los registros del funcionamiento de la red propuesta. Los parámetros iniciales de la red implementada se pueden observar en la tabla 42.

Tabla 42 **Parámetros WSN modo RF básico**

Nodo	Variable	Periodo Tx	Tamaño Pk
0x102B	Temperatura	600 ms	48 bits
0x52FB	Luz	400 ms	40 bits

Fuente: esta investigación

Con los parámetros antes planteados y luego de poner en funcionamiento la WSN, en la tabla 43 se pueden observar los resultados encontrados en este primer proceso práctico.

Tabla 43 **Resultados ejecución WSN modo RF básico**

Nodo	Cant. Pk. Tx	RTT	PDR
0x102B	30000	1,79 ms	97,2%
0x52FB	45000	2,45 ms	98,4%

Fuente: esta investigación

Como se puede apreciar en la tabla 43, el rendimiento de la WSN durante el tiempo de actividad programado para la WSN, generó 75000 paquetes de datos para los nodos programados, en donde el nodo sensor que midió la variable temperatura tuvo un valor de RTT de 1,79 ms, de acuerdo con los reportes de las tramas de datos y ACK analizadas con el sniffer, este proceso como se mencionó anteriormente se hizo comparando el tiempo desde el momento en que se recibe el paquete, hasta que es confirmado la recepción en el nodo coordinador por medio de un ACK, por otra parte el PDR estuvo en el 97,2%. Con respecto al nodo sensor de luz, el RTT fue también de 2,45 ms y el PDR de 98,4%. En este primer ejercicio es importante mencionar que la WSN trabajó completamente mediante contención (CSMA/CA), es decir los nodos esperaban que el canal estuviera libre para poder transmitir, situación que en determinados momentos pudo haber generado los mínimos retardos en la transmisión. También es importante mencionar que este ejercicio es más de tipo demostrativo que de evaluación del algoritmo y funcionamiento de una WSN, puesto que la cantidad de nodos utilizada no exige el funcionamiento de la red más allá de los límites de la misma. En las figuras 27 y 28 se pueden observar algunas tramas capturadas del tráfico generado por la WSN utilizando el sniffer antes mencionado.

Como complemento a este proceso de análisis de los resultados obtenidos en este primer experimento se han obtenidos algunos valores estadísticos que permiten evidenciar mejor el comportamiento de los nodos en la WSN implementada, en la tabla 44, se puede observar los resultados generados.

Tabla 44 **Resultados estadísticos aplicación práctica WSN por defecto**

Nodo	Variable	Máximo RTT	Mínimo RTT	Promedio RTT	Desviación Estándar
0x102B	Temperatura	11,46 ms	0,0009 ms	1,79 ms	1,99 ms
0x52FB	Luz	3,5 ms	0,036 ms	1,33 ms	1,02 ms

Fuente: Esta investigación

De los datos presentados en la tabla 44 se puede deducir que los periodos de RTT que permiten conceptualmente aproximarse a una estimación de la latencia de los nodos son muy pequeños; situación que se debe principalmente a la cantidad de nodos que configuran esta red, además del tamaño de los paquetes y disponibilidad de recursos de las WSN para transmitir los paquetes. Pero aun así se puede evidenciar por ejemplo que el nodo de temperatura tiene en un determinado momento tasas de RTT de 11,46 ms, lo que es un tiempo importante en la transmisión de datos en tiempo real, acercándose al valor mínimo de BFSD que se estima en IEEE 802.15.4, el cual corresponde a 15,36 ms. Con respecto al nodo de luz los valores no son tan altos, pero también se tiene una tasa de RTT de 3,5 ms y valor mínimo de RTT de 0.036 ms.

P.nbr.	Time (ms)	Length	Frame control field					Sequence number	LQI	FCS																				
RX	+1	5	Type	Sec	Fnd	Ack.req	PAN	compr																						
27	=6236	5	ACK	0	0	0	0	0	0x55	73	OK																			
P.nbr.	Time (ms)	Length	Frame control field					Sequence number	Dest. PAN	Dest. Address	Source Address	MAC payload	NWK Frame control field			NWK Dest. Address	NWK Src. Address	Broadcast Radius	Broadcast Seq. num											
28	+4	35	Type	Sec	Fnd	Ack.req	PAN	compr	0x20	0x1740	0x0000	08 00 FF FF 2B 10 1D 08 08 14 03 00 08 0F 14 7B 32 33 2E 32 35 4C 0D 0A	Type	Version	DR	GA	Sec	0x2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
29	+773	35	Type	Sec	Fnd	Ack.req	PAN	compr	0x56	0x1740	0x102B	08 00 FF FF 2B 10 1E 09 08 14 03 00 08 0F 14 7C 32 33 2E 32 35 43 0D 0A	Type	Version	DR	GA	Sec	0x2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P.nbr.	Time (ms)	Length	Frame control field					Sequence number	LQI	FCS																				
30	+1	5	Type	Sec	Fnd	Ack.req	PAN	compr	0x56	70	OK																			
P.nbr.	Time (ms)	Length	Frame control field					Sequence number	Dest. PAN	Dest. Address	Source Address	MAC payload	NWK Frame control field			NWK Dest. Address	NWK Src. Address	Broadcast Radius	Broadcast Seq. num											
31	+5	35	Type	Sec	Fnd	Ack.req	PAN	compr	0x21	0x1740	0x0000	08 00 FF FF 2B 10 1D 09 08 14 03 00 08 0F 14 7C 32 33 2E 32 35 43 0D 0A	Type	Version	DR	GA	Sec	0x2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P.nbr.	Time (ms)	Length	Frame control field					Sequence number	Dest. PAN	Dest. Address	Source Address	MAC payload	NWK Frame control field			NWK Dest. Address	NWK Src. Address	Broadcast Radius	Broadcast Seq. num											
32	+771	35	Type	Sec	Fnd	Ack.req	PAN	compr	0x57	0x1740	0x0000	08 00 FF FF 2B 10 1E 0A 08 14 03 00 08 0F 14 7D 32 33 2E 32 35 4C 0D 0A	Type	Version	DR	GA	Sec	0x2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P.nbr.	Time (ms)	Length	Frame control field					Sequence number	LQI	FCS																				
33	+1	5	Type	Sec	Fnd	Ack.req	PAN	compr	0x57	65	OK																			

Figura 27 Captura tramas nodo 0x102B
Fuente esta investigación

En la figura 27 se puede observar un pequeño fragmento del comportamiento de las tramas del nodo de temperatura, cuya dirección es 0x102B. En la figura 28 por otra parte, se puede observar el mismo proceso, pero en este caso con el nodo que contiene el sensor de luz, cuya dirección es 0x52FB. En la siguiente sección se explica la implementación de la WSN, pero con el uso de GTS.

P.nbr.	Time (ms)	Length	Frame control field					Sequence number	Dest. PAN	Dest. Address	Source Address	MAC payload	NWK Frame control field			NWK Dest. Address	NWK Src. Address	Broadcast Radius	Broadcast Seq. num										
1343	+771	35	Type	Sec	Fnd	Ack.req	PAN	compr	0xF2	0x1740	0x0000	08 00 FF FF FB 52 1E B2 08 14 03 00 08 0F 14 03 32 32 2E 30 36 4C 0D 0A	Type	Version	DR	GA	Sec	0x2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P.nbr.	Time (ms)	Length	Frame control field					Sequence number	LQI	FCS																			
1344	+543050	5	Type	Sec	Fnd	Ack.req	PAN	compr	0xF2	70	OK																		
P.nbr.	Time (ms)	Length	Frame control field					Sequence number	Dest. PAN	Dest. Address	Source Address	MAC payload	NWK Frame control field			NWK Dest. Address	NWK Src. Address	Broadcast Radius	Broadcast Seq. num										
1345	+6	35	Type	Sec	Fnd	Ack.req	PAN	compr	0xFC	0x1740	0xFFFF	08 00 FF FF FB 52 1D B2 08 14 03 00 08 0F 14 03 32 32 2E 30 36 4C 0D 0A	Type	Version	DR	GA	Sec	0x2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
P.nbr.	Time (ms)	Length	Frame control field					Sequence number	Dest. PAN	Dest. Address	Source Address	MAC payload	NWK Frame control field			NWK Dest. Address	NWK Src. Address	Broadcast Radius	Broadcast Seq. num										
1346	+770	35	Type	Sec	Fnd	Ack.req	PAN	compr	0xF3	0x1740	0x0000	08 00 FF FF FB 52 1E B3 08 14 03 00 08 0F 14 04 32 32 2E 30 36 43 0D 0A	Type	Version	DR	GA	Sec	0x2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
P.nbr.	Time (ms)	Length	Frame control field					Sequence number	LQI	FCS																			
1347	+543828	5	Type	Sec	Fnd	Ack.req	PAN	compr	0xF3	73	OK																		
P.nbr.	Time (ms)	Length	Frame control field					Sequence number	Dest. PAN	Dest. Address	Source Address	MAC payload	NWK Frame control field			NWK Dest. Address	NWK Src. Address	Broadcast Radius	Broadcast Seq. num										
1348	+6	35	Type	Sec	Fnd	Ack.req	PAN	compr	0xD0	0x1740	0xFFFF	08 00 FF FF FB 52 1D B3 08 14 03 00 08 0F 14 04 32 32 2E 30 36 43 0D 0A	Type	Version	DR	GA	Sec	0x2	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
P.nbr.	Time (ms)	Length	Frame control field					Sequence number	Dest. PAN	Dest. Address	Source Address	MAC payload	NWK Frame control field			NWK Dest. Address	NWK Src. Address	Broadcast Radius	Broadcast Seq. num										
1349	+771	35	Type	Sec	Fnd	Ack.req	PAN	compr	0xF4	0x1740	0x0000	08 00 FF FF FB 52 1E B4 08 14 03 00 08 0F 14 05 32 32 2E 31 32 4C 0D 0A	Type	Version	DR	GA	Sec	0x2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Figura 28 Captura tramas nodo 0x52FB
Fuente esta investigación

