



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**  
FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA  
PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

TEMA:

**Diseño de escenarios de simulación de parámetros de vida  
útil para una red inalámbrica de sensores**

AUTOR:

Quito Velasquez, Luis Alfredo

Componente práctico del examen complejo previo a la  
obtención del grado de **INGENIERO EN  
TELECOMUNICACIONES**

REVISOR:

Palacios Meléndez, Edwin Fernando

Guayaquil, Ecuador

03 de Mayo del 2018



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**  
FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

## **CERTIFICACIÓN**

Certificamos que el presente **componente práctico del examen complejo**, fue realizado en su totalidad por **Quito Velasquez, Luis Alfredo** como requerimiento para la obtención del título de **INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**.

REVISOR

---

Palacios Meléndez, Edwin Fernando

DIRECTOR DE CARRERA

---

Heras Sánchez, Miguel Armando

Guayaquil, a los 03 días del mes de Mayo del año 2018



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**  
FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

**DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

Yo, **Quito Velasquez, Luis Alfredo**

**DECLARÓ QUE:**

**El componente práctico del examen complejo, Diseño de escenarios de simulación de parámetros de vida útil para una red inalámbrica de sensores** previo a la obtención del Título de **Ingeniero en Telecomunicaciones**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, a los 03 días del mes de Mayo del año 2018

EL AUTOR

---

QUITO VELASQUEZ, LUIS ALFREDO



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**  
FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

### **AUTORIZACIÓN**

Yo, **Quito Velasquez, Luis Alfredo**

Autorizó a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del **componente práctico del examen complejo, Diseño de escenarios de simulación de parámetros de vida útil para una red inalámbrica de sensores**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 03 días del mes de Mayo del año 2018

EL AUTOR

---

QUITO VELASQUEZ, LUIS ALFREDO

# REPORTE DE URKUND

**URKUND**

<b>Documento</b>	<a href="#">Quito_Luis.docx</a> (D38266210)
<b>Presentado</b>	2018-05-03 11:01 (-05:00)
<b>Presentado por</b>	fermandopm23@hotmail.com
<b>Recibido</b>	edwin.palacios.ucsg@analysis.orkund.com
<b>Mensaje</b>	Análisis Luis Quito <a href="#">Mostrar el mensaje completo</a> 1% de estas 17 páginas, se componen de texto presente en 1 fuentes.

Lista de fuentes		Bloques
+	Categoría	Enlace/nombre de archivo
+		<a href="#">a Formato Complexivo FINAL_2017(b...</a>
+		<a href="#">a Formato Complexivo FINAL_2017(b...</a>
+		<a href="#">a Formato Complexivo FINAL_2017(b...</a>
+	>	<a href="#">TESIS NATALIA ROMERO Final.docx</a>
+		<a href="https://doi.org/10.3390/s101211400">https://doi.org/10.3390/s101211400</a>

Reiniciar Exportar Compartir

0 Advertencia

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL  
FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL  
DESARROLLO CARRERA DE INGENIERÍA EN  
TELECOMUNICACIONES

TEMA:

Diseño de escenarios de simulación de parámetros de vida útil para una red inalámbrica de sensores

AUTOR: Quito Velasquez, Luis Alfredo

Componente práctico del examen complejo  
previo a la obtención del grado de INGENIERO EN  
TELECOMUNICACIONES

REVISOR: Palacios Meléndez, Edwin Fernando

## **DEDICATORIA**

Dedicó el presente trabajo de examen complejo a mi familia, ya que cada uno de ustedes forman parte de esta meta cumplida.

A mi querida novia Alison Plaza por estar siempre pendiente de mí por encaminarme siempre al éxito, te agradezco por todas tus ayudas y aportes a lo largo de mi carrera universitaria, eres mi inspiración y mi motivación.

**EL AUTOR**

**QUITO VELASQUEZ, LUIS ALFREDO**

## **AGRADECIMIENTO**

Este logro no había sido alcanzado sin mis pilares fundamentales que son mis padres. Mi papá Alfredo Quito que siempre quiere lo mejor para mi vida, por todos sus consejos y por cada palabra que me guiaron por la vía profesional.

A mi compañera de vida que siempre me enseñó a luchar y que los logros se alcanzan con esfuerzo y sacrificio.

A mi amada y hermosa Madre, María Luisa Velasquez que siempre confió en mí y en todos mi anhelos y sueños que he logrado y que nunca dejo de alentarme para alcanzar este objetivo.

A mi hermana Jennifer Quito por ser brillante, persistente y ejemplo de lucha, a mi hermano Ayrton Quito que siempre estuvo presente en cada momento, mi motivo de siempre ser cada día mejor sobre todo a dios por guiarme y protegerme siempre.

A mi tutor Ing. Edwin Palacios por fortalecer mis conocimientos y mis virtudes.

**EL AUTOR**

**QUITO VELASQUEZ, LUIS ALFREDO**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**  
FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

**TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

f. \_\_\_\_\_  
**MANUEL DE JESUS ROMERO PAZ**  
DECANO

f. \_\_\_\_\_  
**NÉSTOR ARMANDO ZAMORA CEDEÑO**  
COORDINADOR DE ÁREA

f. \_\_\_\_\_  
**LUIS SILVIO CÓRDOVA RIVADENEIRA**  
OPONENTE

## ÍNDICE GENERAL

Índice de Figuras .....	X
Índice de Tablas .....	XII
Resumen .....	XIII
CAPÍTULO 1: DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE PRÁCTICO.....	14
1.1. Introducción.....	14
1.2. Antecedentes. ....	15
1.3. Definición del problema.....	16
1.4. Objetivo General. ....	16
1.5. Objetivos Específicos.....	17
CAPÍTULO 2: Fundamentación teórica.....	18
2.1. Protocolos soportados por redes inalámbricos de sensores.....	18
2.1.1. Protocolo de comunicación de red de sensor inalámbrico IEEE 802.15.4 / ZigBee. ....	18
2.1.1.1. Arquitectura IEEE 802.15.4 / ZigBee. ....	18
2.1.2. IEEE 802.15.1&2 / Bluetooth .....	20
2.2. Arquitectura de redes inalámbricos de sensores.....	21
2.2.1. Red estelar .....	22
2.2.2. Malla de red.....	22
2.2.3. Red híbrida Star-Mesh.....	23
Capítulo 3: Desarrollo del componente práctico.....	25
3.1. Descripción del componente práctico.....	25
3.2. ¿Qué es OMNeT ++? .....	25
3.3. Implementación de la simulación.....	27
3.4. Resultados obtenidos de la red inalámbrica de sensores.....	35
Conclusiones.....	48
Recomendaciones.....	49
Referencias bibliográficas.....	50

## Índice de Figuras

### Capítulo 2:

Figura 2. 1: Diagrama esquemático de la arquitectura ZigBee.....	19
Figura 2. 2: Red tipo estrella.....	22
Figura 2. 3: Red tipo enmallada. ....	23
Figura 2. 4: Red híbrida tipo estrella – malla.....	24

### Capítulo 3:

Figura 3. 1: Pantalla principal de la plataforma de simulación OMNeT ++ 4.27	
Figura 3. 2: Una instantánea del modelo de simulación de una red inalámbrica de sensores. ....	30
Figura 3. 3: Tasas de transferencia de datos de los estándares IEEE 802.11a e IEEE 802.11b. ....	31
Figura 3. 4: Configuración de la WSN, la primera para la conexión y la segunda para fines de conectividad y enrutamiento. ....	32
Figura 3. 5: Configuración de mensajes en la WSN, la primera es un mensaje internodal y la segunda es un mensaje intranodal. ....	33
Figura 3. 6: Configuración del modelado de la red de sensores. ....	33
Figura 3. 7: Instantánea de la interfaz de usuario de la simulación de WSN. ....	34
Figura 3. 8: Gráfica correspondiente a la capacidad inicial de la batería para un período de consulta 10 y números de nodos 15.....	36
Figura 3. 9: Gráfica correspondiente a la capacidad inicial de la batería para un período de consulta 10 y números de nodos 30.....	36
Figura 3. 10: Gráfica correspondiente a la capacidad inicial de la batería para un período de consulta 10 y números de nodos 45.....	37
Figura 3. 11: Gráfica correspondiente a la capacidad inicial de la batería para un radio de comunicación de 300 cm y números de nodos 15.....	38
Figura 3. 12: Gráfica correspondiente a la capacidad inicial de la batería para un radio de comunicación de 300 cm y período de consulta 10. ....	39
Figura 3. 13: Gráfica correspondiente a la capacidad inicial de la batería para un radio de comunicación de 400 cm y período de consulta 10. ....	40

Figura 3. 14: Gráfica correspondiente a la capacidad inicial de la batería para un radio de comunicación de 500 cm y período de consulta 10. ....	41
Figura 3. 15: Gráfica correspondiente al período de consulta para capacidad de batería de 1000 mJ y número de nodos 15.....	42
Figura 3. 16: Gráfica correspondiente al período de consulta para capacidad de batería de 1000 mJ y número de nodos 30.....	43
Figura 3. 17: Gráfica correspondiente al período de consulta para capacidad de batería de 1000 mJ y número de nodos 45.....	43
Figura 3. 18: Gráfica correspondiente al período de consulta para capacidad de batería de 3000 mJ y período de consulta de 10. ....	44
Figura 3. 19: Gráfica correspondiente al período de consulta para capacidad de batería de 1000 mJ y radio de comunicación de 300 cm. ....	45
Figura 3. 20: Gráfica correspondiente al período de consulta para capacidad de batería de 1000 mJ y radio de comunicación de 400 cm. ....	46
Figura 3. 21: Gráfica correspondiente al período de consulta para capacidad de batería de 1000 mJ y radio de comunicación de 500 cm .....	47

## Índice de Tablas

### Capítulo 2:

Tabla 2. 1: Frecuencias de radio IEEE 802.15.4 y tasas de transferencia de datos.....	18
Tabla 2. 2: Comparación de Zigbee y Bluetooth. ....	20

### Capítulo 3:

Tabla 3. 1: Parámetros de simulación y sus valores seleccionados. ....	28
--	----

## Resumen

El desarrollo del presente trabajo denominado “Diseño de escenarios de simulación de parámetros de vida útil para una red inalámbrica de sensores” correspondiente al componente práctico del examen complejo para obtener el título de Ingeniero en Telecomunicaciones. Durante la etapa de inducción de las materias a evaluar en el componente teórico, el tutor realizó la propuesta de analizar la vida útil de una WSN a través de cuatro parámetros tales como, capacidad inicial de la batería, radio de la comunicación, período de consulta y número de nodos. En el capítulo 1, se introduce brevemente a las WSNs, se describen dos artículos científicos relacionados con la vida útil de una WSN como antecedentes a la definición del problema, así como el objetivo general y específicos del trabajo investigativo. En el capítulo 2, se fundamenta los protocolos de comunicaciones, así como la arquitectura en redes inalámbricas de sensores. En el capítulo 3, se desarrolla la simulación de los escenarios de los parámetros que permiten ver la duración o vida útil de la WSN, y se muestran los resultados obtenidos a través de gráficas generadas por la plataforma OMNeT ++.

**Palabras claves:** PROTOCOLOS, ARQUITECTURAS, PARÁMETROS, REDES, SENSORES, WSN.

## CAPÍTULO 1: DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE PRÁCTICO

### 1.1. Introducción.

La red inalámbrica de sensores (*Wireless Sensor Network, WSN*) se basa en el despliegue denso de bajo consumo de energía desechable y bajo costo. El costo de la naturaleza de sistemas heterogéneos y pequeños nodos para recopilar información en tiempo real con muchas aplicaciones potenciales de sensores inalámbricos. Las funciones comunes de WSN son la transmisión, la multidifusión y el enrutamiento lo que permite generar diversos trabajos de investigación. Estos nodos están formados por buscadores. Las redes inalámbricas contienen tres componentes principales, que son: (a) detección, (b) procesamiento y de bajo costo; y (c) baja potencia y autoorganización de la comunicación.

Para Sandoval Orozco, (2016) los nodos del sensor son transceptores generalmente dispersos en un campo de sensores donde cada uno de ellos tiene la capacidad de recopilar y enrutar los datos al receptor/gateway y a los usuarios finales mediante una arquitectura sin infraestructura de salto múltiple a través del sumidero (sink). Utilizan sus capacidades de procesamiento para realizar localmente cálculos simples y transmitir solo los datos requeridos y parcialmente procesados.

El receptor puede comunicarse con el administrador de tareas/usuario final a través de Internet o satélite o cualquier tipo de red inalámbrica (como WiFi, redes malladas, sistemas celulares, WiMAX, etc.), haciendo posible la funcionalidad del internet de las cosas (IoT). Sin embargo, en muchos casos, el receptor se puede conectar directamente a los usuarios finales. Hay que tener en cuenta que puede haber múltiples receptores/pasarelas y múltiples usuarios finales en la arquitectura.

De acuerdo a Khan et al., (2015) en los últimos años, las WSNs se han vuelto omnipresentes y se están utilizando en una amplia gama de dominios de aplicaciones, que incluyen atención médica, agricultura, vigilancia y

seguridad. Estas WSNs se componen de nodos de pequeña escala que tienen la capacidad de detectar, calcular y comunicarse. Mientras que los primeros nodos de sensores tenían limitaciones de recursos con capacidades limitadas, los avances recientes en la tecnología de hardware de sensores han permitido producir nodos de sensores que tienen más poder de procesamiento, memoria y duración prolongada de la batería.

