

Universidad Autónoma de Baja California
Programa de Posgrado de Maestría y Doctorado en Ciencias e
Ingeniería (MyDCI)
Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería.



Metodología de análisis de modelado de red inalámbrica en contexto de nodos heterogéneos.

Tesis que para obtener el grado de Doctor en Ciencias presenta

María Jesús Ruiz Soto

SEPTIEMBRE 2020

Metodología de análisis de modelado de red inalámbrica en contexto de nodos heterogéneos

María Jesús Ruiz Soto

Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería
Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería
Área de Eléctrica y Electrónica:

aprobado por:	Director de Tesis	Dr. Eduardo Álvarez Guzmán
	Codirector de Tesis	Dr. Arturo Serrano Santoyo
	Comité de Tesis	
		Dra. Edith García Cárdenas
		Dr. José Luis González Vázquez
		Dr. Ciro Andrés Martínez García Moreno
		Dr. Moisés Sánchez Adame

Fecha de la defensa de tesis: SEPTIEMBRE 2020

Universidad Autónoma de Baja California
Programa de Posgrado de Maestría y Doctorado en Ciencias e
Ingeniería (MyDCI)
Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería.



Metodología de análisis de modelado de red inalámbrica en contexto de nodos heterogéneos.

Tesis que para obtener el grado de Doctor en Ciencias presenta

María Jesús Ruiz Soto

SEPTIEMBRE 2020

Universidad Autónoma de Baja California

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA

FOLIO No. 273

Tijuana, B. C., a 27 de Febrero del 2020

C. María Jesús Ruiz Soto
Pasante de: Doctor en Ciencias
Presente

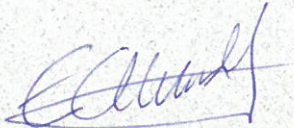
El tema de trabajo y/o tesis para su examen profesional, en la
Opción TESIS

Es propuesto, por los C.C. Dr. Eduardo Álvarez Guzmán,
Dr. Arturo Serrano Santoyo

Quien será el responsable de la calidad de trabajo que usted presente, referido al
tema Metodología de análisis de modelado de red inalámbrica en contexto de
nodos heterogéneos.

el cual deberá usted desarrollar, de acuerdo con el siguiente orden:

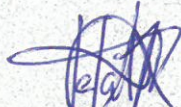
- I.- FUNDAMENTOS TEORICOS
- II.- METODOLOGIA PROPUESTA
- III.- SIMULACION DE UNA RED DE SENSORES INALAMBRICOS
- IV.- ANALISIS DE RESULTADOS
- V.- CONCLUSIONES
- VI.- PRIMER APENDICE
- VII.- BIBLIOGRAFIA

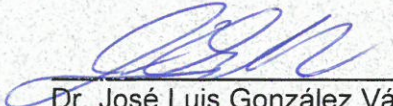

Dr. Eduardo Álvarez Guzmán
Director de Tesis

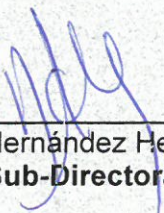
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE BAJA CALIFORNIA



FACULTAD DE CIENCIAS
QUÍMICAS E INGENIERÍA
COORDINACIÓN DE
INVESTIGACIÓN Y POSGRADO


Dr. Arturo Serrano Santoyo
Co- Director de Tesis


Dr. José Luis González Vázquez
Director


Q. Noemí Hernández Hernández
Sub-Directora

DEDICATORIA

A mis padres

Mario Ruiz e Irma Soto.

Por su apoyo incondicional.

Y a mi hermoso

Nicolás

Eres la razón de que me levante cada día
esforzándome por el presente y el mañana, eres
mi principal motivación.

Agradecimientos

A mi esposo **José Rivera** por acompañarme durante esta travesía. Este proyecto no fue fácil, pero estuviste motivándome y ayudándome hasta donde tus alcances lo permitían. Gracias por ser paciente, sobre todo en esos momentos de estrés. Te lo agradezco muchísimo, amor.

A mi hermoso **Nicolás**, tu afecto y tu cariño son mi motor de mi esfuerzo, de mis ganas de buscar lo mejor para ti. A tu corta edad, me has enseñado y me sigues enseñando mucho cosas de esta vida. Muchas gracias hijo, te amo muchísimo.

A mis maravillosos padres, **Mario Ruiz** e **Irma Soto**, por siempre estar conmigo, alentándome y apoyándome en cada una de mis metas.

A mi hermana **Blanca Ruiz Soto**, y mis hermosos sobrinos **Cristhian Luna** y **Oscar Bocanegra**.

A mis suegros **José Rivera** y **Rosy Castillo**, gracias por el apoyo brindado, sobre todo para cuidar a Nicolás.

Muchas gracias a mi director de tesis, **Dr. Eduardo Álvarez Guzmán**, este doctorado fue una excelente experiencia, tanto en lo educativo, profesional como en lo personal, y mucho de esto, fue debido a usted, que siempre se mostró paciente conmigo, a pesar de no ser una alumna modelo, usted me hizo sentir que si lo era. Agradezco cada una de sus clases, cada uno de los momentos que dedicó a este trabajo de tesis, a mi formación profesional, si estaba enamorada del mundo de las telecomunicaciones, en este tiempo, confirme mi amor por esta área. No tengo palabras para agradecer sus enseñanzas, sus consejos y su tiempo. Muchas gracias por haberme aceptado como su alumna de doctorado.

A mi co-director de tesis, **Dr. Arturo Serrano Santoyo**, gracias por sus enseñanzas, por su paciencia y su tiempo, y por haberme aceptado como alumna de doctorado.

Gracias a los miembros del comité de tesis, **Dra. Edith García**, gracias por su apoyo y palabras de aliento durante todo este tiempo; **Dr. Ciro Andrés Martínez**, **Dr. José Luis González** y **Dr. Moisés Sánchez**.

A todas las personas que me acompañaron durante este trayecto, que fueron mis amigos, mis

compañeros de trabajo, mis alumnos; todos ustedes aportaron a este trabajo de tesis, por lo que a cada uno de ustedes les digo muchas gracias.

Y por último, a CONACYT por la beca otorgada para la realización de esta tesis.

RESUMEN

Pocos son los modelos actuales de las redes de sensores inalámbricos que consideran las características reales de las redes, ni las consideraciones del terreno para su uso eficiente, esto implica mayores costos de implementación o retrabajo en el proceso de instalación de este tipo de redes.

En el presente trabajo se desarrolló una metodología de análisis de parámetros de evaluación para una red de sensores heterogéneos inalámbricos, con la finalidad de tener resultados más cercanos a las características reales de este tipo de redes; así como ofrecer estrategias de evaluación, en función de los parámetros críticos de la aplicación, que sea compatible con redes de próxima generación, e identificar las restricciones que impone el caso de estudio sobre la implementación de una red de sensores heterogéneos inalámbricos, con miras hacia el Internet de las Cosas; teniendo como propósito, el lograr un mejor diseño en la implementación.

La metodología de análisis aporta herramientas útiles de diseño que incluye casos de aplicaciones de tecnologías emergentes de IoT; establece una clara relación entre los parámetros más significativos en el desempeño de la red, enfatizando la naturaleza heterogénea de los nodos sensores; proporciona información sobre la naturaleza y características de interrelación entre capas para entender la dinámica de operación de la red.

Para elaborar la presente metodología de análisis, fue necesario proponer una arquitectura de red; lo siguiente fue describir la interrelación existente entre las capas física, acceso al medio y red; para, a continuación, delimitar la heterogeneidad de la red, limitándola a distancia, potencia de transmisión, tasas de transmisión y tamaños de paquetes.

Ya identificados los parámetros críticos junto con su interrelación entre ellos, y habiendo definido la heterogeneidad, lo siguiente fue hacer simulaciones numéricas para así estimar la potencia de recepción, la relación señal a ruido, la tasa de error de bit y la tasa de error por paquete para diferentes tasas de transmisión, diferentes tamaños de paquetes y diferentes números de nodos sensores que estarían transmitiendo de forma simultánea, así como las probabilidades de que el nodo sensor detecte libre el canal y pueda transmitir su paquete, la probabilidad de que no pueda transmitir su paquete y tenga que descartarlo, la probabilidad de que haya una colisión y el caudal eficaz de la red (*throughput*); se propone

que esta metodología se emplee para topologías tipo cluster y así disminuir el número de nodos sensores que estarán transmitiendo de forma simultánea.

Con la metodología propuesta, se hacen las pruebas necesarias para así tener una mayor probabilidad de éxito al momento de implementar, con el máximo ahorro de recurso.

Summary

Currently, there are few wireless sensor networks models that consider the physical characteristics of the networks, nor terrain considerations for the prediction of an efficient use, this implies higher costs of implementation or ad-hoc modifications in the process of installing wireless sensor networks.

In this work a methodology of analysis for evaluation parameters was developed for a heterogeneous wireless sensor networks is presented, in order to achieve a better design in the implementation, closer to the physical characteristics of this type of networks, the work offers evaluation strategies, depending on the critical parameters of the application, compatible with next generation networks, and identify the restrictions imposed by the case study on the implementation of a heterogeneous wireless sensor networks, with interest to the Internet of Things.

The analysis methodology provides useful design tools that include cases for emerging IoT technology applications; establishes a clear relationship between the most significant parameters related to network performance, emphasizing the heterogeneous nature of the sensor nodes; provides information on the nature and characteristics of interrelation between layers to understand the dynamics of network operation.

In order to create the present analysis methodology, it was necessary to propose a network architecture; then the interrelation between the physical layer, medium access control layer and network layer was considered; and the heterogeneity of the network was delimited, limiting current analysis to distance, transmission power, transmission rates and packet sizes.

Having selected the critical parameters as the interrelation between them, and having defined the heterogeneity, the following was to make numerical simulations to estimate the received power, the signal to noise ratio, the bit error rate and the packet error rate for different transmission rates, different packet sizes and different numbers of sensor nodes that would be transmitting simultaneously, as well as the sensor node probability to access the channel and can transmit its packet, the probability that it can not transmit its package and have to discard it, the probability of a collision and the effective throughput of the network. It

is proposed that this methodology be used for cluster type topologies and thus decrease the number of sensor nodes that will be transmitting simultaneously.

With the proposed methodology, the necessary tests are performed in order to achieve a greater probability of success at the time of physical implementation, with better cost-saving conditions.

Índice general

Agradecimientos	4
Resumen	6
Summary	8
Introducción	1
1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	6
1.1. Redes de Sensores Inalámbricos	6
1.1.1. Introducción	6
1.1.2. Aplicaciones de las Redes de Sensores Inalámbricos	8
1.1.3. Integración de las Redes de Sensores Inalámbricos con otras redes y tecnologías.	12
1.1.4. Fundamentos de las Redes de Sensores Inalámbricos.	16
1.2. IEEE 802.15.4.	19
1.2.1. Capa Física	19
1.2.2. Capa de Acceso al Medio	20
1.2.3. Capa de Red	29
1.3. Métricas	33
1.3.1. Relación Señal a Ruido SNR (<i>Signal to Noise Ratio</i>).	33
2. METODOLOGÍA PROPUESTA	34
2.1. Parámetros críticos de una red de sensores heterogéneos inalámbricos	34
2.1.1. Capa Física	37
2.1.2. Capa de Acceso al Medio (MAC)	39
2.1.3. Capa de Red	41
3. SIMULACIÓN DE UNA RED DE SENSORES INALÁMBRICOS	47
3.1. Modelo y características de la red de sensores inalámbricos.	48
3.2. Experimento 1: Análisis de la Capa física PHY	49

3.3. Experimento 2: Análisis de la Capa de acceso al medio MAC	51
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	52
4.1. Resultados de Experimento 1: Análisis de la Capa física PHY	52
4.2. Resultados de Experimento 2: Análisis de la Capa de acceso al medio MAC .	62
5. CONCLUSIONES	69
5.1. Discusión	69
5.2. Trabajo a futuro	74
A. PRIMER APÉNDICE	75
A.1. Trabajos en Congresos	75
A.2. Artículos en revistas indexadas	75
Bibliografía	76

Índice de figuras

1.1. Red de Sensores Inalámbricos.	8
1.2. Varias aplicaciones de las Redes de Sensores Inalámbricos (WSN)	9
1.3. Enrutamiento en una Red de Sensores Inalámbricos.	16
1.4. Arquitectura típica de un nodo sensor de una Red de Sensores Inalámbricos.	17
1.5. Arquitectura en capas de una Red de Sensores Inalámbricos.	18
1.6. Trama del estándar IEEE 802.15.4 típica para una red de 2.4 GHz.	21
1.7. Ejemplo de topologías de red del estándar IEEE 802.15.4	22
1.8. Algoritmos CSMA/CA Ranurado.	26
1.9. Estructura de la supertrama de del estándar IEEE 802.15.4	28
1.10. Parte activa e inactiva de una supertrama.	28
1.11. Ejemplo de Estructura de una Supertrama	29
2.1. Interrelación de parametros criticos de una red de sensores heterogéneos inalámbricos.	42
2.2. Metodología de implementación de una red de sensores heterogéneos inalámbricos.	43
2.3. Algoritmo del modelo analítico de la capa física.	44
2.4. Algoritmo del modelo analítico de la capa MAC.	45
2.5. Propuesta de topología.	46
4.1. Potencia de la señal recibida en función de la potencia de transmisión y la distancia.	53
4.2. Relación Señal a Ruido en el receptor en función de la potencia de transmisión y la distancia.	54
4.3. Relación de energía de señal por bit a la densidad de potencia de ruido por Hertz EbNo, con una modulación O-QPSK y una tasa de transmisión de 250 kbps.	55

4.4. Relación de energía de señal por bit a la densidad de potencia de ruido por Hertz EbNo, con una modulación O-QPSK y diferentes tasas de transmisión. a) Con una potencia de transmisión de 0 dBm; b) Con una potencia de transmisión de 18 dBm.	56
4.5. Relación Portadora-Interferencia.	57
4.6. Tasa de Error de Bit (BER)	58
4.7. Tasa de Error de Bit (BER) con hasta 20 nodos sensores transmitiendo de forma simultánea y diferentes tasas de transmisión. a) Con una potencia de transmisión de 0dBm; b) Con una potencia de transmisión de 18dBm.	59
4.8. Tasa de Error de Bit (BER) con hasta 15 nodos sensores transmitiendo de forma simultánea y diferentes tasas de transmisión. a) Con una potencia de transmisión de 0dBm; b) Con una potencia de transmisión de 18dBm.	60
4.9. Tasa de Error por paquete PER, con 15 nodos sensores transmitiendo simultáneamente, con 127 bytes carga útil de y una tasa de transmisión de 250 kbps.	61
4.10. Tasa de Error por paquete PER, con 5 nodos sensores transmitiendo simultáneamente, con 127 bytes carga útil de y una tasa de transmisión de 250 kbps.	61
4.11. Tasa de Error por Paquete PER, con múltiples nodos sensores transmitiendo simultáneamente, diferentes carga útiles, diversas tasas de transmisión y una potencia de transmisión de 0 dBm.	63
4.12. Tasa de Error por Paquete PER, con múltiples nodos sensores transmitiendo simultáneamente, diferentes carga útiles, diversas tasas de transmisión y una potencia de transmisión de 18 dBm.	64
4.13. Probabilidad de que el Canal este Libre <i>P_{sens}</i>	65
4.14. Probabilidad de que el nodo sensor detecte libre el canal dos veces consecutivas, y pueda transmitir el paquete.	66
4.15. Probabilidad de que a) la transmisión sea exitosa; b) el paquete sufra una colisión.	67
4.16. Probabilidad de descartar el paquete.	68
4.17. <i>Throughput</i> de la red	68

Índice de tablas

1.1. Actividades del nodo sensor y del <i>Cluster Head</i>	32
2.1. Exponente (n) de pérdida de trayectoria para diferentes ambientes.	38

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la economía y la sociedad están cada vez más inmersas en la era digital, que se define por la convergencia de un conjunto de tecnologías emergentes cuya dinámica configura nuevos ecosistemas contruidos sobre la infrestructura y las innovaciones de la revolución digital. La velocidad del cambio, producto de la naturaleza exponencial de los avances tecnológicos, la gran permeabilidad de las tecnologías digitales en todos los sectores e industrias, y su profunda capacidad de transformación de sistemas completos de producción, gestión y gobernanza, agregan oportunidades e incertidumbres a la dinámica del desarrollo [1].

Parte de este desarrollo, son las **Redes de Sensores Inalámbricos** (WSN, por sus siglas en inglés), las cuales son una infraestructura compuesta por dispositivos de detección, computación y comunicación, los cuales obtienen y procesan datos para ayudar a comprender el comportamiento del entorno monitoreado y reaccionar a los eventos y fenómenos que ocurren en él [2]. Debido a su tamaño, costo-efectividad y la facilidad de implementación, las redes WSN se utilizan en diversos campos, como medicina, agricultura, meteorología, domótica, industria manufacturera, automóviles, por nombrar algunas. [3].

El mundo está experimentando un rápido crecimiento de la tecnología de sensores inalámbricos, debido a esto, se están integrando en casi todas partes. Según las estimaciones del mercado, el valor de los productos basados en sensores y las tecnologías relacionadas ha alcanzado los 124 mil millones de dólares en 2016 y se espera que crezcan 240 mil millones para 2022 [4], por lo que en los últimos años se ha visto un gran desarrollo e interés en la prestación eficiente de servicios y en una mejor utilización de los recursos en las redes WSN basadas en **Internet de las cosas** (IoT, por sus siglas en inglés) [5]. El IoT conecta una red de elementos físicos equipados con componentes electrónicos, sensores y actuadores, con software, que permite capturar, filtrar e intercambiar datos sobre sí mismos y su entorno a fin de generar información y conocimientos prácticos que se traduzcan en inteligencia para la toma de decisiones y la asignación de recursos [1].

Al combinar combinar capacidades de detección y procesamiento integradas con una infraestructura de comunicación inalámbrica, las redes WSN son esenciales para las próximas

aplicaciones de IoT. Por otra parte, la limitante de ancho de banda y energía de los nodos sensores, requieren un uso eficiente de los recursos de la red. [6].

Las redes WSN facilitarán muchas tareas difíciles pero también presentarán desafíos, de cobertura, de conectividad, de eficiencia energética y de vida útil de la red [7]. La energía es un requisito importante de las redes WSN para un mejor rendimiento, la capacidad de red y en el retraso en la entrega de datos [8]. Debido a esto, la prolongación de la vida útil de la red WSN, está estrechamente relacionada con el consumo de energía [9]. Los nodos sensores tienen una batería de baja capacidad lo que limita su desempeño en el procesamiento de información, y esta restricción de energía de la batería provoca que las redes WSN sean propensas a fallar [10]. Por otro lado, las variaciones espaciales y temporales en las actividades de los nodos sensores crean un desequilibrio energético en la red [11]. Otro factor importante, es el área de implementación, como es el caso de los nodos de sensores inalámbricos colocados en entornos hostiles, donde las condiciones cambian drásticamente, por lo que los nodos sufren cambios repentinos en la calidad del enlace y en su estado (*hardware*) . El retardo de extremo a extremo de cada nodo sensor cambia debido a la variación de la calidad del enlace y el estado del nodo. Por otro lado, los nodos sensores se suministran con energía limitada y es una gran preocupación extender la vida útil de la red [12].

Dado que las soluciones energéticas y espectrales son indispensables para el éxito de una red WSN, el diseño y desarrollo de energía y soluciones eficientes espectrales para una red WSN son muy desafiantes, principalmente debido a la implementación a gran escala de una gran cantidad de nodos sensores y dispositivos [13].

Un punto importante, es que a diferencia de las redes WSN homogéneas tradicionales, las redes WSN heterogéneas permiten la cooperación entre múltiples dispositivos heterogéneos dedicados a resolver diferentes tareas. Sin embargo, el diseño de redes WSN heterogéneas es muy desafiante y requiere de un diseño escalable que maximice el rendimiento de los dispositivos [14].

Agregado a lo anterior, el diseño de capas cruzadas se ha convertido en un área importante en las redes WSN, ya que permite la interacción entre diferentes capas y el intercambio de información entre ellas. El diseño de capas cruzadas se utiliza para mejorar el rendimiento de las arquitecturas existentes al utilizar las perspectivas flexibles de las capas de protocolo para mejorar el rendimiento del sistema y satisfacer las demandas de calidad de servicios de las aplicaciones. A la vez que aumenta la eficiencia de la red y el rendimiento optimizado de la misma [15].

OBJETIVOS

Objetivo General de Tesis

Desarrollar una metodología de análisis de parámetros de evaluación para una red de sensores heterogéneos inalámbricos, para disminuir los errores al implementar una red con estas características, y así demostrar los beneficios de una adecuada planificación y diseño.

Objetivos Particulares

1. Ofrecer estrategias de evaluación de redes de sensores heterogéneos inalámbricos, en función de los parámetros críticos de la aplicación.
2. Proponer una metodología de análisis compatible con Redes de Próxima Generación (NGNs, *Next Generation Networks*) para una red de sensores heterogéneos inalámbricos.
3. Identificar las restricciones que impone el caso de estudio sobre la implementación de una red de sensores heterogéneos inalámbricos, con miras hacia el Internet de las Cosas (IoT, *Internet of Things*).
4. Explorar áreas de oportunidad, crecimiento y desarrollo en el rubro de las redes de sensores heterogéneos inalámbricos aplicado a energías renovables y verdes e Internet de las Cosas.

Problemática e Hipótesis

Al momento de investigar las redes de sensores inalámbricas, se encontraron con varias problemáticas, las cuales se pueden resumir así:

1. Los modelos existentes de Redes de Sensores Inalámbricas (WSN), consideran a los nodos con características homogéneas.
2. Los resultados de dichos modelos subestiman o sobreestiman la red, teniendo como consecuencia una baja eficiencia.
3. Las redes WSN reales son Heterogéneas.
4. No existe una metodología general de análisis que considere la interrelación entre capas.

Por lo que para abordar estos problemas, se formuló la siguiente hipótesis:

La metodología propuesta permite crear un modelo que considere las características de heterogeneidad de la red. Esta metodología considera la interrelación de las capas de la arquitectura de una red de sensores inalámbricos, y es capaz de hacer una aproximación más exacta de las condiciones reales de la red, en forma suficientemente flexible para aplicarse a redes de próxima generación NGN e Internet de las Cosas IoT.

De lo anterior se desprenden dos preguntas de investigación a abordar:

1. ¿Es posible generar una metodología de análisis e implementación que considere la heterogeneidad de los nodos sensores para una red de sensores inalámbricos?
2. ¿La metodología de análisis e implementación será capaz de hacer una aproximación más exacta de las condiciones reales de una red de sensores inalámbricos con nodos sensores heterogéneos ?

Justificación e impacto

En la actualidad las redes WSN ya son parte de la sociedad, se encuentran en múltiples aplicaciones, pero no existe una metodología de análisis e implementación que ayude a entender como es la interrelación entre los parámetros críticos de dichas redes, y su variación dependiendo de la aplicación. Por lo que una de las contribuciones clave de este trabajo de investigación es generar una metodología que considere la interrelación entre capas del modelo OSI, para así apreciar como al variar ciertos parámetros, se ven afectadas todas las características de la red, pudiendo así prevenir y predecir posibles fallas al momento de la implementación.

Debido a que la metodología propuesta aporta una interrelación entre las capas de la arquitectura de red de las redes WSN, se vuelve flexible para múltiples aplicaciones, siempre y cuando los nodos sensores no se encuentren en movimiento.

Del mismo modo, la metodología propuesta está diseñada para que considere la heterogeneidad de los nodos sensores, a partir de distintas potencias de transmisión dependiendo de la distancia entre nodos sensores y viceversa, así como diferentes tamaños de los paquetes a transmitir y múltiples tasas de transmisión. Con esto se logra que el diseño y simulación de las redes WSN sean más aproximados a las características reales de la red, consiguiendo a la vez disminuir el porcentaje de error al momento de implementación, y teniendo como resultado un ahorro de tiempo y recursos. Ya que si se tiene un mal diseño de red, se pueden presentar problemas como por ejemplo, el no poder compartir de forma eficiente la información entre

los nodos sensores, provocando con esto la necesidad de que haya más de una retransmisión, lo que provocaría un mayor consumo de energía y una disminución del tiempo de vida útil del nodo sensor, afectando así todo el diseño de la redes WSN. Otro falla que se puede presentar, es una mala distribución de las redes WSN, lo que ocasionaría que hubieran zonas en el áreas de implementación sin cobertura y no se recopilaría la información completa. Por otro lado, pudiera presentarse el caso, que al realizar un mal diseño se tenga un exceso de dispositivos, originando con esto una sobrecarga de información, saturando al nodo coordinador, y por otro lado, aumentaría el costo de implementación.

Es por esto que, debido a la amplia variedad de aplicaciones de las redes WSN, se necesario que exista una metodología de análisis e implementación como la que aquí se propone.

Organización del documento

En el capítulo 1 se proporcionan los principios básicos de las redes de sensores inalámbricos, sus aplicaciones y su integración con otras redes y tecnologías. Se incluye también una explicación del estándar IEEE 802.15.4, y se presentan algunas de las métricas de las redes de sensores inalámbricos, que son Relación Señal a Ruido SNR (*Signal to Noise Ratio*, por sus siglas en inglés), Probabilidad de Transmisión, Probabilidad de Colisión, Probabilidad de Descartar Paquetes y *Throughput* (caudal de salida).

En el capítulo 2 se presenta la metodología de análisis e implementación propuesta, incluyendo los parámetros críticos y algoritmos para simular las capas Física, de Acceso al Medio (MAC) y de Red.

En el capítulo 3 se muestran los casos para las simulaciones empleadas en las redes de sensores inalámbricos, se presenta el modelo y las características de la red de sensores inalámbricos, así como el experimento del análisis de la capa física PHY y el experimento del análisis de la capa de acceso al medio MAC.

En el capítulo 4 se analizan los resultados.

Finalmente en el capítulo 5 se presentan las conclusiones y trabajo a futuro.

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1. Redes de Sensores Inalámbricos

1.1.1. Introducción

El desarrollo de los Sistemas Microelectromecánicos MEMS (por sus siglas en inglés, *Micro-electromechanical Systems*) junto con la comunicación y la electrónica digital, han permitido el desarrollo de nodos sensores inalámbricos de eficiencia energética, de tamaño pequeño y multifuncionales que proporcionan comunicación dentro de un rango específico [16]. En la actualidad, millones de estos dispositivos integrados (nodos sensores) se utilizan en diversas aplicaciones para mejorar la forma en que trabajamos y vivimos, creando así nuevas oportunidades para el crecimiento e innovación [17].

Por lo que los nodos sensores inalámbricos ahora son parte de nuestro entorno de vida, esto es debido a su tamaño reducido, su mínimo consumo de energía, sus bajos costos, su facilidad de implementación, su poco requerimiento de mantenimiento y su capacidad de operar en un ambientes hostiles sin requerir supervisión alguna [4].

Los nodos de sensores inalámbricos son dispositivos extremadamente pequeños y de baja potencia, que combinan la informática programable de propósito general con capacidad de detección múltiple y comunicación inalámbrica [18]. En una gran cantidad de escenarios, los nodos de sensores inalámbricos funcionan con baterías, lo que significa que tienen energía limitada y es necesario cambiarlos o reemplazarlos regularmente. Para reducir tales operaciones de mantenimiento, los nodos de sensores inalámbricos generalmente se diseñan con capacidad de cálculo restringido y memoria limitada, para de esta manera, mantener su consumo de energía a un nivel mínimo y así prolongar su vida útil [19].

Las **Redes de Sensores Inalámbricos WSN** (*Wireless Sensor Networks*, por sus siglas en inglés) consisten en una gran cantidad de nodos sensores compactos, de bajo costo, de baja potencia y versátiles que se comunican de forma inalámbrica en distancias cortas. En una red WSN, los nodos sensores generalmente se despliegan aleatoriamente en el campo de interés,

y se utilizan ampliamente para realizar tareas de supervisión y vigilancia. Dependiendo de los escenarios de aplicación específicos, las redes WSN pueden confiar en diversas métricas de rendimiento, en procesos de optimización de parámetros y funciones. La eficiencia energética y la vida útil de la red se encuentran entre las principales preocupaciones en las redes WSN, ya que los nodos sensores suelen funcionar con baterías, cuyo reemplazo suele ser difícil. Además, la cobertura de red, la latencia y la equidad entre los nodos sensores son importantes para mantener la calidad de servicio QoS (*Quality-of-Service*, por sus siglas en inglés). En la práctica, estas métricas a menudo entran en conflicto entre sí, por lo tanto, el equilibrio cuidadoso de las concesiones entre ellas es vital en términos de optimizar el rendimiento general de las redes WSN en aplicaciones reales [20].