4.6.3. Experimentación WSN con IEEE 802.15.4 con GTS y PEMM.

La segunda parte de la experimentación práctica que se hizo fue la configuración de una WSN, trabajando en modo GTS y utilizando el algoritmo PEMM, para este caso se tomó la misma red implementada anteriormente con los tres nodos sensores que se describieron previamente, la diferencia estuvo que en lugar de

manejar el modo por defecto de CSMA/CA para uso del canal se implementó la opción de asignación directa por GTS. Esta implementación al igual que la anterior es de carácter demostrativo y permite evidencia el funcionamiento de PEMM, más allá de evaluarlo y medir su rendimiento, puesto que con los nodos que se han utilizado no es posible exigirle su máximo funcionamiento. Es importante aclarar también, que debido a las limitaciones de los nodos sensores para manejar la configuración GTS desde la capa MAC, se trabajó en la configuración de la red en modo GTS desde la capa de aplicación.

4.6.3.1. Descripción de la implementación:

En esta implementación de la WSN, el proceso de funcionamiento de los nodos sensores mediante GTS se hizo en la capa de aplicación, por lo tanto, la programación del nodo coordinador para que funcionase según el estándar se hizo con una herramienta de programación externa (LabView), la cual trabaja como un middleware que leyó las variables de entrada BO y SO y con base en la mismas configuró el funcionamiento de la WSN. En la figura 29 se puede observar el modelo de código que se utilizó para configurar los nodos.

```
sensor_de_temp$
////////curre miliuns
unsigned long previousMillis = 0;          // will store last time LED was updated
unsigned long previousMillis1 = 0;
unsigned long currentMillis =0;
// constants won't change :
const long interval = 40;                // interval at which to blink (milliseconds)

void setup() {
  // Iniciamos la comunicación serie
  Serial.begin(38400);
  // Iniciamos el bus I-Wire
  sensorDS18B20.begin();
}

void loop() {
  currentMillis = millis();

  if (currentMillis - previousMillis >= interval) {
    // save the last time you blinked the LED
    previousMillis = currentMillis;

    // Leemos y mostramos los datos de los sensores DS18B20
    Serial.print("T");
    Serial.print(sensorDS18B20.getTempCByIndex(0));
    Serial.println( );
  }
}
```

Figura 29 Programación nodos LabView
Fuente esta investigación

Mediante la herramienta utilizada para configurar los nodos (LabView), también se configuró el archivo de salida, que se constituyó en un archivo tipo texto con los siguientes campos, ver tabla 45.

Tabla 45 **Campos archivos de salida implementación GTS**

Campo	Descripción
Consecutivo	Contador de registros generados en el proceso de funcionamiento de la red.
Fecha captura	Campo de fecha con formato: dd/mm/aaaa
Tiempo captura	Tiempo en milisegundos con la captura del paquete en comparación con el inicio.
Dirección MAC Nodo Destino	Dirección del nodo que está recibiendo la información en un determinado registro.
Dirección MAC Nodo Origen (Puede haber varias según número de nodos)	Dirección del nodo que está enviando la información en un determinado registro.
Tamaño del paquete que está enviando:	Es un valor decimal en bits del tamaño del paquete que está enviando el nodo origen. (Si hay varios paquetes serán varios reportes)
Información del nodo sensor	Se refiere al valor de la variable que mide el sensor. (Si hay varios nodos existirán igual número de reportes)
Cantidad Time-slot nodo sensor	Es un número entre 1 y 13 de la cantidad de time-slot que requiere un paquete de transmisión de un nodo sensor, existirán varios si transmiten varios nodos al tiempo.

Fuente: esta investigación

4.6.3.2. Resultados obtenidos en la implementación:

Con la información suministrada anteriormente y los nodos configurados, según lo especificado se procedió a hacer funcionar la red. En esta implementación se tuvo en cuenta los mismos parámetros establecidos en la tabla 42.

En el proceso se capturaron paquetes con el sniffer y se generó el archivo texto programado. En las figuras 30 y 31 se puede observar el proceso de captura de los nodos finales y envío al nodo coordinador.

P.nbr.	Time (ms)	Length	Frame control field	Sequence number	Dest. PAN	Dest. Address	Source Address	MAC payload
RX 1	+0 =0	32	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 1 1	0x34	0x1316	0x0000	0x2773	08 00 FF FF 73 27 1E 0D 08 00 08 0F 14 6D 4C 32 33 35
RX 6	+72 =127	32	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 1 1	0x35	0x1316	0x0000	0x2773	08 00 FF FF 73 27 1E 0E 08 00 08 0F 14 6E 4C 32 33 35
RX 13	+10 =255	32	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 1 1	0x36	0x1316	0x0000	0x2773	08 00 FF FF 73 27 1E 0F 08 00 08 0F 14 6F 4C 32 33 35
RX 18	+45 =384	32	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 1 1	0x37	0x1316	0x0000	0x2773	08 00 FF FF 73 27 1E 10 08 00 08 0F 14 70 4C 32 33 35

Node name	PAN id	Short address	IEEE extended address
Nodo Coordinador	0x1316	0x0000	0xFFFFFFFFFFFFFFFF
Nodo Final 1	0x1316	0x2773	0xFFFFFFFFFFFFFFFF
Nodo Final 2	0x1316	0x5DC6	0xFFFFFFFFFFFFFFFF

Figura 30 Sniffer capturando datos nodo final 1
Fuente esta investigación

P.nbr.	Time (ms)	Length	Frame control field	Sequence number	Dest. PAN	Dest. Address	Source Address	MAC payload
RX 3	+47 =49	34	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 1 1	0x1A	0x1316	0x0000	0x5DC6	08 00 FF FF C6 5D 1E BC 08 00 0F 14 6D 43 32 33 2E 39
RX 8	+15 =144	33	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 1 1	0x1B	0x1316	0x0000	0x5DC6	08 00 FF FF C6 5D 1E BD 08 00 08 0F 14 6E 43 37 2E 32
RX 10	+93 =238	33	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 1 1	0x1C	0x1316	0x0000	0x5DC6	08 00 FF FF C6 5D 1E BE 08 00 08 0F 14 6F 43 35 2E 37
RX 16	+73 =336	34	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 1 1	0x1D	0x1316	0x0000	0x5DC6	08 00 FF FF C6 5D 1E BF 08 00 0F 14 70 43 31 37 2E 31

Node name	PAN id	Short address	IEEE extended address
Nodo Coordinador	0x1316	0x0000	0xFFFFFFFFFFFFFFFF
Nodo Final 1	0x1316	0x2773	0xFFFFFFFFFFFFFFFF
Nodo Final 2	0x1316	0x5DC6	0xFFFFFFFFFFFFFFFF

Figura 31 Sniffer capturando datos nodo final 2
Fuente esta investigación

En la tabla 46 se pueden observar algunos registros de salida del archivo de texto generado con la implementación.

Tabla 46 Registros de salida archivo de texto generado

Id	Fecha	Tiempo (ms)	Dest	Orig1	Orig2	Pk1	Pk2	Var1	Var2	T1	T2
1	15/09/2017	49	0x0000	0x5DC6	---	48	---	10.51	---	1	---
2	15/09/2017	98	0x0000	---	---	---	---	---	---	---	---
3	15/09/2017	151	0x0000	---	---	---	---	---	---	---	---
4	15/09/2017	203	0x0000	0x5DC6	---	48	---	10.51	---	1	---
5	15/09/2017	251	0x0000	0x2773	---	40	---	218	---	1	---
6	15/09/2017	303	0x0000	---	---	---	---	---	---	---	---
7	15/09/2017	351	0x0000	0x5DC6	---	48	---	10.51	---	1	---
8	15/09/2017	402	0x0000	---	---	---	---	---	---	---	---
9	15/09/2017	451	0x0000	---	---	---	---	---	---	---	---
10	15/09/2017	501	0x0000	0x5DC6	0x2773	48	40	10.51	218	1	1

Fuente: esta investigación

En la tabla anterior se puede observar que la red funciona con dos nodos finales (0x5DC6 y 0x2773) y un nodo coordinador (0x0000), donde el primer nodo transmite cada 600 ms y el segundo cada 400 ms. En este caso como diferencia importante

con respecto al primer caso se tiene que el PDR fue para los dos nodos del 100% con respecto al archivo de salida, en la tabla 47 se pueden observar los resultados finales obtenidos.