El problema más importante de WSN es que los nodos de los sensores agotan rápidamente su poder de batería limitado. Hay alguna solución para guardar la potencia finita de los nodos de los sensores, como la programación de los sensores en el estado de reposo, la planificación de buenos protocolos de enrutamiento, sensores móviles y métodos de recopilación de datos. Los nodos sensores de un sensor móvil se fijan desde una potencia superior a una inferior. Este enfoque de los sensores móviles puede extender el tiempo de vida de una WSN. La energía de la batería también puede expandirse mediante la reubicación de los nodos del sensor. En lugar de reubicar los nodos del sensor, un enfoque de compromiso para reubicar el nodo receptor para preservar la potencia finita de la batería. Esos nodos que están cerca de un nodo receptor consumen más energía que otros nodos de sensor. (Pant, Kumar, & Singh, 2017)

## **1.2. Antecedentes.**

En la carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones se dispone de biblioteca virtuales, y en ella se pudieron encontrar trabajos de pregrado y posgrado que tiene relación con la red inalámbrica de sensores. También, se realizó la búsqueda de información en repositorios digitales, revistas y congresos. A continuación, se enumeran dos trabajos muy relevantes y guardan relación con redes inalámbricos de sensores:

1. Pant, Kumar, & Singh, (2017) realizan el trabajo “transmisión y reubicación adaptables del sumidero (sink) para extender la vida útil de la red de sensores inalámbricos”. En este artículo, se presenta un nuevo enfoque de la transmisión y reubicación adaptativa del sumidero (AST-EASR) para extender la vida útil de la WSN. El método propuesto se categoriza en dos sentidos, transmisión de

sumidero y reubicación. La operación de transmisión del sumidero se realiza verificando la intensidad de la señal de recepción utilizando un consumo de energía más heterogéneo. Otro lado es la tarea de la reubicación del sumidero realizada por detección basada en la red (anterior al nodo avanzado). Los resultados de la simulación muestran que el método AST-EASR propuesto maximizó la vida útil de la WSN en comparación con los enfoques convencionales como la reubicación del sumidero con consumo de energía (EASR) y el esquema de movimiento en un solo paso.

2. Lakshmi, Jibukumar, & Neenu, (2018) realizan el trabajo “Mejora de la vida útil de la red de sensores inalámbricos multisalvo mediante la recolección de energía de RF”. Este artículo propone un esquema eficiente de recolección de energía de RF que utiliza múltiples fuentes de RF dedicadas para evitar los agujeros de energía. El trabajo tiene como objetivo: (a) colocar de manera óptima los transmisores de energía y (b) determinar el número óptimo de transmisores de energía necesarios para evitar los agujeros de energía en multisistemas WSN. Definieron una función de utilidad para colocar los transmisores de energía, asegurando más peso para suministrar energía a los nodos de retransmisión y para mantener una energía mínima entre todos los nodos de sensor. Para un número óptimo de transmisores de energía, se resuelve un problema de optimización al tiempo que se satisface la restricción sobre la energía mínima cargada por cada nodo sensor.

### **1.3. Definición del problema.**

Necesidad de modelar los parámetros de capacidad inicial de la batería, radio de la comunicación, período de consulta y número de nodos, los cuales están relacionados principalmente con la vida útil de la WSN utilizando la plataforma de simulación OMNeT ++.

### **1.4. Objetivo General.**

Realizar el diseño de escenarios de simulación de los parámetros que definen la vida útil para redes inalámbricas de sensores.

### **1.5. Objetivos Específicos.**

- a. Describir los fundamentos teóricos de las redes inalámbricas, sus protocolos, arquitecturas y topologías en las WSNs.
- b. Diseñar los escenarios de simulación para una red inalámbrica de sensores que permita la manipulación de las variables que determinan la vida útil de los nodos sensores.
- c. Evaluar los resultados obtenidos de los parámetros de vida útil considerados para la red inalámbrica de sensores

## CAPÍTULO 2: Fundamentación teórica.

### 2.1. Protocolos soportados por redes inalámbricas de sensores.

Se describen dos protocolos soportados en una WSN, tales como IEEE 802.15.4 / Zigbee e IEEE 802.15.1&2 / Bluetooth.

#### 2.1.1. Protocolo de comunicación de red de sensor inalámbrico IEEE 802.15.4 / ZigBee.

Para Biaou, Sadoudi, Bocquet, & Rivenq, (2015) ZigBee es un protocolo de comunicación desarrollado por ZigBee y estandarizado por IEEE como 802.15.4 para proporcionar una capacidad limitada de transmisión de datos a baja potencia en redes inalámbricas personales. Las características distintivas de ZigBee de acuerdo con otros estándares IEEE según Chandra, (2008) son:

- Baja velocidad de datos entre 10 y 115.2 Kbps
- Bajo consumo de energía durante algunos años con una batería estándar
- Topología de red que proporciona supervisión múltiple y control de aplicaciones
- Bajo costo, simple y fácil de usar
- Alta seguridad

Tabla 2. 1: Frecuencias de radio IEEE 802.15.4 y tasas de transferencia de datos.

Banda	Zona de impacto	Canales	Velocidad de datos
2.4GHz	En todo el mundo	16	250 kbps
915MHz	América	10	40 kbps
868MHz	Europa	1	20 kbps

Fuente: Chandra, (2008)

##### 2.1.1.1. Arquitectura IEEE 802.15.4 / ZigBee.

Según Rackley, (2007) ZigBee tiene una arquitectura similar a la de otros estándares inalámbricos, como Wi-Fi, Bluetooth. La figura 2.1 muestra la arquitectura del ZigBee como un diagrama de bloques simplificado. En la parte

inferior, hay dos opciones de capa física de acuerdo con la definición de función del transceptor de RF.

No se espera que ambos estén en el mismo dispositivo. La capa física tiene una capa de enlace de datos que consta de dos subcapas. Estas subcapas son; control de enlace lógico y capa MAC. La capa MAC es responsable del manejo de las capas físicas, el acceso al canal, el control de los tiempos de las ranuras y la información de acceso a los mensajes. (Ma, Chen, Huang, & Lee, 2010)

La capa de Control de enlace lógico proporciona una interfaz entre el MAC, la capa física y el software de la aplicación (Karasulu, et al., 2009).

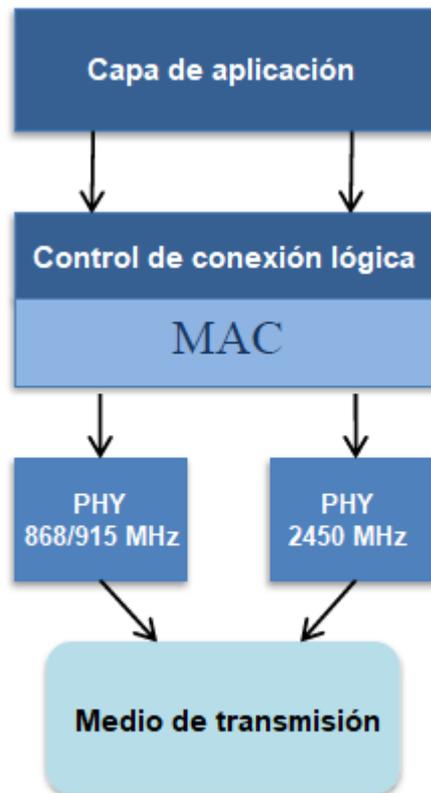


Figura 2. 1: Diagrama esquemático de la arquitectura ZigBee.  
Fuente: (Al Agha et al., 2009)

En la tabla 2.2 se muestra una comparativa de ZigBee con el modelo Bluetooth ampliamente utilizado en redes de área personal. (Lee, Su, & Shen, 2007)

Tabla 2. 2: Comparación de Zigbee y Bluetooth.

	Bluetooth	ZigBee
Horario de transmisión	FHSS	DSS
modulación	GFSK	QPSK
Banda de frecuencia	2.4Ghz	2.4 GHz, 915 MHz, 868 MHz
Velocidad de bits de datos brutos	1Mbps	250 kbps, 40 kbps, 20 kbps
Potencia de salida	Max 100 mW, 2.5 mW O 1 mW	Min 0.5 mW Máximo valor, depende de la regulación local
Sensibilidad mínima	Tasa de error de bit 0.1% - 70dBm	% 1 para tasa de error de paquete pequeño - 85dBm (2.4Ghz) o 92dBm (915 / 868MHz)
Topología de red	Maestro + 8 Esclavos Nodo activo	Estrella o punto a punto 255 Nodo activo

Fuente: (Lee et al., 2007)

Las características del nodo coordinador de la red Zigbee se pueden enumerar de la siguiente manera:

- Configura y prepara la red.
- Transmite las tramas llamadas Beacon en la red.
- Organiza los nodos en la red.
- Almacena información del nodo en la red.
- Administra mensajes entre nodos coincidentes.
- Funciona en la posición típica del receptor.

### **2.1.2. Protocolo de comunicación de red de sensor inalámbrico IEEE 802.15.1&2 / Bluetooth**

Es un estándar de red de área personal más fuerte que el estándar IEEE 802.11x. Fue desarrollado para usar aplicaciones de transferencia de datos de corto alcance entre computadoras y dispositivos como teléfonos móviles.

En la topología en estrella, 7 nodos admiten la comunicación con una estación central. Algunas compañías han desarrollado sensores inalámbricos que usan tecnología Bluetooth, pero no han sido aceptados por grandes círculos debido a las limitaciones de la tecnología Bluetooth.

Las principales razones por las cuales la tecnología Bluetooth no es aceptada en las redes de sensores inalámbricos se enumeran a continuación;

- Alto consumo de energía para una distancia de transmisión corta.
- Lleva mucho tiempo salir del modo de espera y sincronizar nuevamente con el sistema, lo que aumenta el consumo promedio de energía del sistema.
- Definición de menos posibilidades de nodos

Tabla 2. 3: Propiedades físicas del protocolo de comunicación Bluetooth.

<b>Rango de frecuencia</b>	2402 – 2480 MHz
<b>Velocidad de datos</b>	1 Mbps (físico)
<b>Ancho de banda del canal</b>	1 MHz
<b>Cantidad de canales</b>	79
<b>Distancia</b>	10 – 100 m
<b>Encriptación</b>	Identificación del dispositivo y longitudes de clave de 0/40/64 bits
<b>Potencia de salida del Tx</b>	Máximo 20 dBm (0.1mw)

Fuente: (Lee et al., 2007)

## 2.2. Arquitectura de redes inalámbricos de sensores.

Hay muchos métodos de comunicación de red diferentes disponibles para la comunicación inalámbrica. Debido a que la estructura de las redes de sensores inalámbricos es diferente de otras áreas de aplicación, se utilizan arquitecturas, tales como, estrella, malla y de red híbrida malla-estrella. (Faludi, 2011)

### 2.2.1. Red tipo estrella.

Un nodo es un tipo de conexión de red que opera en forma de enviar o recibir mensajes de una estación central a un punto de control. De acuerdo con Faludi, (2011) en este tipo de conexión de red, los puntos de nodo solo pueden transferir datos hacia y desde la estación central. Cada nodo no puede transferir datos entre sí.

La ventaja de esta conexión es que, para redes de sensores inalámbricos, los nodos pueden simplemente controlar su consumo de energía. Además, el retardo de transmisión de datos entre la estación central y el nodo también es muy bajo. El inconveniente es que todos los nodos deben estar dentro del área de cobertura de la estación central. (Faludi, 2011)

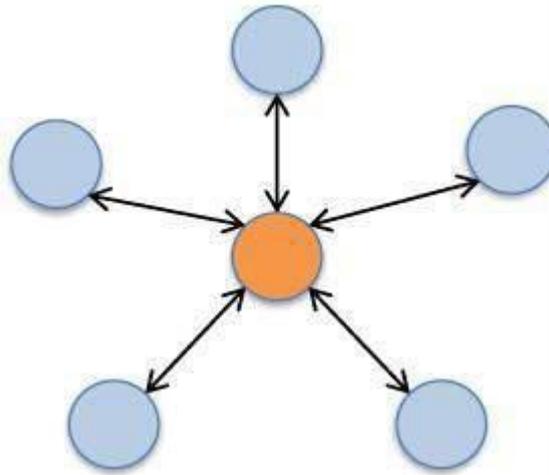


Figura 2. 2: Red tipo estrella.  
Fuente: (Faludi, 2011)

### 2.2.2. Red tipo malla.

La red tipo malla permite que un nodo en un tipo de conexión de red se comunique con otro nodo dentro del área de cobertura de un nodo. El área amplia es un método altamente preferido para redes inalámbricas de sensores.

Si un sensor inalámbrico desea establecer una conexión con otro sensor que está fuera de rango, utiliza los otros nodos del sensor como un puente y se comunica con el nodo del sensor que está fuera del área de cobertura de

las ondas de radio. Con este método, es posible comunicarse utilizando poca potencia a distancias muy grandes. (Faludi, 2011)

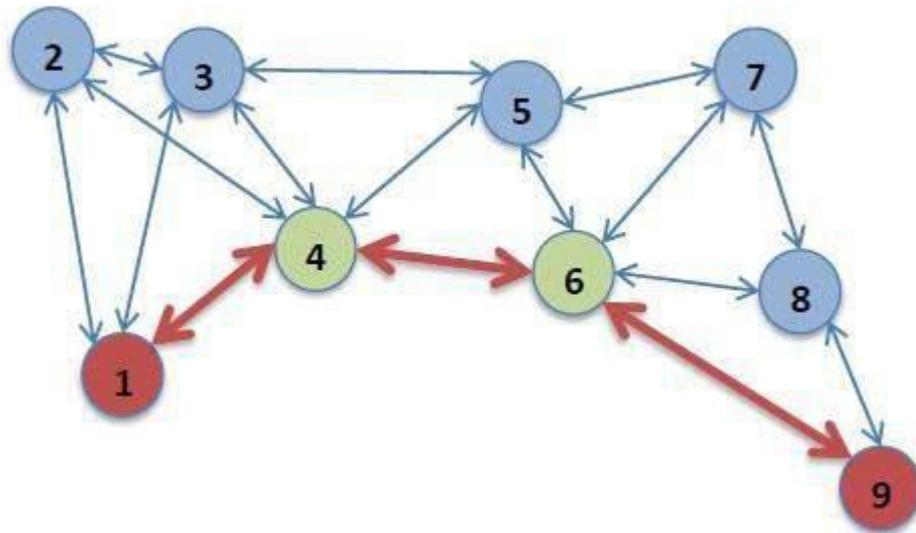


Figura 2. 3: Red tipo enmallada.  
Fuente: (Faludi, 2011)

La figura 1.3 muestra un ejemplo de transferencia de datos entre sensores inalámbricos que utilizan una red en malla. Aunque los nodos 1 y 9 están fuera del alcance de la otra, se comunican usando los nodos 4 y 6. Además, con este método de red, un nodo se puede agregar fácilmente al sistema y admite la conexión de hasta 255 puntos de nodo.