Como se mencionó anteriormente, las redes WSN se componen de nodos sensores, los cuales tienen una pequeña batería, memoria, capacidad de procesamiento y potencia de transmisión. Estos nodos sensores se implementan para detectar, transmitir y retransmitir datos parcialmente procesados, trabajar de forma cooperativa y autoorganizada. Los datos detectados llegan al nodo receptor a través de una o más rutas de enrutamiento para entregar la información [21]. Los nodos sensores gastan energía al recopilar, analizar y transmitir información; dónde y cómo se colocan estos nodos sensores puede depender de las características ambientales y el acceso al entorno [22].

Las redes WSN han sido la opción preferida para el diseño e implementación de sistemas de control y supervisión (SCADA, por las siglas en inglés de *Supervisory Control And Data Acquisition*). Ahora es factible desplegar un gran número de nodos sensores de bajo costo para monitorear grandes regiones sobre la superficie del suelo, debajo del agua o en la atmósfera. Las redes WSN pueden operar durante períodos prolongados en hábitats hostiles, desafiantes o inaccesibles para las visitas humanas. Además, tienen el potencial de proporcionar una gran cantidad de datos sobre el entorno en el que se implementan y entregar los datos a través de la red a los usuarios finales [23].

La Figura 1.1 muestra una red WSN típica que comprende varios nodos sensores y un nodo receptor. Los nodos sensores detectan continuamente los datos del entorno y los envían al nodo receptor. En la mayoría de los escenarios, de decenas a miles de estos nodos sensores se distribuyen a lo largo de una región de interés, donde se autoorganizan en una red a través de la comunicación inalámbrica y colaboran entre sí para lograr una tarea común. El receptor recibe todos los datos detectados de estos nodos sensores, los procesa y los envía al usuario final [23].

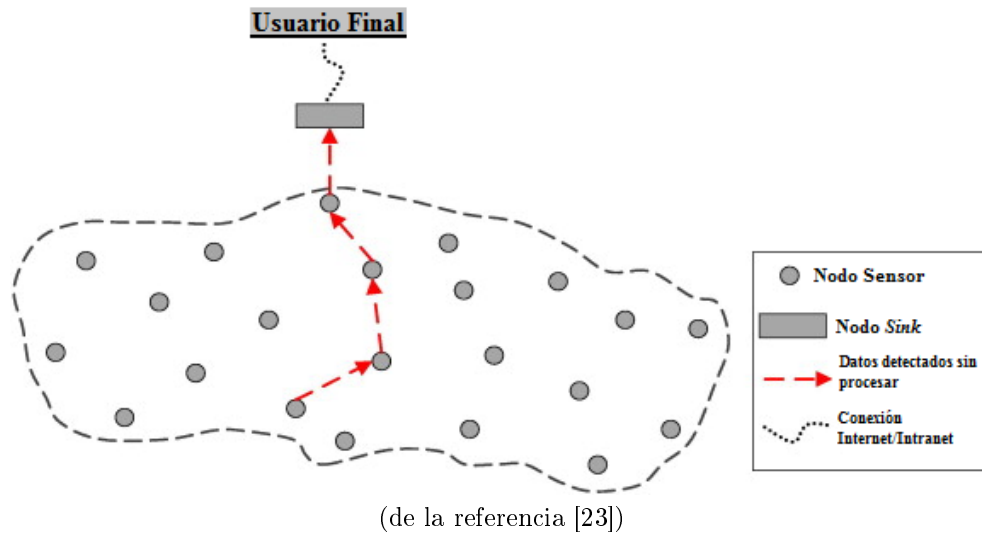


Figura 1.1.: Red de Sensores Inalámbricos.

1.1.2. Aplicaciones de las Redes de Sensores Inalámbricos

Las redes WSN tienen numerosas aplicaciones que van desde vigilancia militar, monitoreo industrial, telemetría médica y monitoreo ambiental. Estas aplicaciones tienen requisitos operativos diferentes, por lo que las redes WSN tienden a adoptar diferentes arquitecturas. Por ejemplo, para la vigilancia militar, los requisitos más importantes incluyen gran ancho de banda, alta seguridad y buena cobertura. En el caso de las aplicaciones de monitoreo industrial estas requieren seguridad, confiabilidad, robustez y monitoreo en tiempo real. Las aplicaciones médicas a menudo ponen más énfasis en la seguridad y la confiabilidad de la red, y el monitoreo ambiental generalmente requiere nodos robustos, energéticamente eficientes y autónomos [24].

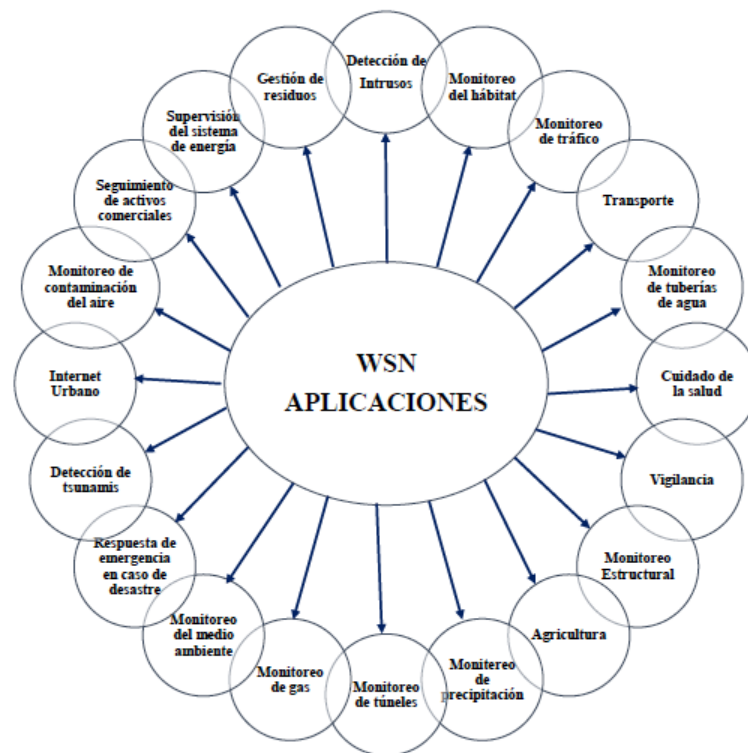
Las aplicaciones y beneficios de las redes WSN son significativos, desde la seguridad y la protección, el ahorro de recursos naturales, la conservación de la energía en los electrodomésticos y la facilidad de uso en la electrónica de consumo, por mencionar algunos [4].

En general, las aplicaciones de una red WSN se pueden clasificar en dos tipos: monitoreo y seguimiento. El monitoreo se usa para analizar, supervisar y controlar cuidadosamente el funcionamiento de un sistema en tiempo real. El seguimiento generalmente se usa para seguir el cambio de un evento, una persona, un animal, etc. Las aplicaciones de monitoreo existentes incluyen monitoreo ambiental interior/externo, monitoreo industrial, agricultura de precisión (por ejemplo, gestión de riego y predicción de enfermedades de cultivos), monitoreo biomédico o de salud, monitoreo de redes eléctricas, monitoreo de ubicación militar, y más. Las aplicaciones de seguimiento incluyen el seguimiento del hábitat, el seguimiento del tráfico, el

seguimiento del objetivo militar, etc [20].

Además, varios escenarios novedosos de aplicaciones de redes WSN, como **Internet de las Cosas IoT** (*Internet of Things*, por sus siglas en inglés), sistemas ciber-físicos (*cyber-physical systems*, CPS por sus siglas en inglés) y redes y ciudades inteligentes, entre otros, han adoptado nuevos enfoques de diseño que admiten múltiples aplicaciones simultáneas en la misma red WSN [20].

Debido al bajo costo, la flexibilidad, la alta fidelidad, la autoorganización, la implementación rápida, las redes WSN se están aplicando en varios campos, los cuales se muestran en la Figura 1.2 [25].



(de la referencia [25])

Figura 1.2.: Varias aplicaciones de las Redes de Sensores Inalámbricos (WSN) .

1.1.2.1. Estilo de Vida

Se anticipa que las personas próximamente podrán llevar consigo una red de área corporal personal BAN (*body area network*, por sus siglas en inglés) que proporcionará a los usuarios información y diversas capacidades de informes para fines médicos, de vida asistida, deportes o entretenimiento. La Nintendo Wii es un claro ejemplo del uso de sensores inalámbricos

para aplicaciones de juegos. En el área de deportes, Adidas emplea las redes WSN para el seguimiento de la salud y el estado físico de los atletas [26].

1.1.2.2. Aplicaciones de Salud

Los sensores conectados en red de forma inalámbrica permiten un denso muestreo espacio-temporal de los procesos físicos, fisiológicos, psicológicos, cognitivos y conductuales en espacios que van desde los personales hasta los edificios, incluso los de mayor escala. Algunas de las aplicaciones de atención médica habilitadas por estas tecnologías son el monitoreo en desastres masivos de víctimas, la vigilancia de signos vitales en hospitales y estudios médicos y de comportamiento a gran escala en el campo [27].

1.1.2.3. Industria Automotriz

La industria automotriz tiene un interés significativo en sistemas de sensores inalámbricos miniaturizados para aplicaciones de seguridad y control. Cada día se incorporarán más y más sensores en los automóviles. Los sistemas de monitoreo de presión de neumáticos son ejemplos de redes WSN utilizadas para la seguridad [26].

1.1.2.4. Redes Inteligentes (*Smart Grid*)

En redes inteligentes, las redes WSN se pueden utilizar para el monitoreo remoto de granjas eólicas o solares, monitoreo de calidad de energía, diagnóstico de fallas del equipo, monitoreo de sistema de cable subterráneo, control de animales y vegetación, gestión de energía residencial, automatización de edificios, entre otros[28].

1.1.2.5. Monitoreo de tráfico.

Con las redes WSN será posible monitorear el tráfico vehicular en las grandes ciudades o autopistas y desplegar servicios que ofrezcan recomendaciones de rutas de tráfico para evitar la congestión. También se podrá monitorear el flujo de tráfico vehicular en las carreteras y recuperar información agregada, como velocidad promedio y número de autos [29].

Las redes WSN se están implementando en una variedad de aplicaciones en todo el sistema de transporte, como en el monitoreo de tráfico urbano, aplicaciones de redes *ad-hoc* vehicular VANET (*Vehicular ad hoc networks*, por sus siglas en inglés), aplicaciones en el camino (carretera, vialidades), aplicaciones de asistencia para estacionamientos, y supervisión del túnel ferroviario subterráneo [30].

1.1.2.6. Monitoreo Industrial

Para el caso de la industria, hay una amplia variedad de aplicaciones, por ejemplo, monitoreo de gas, monitoreo estructural, monitoreo de maquinaria y equipo, monitoreo de condiciones ambientales de la planta (temperatura, humedad), entre otras [30].

1.1.2.7. Monitoreo Ambiental

Las redes WSN se puede utilizar para una amplia clase de aplicaciones de monitoreo ambiental a largo plazo, como el caso de niveles de agua para lagos, arroyos, aguas residuales; concentración de gas en el aire para ciudades, laboratorios, depósitos; la humedad del suelo y otras características; la inclinación para estructuras estáticas (por ejemplo, puentes, presas); cambios de posición, por ejemplo, para deslizamientos de tierra; condiciones de iluminación como parte de una detección combinada o independiente, por ejemplo, para detectar intrusiones en lugares oscuros; la radiación infrarroja para el calor (fuego) o la detección de animales [31]. Así como el monitoreo de contaminación del aire, la vigilancia de temperatura urbana, el monitoreo de desechos sólidos, y monitoreo de precipitación [30].

1.1.2.8. Monitoreo Áreas Urbana

El despliegue de redes WSN en un entorno urbano ha ganado tanta popularidad, que se emplean para el monitoreo de rendimiento del sistema de distribución eléctrica, monitoreo de macetas, aplicaciones de transporte, y monitoreo de desastres, emergencias y aplicaciones de seguridad en áreas urbanas, por ejemplo la detección y respuesta al tsunami, la respuesta de emergencia en caso de desastre y ladetección de intrusos [30].

1.1.2.9. Industria 4.0

La industria 4.0 ha atraído un creciente interés recientemente por parte de investigadores, gobiernos, fabricantes y desarrolladores de aplicaciones, ya que puede ofrecer una reducción del consumo de energía, aumentar los beneficios económicos y permitir una producción inteligente [32].

Las redes WSN son una forma importante y efectiva de mejorar la flexibilidad, la productividad y la creación de redes de un sistema industrial al proporcionar mayor movilidad, inteligencia y adaptación. Las redes WSN son una tecnología prometedora que jugará un papel cada vez más importante en la próxima generación de sistemas industriales para la Industria 4.0 [32].

El objetivo de la Industria 4.0 es conectar e integrar las industrias tradicionales, particularmente la manufactura, para lograr flexibilidad, adaptabilidad y eficiencia, y así aumentar la comunicación efectiva entre productores y consumidores. La industria 4.0 se refiere a la cooperación entre diferentes fábricas que generalmente están ubicadas en diferentes lugares remotos. Por lo tanto, las comunicaciones y las redes WSN desempeñan un papel importante en la Industria 4.0 [32].

1.1.2.10. Ciudades Inteligentes

Las nuevas tecnologías de la información, por ejemplo IoT, están transformando las ciudades al mejorar la infraestructura, crear servicios municipales más eficientes y rentables, mejorar el transporte público, reducir la congestión del tráfico, y así mantener a los ciudadanos seguros y más comprometidos con la comunidad. Para lograr lo anterior, las redes WSN son un elemento importante. Mediante el uso de nodos sensores, toda la infraestructura física está estrechamente unida a las tecnologías de la información y la comunicación; donde el monitoreo y la administración inteligentes pueden lograrse a través del uso de dispositivos integrados en red [33].

1.1.3. Integración de las Redes de Sensores Inalámbricos con otras redes y tecnologías.

En un inicio las redes WSN se utilizaban en aplicaciones en tiempo no real donde la calidad de servicio (QoS) no era prioridad; sin embargo, en la actualidad las redes WSN empiezan ya a implementarse en aplicaciones en tiempo real, donde se busca una mayor QoS para proporcionar la latencia deseada, confiabilidad, consumo de energía y rendimiento [16]. Motivo por el cual, los sensores necesitan integrarse con otras redes y tecnologías, como redes celulares, WiFi, computación en la nube, nanotecnología, etc. para ampliar sus capacidades [4].

1.1.3.1. Redes de Sensores Inalámbricos - Redes Celulares

El éxito de las redes WSN se debe a varias razones, incluida la falta de requisitos de infraestructura, así como su capacidad para operar en varios escenarios de aplicación. A pesar del éxito y el auspicioso futuro de estas redes, la conectividad a Internet sigue siendo un desafío crítico. Una de las posibles soluciones es utilizar la interfaz aérea celular como una extensión de las redes de sensores, lo que lleva a mejoras en su capacidad y cobertura. Otro problema común que enfrentan las redes WSN son el agotamiento de la energía de los nodos sensores.

En caso de falla de estos nodos, la cobertura y conectividad de una red WSN se ve afectada. Para manejar esto, la red celular puede introducirse como un enlace troncal para admitir la conectividad del sensor inalámbrico que, en última instancia, ayuda a mejorar la eficiencia energética de la red. Los terminales celulares tienen la capacidad de múltiples transceptores de radio para interactuar con los nodos sensores que permiten recolectar y procesar los datos del sensor. Esta nueva arquitectura amplía la vida de la red al distribuir las tareas para proporcionar un sistema de administración escalable [4].

La comunicación celular tiene la ventaja de ser una tecnología madura con un amplio rango de cobertura y largas distancias de comunicación, especialmente teniendo en cuenta las zonas rurales. La red WSN resultante podrá cubrir grandes áreas y ofrecer una verdadera monitorización remota con alta precisión de detección [4].

1.1.3.2. Redes de Sensores Inalámbricos - Cómputo en la nube

Incluso con todo su éxito, las redes WSN enfrentan algunos problemas serios, como limitaciones de recursos, pequeño ancho de banda y un rango de comunicación limitado. Para continuar el camino del éxito, necesitan un cómputo poderoso y altamente escalable, recursos de almacenamiento más grandes e instalaciones de procesamiento en tiempo real para analizar y extraer los eventos de interés de los datos recuperados. Para este propósito, la computación en la nube ofrece una solución prometedora al proporcionar computación y almacenamiento masivos, análisis global de los datos recuperados, lo que es más importante de manera virtualizada a un costo accesible, simplemente con la modalidad "pague mientras usa". Se usa una gran cantidad y variedad de sensores para diversas aplicaciones en todo el mundo. Para esto, la combinación de sensor-nube puede ayudar a recopilar y procesar información de varias redes de sensores implementadas en diferentes ubicaciones y permite compartirla a gran escala entre múltiples usuarios de la nube. La computación en la nube ofrece acceso a través de servidores virtuales sin preocuparse por la ubicación del servidor o su especificación exacta. La integración de sensores inalámbricos y computación en la nube significaba superar las limitaciones de recursos, además, permite conectar diferentes redes que trabajan en diferentes ubicaciones geográficas y compartir la información entre múltiples usuarios al mismo tiempo o cuando lo requieran [4].

La computación en la nube ofrece la posibilidad de acceso bajo demanda a un grupo compartido de recursos, mientras que la integración con sensores inalámbricos puede proporcionar una plataforma flexible y reconfigurable. Esta nueva combinación abre muchas oportunidades para diversas aplicaciones, especialmente para la supervisión del transporte, el pronóstico del tiempo y la vigilancia de desastres. El potencial de recuperación de datos en tales aplicaciones

es muy alto, pero debido a las limitaciones de recursos no puede ser recibido y almacenado en una ubicación central durante largos períodos. En muchos casos, los operadores simplemente borran los datos recopilados cuando ya no están en uso. Sin embargo, para obtener un uso adecuado, debe almacenarse y analizarse para cumplir con los requisitos futuros. Aplicaciones como la red inteligente, el hogar inteligente y el transporte inteligente son capaces de generar enormes volúmenes de datos que tienen el potencial de servir para muchos propósitos. Una vez que los datos se cargan en el almacenamiento en la nube, incluso de diferentes tipos, otros clientes que tienen intereses similares pueden acceder a los mismos datos eliminando el requisito de almacenamiento de datos en múltiples ubicaciones [4].

1.1.3.3. Redes de Sensores Inalámbricos - Nanotecnología

Las características como la alta fidelidad de detección y el menor costo de fabricación de los sensores inalámbricos crean varias aplicaciones nuevas y emocionantes para la detección remota. Sin embargo, estas redes deben satisfacer muchas restricciones críticas, como el consumo de energía, el tamaño del nodo con sus limitaciones y los protocolos de transmisión. Se muestra un gran interés por parte de los investigadores para desarrollar e implementar sensores capacitados en nanotecnología, donde ofrecen soluciones más apropiadas para desarrollar redes de sensores factibles y de gran escala [4].

El nanosensor puede ser un nodo químico, biológico o quirúrgico utilizado para controlar y transferir información sobre nanopartículas durante la monitorización o evaluación. Los sensores habilitados con nanotecnología son considerados mejores que los convencionales en términos de sensibilidad de detección mejorada, costo de producción, consumo de energía, tamaño de nodo y portabilidad [4].

1.1.3.4. Redes de Sensores Inalámbricos - WiFi

Como la tecnología WiFi no fue diseñada para la eficiencia energética, no se ha considerado una buena opción para aplicaciones de detección inalámbrica de baja potencia. Por lo que protocolos de eficiencia energética como Zigbee y Bluetooth, siguen siendo comunes para las redes WSN. Recientemente varios fabricantes han desarrollado componentes WiFi energéticamente eficientes con características como la fácil integración con la infraestructura existente, protocolos familiares y antecedentes de gestión, como compatibilidad con redes IP, etc. [4].

Comparando con otras tecnologías energéticamente eficientes como Zigbee, las redes WSN basadas en WiFi tienen varios beneficios. En primer lugar, la tecnología WiFi admite velocidades de datos y rendimiento superiores, incluso hasta 300 Mbps. Mientras que, la transmisión

de datos de Zigbee se enfrenta a una tasa de datos más baja, ya que permanece alrededor de 10-250 Kbps. Por lo tanto, la transmisión WiFi se considera más eficiente, ya que no solo enfrenta menos retraso sino que también es capaz de funcionar sin complejos algoritmos de programación cada vez que se produce una congestión. En segundo lugar, WiFi admite transmisión sin línea de vista (NLOS, por sus siglas en inglés), incluso tiene la capacidad de transmitir datos a través de objetos físicos como la pared. Mientras, los oponentes enfrentan estos dos problemas como la falta de transmisión de NLOS y la comunicación débil a través de los obstáculos físicos. En tercer lugar, la tecnología WiFi es superior a Zigbee debido a su cobertura más amplia, ya que puede trabajar hasta 300 metros al aire libre el mismo tiempo admite 100 metros de barreras en interiores. Por otro lado, las ondas Zigbee proporcionan una menor cobertura como distancia de transmisión de soporte de 10-75 metros, que disminuye aún más al pasar a través de obstáculos y paredes. Otra ventaja de elegir WiFi basado en redes WSN es el costo y la facilidad de expansión. Actualmente, las redes WiFi están disponibles en muchos edificios inteligentes; lo que resulta en un costo de hardware significativamente menor si la red de sensores se basa en los recursos WiFi existentes, lo que en última instancia reduce el ciclo de desarrollo con el costo del proyecto. Además, no es necesario tener en cuenta los problemas de interoperabilidad, que son comunes para los dispositivos Zigbee, ya que es difícil interactuar y administrar cuando crece la escala de la red [4].

1.1.3.5. Redes de Sensores Inalámbricos - RFID

La identificación por radiofrecuencia RFID (*Radio Frequency Identification*, por sus siglas en inglés) y las redes de sensores inalámbricos son dos tecnologías inalámbricas importantes que tienen una amplia variedad de aplicaciones en sistemas actuales y futuros. RFID facilita la detección e identificación de objetos que no son fácilmente detectables o distinguibles mediante el uso de tecnologías de sensores convencionales. Sin embargo, no proporciona información sobre la condición de los objetos que detecta. Las redes WSN, por otro lado, no solo proporciona información sobre la condición de los objetos y el entorno, sino que también permite las comunicaciones inalámbricas multisalto. Por lo tanto, la integración de estas tecnologías amplía su funcionalidad y capacidades generales [34].

Se pueden definir varios escenarios de diferentes aplicaciones para combinar RFID y redes WSN, incluidos [34]:

- La integración en la que se usa RFID para identificar y redes WSN se usa para detectar.
- Integración en la que tanto la RFID como los sensores se utilizan para identificar objetos o personas.

- La integración en la que se utiliza una red WSN para proporcionar ubicación y RFID se usa para identificar objetos o personas o para ayudar con el posicionamiento que se realiza mediante sensores.
- La integración en la que se utiliza una red WSN para proporcionar comunicaciones multisalto y RFID se usa para identificar y rastrear objetos o personas en una red de atención médica para ancianos.

Es importante conocer los principios básicos de las redes WSN, para así saber como se forma la red, los diferentes tipos de nodos sensores que existen y cual es su función.

1.1.4. Fundamentos de las Redes de Sensores Inalámbricos.

En la Figura 1.3 se presenta una idea general de una red WSN, la cual tiene un conjunto de nodos destino, nodos sensores y un nodo receptor único (también conocido como nodo *sink* o sumidero). Los objetivos son ubicaciones físicas dentro del entorno donde se originan las condiciones de interés. La información encontrada en estos objetivos debe ser monitoreada y recuperada por un nodo sensor. Tras la recuperación, los nodos sensores tienen la tarea de enviar estos datos al nodo *sink* para su recolección y procesamiento. El nodo *sink* agrega y procesa la información recuperada por los nodos sensores. Los nodos sensores pueden transmitir datos directamente al nodo *sink*, como se muestra en la Figura 1.3a. Alternativamente, los nodos sensores pueden transmitir datos al nodo *sink* a través de la comunicación de multi-saltos, donde los nodos sensores re-transmiten datos a través de los nodos sensores vecinos que se dirigen al nodo *sink*, como se muestra en la Figura 1.3b [22].

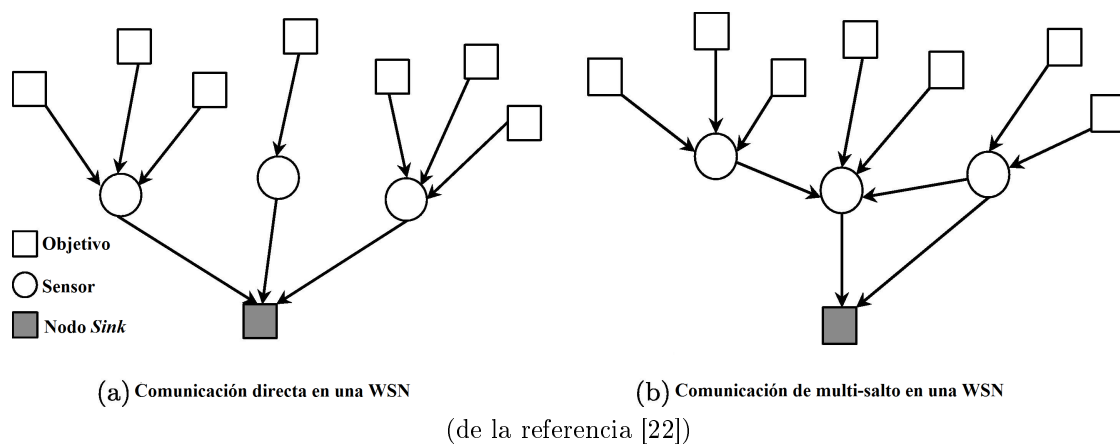


Figura 1.3.: Enrutamiento en una Red de Sensores Inalámbricos.

Las redes WSN son redes sin infraestructura, que se componen de cientos de nodos sensores, los cuales detectan y controlan de forma cooperativa el entorno para permitir su interacción

con personas o dispositivos [17].

Cada nodo sensor generalmente está equipado con una unidad de sensado, un procesador, un transceptor de radio, un convertidor analógico-digital, una unidad de memoria y una fuente de alimentación (batería). La arquitectura típica de un nodo de red WSN se ilustra en la Figura 1.4. Uno de los grandes desafíos a los que se enfrentan las redes WSN es utilizar dichos nodos sensores con recursos limitados para cumplir con ciertos requisitos de la aplicación, incluida la detección de cobertura, el tiempo de vida de la red y la demora de extremo a extremo [20].

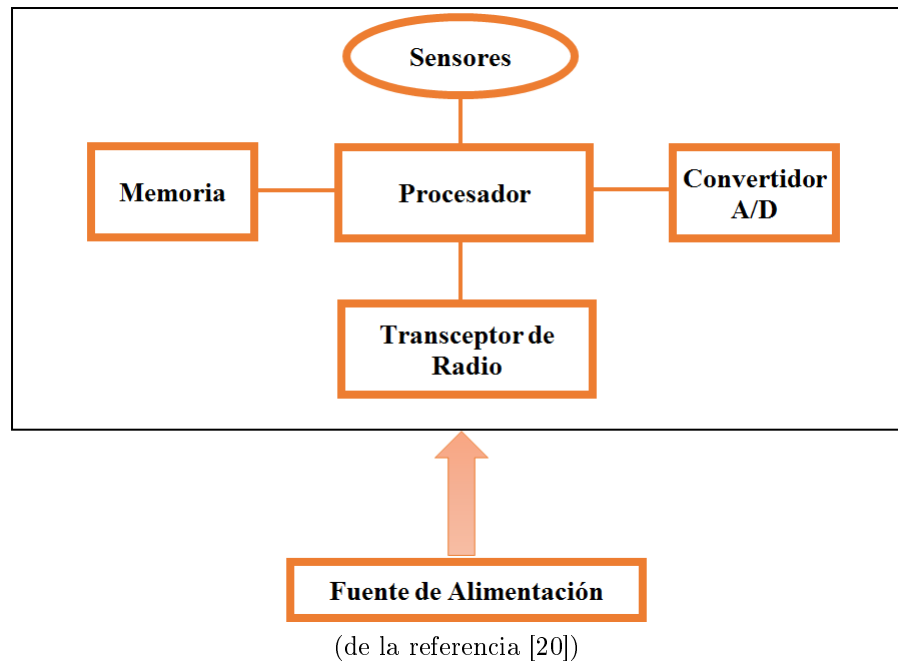


Figura 1.4.: Arquitectura típica de un nodo sensor de una Red de Sensores Inalámbricos.

Los nodos sensores están conectados entre sí a través de enlaces inalámbricos y trabajan juntos para recopilar grandes cantidades de información sobre diferentes ubicaciones, procesar y transmitir dichos datos a nodos pasarela (*gateway nodes*, por sus siglas en inglés) también conocidos como *sink points* [35].

