

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**  
**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



PONTIFICIA  
**UNIVERSIDAD**  
**CATÓLICA**  
DEL PERÚ

**IMPLEMENTACIÓN Y EVALUACIÓN DE UNA RED INALÁMBRICA  
DE SENSORES A TRAVÉS DE ALGORITMOS DE  
TRANSMISIÓN BASADOS EN GOSSIPING POR RF**

Tesis para optar el Título de **Ingeniero Electrónico**, que presenta el bachiller:

**Martín Arturo Martínez Espinoza**

**ASESOR: Dr. Manuel Augusto Yarlequé Medina**

Lima, Febrero del 2013

## RESUMEN

El desarrollo de las redes de sensores inalámbricas o Wireless Sensor Networks (WSN) en los últimos años ha posicionado su investigación como prioridad, a fin de ver las posibilidades que tienen estas como redes inteligentes para el futuro. Las WSN presentan varias desventajas como el consumo de la energía, la escalabilidad en la red, su adaptación a terrenos desfavorables para las comunicaciones no cableadas, las cuales dificultan su implementación. En años recientes, muchas técnicas han sido desarrolladas en esta dirección, al proponer varias alternativas acerca de qué tipo de algoritmo es más conveniente para poder minimizar el consumo energético y, a su vez, maximizar la vida de los dispositivos que son parte de la red.

El objetivo principal en la presente tesis es comparar el funcionamiento de los algoritmos de gossiping o cotilleo RGA (Randomized Gossip Algorithm) y DRG (Distributed Random Grouping) aplicados en redes inalámbricas simuladas por software, por medio de la creación de librerías, posterior al cual se realizará una implementación en menor escala de los algoritmos en una red inalámbrica de sensores.

En el presente trabajo se documentará los resultados logrados en las simulaciones para los dos algoritmos mencionados, así como de sus derivados, en función a parámetros de desempeño aplicables para este tipo de algoritmos de enrutamiento. De igual forma se comparará su desempeño en una red implementada y se presentará las conclusiones de los beneficios y desventajas de uno u otro para ciertas aplicaciones.

FACULTAD DE  
CIENCIAS E  
INGENIERÍA



PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD  
CATÓLICA  
DEL PERÚ

**TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRÓNICO**

Título : Implementación y evaluación de una red inalámbrica de sensores a través de algoritmos de transmisión basados en gossiping por RF  
 Área : Comunicaciones 4 1092  
 Asesor : Manuel Yarleque Medina  
 Alumno : Martin Arturo Martinez Espinoza  
 Código : 20074324  
 Fecha : 07 de noviembre del 2012



**Descripción y Objetivos**

En esta tesis vamos a realizar un análisis acerca del funcionamiento e importancia de los algoritmos de distribución en redes de sensores, posterior al cual se estudiará más al detalle el tema de sus funciones y su desempeño o eficacia en diversas topologías de redes.

En años recientes, muchas técnicas han sido desarrolladas en esta dirección, al proponer varias alternativas acerca de que tipo de algoritmo es más conveniente para poder minimizar el consumo de energía y, a su vez, maximizar la vida de los dispositivos que la conforman.

De todo lo mencionado anteriormente, se propone un estudio en los algoritmos de gossiping cuya aplicación en redes de sensores puede favorecer la minimización de consumo de energía y el tiempo de transmisión, en diferente nivel. Se realizará un análisis de su modelo matemático y se estudiará a fondo el Pairwise Averaging Algorithm o Randomized Gossip Algorithm (RGA) y el Distributed Randomized Grouping (DRG) bajo una simulación que permita observar su comportamiento en redes nodales. Finalmente se espera realizar una implementación en menor escala de la aplicación del algoritmo.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ  
SECCIÓN ELECTRICIDAD Y ELECTRÓNICA

Dr. Ing. BENJAMÍN CASTAÑEDA APHAN  
Coordinador de la Especialidad de Ingeniería Electrónica