La desventaja es que el consumo de energía es mayor que el tipo de conexión de red en estrella porque los nodos de nodo envían y reciben sus propios datos, así como la comunicación de datos entre los otros nodos que intentan comunicarse entre sí.

### 2.2.3. Red híbrida estrella – malla.

Al utilizar en conjunto la estructura de la red estelar y la red de malla, área de cobertura máxima, cuyo objetivo es mantener el consumo de energía a un nivel mínimo.

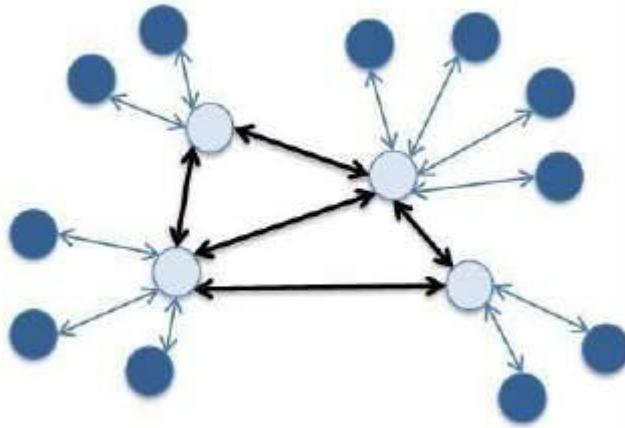


Figura 2. 4: Red híbrida tipo estrella – malla.  
Fuente: (Faludi, 2011)

En esta topología de red, los nodos de baja potencia no pueden conectarse a otros nodos además de su propia transferencia de datos. Se conecta directamente al nodo al que quiere acceder a través de otro nodo de alta potencia.

Este método permite que los nodos utilizados en la red de sensores inalámbricos, que está instalada en un área grande, consuman una gran cantidad de energía. Esta topología de red también se conoce como topología ZigBee.

## Capítulo 3: Desarrollo del componente práctico.

### 3.1. Descripción del componente práctico.

Se implementó un banco de pruebas de simulación para la definición del problema presentado. Para el desarrollo de la simulación se utilizó el programa OMNeT ++, que es un entorno de simulación de eventos discretos. Para este propósito, se instaló la herramienta de simulación OMNeT ++. Para realizar estos experimentos de simulación, nuestro objetivo principal fue comprender la compensación de la eficiencia energética entre los parámetros de la red del sensor que afectan la vida útil. Antes de explicar la configuración utilizada para la simulación, parece lógico introducir primero la herramienta del simulador OMNeT ++.

### 3.2. ¿Qué es OMNeT ++?

OMNeT ++ es un simulador de eventos discretos modular orientado a objetos. El nombre en sí mismo significa prueba objetiva de red modular (*Objective Modular Network Testbed in C ++, OMNeT ++*). OMNeT ++ tiene sus raíces distantes en OMNeT, el simulador se puede usar para modelar:

- a. Protocolos de comunicación
- b. Redes de computación y modelado de tráfico
- c. Sistemas multiprocesadores y distribuidos
- d. Sistemas administrativos
- e. Cualquier otro sistema donde el enfoque de evento discreto sea adecuado.

Es decir, que el modelado sobre OMNeT ++ consiste en módulos anidados jerárquicamente. La profundidad del anidamiento del módulo no está limitada, lo que permite al usuario reflejar la estructura lógica del sistema real en la estructura del modelo. Algunas de las propiedades de los módulos anidados son:

- Los módulos se comunican con el envío de mensajes. Los mensajes pueden contener estructuras de datos arbitrariamente complejas.
- Los módulos pueden enviar mensajes directamente a su destino o a lo largo de una ruta predefinida, a través de puertas y conexiones.

- Los módulos pueden tener parámetros que se utilizan con tres propósitos principales: personalizar el comportamiento del módulo; para crear topologías de modelo flexibles (donde los parámetros pueden especificar el número de módulos, la estructura de conexión, etc.); y para la comunicación del módulo, como variables compartidas.
- Los módulos en el nivel más bajo de la jerarquía del módulo deben ser proporcionados por el usuario, y contienen los algoritmos en el modelo. Durante la ejecución de la simulación, parece que los módulos simples se ejecutan en paralelo, ya que se implementan como cortinas (a veces denominados procesos livianos). Para escribir módulos simples, el usuario no necesita aprender un nuevo lenguaje de programación, pero se supone que tiene algún conocimiento de la programación en C ++.

Las simulaciones utilizando OMNeT ++ pueden presentar diferentes interfaces de usuario para diferentes propósitos: depuración, demostración y ejecución por lotes. Las interfaces de usuario avanzadas hacen visible el interior del modelo para el usuario, le permiten iniciar/detener la ejecución de la simulación e intervenir cambiando variables/objetos dentro del modelo. Esto es muy importante en la fase de desarrollo/depuración del proyecto de simulación. Las interfaces de usuario también facilitan la demostración de cómo funciona un modelo, dado que está escrito en C ++, el simulador es básicamente portátil; debería ejecutarse en la mayoría de las plataformas con un compilador de C ++. Las interfaces de usuario avanzadas de OMNeT ++ son compatibles con Windows 7, Windows 8 y Windows X.

OMNeT ++ se ha ampliado para ejecutar la simulación en paralelo. Se puede usar cualquier tipo de mecanismo de sincronización. Un mecanismo de sincronización adecuado es la sincronización estadística, para lo cual OMNeT ++ proporciona soporte explícito desde (Omnet ++ Team Members, 2018). En la figura 3.1 se muestra la presentación de pantalla del simulador OMNeT ++ 4.0.

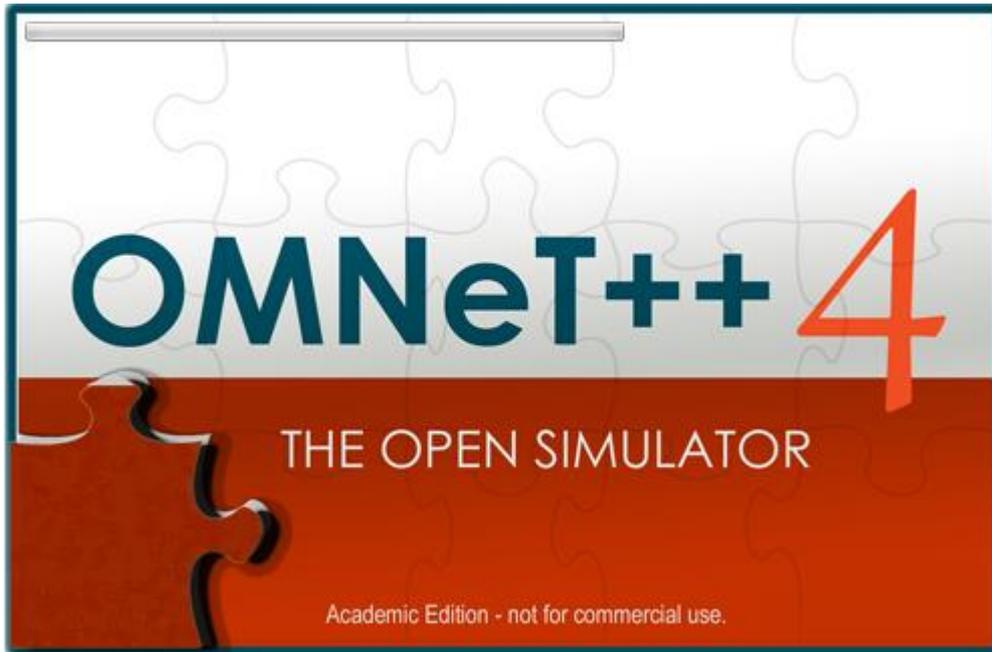


Figura 3. 1: Pantalla principal de la plataforma de simulación OMNeT ++ 4.  
Elaborado por: Autor.

### 3.3. Implementación de la simulación.

El simulador está diseñado para modelar una amplia gama de tamaños de redes de sensores físicos, densidades de nodos y tasas de mensajes ofrecidos. La ubicación del nodo de usuario, es decir, el nodo receptor, se coloca aleatoriamente en el borde izquierdo de un rectángulo de dimensiones de 800 cm x 500 cm; los otros nodos de red se colocan aleatoriamente dentro del rectángulo. El simulador se configuró con los siguientes parámetros:

1. El área de la matriz física es 800 x 500 (centímetros);
2. Los nodos en el área se distribuyen aleatoria y uniformemente;
3. La longitud de los mensajes inter-nodos es de 7 bits;
4. Los mensajes se generan periódicamente con un período de T (período de consulta);
5. La capacidad máxima de conectividad de un nodo es igual a la cantidad de nodos en el área;
6. Se supone que el retardo de procesamiento es de 1 s para cada nodo del sensor;
7. El límite de satisfacción del usuario se acepta como 0.2 para la utilización de la red.

8. El consumo de energía que corresponde al envío de un paquete es de 1 unidad de energía, que es  $CR^2$ , donde  $R$  es el radio de comunicación en centímetros y  $C$  es una constante de escala. En este ejemplo, se toma 1 unidad de energía como  $(R/100)^2$ .

El simulador tiene un modo opcional de gráficos en color (animación). En este modo, se muestra el diseño físico de la red generada; un código de color identifica el estado de cada nodo y cada mensaje internodal. La verificación de la simulación se simplificó realizando simulaciones en su modo de animación, a un ritmo lo suficientemente lento como para que un experto humano pueda observar y registrar todo el comportamiento simulado de la red y compararlo con el esperado. Los datos brutos se colocan en un archivo legible por Microsoft Excel para el procesamiento posterior. Las simulaciones se realizaron en una amplia gama de combinaciones de parámetros de entrada que se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3. 1: Parámetros de simulación y sus valores seleccionados.

<b>Parámetros</b>	Bajo (L)	Medio (M)	Alto (H)
Capacidad inicial de la batería (mJ)	1000	2000	3000
Radio de comunicación (cm)	300	400	500
Período de consulta (s)	10	20	30
Nº de nodos	15	30	45

Elaborado por: Autor.

El simulador se diseñó con el objetivo relativamente estrecho de modelar el comportamiento de redes inalámbricas de sensores, por lo que se omiten varias posibles irregularidades de red y se presuponen algunas simplificaciones del tráfico de red (incluida la definición de todos los mensajes para que sean idénticos en longitud). Para muchas aplicaciones potenciales, como la detección de temperatura (termostatos inalámbricos), el modelo de mensaje utilizado es una buena aproximación de la realidad; para otros, como

los sistemas de seguridad, que pueden tener más ráfagas y generación de mensajes correlacionados.

Es posible realizar la simulación en redes de sensores generadas aleatoriamente, que se definen mediante los cuatro parámetros que se mostraron en la tabla 3.1. Se puede cambiar cualquiera de los parámetros para producir una red diferente. En el presente diseño de simulación, se utiliza una cuadrícula rectangular como el área de detección, una de las esquinas se fija en el origen. El simulador distribuye aleatoriamente los nodos del sensor al área de detección, cada nodo tiene una capacidad de energía inicial predefinida. El tamaño de cada paquete de datos (mensaje internodal) se elige para ser de 7 bits por simplicidad después de todas las encapsulaciones en capas intranodales. En este escenario, se mide la vida útil de la red a medida que pasa el tiempo de simulación. Para cada combinación de parámetros, se generan diez redes aleatorias y se promedian los resultados.

El escenario implementado es el siguiente: una vez que se inicializa la simulación, se generan nodos de sensores distribuidos aleatoriamente. Luego, los nodos configuran sus conexiones con los nodos vecinos y las rutas de enrutamiento se establecen de acuerdo con el algoritmo de enrutamiento MH aplicado a las redes de sensores.

Para implementar este algoritmo en redes de sensores auto-configuradas, las calificaciones asignadas a los nodos de sensores se usaron de la siguiente manera. En primer lugar, el nodo de usuario, que será la raíz del árbol, obtiene la calificación más baja, sería "0"; y luego sus nodos vecinos obtienen la siguiente calificación que es "1"; al usar este método, cada nodo sensor toma el siguiente grado del nodo vecino que tiene la calificación más baja entre los otros nodos vecinos. Habiendo sido asignados todos los grados, cada nodo prefiere un nodo de menor grado, que en realidad es el nodo que tiene un salto mínimo al nodo de usuario, para establecer su conexión. Al usar esta metodología, se forman rutas de salto mínimas desde los nodos del sensor de origen hasta el sumidero (sink). Además, todos los bordes tienen el mismo peso que 1.

En la figura 3.2 se ilustra los nodos que están distribuidos al azar alrededor del área escogida para la simulación de la red inalámbricas de sensores.