Tabla 47 **Resultados ejecución WSN modo GTS con PEMM**

Nodo	Cant. Pk. Tx	RTT	PDR
0x5DC6	30000	1,38 ms	100%
0x2773	45000	1,29 ms	100%

Fuente: esta investigación

La implementación con GTS en esta aplicación práctica evidenció una disminución en los valores de RTT, en menos de un milisegundo con respecto al ejercicio anterior de la WSN por defecto, que si bien no es muy determinante es importante para efectos de la aplicación práctica presentada, además hubo una variable importante que tuvo un cambio significativo y se refiere al PDR, donde se obtuvo un valor del 100%, lo que significa que este segundo ejercicio no se perdieron paquetes. Es importante recalcar que se está trabajando sólo con dos nodos y un coordinador, lo que significa que la exigencia es mínima y que se cubren completamente las expectativas de transmisión de datos y se dispone de recursos suficientes para garantizar la transmisión de datos en tiempo real. El ejercicio de aplicación permitió conocer un poco más de cerca la estructura de hardware de las WSN y a futuro se espera una implementación más compleja con muchos más nodos y con una exigencia mayor a la WSN propuesta. Complementando este ejercicio al igual que el primer experimento práctico, también se obtuvieron algunos valores estadísticos que permiten evidenciar un poco más la mejora que propone PEMM con respecto al modo por defecto, en la tabla 48 se pueden observar los resultados obtenidos.

Tabla 48 **Resultados estadísticos aplicación práctica WSN con GTS**

Nodo	Variable	Máximo RTT	Mínimo RTT	Promedio RTT	Desviación Estándar
0x5DC6	Temperatura	3,15 ms	0,025 ms	1,38 ms	0,93 ms
0x2773	Luz	2,91 ms	0,094 ms	1,29 ms	0,69 ms

Fuente: Esta investigación

De los datos presentados en la tabla 48 se puede deducir que los periodos de RTT con respecto al ejercicio anterior disminuyeron, si bien son fracciones de milisegundos hay una mejora, al igual que la desviación estándar es mucho menor, permitiendo identificar que el comportamiento de la transmisión de datos mejoró en toda la WSN implementada. En la tabla 49 se pueden observar los valores de los dos ejercicios realizados. También en la figura 32 se puede apreciar las diferencias presentadas en los dos ejercicios prácticos realizados.

Tabla 49 **Diferencias experimentos prácticos realizados**

Métodos	Nodo	Máximo RTT	Mínimo RTT	Promedio RTT	Desviación Estándar
Con CSMA/CA	Temperatura	11,46 ms	0,0009 ms	1,79 ms	1,99 ms
Con GTS y PEMM	Temperatura	3,15 ms	0,025 ms	1,38 ms	0,93 ms
Con CSMA/CA	Luz	3,5 ms	0,036 ms	1,33 ms	1,02 ms
Con GTS y PEMM	Luz	2,91 ms	0,094 ms	1,29 ms	0,69 ms

Fuente: esta investigación

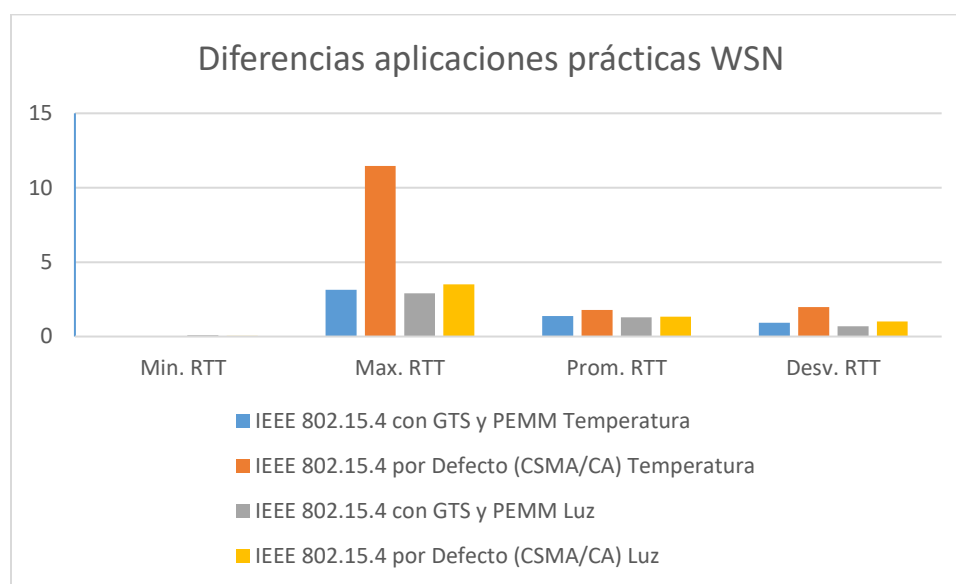


Figura 32 Diferencias resultados aplicación práctica WSN con CSMA y con PEMM

En la tabla 49 y en la figura 32 se puede observar, que en las pruebas realizadas la mayor latencia se presenta en el experimento que utilizó CSMA/CA como técnica de acceso al medio (barras de color: naranja y amarillo) donde el RTT para los dos sensores es mayor, lo que significa que sus paquetes llegan con mayor latencia de lo que se había programado, que si bien son valores pequeños dada la cantidad de sensores que se maneja, en redes con más nodos estos valores pueden ser muy importantes y no harían cumplir con la factibilidad de transmitir en tiempo real; mientras que en el experimento que se utilizó GTS y PEMM los valores son menores (barras de color: azul y gris), permitiendo identificar que hay una posible acción de PEMM, que reduce la latencia, de acuerdo con el RTT estimado en el experimento, haciendo que los paquetes se entreguen en menor tiempo que con la técnica de contención, situación que con mayor volumen de nodos se hará más notoria y significativa, haciendo factible que una red pueda transmitir en tiempo real.

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 cuando a proporcionar soluciones factibles utilizando los recursos limitados de la red y en cuando a su capacidad de escalar el sistema cuando se requieren altos números de sensores.

Este trabajo abordó estos problemas en el contexto específico de redes de sensores 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 por medio de un esquema de planificación coordinado. Para este efecto se diseñó un algoritmo de planificación que se ha denominado PEMM el cual, tomando como entradas los requerimientos de un conjunto de sensores y las restricciones de la tecnología utilizada para la implementación de la WSN, determina 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.

TRABAJOS FUTUROS

Esta investigación abordó principalmente la planificación de recursos en WSN, que requieran transmitir en tiempo real, utilizando para el acceso al medio en la capa MAC, la asignación de espacios de tiempo (time-slot) por cada nodo sensor que haga parte de la red, en transmisiones periódicas y que además trabaje en una topología estrella. A futuro se ha pensado en la posibilidad de ampliar este horizonte hacia redes de sensores inalámbricas que manejen tanto transmisiones periódicas, como esporádicas, trascendiendo en el tipo de topología de estrella a malla y con el manejo de diferentes frecuencias que hagan posible un mayor ancho de banda y recursos en el objetivo fijado de hacer transmisiones que garanticen el tiempo real.

REFERENCIAS

- [1] D. Godoy, E. Sosa, H. Barreiro, J. Benítez, E. Belloni and R. Díaz, Plataforma Middleware para la Gestión Datos de WSN de Manera Interoperable. In XVIII Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación (WICC 2016, Entre Ríos, Argentina), May. 2016.
- [2] D. L. Galindo and C.P. Sánchez, Red de sensores inalámbricos para monitoreo de parámetros hidrológicos aplicado en lagunas, estanques y plantas de tratamiento de agua, 2015.
- [3] A. M. Vela, Estudio de la agricultura de precisión enfocado en la implementación de una red de sensores inalámbricos (WSN) para el monitoreo de humedad y temperatura en cultivos—caso de estudio hacienda Cabalinus ubicada en la provincia de Los Ríos (Master's thesis, PUCE). 2016.
- [4] J. V. Murillo, *Diseño de una red de sensores inalámbricos para el control y monitoreo de detección y prevención de incendios en hogares causados por fuga de gas* (Doctoral dissertation, Universidad de Guayaquil Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas Carrera de Ingeniería en Networking y Telecomunicaciones). 2016.
- [5] J. G. Ortiz, Modelo de despliegue de una WSN para la medición de las variables climáticas que causan fuertes precipitaciones. *Prospectiva*, 13(1), 106-115, 2015.
- [6] S. Barillaro, W. De Luca, W. Valiente, E. Carnuccio, G. García, M. Volker and M. Pérez. Diseño de sistema IoT de monitoreo y alarma para personas mayores. In XVIII Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación (WICC 2016, Entre Ríos, Argentina). May, 2016.
- [7] H. Jain, A. Rawat and A. K. Sachan. A Review on Advancement in Sensor Technology in Structural Health Monitoring System. *Journal of Structural Engineering and Management*, 2(3), 1-7, 2015.
- [8] González-Nalda, P., Calvo, I., Etxeberria-Agiriano, I., García-Ruiz, A., Martínez-Lesta, S., & Caballero-Martín, D. El reto de construir un sistema ciberfísico como experiencia educativa The Challenge of Building a Cyber Physical System as an Educational Experience.
- [9] Martínez, R. F., Meré, J. B. O., de Pisón Ascacíbar, F. J. M., Marcos, A. G., Elías, F. A., & Lorza, R. L. (2009). Redes inalámbricas de sensores: teoría y aplicación práctica.