Hay varias características que diferencian a las redes WSN de las redes cableadas, las cuales se explican a continuación [17]:

1. *Autoorganización*: Las redes WSN no tienen una estructura fija y las posiciones de los nodos sensores son aleatorias. Cualquier falla en la red debe ser neutralizada a través del mecanismo de autoorganización para permitir que los nodos descubran a sus vecinos y restablecer la comunicación.

2. *Control de flujo autoadaptable*: En función de la calidad del enlace y la cantidad de errores de transmisión, el flujo de transmisión se ajusta para resolver la degradación del rendimiento de la red en condiciones de transmisión inestables.
3. *Restricciones de recursos*: Las capacidades de procesamiento, la capacidad de almacenamiento y el ancho de banda de comunicación son limitados.
4. *Control centralizado*: Los nodos sensores se controlan de forma central y los datos fluyen entre los nodos de acuerdo con las reglas del algoritmo de enrutamiento aplicado.

Las redes WSN tienen cientos o miles de nodos distribuidos en un área geográfica. Estos nodos tienen la capacidad de autoorganización para realizar actividades de recopilación de datos. Esta autoorganización de nodos conduce a una red dinámica, con nodos que también realizan actividades de retransmisión para sus vecinos [36].

Las redes WSN no tienen ningún soporte de infraestructura; por lo tanto, necesitan tener la capacidad de autorreparación y autoorganización. Toda la red no debería *venirse abajo* en presencia de unos pocos nodos comprometidos [36].

En lo referente a las redes WSN, típicamente emplean arquitectura estratificada que generalmente consta de cinco capas, en la Figura 1.5 se muestran junto con los problemas abordados por cada capa [17].

CAPA DE APLICACIÓN	Agregación de Datos, Interacción con el usuario final
CAPA DE TRANSPORTE	Transporte confiable de datos
CAPA DE RED	Enrutamiento, administración de la red, topología de red
CAPA DE ENLACE DE DATOS	Acceso al medio y control del error, detección de la trama de datos, multiplexación
CAPA DE FÍSICA	Modulación, selección de frecuencia y canal, procesamiento de la señal.

(de la referencia [17])

Figura 1.5.: Arquitectura en capas de una Red de Sensores Inalámbricos.

Tal como se ha mencionado, las redes WSN están conformadas por nodos que contienen sensores y transmisores embebidos, con capacidad para monitorear y reaccionar en el ambiente donde operan. La lógica embebida también permite el control remoto, y proporciona la oportunidad para vigilar y analizar fuentes de datos con información constante, lo cual repercute en el manejo y búsqueda de datos en tiempo real. En ese sentido, desde el año 2003 el estándar IEEE 802.15.4 ha sido el estándar más empleado en las redes WSN.

1.2. IEEE 802.15.4.

La última década ha sido testigo de la proliferación del estándar IEEE 802.15.4 empleado en las redes WSN con una multitud de aplicaciones y servicios domésticos, médicos e industriales. Debido a las diversas aplicaciones globales para las redes WSN, las bandas de radio Industrial, Científica y Médica ISM (*Industrial, Scientific, and Medical*, por sus siglas en inglés) se han seleccionado para la operación del estándar IEEE 802.15.4 [37].

El estándar IEEE 802.15.4 se introdujo en 2003 para ser utilizado en Redes Inalámbricas de Área Personal WPANs (*Wireless Personal Area Network*, por sus siglas en inglés). Existen tres revisiones posteriores (2006, 2011, 2015), por lo que el estándar IEEE 802.15.4 hasta el 2016 es el estándar con el mayor impacto en la conexión inalámbrica de baja potencia en general [38].

El estándar IEEE 802.15.4 solo se enfoca en las capas física PHY y la capa secundaria Control de acceso (MAC), mientras que capas superiores (desde la red hasta la aplicación) están definidas por múltiples estándares, incluidos ZigBee, 6LoWPAN, ISA100 o WirelessHART [39].

Como se mencionó en el párrafo anterior el estándar IEEE 802.15.4 es un estándar de tecnología de radio que define las capas PHY y MAC para comunicaciones de baja potencia y baja velocidad de datos. Debido a su bajo consumo de energía, bajo costo y flexibilidad, se ha utilizado en muchas aplicaciones industriales, pero también en otros campos, como el monitoreo de la salud, el sistema de administración de energía inteligente en el hogar [17].

La capa PHY-IEEE 802.15.4 es responsable de la transmisión de datos, la selección de canales, la gestión de la energía y la modulación de la señal. La subcapa MAC se basa en la capa PHY para regular el acceso al medio inalámbrico para enviar y recibir tramas, con el objetivo de minimizar la ocurrencia de colisiones. La capa MAC es capaz de transmisión de trama básica, así como de señalización compleja y sincronización de nodos. En términos de formato de trama, esta capa recibe un paquete de la capa superior y agrega un encabezado, llamado encabezado MAC, necesario para regular las comunicaciones de un solo salto [39].

1.2.1. Capa Física

El estándar IEEE 802.15.4 admite 11 canales en banda de baja frecuencia (868/915 MHz) y 16 canales en la banda de radio industrial, científica y médica de alta frecuencia (2.4 GHz). Con el fin de lograr menos interferencia a lo largo de las bandas de frecuencia con una relación señal a ruido mejorada, la norma emplea diferentes técnicas de modulación [17].

La capa física es responsable de las siguientes tareas [40]:

- **Activación y Desactivación del Transceptor de Radio.** En lo que respecta al envío de información, se consideran tres funciones que son transmitir, recibir y modo apagado (dormido). El tiempo de respuesta entre transmisor y receptor (viceversa) no debe ser mayor a 12 períodos de símbolos. Un **período de símbolo** es la duración de un símbolo $T_S = 1/R_S$, donde R_S es la tasa de símbolo.
- **Detección de Energía dentro del Canal Actual.** Es una estimación de la potencia de la señal recibida en el ancho de banda de un canal IEEE 802.15.4. El resultado de la detección de energía puede ser utilizada por la capa de red como parte del algoritmo de selección de canal, o con el propósito de la evaluación de canal libre (CCA, *Clear Channel Assessment*, por sus siglas en inglés).
- **Indicador de la Calidad del Enlace (LQI) para los paquetes recibidos.** El indicador de la Calidad del Enlace se realiza para cada paquete recibido. Se puede utilizar la detección de energía en el receptor o la relación señal a ruido.
- **Selección de la Frecuencia de Canal.**
- **Transmisión y Recepción de Datos.**

La capa PHY define los estados del dispositivo, que pueden ser transmitiendo, recibiendo o dormido, con un tiempo máximo de 12 períodos de símbolo para pasar de un estado a otro [40].

1.2.2. Capa de Acceso al Medio

El estándar IEEE 802.15.4 administra el acceso a canales físicos y ranuras de tiempo, detección de tramas y asociación de nodos, y utiliza el acceso múltiple de detección de portadora con prevención de colisiones CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*, por sus siglas en inglés). Tiene dos modos de acceso a los canales y define diferentes tipos de dispositivos, lo que brinda la posibilidad de tener diferentes topologías de red (estrella, punto a punto y clúster) [17].

La Figura 1.6 representa la estructura de trama IEEE 802.15.4. La trama PHY contiene un encabezado de sincronización que consiste en un preámbulo, el inicio del delimitador de trama para indicar el inicio de un paquete que llega, y el encabezado PHY (PHR, *PHY header*) para indicar la longitud de la carga útil. Estos son seguidos por la carga útil de máximo 127 bytes. La trama MAC incluye el encabezado (campo de control, número de secuencia y dirección), la carga útil de la secuencia de tamaño variable y verificación de trama (FCS) utilizada para

verificar la integridad de la trama. El tamaño de la trama MAC completo debe ser inferior a 127 bytes para satisfacer la restricción de tamaño de la capa física [17].

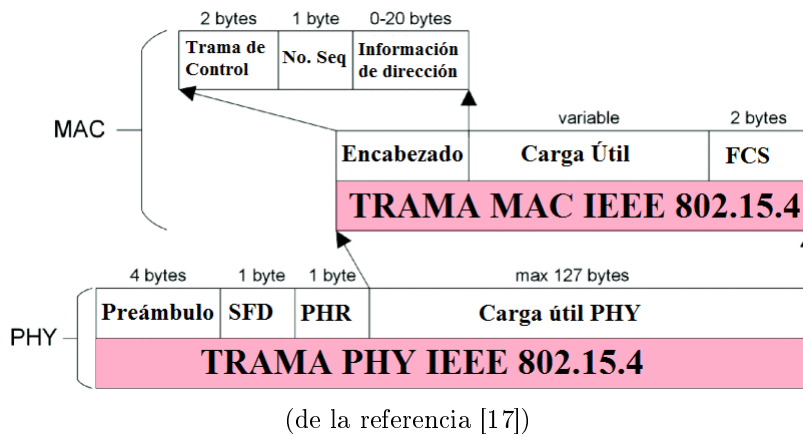


Figura 1.6.: Trama del estándar IEEE 802.15.4 típica para una red de 2.4 GHz.

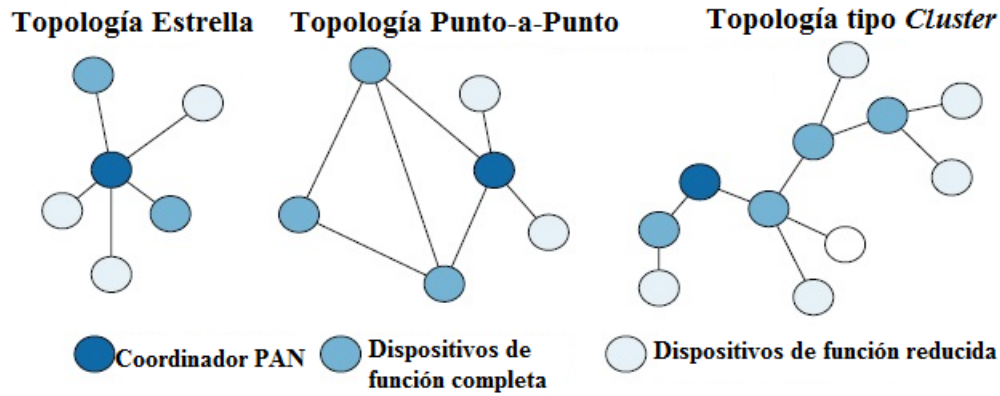
La capa MAC es responsable de las siguientes tareas [40]:

- **Generación de balizas si el dispositivo es un coordinador.** En el modo de *Baliza Activado* se utiliza la Estructura de Supertrama (más adelante se explicará este concepto). Una Supertrama está delimitada por balizas de red y se divide en *aNumSuperframeSlots* (por defecto es 16) ranuras de igual tamaño.
- **Sincronización de balizas.**
- **Apoyo en la asociación y disociación de la Red de Área Personal (PAN, *Personal Area Network*, por sus siglas en inglés).**
- **Uso del Mecanismo CSMA/CA para acceso al canal.**
- **Manipulación y mantenimiento del mecanismo (Ranura de Tiempo Garantizado GTS, *Guaranteed Time Slot*, por sus siglas en inglés).**

1.2.2.1. Topología de la capa de enlace

En una red del estándar IEEE 802.15.4, los dispositivos son administrados por un controlador conocido como el coordinador de red de área personal (PAN) (o *sink*). El estándar define dos tipos de topologías de red, estrella y punto-a-punto, ambas ilustradas en la Figura 1.7 [38].

En una topología tipo estrella, todos los dispositivos se comunican solo con el coordinador PAN en un solo salto. Mientras que los dispositivos pueden funcionar con baterías, el coordinador PAN generalmente está alimentado por la red, ya que necesita mantener su radio encendida todo el tiempo [38].



(de la referencia [38])

Figura 1.7.: Ejemplo de topologías de red del estándar IEEE 802.15.4 .

En una topología punto-a-punto, la comunicación no está restringida al coordinador PAN. A diferencia de una topología estrella, los dispositivos se comunican entre sí, lo que permite la conectividad de múltiples saltos. El inconveniente de la topología punto-a-punto es que un nodo siempre debe permanecer despierto, ya que puede recibir un paquete de un vecino en cualquier momento. Una tercera topología, llamada *clúster*, puede usarse para superar esto; en ella, un árbol enraizado en el coordinador PAN organiza los períodos de descanso de los diferentes nodos enrutadores para permitir la comunicación de varios saltos con ahorro de energía [38].

El modelo de red permite la participación de dos dispositivos diferentes en la red: dispositivo de función completa (*full-function device* FFD, por sus siglas en inglés) y dispositivos de función reducida (*reduced function devices* RFD, por sus siglas en inglés) que corresponden a un *cluster head* rico en recursos y un nodo sensor respectivamente. El dispositivo RFD sirve y se asocia con un dispositivo FFD para crear una red (Figura 1.7). El dispositivo de función completa o el coordinador PAN sincroniza la red e integra los dispositivos en dicha red. Por lo tanto, un dispositivo FFD también puede asumir el papel de un coordinador de PAN [36].

La comunicación puede ser, FFD a FFD, FFD a RFD, RFD a FFD, entre dispositivos RFD no puede haber comunicación. La transferencia de datos puede ser, dispositivo a coordinador, coordinador a dispositivo y punto a punto (Red) [40].

1.2.2.2. Acceso al Medio.

En el estándar IEEE 802.15.4, el acceso al medio se puede hacer en modo asincrónico (sin baliza) o síncrono (con baliza) [38].

En el modo sin baliza, los nodos usan un acceso múltiple sin detección de portadora con

prevención de colisión (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance* CSMA/CA, por sus siglas en inglés), sin intercambiar mensajes de solicitud de envío (*request-to-send* RTS, por sus siglas en inglés) y claro para enviar (*clear-to-send* CTS, por sus siglas en inglés). En una topología multisalto, todos los nodos de enrutamiento deben permanecer despiertos para poder recibir paquetes, que pueden enviarse en cualquier momento. El muestreo de preámbulo puede reducir el consumo de energía: el nodo transmisor envía previamente un preámbulo largo (una serie de bytes bien conocidos) a su paquete; un receptor muestrea periódicamente el medio y permanece encendido cuando escucha un preámbulo en curso. Desafortunadamente (además de romper el cumplimiento con el estándar IEEE 802.15.4, que no lo incluye), el muestreo del preámbulo coloca la carga de energía en el transmisor y reduce significativamente el rendimiento de la red [38].

En el modo con baliza, el estándar IEEE 802.15.4 corta el tiempo en supertramas. Cada supertrama inicia cuando el coordinador (posiblemente un enrutador) envía una baliza. Como se muestra en Figura 1.9, esto es seguido por un período activo (en el que todos los transmisores compiten usando CSMA / CA ranurado), y un período inactivo (en el que los nodos duermen hasta la próxima señal) [38].

En ambos casos, el algoritmo CSMA/CA utiliza una unidad de tiempo básica llamada ***Backoff Period*** (BP, por sus siglas en inglés), que es igual a $aUnitBackoffPeriod = 20$ símbolos [41]. El acceso al canal CSMA/CA no incluye mensajes RTS y CTS, como se mencionó en párrafos anteriores.

1.2.2.3. CSMA/CA Ranurado

Como se mencionó, el algoritmo CSMA/CA Ranurado está basado en una unidad básica de tiempo *Backoff Period* (BP). Cada operación del algoritmo CSMA/CA Ranurado sólo puede ocurrir en el límite de un tiempo BP. Los límites de tiempo BP deben alinearse con los límites de la ranura de tiempo de la supertrama [42].

El algoritmo Backoff CSMA/CA-Ranurado principalmente depende de tres variables:

1. ***Backoff Exponent*** (BE, por sus siglas en inglés), permite el cálculo del retardo *backoff delay*, que es el tiempo antes de realizar la evaluación del CCA's. El **retardo *Backoff delay*** es una variable aleatoria entre 0 y $(2^{BE} - 1)$.
2. ***Contention Window*** (CW, por sus siglas en inglés), representa el número de *Backoff Periods* durante el cual el canal debe ser detectado inactivo antes de acceder al canal. El estándar por omisión indica $CW = 2$, corresponden a dos evaluaciones CCA's. En

cada período de *Backoff Period*, la detección del canal se realiza durante los 8 primeros símbolos del período BP.

3. **Number of Backoffs** (NB, por sus siglas en inglés), representa el número de veces que el algoritmo CSMA/CA requirió *Backoff Period* al intentar acceder al canal. Este valor se inicializa en cero ($NB = 0$) antes de cada nuevo intento de transmisión.

La norma MAC-802.15.4 emplea un mecanismo de *Backoff* para conservar el recurso de potencia de los nodos sensores al mismo tiempo que reduce la probabilidad de colisiones sobre el medio de comunicación. Los nodos pueden conservar energía, ya que permanecen en un modo de reposo mientras esperan la oportunidad de competir por el medio. Tener algunos nodos en estado de reposo, reduce el número de nodos que están a punto de realizar su evaluación de canales (*Clear Channel Assessment* CCAs, por sus siglas en inglés), lo que reduce la probabilidad de colisiones de paquetes. Además, la incorporación de dos períodos de CCA es para proteger el paquete ACK de colisiones [43].

La MAC-802.15.4 no tiene medidas de prioridad en el tráfico o en los nodos. La única prioridad implícita considerada por la norma es la asociada con el paquete ACK, que tenga asignada una mayor prioridad sobre otros paquetes [43].

La Figura 1.8 presenta el diagrama de flujo de los algoritmos CSMA/CA Ranurado y No Ranurado. El algoritmo CSMA/CA Ranurado pueden resumirse en cinco pasos, que se explican a continuación [41].

1. **Inicialización de NB, CW y BE.** El número de eventos *Backoffs* (NB) y de *contention window* (CW) son inicializados en ($NB = 0$ y $CW = 2$). El exponente de *Backoff* (BE) también es inicializado en $BE = 2$ o $BE = \min(2, macMinBE)$ dependiendo del valor del atributo *MAC BatteryLifeExtension*. *MacMinBE* es una constante definida en el estándar. Después de la inicialización, el algoritmo localiza el límite del siguiente período de tiempo *Backoff*.
2. **Retardo de espera aleatorio para evitar colisiones.** El algoritmo comienza la cuenta atrás de un número aleatorio de períodos de BP uniformemente generado dentro de $[0, 2^{BE} - 1]$. La cuenta regresiva ha de comenzar en el límite de un período BP. Para desactivar el procedimiento de prevención de colisiones en la primera iteración, el tiempo BE debe establecerse en 0, y por lo tanto el retraso de espera es nulo y el algoritmo va directamente al Paso 3.
3. **Clear Channel Assessment (CCA).** Cuando el tiempo se agota, el algoritmo entonces realiza una operación CCA en el límite de período BP para evaluar la actividad del canal. Si el canal está ocupado, el algoritmo continúa en el paso 4, de lo contrario, es decir, el canal está inactivo, el algoritmo pasa al paso 5.

4. **Canal Ocupado.** Si el canal es evaluado como ocupado, la variable CW se reinicializa en 2, NB y BE se incrementan. BE no debe exceder $aMaxBE$ (un valor por omisión igual a 5). Incrementado el tiempo BE aumenta la probabilidad de tener mayores retardos de *Backoff*. Si el número máximo de *Backoff* ($NB = macMaxCSMABackoffs = 5$) es alcanzado, el algoritmo informa de un error a la capa superior, de lo contrario, se remonta a (paso 2) y la operación de *Backoff* se reinicia.
5. **Canal Libre.** Si el canal está siendo evaluado como libre, la variable CW se decrementa. El CCA se repite si $CW \neq 0$ (Paso 3). Esto asegura la realización de dos operaciones CCA para evitar posibles colisiones de tramas de acuse de recibo (ACK). Si el canal se vuelve a detectar como libre ($CW = 0$), el nodo intenta transmitir. Sin embargo, las colisiones pueden aún ocurrir si dos o más nodos están transmitiendo al mismo tiempo.



Figura 1.8.: Algoritmos CSMA/CA Ranurado.

Por cada paquete generado, cada nodo mantiene una variable r que indica el número de colisiones que el paquete ha experimentado. Para un paquete recién generado, r se inicializa en cero [44].

En resumen, en el mecanismo de CSMA/CA Ranurado, se realiza la primera evaluación CCA, es decir, detecta el canal, y si está libre, la primera evaluación CCA tiene éxito, y la variable CW se reduce en 1. El nodo realiza la segunda evaluación CCA, y si también es exitosa, entonces se puede transmitir el paquete. Si cualquiera de las evaluaciones CCAs falla, tanto NB como BE se incrementan en 1, asegurando los niveles de BE en $macMaxBE$, y CW se reinicializa en 2. El nodo repite el procedimiento para la nueva etapa de *Backoff* calculando un nuevo valor para el *Backoff*, a menos que el valor de NB sea mayor que la constante $M = macMaxCSMABackoffs$. En este caso, el algoritmo CSMA/CA termina con un estado de fallo de acceso al canal, y el paquete es descartado [44].

En el **modo mensaje ACK**, una transmisión exitosa es acompañada por la recepción de un mensaje ACK, que tiene una longitud fija de períodos de $BackoffL_{ack}$. El mensaje ACK es la retroalimentación al nodo remitente después de un tiempo mínimo, lo que permite al transceptor del nodo cambiar de modo transmisor (Tx) a modo receptor (Rx). El nodo emisor espera el mensaje ACK antes de un tiempo máximo fijo de $macAckWaitDuration$. Si el mensaje ACK no es recibido correctamente después de este tiempo, se declara colisión. Un paquete colisionado puede ser retransmitido a lo sumo $R = aMaxFrameRetries$ tiempos antes de ser descartado. Por lo tanto, cada vez que un paquete transmitido colisiona, r se incrementa en 1, y si $r \leq R$, entonces el paquete se retransmite utilizando un nuevo procedimiento de transmisión con NB , CW y BE reiniciados a sus valores iniciales [44].

La capa MAC esperará intencionalmente un espacio entre tramas (***Interframe Space IFS***, por sus siglas en inglés), después de transmitir con éxito un paquete y antes de servir otros paquetes [45].

Como se menciona en párrafos anteriores, en el algoritmo CSMA/CA los nodos tienen dos estados, activo y en reposo. Durante el período activo, los nodos escuchan el canal en caso de posible tráfico de nodos vecinos, y al terminar este período vuelven al estado de reposo. Un nodo al transmitir debe hacerlo en el momento adecuado, en los períodos activos de los nodos receptores específicos. Todo un ciclo que consta del período de reposo y de activo se denomina *Wakeup Period*. La relación de la duración del período activo y el *Wakeup Period* se llama *Duty cycle* [46].

1.2.2.4. Estructura de supertrama

La **supertrama** se divide en una parte activa y una parte inactiva (la cual es opcional), como se observa en la Figura 1.9. La supertrama está delimitada por balizas de red transmitidos periódicamente por el coordinador PAN, con la finalidad de identificar su PAN, sincronizar nodos que están asociados con él, y delimitar la supertrama que es donde deben ocurrir todas las transmisiones [42].

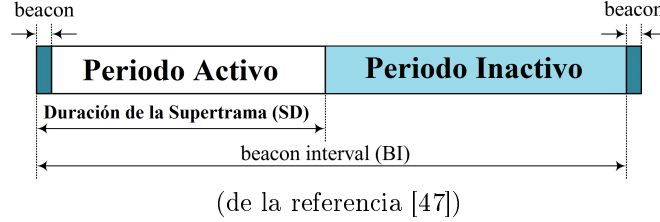


Figura 1.9.: Estructura de la supertrama de del estándar IEEE 802.15.4 .

El tamaño de la supertrama (Activa +Inactiva) (Figura 1.10) es igual al intervalo *Beacon Interval* BI [40],

$$BI = aBaseSuperframeDuration \times 2^{BO} \quad (1.1)$$

Mientras que el tamaño de solo la parte activa es *Superframe Duration* SD,

$$SD = aBaseSuperframeDuration \times 2^{SO} \quad (1.2)$$

donde $aBaseSuperframeDuration = 960$ símbolos ; BO es *Beacon Order* ($0 \leq BO \leq 14$); SO es *Superframe Order* ($0 \leq SO \leq BO \leq 14$). Los valores de BO y SO los determina el coordinador.

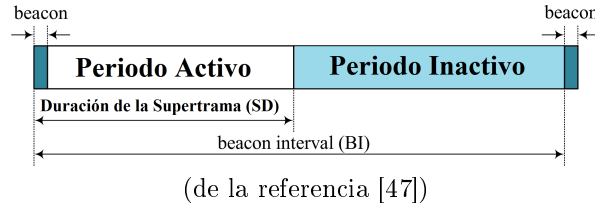


Figura 1.10.: Parte activa e inactiva de una supertrama.

En la Figura 1.11 se muestra un ejemplo de la Estructura de una Supertrama.

La **parte activa** es llamada Supertrama, está dividida en $aNumSuperframeSlots$ (16 ranuras), que a su vez se dividen en *Contention Access Period* CAP, en este tiempo es el acceso

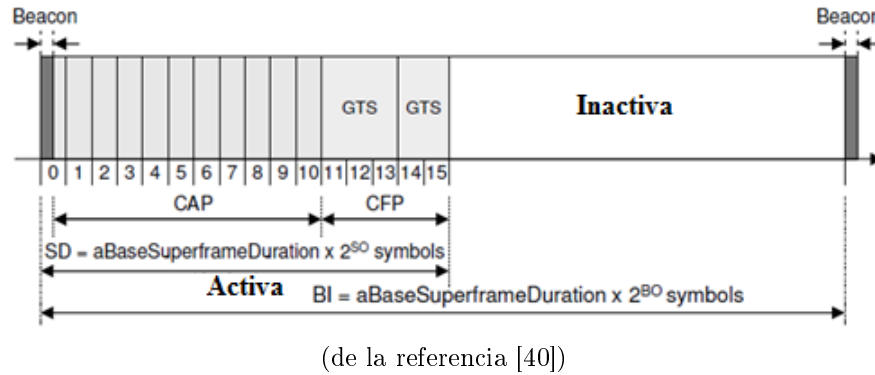


Figura 1.11.: Ejemplo de Estructura de una Supertrama .

al canal (transmisiones de las tramas); y *Contention Free Period* CFP que son siete *Guaranteed Time Slots* GTS. Durante el período CAP los nodos compiten por acceder al medio (utilizando CSMA/CA-ranurado). El estándar IEEE 802.15.4 ofrece la posibilidad de definir un período CFP dentro de la supertrama, el cual se activa cuando un nodo se lo solicita al coordinador PAN para asignar un tiempo GTS dependiendo de los requisitos del nodo [42]. En la **parte inactiva** (opcional), todos los nodos pueden entrar en un estado “dormido” para así, ahorrar energía.

1.2.3. Capa de Red

Los nodos sensores están alimentados por una batería que tiene una energía limitada y raras veces puede ser recargada. La vida útil del nodo sensor depende en gran medida de la duración de la batería, y el consumo de energía no razonable hará que se reduzca la vida útil de la red. El diseño del algoritmo de enrutamiento de una red WSN ahorra energía de los nodos y mejora la calidad de la comunicación en la red, que es el punto clave para las redes WSN [48].

La selección de técnicas de enrutamiento es un tema importante para la entrega eficiente de datos sensados desde su origen hasta su destino. La estrategia de enrutamiento utilizada en una red WSN debe asegurar el mínimo consumo de energía debido a que el reemplazo de batería del nodo sensor en la mayoría de las aplicaciones no es posible. Los protocolos de enrutamiento dependen de la aplicación y la arquitectura de red [49].

El nodo sensor está limitado tanto en capacidad de computo, almacenamiento y comunicación [50].

El consumo de energía se puede manejar eficientemente ajustando la topología de la red y regulando los niveles de potencia de transmisión de los nodos en el protocolo de enrutamiento

[50]. El desempeño del protocolo de enrutamiento depende de la arquitectura y diseño de la red, y esta es una característica muy importante de las redes WSN. Sin embargo, la operación del protocolo puede afectar la energía gastada para la transmisión de datos [51]. La técnica de agrupamiento es útil para reducir el uso de energía en protocolos de enrutamiento [50].

En una arquitectura de agrupación, los nodos sensores están organizados en *clústers*, donde los nodos con menor energía se utilizan para realizar tareas de detección y envío de datos al *Cluster Head* a cortas distancias [50].

El enfoque de *clúster* es capaz de aumentar la longevidad de la red y mejorar la eficiencia energética minimizando el consumo de energía global y equilibrando el consumo de energía entre los nodos durante la vida útil de la red. Además, es capaz de mejorar la contención de canales y las colisiones de paquetes, dando como resultado un mejor rendimiento de la red (*throughput*) [50].

El *Cluster Head CH* es quien recopila los datos de cada nodo del *clúster*, los comprime (procesamiento) y los envía a la estación base. Agrupando los nodos en *clúster* se obtiene un uso eficiente de los recursos energéticos, ya que la cantidad total de datos transmitidos a la estación base se reduce significativamente. La comunicación entre-*clúster* permite reducir la distancia de transmisión entre nodos, y así reducir el consumo de energía [52].