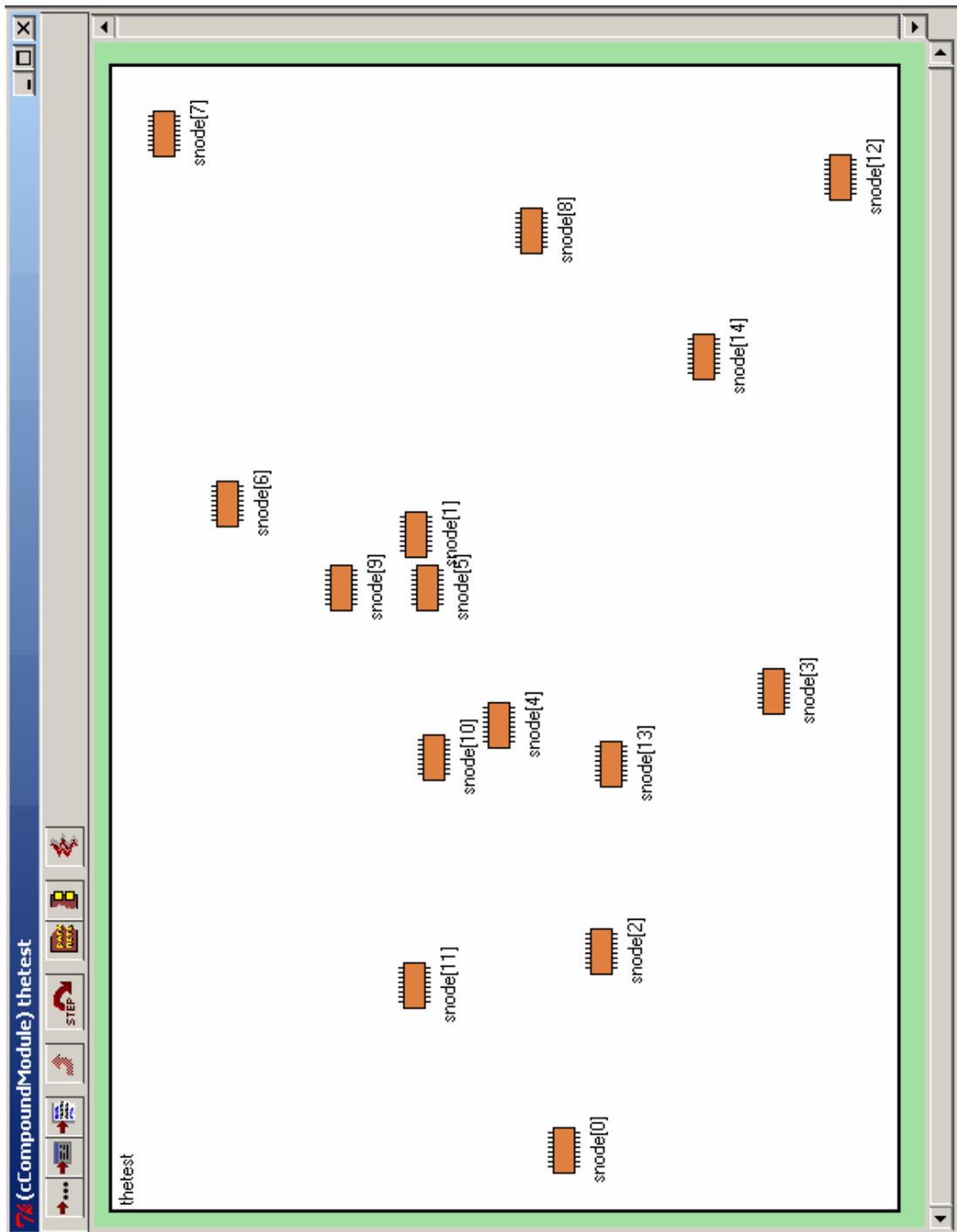


Figura 3. 2: Una instantánea del modelo de simulación de una red inalámbrica de sensores.

Elaborado por: Autor.

En la figura 3.3, se muestra que los nodos detectan a sus nodos vecinos y determinan la ruta de sumidero (el nodo de usuario).

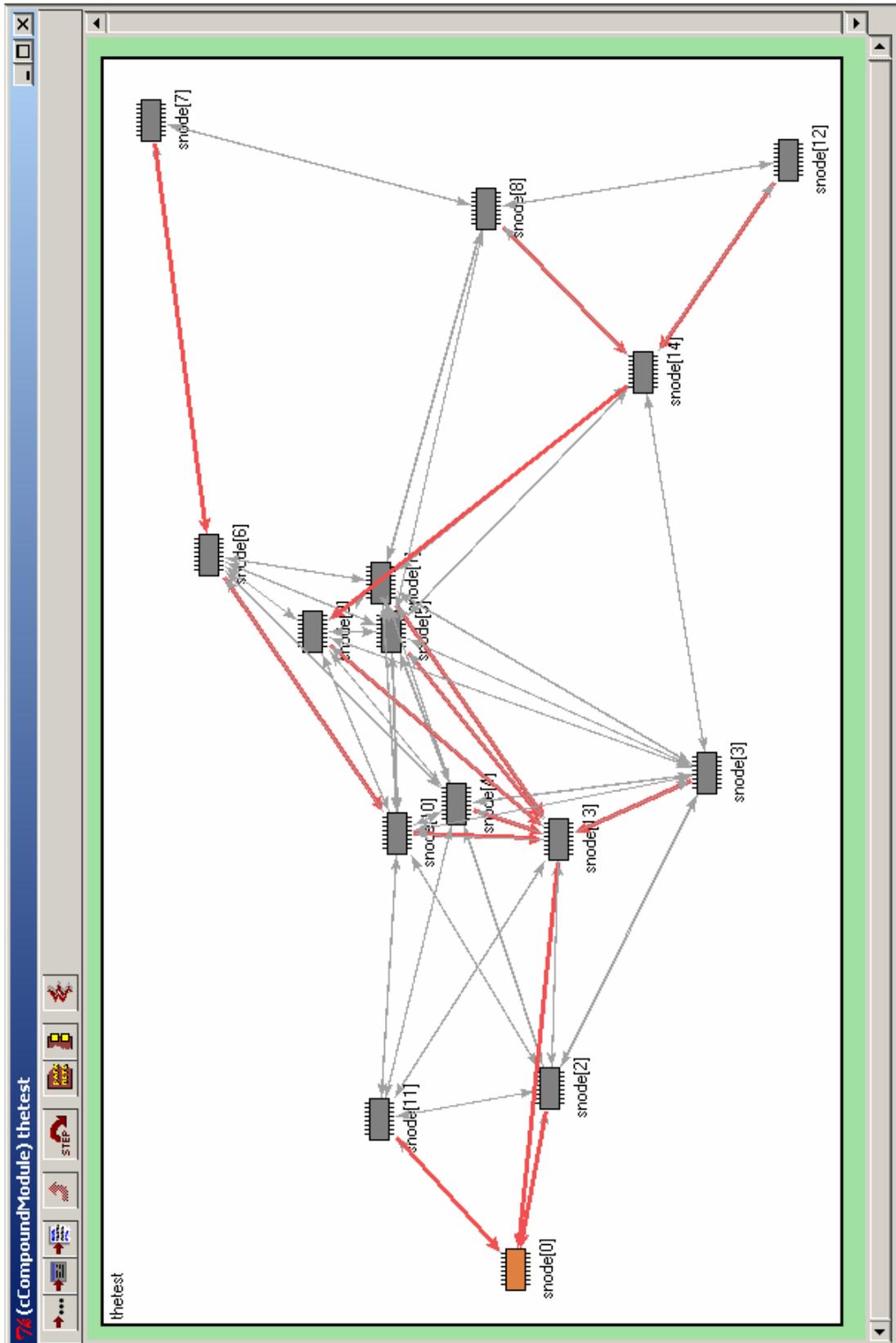


Figura 3. 3: Tasas de transferencia de datos de los estándares IEEE 802.11a e IEEE 802.11b.  
Elaborado por: Autor.

Todos los nodos y el nodo de usuario son estacionarios. La red de sensores se modela como una colección de estos nodos, que transmite y recibe paquetes a través de sus canales de radio. Los canales también se modelan como entidades específicas, que reciben mensajes de los nodos.

Mientras, que la figura 3.4 muestra los canales de conexión. Un canal, que es un miembro de la ruta, se muestra en el lado derecho. El otro es para un canal ordinario. La comunicación entre capas dentro de un solo nodo se lleva a cabo mediante el envío de mensajes. Cuando un paquete se genera en un nodo, se pasa de una capa a otra; hasta que alcanza la capa de radio (que se llama "layer0") del nodo de detección.

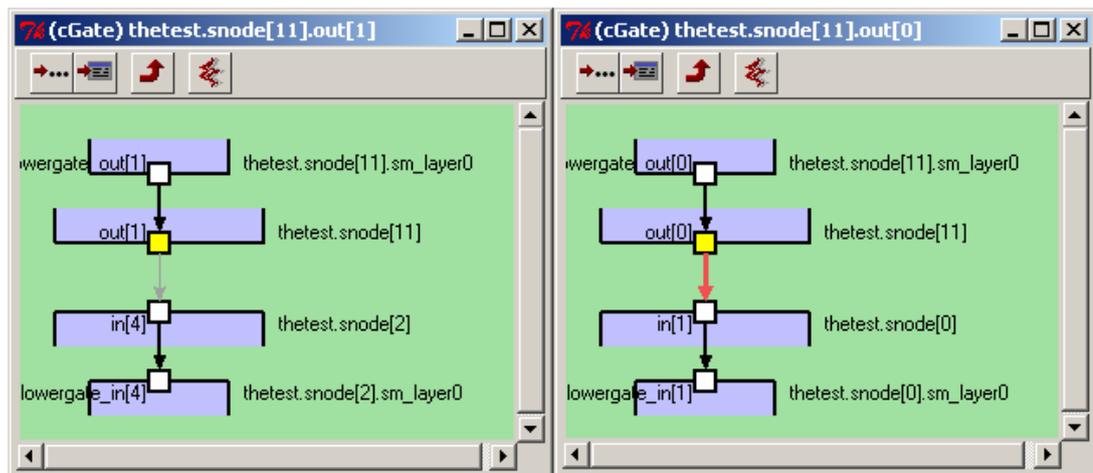


Figura 3. 4: Configuración de la WSN, la primera para la conexión y la segunda para fines de conectividad y enrutamiento.

Elaborado por: Autor.

En la figura 3.5, se muestran las propiedades del paquete. Un paquete, que se encapsula y se envía de un nodo a otro, se muestra en el lado izquierdo. El otro es un mensaje recién nacido y aún no ha sido encapsulado. La capa de radio genera un paquete sobre el aire y lo envía a la entidad de canal reservada para el enrutamiento. La entidad de canal que simula las condiciones de un canal de radio, y entrega el paquete a su nodo vecino, que está en la ruta entre los nodos lo suficientemente cerca para recibirlo (dentro del rango de comunicación). El modelado del sensor de simulación se muestra en la figura 3.6

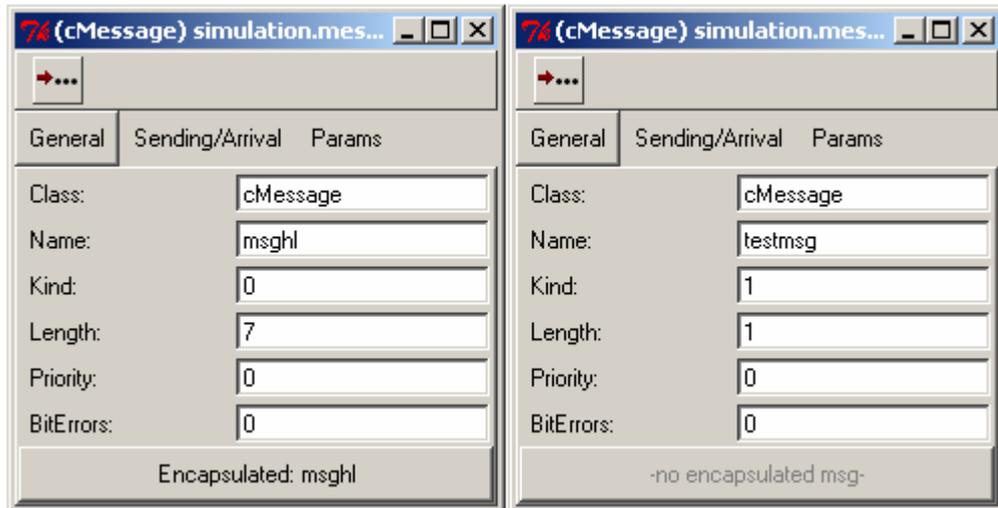


Figura 3. 5: Configuración de mensajes en la WSN, la primera es un mensaje internodal y la segunda es un mensaje intranodal.

Elaborado por: Autor.



Figura 3. 6: Configuración del modelado de la red de sensores.

Elaborado por: Autor.

Dos instantáneas de los nodos del sensor, la primera genera el mensaje, pero la segunda está a punto de enviarlo

Para el proceso de agregación, cada nodo intermedio en las rutas de enrutamiento transmite un solo paquete agregado incluso si recibe múltiples paquetes de entrada uno después de otro. En otras palabras, los paquetes sucesivos que llegan a un nodo de enrutador deben agregarse y el nodo genera solo un paquete para representar todos esos paquetes agregados.

A medida que avanza la simulación, los nodos, que están bajo un tráfico intenso, comienzan a morir uno tras otro. La red se aceptará como viva hasta el momento en que el nodo de usuario ya no esté satisfecho con el nivel de utilidad de la red. Este valor de tiempo se denomina "duración" de la red, que es el resultado de la simulación para una configuración de parámetro particular.

La evaluación de la utilidad de esta simulación se realiza de la siguiente manera. Los nodos de usuario esperan obtener todos los paquetes generados por los nodos del sensor en el período definido, pero algunos de ellos se deben a algunas fallas que se han producido en el camino y debido a la agregación de datos utilizada. Por lo tanto, la utilidad toma un valor entre 0 y 1. El usuario está satisfecho con los valores que son mayores que el umbral especificado en la definición del problema.