MÁXIMO 50 PÁGINAS



FACULTAD DE  
CIENCIAS E  
INGENIERÍAPONTIFICIA  
UNIVERSIDAD  
CATÓLICA  
DEL PERÚ**TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRÓNICO**

Título : Implementación y evaluación de una red inalámbrica de sensores a través de algoritmos de transmisión basados en gossiping por RF

**Índice**

Introducción


1. PROBLEMÁTICA DE REDES DE SENSORES EN LA ACTUALIDAD Y SU DESARROLLO
2. ALGORITMOS DE TRANSMISIÓN EN REDES INALÁMBRICAS
3. SIMULACIÓN Y EVALUACIÓN DE WSN EN DIVERSAS TOPOLOGÍAS
4. IMPLEMENTACIÓN Y RESULTADOS FINALES

Conclusiones

Recomendaciones

Bibliografía

Anexos

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ  
SECCIÓN ELECTRICIDAD Y ELECTRÓNICA  
-----  
Dr. Ing. BENJAMÍN CASTAÑEDA APHAN  
Coordinador de la Especialidad de Ingeniería ElectrónicaMÁXIMO 50 PÁGINAS

## DEDICATORIA

Para mis padres, Jaime y Liliana, y para mis hermanos Milagros y André, quienes no solo son mi familia, sino también mi apoyo moral.

A Dios, a mi perro Bombi, mis abuelos Martin y Arturo y todos mis seres queridos que están con él en el Cielo.

A mi tía y mis primos, por educarme durante mis primeros años de vida y que me sirvieron para poder entrar en el mundo de las ciencias.

A mi asesor, el Prof. Manuel Yarlequé, que supervisó y asesoró analíticamente durante el desarrollo de este estudio.

Al profesor Choon Yik Tang de la University of Oklahoma, por enseñarme los aspectos básicos de los algoritmos en redes de sensores y que sirvieron de motivación para este trabajo.

A mis amigos y compañeros de la PUCP, quienes durante mi estancia en la universidad me ayudaron a disfrutar mi vida universitaria a plenitud.

A mis amigos de OU, quienes por un lapso de un año académico me permitieron conocer sus propias culturas y aprender que la única diferencia entre ellos y mi persona es el gentilicio, por lo demás todos somos ciudadanos del mundo.

Al Grupo de Telecomunicaciones Rurales PUCP, por brindarme las facilidades de prestación de los motes de prueba para poder desarrollar esta tesis.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS.....	i
ÍNDICE DE TABLAS.....	iii
INTRODUCCIÓN.....	1
<b>1. PROBLEMÁTICA DE REDES DE SENSORES EN LA ACTUALIDAD Y SU DESARROLLO.....</b>	<b>2</b>
1.1. Redes de sensores inalámbricas.....	2
1.2. Topologías y elementos de una red inalámbrica.....	3
1.2.1. Elementos en la red.....	4
1.2.2. Topologías.....	4
1.3 Características generales.....	5
1.3.1. Propiedades generales.....	5
1.3.2. Arquitectura de la red.....	6
1.3.3. Jerarquía de red.....	7
1.3.4. Bandas de frecuencia.....	8
1.3.5. Protocolos.....	9
1.4. Estándares empleados.....	10
1.5. Actualidad.....	11
1.6. Aplicaciones y desarrollos innovadores.....	11
1.6.1. VigilNet.....	11
1.6.2. AlarmNet.....	12
1.6.3. Smart Dust.....	12
1.7 Proyección a futuro.....	13
1.7.1 Protocolos MAC.....	13