Durante la operación del nodo sensor, la tarea de comunicación generalmente consume la mayor energía en comparación con el sensado y procesamiento. En comunicaciones inalámbricas, entre mayor es la distancia de transmisión, mayor es la potencia de consumo [52].

Los protocolos de enrutamiento se ven afectados por diversos factores; a continuación se detallan los más relevantes [51]:

- **Implementación de los nodos:** dependiendo de la aplicación la implementación de los nodos puede ser determinista o aleatorio, lo cual afecta el rendimiento del protocolo de enrutamiento.
- **Heterogeneidad del Nodo/Enlace:** la existencia de un conjunto de nodos heterogéneos da lugar a muchos problemas técnicos relacionados con el enrutamiento de datos.
- **Modelo de Informe de Datos:** La detección, medición y notificación de datos en las redes WSN depende de la aplicación y el tiempo crítico del informe. Los informes de datos se pueden clasificar como impulsados por tiempo, impulsados por eventos, orientados por consultas e híbridos.
- **Escalabilidad:** Los protocolos de enrutamiento de una red WSN deben ser lo suficientemente escalables para responder a eventos, por ejemplo el aumento excesivo de nodos

en la red.

- **Tolerancia a Fallas:** La tarea general de una red WSN es no verse afectada por el fallo de algún nodo sensor.
- **Conectividad:** La conectividad de los nodos sensores depende de la distribución aleatoria de los nodos.
- **Cobertura:** En una red WSN, una visión del sensor del ambiente está limitada tanto en el rango como en la precisión, por lo que sólo puede cubrir un área física limitada del ambiente (entorno).

El enrutamiento en una red WSN puede ser más exigente que en otras redes inalámbricas, por las siguientes razones [51]:

- Los nodos sensores requieren una administración cuidadosa de sus recursos, debido a sus limitaciones severas de energía, procesamiento y capacidades de almacenamiento.
- La mayoría de las aplicaciones en una red WSN requieren el flujo de datos, detectados de múltiples fuentes a una estación base particular.
- Los requisitos de diseño de una red WSN dependen de la aplicación.
- Los nodos en una red WSN son en su mayoría estacionarios después de su despliegue, lo que resulta en cambios topológicos predecibles y poco frecuentes.

Una técnica de enrutamiento son los **protocolos jerárquicos**. Los protocolos en este esquema imponen una estructura en la red para lograr eficiencia energética, estabilidad y escalabilidad. En esta clase de protocolos, los nodos sensores se organizan en grupos (*clústers*) en los que el nodo con mayor energía residual, asume el rol de *Cluster Head*. El *Cluster Head* es el responsable de coordinar las actividades entre el *clúster* y dar seguimiento a la información entre el *clúster*, por lo que tiene mayor batería y capacidad de cómputo [53]. El agrupamiento tiene el potencial de reducir la energía de consumo y extender el tiempo de vida de la red [51].

Cuando se ha seleccionado el *Cluster Head*, este envía un *broadcast* con un mensaje de notificación a los otros nodos de la red. Dependiendo la intensidad de la señal recibida del mensaje de notificación, el nodo sensor decide si unirse al CH [49].

En la técnica de agrupamiento, un conjunto de dispositivos se agrupa en una región geográfica. El enrutamiento de datos en *clústers* se divide en dos áreas, que son *Intraclúster* (entre el mismo *clúster*) y *Interclúster* (entre *clústers*) [53].

La arquitectura *clúster* presenta las siguientes ventajas [53]:

- Minimiza la potencia de transmisión.
- Ayuda a equilibrar la energía de los nodos.
- Minimiza las colisiones al reducir la comunicación salto-salto.
- Extiende la vida útil de los nodos.
- Mayor cobertura y conectividad en la red [49].
- Permite la escalabilidad en la red [49].
- Minimiza el retardo [49].

Existen diferencias entre las actividades realizadas por el nodo sensor y el *Cluster Head*, en el caso del nodo sensor, este es el encargado de realizar las tareas de sensado, procesamiento de los datos recolectados y la transmisión y recepción de dichos datos; mientras que el *Cluster Head* realiza todas las funciones del nodo sensor, con excepción del sensado, y como actividad extra realiza el cálculo de trayectoria y tiene comunicación con la estación base. La Tabla 1.1 muestra dichas diferencias.

Tabla 1.1.: Actividades del nodo sensor y del *Cluster Head*

(de la referencia [53])

ACTIVIDADES	SENSOR	CLUSTER HEAD
Sensado	Si	No
Cálculo de Trayectoria	No	Si
Procesamiento de Datos	Si	Si
Transmisión	Si	Si
Recepción	Si	Si
Comunicación a la estación base	No	Si

Otra técnica empleada para acceder al medio es **Acceso Múltiple por División de Tiempo** (**TDMA**, *Time Division Multiple Access*, por sus siglas en inglés), donde la duración de cada trama en el que el nodo transmite los datos es constante, por lo que el tiempo para enviar una trama de datos depende de la cantidad de nodos en el *clúster* [54].

Medir el desempeño de una red de sensores inalámbricos es fundamental para saber si la red funciona adecuadamente. Con una metodología bien estructurada para definir y analizar esas métricas se puede evaluar las capacidades de la red, prevenir fallas y determinar posibles mejoras.

1.3. Métricas

1.3.1. Relación Señal a Ruido SNR (*Signal to Noise Ratio*).

Está directamente relacionado con el proceso de captura de paquetes por un receptor. Si un receptor captura un paquete, se deben cumplir dos condiciones: (1) la intensidad efectiva de la señal debe ser mayor que la sensibilidad del receptor y (2) la relación SNR actual en el receptor debe ser mayor que el umbral de la relación SNR del receptor [55].

Probabilidad de Transmisión. La **Probabilidad de Transmisión** indica la probabilidad de que en una ranura aleatoria, un nodo sensor en particular esté transmitiendo [44].

Probabilidad de Colisión. La **probabilidad de colisión** se define como la probabilidad de que en un tiempo en el que un nodo está transmitiendo, uno o más nodos están transmitiendo [44].

Probabilidad de Descartar Paquetes La probabilidad de descartar paquetes es la fracción de paquetes generador que no se transmiten con éxito [44].

Rendimiento (*Throughput*). Mide el rendimiento desde la fuente hasta el destino, mostrando la cantidad de datos que se pueden entregar entre los dos extremos en el tiempo de la unidad [55]. El **Rendimiento (*Throughput*)** es la velocidad real de transporte, se ve afectado por una serie de factores, incluyendo los protocolos utilizados para el enrutamiento, comunicación de la capa física y MAC, longitud de los paquetes, el número de nodos sensores que intervienen en comunicar los datos y las limitaciones físicas de los nodos sensores como el alcance de radio [45].

2. METODOLOGÍA PROPUESTA

El principal objetivo del diseño de una red WSN no es sólo transmitir datos de una fuente a un destino, sino también aumentar la vida útil de la red. Dependiendo de la aplicación, diferentes arquitecturas y diseños pueden ser utilizados. [51].

Especificando la aplicación se pueden reducir los requisitos de diseño y limitaciones, y abre una oportunidad para soluciones personalizadas que pueden ser controladas y administradas con mayor propiedad [43].

La metodología que se propone para implementar una red de sensores inalámbricos ofrece una visión clara y dinámica de lo que se está trabajando en cada momento. Esta metodología es importante y necesaria para obtener los resultados que se quieren. Esta es una metodología general de diseño y/o rediseño de una red WSN, donde todas sus fases se puede adaptar a casi cualquier tipo de requerimientos de una red WSN, sin importar las dimensiones de la red.

El uso de esta metodología en la gestión de una red WSN tiene como beneficios específicos: Organizar los tiempos de diseño e implementación de una red WSN; proporcionar herramientas para estimar de forma correcta tiempos y costos; ayudar a gestionar y minimizar los riesgos de una red WSN; y mejorar la relación entre costo y beneficio de las redes WSN.

2.1. Parámetros críticos de una red de sensores heterogéneos inalámbricos

En la Figura 2.1, se presenta un esquema de los parámetros críticos de cada capa de una red de sensores heterogéneos inalámbricos (HWSN, por sus siglas en inglés) y cómo están interrelacionados entre sí. La arquitectura de las redes HWSN se dividió en 4 capas, que son la capa física, capa de acceso al medio (MAC), capa de red y la capa de aplicación, esta última por el alcance del presente trabajo de investigación no fue considerada.

En lo que respecta a la capa física, como parámetros críticos se considera la frecuencia de operación ya que de ella depende el esquema de modulación a emplear y la tasa de

transmisión; también se considera la potencia de transmisión la cual está relacionada de forma directa con la distancia entre nodos; además se considera el número de nodos sensores en la red y el tamaño de la carga útil del paquete. Todos estos parámetros críticos de la capa física son utilizados para calcular la relación señal a ruido (SNR), relación portadora-interferencia (CIR), tasa de error de bits (BER , *Bit Error Rate*) y la tasa de error por paquetes (PER , *Packet Error Rate*.)

En la capa física se consideran como parámetros variables a la frecuencia de operación, potencia de transmisión, distancia entre nodos, número de nodos sensores en la red y tamaño de la carga útil, lo que provoca que la red sea de carácter heterogéneo.

En la capa MAC, lo primero a considerar es el método de acceso al medio, ya que de este dependerán los parámetros que se están considerando en esta capa, que son el rendimiento (*Throughput*), retardo, probabilidad de transmisión, probabilidad de colisiones de paquetes y la probabilidad de descartar el paquete. El rendimiento (*Throughput*) a su vez depende de los parámetros fundamentales que se están considerando en la capa física, que son la potencia de transmisión, la distancia entre los nodos, el número de nodos sensores y el tamaño de la carga útil. También se ve afectado por la topología y enrutamiento de la red, los cuales son parámetros de la capa de red. El retardo también depende de parámetros de la capa física, y éstos son la distancia entre los nodos, el número de nodos sensores en la red y el tamaño de la carga útil; y al igual que el rendimiento (*Throughput*), también se ve afectado por los parámetros que se están considerando en la capa de red. Las probabilidades de transmitir el paquete o de descartarlo, y de que ya una vez enviado sufra una colisión, dependen tanto de variables de la capa física, como de la capa de red. Las variables de la capa física que afectan estas probabilidades son el número de nodos sensores en la red y el tamaño de la carga útil; y en lo que respecta a la capa de red dependen tanto de la topología como del enrutamiento.

Por último, en la capa de red solo se consideran la topología y enrutamiento de la red, que dependen de parámetros de la capa física. Para determinar la topología de la red, es necesario conocer las potencias de transmisión de los nodos sensores, así como la distancia entre ellos, el máximo número de nodos sensores que habrá en la red WSN y el tamaño del paquete. Una vez definida la topología de la red se determinará el enrutamiento de la misma, lo que afectará los parámetros considerados en la capa MAC, como se menciona en el párrafo anterior.

Ya que se consideraron los parámetros de cada una de las capas y su interrelación entre ellos, lo siguiente es elaborar la metodología para implementar una red HWSN. Esta metodología se presenta en la Figura 2.2, y se describe a continuación.

1. El primer paso consiste en establecer si los nodos sensores de las redes HWSN se encontrarán en movimiento. En caso de que así sea, la metodología que se está presentando no está diseñada para este escenario, únicamente para nodos fijos.
2. Ya que se estableció que los nodos se encontrarán fijos, lo siguiente es identificar la aplicación, esto es la variable a sensar, ya que de esto depende si el sensado será **basado en tiempo** el cual es adecuado para aplicaciones que requieren motorización de datos periódicos. Como tal, los nodos sensores encienden periódicamente sus sensores y transmisores, detectan el medio, y transmiten los datos de interés en intervalos de tiempo periódicos y constantes [56], en este caso se emplea la técnica **TDMA** (técnica de Acceso Múltiple por División de Tiempo, por sus siglas en inglés *Time Division Multiple Access*) para acceder al medio, y esta metodología no está diseñada para dicha técnica. En caso de que el sensado sea **basada por eventos**, donde los nodos sensores reaccionan inmediatamente a los cambios repentinos y drásticos en el valor del atributo detectado debido a la ocurrencia de un determinado evento, o responden a una consulta generada en la red por otro nodo [56], para este caso se utiliza la técnica **Acceso Múltiple por Detección de Portadora y Prevención de Colisiones CSMA/CA-Ranurado** (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*).
3. Ya definido lo anterior, se continua estableciendo si el área de implementación será en espacio exterior o interior. En caso de ser en **espacio exterior** seimplementarán las ecuaciones de pérdida de propagación en espacio libre; en el caso de **interiores**, será necesario indicar el tipo de edificio donde se va a implementar, esto es si es edificio de oficinas, hogar, escuela, etc, el tipo de material de construcción, número de pisos del edificio, el número de paredes existentes entre los nodos, ya que se aplicará la ecuación de pérdida de propagación para espacio en interiores.
4. Lo siguiente es determinar las dimensiones del área de implementación, para esto se esta considerando una **implementación determinista**, esto significa que los nodos son colocados manualmente y los datos se distribuyen a través de rutas predeterminadas [56]. Dependiendo el área de implementación será la topología a implementar, la metodología esta diseñada para implementarse en redes tipo *cluster* que empleen topología tipo estrella; en caso de emplearse otro tipo (como *mesh*) esta metodología no podrá implementarse.
5. Una vez establecidos tanto el espacio como las dimensiones del área de implementación, lo sucesivo es indicar el mínimo número de nodos necesarios para implementar la red.
6. Esta metodología esta diseñada para emplearse con el estándar **IEEE 802.15.4**, en la banda de frecuencia de **2.4 GHz** y una tasa de transmisión de **250 kbps**.

7. Ya establecida la aplicación (parámetro a sensar) se indica el tamaño de paquete óptimo en la red.
8. Dependiendo de la distancia entre los nodos, se determinará la potencia de transmisión, considerando 5 posibles valores, que son **Súper Bajo (0 dBm)**, **Bajo (4 dBm)**, **Medio (10 dBm)**, **Alto (14 dBm)** y **Súper Alto (18 dBm)**.
9. Con todo lo anterior, se realiza el cálculo promedio de la **Relación Señal a Ruido SNR**, **Tasa de Error Binario BER**, **Tasa de Error por Paquete PER**, **rendimiento (*Throughput*)**, **Retardo**, así como la **Probabilidad de Transmisión**, **Probabilidad de Descartar el Paquete** y **Probabilidad de Colisiones en la red**.

A continuación se describen los modelo analítico de la capa física y capa de acceso al medio (MAC).

2.1.1. Capa Física

El modelo de la capa física determina la precisión del modelo de optimización de capas cruzadas (*cross-layer*). Un modelo de capa física realista considera las técnicas de modelo de propagación, modulación, codificación, demodulación y decodificación, vinculando así parámetros principales como potencia, relación señal a ruido SNR y tasa de error de bit [57].

En la Subsección 1.2.1 se indicaron las funciones de la capa PHY. El algoritmo del modelo analítico de la capa física se presenta en la Figura 2.3 y de describe a continuación.

Para calcular la **relación señal a ruido SNR** en el receptor se utiliza la Ecuación 2.1 [58],

$$SNR_{RX} (dB) = 10 \log \frac{P_S}{P_N} \quad (2.1)$$

donde P_S es la potencia de la señal recibida en watts, y P_N es la potencia de ruido en watts.

Es necesario realizar el cálculo de pérdida de trayectoria para calcular la potencia de la señal recibida P_S . Considerando un espacio donde solo está presente la señal emitida por una antena isotrópica (antena que emite una señal de manera uniforme en todas las direcciones). Esto se denomina propagación de la señal en el espacio libre. En el espacio libre, la potencia de la señal a una distancia d puede calcularse a partir de la ecuación de pérdida de trayectoria [59],

$$P_S = P_0 - 10 \times 2 \times \log_{10}(f) - 10 \times 2 \times \log_{10}(d) + 27.56 \quad (2.2)$$

Tabla 2.1.: Exponente (n) de pérdida de trayectoria para diferentes ambientes.

n	Ambiente
2.0	Espacio Libre
1.6 a 1.8	Dentro de un edificio, línea de visibilidad directa
1.8	Tienda de Comestibles
1.8	Edificio de fábrica (papel y cereales)
2.09	Cuarto de conferencias típico de 15m x 7.6m con mesas y sillas
2.2	Tienda al por menor
2 a 3	Dentro de una fábrica, sin línea de visibilidad directa.
2.8	Residencial (interior)
2.7 a 4.3	Típico edificio de oficinas, sin línea de visibilidad directa.

donde P_S es la potencia de la señal (en dBm) a una distancia d (en metros); P_0 es la potencia de la señal (en dBm) a una distancia cero desde la antena, la magnitud de P_0 es variable, de acuerdo a los dispositivos existentes en el mercado, con un valor mínimo de 0 dBm hasta los 18 dBm (incremento de 2 dBm); y f es la frecuencia de la señal (en MHz).

Para diferentes escenarios la Ec. Ecuación 2.2 se convierte en [59]

$$P_S = P_0 - 10 \times n \times \log_{10}(f) - 10 \times n \times \log_{10}(d) + 30 \times n - 32.44 \quad (2.3)$$

donde n es el exponente de pérdida de trayectoria, en la Tabla 2.1 se muestra el valor para diferentes ambientes [59].

La potencia de ruido se calcula de la siguiente manera [58]

$$P_N = kTB_C \quad (2.4)$$

donde k es la constante de Boltzmann con un valor de $1.38 \times 10^{-23} J/K$; T es la temperatura absoluta en Kelvin; y B_C es el ancho de banda del canal (Hertz).

Hay un parámetro relacionado con SNR que es más conveniente para determinar las tasas digitales y las tasas de error, es la medida estándar de calidad para el rendimiento del sistema de comunicación digital. Este parámetro es la **relación de energía de señal por bit a la densidad de potencia de ruido por Hertz (EbNo)** [60].

Haciendo una relación entre SNR y EbNo [61], se obtiene

$$EbNo = (SNR) \left(\frac{B_R}{R} \right) \quad (2.5)$$

donde B_R es el ancho de banda del receptor, y R es la tasa de transmisión (en bps).

Una vez obtenido el parámetro E_b/N_0 lo siguiente es calcular la **relación Portadora/Interferencia (C/I)** en el enlace de radio. La relación Portadora/Interferencia es la relación mínima requerida para la recepción de la señal adecuada entre la intensidad de la portadora de la señal recibida y la suma de todas las señales que interfieren y potencias de ruido [62],

$$C/I = \left(\frac{E_b}{N_0} \right) \left(\frac{R}{W} \right) \quad (2.6)$$

donde w es la tasa de chips.

Un parametro importante es conocer la **Tasa de Error de Bit (BER)**, para el esquema de modulación O-QPSK está dada por la siguiente ecuación [63],

$$BER^{O-QPSK} = Q\sqrt{(E_b/N_0)_{DS}} \quad (2.7)$$

donde

$$(E_b/N_0)_{DS} = \frac{2N \times (E_b/N_0)}{N + 4 (E_b/N_0) (k - 1) / 3} \quad (2.8)$$

donde Q es la función de error complementaria $Q(x) = \left(1/\sqrt{2\pi} \int_x^\infty e^{-t^2/2} dt \right)$ [64]; N es el número de chips por símbolo; k es el número de usuarios transmitiendo simultáneamente. Los valores esperados de la tasa de BER en ambientes sin y con interferencia es de aproximadamente 10^{-4} y 10^{-3} , respectivamente [65].

Lo siguiente es calcular la **Tasa de Error por paquete PER** por medio de la siguiente ecuación [65],

$$PER = 1 - (1 - BER)^X \quad (2.9)$$

donde X es el tamaño del paquete (en bits) incluyendo las cabeceras de la capa Física y MAC.

2.1.2. Capa de Acceso al Medio (MAC)

En la Subsección 1.2.2 se mostraron las funciones de la capa MAC.

En la Figura 2.4 se presenta el algoritmo del modelo analítico empleado en la capa MAC.

Tomando como referencia el modelo analítico del rendimiento (*Throughput*) de la red de [45], se tienen los siguientes parámetros, D^{tg} es un nodo arbitrario; P_{sens} es la probabilidad de que D^{tg} empiece a sensar el canal (primera evaluación CCA) y que este ocupado; P_{cca_1} es la probabilidad de que D^{tg} comience a sensar la segunda evaluación CCA (significa que la primera evaluación CCA fue exitosa); P_{cca} es la probabilidad de que se pueda transmitir el paquete (significa que la primera y segunda CCA fueron exitosas).

Al haber más de un nodo, la probabilidad de que al menos uno de los otros nodos de la red comience su primera evaluación CCA esta determinado por $1 - (1 - P_{sens})^{n-1}$, donde n es el número de nodos en la red.

El cálculo de P_{cca} (probabilidad de que D^{tg} tenga éxito en dos evaluaciones CCA sucesivas) es

$$P_{cca} = \frac{1}{1 + (L + 1) [1 - P_{sens} - (1 - P_{sens})^n]} \quad (2.10)$$

donde L es el tamaño del paquete (en ranuras *backoff slots*).

Si en la red solo hay un nodo enviando al coordinador ($n = 1$) la Ec. Ecuación 2.10 se vuelve 1, significa que no hay otros nodos escuchando el canal, y por lo tanto el canal siempre estará libre.

La probabilidad de comenzar el segundo CCA es

$$P_{cca_1} = \frac{1}{L + 1} + \frac{L}{L + 1} P_{cca} \quad (2.11)$$

El período entre dos evaluaciones sucesivas CCA primeras, esto es que si falla la primera vez, el tiempo que se debe esperar para sensar de nuevo, es

$$\bar{P} = T_{bk} + 1 + \frac{1}{L + 1} + \left(L + L_I + \frac{L}{L + 1} \right) P_{cca} \quad (2.12)$$

donde, T_{bk} es el periodo de *backoff* $T_{bk} = \frac{1}{2} (2^{macMinBE} - 1)$, $macMinBE$ por omisión es 3, pero puede tomar valores de 0 a 7; y L_I es el periodo IFS (*Interframe Space*), tiempo que se debe esperar después de transmitir con éxito un paquete para enviar otro, depende del tamaño del paquete.

La probabilidad de que el nodo D^{tg} comience su primera evaluación CCA es

$$P_{sens} = \frac{1}{\bar{P}} = \frac{1}{T_{bk} + 1 + \frac{1}{L+1} + \left(L + L_I + \frac{L}{L+1} \right) P_{cca}} \quad (2.13)$$

La probabilidad de una transmisión exitosa Ptx es

$$Ptx = (1 - Psens)^{n-1} \quad (2.14)$$

El rendimiento (*Throughput*) para un nodo específico es

$$\phi^{tg} = L \times Psens \times Pcca \times Ptx \quad (2.15)$$

Para la red, el rendimiento (*Throughput*) será el rendimiento (*Throughput*) de cada nodo.

2.1.3. Capa de Red

En la Subsección 1.2.3 se presentan los beneficios de utilizar una arquitectura de agrupación (*clúster*). Considerando tales ventajas, en la metodología propuesta, la topología a implementar es de este tipo.

La topología propuesta se muestra en la Figura 2.5. En dicha topología, los nodos sensores se agrupan en *clústers*, donde en cada *clúster*, hay un nodo coordinador (*Cluster Head*, CH) el cual es el encargado de recibir y enviar información a cada nodo sensor que forme parte de su *cluster*. La información que reciban los nodos coordinadores de cada nodo sensor, será enviada a la estación base (administrador de la red).

La topología de cada *clúster*, y nodos coordinadores a la estación base será tipo estrella, donde el enrutamiento en cada *clústers* será de un solo salto, y en el caso de los nodos coordinadores a la estación base, será de múltiples saltos, esto dependiendo de la magnitud del área de implementación. El acceso al medio será por medio de CSMA/CA Ranurado en todos los casos.

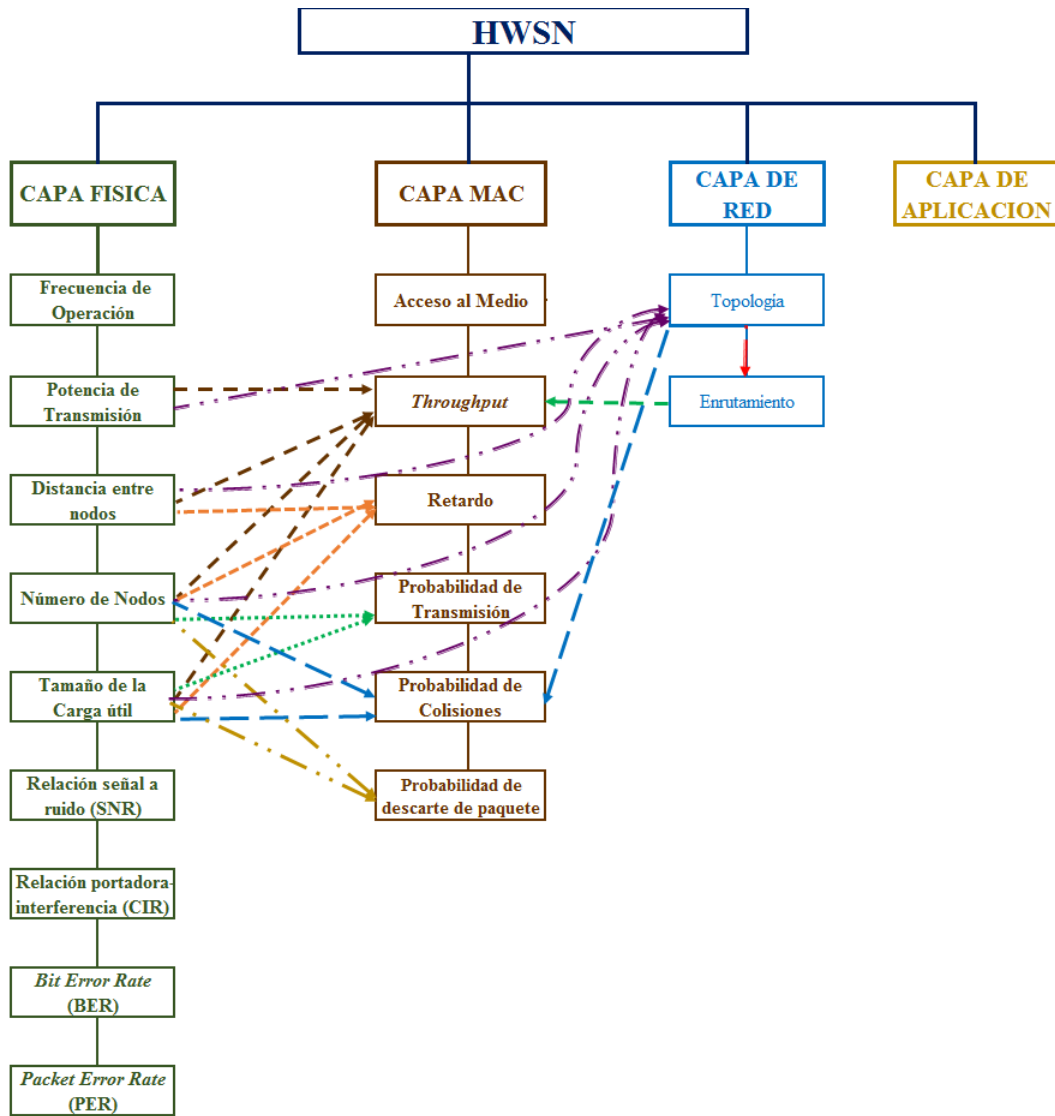


Figura 2.1.: Interrelación de parámetros críticos de una red de sensores heterogéneos inalámbricos.