En la figura 3.7, se muestra la pantalla de salida del simulador. Especialmente, en esta ilustración, se entiende que el nodo de usuario se ha aislado y, por lo tanto, se detuvo la simulación. Las iteraciones se llevan a cabo hasta que se reúnen los resultados de todas las combinaciones. El número de iteraciones es:

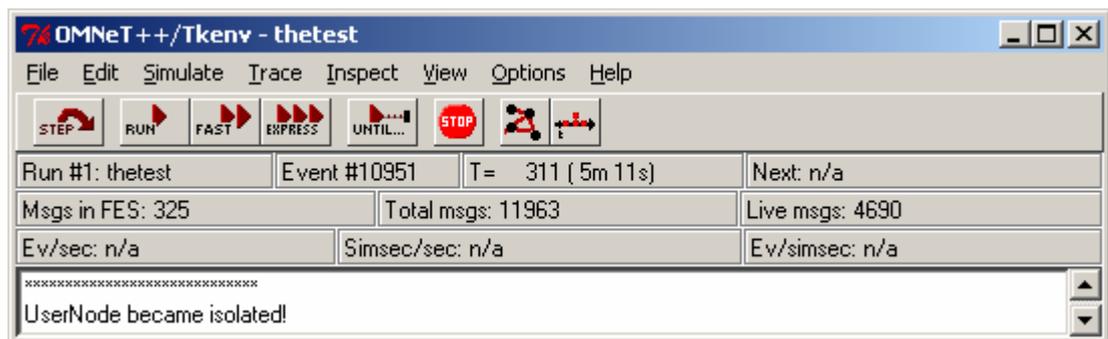


Figura 3. 7: Instantánea de la interfaz de usuario de la simulación de WSN.  
Elaborado por: Autor.

$$I = m^n$$

Donde,

$I$ , es el número de iteraciones;

$m$ , es el número de posibles valores para un parámetro;

$n$ , es el número de parámetros afectados

Por lo tanto, para el presente trabajo es:  $3^4 = 81$

Además, para cada combinación de parámetros, se generaron 10 redes aleatorias, que en total las iteraciones serían 810. La próxima sección, se muestra la interpretación de los resultados obtenidos de este extenso estudio de simulación.

#### **3.4. Resultados obtenidos de la red inalámbrica de sensores.**

Al realizar estos experimentos de simulación, nuestro objetivo es comprender las relaciones entre los parámetros de diseño escogidos. Para hacer esto, los resultados de muchas iteraciones se registraron y procesaron en una hoja de Excel. Se consiguieron 54 parcelas únicas diferentes como resultado y 14 parcelas cruciales de ellas son examinadas y analizadas en los siguientes párrafos. En los siguientes gráficos, dos de los parámetros son fijos y los dos restantes varían.

Para la configuración ya descrita con anterioridad (es decir, el período de consulta y la densidad del nodo se fija como 10 y 15, respectivamente), la figura 3.8 compara la vida útil o duración de la red cuando se varían el radio de comunicación y la capacidad inicial de la batería. La figura ilustra que a medida que el radio de comunicación aumenta hasta un punto, la vida útil aumenta y más allá de ese punto, comienza a disminuir. Esto se debe principalmente al hecho de que más allá de ese cierto punto del radio de comunicación, los nodos comienzan a consumir mucha energía y esto hará que mueran pronto.

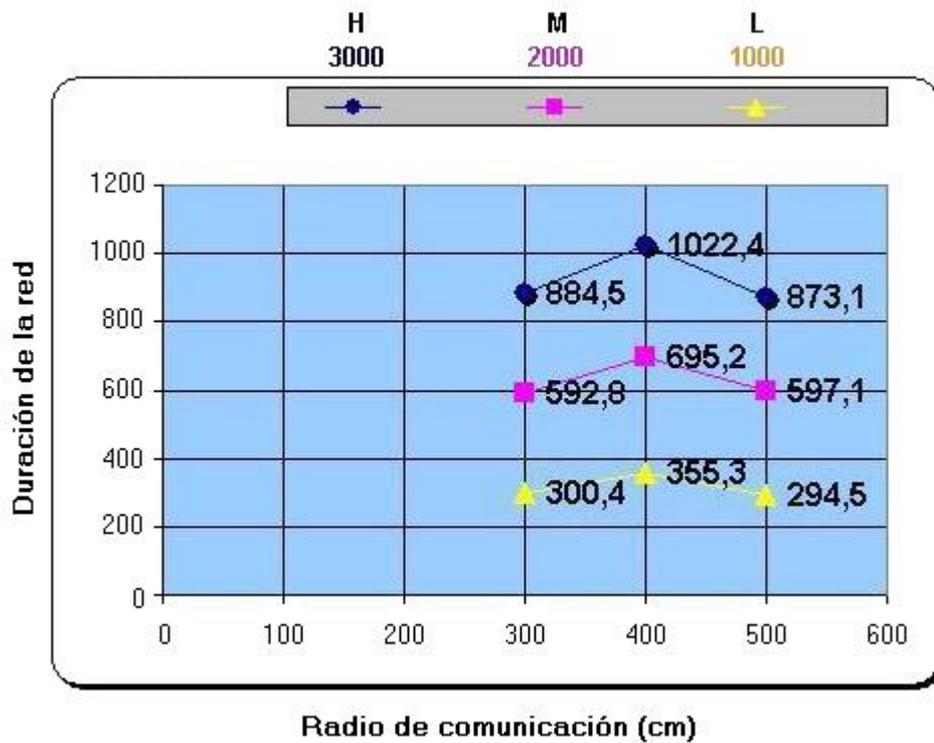


Figura 3. 8: Gráfica correspondiente a la capacidad inicial de la batería para un período de consulta 10 y números de nodos 15.  
Elaborado por: Autor.

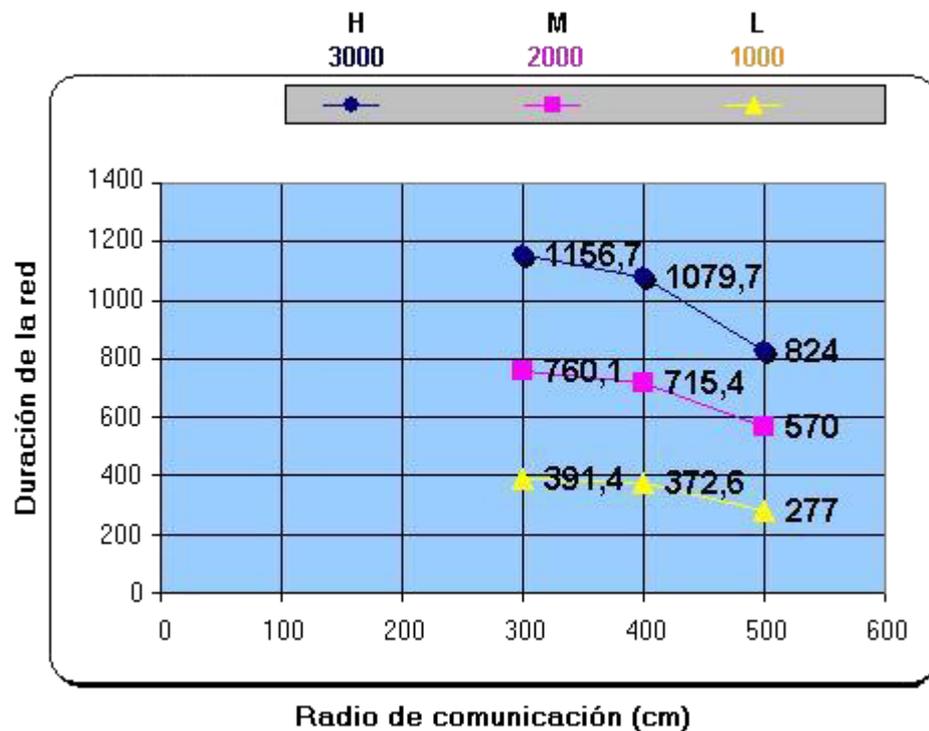


Figura 3. 9: Gráfica correspondiente a la capacidad inicial de la batería para un período de consulta 10 y números de nodos 30.  
Elaborado por: Autor.

De manera similar a la figura 3.8, las figuras 3.9 y 3.10 también comparan la vida útil de la red ya que el radio de comunicación y la capacidad inicial de la batería varían. Las configuraciones seleccionadas en estas representaciones son el parámetro de densidad del nodo (número de nodos) que es 30 y 45 en las figuras 3.9 y 3.10, respectivamente. Se observa a partir de estas figuras que a medida que aumenta el radio de comunicación, la vida útil disminuye. Una cosa a tener en cuenta en la figura 3.9 es el valor óptimo del radio de comunicación, que puede ser de alrededor de 300 cm para esta configuración. A medida que aumenta la capacidad de la batería, el margen entre los valores de vida útil para el radio de comunicación diferente se hace más amplio también.

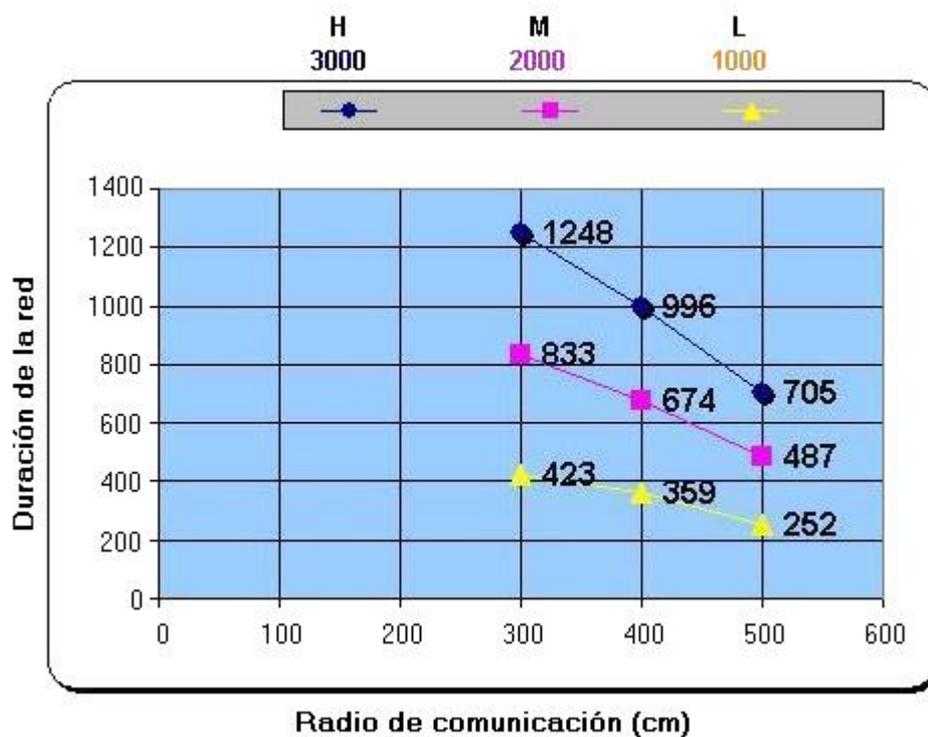


Figura 3. 10: Gráfica correspondiente a la capacidad inicial de la batería para un período de consulta 10 y números de nodos 45.

Elaborado por: Autor.

Además, la figura 3.10 muestra una disminución catastrófica en la vida útil mientras que el radio de comunicación aumenta para esta configuración. Esto se debe principalmente al hecho de que en esta configuración el número de nodos es alto y esto causa mucho más tráfico en la red y, por lo tanto, significa que habrá mucho más consumo de energía por nodo a medida que aumente el radio de comunicación. Por lo tanto, aumentar el número de nodos

en el área para una mejor cobertura puede conducir a un aumento marginal después de cierto punto y también el radio de comunicación aumenta la vida considerablemente en tales casos. La figura 3.10 también muestra que a medida que aumenta la capacidad inicial de la batería, la vida útil aumenta en esta proporción.

Ahora para una configuración de radio de comunicación y número de nodos fijados en 300 y 15, respectivamente. La figura 3.11 compara la vida útil de la red cuando se varía el período de consulta y la capacidad de batería inicial.

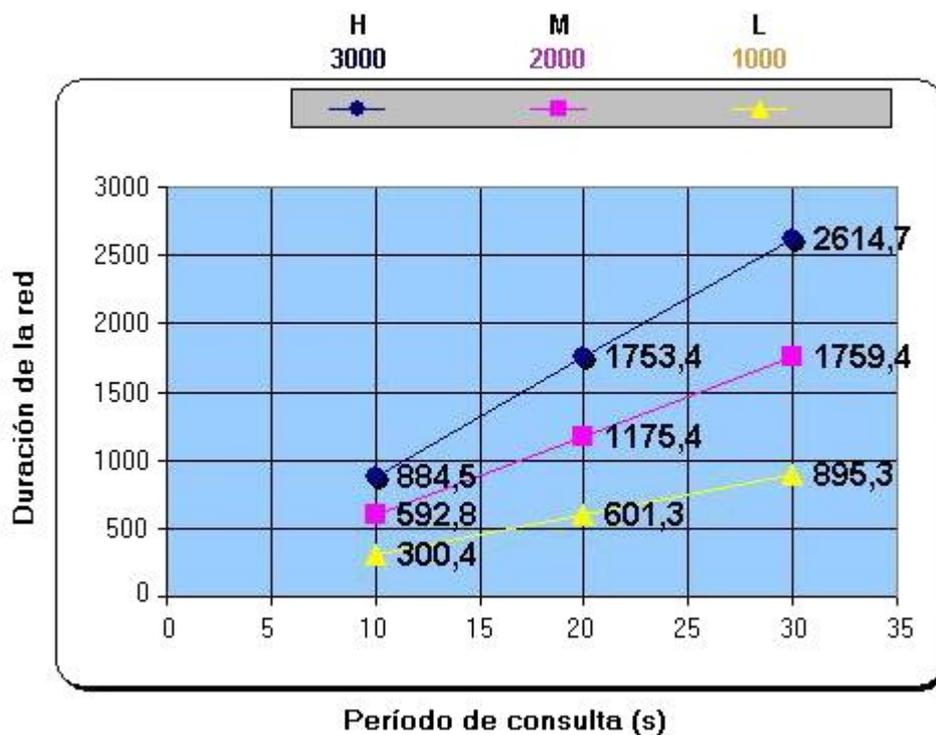


Figura 3. 11: Gráfica correspondiente a la capacidad inicial de la batería para un radio de comunicación de 300 cm y números de nodos 15.