- [12] Salinas Rosales, M., & Duchén Sánchez, G. (2010). Identity based authentication protocol for wireless sensor networks. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (52), 196-205.
- [13] Hussain, M. A., & kyung Sup, K. (2009, February). WSN research activities for military application. In *Advanced Communication Technology, 2009. ICACT 2009. 11th International Conference on* (Vol. 1, pp. 271-274). IEEE.
- [14] Đurišić, M. P., Tafa, Z., Dimić, G., & Milutinović, V. (2012, June). A survey of military applications of wireless sensor networks. In *Embedded Computing (MECO), 2012 Mediterranean Conference on* (pp. 196-199). IEEE.
- [15] Riquelme, J. L., Valles, F. S., Sánchez, R. T., Pérez, C. A., Muro, J. S., & Hellín, H. N. (2011). Mewin: un nodo sensor inalámbrico multientorno. Validación en agricultura de Precisión. *Proc. of SAAEI 2011*.
- [16] Urbano-Molano, F. A. (2013). Redes de Sensores Inalámbricos Aplicadas a Optimización en Agricultura de Precisión para Cultivos de Café en Colombia. *Journal de Ciencia e Ingeniería*, 5(1), 46-52.
- [17] Fidalgo, A. L., González, L. L., Brandariz, J. S., & González, X. C. (2010). Redes de Sensores sin Cables para Agricultura de Precisión en Regiones Minifundistas.
- [18] Ortiz, J. G. C. (2015). Modelo de despliegue de una WSN para la medición de las variables climáticas que causan fuertes precipitaciones. *Prospectiva*, 13(1), 106-115.
- [19] Bastidas, S. E. C., & Peláez, J. M. L. (2013). ESTUDIO DE REDES DE SENSORES Y APLICACIONES ORIENTADAS A LA RECOLECCIÓN Y ANÁLISIS DE SEÑALES BIOMÉDICAS. *REVISTA GTI*, 12(33).
- [20] MIN, Gao, QIAN, Zhang, LIONEL, Ni, YUNHUI, Liu, and XIAOXI, Tang. Cardiosentinal: A 24-hour heart care and monitoring system. *Journal of Computing Science and Engineering*, 6:67-78, 2012.
- [21] Otero, C. G., García, R. M., & Fuente, Á. M. (2013). SPATIA: PLATAFORMA TIC PARA LA GESTIÓN DE EDIFICIOS INTELIGENTES. *LIBRO DE COMUNICACIONES*, 208.
- [22] Galindo Toapanta, D. L., & Sánchez Ortiz, C. P. (2015). *Red de sensores inalámbricos para monitoreo de parámetros hidrológicos aplicado en lagunas*,

estanques y plantas de tratamiento de agua (Bachelor's thesis, Universidad del Azuay).

[23] NIETO, C. A., VILLEGAS, C., & PEÑA, D. N. M. (2009). ESTADO DEL ARTE EN APLICACIONES INDUSTRIALES DE SENSORES INALÁMBRICOS.

[24] Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., & Cayirci, E. (2002). A survey on sensor networks. *IEEE Communications magazine*, 40(8), 102-114.

[25] Garbarino, J., & Echeverria, A. (2012). *Protocolos Para Redes Inalámbricas de Sensores*. Editorial Académica España.

[26] Holger, Karl & Andreas, Willig. (2005). *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*. Wiley.

[27] Alliance, Z. (2004). ZigBee Specification: ZigBee Document 053474r06 Version 1.0. *December 14th*.

[28] Botero, M. A. B., Gonzales, O. A. M., Murillo, D. A., & Álvarez, S. M. (2014). Análisis comparativo de tecnologías de transmisión. *Revista QUID*, (17), 17-22.

[29] Kwak, K. S., Ullah, S., & Ullah, N. (2010, November). An overview of IEEE 802.15. 6 Standard. In *Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies (ISABEL), 2010 3rd International Symposium on* (pp. 1-6). IEEE.

[30] Averos Vargas, J. E. (2017). *Estudio del Estándar IEEE 802.15. 6 y Simulación de los Parámetros de Transmisión en una Red de Área Corporal en la Banda de Frecuencia de 2.4 GHz* (Doctoral dissertation, Quito, 2017.).

[31] Jianping, Song, Song, Han, Aloysius, Mok, Deji, Chen, Mike Lucas, Mark Nixon & Wally Pratt. (2008). *WirelessHART : Applying Wireless Technology in Real-Time Industrial Process Control*. *Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium*, pages 377–386.

[32] Tomas, Lennvall & Stefan, Svensson. (2008). *A Comparison of WirelessHART and ZigBee for Industrial Applications*. *Factory Communication Systems*, pages 85–88.

[33] Morparia, K., Shah, P., Shah, B., & Krishnamachari, B. *Experimental Study of Concurrent Packet Transmission in Wireless Sensor Networks using Tmote Sky devices*.

[34] Zheng, X., Julien, C., Kim, M., & Khurshid, S. (2014). *On the state of the art in verification and validation in cyber physical systems*. The University of Texas at

Austin, The Center for Advanced Research in Software Engineering, Tech. Rep. TR-ARiSE-2014-001,1485.

[35] Ma, C. (2014). Performance modelling and analysis of multiple coexisting IEEE 802.15. 4 wireless sensor networks (Doctoral dissertation, Aston University).

[36] Gu, Y. (2015). The Improvement of CSMA/CA Based on Dynamic Weighting Algorithm.

[37] Na, C. W. (2011). IEEE 802.15. 4 Wireless Sensor Networks: GTS Scheduling and Service Differentiation (Doctoral dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University).

[38] Lennvall, T., Svensson, S., & Hekland, F. (2008, may). A comparison of WirelessHART and ZigBee for industrial applications. In factory communication system, 2008. WFCs 2008. IEEE International Workshop on IEEE 2008.

[39] Gill, K., Yang, S. H., Yao, F., & Lu, X. (2009). A zigbee-based home automation system. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 55(2).

[40] Quiroz, S. A. A., & Telecomunicaciones-UPB, E. E. Redes De Sensores Inalámbricos Utilizando Zigbee/802.15. 4.

[41] Campaña, S. E., & Londoño, J. M. (2014). A Characterization of data transfer modes in Wireless Sensor Networks based on IEEE 802.15. 4 in Real-time. IEEE LATINCOM.

[42] Haque, S. A., Aziz, S. M., & Rahman, M. (2014). Review of cyber-physical system in healthcare. international journal of distributed sensor networks.

[43] Amarillo Rojas, M. O. (2012). Simulación de redes de sensores inalámbricos: un modelo energético a nivel de nodo-sensor bajo las especificaciones ieee 802.15. 4tm y zigbee (Master's thesis).

[44] Bhat, N. S. (2012). Design and Implementation of IEEE 802.15. 4 Mac Protocol on FPGA. arXiv preprint arXiv:1203.2167.

[45] Martínez, D., Blanes, F., Simo, J., & Crespo, A. (2008). Redes de Sensores y Actuadores Inalámbricas: Una Caracterización y Caso de Estudio para Aplicaciones Médicas en Espacios Cerrados. Pendiente de publicación: XXIX Jornadas de Automática. Universidad Rovira i Virgili de Tarragona, España.

[46] Kaschel Cárcamo, H., & Pérez Bahamondes, J. (2014). Monitoreo ubicuo de salud en tiempo real con WBSN. Ingeniare. Revista chilena de ingeniería,22(2), 169-176.

- [47] Mohan, G., & Sinciya, P. O. (2013). Real time healthcare system for patients with chronic diseases in home and hospital environments. *International Journal of Science, Engineering and Technology Research*, 2.
- [48] Li, Yanjun, Chen, Chung, Song, Ye & Wang, Zhi. (2007). Real-time QoS Support in Wireless Sensor Networks: A Survey. Zhejiang University, China
- [49] Diallo, O., Rodrigues, J. J., & Sene, M. (2012). Real-time data management on wireless sensor networks: A survey. *Journal of Network and Computer Applications*, 35(3), 1013-1021.
- [50] Prabh, K. S. (2007). Real-time wireless sensor networks (Doctoral dissertation, University OF Virginia).
- [51] Ramesh, A., & Sumithabhashini, P. (2012). Analyzing the Performance of GTS Allocation Using Markov Model in IEEE 802.15. 4. *International Journal of Computer Science and Information technology*, 3(2), 3382-3387.
- [52] Park, P., Fischione, C., & Johansson, K. H. (2009, June). Performance analysis of GTS allocation in beacon enabled IEEE 802.15. 4. In *Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks*, 2009. SECON'09. 6th Annual IEEE Communications Society Conference on (pp. 1-9). IEEE.
- [53] Grassi, P. R., Beretta, I., Rana, V., Atienza, D., & Sciuto, D. (2012, October). Knowledge-based design space exploration of wireless sensor networks. In *Proceedings of the eighth IEEE/ACM/IFIP international conference on Hardware/software codesign and system synthesis* (pp. 225-234). ACM.
- [54] Nordin, N., & Dressler, F. (2012, September). Effects and implications of beacon collisions in co-located IEEE 802.15. 4 networks. In *Vehicular Technology Conference (VTC Fall), 2012 IEEE* (pp. 1-5). IEEE.
- [55] Recas, J., Khaled, N., Del Barrio, A. A., & Hermida, R. (2014). Generic Markov model of the contention access period of IEEE 802.15. 4 MAC layer. *Digital Signal Processing*, 33, 191-205.
- [56] Martinez, C. (2011). Metodología de diseño para minimizar el consumo de potencia y los retrasos en redes inalámbricas de sensores y actuadores con retrasos acotados (Disertación Doctoral).
- [57] Rane, S. J. (2013). Throughput optimization in IEEE 802.15. 4 using GTS mechanism. *International Journal of Latest Research in Science and Technology* ISSN, 2(1), 2278-5299.