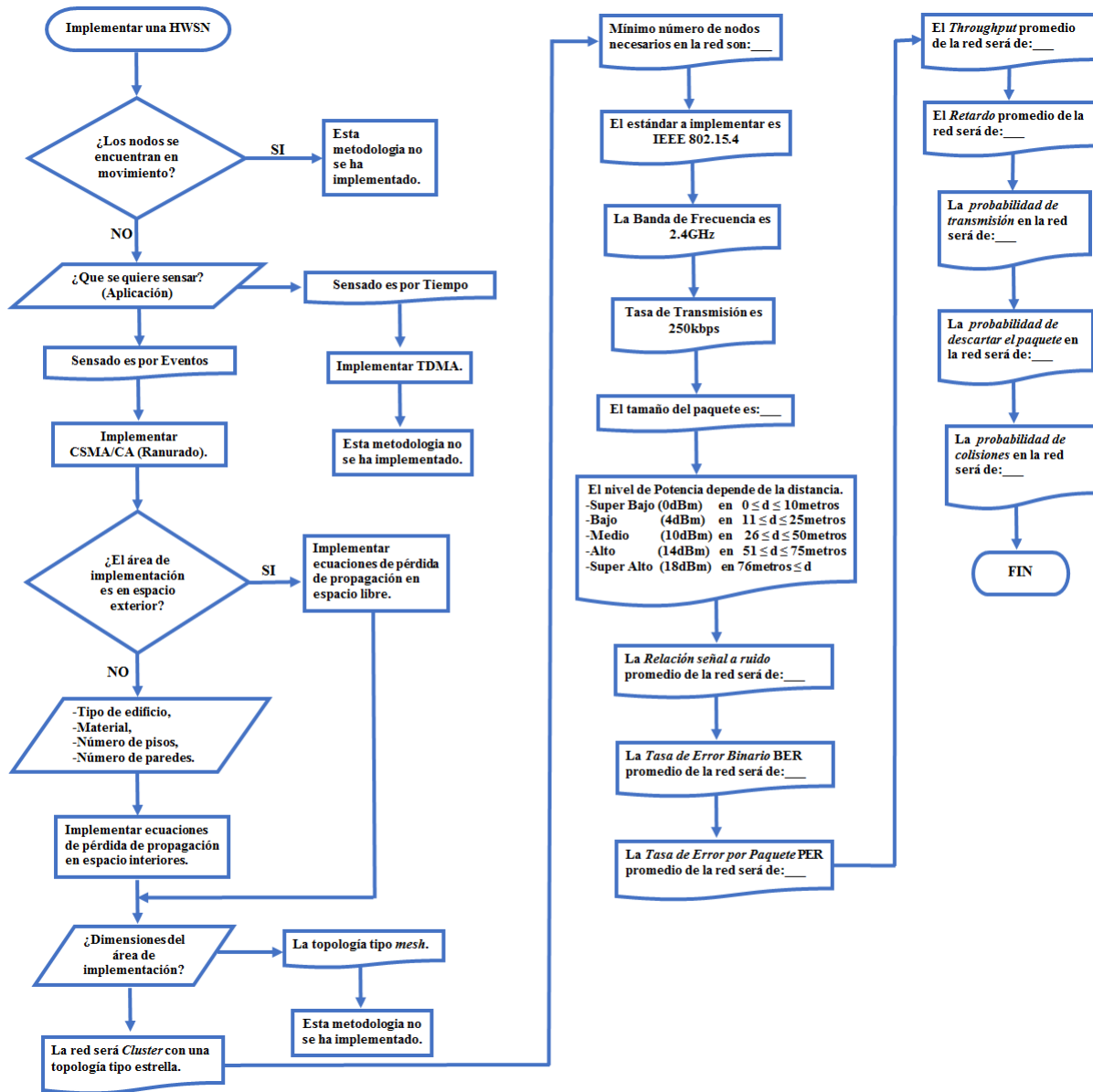


Figura 2.2.: Metodología de implementación de una red de sensores heterogéneos inalámbricos.

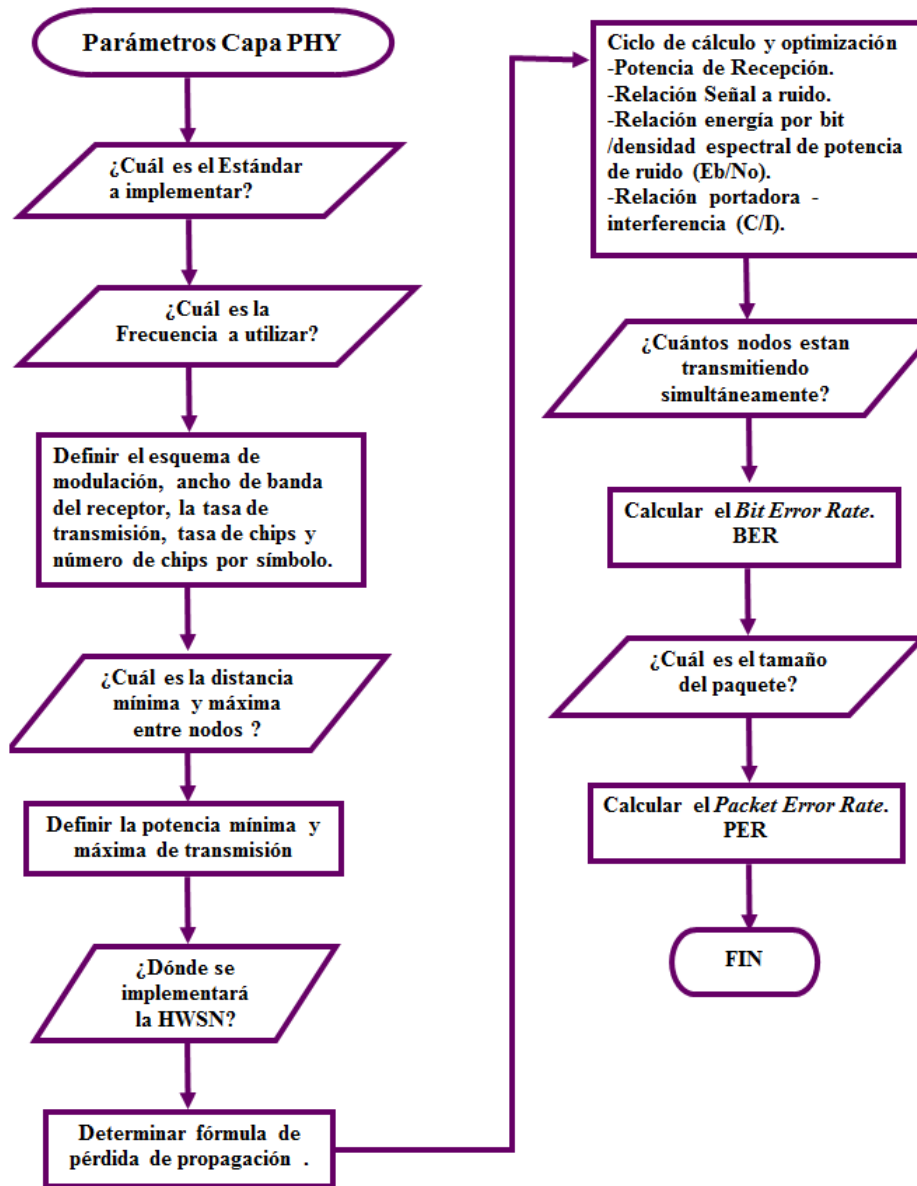


Figura 2.3.: Algoritmo del modelo analítico de la capa física.

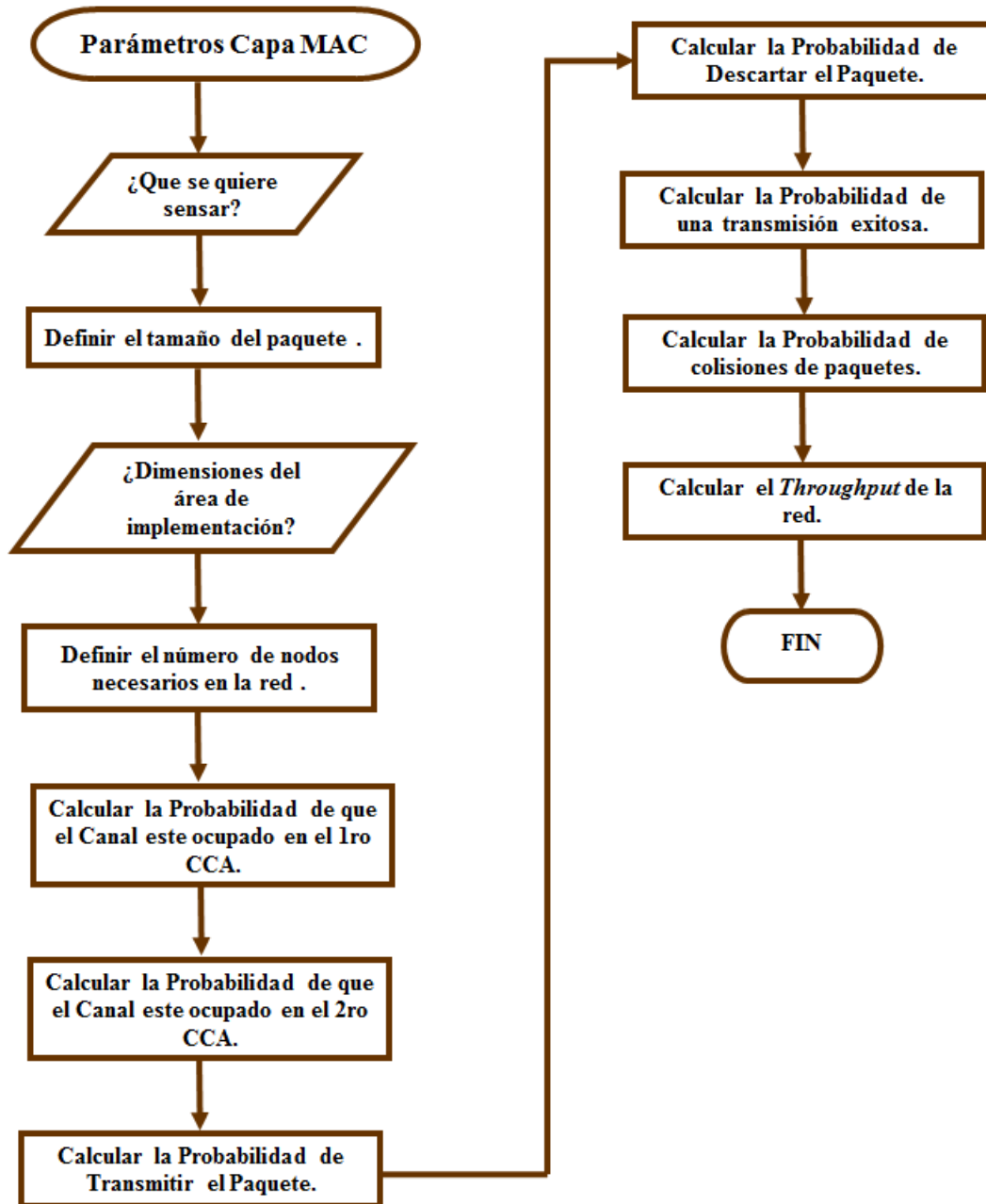


Figura 2.4.: Algoritmo del modelo analítico de la capa MAC.

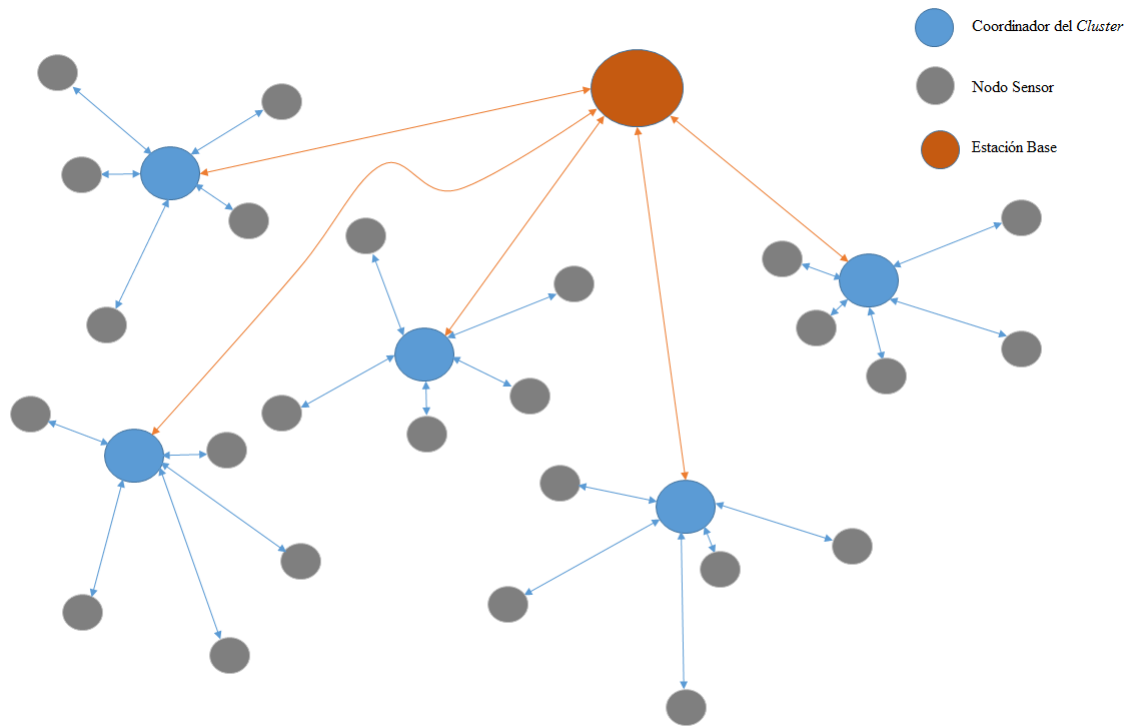


Figura 2.5.: Propuesta de topología.

3. SIMULACIÓN DE UNA RED DE SENSORES INALÁMBRICOS

La simulación es un elemento clave en el diseño de las redes de sensores inalámbricas (WSN), debido a que éstas por naturaleza están compuestas por un gran número de nodos sensores, lo que implica un coste de implementación. Es por ello que simular una red es fundamental cuando se quiere proponer nuevos diseños; y necesaria para comprobar la idoneidad de una nueva composición de red antes de ponerla en práctica en escenarios reales.

En este capítulo se presenta la simulación realizada de acuerdo a la metodología propuesta en el Capítulo 2. El objetivo de la simulación es determinar cuál es la fiabilidad de dicha metodología en la implementación de redes de sensores inalámbricos; además de hacer un análisis de dichas redes para obtener un parámetro de calidad como es la relación señal a ruido, tasa de error de bit, tasa de error por paquete, probabilidad de éxito en la transmisión del paquete, la probabilidad de colisiones y el rendimiento (*Throughput*) de la red.

La implementación de las infraestructuras de una red WSN, debido al elevado número de nodos sensores que la constituyen, implica un gran esfuerzo y coste. Es por ello, que la metodología que se propone es fundamental y necesaria, ya que con ella se puede comprobar el correcto funcionamiento de los protocolos implementados en la red .

La necesidad de contar con una metodología como la que se propone es debido a que dependiendo del objetivo para el cual haya sido desarrollada la red WSN, la variabilidad de los parámetros del medio a medir determinará tanto el tráfico como la topología de la red. Por otro lado, como se menciona en el Capítulo 1, en la mayoría de los casos los nodos que constituyen las redes WSN funcionan con baterías no recargables. Por ello, limitar el uso innecesario de energía por parte del nodo sensor durante su ciclo de trabajo es un proceso fundamental, que debe ser considerado en los estudios previos a la implementación de la red.

A continuación se presentarán el modelo y características de las redes de sensores inalámbricos que se utilizaron en la simulación.

3.1. Modelo y características de la red de sensores inalámbricos.

La red WSN se diseñó para manejar 2 tipos de nodos, que son un nodo *sink* y varios nodos esclavos. Cada uno de los nodos emplea el estándar IEEE 802.15.4 en la banda de frecuencia 2.4 GHz, la cual utiliza el esquema de modulación O-QPSK y una tasa de transmisión de 250 kbps [66].

Se tienen parámetros de entrada y salida, que son todas aquellas variables que permiten cambiar las características de la red WSN, y que debido a estas variaciones se pueden obtener distintos valores o comportamientos en dicha red. A continuación se indican todos los parámetros de entrada que son configurables por el usuario y cuáles son los valores o parámetros que se obtienen de salida.

Los parámetros configurables, es decir, las entradas del modelo son:

- Potencia de transmisión P_0 , en un rango de 0 a 18 dBm.
- Frecuencia de la señal f .
- Distancia entre los nodos sensores d , tiene un rango de 0 a 100 metros.
- Tasa de transmisión R .
- Número de nodos sensores transmitiendo simultáneamente k , tiene un rango de 1 a 10.
- Tamaño del paquete X , máximo de 127 bytes.

Para cada una de las configuraciones de simulación se extraerán como resultados los siguientes parámetros:

- Potencia de la señal recibida.
- Relación señal a ruido SNR .
- Relación de energía de señal por bit a la densidad de potencia de ruido por Hertz $E_b N_0$.
- Relación Portadora/Interferencia (C/I).
- Tasa de Error de Bit (BER).
- Tasa de Error por paquete PER .
- Probabilidad de que el canal este libre la primera vez que se esta sensando.
- Probabilidad de que el canal este libre por segunda vez consecutiva y de esa manera transmitir el paquete.

- Probabilidad de descartar el paquete.
- Probabilidad de una transmisión exitosa.
- Probabilidad de una colisión del paquete.
- El rendimiento (*Throughput*) de la red

Las características de la red que se simuló son:

- Los nodos sensores están distribuidos aleatoriamente en una región cuadrada de $M \times M$. El área de implementación de 100×100 metros.
- Se despliegan los nodos de manera determinista.
- El área de implementación puede ser tanto en exteriores como en interiores.
- Dentro del área de implementación, los nodos sensores no se encuentran en movimiento, esto significa que una vez desplegados ya no cambiarán de posición.
- El sensado esta basado por eventos.
- Se propone el *cluster head*, el cual es el nodo con mayor capacidad de procesamiento, memoria y energía.
- Dependiendo de la distancia euclidiana del destinatario, el nodo ajusta la potencia de transmisión P_0 .

Los niveles de P_0 son Super Bajo: 0 dBm, Bajo: 4 dBm, Medio:10 dBm, Alto: 14 dBm, Super Alto: 18 dBm.

A continuación se presentarán las diversas simulaciones realizadas sobre la metodología en la implementación de redes de sensores inalámbricos, presentada en Figura 2.2 y considerando la interrelación de parametros presentados en la Figura 2.1.

3.2. Experimento 1: Análisis de la Capa física PHY

Para el análisis de la capa física se siguieron los pasos del algoritmo del modelo analítico de la capa física, presentado en Figura 2.3.

Como estándar de implementación se eligió el IEEE 802.15.4 en la banda de frecuencia de 2.4 GHz. Siguiendo con lo que dicta dicho estándar, a la frecuencia de operación seleccionada, el esquema de modulación sugerido es O-QPSK, con un ancho de banda entre canales de 2 MHz, una tasa de transmisión de 250 kbps, una tasa de chips de 2 Mchips/s y 32 chips por segundo [66].

De acuerdo a la aplicación, los nodos en una red WSN tendrán diferentes distancias de comunicación entre ellos. Por lo que, en la simulación se consideró un rango de distancia d de 0 hasta 100 metros.

Aunado a lo anterior, la potencia de transmisión P_0 también se consideró como variable, con un rango de valores de 0 dBm hasta 18 dBm, con un incremento de 2 dBm.

Por alcance del trabajo, solo se consideró el espacio de implementación en exteriores, por lo que el exponente de pérdida de trayectoria $n = 2$ (Tabla 2.1).

Lo primero a simular fue la variación de la potencia de la señal recibida en función de la potencia de transmisión y la distancia. La Figura 4.1 presenta los resultados obtenidos.

Ya que se calculó la potencia de la señal recibida, lo siguiente es calcular la relación señal a ruido en el receptor, ya que es un parámetro fundamental para la caracterización del desempeño de un enlace inalámbrico. Los resultados se exponen en la Figura 4.2.

Continuando con el algoritmo, lo siguiente a simular fue la relación de energía de señal por bit a la densidad de potencia de ruido por Hertz E_b/N_0 , la cual sirve para indicar la calidad de la señal con respecto al ruido, y depende de la técnica de modulación utilizada, en este caso únicamente se empleó la modulación O-QPSK, los resultados se muestran en la Figura 4.3.

En términos generales, dependiendo de la distancia y potencia de transmisión será el rendimiento del enlace digital, pero la energía por bit, E_b , permanece constante mientras no cambie la velocidad de transmisión, por lo que en la Figura 4.4 se presentan los resultados del parámetro E_b/N_0 para diferentes tasas de transmisión.

Cuando se planifica una red de sensores inalámbricos es importante identificar posibles interferencias que podrían degradar la calidad de la red. Éstas pueden provenir de otras redes ya instaladas, pero también de la propia red WSN. Y es aquí donde es importante la relación Portadora/Interferencia (C/I), cuyos resultados se presentan en la Figura 4.5.

En los parámetros anteriores, solo se consideraron como variable de entrada la distancia entre nodos, potencia de transmisión y tasa de transmisión pero para el cálculo de la Tasa de Error de Bit (BER), es necesario tener en cuenta otra variable, la cual es el número de nodos que están transmitiendo de forma simultánea. La Figura 4.6 presenta los resultados obtenidos.

Otra variable que afecta la Tasa de Error de Bit es la tasa de transmisión, por lo que las Figura 4.7 y Figura 4.8 presentan los resultados obtenidos.

Lo último a evaluar en la capa física de acuerdo a la metodología (Figura 2.3) es Tasa de Error por paquete PER, la cual depende del tamaño del paquete. Las Figura 4.9, Figura 4.10, Figura 4.11 y Figura 4.12 presentan los resultados obtenidos.

Ya que se obtuvieron los parámetros correspondientes a la capa física, lo siguiente es analizar el comportamiento de la capa de acceso al medio.

3.3. Experimento 2: Análisis de la Capa de acceso al medio MAC

Ya realizadas las simulaciones correspondientes de la capa física, lo siguiente es interrelacionar los valores obtenidos con la capa de acceso al medio.

De acuerdo al algoritmo presentado en la Figura 2.4, las variables de la capa MAC dependen del tamaño de la carga útil (como se mencionó en párrafos anteriores, depende la aplicación) y del número de nodos sensores que estarán transmitiendo de forma simultánea (depende de la topología de la red WSN que a su vez depende de las dimensiones del área de implementación).

La simulación de la capa de acceso al medio está basada en el algoritmo CSMA/CA Ranurado (Figura 1.8), donde cada nodo sensor de la red WSN debe detectar libre el canal dos veces consecutivas para poder enviar el paquete.

La primera simulación que se realizó fue el cálculo de la probabilidad de que el canal este libre la primera vez que se esta sensando el canal P_{sens} (Ecuación 2.13), es decir la primera evaluación *Clear Channel Assessment* (CCA), la cual depende del tamaño del paquete, y cuyos resultados se presentan en la Figura 4.13.

Si la primera evaluación CCA es exitosa, lo siguiente es monitorear por segunda vez consecutiva el canal para poder enviar el paquete. Por lo que lo siguiente a simular fue el cálculo de la probabilidad de que el canal se detecte como libre en la segunda evaluación CCA P_{cca} (Ecuación 2.10) y así enviar el paquete. Los resultados de este cálculo son presentados en la Figura 4.14.

Ya que se envía el paquete, lo siguiente a calcular es la probabilidad de que la transmisión sea exitosa P_{tx} (Ecuación 2.14) o que el paquete sufra una colisión. La Figura 4.15 muestra los resultados obtenidos.

Si el nodo sensor realiza varios monitoreos del canal y no logra dos veces consecutivas detectar libre el canal, el paquete se descarta, la Figura 4.16, presenta los resultados del cálculo de la probabilidad de que el paquete sea descartado.

Si el paquete se logra enviar de manera exitosa, lo último a calcular es el rendimiento (*Throughput*) de la red. La Figura 4.17 muestra los resultados.

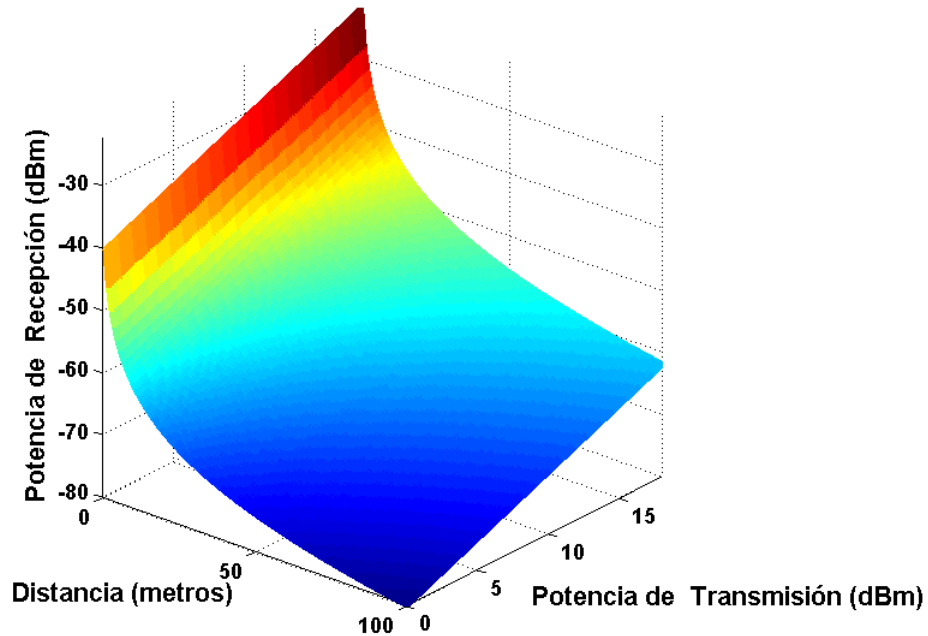
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Resultados de Experimento 1: Análisis de la Capa física PHY

De acuerdo a Sección 3.2, lo primero a simular fue la variación de la potencia de la señal recibida en función de la potencia de transmisión y la distancia, cuyos resultados se muestran en la Figura 4.1. En dichos resultados se observa, que a medida que la distancia entre los nodos sensores se incrementa, la potencia de la señal recibida disminuye, tal es el caso de 100 metros, donde con una potencia de transmisión de 0 dBm se tiene una señal recibida de -80.06 dBm; mientras que con los mismos 0 dBm de potencia de transmisión, a una distancia de 1 metro se tienen -40.15 dBm de señal recibida. Otro parámetro que afecta la potencia de la señal recibida es la potencia de transmisión, regresando a los 100 metros, pero ahora con una potencia de transmisión de 18 dBm se obtiene una señal recibida -62.06 dBm, y para el caso de 1 metro es de -22.15 dBm.

Considerando la sensibilidad de hasta -100 dBm que indica el estándar en la recepción de señales [66], en los resultados se observa que aún enviando señales con la mínima potencia de transmisión (esto es 0 dBm) y la máxima distancia entre los nodos sensores (es decir, 100 metros), el modelo empleado en la metodología Figura 2.2 cumple con lo que dicta el estándar.

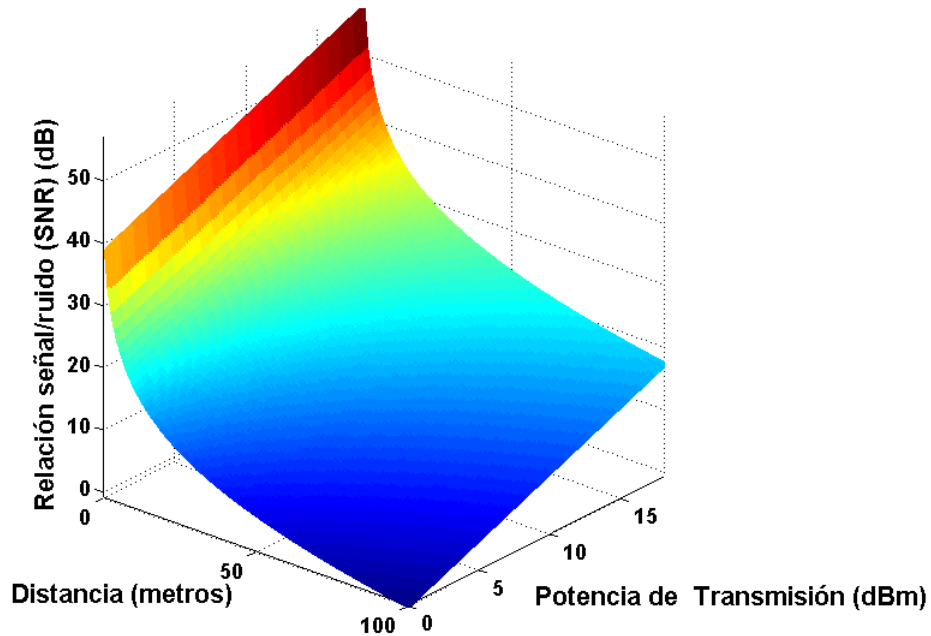
En los resultados obtenidos sobre la potencia de la señal recibida, se obtuvo que dicha potencia depende de la potencia de la señal transmitida y de la atenuación de trayecto entre el nodo transmisor y el nodo receptor. Por lo tanto, lo siguiente que se analizó es la relación señal a ruido en el receptor SNR (Figura 4.2). Se observa que a medida que la distancia entre los nodos sensores se hace mayor, la calidad de la señal recibida empeora; ejemplo en una distancia de 100 metros con una potencia de transmisión de 0 dBm el valor de la tasa SNR es de -0.903 dB, y 57.01 dB transmitiendo con 18 dBm.