Elaborado por: Autor.

La figura 3.11 muestra que el aumento en la capacidad inicial de la batería y el período de consulta hace que la vida útil aumente significativamente. Estos aumentos son casi lineales, es posible concluir a partir de este gráfico que existe una relación lineal entre el período de consulta y la duración, y también entre la capacidad inicial de la batería y la duración. Esto se debe a que ambos parámetros tienen alguna contribución a la red solo en la base nodal. Esto significa que tanto la capacidad inicial de la batería

como el período de consulta tienen un efecto directo en la duración del nodo del sensor. Por lo tanto, si la vida útil de los nodos aumenta dos veces, la duración de la red también aumentará dos veces (es decir, en la misma cantidad).

Las figuras 3.12, 3.13 y 3.14 comparan la vida útil de la red ya que la densidad del nodo y la capacidad inicial de la batería varían. En la figura 3.12, el radio de comunicación se toma como un valor fijo de 300 cm. Se ve claramente a partir de esta figura que cuando la densidad del nodo aumenta, la vida útil aumenta al disminuir la cantidad. Esto se debe principalmente al hecho de que al aumentar la densidad del nodo más allá de cierto punto, el tráfico se llena. Estas figuras también muestran que, para una configuración determinada, existe una relación lineal entre la capacidad inicial de la batería y la vida útil.

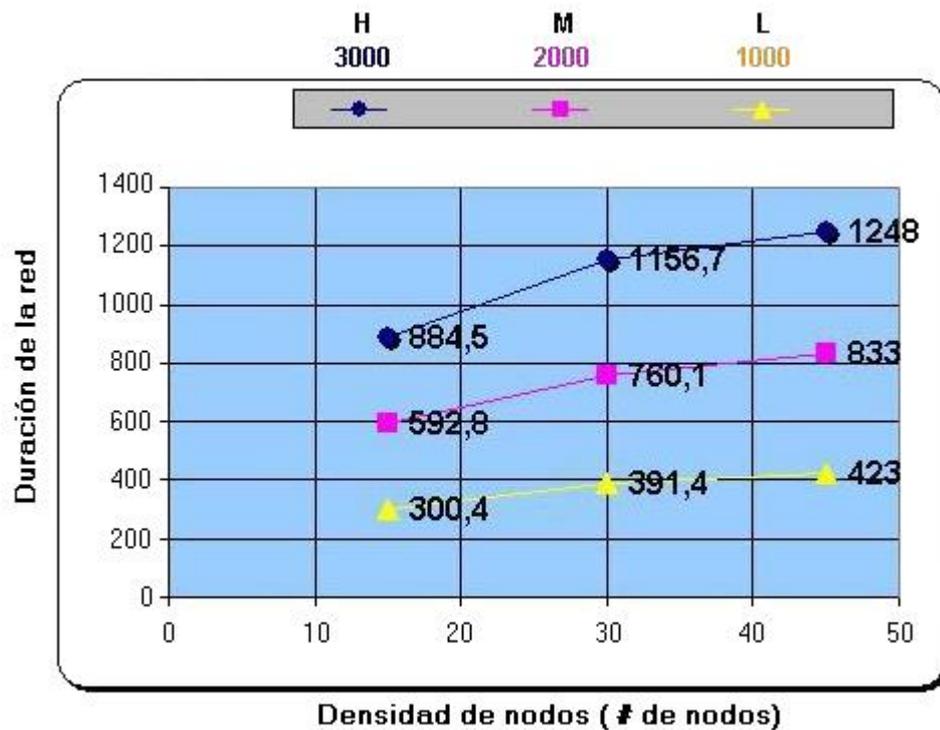


Figura 3. 12: Gráfica correspondiente a la capacidad inicial de la batería para un radio de comunicación de 300 cm y período de consulta 10.

Elaborado por: Autor.

Para la configuración vista en la figura 3.12, ahora varía el radio de comunicación a 400 cm. La figura 3.13 compara la vida útil de la red como la capacidad inicial de la batería y la densidad del nodo. Se puede ver en la figura

3.13 que, como si se mira una ventana que muestre que la vida útil está en condiciones de estado estable para esta configuración. En realidad, hay un valor óptimo de la densidad del nodo para este caso. Mientras la densidad del nodo aumenta, antes y después del valor óptimo de la densidad del nodo, la vida útil es menor que la del valor óptimo.

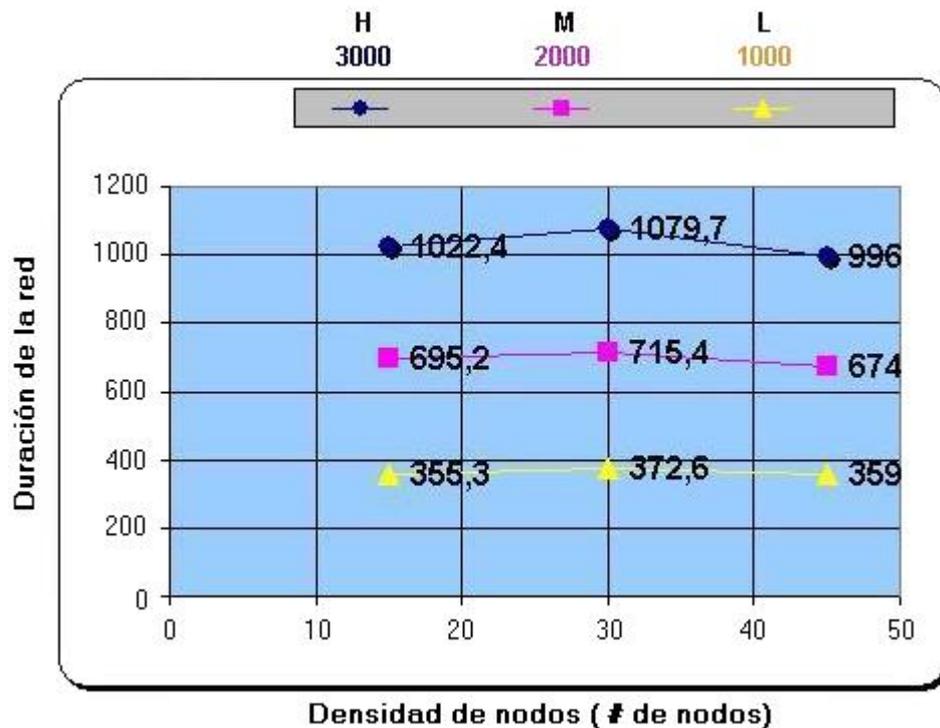


Figura 3. 13: Gráfica correspondiente a la capacidad inicial de la batería para un radio de comunicación de 400 cm y período de consulta 10.  
Elaborado por: Autor.

En la figura 3.14, el radio de comunicación es de 500 cm, la vida útil de la red se ilustra como la capacidad inicial de la batería contra el número de nodo variando. Se representa en la figura 3.14 que cuando el radio de comunicación es 500 cm, mientras que la densidad del nodo aumenta de 15 a más de 45 nodos, la vida útil comienza a disminuir para esta configuración dada. Esto se debe a que, para un radio de comunicación de 500 cm, el valor óptimo de la densidad del nodo es inferior a 15 nodos, por lo que ir más allá de ese valor de la densidad del nodo hace que la vida útil disminuya lentamente.

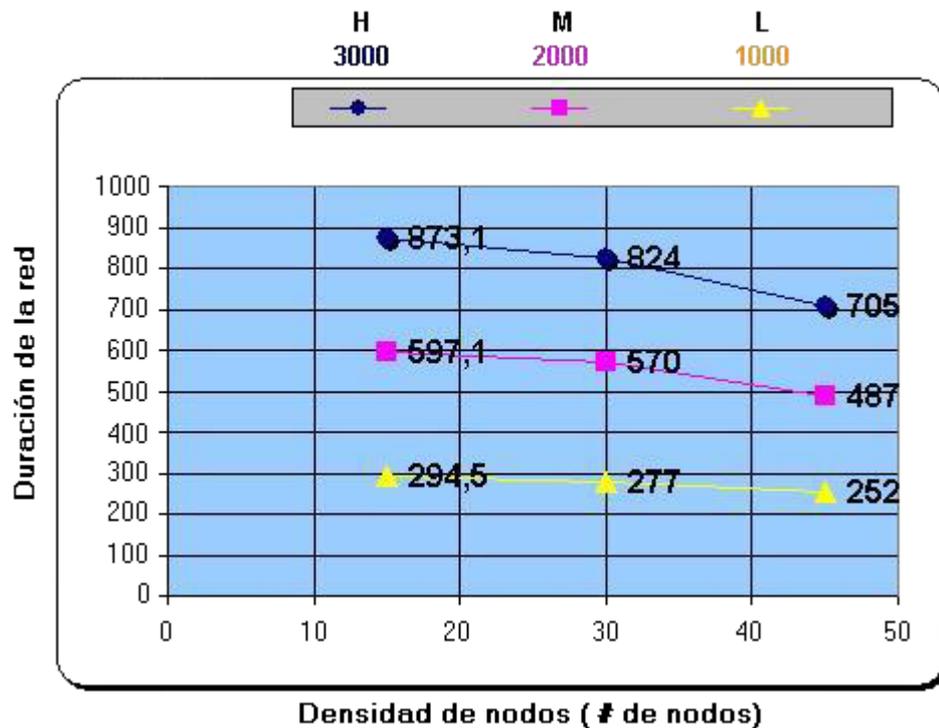


Figura 3. 14: Gráfica correspondiente a la capacidad inicial de la batería para un radio de comunicación de 500 cm y período de consulta 10.

Elaborado por: Autor.

Para la configuración de las figuras 3.15, 3.16 y 3.17; comparan la vida útil de la red ya que el radio de comunicación y el período de consulta son variados. La densidad del nodo toma el valor de 15, 30 y 45 nodos en las figuras 3.15 a 3.17, respectivamente. La figura 3.15 muestra que a medida que el radio de comunicación aumenta hasta un punto, la vida útil aumenta; más allá de ese punto, la duración del nodo comienza a caer. Esto se debe principalmente al hecho de que la potencia consumida para la transmisión está relacionada con el cuadrado de la distancia y más allá de un cierto punto del radio de comunicación, los nodos comienzan a consumir mucha potencia y esto hará que mueran pronto. Este radio de comunicación óptimo es de alrededor de 400 cm para esta configuración elegida. También se puede ver en las tres figuras ya mencionada que, mientras el período de consulta aumenta, la vida útil aumenta. Esto se debe a que la escala de la vida útil de la red aumenta cuando se extiende la vida útil de un nodo sensor.

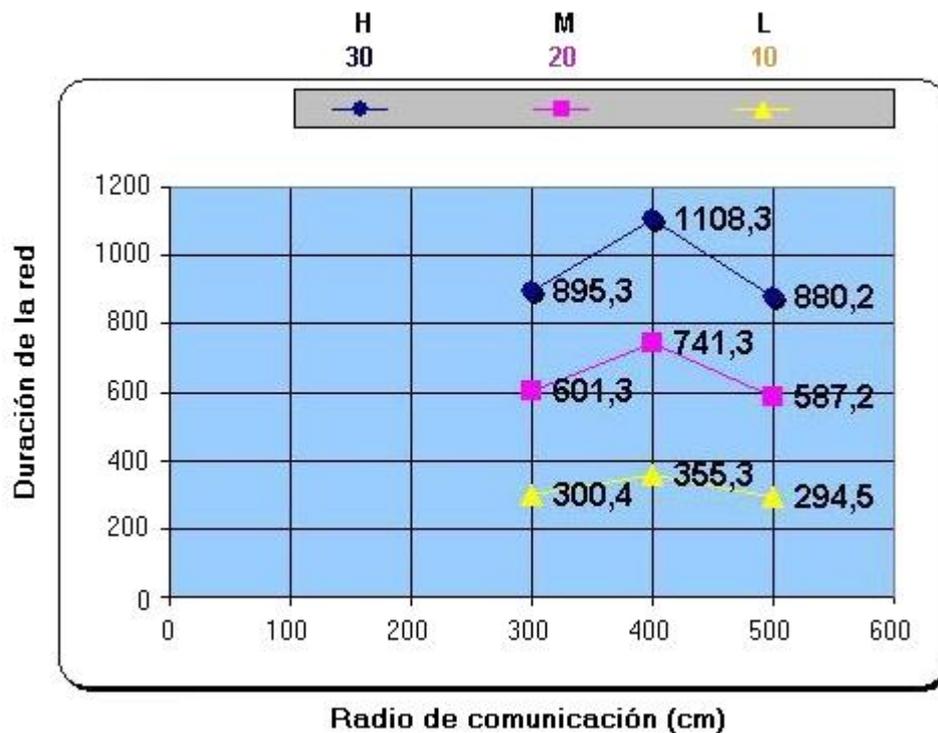


Figura 3. 15: Gráfica correspondiente al período de consulta para capacidad de batería de 1000 mJ y número de nodos 15.  
Elaborado por: Autor.