- [58] Kim, R. H., Kim, P. S., & Kim, J. G. (2014). A MAC Protocol for Fair Data Transmission in the WBSN Environment.
- [59] Kim, R. H., Kim, P. S., & Kim, J. G. (2015). A study on MAC protocol for urgent data transmission in Wireless Bio Signal Monitoring Environment.
- [60] Shen, W. (2014). A Protocol Framework for Adaptive Real-Time Communication in Industrial Wireless Sensor and Actuator Networks (Doctoral dissertation, Mid Sweden University).
- [61] Alvi, A. N., Bouk, S. H., Ahmed, S. H., Yaqub, M. A., Javaid, N., & Kim, D. (2015). Enhanced TDMA based MAC protocol for adaptive data control in wireless sensor networks. *Communications and Networks, Journal of*, 17(3), 247-255.
- [62] Beretta, I., Rincon, F., Khaled, N., Grassi, P. R., Rana, V., Atienza, D., & Sciuto, D. (2012, April). Model-based design for wireless body sensor network nodes. In *Test Workshop (LATW), 2012 13th Latin American* (pp. 1-6). IEEE.
- [63] Hernández Herranz, A. (2010). Wireless Process Control using IEEE 802.15. 4 Protocol. Master Degree Thesis, Royal Institute of Technology.
- [64] Saraireh, M. S. (2013). Performance Analysis of Guaranteed Time Slots Allocation in IEEE 802.15. 4 Protocol over Radio. *Middle-East Journal of Scientific Research*, 13(9), 1137-1143.
- [65] Koubaa, A., Alves, M., & Tovar, E. (2006, July). i-GAME: an implicit GTS allocation mechanism in IEEE 802.15. 4 for time-sensitive wireless sensor networks. In *Real-Time Systems, 2006. 18th Euromicro Conference on* (pp. 10-pp). IEEE.
- [66] Anwar, Mashood, Xia, Yuanqing & Zhan, Yufeng. (2016). TDMA-Based IEEE802.15.4 for Low-Latency Deterministic Control Applications. *IEEE Transactions on industrial informatics*, Vol 12. No 1.
- [67] Xia, F., Wang, L., Zhang, D., He, D., & Kong, X. (2015). An adaptive MAC protocol for real-time and reliable communications in medical cyber-physical systems. *Telecommunication Systems*, 58(2), 125-138.
- [68] Xia, F., Wang, L., Zhang, D., Zhang, X., & Gao, R. (2012, May). Ada-MAC: An adaptive MAC protocol for real-time and reliable health monitoring. In *Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER), 2012 IEEE International Conference on* (pp. 203-208). IEEE.
- [69] Choi, D. H., & Kim, D. S. (2008). Wireless fieldbus for networked control systems using LR-WPAN. *International Journal of Control Automation and Systems*, 6(1), 119-125.

- [70] Chen, F., Talanis, T., German, R., & Dressler, F. (2009, July). Real-time enabled IEEE 802.15. 4 sensor networks in industrial automation. In *Industrial Embedded Systems, 2009. SIES'09. IEEE International Symposium on* (pp. 136-139). IEEE.
- [71] Araújo, J. (2014). *Design, implementation and validation of resource-aware and resilient wireless networked control systems* (Doctoral dissertation, KTH Royal Institute of Technology).
- [72] Araujo, J., Mazo, M., Anta, A., Tabuada, P., & Johansson, K. H. (2014). System architectures, protocols and algorithms for aperiodic wireless control systems. *Industrial Informatics, IEEE Transactions on*, 10(1), 175-184.
- [73] Wavage, R., & Kaushik, A. (2014). Performance Analysis of Beacon Enabled IEEE 802.15. 4 Using GTS in Zigbee. *International Journal of Computer Science & Applications (TIJCSA)*, 2(12).
- [74] Cheng, L., Bourgeois, A. G., & Zhang, X. (2007, October). A new GTS allocation scheme for IEEE 802.15. 4 networks with improved bandwidth utilization. In *Communications and Information Technologies, 2007. ISCIT'07. International Symposium on* (pp. 1143-1148). IEEE.
- [75] Chen, J., Ferreira, L. L., & Tovar, E. (2011, September). An explicit GTS allocation algorithm for IEEE 802.15. 4. In *Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA), 2011 IEEE 16th Conference on* (pp. 1-8). IEEE.
- [76] Haque, S. E. (2012). *Efficient GTS Allocation Schemes for IEEE 802.15. 4*.
- [77] Hayashi, N., & Takai, S. (2013, July). A GTS scheduling for consensus problems over IEEE 802.15. 4 wireless networks. In *Control Conference (ECC), 2013 European* (pp. 1764-1769). IEEE.
- [78] Hayashi, N., & Takai, S. (2015). GTS-based communication task scheduling for quantized output consensus over IEEE 802.15. 4 wireless networks. *Automatica*, 55, 6-11.
- [79] Al-Anbagi, I., & Mouftah, H. T. (2014, December). Adaptive time slots control in wireless sensor networks for delay-aware applications. In *Global Communications Conference (GLOBECOM), 2014 IEEE* (pp. 222-227). IEEE.
- [80] Al-Anbagi, I., Erol-Kantarci, M., & Mouftah, H. T. (2014, April). Tuning guaranteed time slots of IEEE 802.15. 4 for transformer health monitoring in the smart grid. In *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2014 IEEE* (pp. 3420-3425). IEEE.

- [81] Zhang, X., Jin, Y., & Kwak, K. S. (2015). Adaptive GTS allocation scheme with applications for real-time Wireless Body Area Sensor Networks. *KSII Transactions on Internet and Information Systems (TIIS)*, 9(5), 1733-1751.
- [82] Yoo, S. E., Chong, P. K., Kim, D., Doh, Y., Pham, M. L., Choi, E., & Huh, J. (2010). Guaranteeing real-time services for industrial wireless sensor networks with IEEE 802.15. 4. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 57(11), 3868-3876.
- [83] Azeem, M., Khan, M. I., Faheem, Y., Tamimy, M. I., Malik, N. S., Khan, A., & Ahmed, M. (2014). Reactive GTS Allocation Protocol for Sporadic Events Using the IEEE 802.15. 4. *Mathematical Problems in Engineering*.
- [84] Choi, W., & Lee, S. (2012). A novel GTS mechanism for reliable multihop transmission in the IEEE 802.15. 4 Network. *International Journal of Distributed Sensor Networks*.
- [85] Hanzálek, Z., & Jurčík, P. (2010). Energy efficient scheduling for cluster-tree Wireless Sensor Networks with time-bounded data flows: application to IEEE 802.15. 4/ZigBee. *Industrial Informatics, IEEE Transactions on*, 6(3), 438-450.
- [86] sem, M., Khan, M. I., Khan, S. U., & Gansterer, W. (2014). Efficient scheduling of sporadic tasks for real-time wireless sensor networks. *IET Wireless Sensor Systems*, 5(1), 1-10.
- [87] Ahmad, A., Hanzalek, Z., & Hanen, C. (2014, September). A polynomial scheduling algorithm for IEEE 802.15. 4/ZigBee cluster tree WSN with one collision domain and period crossing constraint. In *Emerging Technology and Factory Automation (ETFA), 2014 IEEE* (pp. 1-8). IEEE.
- [88] Kim, K. W., Park, M. G., Han, J., & Lee, C. G. (2015). A Holistic Approach to Optimizing the Lifetime of IEEE 802.15. 4/ZigBee Networks with a Deterministic Guarantee of Real-Time Flows. *Journal of Computing Science and Engineering*, 9(2), 83-97.
- [89] Semprebom, T., Montez, C., & Vasques, F. (2013). (m, k)-firm pattern spinning to improve the GTS allocation of periodic messages in IEEE 802.15. 4 networks. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2013(1), 1-15.
- [90] Semprebom, T., Moraes, R., Montez, C., Portugal, P., & Vasques, F. (2014, July). Quality of service provision assessment for DDBP approach in IEEE 802.15. 4 networks. In *Industrial Informatics (INDIN), 2014 12th IEEE International Conference on* (pp. 118-123). IEEE.

[91] Crespo, A., & Alonso, A. (2006). Una panorámica de los Sistemas de Tiempo Real. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industria*, 3(2), 7-18.

[92] De la Puente, J.A. (2000). Introducción a los sistemas en tiempo real.

[93] F. F. Quiles and A. Garrido, *Computadores paralelos y evaluación de prestaciones*. Universidad Castilla de la Mancha. Cuenca – España, 1996.

[94] J. Zamorano, *Planificación Estática de Procesos en Sistemas de Tiempo Real Crítico*. PhD. Thesis. Universidad Politécnica de Madrid, 1995.

[95] A. Shah, M. Syed and R. Mustafisur, *Review of Cyber-Physical System in Healthcare*. Hindawi Publishing Corporation. *International Journal of Distributed Sensor Networks*. Volume 2014. Article ID 217415. 2014.

[96] Campbell, S. L., Chancelier, J. P., & Nikoukhah, R. (2006). *Modeling and Simulation in SCILAB* (pp. 73-105). Springer New York.