Potencia Recibida en función de la Potencia de Transmisión y Distancia**Figura 4.1.:** Potencia de la señal recibida en función de la potencia de transmisión y la distancia.

Estos resultados son útiles, para estimar la calidad del enlace inalámbrico en una red WSN al momento de implementarla. Ya que dependiendo de la aplicación, se determinará el valor mínimo aceptable de la tasa SNR, y esto servirá para definir la potencia de transmisión de cada nodo sensor que a su vez dependerá de la distancia entre el nodo sensor y el nodo *sink*.

Lo siguiente que se simuló fue la relación de energía de señal por bit a la densidad de potencia de ruido por Hertz E_bN_o (Figura 4.3), estos resultados ayudan a determinar cómo será el rendimiento del enlace digital. Considerando un escenario donde los nodos sensores estén transmitiendo con 0 dBm y a una distancia de 100 metros entre ellos, el valor de $E_bN_o=8.128$ dB, mientras que si se mantiene la misma distancia, pero se aumenta la potencia de transmisión a 18 dBm, ahora $E_bN_o=26.13$ dB. En los resultados se observa, que a medida que la distancia entre los nodos sensores disminuye, E_bN_o tiene mejores resultados. Si consideramos ahora una distancia de 1 metro entre los nodos sensores y unas potencias de transmisión de 0 dBm y 18 dBm, E_bN_o es igual a 48.04 dB y 66.04 dB, respectivamente.

Así como el parámetro E_bN_o depende de la distancia y potencia de transmisión, también se ve afectada por la velocidad de transmisión, en la Figura 4.4 se presentan los resultados obtenidos, al variar la tasa de transmisión. La Figura 4.4(a) es con una potencia de transmisión de 0 dBm, mientras que en la Figura 4.4(b) la potencia de transmisión es de 18 dBm. Como

Relación señal/ruido en función de la Potencia de Transmisión y Distancia**Figura 4.2.:** Relación Señal a Ruido en el receptor en función de la potencia de transmisión y la distancia.

era de esperarse a mayor potencia de transmisión el valor obtenido de del parámetro E_b/N_0 es mejor, significa que la energía del bit es mayor en comparación con el ruido. Pero en ambos casos, se consideraron diferentes tasas de transmisión, y se obtuvo que a menor velocidad, la energía por símbolo es mayor, y por lo tanto la energía del bit aumenta (considerando que el ruido siempre tiene el mismo nivel). Por lo que entre menor sea la velocidad, mayor será la diferencia entre la energía de bit con respecto a la energía del ruido. Si la velocidad de transmisión aumenta el tiempo del símbolo es menor, por lo que si el tiempo del símbolo es menor la energía por bit disminuye. En el caso de transmitir con 18 dBm (Figura 4.4(b)), para una tasa de transmisión de 20 kbps y a una distancia entre nodos sensores de 1metro, se tiene un valor del parámetro E_b/N_0 aproximado de 80 dB, mientras que con 250 kbps es de aproximadamente 75 dB. Lo que significa que dependiendo la aplicación se tiene que emplear la tasa de transmisión adecuada a la red, ya que aunque el estándar indica una tasa de transmisión de 250 kbps [66], no significa que es obligatorio emplearla en caso de no ser necesario.

Una vez simulada y analizada la calidad de la señal de la red WSN considerando solo el ruido del canal, potencia de transmisión, distancia entre nodos sensores y tasa de transmisión, es importante definir la calidad de la señal recibida en términos de interferencias (de la propia red o de redes externas), para eso se utiliza la relación portadora a interferencia, (C/I) , la

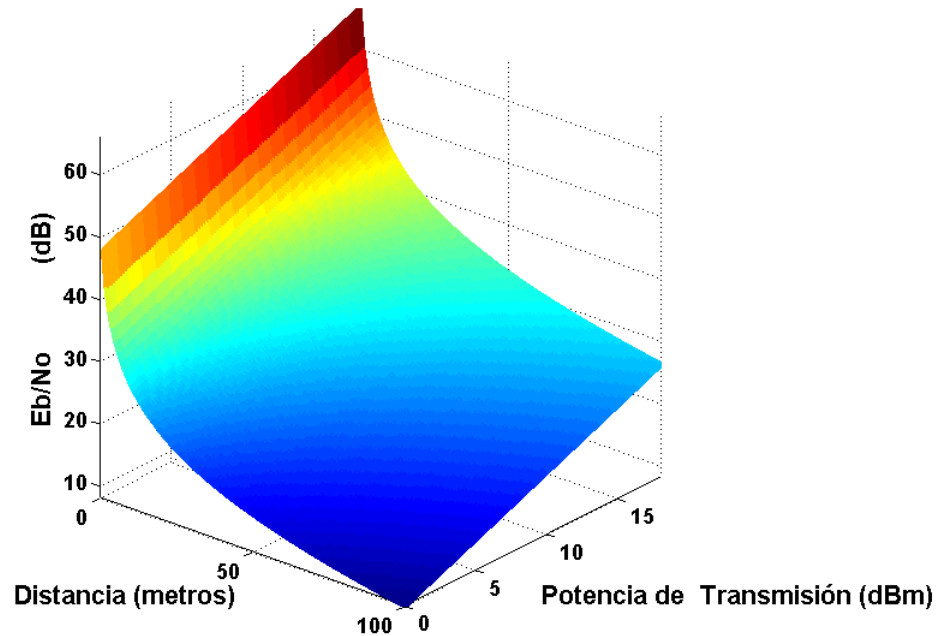
Relación de Energía de Señal por Bit a la Densidad de Potencia de Ruido por Hertz

Figura 4.3.: Relación de energía de señal por bit a la densidad de potencia de ruido por Hertz E_b/N_0 , con una modulación O-QPSK y una tasa de transmisión de 250 kbps.

cual depende del valor de del parámetro E_b/N_0 , de la tasa de transmisión y la tasa de chips (2 Mchips/s, para el esquema de modulación OQPSK, de acuerdo al estándar [66]).

Considerando que las redes WSN son redes densamente pobladas, la interferencia en la misma red (Figura 4.5) depende tanto de la distancia entre los nodos sensores como de la potencia de transmisión. En el caso de menor distancia entre los nodos sensores, mayor es la interferencia que se presenta entre ellos. Con una potencia de transmisión de 18 dBm en 1 metro de distancia entre nodos sensores la simulación de la red arrojó como resultado 57.01 dB de (C/I) , conforme la distancia entre nodos sensores aumenta, la interferencia disminuye, tal es el caso de ahora en 10 metros la interferencia es de 37.01 dB, mientras que a 50 metros es de 23.03 dB y a 100 metros es de 17.01 dB.

Pero como se mencionó en el párrafo anterior, la interferencia también depende de la potencia de transmisión, por lo que ahora con 10 dBm, con una distancia de 1 metro se tiene 39.01 dB de interferencia, mientras que a 10 metros se tienen 19.47 dB, a 50 metros el valor es de 5.212 dB, y a 100 metros se tienes -0.903 dB.

Estos resultados son muy útiles para el análisis de la interferencia de redes externas, ya que dependiendo la distancia entre las redes, la interferencia existente entre ellas variará. A pesar de que la tasa de transmisión es necesaria para realizar el cálculo de la relación portadora a interferencia (Ecuación 2.6), en las simulaciones realizadas con diferentes valores de tasas de

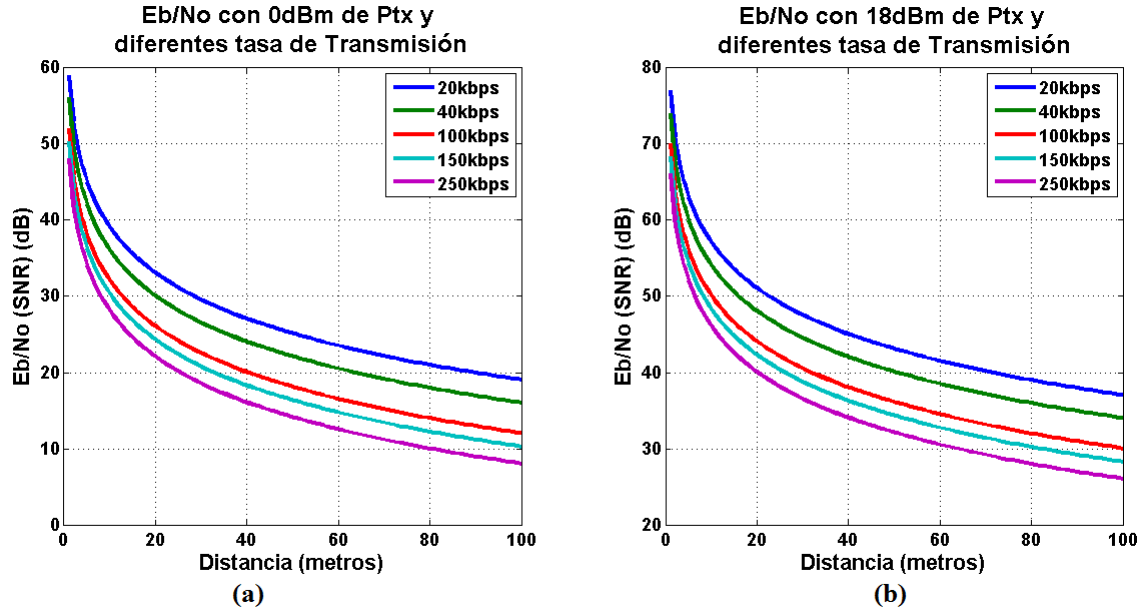


Figura 4.4.: Relación de energía de señal por bit a la densidad de potencia de ruido por Hertz E_b/N_0 , con una modulación O-QPSK y diferentes tasas de transmisión. a) Con una potencia de transmisión de 0 dBm; b) Con una potencia de transmisión de 18 dBm.

transmisión, el (C/I) permaneció constante, y esto se debió al hecho de que se divide entre la tasa de chips, que es un valor muy grande en comparación con la tasa de transmisión y esto estabiliza la relación portadora a interferencia.

Lo siguiente a simular y analizar, es la Tasa de Error de Bit (BER), en la cual es necesario considerar el número de nodos sensores que están transmitiendo de forma simultánea. La Figura 4.6 presenta los resultados obtenidos. En esta simulación se consideraron hasta 10 nodos sensores que están transmitiendo de forma simultánea con una tasa de transmisión de 250 kbps. Considerando que en ambientes con interferencia, la tasa de BER esperado es de aproximadamente 10^{-3} [65], en los resultados obtenidos se observa que a 100 metros con 0 dBm de potencia de transmisión, la tasa de BER es de 6×10^{-3} , pero conforme aumente la potencia la tasa de BER mejora, y esto se puede observar en resultados, donde en la misma distancia (100 metro) pero con 18 dBm de potencia de transmisión, ahora la tasa de BER es de 1.132×10^{-3} .

Pero así como la tasa de BER depende de la potencia de transmisión, también se ve afectado por la distancia entre los nodos sensores, como se observa en la Figura 4.6, donde a una distancia ahora de 1 metro, el valor de la tasa de BER es de aproximadamente 1×10^{-3} en el caso de 18 dBm, y 1.09×10^{-3} para 0 dBm.

Estos valores son útiles al momento de hacer el diseño de la topología de la red, ya que se

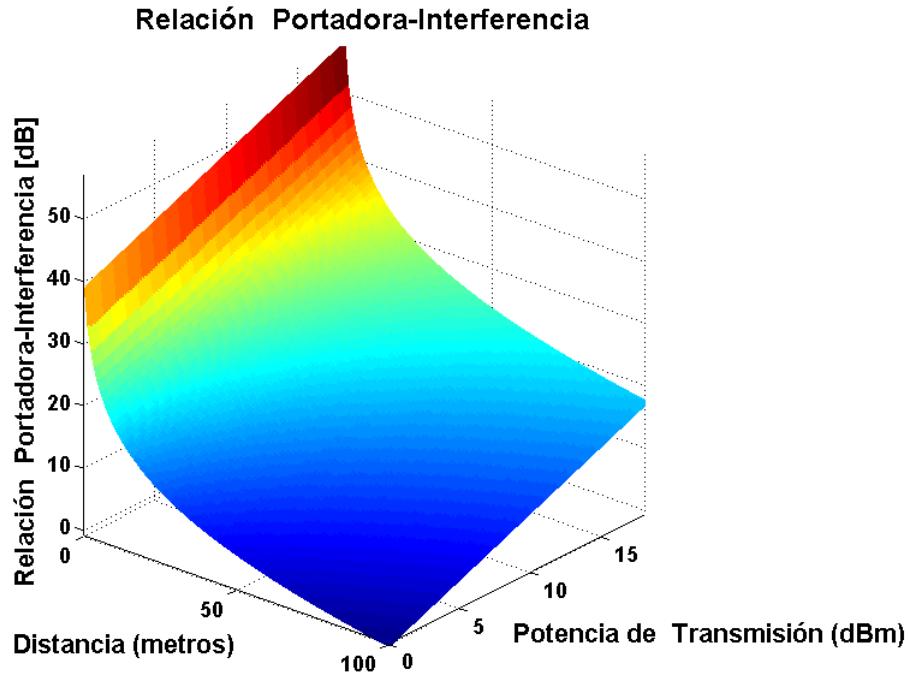


Figura 4.5.: Relación Portadora-Interferencia.

sabe que a medida que aumenta el número de nodos sensores que están transmitiendo de forma simultánea la Tasa de Error de Bit se incrementará, y es donde la metodología que se esta presentando es valiosa, ya que previene la mayoría de las fallas que puede tener la red WSN antes de implementarse.

Si se tiene en cuenta que la Tasa de Error de Bit también depende de la tasa de transmisión, lo siguiente a simular es como se ve afectada esta variable y si el número de nodos sensores que están transmitiendo de forma simultánea puede aumentar. La Figura 4.7 presenta los resultados obtenidos, donde se incrementa el número de nodos sensores que transmiten de forma simultánea a 20, y se simuló con 2 diferentes potencias de transmisión. La Figura 4.7 (a) muestra el caso de una potencia de transmisión de 0 dBm, donde a medida que aumenta la tasa de transmisión la tasa de BER aumenta. Se observa que a una distancia de 100 metros con 20 kbps la tasa de *BER* es de 25×10^{-3} lo cual es superior al valor mínimo esperado. Aunque la distancia entre los nodos sensores disminuya, aun así el valor de la tasa de *BER* es superior a 10^{-3} [65]. Y un caso similar ocurre con 18 dBm (Figura 4.7 (b)), donde el valor mínimo es de 24×10^{-3} .

Estos valores son útiles al momento de hacer el análisis de interferencias de otras redes al momento de implementar la red WSN, y así evaluar como se vera afectada la Tasa de Error de Bit por redes vecinas dependiendo de la distancia que haya entre los nodos sensores de la

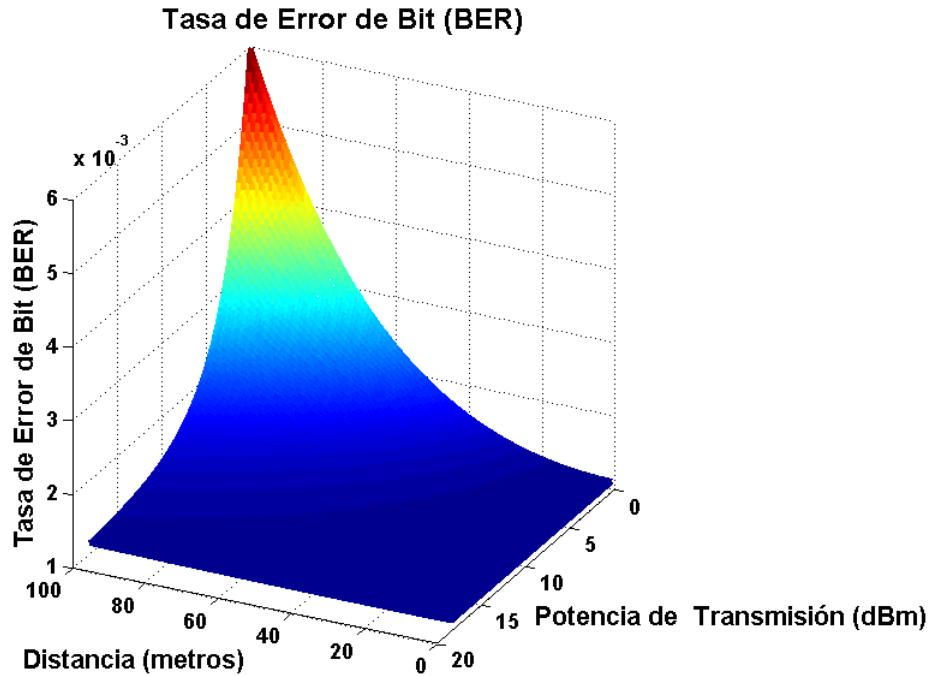


Figura 4.6.: Tasa de Error de Bit (BER)

propia red WSN y/o redes externas, y así tener un estimado de cuantos bit erróneos habrá por paquete dependiendo de los nodos sensores que estén transmitiendo de forma simultánea, la tasa de transmisión a la que estén enviado y la potencia de transmisión.

Realizando un ajuste al número de nodos sensores que transmiten de forma simultánea a 15, la Figura 4.8 muestra los resultados obtenidos. En el caso de la potencia de transmisión de 0 dBm (Figura 4.8 (a)), con una tasa de transmisión de 20 kbps a la distancia de 100 metros, la tasa de *BER* es de 9.558×10^{-3} , cuyo valor es aceptable de acuerdo al estándar [66]; al incrementar la tasa de transmisión a 40 kbps ahora la tasa de *BER* es de 10.29×10^{-3} , que estrictamente hablando ya esta fuera de las especificaciones, pero para fines prácticos podría ser aceptable. Al aumentar a 100 kbps la tasa de transmisión, la tasa de *BER* es de 12.76×10^{-3} , lo cual ya no es aceptable, pero si se disminuye la distancia entre nodos sensores a 60 metros, ya la tasa de *BER* es aceptable; lo mismo sucede en el caso de 150 kbps, donde la distancia máxima ahora es de 45 metros, mientras que en 250 kbps es de aproximadamente 35 metros.

Para el caso de la potencia de transmisión de 18 dBm (Figura 4.8 (b)), en la Figura 4.6 se observo que a mayor potencia de transmisión mejores resultados de la tasa de BER, por lo que con una tasa de transmisión de 20 kbps a la distancia de 100 metros, la tasa de *BER* es de 8.84×10^{-3} ; con 40 kbps la tasa de *BER* es de 8.851×10^{-3} ; con 100 kbps la tasa de *BER*

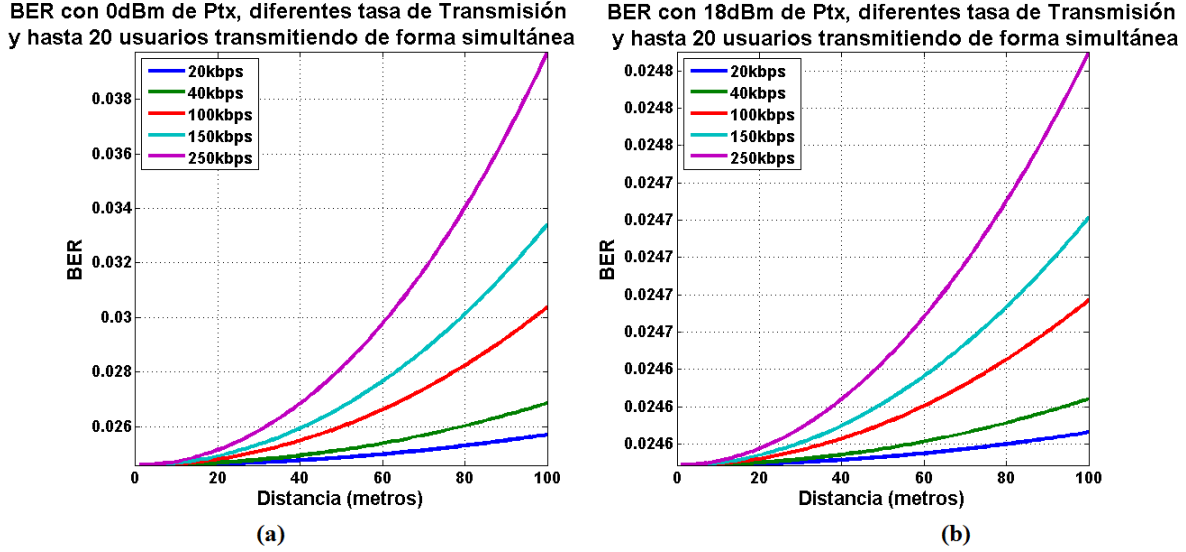


Figura 4.7.: Tasa de Error de Bit (BER) con hasta 20 nodos sensores transmitiendo de forma simultánea y diferentes tasas de transmisión. a) Con una potencia de transmisión de 0dBm; b) Con una potencia de transmisión de 18dBm.

es de 8.884×10^{-3} ; con 150 kbps la tasa de BER es de 8.914×10^{-3} y con 250 kbps la tasa de BER es de 8.971×10^{-3} .

Estos valores sirven para hacer un diseño de la topología de la red más preciso, ya que dependiendo de la aplicación se determinara la tasa de transmisión. Dependiendo de las dimensiones del área de implementación serán las distancias entre los nodos sensores y como consecuencia su potencia de transmisión, y se tendrá un estimado de cuantos bits erróneos enviara cada nodo sensor.

Y lo último, de acuerdo a la metodología (Figura 2.3) a evaluar es la Tasa de Error por paquete PER , que depende del tamaño del paquete. Conforme al estándar la máxima carga útil permitida es de 127 bytes [66].

En la primer simulación se consideró la máxima carga útil con 15 nodos sensores transmitiendo simultáneamente y una tasa de transmisión de 250 kbps; los resultados son presentados en la Figura 4.9, donde se observa que dichos valores no son factibles, ya que la tasa de PER que se obtiene es del 100 %, que significa que todos los paquetes se perderán. Si se disminuye la tasa de transmisión a 20 kbps, la simulación arroja resultados de 99.99 % de tasa de PER . Por lo que a pesar de que los resultados obtenidos indicaron que se podría tener hasta 15 nodos sensores transmitiendo simultáneamente, ya al momento de considerar la Tasa de Error por paquete PER , ya no es viable. En caso de que la red WSN a implementarse sea densamente poblada y sean necesarios múltiples nodos sensores transmitiendo simultáneamente, lo que

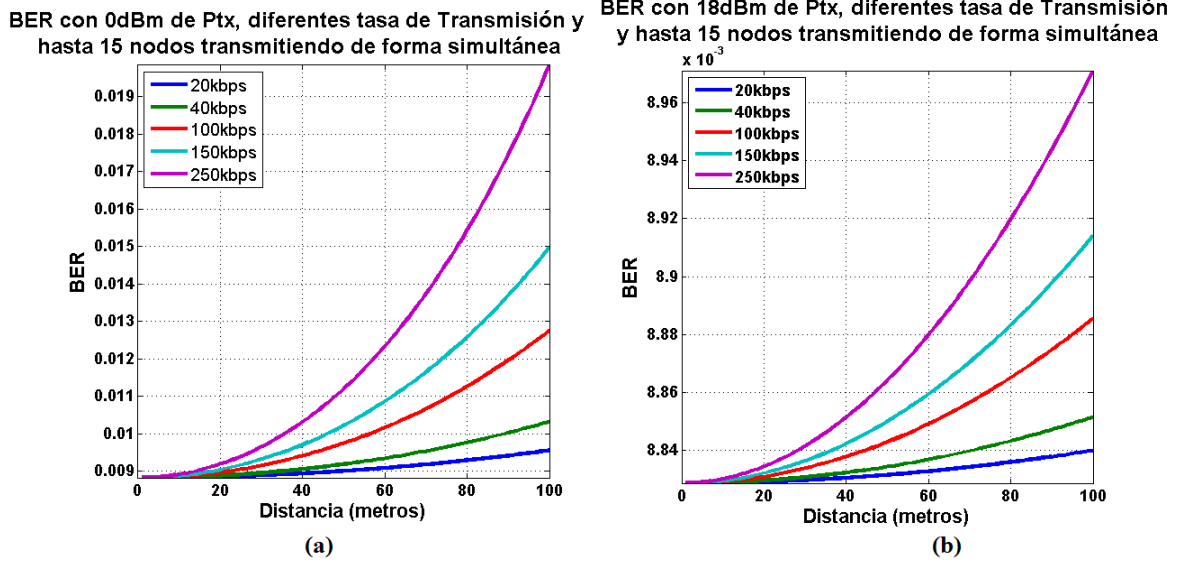


Figura 4.8.: Tasa de Error de Bit (BER) con hasta 15 nodos sensores transmitiendo de forma simultánea y diferentes tasas de transmisión. a) Con una potencia de transmisión de 0dBm; b) Con una potencia de transmisión de 18dBm.

se sugiere es implementar una topología agrupación (*cluster*), como la que se propone en la Figura 2.5.

Si se implementa una red WSN con una topología agrupación (*cluster*), disminuye el número de nodos sensores que estarán transmitiendo de forma simultánea, ya que a cada *cluster* se le asigna una frecuencia de operación distinta para así disminuir las interferencias. Teniendo esto en consideración, se simuló ahora con 5 nodos sensores transmitiendo simultáneamente (con 250 kbps y 127 bytes de carga útil). Los resultados son presentados en la Figura 4.10. Se observa que cuando se emplea una potencia de transmisión de 0 dBm y la distancia entre los nodos sensores es de 100 metros, se presenta la máxima Tasa de Error por paquete de 35.48 %, cuyo valor es superior al aceptado por el estándar (1 %) [66]. Si se aumenta la potencia de transmisión (considerando la misma distancia), la tasa de PER ahora es de 12.26 %, que es aún superior a lo que dicta el estándar, pero dependiendo de la aplicación se debe valorar si este valor podría ser aceptable. Si disminuye la distancia entre los nodos sensores a 50 metros con una potencia de transmisión de 0 dBm de tasa de PER es de 1.196 % y con 18 dBm se tiene 0.10 %, cuyos valores ya están dentro de lo que indica el estándar. Con distancias menores a 1 metro entre los nodos sensores, con diferentes potencias de transmisión se tienen valores aproximados de 0.10 % de tasa de PER.

En los resultados que se han presentado hasta el momento, cada nodo sensor envía paquetes con la máxima carga útil (127 bytes) con hasta 5 nodos sensores transmitiendo de forma simultánea y 50 metros la Tasa de Error por paquete se puede considerar aceptable.

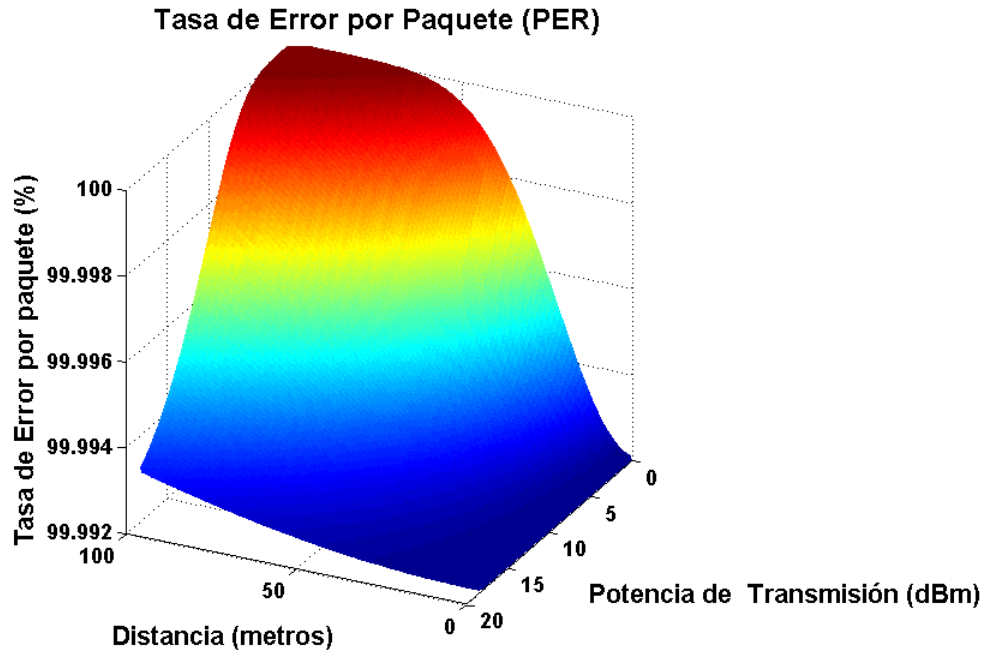


Figura 4.9.: Tasa de Error por paquete PER, con 15 nodos sensores transmitiendo simultáneamente, con 127 bytes carga útil de y una tasa de transmisión de 250 kbps.