En la figura 3.16, el valor fijo del número de nodos es 30 por área. También, se observa que cuando la densidad del nodo se convierte en 30 nodos por área, el resultado en el escenario anterior es diferente. En este caso, a medida que el radio de comunicación aumenta, la vida comienza a disminuir. Esto se debe a que la densidad del nodo elegida es tan grande que no se puede encontrar un valor óptimo para el radio de comunicación incrementándolo aún más. También se puede extraer de la figura que el valor óptimo para el radio de comunicación es de alrededor de 300 cm.

Para la configuración anterior, ahora la densidad del nodo es de 45 nodos por área. La figura 3.17 muestra que cuando el número de nodos se convierte en 45 por área, el resultado en el escenario anterior no es tan diferente. En este caso, a medida que aumenta el radio de comunicación, la vida útil continúa disminuyendo, pero en este caso un poco más rápido. Esto se debe a que la densidad del nodo elegida es demasiado grande para encontrar un valor óptimo para cuando el radio de comunicación se

incremento aún más. Se puede examinar en la figura que, el valor óptimo para el radio de comunicación es quizás de alrededor de 300 cm.

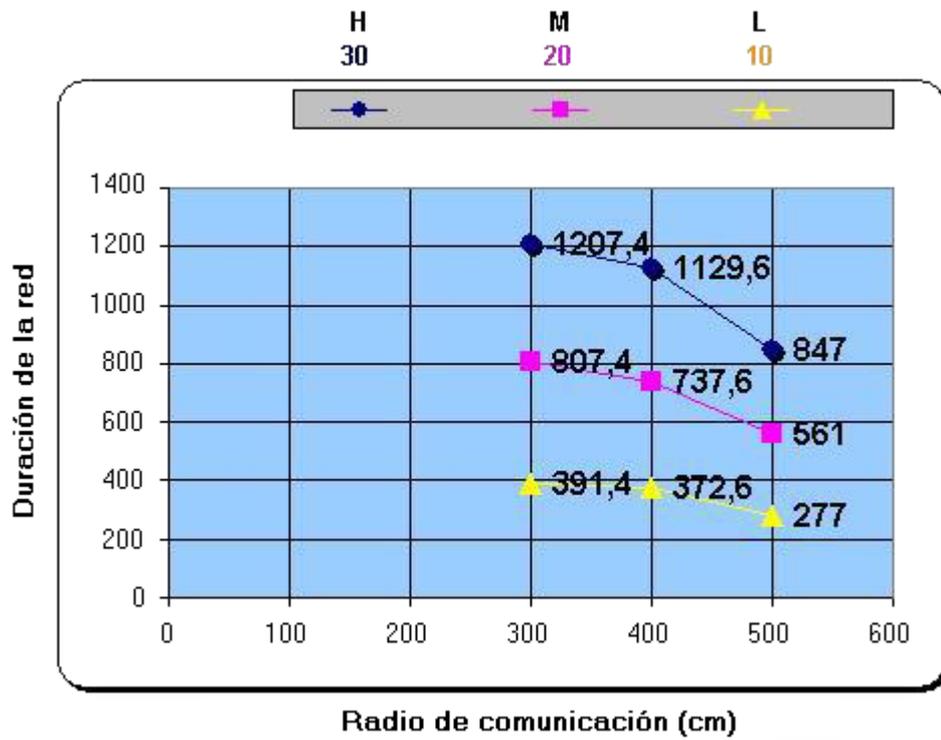


Figura 3. 16: Gráfica correspondiente al período de consulta para capacidad de batería de 1000 mJ y número de nodos 30.

Elaborado por: Autor.

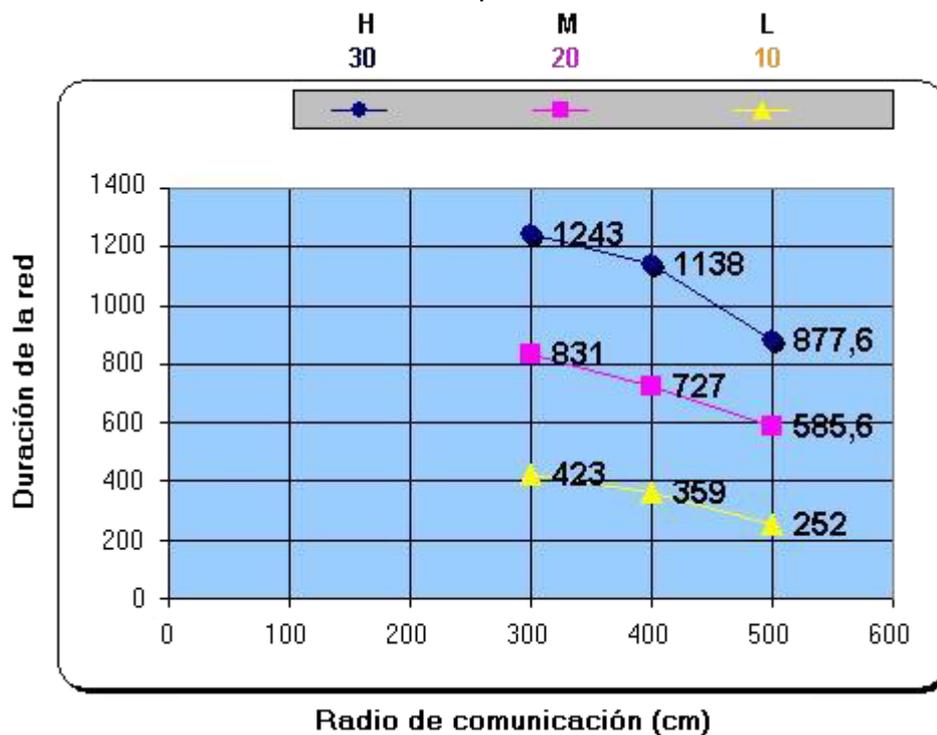


Figura 3. 17: Gráfica correspondiente al período de consulta para capacidad de batería de 1000 mJ y número de nodos 45.

Elaborado por: Autor.

La figura 3.18 compara la vida útil de la red ya que la densidad del nodo y el radio de comunicación varían. Los valores fijos seleccionados son 3000 mJ y 10 segundos para la capacidad de batería inicial y el período de consulta, respectivamente. Cuando la densidad del nodo es alta, se ve claramente en la figura que a medida que aumenta el radio de comunicación, la vida útil cae rápidamente. Cuando la densidad del nodo es media, la figura muestra que a medida que el radio de comunicación aumenta, la vida útil disminuye gradualmente. Cuando la densidad del nodo es baja, la figura muestra que a medida que aumenta el radio de comunicación, la vida útil alcanza un valor óptimo para el valor del radio de comunicación, alrededor de 400 cm. Esto es sucede para todos los valores diferentes de la densidad del nodo, hay un valor óptimo del radio de comunicación. Al mirar las tramas, se puede entender de alguna manera estos valores; para 45 nodos por área, aproximadamente 200 cm; para 30 nodos por área, aproximadamente 300 cm; para 15 nodos por área, aproximadamente 400 cm.

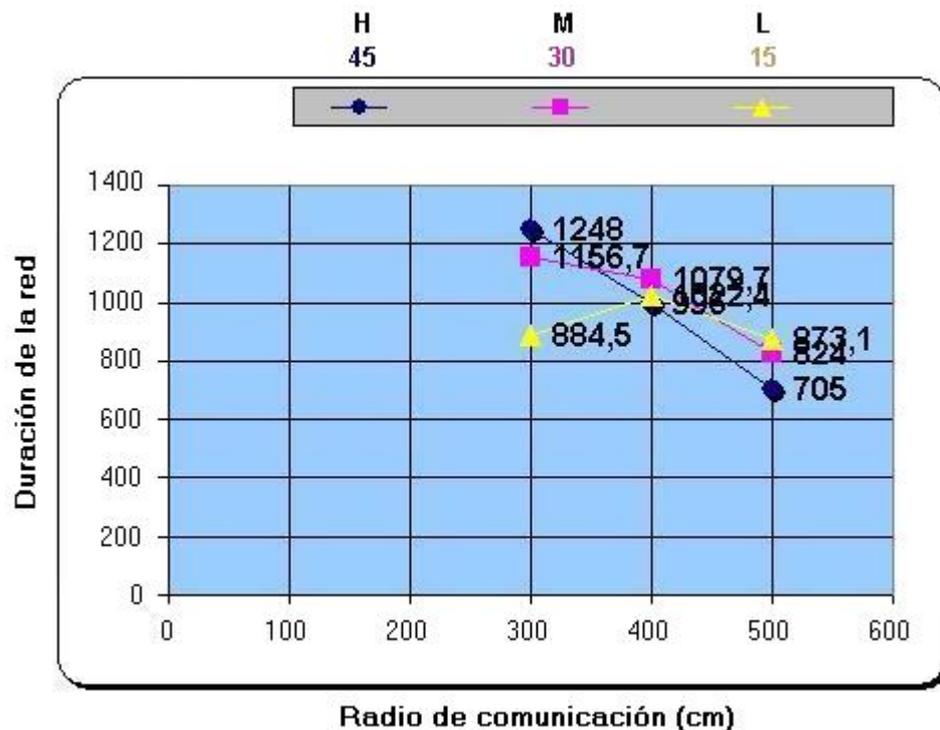


Figura 3. 18: Gráfica correspondiente al período de consulta para capacidad de batería de 3000 mJ y período de consulta de 10.

Elaborado por: Autor.

Para todas las configuraciones de las figuras 3.19, 3.20 y 3.21; las cifras comparan la vida útil de la red ya que el período de consulta y la densidad del

nodo varían. Se observa en la figura 3.19, que a medida que la densidad del nodo sube a un cierto valor, que es de 45 nodos por área, aquí la vida útil aumenta. Esto se debe principalmente al hecho de que; para el radio de comunicación constante, hay un valor óptimo para la densidad del nodo; más allá de ese valor, la vida comienza a caer. También se puede ver en todas las figuras que aumentan en el período de consulta, lo que hace que aumente la duración de la vida, como se afirma en los gráficos ya mencionados. Hay una cosa que notar en la figura 3.19; a medida que la densidad del nodo aumenta, el aumento en el tiempo de vida se atenúa y la trama se vuelve casi plana.

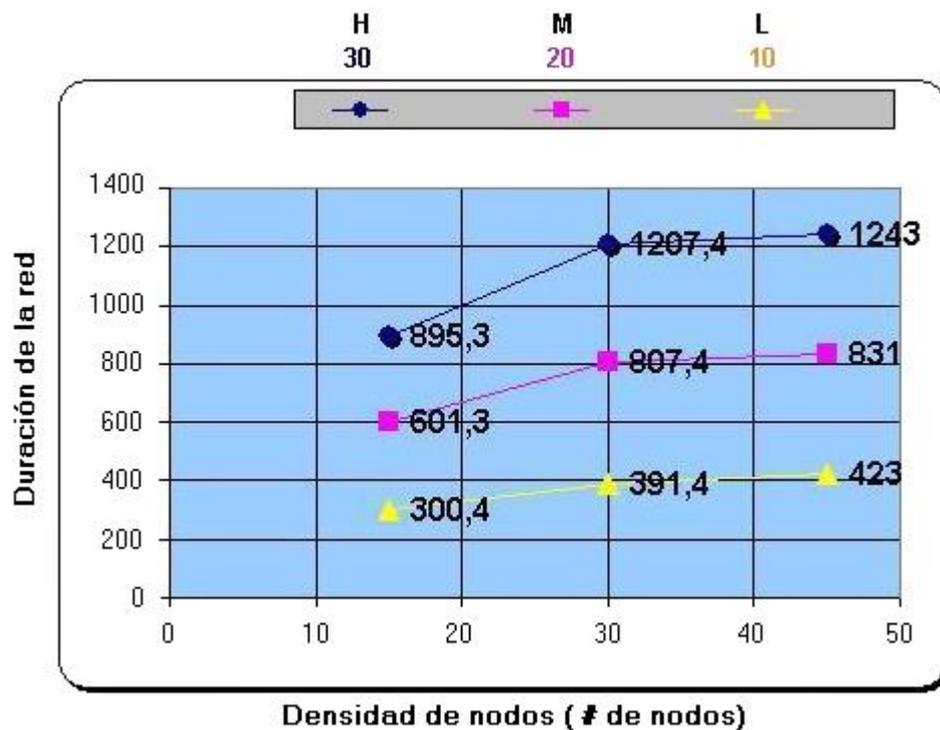


Figura 3. 19: Gráfica correspondiente al período de consulta para capacidad de batería de 1000 mJ y radio de comunicación de 300 cm.  
Elaborado por: Autor.

La figura 3.20 compara la vida útil de la red ya que el radio de comunicación se fija en 400 cm. La figura 3.20 muestra que a medida que la densidad del nodo aumenta; la vida útil es casi constante para esta configuración. Esto se debe principalmente al hecho de que; para este valor del radio de comunicación, la duración es robusta frente al cambio en el número de nodos. Se representa en la figura 3.20 que el aumento en el período de consulta no cambia esta actitud. Hay una cosa que notar en la figura 3.20; que a medida que la densidad del nodo sube a un valor más alto,

el aumento en la duración se atenúa y la trama comienza a disminuir. Esto se debe al hecho de que cuando la densidad del nodo aumenta, el número de mensajes en la red en un período también aumentará y esto hará que la duración de la vida disminuya.