[97] Gordón Pico, M. E., & Vásquez Castro, B. S. (2012). *Análisis de desempeño de redes de Sensores Inalámbricos en Tiempo Real aplicadas a Monitorización Volcánica* (Doctoral dissertation, SANGOLQUÍ/ESPE/2012).

[98] De Ávila, H. C., Hipólito, J. I. N., López, J. D. D. S., Rosas, M. E. M., & Calvo, A. H. (2012). Arquitectura de e-Salud basada en Redes Inalámbricas de Sensores. *Revista de Divulgación Científica*, 6(2).

[99] Herrera, C., González, F., Silva, P. S., & Silva, J. S. (2014). Análisis y Evaluación de una Solución basada en IPv6 para Monitoreo de Calidad Ambiental en base a Redes Inalámbricas de Sensores. *Revista Politécnica*, 33(1).

[100] Santos, B. M. (2011). Módulo inalámbrico para redes de sensores biomédicos. *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, 31(2), 16-22.

[101] Cantillo, S. R. M. (2010). *Desarrollo de aplicaciones basadas en wsn* (Doctoral dissertation).

[102] Strand, J. SensorNet. In *presentation at [http://www. ittc. ku. edu/workshops/sensornet/john_strand. pdf](http://www.ittc.ku.edu/workshops/sensornet/john_strand.pdf)*.

[103] Moreno-Roldán, J. M., Luque-Nieto, M. A., Otero, P., Poncela, J., Fernández-Salas, L. M., & Díaz-del-Río, V. Monitorización de entornos submarinos en tiempo real.

[104] Pérez, C. A., Soto, F., Riquelme, J. L., & Iborra, A. (2010). DISEÑO DE UNA RED DE SENSORES INALÁMBRICA PARA UN SISTEMA DE OBSERVACIÓN COSTERO. *Actas de SAAEI*, 118-123.

- [105] Koubâa, A., Alves, M., Tovar, E., & Cunha, A. (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.
- [106] Le Boudec, J. Y., & Thiran, P. (2001). *Network calculus: a theory of deterministic queuing systems for the internet* (Vol. 2050). Springer Science & Business Media.
- [107] Thomesse, J. P. (1998). A review of the fieldbuses. *Annual reviews in Control*, 22, 35-45.
- [108] Sarmiento H. G. (2012). Análisis de desempeño del protocolo CSMA/CA ranurado en redes de sensores inalámbricas con tráfico heterogéneo. Universidad Técnica Federico de Santa María. Chile.
- [109] Ortiz A., Munilla J. & Peinado A. (2006). Enlace inalámbrico seguro para redes de sensores. Universidad de Malaga. XXI Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio. Oviedo. España.
- [110] S. Campaña and J. Londoño. 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 UNAD. Colombia. 2016.
- [111] M. Coronado. Aplicaciones para redes de sensores en IPv6 (Doctoral dissertation, Facultad de Informática). 2017.
- [112] C. A. Medina Mondragón. Evaluación de desempeño de mecanismos de control de congestión en diferentes topologías en una WSN. Universidad Javeriana. Departamento de Electrónica. 2017
- [113] IEEE 802.15.4, Standard for Low-Rate Wireless Networks, 2015
- [114] MONTGOMERY, DOUGLAS. Design and analysis of experiments. Fifth Edition. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1997.
- [115] Padhye, J., Firoiu, V., Towsley, D., & Kurose, J. (1998). Modeling TCP throughput: A simple model and its empirical validation. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 28(4), 303-314.
- [116] LECHTALER, A. R. C. (2013). Comunicaciones-una introducción a las redes digitales de transmisión de datos y señales isócronas. Alfaomega Grupo Editor.

ANEXOS

Anexo 1: Tablas de datos de los sensores tomados para las simulaciones.

WSN para monitorización volcánica [97]		
Sensor	Periodo (T) (s)	Tamaño Paquete (P) (bits)
s1	2000	600
s2	10000	500
s3	300000	1200
s4	20000	2000
s5	5000	600
s6	15000	300
s7	30000	1500
s8	15000	400

Arquitectura de e-Salud basada en Redes Inalámbricas de Sensores [98]		
Sensor	Periodo (T) (s)	Tamaño Paquete (P) (bits)
s1	40	300
s2	80	480
s3	40	320
s4	80	300
s5	40	320

Monitoreo de Calidad Ambiental en base a Redes Inalámbricas de Sensores [99]		
Sensor	Periodo (T) (s)	Tamaño Paquete (P) (bits)
s1	5000	384
s2	10000	1040
s3	2500	384
s4	4200	1040
s5	6000	500
s6	5000	500
s7	8000	384

WSN Aplicado a Entornos de Salud – monitoreo señales biomédicas [100]		
Sensor	Periodo (T) (s)	Tamaño Paquete (P) (bits)
s1	8500	380
s2	10000	816
s3	6500	380

WSN para la monitorización de infraestructuras críticas de puentes [101]		
Sensor	Periodo (T) (s)	Tamaño Paquete (P) (bits)
s1	3000	40
s2	4000	1040
s3	5000	40
s4	3000	1040
s5	4000	1040
s6	7000	1040
s7	9000	40
s8	13000	1040
s9	10000	40
s10	21000	40

WSN para monitorización de entornos submarinos en tiempo real [103]		
Sensor	Periodo (T) (s)	Tamaño Paquete (P) (bits)
s1	300000	80
s2	500000	320
s3	200000	80
s4	100000	320
s5	50000	80
s6	300000	320
s7	200000	80
s8	150000	320
s9	110000	80
s10	65000	320
s11	300000	80
s12	500000	320
s13	200000	80
s14	100000	320
s15	50000	80
s16	300000	320
s17	200000	80
s18	150000	320
s19	110000	80
s20	65000	320

Anexo 2: Tablas de datos con el número de sensores ampliados para las simulaciones.

WSN para monitorización volcánica [97] – 14 sensores		
Sensor	Periodo (T) (s)	Tamaño Paquete (P) (bits)
s1	2000	600
s2	10000	500
s3	300000	1200
s4	20000	2000
s5	5000	600
s6	15000	300
s7	30000	1500
s8	15000	400
s9	2000	600
s10	10000	500
s11	300000	1200
s12	20000	2000
s13	5000	600
s14	15000	300

Arquitectura de e-Salud basada en Redes Inalámbricas de Sensores [98] – 7 sensores		
Sensor	Periodo (T) (s)	Tamaño Paquete (P) (bits)
s1	40	300
s2	80	480
s3	40	320
s4	80	300
s5	40	320
s6	40	300
s7	80	480

Monitoreo de Calidad Ambiental en base a Redes Inalámbricas de Sensores [99] – 14 sensores		
Sensor	Periodo (T) (s)	Tamaño Paquete (P) (bits)
s1	5000	384
s2	10000	1040
s3	2500	384
s4	4200	1040
s5	6000	500
s6	5000	500
s7	8000	384

s8	5000	384
s9	10000	1040
s10	2500	384
s11	4200	1040
s12	6000	500
s13	5000	500
s14	8000	384

WSN Aplicado a Entornos de Salud – monitoreo señales biomédicas [100] – 21 Sensores		
Sensor	Periodo (T) (s)	Tamaño Paquete (P) (bits)
s1	8500	380
s2	10000	816
s3	6500	380
s4	8500	380
s5	10000	816
s6	6500	380
s7	8500	380
s8	10000	816
s9	6500	380
s10	8500	380
s11	10000	816
s12	6500	380
s13	8500	380
s14	10000	816
s15	6500	380
s16	8500	380
s17	10000	816
s18	6500	380
s19	8500	380
s20	10000	816
s21	6500	380

WSN para la monitorización de infraestructuras críticas de puentes [101] – 18 sensores		
Sensor	Periodo (T) (s)	Tamaño Paquete (P) (bits)
s1	3000	40
s2	4000	1040
s3	5000	40
s4	3000	1040
s5	4000	1040
s6	7000	1040

s7	9000	40
s8	13000	1040
s9	10000	40
s10	21000	40
s11	3000	40
s12	4000	1040
s13	5000	40
s14	3000	1040
s15	4000	1040
s16	7000	1040
s17	9000	40
s18	13000	1040

WSN para monitorización de entornos submarinos en tiempo real [103] – 15 sensores		
Sensor	Periodo (T) (s)	Tamaño Paquete (P) (bits)
s1	300000	80
s2	500000	320
s3	200000	80
s4	100000	320
s5	50000	80
s6	300000	320
s7	200000	80
s8	150000	320
s9	110000	80
s10	65000	320
s11	300000	80
s12	500000	320
s13	200000	80
s14	100000	320
s15	50000	80

Anexo 3: Cumplimiento Pasantía Internacional UJAEN - España

Universidad: Universidad de Jaén – Andalucía

País: España

Ciudad: Jaén

Año: 2016

Carta de cumplimiento:

Dr. Pedro Sánchez Sánchez
Director del Departamento de Informática
Universidad de Jaén
Campus Las Lagunillas s/n, 23071 Jaén
Teléfono: 954 951 111 ext. 505



UNIVERSIDAD DE JAÉN

Departamento de Informática
Fecha: 18 de abril de 2016
Asunto: Cumplimiento Pasantía en Investigación

Ingeniero
CLAUDIO CAMILO GONZÁLEZ CLAVIRO
Decano Escuela de Ciencias Básicas Tecnología e Ingeniería - ECBTI
Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD
Bogotá - Colombia


Cordial saludo,

Acuerdo con la invitación realizada al docente Serna Estigarribia Campaña Bionética, identificado con C.C. 98.792.188 de Colombia, adscrito a la ECBTI de la UNAD, con el fin de desarrollar una pasantía investigativa internacional en la Universidad de Jaén en el periodo comprendido entre el 29 de marzo y 29 de abril de 2016. Mediante el presente documento me permite certificar el cumplimiento de la misma, alcanzando los objetivos fijados al inicio de la invitación, que correspondieron a:

- Avanzar en el desarrollo de los procesos investigativos del grupo Davinci, relacionados con el proyecto de investigación en campo que maneja técnicas de sensores y señales biomédicas principalmente.
- Participar en la publicación de artículos y ponencias en conjunto con el grupo SINBAD2
- Adelantar actividades relacionadas con el doctorado en ingeniería que adelanta actualmente con la UPB.