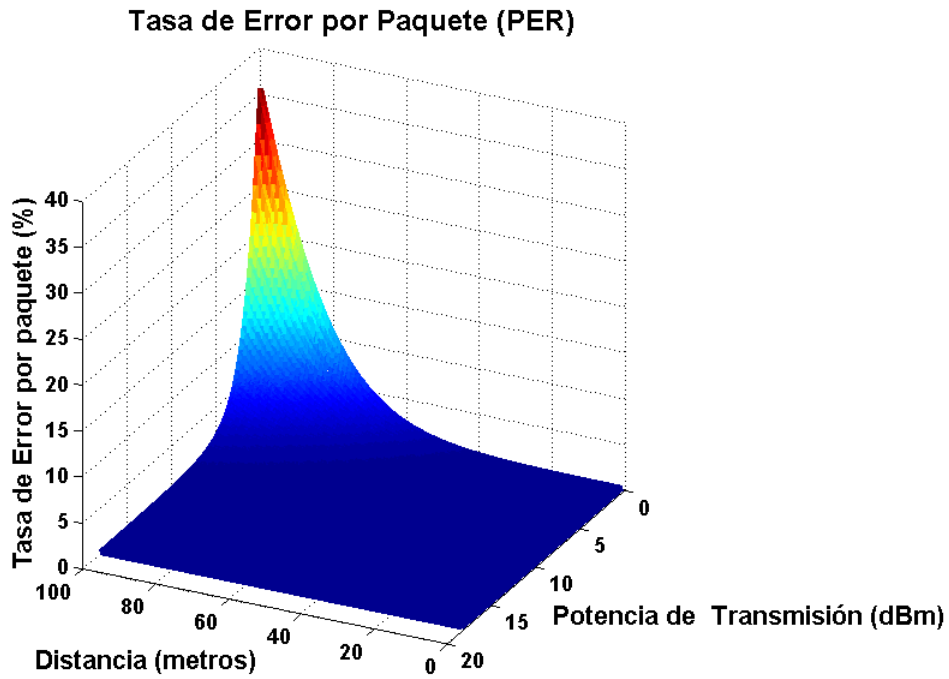


Figura 4.10.: Tasa de Error por paquete PER, con 5 nodos sensores transmitiendo simultáneamente, con 127 bytes carga útil de y una tasa de transmisión de 250 kbps.

Considerando que la tasa de error por paquete depende de la carga útil, en las siguientes simulaciones se realizaron variaciones a la carga útil con diferentes tasas de transmisión y ver así como se ve afectado la tasa de PER y como el número de nodos sensores que están transmitiendo de forma simultánea puede aumentar o disminuir, dependiendo de cada caso. Con una potencia de transmisión de 0 dBm, se observa en la Figura 4.11 que al disminuir la carga útil, disminuye la tasa de error por paquete. Si se es muy riguroso a lo que dicta el estándar, donde el máximo valor de tasa de PER permitido es de 1 % (línea amarilla en la Figura 4.11), no se logra que 6 nodos sensores transmitan simultáneamente y al aumentar a 127 Bytes la carga útil con una tasa de transmisión de 250 kbps el máximo número de nodos sensores que transmitirán simultáneamente son 4, esto indica que al aumentar el tamaño del paquete aumenta la tasa de error por paquete y sucede lo mismo al aumentar la tasa de transmisión.

Pero como se ha mencionado en párrafos anteriores, todo depende de la aplicación, y el valor de tasa de PER podría ser mayor al 1 %, si se considera un valor máximo de tasa de PER del 10 %, ahora en 40 bytes con 20 kbps se pueden tener hasta 8 nodos sensores transmitiendo simultáneamente, y con 127 bytes y 250 kbps se podrían tener hasta 6 nodos sensores.

Al aumentar la potencia de transmisión a 18 dBm (Figura 4.12) y considerando una tasa de error por paquete de 10 % como máximo valor aceptable, se observa que el máximo número de nodos sensores que transmitirán simultáneamente sigue siendo 8. Un resultado interesante que se observa es la tasa de PER de 80 bytes a 100 kbps y 250 kbps tienen valores muy similares, lo mismo sucede con 127 bytes.

Estos resultados indican que dependiendo de la aplicación (variable a sensor) determinará el tamaño de la carga útil y la tasa de transmisión.

Una vez analizada la capa física, lo siguiente es relacionar estos parámetros con los correspondientes a la capa de acceso al medio.

4.2. Resultados de Experimento 2: Análisis de la Capa de acceso al medio MAC

El análisis y simulación de la capa de acceso al medio se basó en el algoritmo CSMA/CA Ranurado (Figura 1.8). De acuerdo a este algoritmo, para que el nodo sensor pueda enviar el paquete al nodo receptor debe detectar libre el canal dos veces consecutivas.

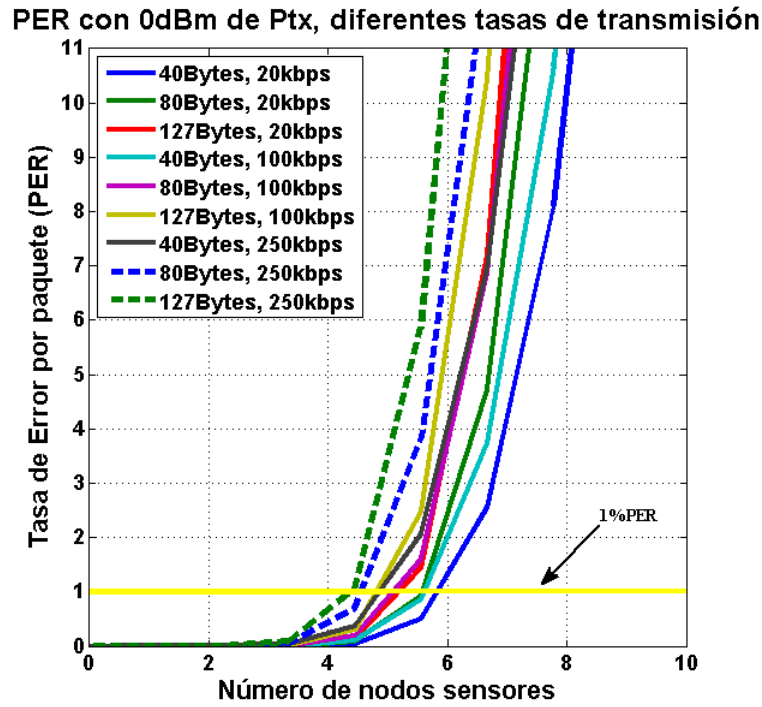


Figura 4.11.: Tasa de Error por Paquete PER, con múltiples nodos sensores transmitiendo simultáneamente, diferentes carga útiles, diversas tasas de transmisión y una potencia de transmisión de 0 dBm.

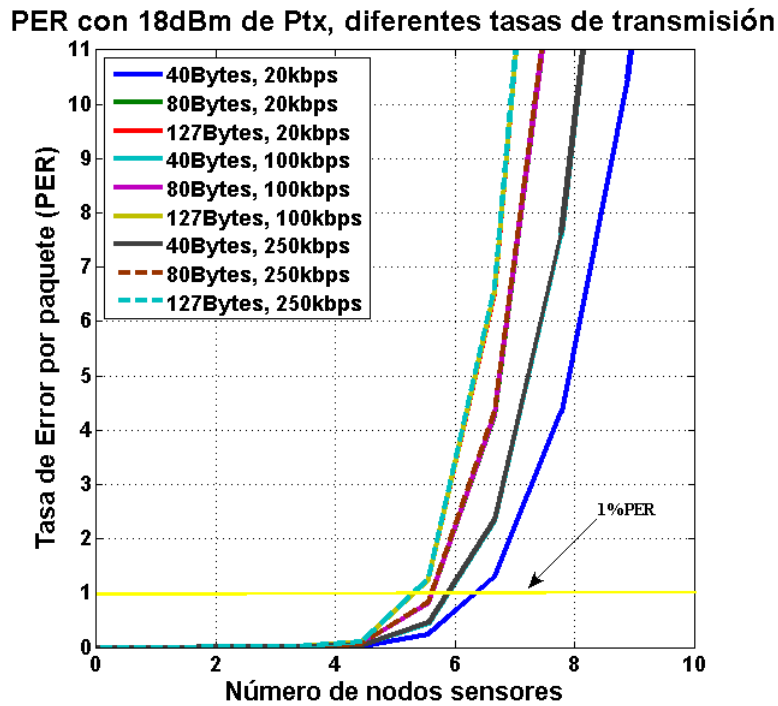


Figura 4.12.: Tasa de Error por Paquete PER, con múltiples nodos sensores transmitiendo simultáneamente, diferentes carga útiles, diversas tasas de transmisión y una potencia de transmisión de 18 dBm.

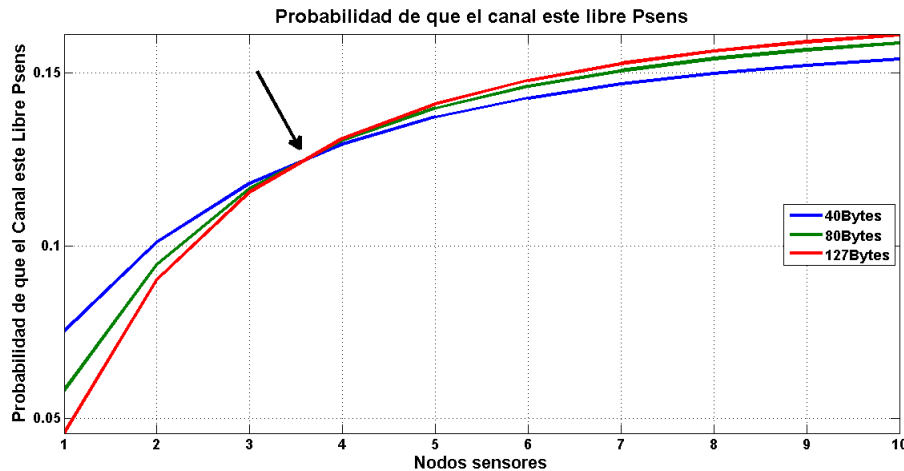


Figura 4.13.: Probabilidad de que el Canal este Libre P_{sens}

El primer cálculo es la probabilidad de que el canal se detecte como libre la primera vez que se esta sensando P_{sens} (*Clear Channel Assessment* ó CCA). Si $P_{sens} = 0$ significa que el canal está libre, mientras que $P_{sens} = 1$ el canal está ocupado. En la Figura 4.13 se observa que cuando hay un solo nodo sensor, P_{sens} es muy cercano a 0, lo que significa que cada vez que sense el canal lo detectará como libre, ya que no hay otro nodo sensor que este tratando de enviar su paquete, pero a medida que más nodos sensores tratan de enviar sus paquetes, la probabilidad de detectar libre el canal disminuye, es decir P_{sens} se acerca a 1. Un parámetro que afecta a la probabilidad de detectar libre el canal, es el tamaño del paquete. Se observa en la Figura 4.13 que a medida que aumenta el tamaño del paquete, la probabilidad de detectar libre el canal disminuye. Cuando hay menos de 3 nodos sensores transmitiendo simultáneamente, se presenta un comportamiento interesante, donde el paquete de 127 Bytes tiene una mayor probabilidad de detectar libre el canal, pero a medida que aumentan el número de nodos sensores, el paquete de menor tamaño ya tiene una mayor probabilidad de detectar libre el canal, y esto se debe a que el paquete ocupa menos tiempo el canal.

Si el nodo sensor detecta libre el canal la primera vez que lo esta monitoreando, espera un tiempo definido por T_{bk} y después monitorea por segunda vez consecutiva el canal para poder determinar si esta libre. Si en el segundo monitoreo el canal se detecta como libre, es decir, la segunda evaluación CCA, ya el nodo sensor puede enviar el paquete.

Si $P_{cca} = 1$, significa que el nodo sensor detecto libre el canal dos veces consecutivas, por lo tanto puede enviar su paquete al nodo destino; si $P_{cca} = 0$, significa que el canal se encuentra ocupado, por lo que el nodo sensor, tendrá que detectar de nuevo el canal libre una primera vez, esto es P_{sens} Figura 1.8. En la Figura 4.14 se presentan los resultados obtenidos de la

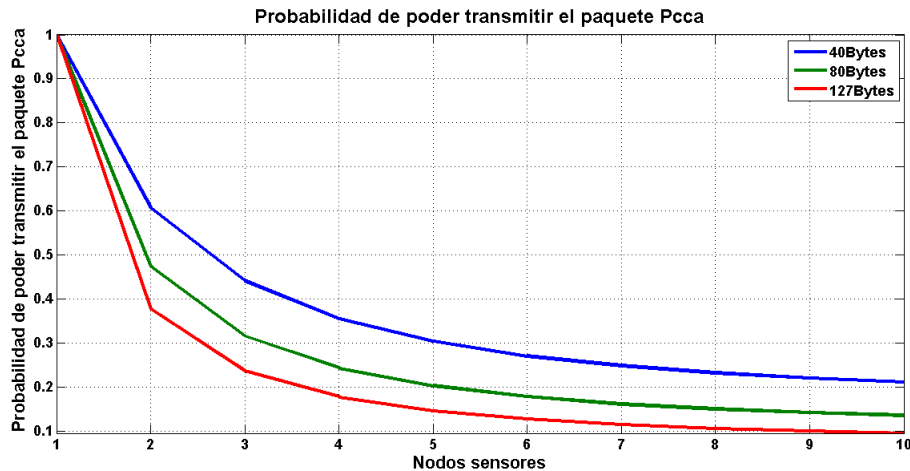


Figura 4.14.: Probabilidad de que el nodo sensor detecte libre el canal dos veces consecutivas, y pueda transmitir el paquete.

simulación de $Pcca$. Se observa que en el caso de un solo nodo sensor, para cualquier tamaño de paquete, $Pcca = 1$, esto se debe a que nadie más está compitiendo por transmitir. Pero con 2 o más nodos sensores que estén compitiendo por transmitir, se presenta un comportamiento similar al obtenido en $Psens$, donde a mayor tamaño del paquete y nodos sensores, menor es la probabilidad de detectar libre el canal la segunda vez (es decir, probabilidad de transmisión). Con un paquete de 127 bytes y 2 nodos sensores, el valor de $Pcca = 0.3772$, mientras que con 10 ahora $Pcca = 0.094$, significa que son pocas las probabilidades de que un nodo sensor, en una red densamente poblada, donde varios nodos estén transmitiendo simultáneamente, pueda enviar su paquete al nodo destino. Si se disminuye el tamaño del paquete a 80 bytes, con 2 nodos sensores, $Pcca = 0.4743$, mientras que con 10, $Pcca = 0.135$; mientras que con 40 bytes, considerando el caso de 2 y 10 nodos sensores, se tiene $Pcca = 0.6073$ y 0.2111 , respectivamente.

Si el nodo sensor logra enviar el paquete, lo siguiente por calcular es la probabilidad de que la transmisión sea exitosa P_{tx} (Ecuación 2.14) o que el paquete sufra una colisión. En la Figura 4.15 se observa que en el caso de un solo nodo sensor, la probabilidad de una transmisión exitosa siempre es 1, $P_{tx} = 1$ (Figura 4.15 a), esto significa que el nodo sensor cada que transmita un paquete, llegará de forma exitosa al nodo destino, es decir, no sufrirá colisiones, Figura 4.15b. Nótese, que sin importar el tamaño del paquete, a mayor número de nodos sensores que estén compitiendo por transmitir (o estén transmitiendo), mayor es la probabilidad de que el paquete sufra una colisión ($P_{tx} = 0$).

El nodo sensor al realizar continuos monitoreos del canal y no logra dos veces consecutivas

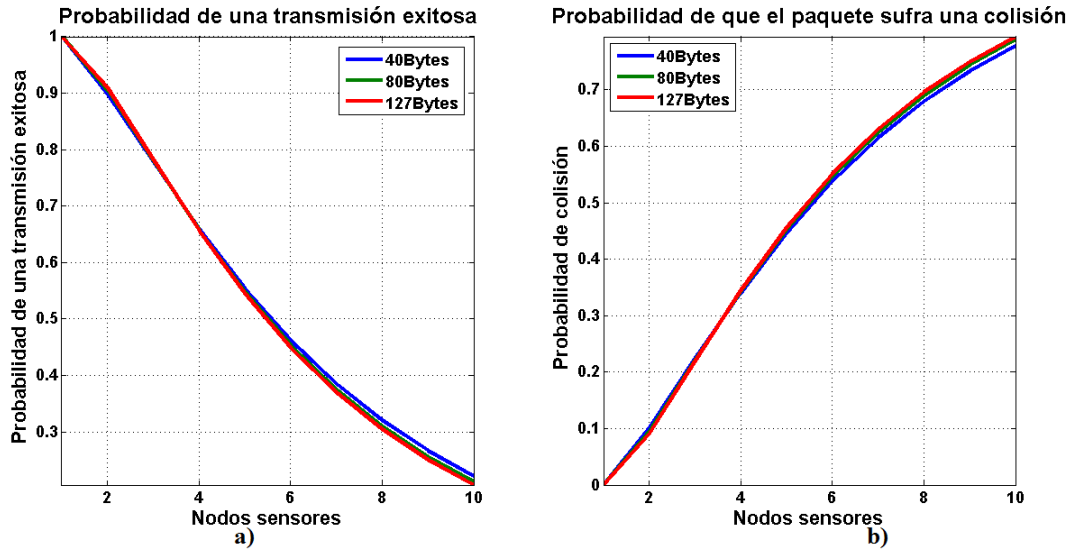


Figura 4.15.: Probabilidad de que a) la transmisión sea exitosa; b) el paquete sufra una colisión.

detectarlo como libre, el paquete se descarta. Si el resultado de la simulación da un valor igual a cero, significa que el paquete no será descartado. En la Figura 4.16 se observa que cuando hay un solo nodo sensor transmitiendo simultáneamente, siempre enviará su paquete, sin importar el tamaño de este, lo cual concuerda con los resultados de $Pcca$. A medida que aumentan los números de nodos sensores que estén tratando de transmitir (o estén transmitiendo) mayor es la probabilidad de que el paquete sea descartado. En el caso del paquete de 40 bytes, con 10 nodos sensores se tiene una probabilidad de 0.6480 de descartar el paquete. Se observa en la Figura 4.16 que a partir de 4 nodos sensores se tiene la misma probabilidad de enviar o de descartar el paquete. En el caso de un paquete de 80 y 127 bytes, se observa que a partir de 2 nodos sensores, ya es la misma probabilidad de enviar o de descartar el paquete, y con hasta 10 nodos sensores que estén transmitiendo de forma simultanea se tienen probabilidad de descartar el paquete de 0.7749 y 0.8418, respectivamente. Esto indica que a mayor tamaño de paquete mayor es la probabilidad de que este sea descartado.

Si el paquete se logra enviar de manera exitosa, lo último a calcular es el *Throughput* de la red, para redes inalámbricas el valor esperado esta entre 30 % al 60 % [65]. En la Figura 4.17 se observa que con un paquete de 40 bytes con un solo nodo sensor, el valor del *Throughput* es de aproximadamente 60 %, pero a medida que aumentan los nodos sensores, el valor disminuye hasta 6 % (para el caso de 10 nodos sensores). Al aumentar el tamaño del paquete a 80 bytes, con un solo nodo sensor, ahora el *Throughput* es de aproximadamente 47 %, y con 10 nodos sensores disminuye a 3.5 %, aproximadamente. Con 127 bytes, con un solo nodo sensor el *Throughput* es de 37 %, pero con 10 nodos sensores es de 2.5 %. Estos valores indican que al

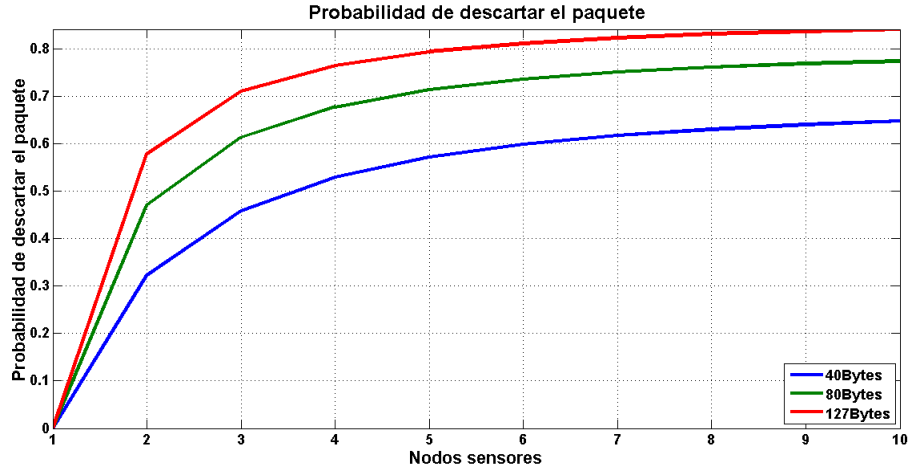


Figura 4.16.: Probabilidad de descartar el paquete.

aumentar el tamaño del paquete y los nodos sensores, disminuye el rendimiento de la red.

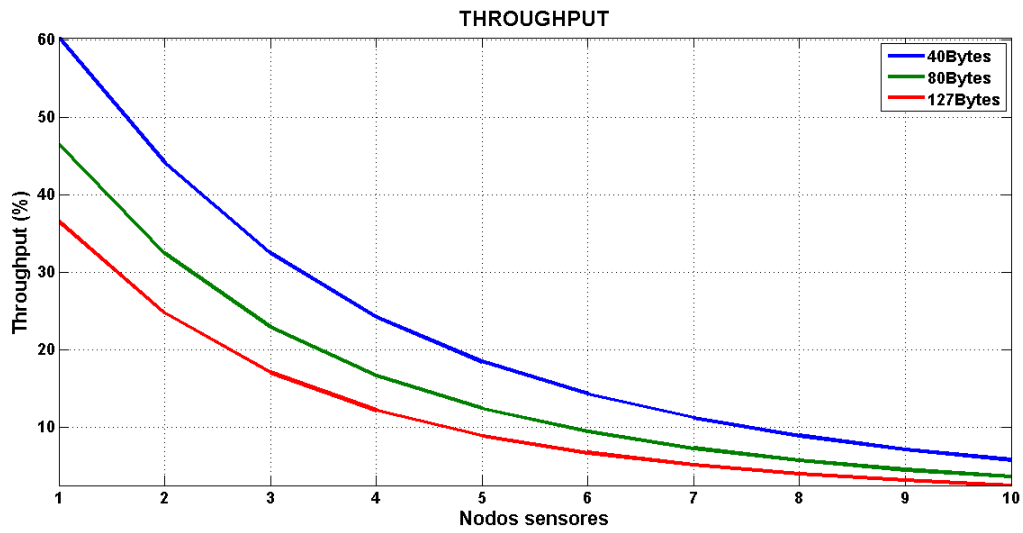


Figura 4.17.: *Throughput* de la red

5. CONCLUSIONES

5.1. Discusión

Los resultados obtenidos indican la importancia de tener una estrategia clara sobre el propósito, característica y alcance de la red de sensores a diseñar, particularmente tratándose de casos donde se están empleando sensores heterogéneos inalámbricos. Se observa que la metodología propuesta proporciona información clave de cuales son los parámetros críticos a considerar en el diseño de la red, considerando la interrelación entre capas e identificando elementos nocivos en el desempeño de la red, lo cual ayuda a definir el tipo de sensor y sus principales parámetros.

Se tuvo cuidado en el proceso de definición de la metodología de esta investigación en lograr compatibilidad con tecnologías emergentes, como es el caso de redes de próxima generación utilizando sensores heterogéneos inalámbricos, lo cual es una contribución relevante de este trabajo dado que en literatura, en general, solo se enfatizan casos en los cuales intervienen sensores con los mismos parámetros técnicos.

Dado el avance tecnológico en cuanto a sensores, el trabajo desarrollado constituye una plataforma para el diseño de redes en las cuales el Internet de las Cosas IoT es cada vez más utilizado; es decir, la metodología propuesta es compatible para cuando las necesidades en aplicaciones de manufactura, salud y otros campos requieran la intervención de sistemas IoT. En este caso el diseñador tendrá que tomar en cuenta los diversos protocolos disponibles para sistemas IoT dado que de acuerdo al protocolo seleccionado se definirá el desempeño final, particularmente en las capas superiores.

En cuanto a las áreas de oportunidad de aplicación de redes heterogéneas de sensores, los resultados obtenidos confirman que el ahorro de energía se vuelve un elemento fundamental en la operación de la red. En lograr que se incremente el uso de este tipo de redes en aplicaciones relacionadas a energías renovables y verdes, se tendrá que poner extrema atención en seleccionar los parámetros que optimicen el desempeño de la red en la capa física y en la capa MAC en función de lograr la mínima potencia sin alterar la calidad de servicio (QoS) esperada.

En este trabajo se ha desarrollado una metodología que emplea un modelo el cual considera las características de heterogeneidad de los nodos sensores de la red. Al hablar de heterogeneidad hay un gran número de variables a considerar, por lo que en esta metodología, se toman en cuenta nodos heterogéneos en términos de distancia, potencia de transmisión, tamaño del paquete y tasa de transmisión. Estos son elementos claves para definir el desempeño de este tipo de redes.

La metodología propuesta considera la interrelación de las capas de la arquitectura de comunicaciones de una red de sensores inalámbricos. En la arquitectura de comunicaciones propuesta solo se consideran 4 capas, que son capa física, capa de enlace de datos, capa de red y capa de aplicación. La capa de aplicación, por cuestiones del alcance de trabajo, no se consideró a detalle, por lo que únicamente la interrelación entre las capas, es considerada en las tres capas restantes. Si se considera cada capa de la arquitectura de comunicaciones de forma aislada o independiente de las demás, los resultados obtenidos en las simulaciones no coinciden con los resultados experimentales, y esto tendrá como consecuencias, que haya más fallas de las previstas en la red o que no se comporte de la forma planeada, al momento de implementarse. Un aspecto relevante de este trabajo es que al considerar la interrelación entre capas, se logra evidenciar como al variar un determinado parámetro afecta toda la arquitectura de la red, y teniendo esto en cuenta, los resultados de las simulaciones serán más cercanos a las características reales de la red al momento de implementarse, lo cual es un apoyo significativo para los diseñadores de redes en las que intervienen componentes del estado del arte, particularmente de la última generación de sistemas IoT.

Como se mencionó en el párrafo anterior, la metodología propuesta es capaz de llevar a cabo una aproximación cercana a las condiciones reales del entorno, haciendo que las simulaciones y cálculos contribuyan al conocimiento de la red en forma teórica y práctica, en el caso específico de nodos de sensores no homogéneos, enfatizando casos con distintas distancias entre nodos y potencias de transmisión, y la interrelación entre capas.

De la misma forma, la metodología propuesta es lo suficientemente flexible y se adapta, tal como se mencionó anteriormente, al Internet de las Cosas IoT, en particular a aplicaciones Internet Industrial de las cosas. Por lo que, se resalta la contribución de este trabajo de investigación al considerar que dicha metodología puede aplicarse para sistemas IoT y redes WSN.

En los resultados de las simulaciones, se observó que la potencia de la señal recibida varía en función de la potencia de transmisión y la distancia, es decir, a medida que la distancia entre los nodos sensores se incrementa, la potencia de la señal recibida disminuye, factor que debe tomarse en cuenta en la planeación de la red.

La potencia de la señal recibida también depende de la potencia de la señal transmitida y de la atenuación de trayecto entre el nodo transmisor y el nodo receptor. Los resultados obtenidos, arrojan que a medida que la distancia entre los nodos sensores se hace mayor, la relación señal a ruido SNR , empeora. Estos resultados son útiles, para estimar la calidad del enlace inalámbrico en una red WSN al momento de implementarla, ya que dependiendo de la aplicación, se determinará el valor mínimo aceptable de la relación señal a ruido, y esto servirá para definir la potencia de transmisión de cada nodo sensor que a su vez dependerá de la distancia entre el nodo sensor y el nodo receptor.

El rendimiento del enlace digital se puede predecir mediante la relación de energía de señal por bit a la densidad de potencia de ruido por Hertz E_b/N_0 . Donde a mayor potencia de transmisión y menor distancia entre los nodos sensores, el rendimiento es mejor, conforme se disminuye la potencia y aumenta la distancia del enlace digital, este se va degradando. A mayor potencia de transmisión, el valor obtenido de la relación E_b/N_0 es mejor, debido a que la energía del bit es mayor en comparación con el ruido.