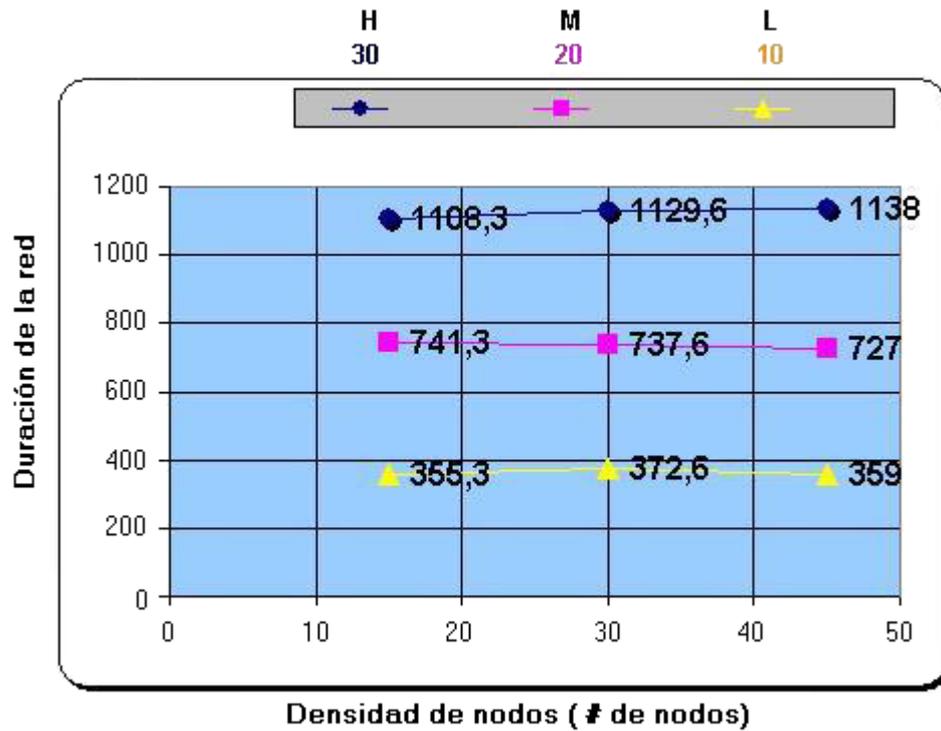


Figura 3. 20: Gráfica correspondiente al período de consulta para capacidad de batería de 1000 mJ y radio de comunicación de 400 cm.

Elaborado por: Autor.

Como última gráfica, la figura 3.21 representa la vida útil de la red ya que el período de consulta y la densidad del nodo varían. En este caso, el radio de comunicación se elige en 500 cm. Para esta configuración, se entiende a partir de la figura 3.21 que a medida que la densidad del nodo aumenta, la vida comienza a disminuir lentamente. Esto es porque, para este valor del radio de comunicación, un nodo en la red consume una mayor cantidad de energía para enviar un mensaje con respecto a los dos valores anteriores del radio de comunicación. La figura 3.21 también muestra eso; a medida que la densidad del nodo sube a un valor más alto, la disminución en la vida útil se hace más grande y la trama comienza a disminuir rápidamente. Esto se debe al hecho de que cuando la densidad del nodo aumenta, el número de mensajes en la red en un período también aumentará y esto hará que se atenúe la vida útil.

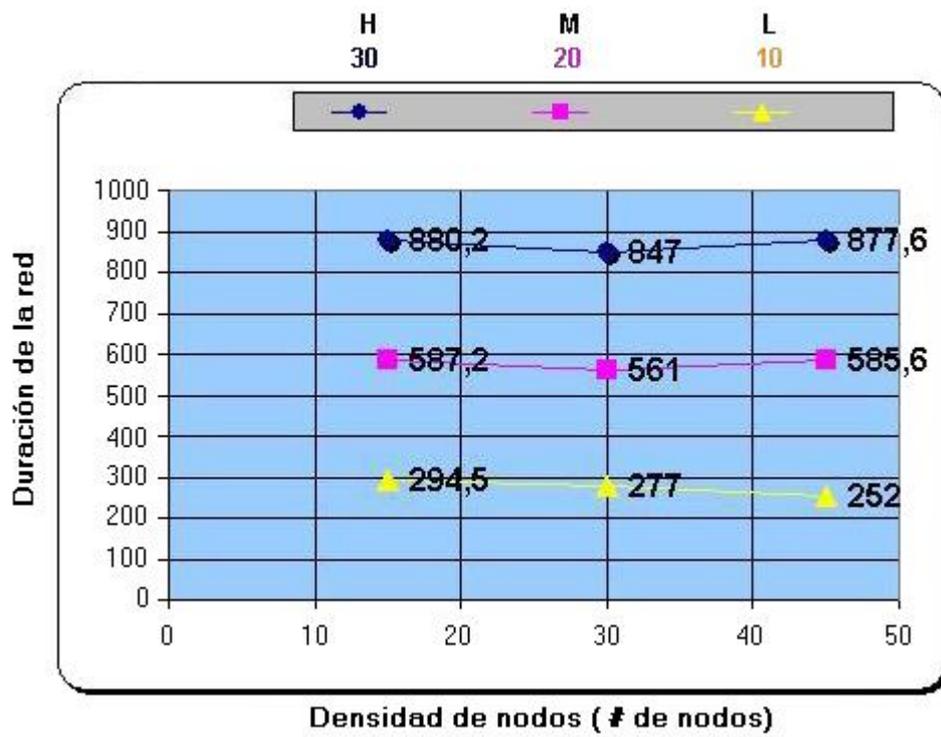


Figura 3. 21: Gráfica correspondiente al período de consulta para capacidad de batería de 1000 mJ y radio de comunicación de 500 cm  
Elaborado por: Autor.

## Conclusiones.

- Con los últimos avances tecnológicos en comunicaciones inalámbricas y electrónicas, se han desarrollado los dispositivos nodos de sensores. Estos son multifuncionales de bajo consumo y bajo consumo de energía, cuyas dimensiones en tamaño resultan ser pequeños y los más importante que transmiten información a cortas distancias.
- En algunos escenarios desarrollados, la reposición de recursos de energía podría ser imposible refiriéndose a la vida útil del nodo sensor, por lo tanto, muestra una fuerte dependencia de la vida útil de la batería. En una red de sensores, cada nodo cumple la doble función de crear y enrutar datos.
- El nodo del sensor en la red se comunica eficientemente con sus vecinos después de la formación. Los nodos actúan como enrutadores y fuentes. Debido al rango de transmisión limitado, los saltos se establecen de modo que la información fluya de la fuente al sumidero (es decir, nodo de usuario) de la mejor manera posible.
- A través del desarrollo de escenarios de simulaciones de una WSN, fue comprender la compensación de la eficiencia energética entre los parámetros de la red del sensor que afectan la vida útil. Se consideraron cuatro parámetros en este estudio. Dos de ellos, la capacidad inicial de la batería y el período de consulta, tienen efectos directos en la vida útil de un nodo sensor. En otras palabras, el cambio en estos parámetros hace que la vida útil de la red aumente linealmente. Por el contrario, los otros parámetros, del radio de comunicación y densidad de nodos, tienen compensaciones en términos de la vida útil de la red.

## **Recomendaciones.**

El presente trabajo del examen complejo – componente práctico, se proponen nuevos trabajos que pueden desarrollar como futuros proyectos de titulación:

- Implementación de un sistema de gestión eficiente para redes de sensores inalámbricos aplicados en la industria camaronera.
- Análisis comparativo de protocolos de enrutamiento y métricas de rendimiento para WSNs utilizando el simulador NS-3.

## Referencias bibliográficas.

- Al Agha, K., Bertin, M.-H., Dang, T., Guitton, A., Minet, P., Val, T., & Viollet, J.-B. (2009). Which Wireless Technology for Industrial Wireless Sensor Networks? The Development of OCARI Technology. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(10), 4266–4278. <https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2027253>
- Biaou, U., Sadoudi, L., Bocquet, M., & Rivenq, A. (2015). Modeling of ZigBee (IEEE 802.15.4) channel in rail environment for Intelligent Transport (pp. 293–298). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICAdLT.2015.7136637>
- Chandra, P. (Ed.). (2008). *Wireless networking*. Amsterdam; Boston: Elsevier/Newnes.
- Faludi, R. (2011). *Building wireless sensor networks* (1. edition). Beijing Cambridge Farnham Köln Sebastopol Tokyo: O'Reilly.
- Khan, I., Belqasmi, F., Glitho, R., Crespi, N., Morrow, M., & Polakos, P. (2015). Wireless sensor network virtualization: early architecture and research perspectives. *IEEE Network*, 29(3), 104–112. <https://doi.org/10.1109/MNET.2015.7113233>
- Lakshmi, P. S., Jibukumar, M. G., & Neenu, V. S. (2018). Network lifetime enhancement of multi-hop wireless sensor network by RF energy harvesting (pp. 738–743). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICOIN.2018.8343216>
- Lee, J.-S., Su, Y.-W., & Shen, C.-C. (2007). A Comparative Study of Wireless Protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi (pp. 46–51). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IECON.2007.4460126>
- Ma, Y.-W., Chen, J.-L., Huang, Y.-M., & Lee, M.-Y. (2010). An efficient management system for wireless sensor networks. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 10(12), 11400–11413. <https://doi.org/10.3390/s101211400>

- Omnet ++ Team Members. (2018). OMNET++ Network Simulator [Tutorial]. Recuperado el 25 de marzo de 2018, a partir de <http://omnet-tutorial.com/omnet-network-simulator/>
- Pant, S., Kumar, R., & Singh, A. (2017). Adaptive sink transmission and relocation to extend the network lifetime of wireless sensor network (pp. 1–4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICACCAF.2017.8344693>
- Rackley, S. (2007). *Wireless networking technology: from principles to successful implementation*. Amsterdam; Boston: Elsevier, Newnes.
- Sandoval Orozco, J. (2016). *Implementación de un prototipo electrónico para la monitorización y transmisión inalámbrica de variables ambientales marinas en boyas de deriva* (Tesis de Maestría). Universidad de Colima, Colima, Colombia.



Presidencia  
de la República  
del Ecuador



Plan Nacional  
de Ciencia, Tecnología,  
Innovación y Saberes



SENESCYT  
Secretaría Nacional de Educación Superior,  
Ciencia, Tecnología e Innovación

## DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **QUITO VELASQUEZ, LUIS ALFREDO** con C.C: # 092504703-7 autor del Trabajo de Titulación: **Diseño de escenarios de simulación de parámetros de vida útil para una red inalámbrica de sensores** previo a la obtención del título de **INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 03 de Mayo de 2018

f. \_\_\_\_\_

Nombre: QUITO VELASQUEZ, LUIS ALFREDO

C.C: 092504703-7



Presidencia  
de la República  
del Ecuador



Plan Nacional  
de Ciencia, Tecnología,  
Innovación y Saberes



SENESCYT  
Secretaría Nacional de Educación Superior,  
Ciencia, Tecnología e Innovación

## **REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA**

### **FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN**

<b>TÍTULO Y SUBTÍTULO:</b>	Diseño de escenarios de simulación de parámetros de vida útil para una red inalámbrica de sensores		
<b>AUTOR(ES)</b>	QUITO VELASQUEZ, LUIS ALFREDO		
<b>REVISOR(ES)/TUTOR(ES)</b>	M. Sc. EDWIN F. PALACIOS MELÉNDEZ		
<b>INSTITUCIÓN:</b>	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
<b>FACULTAD:</b>	Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo		
<b>CARRERA:</b>	Ingeniería en Telecomunicaciones		
<b>TÍTULO OBTENIDO:</b>	Ingeniero en Telecomunicaciones		
<b>FECHA DE PUBLICACIÓN:</b>	03 de Mayo de 2018	<b>No. DE PÁGINAS:</b>	51
<b>ÁREAS TEMÁTICAS:</b>	Fundamentos de Comunicación, Comunicaciones Inalámbricas, Transmisiones		
<b>PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:</b>	Protocolos, arquitecturas, parámetros, redes, sensores, WSN.		
<b>RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras):</b>			
<p>El desarrollo del presente trabajo denominado “Diseño de escenarios de simulación de parámetros de vida útil para una red inalámbrica de sensores” correspondiente al componente práctico del examen complejo para obtener el título de Ingeniero en Telecomunicaciones. Durante la etapa de inducción de las materias a evaluar en el componente teórico, el tutor realizó la propuesta de analizar la vida útil de una WSN a través de cuatro parámetros tales como, capacidad inicial de la batería, radio de la comunicación, período de consulta y número de nodos. En el capítulo 1, se introduce brevemente a las WSNs, se describen dos artículos científicos relacionados con la vida útil de una WSN como antecedentes a la definición del problema, así como el objetivo general y específicos del trabajo investigativo. En el capítulo 2, se fundamenta los protocolos de comunicaciones, así como la arquitectura en redes inalámbricas de sensores. En el capítulo 3, se desarrolla la simulación de los escenarios de los parámetros que permiten ver la duración o vida útil de la WSN, y se muestran los resultados obtenidos a través de gráficas generadas por la plataforma OMNeT ++.</p>			
<b>ADJUNTO PDF:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
<b>CONTACTO CON AUTOR/ES:</b>	<b>Teléfono:</b> +593-9-96977403	<b>E-mail:</b> <a href="mailto:luisalfredoquito13@hotmail.com">luisalfredoquito13@hotmail.com</a>	
<b>CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN: COORDINADOR DEL PROCESO DE UTE</b>	<b>Nombre:</b> Palacios Meléndez Edwin Fernando		
	<b>Teléfono:</b> +593-9-68366762		
	<b>E-mail:</b> <a href="mailto:edwin.palacios@cu.ucsg.edu.ec">edwin.palacios@cu.ucsg.edu.ec</a>		
<b>SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA</b>			
<b>Nº. DE REGISTRO (en base a datos):</b>			
<b>Nº. DE CLASIFICACIÓN:</b>			
<b>DIRECCIÓN URL (tesis en la web):</b>			