Sin otro particular, en constancia se firma en la ciudad de Jaén España, a 29 de abril de 2016.

Atentamente,



Dr. Pedro Sánchez Sánchez
Director del Dep. de Informática
Universidad de Jaén



Dra. Macarena Espinosa
Investigadora del Dep. de Informática
(SINBAD2) - Universidad de Jaén

Para cualquier información adicional, sus correcciones pueden presentarse en materia con el departamento de Informática en la siguiente dirección: Universidad de Jaén, Campus Politécnico Superior, Departamento de Informática, Edificio Tecnología e Ingeniería s/n, Parque Las Lagunillas, 23071 Jaén, Teléfono: 954 951 111 ext. 505, Fax: 954 951 111 ext. 505.

Anexo 4: Publicación Artículo: Scheduling the Real-Time Transmission of Periodic Measurements in 802.15.4 Wireless Sensor Network

Revista: Procedia Computer Scienc

País: Estados Unidos

Año: 2017

Link de acceso artículo:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050917318094>

Resumen:

Wireless sensor networks (WSN) are a major technological innovation developed in recent years with many important applications, for example in Cyber-Physical Systems and Internet of Things environments. Although there are many proposals for handling realtime traffic in WSNs, most of them fall into best-effort mechanisms that do not provide real-time guarantees. At the MAC level, the IEEE 802.15.4 standard defines a reservation mechanism called Guaranteed Time Slots (GTS) that uses a first-come firstserved service policy, which is not enough to ensure the real-time delivery of packets. In this work, we present a formal definition of the scheduling problem for a sensor network using a reservation mechanism (such as GTS) that provides guarantees for the realtime delivery of packets. We also present a heuristic approach for finding feasible schedules when possible or determining if the requirements of a set of sensors are not feasible. © 2017 The

Authors. Published by Elsevier B.V. Peer-review under responsibility of the scientific committee of the Complex Adaptive Systems Conference with Theme: Engineering Cyber Physical Systems.

Keywords: Wireless Sensor Network; Real-Time; GTS; IEEE 802.15.4; Scheduling algorithm.

Anexo 5: Publicación Artículo: Fuzzy Intelligent System for Patients with Preeclampsia in Wearable Devices

Revista: Mobile Information System

Año: 2017

Lugar: Europa

Link Acceso artículo: <http://downloads.hindawi.com/journals/misy/2017/7838464.pdf>

Resumen:

Preeclampsia affects from 5% to 14% of all pregnant women and is responsible for about 14% of maternal deaths per year in the world. This paper is focused on the use of a decision analysis tool for the early detection of preeclampsia in women at risk. This tool applies a fuzzy linguistic approach implemented in a wearable device. In order to develop this tool, a real dataset containing data of pregnant women with high risk of preeclampsia from a health center has been analyzed, and a fuzzy linguistic methodology with two main phases is used. Firstly, linguistic transformation is applied to the dataset to increase the interpretability and flexibility in the analysis of preeclampsia. Secondly, knowledge extraction is done by means of inferring rules using decision trees to classify the dataset. The obtained linguistic rules provide understandable monitoring of preeclampsia based on wearable applications and devices. Furthermore, this paper not only introduces the proposed methodology, but also presents a wearable application prototype which applies the rules inferred from the fuzzy decision tree to detect preeclampsia in women at risk. The proposed methodology and the developed wearable application can be easily adapted to other contexts such as diabetes or hypertension

Anexo 6: Secondment Proyecto REMIND – COMISIÓN EUROPEA

Entidad: Fundación AgeingLab - España

Año: 2017

Duración: 2 meses

Resumen Actividad:

La Movilidad internacional en Investigación en la fundación AgeingLab (España) relacionada con las temáticas de ambientes inteligentes, redes de sensores inalámbricos, envejecimiento y cuidado de personas de la tercera edad, en función del desarrollo del proyecto de investigación en curso aprobado por la Unión Europea en el marco de la convocatoria H2020 y aprobado por la escuela con código número: PIE 13-17 denominado: The use of computational techniques to Improve compliance to reminders within smart environments — REMIND. Los productos de esta primera movilidad fueron los siguientes: Desarrollo de una publicación investigativa del proceso de movilidad: Este es el producto a corto plazo, que resultó de la interacción y desarrollo de las actividades investigativas en la fundación AgeingLab, en conjunto con los investigadores de la misma, donde se estudió principalmente los cuidados y tecnologías para personas de la tercera edad. Fortalecimiento del proyecto aprobado actualmente y denominado: Libro: Redes de sensores y su aplicación en el cuidado de la salud. PIE 20-16. En este aspecto todo el conocimiento adquirido está siendo transferido al grupo para el logro de los objetivos propuestos. Socialización de la experiencia en la UNAD: Se han realizado varias conferencias y talleres con los investigadores de la escuela y de la universidad interesados en las temáticas aprendidas, con el fin de socializar e intercambiar experiencias entorno a los procesos investigativos adquiridos durante la movilidad.

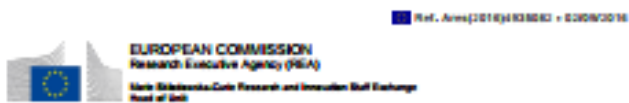
Anexo 7: Aprobación Proyecto Remind – Comisión Europea

Nombre del proyecto: The use of computational techniques to Improve compliance to reminders within Smart environments.

Lugar: Europa – Red REMIND

Año: 2016 – 2020

Carta de aprobación:



Ref. Ares(2016)4030002 - 0206/2016

Brussels,

Chris NUGENT
UNIVERSITY OF ULSTER
CROMBIE ROAD
BTSE ISA COLERAINE
UNITED KINGDOM

Subject: Result of Evaluation / Invitation to grant preparation
Programme/Call: H2020 — H2020-MSCA-RISE-2016/H2020-MSCA-RISE-2016
Proposal: 734355 — REMIND

Dear Chris NUGENT,

We are pleased to inform you that the above mentioned proposal has been favourably evaluated by the Agency. Consequently, we wish to proceed to the preparation of the Grant Agreement based on your proposal.

You will find the Evaluation Summary Report (ESR) for your proposal together with this letter in the "My Area" section of the Research Participant Portal. The ESR reflects the comments of the evaluators.

You will also find under chapter "Other Information" in this letter or available in the Participant Portal, the outcome of the Ethics Review (including the outcome of the Ethics screening/ Ethics Assessment), which may include elements to be taken into account during the grant preparation.

Invitation to grant preparation

With reference to the submitted proposal and its evaluation, the grant preparation shall be based on the following:

1. **Proposal No:** 734355 - REMIND - MSCA-RISE
2. **Topic:** MSCA-RISE-2016 - Research and Innovation Staff Exchange
3. **Project Officer:**

Ms Laura Elena APOSTOL
Laura-Elena.APOSTOL@ec.europa.eu
+32 22966985
Marie Skłodowska-Curie Research and Innovation Staff Exchanges

Anexo 8: Publicación Artículo: Computing protoforms from high-rate sensor streams

Evento: STYLF 2016 – Donostia San Sebastian – 2016 - España

Año: 2016

Link artículo:

https://www.researchgate.net/profile/Sixto_Campana_Bastidas/publication/308992417_Computing_protoforms_from_high-rate_sensor_streams/links/57fd043a08ae406ad1f3b925.pdf

Resumen:

In the context of the Internet of Things (IoT) many sensors have been enhanced with respect to their ordinary role to be proactive and collaborative with other devices. This fact provokes a description of the world and the human activity as we have never collected [1]. The data streams provided by the set of sensors is continuously increasing. Generally, these data streams are just analyzed and partially stored. In order to interpret the information of sensor streams is critical developing linguistic descriptions on natural language in a comprehensiveness and interpretability way, depending of the application domain. In this contribution, we introduces a methodology to compute linguistic descriptions of high-rate sensor streams that considers relative quantifiers on a temporal component by means of protoforms [2], which are an useful knowledge model for summarization [3], quantification [4] or in time series [5]. In this work, we propose protoforms in the shape of s_j is $Q_j s V_j r T_k$, to represent the linguistic terms $V_j k$ which describe the sensor stream s_j with the relative quantifier $Q_j s$ in a temporal terms T_k . An example of linguistic description computed by the proposed methodology from a data stream of a pulsometer is as follows: the most of heart rate measurements are high recently

Anexo 9: Publicación Artículo: Fuzzy Intelligent System for Supporting Preeclampsia Diagnosis from the Patient Biosignals

Revista: Springer International Publishing

Año: 2016

Link Acceso artículo: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-48746-5_1

Resumen:

This contribution presents a proposal for generating linguistic reports based on the study of biomedical signals of human patients. Although this topic is dealt in many previous works, there are challenges still open for the scientific community, such as the development of systems to produce reports and alerts using a human-friendly language. We present a brief review of some relevant previous works, as well as our proposal of a system based on fuzzy linguistic approach applied to the diagnosis of the preeclampsia disease that may affect pregnant women. Our system transforms numerical values of biomedical signals into linguistic values that are understandable information for the patients and the medical staff. The dataset used for testing the system contains real data from a study carried out by the Davinci UNAD Group (Colombia) on patients that suffer from preeclampsia.