Como se puede observar en las Figura 4.3 y Figura 4.4, el valor de la relación E_b/N_0 también se ve afectado por la tasa de transmisión. Si se considera que el ruido siempre tiene el mismo nivel, con una menor tasa de transmisión, la energía por símbolo es mayor, y por lo tanto la energía del bit aumenta. Empleando una menor tasa de transmisión, mayor será la diferencia entre la energía de bit con respecto a la energía del ruido. Si la tasa de transmisión aumenta, el tiempo del símbolo es menor, por lo que la energía por bit disminuye. Considerando esto, la tasa de transmisión dependerá de la aplicación, ya que aunque el estándar indica una determinada tasa de transmisión, no significa que es obligatorio emplearla de no ser necesario. Cabe resaltar, por lo tanto, que el trabajo desarrollado permite llevar a cabo un diseño integral, independientemente del tipo de protocolo que el estándar indique, haciendo de esta manera que el diseñador tenga elementos de decisión clave en el momento de diseñar la red.

Ya que los aspectos de interferencia son cruciales, por ejemplo en aplicaciones médicas, se considero en este trabajo, el utilizar la relación portadora a interferencia C/I como parámetro que define la calidad de la señal recibida, tanto de la propia red como de redes vecinas. Ahora bien, al considerar que las redes WSN son redes densamente pobladas, la interferencia en la misma red depende tanto de la distancia entre los nodos sensores como de la potencia de transmisión. En el caso de menor distancia entre los nodos sensores, mayor es la interferencia que se presenta entre ellos. En el caso de redes vecinas, la relación C/I sirve para calcular la interferencia que exista dependiendo la distancia entre las redes, para hacer los cambios necesarios en la red WSN antes de realizar la implementación. A pesar de que la tasa de transmisión es necesaria para realizar el cálculo de la relación portadora a interferencia, en

las simulaciones realizadas con diferentes valores, la relación C/I permaneció constante, y esto se debió al hecho de que se divide entre la tasa de chips, que es un valor muy grande en comparación con la tasa de transmisión y esto estabiliza la relación portadora a interferencia.

Un aspecto relevante en relación a la metodología propuesta, es que debido a que el número de nodos sensores que están transmitiendo de forma simultánea en la red afecta la tasa de error de bit (BER), así como la potencia de transmisión y la distancia entre los nodos sensores; a medida que aumenta el número de nodos sensores que están transmitiendo de forma simultánea la tasa BER se incrementará. De esta forma se confirma que la metodología propuesta previene la mayoría de las fallas que puede tener la red WSN antes de implementarse.

Los resultados que se obtienen empleando lo metodología propuesta son útiles al momento de hacer el análisis de interferencias con otras redes al momento de implementar la red WSN, y así evaluar como se verá afectado la tasa BER por redes vecinas dependiendo de la distancia que haya entre los nodos sensores de la propia red WSN y/o redes vecinas, y así tener un estimado de cuantos bits erróneos habrá por paquete dependiendo de los nodos sensores que estén transmitiendo de forma simultánea, de la tasa de transmisión a la que estén enviado y de la potencia de transmisión.

Los valores obtenidos en la simulación sirven para hacer un diseño de la topología de la red en forma más precisa, ya que dependiendo de la aplicación se determinará la tasa de transmisión. Dependiendo de las dimensiones del área de implementación, serán las distancias entre los nodos sensores; y como consecuencia su potencia de transmisión. De esta forma, se tendrá un estimado de cuantos bits erróneos enviara cada nodo sensor.

Por lo que respecta a la tasa de error por paquete PER, ésta depende de los parámetros mencionados en los párrafos anteriores y del tamaño del paquete. El estándar permite hasta 127 Bytes de carga útil. Los resultados obtenidos indican que sin importar el tamaño del paquete, no es viable tener hasta 15 nodos sensores transmitiendo simultáneamente, ya que PER es del 100 %. Por lo que, en el caso de implementar una red WSN densamente poblada y sean necesarios múltiples nodos sensores transmitiendo simultáneamente, lo que se sugiere es implementar una topología de agrupación (*cluster*), ya que este tipo de topología disminuye el número de nodos sensores que estarán transmitiendo de forma simultánea. Es decir, a cada *cluster* se le asigna una frecuencia de operación distinta para así disminuir las interferencias.

Para el análisis y simulación de la capa de acceso al medio se utilizó en el algoritmo CSMA/CA Ranurado, el cual indica que el nodo sensor debe detectar libre el canal dos veces consecutivas para poder enviar el paquete al nodo receptor . Cuando hay un solo nodo sensor el canal se

detectará como libre siempre, ya que no hay otro nodo sensor que este tratando de enviar su paquete, sin embargo a medida que más nodos sensores están transmitiendo de forma simultánea, la probabilidad de detectar libre el canal disminuye. Adicionalmente, así como el número de nodos sensores afecta a esta probabilidad, también se ve afectada por el tamaño del paquete; a medida que aumenta el tamaño del paquete, la probabilidad de detectar libre el canal disminuye, y esto se debe a que el paquete ocupa menos tiempo el canal.

Es importante observar que ya una vez enviado el paquete, se calcula la probabilidad de que la transmisión sea exitosa o que el paquete sufra una colisión. En el caso de un solo nodo sensor, evidentemente la probabilidad de una transmisión será exitosa, en otras palabras, cada vez que el nodo sensor transmita un paquete, este llegará de forma exitosa al nodo destino, es decir, no sufrirá colisiones. A medida que aumenta número de nodos sensores que estén compitiendo por transmitir (o estén transmitiendo), mayor es la probabilidad de que el paquete sufra una colisión, sin importar el tamaño del paquete.

Nótese que cuando el nodo sensor realiza continuos monitoreos del canal y no logra dos veces consecutivas detectarlo como libre, el paquete se descarta. En el caso de un solo nodo sensor transmitiendo, siempre enviará su paquete, sin importar su tamaño. A medida que aumentan los números de nodos sensores que estén tratando de transmitir (o estén transmitiendo) mayor es la probabilidad de que el paquete sea descartado.

Con respecto al cálculo del *Throughput* de la red, a medida que aumenta el tamaño del paquete y los nodos sensores que están transmitiendo de forma simultánea, disminuye el rendimiento de la red, tal como se ve en la Figura 4.17.

Debido a lo mencionado anteriormente, se puede resumir que los resultados obtenidos en este trabajo:

1. Aportan herramientas útiles de diseño que incluye casos de aplicaciones de tecnologías emergentes de sistemas IoT.
2. Establecen una clara relación entre los parámetros más significativos en el desempeño de la red, enfatizando la naturaleza heterogénea de los nodos.
3. Proporcionan información sobre la naturaleza y características de interrelación entre capas para entender la dinámica de operación de la red.
4. Cumplen con los objetivos planteados.

Por lo que, el planteamiento original y el alcance del trabajo se consideran realizados satisfactoriamente.

5.2. Trabajo a futuro

Reconociendo que los avances tecnológicos en el área de sensores, particularmente en sistemas IoT, han sido exponenciales; en el desarrollo de esta investigación, se han identificado futuras líneas de investigación apoyadas en los resultados obtenidos, las cuales se enlistan a continuación:

- Llevar a cabo estudios para tomar en cuenta la compatibilidad de la arquitectura de cuatro capas propuesta para las redes HWSN con la arquitectura de redes NGN.
- Explorar áreas de oportunidad, crecimiento y desarrollo en el rubro de las redes de sensores heterogéneos inalámbricos poniendo especial énfasis a aplicaciones sobre energías renovables y verdes.
- Realizar pruebas experimentales, donde los resultados de simulación puedan ser comparados con casos reales y de esta forma hacer los ajustes necesarios al modelo empleado.
- Incorporar análisis de optimización en las rutinas empleadas en el modelo.
- Aplicar la metodología propuesta en campos específicos, a saber, manufactura avanzada, salud y agricultura, por mencionar los más significativos.

A. PRIMER APÉNDICE

A.1. Trabajos en Congresos

- **Red de Sensores Inalámbricos aplicado a control de iluminación, como herramienta didáctica: una prueba de concepto.** Memorias del SOMI XXX Congreso de Instrumentación, Durango, Durango, México, 28-30 de octubre 2015. ISSN: 2395-8499.
- **Comparación de Consumo de Corriente y Estados de Operación en Nodo Sensor de una WSN: Consideraciones de Consumo en Régimen Estático.** Memoria de Congreso Ci2T 2016. Revista Aristas: Ciencia Básica y Aplicada. ISSN 2007-9478, Vol 5, Núm. 9, Año 2016.
- **Comparación de Arquitecturas de las Redes de la Próxima Generación y de Redes de Sensores Inalámbricos.** Trabajo para Congreso IEEE México ROC&C 2016.
- **Análisis del internet de las cosas en la era de 5G y de blockchain: retos en México.** Memoria de Congreso Congreso Ci2T 2017. Revista Aristas: Ciencia Básica y Aplicada. ISSN 2007-9478, Vol 6, Núm. 11, Año 2017.

A.2. Artículos en revistas indexadas

- **The Convergence between Wireless Sensor Networks and the Internet of Things; Challenges and Perspectives: a Survey.** Revista IEEE Latin America Transactions. ISSN 1548-0992, Vol 14, Año 2016, páginas 4249-4254.

Bibliografía

- [1] CEPAL Comision Economica para America Latina y el Caribe. Datos, algoritmos y politicas: la redefinicion del mundo digital, 2018. LC/CMSI.6/4, Santiago, 2018.
- [2] Diego V. Queiroz, Marcelo S. Alencar, Ruan D. Gomes, Iguatemi E. Fonseca, and Cesar Benavente-Peces. Survey and systematic mapping of industrial wireless sensor networks. *Journal of Network and Computer Applications*, 97:96 – 125, 2017. ISSN 1084-8045. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2017.08.019>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1084804517302771>.
- [3] D. Praveen Kumar, Tarachand Amgoth, and Chandra Sekhara Rao Annavarapu. Machine learning algorithms for wireless sensor networks: A survey. *Information Fusion*, 2018. ISSN 1566-2535. doi: <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2018.09.013>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S156625351830277X>.
- [4] M. Ayaz, M. Ammad-uddin, I. Baig, and e. H. M. Aggoune. Wireless sensor networks civil applications, prototypes, and future integration possibilities a review. *IEEE Sensors Journal*, 18(1):4–30, Jan 2018. ISSN 1530-437X. doi: 10.1109/JSEN.2017.2766364.
- [5] Haleem Farman, Bilal Jan, Huma Javed, Naveed Ahmad, Javed Iqbal, Muhammad Arshad, and Shaukat Ali. Multi-criteria based zone head selection in internet of things based wireless sensor networks. *Future Generation Computer Systems*, 87:364 – 371, 2018. ISSN 0167-739X. doi: <https://doi.org/10.1016/j.future.2018.04.091>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167739X17320174>.
- [6] A. Engel and A. Koch. Heterogeneous wireless sensor nodes that target the internet of things. *IEEE Micro*, 36(6):8–15, Nov 2016. ISSN 0272-1732. doi: 10.1109/MM.2016.100.
- [7] Fariba Aznoli and Nima Jafari Navimipour. Deployment strategies in the wireless sensor networks: Systematic literature review, classification, and current trends. *Wireless Personal Communications*, 95(2):819–846, Jul 2017. ISSN 1572-834X. doi: 10.1007/s11277-016-3800-0. URL <https://doi.org/10.1007/s11277-016-3800-0>.
- [8] R. Dahiya, A. K. Arora, and V. R. Singh. Modelling the energy efficient sensor nodes for wireless sensor networks. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series*

- B*, 96(3):305–309, Sep 2015. ISSN 2250-2114. doi: 10.1007/s40031-014-0149-1. URL <https://doi.org/10.1007/s40031-014-0149-1>.
- [9] Georgios Tsoumanis, Konstantinos Oikonomou, George Koufoudakis, and Sonia AÃssa. Energy-efficient sink placement in wireless sensor networks. *Computer Networks*, 141: 166 – 178, 2018. ISSN 1389-1286. doi: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2018.05.029>.
- [10] Sukhchandan Randhawa and Sushma Jain. Data aggregation in wireless sensor networks: Previous research, current status and future directions. *Wireless Personal Communications*, 97(3):3355–3425, Dec 2017. ISSN 1572-834X. doi: 10.1007/s11277-017-4674-5. URL <https://doi.org/10.1007/s11277-017-4674-5>.
- [11] R. M. Al-Kiyumi, C. H. Foh, S. Vural, P. Chatzimisios, and R. Tafazolli. Fuzzy logic-based routing algorithm for lifetime enhancement in heterogeneous wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2(2):517–532, June 2018. ISSN 2473-2400. doi: 10.1109/TGCN.2018.2799868.
- [12] X. Lai, X. Ji, X. Zhou, and L. Chen. Energy efficient link-delay aware routing in wireless sensor networks. *IEEE Sensors Journal*, 18(2):837–848, Jan 2018. ISSN 1530-437X. doi: 10.1109/JSEN.2017.2772321.
- [13] S. Aslam, W. Ejaz, and M. Ibnkahla. Energy and spectral efficient cognitive radio sensor networks for internet of things. *IEEE Internet of Things Journal*, 5(4):3220–3233, Aug 2018. ISSN 2327-4662. doi: 10.1109/JIOT.2018.2837354.
- [14] J. Plata-Chaves, A. Bertrand, M. Moonen, S. Theodoridis, and A. M. Zoubir. Heterogeneous and multitask wireless sensor networks algorithms, applications, and challenges. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 11(3):450–465, April 2017. ISSN 1932-4553. doi: 10.1109/JSTSP.2017.2676468.
- [15] Rajeev Ranjan and Shirshu Varma. Challenges and implementation on cross layer design for wireless sensor networks. *Wireless Personal Communications*, 86(2):1037–1060, Jan 2016. ISSN 1572-834X. doi: 10.1007/s11277-015-2972-3. URL <https://doi.org/10.1007/s11277-015-2972-3>.
- [16] Dinesh Kumar Sah and Tarachand Amgoth. Parametric survey on cross-layer designs for wireless sensor networks. *Computer Science Review*, 27:112 – 134, 2018. ISSN 1574-0137. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2017.12.002>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1574013717301971>.
- [17] I. Tomic and J. A. McCann. A survey of potential security issues in existing wireless sensor network protocols. *IEEE Internet of Things Journal*, 4(6):1910–1923, Dec 2017. doi: 10.1109/JIOT.2017.2749883.

- [18] C. Srisathapornphat, C. Jaikaeo, and Chien-Chung Shen. Sensor information networking architecture. In *Proceedings 2000. International Workshop on Parallel Processing*, pages 23–30, 2000. doi: 10.1109/ICPPW.2000.869083.
- [19] G. Feng, H. Zhao, F. Gu, P. Needham, and A.D. Ball. Efficient implementation of envelope analysis on resources limited wireless sensor nodes for accurate bearing fault diagnosis. *Measurement*, 110:307 – 318, 2017. ISSN 0263-2241. doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.07.009>.
- [20] Z. Fei, B. Li, S. Yang, C. Xing, H. Chen, and L. Hanzo. A survey of multi-objective optimization in wireless sensor networks: Metrics, algorithms, and open problems. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 19(1):550–586, Firstquarter 2017. ISSN 1553-877X. doi: 10.1109/COMST.2016.2610578.
- [21] Waqas Rehan, Stefan Fischer, Maaz Rehan, and Mubashir Husain Rehmani. A comprehensive survey on multichannel routing in wireless sensor networks. *Journal of Network and Computer Applications*, 95:1 – 25, 2017. ISSN 1084-8045. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2017.07.006>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S108480451730228X>.
- [22] Robert M. Curry and J. Cole Smith. A survey of optimization algorithms for wireless sensor network lifetime maximization. *Computers and Industrial Engineering*, 101:145 – 166, 2016. ISSN 0360-8352. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.08.028>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360835216303321>.
- [23] Muhammad Adeel Mahmood, Winston K.G. Seah, and Ian Welch. Reliability in wireless sensor networks: A survey and challenges ahead. *Computer Networks*, 79:166 – 187, 2015. ISSN 1389-1286. doi: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2014.12.016>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128614004708>.
- [24] Mompoloki Pule, Abid Yahya, and Joseph Chuma. Wireless sensor networks: A survey on monitoring water quality. *Journal of Applied Research and Technology*, 15(6):562 – 570, 2017. ISSN 1665-6423. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jart.2017.07.004>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1665642317301037>.
- [25] S.R. Jino Ramson and D. Jackuline Moni. Wireless sensor networks based smart bin. *Computers and Electrical Engineering*, 64:337 – 353, 2017. ISSN 0045-7906. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2016.11.030>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045790616309065>.
- [26] R. J. M. Vullers, R. v. Schaijk, H. J. Visser, J. Penders, and C. V. Hoof. Energy har-

- vesting for autonomous wireless sensor networks. *IEEE Solid-State Circuits Magazine*, 2(2):29–38, Spring 2010. ISSN 1943-0582. doi: 10.1109/MSSC.2010.936667.
- [27] J. Ko, C. Lu, M. B. Srivastava, J. A. Stankovic, A. Terzis, and M. Welsh. Wireless sensor networks for healthcare. *Proceedings of the IEEE*, 98(11):1947–1960, Nov 2010. ISSN 0018-9219. doi: 10.1109/JPROC.2010.2065210.
- [28] Etimad Fadel, V.C. Gungor, Laila Nassef, Nadine Akkari, M.G. Abbas Malik, Suleiman Almasri, and Ian F. Akyildiz. A survey on wireless sensor networks for smart grid. *Computer Communications*, 71:22 – 33, 2015. ISSN 0140-3664. doi: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2015.09.006>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140366415003400>.
- [29] I. F. Akyildiz, T. Melodia, and K. R. Chowdhury. Wireless multimedia sensor networks: Applications and testbeds. *Proceedings of the IEEE*, 96(10):1588–1605, Oct 2008. ISSN 0018-9219. doi: 10.1109/JPROC.2008.928756.
- [30] B. Rashid and M.H. Rehmani. Applications of wireless sensor networks for urban areas: A survey. *Journal of Network and Computer Applications*, 60:192–219, 2016. doi: 10.1016/j.jnca.2015.09.008.
- [31] M. T. Lazarescu. Design of a wsn platform for long-term environmental monitoring for iot applications. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, 3(1):45–54, March 2013. ISSN 2156-3357. doi: 10.1109/JETCAS.2013.2243032.
- [32] Xiaomin Li, Di Li, Jiafu Wan, Athanasios V. Vasilakos, Chin-Feng Lai, and Shiyong Wang. A review of industrial wireless networks in the context of industry 4.0. *Wireless Networks*, 23(1):23–41, Jan 2017. ISSN 1572-8196. doi: 10.1007/s11276-015-1133-7.
- [33] Bindiya Jain, Gursewak Brar, Jyoteesh Malhotra, and Shalli Rani. A novel approach for smart cities in convergence to wireless sensor networks. *Sustainable Cities and Society*, 35:440 – 448, 2017. ISSN 2210-6707. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.08.005>.
- [34] H. Liu, M. Bolic, A. Nayak, and I. Stojmenovic. Taxonomy and challenges of the integration of rfid and wireless sensor networks. *IEEE Network*, 22(6):26–35, November 2008. ISSN 0890-8044. doi: 10.1109/MNET.2008.4694171.
- [35] Aya Ayadi, Oussama Ghorbel, Abdulfattah M. Obeid, and Mohamed Abid. Outlier detection approaches for wireless sensor networks: A survey. *Computer Networks*, 129: 319 – 333, 2017. ISSN 1389-1286. doi: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2017.10.007>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128617303900>.
- [36] Vandana Bhasin, Sushil Kumar, P. C. Saxena, and C. P. Katti. Security architectures in wireless sensor network. *International Journal of Information Technology*, Feb 2018.

- ISSN 2511-2112. doi: 10.1007/s41870-018-0103-6. URL <https://doi.org/10.1007/s41870-018-0103-6>.
- [37] Tallal Elshabrawy. Network throughput analysis of ieee 802.15.4 enabled wireless sensor networks with fec coding under external interference. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 69(11):1641 – 1649, 2015. ISSN 1434-8411. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2015.07.017>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1434841115002198>.
- [38] O. Iova, F. Theoleyre, T. Watteyne, and T. Noel. The love-hate relationship between ieee 802.15.4 and rpl. *IEEE Communications Magazine*, 55(1):188–194, January 2017. ISSN 0163-6804. doi: 10.1109/MCOM.2016.1300687RP.
- [39] Stefano Tennina, Olfa Gaddour, Anis Koubaa, Fernando Royo, Mario Alves, and Mohamed Abid. Z-monitor a protocol analyzer for ieee 802.15.4-based low-power wireless networks. *Computer Networks*, 95:77 – 96, 2016. ISSN 1389-1286. doi: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2015.12.002>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128615004788>.
- [40] J. Zheng and M.J. Lee. *A comprehensive performance study of IEEE 802.15.4*, chapter 4, pages 218–237. Wiley Interscience, 2006.
- [41] Anis Koubaa, M̃ario Alves, and Eduardo Tovar. Time sensitive ieee 802154 protocol. In Nitaigour P. Mahalik, editor, *Sensor Networks and Configuration*, chapter 2, pages 29–30. Springer, 2007.
- [42] Anis Koubaa, M̃ario Alves, and Eduardo Tovar. A comprehensive simulation study of slotted csma/ca for ieee 802.15.4 wireless sensor networks. In *2006 IEEE International Workshop on Factory Communication Systems*, pages 183–192, 2006. doi: 10.1109/WFCS.2006.1704149.
- [43] M. Khanafer, M. Guennoun, and H. T. Mouftah. A survey of beacon-enabled ieee 802.15.4 mac protocols in wireless sensor networks. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 16(2):856–876, Second 2014. ISSN 1553-877X. doi: 10.1109/SURV.2013.112613.00094.
- [44] A. Faridi, M. R. Palattella, A. Lozano, M. Dohler, G. Boggia, L. A. Grieco, and P. Camarda. Comprehensive evaluation of the ieee 802.15.4 mac layer performance with re-transmissions. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 59(8):3917–3932, Oct 2010. ISSN 0018-9545. doi: 10.1109/TVT.2010.2063720.
- [45] X. Cao, J. Chen, Y. Sun, and X. Shen. Maximum throughput of ieee 802.15.4 en-

- abled wireless sensor networks. In *Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2010)*, 2010 IEEE, pages 1–5, Dec 2010. doi: 10.1109/GLOCOM.2010.5683611.
- [46] Abdulaziz Y. Barnawi. Aggregation for adaptive and energy-efficient mac in wireless sensor networks. *Journal of Systems and Software*, 109:161 – 176, 2015. ISSN 0164-1212. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jss.2015.07.038>.
- [47] Zhuoling Xiao, Jie Zhou, Junjie Yan, Chen He, Lingge Jiang, and Niki Trigoni. Performance evaluation of ieee 802.15.4 with real time queueing analysis. *Ad Hoc Networks*, 73:80 – 94, 2018. ISSN 1570-8705. doi: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2018.01.006>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1570870518300167>.
- [48] Y. Sun, W. Dong, and Y. Chen. An improved routing algorithm based on ant colony optimization in wireless sensor networks. *IEEE Communications Letters*, 21(6):1317–1320, June 2017. ISSN 1089-7798. doi: 10.1109/LCOMM.2017.2672959.
- [49] S. K. Singh, P. Kumar, and J. P. Singh. A survey on successors of leach protocol. *IEEE Access*, 5:4298–4328, 2017. ISSN 2169-3536. doi: 10.1109/ACCESS.2017.2666082.
- [50] Y. Zhou, N. Wang, and W. Xiang. Clustering hierarchy protocol in wireless sensor networks using an improved pso algorithm. *IEEE Access*, 5:2241–2253, 2017. ISSN 2169-3536. doi: 10.1109/ACCESS.2016.2633826.
- [51] N. A. Pantazis, S. A. Nikolidakis, and D. D. Vergados. Energy-efficient routing protocols in wireless sensor networks: A survey. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 15(2): 551–591, Second 2013. ISSN 1553-877X. doi: 10.1109/SURV.2012.062612.00084.
- [52] J. S. Lee and T. Y. Kao. An improved three-layer low-energy adaptive clustering hierarchy for wireless sensor networks. *IEEE Internet of Things Journal*, 3(6):951–958, Dec 2016. ISSN 2327-4662. doi: 10.1109/JIOT.2016.2530682.
- [53] S. Din, A. Ahmad, A. Paul, M. M. Ullah Rathore, and G. Jeon. A cluster-based data fusion technique to analyze big data in wireless multi-sensor system. *IEEE Access*, 5: 5069–5083, 2017. doi: 10.1109/ACCESS.2017.2679207.
- [54] W. B. Heinzelman, A. P. Chandrakasan, and H. Balakrishnan. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 1(4):660–670, Oct 2002. ISSN 1536-1276. doi: 10.1109/TWC.2002.804190.
- [55] Dingwen Yuan, Salil S. Kanhere, and Matthias Hollick. Instrumenting wireless sensor networks. a survey on the metrics that matter. *Pervasive and Mobile Computing*, 37: 45 – 62, 2017. ISSN 1574-1192. doi: <https://doi.org/10.1016/j.pmcj.2016.10.001>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1574119216302802>.

- [56] Antonio Manuel Palma Gomez. Analisis de protocolos de enrutamiento para redes de sensores inalambricos, 2009.
- [57] L. Shi and A. O. Fapojuwo. Tdma scheduling with optimized energy efficiency and minimum delay in clustered wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 9(7):927–940, July 2010. ISSN 1536-1233. doi: 10.1109/TMC.2010.42.
- [58] Roy Blake. *Sistemas Electronicos de Comunicaciones*. Thomson, 2 edition, 2004. ISBN 0766826848.
- [59] Shahin Farahani. *ZigBee Wireless Networks and Transceivers*. Elsevier Ltd, Burlington, MA, 2008. ISBN 9780750683937.
- [60] William Stallings. *Wireless Communications and Networks*. PEARSON Prentice Hall, 2005. ISBN 0131918354.
- [61] Bernand Sklar. *Digital Communications*. Prentice Hall, New Jersey, 2001. ISBN 0130847887.
- [62] G. Anandalingam and S. Raghavan. *Telecommunications Network Design and Management*. Springer US, 2003. ISBN 9781402073182.
- [63] Mehment Can Akyildiz, Ian F.and Vuran. *Wireless Sensor Networks*. John Wiley and Sons Ltd, Reino Unido, 2010. ISBN 9780470036013.
- [64] M. A. Landolsi and W. E. Stark. On the accuracy of gaussian approximations in the error analysis of ds-cdma with oqpsk modulation. *IEEE Transactions on Communications*, 50(12):2064–2071, Dec 2002. ISSN 0090-6778. doi: 10.1109/TCOMM.2002.806522.
- [65] Yang Xiao, Xuemin Shen, and Ding-Zhu Du. *Wireless Network Security*. Springer, New York, 2007. ISBN 9780387280400.
- [66] Ieee standard for information technology– local and metropolitan area networks– specific requirements– part 15.4: Wireless medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications for low rate wireless personal area networks (wpans). *IEEE Std 802.15.4-2006 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2003)*, pages 1–320, Sept 2006. doi: 10.1109/IEEESTD.2006.232110.
- [67] W. Wu, N. Xiong, and C. Wu. Improved clustering algorithm based on energy consumption in wireless sensor networks. *IET Networks*, 6(3):47–53, 2017. ISSN 2047-4954. doi: 10.1049/iet-net.2016.0115.
- [68] T. Liu, T. Gu, N. Jin, and Y. Zhu. A mixed transmission strategy to achieve energy balancing in wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 16(4):2111–2122, April 2017. ISSN 1536-1276. doi: 10.1109/TWC.2016.2642098.

- [69] L. Goratti, T. Baykas, T. Rasheed, and S. Kato. Nacrp: A connectivity protocol for star topology wireless sensor networks. *IEEE Wireless Communications Letters*, 5(2): 120–123, April 2016. ISSN 2162-2337. doi: 10.1109/LWC.2015.2506163.
- [70] Z. H. Mir and Y. B. Ko. Collaborative topology control for many-to-one communications in wireless sensor networks. *IEEE Access*, 5:15927–15941, 2017. doi: 10.1109/ACCESS.2017.2722379.
- [71] J. Shen, A. Wang, C. Wang, P. C. K. Hung, and C. F. Lai. An efficient centroid-based routing protocol for energy management in wsn-assisted iot. *IEEE Access*, 5: 18469–18479, 2017. doi: 10.1109/ACCESS.2017.2749606.
- [72] M. Amjad, M. K. Afzal, T. Umer, and B. S. Kim. Qos-aware and heterogeneously clustered routing protocol for wireless sensor networks. *IEEE Access*, 5:10250–10262, 2017. ISSN 2169-3536. doi: 10.1109/ACCESS.2017.2712662.
- [73] Lieven Tytgat, Opher Yaron, Sofie Pollin, Ingrid Moerman, and Piet Demeester. Avoiding collisions between iee 802.11 and iee 802.15.4 through coexistence aware clear channel assessment. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2012(1):137, Apr 2012. ISSN 1687-1499. doi: 10.1186/1687-1499-2012-137. URL <https://doi.org/10.1186/1687-1499-2012-137>.