Keywords: Fuzzy logic Fuzzy linguistic intelligent systems Biomedical systems Preeclampsia

Anexo 10: Publicación Artículo: Sistema en tiempo real para el monitoreo de variable médicas en pacientes hospitalizadas con redes WSN.

Revista: Publicación e Investigaciones - UNAD

Año: 2016

Link de Acceso Artículo:

https://www.researchgate.net/profile/Sixto_Campana_Bastidas/publication/308992167_SISTEMA_EN_TIEMPO_REAL_PARA_EL_MONITOREO_DE_VARIABLEES_MEDICAS_EN_PACIENTES_HOSPITALIZADAS_CON_REDES_WSN_REAL-TIME_SYSTEM_FOR_MEDICAL_MONITORING_VARIABLES_IN_HOSPITALIZED_PATIENTS_WITH_NETWORKS_WSN/links/57fd025508aeea8c97c8636c.pdf

Resumen:

Este artículo presenta los resultados obtenidos de la investigación PIE 03-15, aprobada por el comité de investigaciones de la ECBTI de la UNAD en el año 2015. La cual consistió en un estudio de aplicación de un sistema en tiempo real para el monitoreo de variables médicas, aplicado en pacientes hospitalizadas, para el caso específico se tomó como referencia una población de personas con patología de preeclampsia. La investigación en referencia parte de la descripción de la población seleccionada, así como de la patología asociada, luego se presentan los requerimientos técnicos y lógicos del sistema propuesto y se finaliza con los resultados obtenidos con el desarrollo del sistema. Este estudio es un inicio en la aplicación y desarrollo de dispositivos y sistemas para la captura de señales biomédicas utilizando tecnologías emergentes, con software y hardware a bajo costo.

Palabras clave: Comunicación biomédica, Redes de área personal, Redes de sensores inalámbricos, Redes de sensores del cuerpo, Sistema de software, Procesamiento de señales biomédicas, Preeclampsia.

Anexo 11: Publicación Artículo: REVIEW: ALGORITMOS DE PLANIFICACIÓN PARA LA TRANSMISIÓN DE DATOS EN TIEMPO REAL EN REDES DE SENSORES INALÁMBRICAS IEEE 802.15. 4

Revista: Publicación e Investigaciones - UNAD

Año: 2015

Link de Acceso Artículo:

<http://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/publicaciones-e-investigacion/article/view/1443/1883>

Resumen:

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

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

Anexo 12: Participación Evento: ECOSISTEMAS DIGITALES: REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS, INTERNET DE LAS COSAS Y AMBIENTES INTELIGENTES

Evento: I Encuentro Internacional de e-investigación, IV cumbre nacional de paz y II encuentro interzonal de investigación.

Año: 2015

Resumen:

En el marco del desarrollo del proyecto “Sistema en tiempo real para el monitoreo de variables médicas en pacientes hospitalizados con redes WSN”, aprobado por el comité de investigaciones de la ECBTI de la UNAD, se ha realizado un estudio que hace referencia a la integración de las redes de sensores inalámbricas (WSN), Internet de las cosas (IoT), ambientes inteligentes (IA) y otras tecnologías en la búsqueda de transmisiones más eficientes y en tiempo real, tal como lo exigen diferentes aplicaciones en la vida del hombre, sobre todo en situaciones en las cuales está de por medio la vida de la personas. Toda esta integración de tecnologías es lo que se ha denominado ecosistemas digitales, que es el tema principal de la ponencia y la base sobre la cual se está avanzando en la investigación mencionada, por ello en este artículo se definirán las tecnologías mencionadas, se hablará de su problemática, contexto y desafíos que atañen a diferentes aplicaciones y en donde la transmisión en tiempo real será lo relevante.

Palabras clave: Redes de sensores inalámbricas, Internet de las cosas, Ambientes inteligentes, Sistemas ciberfísicos.

Anexo 13: Publicación Artículo: A Characterization of data transfer modes in Wireless Sensor Networks based on IEEE 802.15.4

Evento: IEEE Latincom 2014

Año: 2014

Resumen:

Abstract: This paper presents a characterization of the various access layer mechanisms defined in the IEEE 802.15.4 standard for wireless sensor networks (WSNs). In particular we seek to identify the conditions under which these mechanisms provide efficient means for delivery of real time sensor data to end devices.

There are many applications of wireless sensor networks that depend on the ability to deliver and process sensor readings in real-time. For example when alarms must be generated and actions taken to avoid a catastrophic situation. For these reason, characterizing the performance of the network is fundamental for the design of WSNs in applications with real-time constraints.

These study concludes presenting the various trade-offs between the different medium access mechanisms that provide guidelines for the design of the WSNs under these requirements.

Index Terms—Medium access, WSN, beacon, CSMA/CA.

Anexo 14: Publicación Artículo: ESTUDIO DE REDES DE SENSORES Y APLICACIONES ORIENTADAS A LA RECOLECCIÓN Y ANÁLISIS DE SEÑALES BIOMÉDICAS.

Revista: Gerencia Tecnológica Informática – GTI UIS

Año: 2013

Link de Acceso Artículo:

<http://revistas.uis.edu.co/index.php/revistagti/article/view/3558>

Resumen:

El presente estudio realiza un análisis de las principales investigaciones que en los últimos años comprenden el uso de las redes de sensores inalámbricas (WSN) para aplicaciones médicas y de cuidado de la salud, con énfasis en lo relacionado con la captura y envío de datos en tiempo real, teniendo en cuenta la concepción de red WSN, sus protocolos y aplicaciones, como también el uso de sensores, sus clases y características; y la forma como se integran para hacer un sistema que apoye a la medicina mediante el uso de la tecnología en lo que generalmente se denomina telemedicina. Adicionalmente se ha tenido en cuenta que la información obtenida de la red de sensores es el insumo que permite el desarrollo de aplicaciones para el cuidado de la salud, la cual es un área de investigación que promete importantes oportunidades de investigación, por ello se ha realizado una revisión inicial del estado del arte en este tema. Por último, el estudio identifica los principales problemas y retos que presentan las aplicaciones propuestas en procura del análisis de dichas situaciones que a futuro pueden determinar nuevas investigaciones y desarrollos en el campo de estudio.

PALABRAS CLAVES: Telemedicina, Sensores, WSN, Minería de datos, Señales Biomédicas.

Anexo 15: Participación evento: “Estudio de la transmisión en tiempo real de señales medicas con redes WSN y sensores ECG entre otros”

Evento: Colombian Engineering Meeting 2013

Año: 2013

Resumen:

El desarrollo tecnológico en los últimos años ha permitido que la ciencia evolucione continuamente en favor de las necesidades del ser humano, el campo de la salud no es ajeno a esta evolución, sino por el contrario es donde más aplicaciones se encuentra; por ejemplo, en el uso de sensores para el seguimiento y control de pacientes remotamente (sensor body), monitoreo de enfermedades de pacientes con ciertos patrones, entre otros. Sin duda la llave tecnología y salud, es extraordinaria y si se combina de forma que la una asista a la otra para el bienestar de las personas, su aporte a la humanidad es invaluable, esta premisa ha sido considerada por muchos investigadores en los diferentes campos que atañe este tema, desde el punto de vista de la ingeniería, se puede mencionar el desarrollo electrónico de elementos que permiten el control de enfermedades y monitoreo de señales que determinan el comportamiento de una persona en particular, también están las redes de datos y comunicaciones que van desde la conocidas WIFI hasta la cada vez más populares WSN (Wireless Sensor Network - Redes de Sensores inalámbricos); en el aspecto médico se ha tratado el control y monitoreo de aspectos como la frecuencia cardiaca, presión sanguínea, temperatura, humedad, niveles de azúcar en la sangre, entre otros.

Acorde a lo anterior se propone una conferencia sobre los estudios más importantes en los últimos años acerca de tema propuesto, teniendo en cuenta cuatro aspectos fundamentales: el uso de las redes de sensores inalámbricos (WSN), los sensores que se usan en el cuerpo humano para el monitoreo de diferentes aspectos del ser humano (Network Body Sensors), la transmisión de datos en tiempo real y en la parte médica, las señales vitales que deben ser monitoreadas para actuar de forma inmediata en los pacientes que presenten algún tipo de padecimiento importante y que con la ayuda de la tecnología pueden ser tratados de forma más eficiente.

Palabras clave: Telemedicina, Sensores, WSN, Tiempo Real, Minería de datos, GEO.