1.7.2	Protocolos de enrutamiento.....	13
1.7.3	Localización.....	14
1.7.4	Sincronización.....	14
1.7.5	Manejo de energía.....	14
<b>2</b>	<b>ALGORITMOS DE TRANSMISIÓN EN REDES INALÁMBRICAS.....</b>	<b>15</b>
2.1	Estado del arte.....	15
2.2	Tipos de redes inalámbricas.....	16
2.3	Algoritmos MAC.....	17
2.3.1	Algoritmos MAC tradicionales.....	17
2.3.2	Algoritmos MAC en la actualidad.....	18
2.4	Algoritmos de transmisión para redes de sensores inalámbricas.....	18
2.4.1	Algoritmos de ruteo global o estado-enlace.....	18
2.4.2	Algoritmos de ruteo descentralizado.....	19
2.4.3	Algoritmo de encaminamiento por gradiente.....	20
2.4.4	Algoritmos basados en gossiping.....	21
2.4.4.1	De computación lineal.....	21
2.4.4.2	De computación de funciones separadas.....	22
2.4.4.3	De planificación de red.....	23
2.5	Problemática y modelo teórico.....	24
<b>3</b>	<b>SIMULACIÓN Y EVALUACIÓN DE WSN EN DIVERSAS TOPOLOGÍAS .....</b>	<b>25</b>
3.1	Algoritmos de diseminación de la información.....	25

3.2. Conceptos preliminares.....	26
3.3. Simulación y evaluación de los algoritmos de gossiping.....	27
3.3.1. Flooding.....	28
3.3.2. Evaluación del flooding en diversas topologías.....	29
3.3.2.1. Topología lineal.....	29
3.3.2.2. Topología anillo.....	30
3.3.2.3. Topología geométrica aleatoria.....	32
3.3.2.3.1. Radio de salto constante.....	32
3.3.2.3.2. Número de nodos constante.....	33
3.3.3. Randomized Gossip Algorithm (RGA).....	34
3.3.4. Evaluación del RGA en diversas topologías.....	35
3.3.4.1. Topología lineal.....	35
3.3.4.2. Topología anillo.....	36
3.3.4.3. Topología geométrica aleatoria.....	36
3.3.4.3.1. Radio de salto constante.....	37
3.3.4.3.2. Número de nodos constante.....	37
3.3.5. Distributed Random Grouping (DRG).....	37
3.3.6. Evaluación del DRG en diversas topologías.....	39
3.3.6.1. Topología lineal.....	39
3.3.6.2. Topología anillo.....	40
3.3.6.3. Topología geométrica aleatoria.....	40
3.3.6.3.1. Radio de salto constante.....	41
3.3.6.3.2. Número de nodos constante.....	41
3.3.7. RGA modificado.....	41



3.4. Resultados.....	43
<b>4 IMPLEMENTACIÓN Y RESULTADOS FINALES.....</b>	<b>46</b>
4.1. Consideraciones iniciales.....	46
4.2. Tecnologías de comunicación inalámbrica.....	46
4.3. Selección del mote.....	47
4.4. Implementación de la red.....	48
4.4.1. Pruebas en topología lineal y anillo.....	50
4.4.2. Pruebas en topología aleatoria-árbol.....	50
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>55</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>56</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>57</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>61</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

- FIGURA 1-1. Topologías tipo bus y estrella.
- FIGURA 1-2. Topología tipo anillo, árbol y mesh.
- FIGURA 1-3. Arquitectura de un sensor inteligente.
- FIGURA 1-4. Esquema de un sistema de dispositivos inalámbricos.
- FIGURA 1-5. Niveles del modelo OSI.
- FIGURA 1-6. Disposición de la red de sensores.
- FIGURA 1-7. Distribución de una WSN con AlarmNet.
- FIGURA 1-8. Tamaño real de un dispositivo de tecnología Smart Dust.
- FIGURA 2-1. Arquitectura de MyriaCore.
- FIGURA 2-2. Funcionamiento de los dispositivos LAGS.
- FIGURA 2-3. Ejemplo de WSN con enlaces con coste definido.
- FIGURA 2-4. WSN con costes tabulados.
- FIGURA 2-5. Explicación del funcionamiento del ruteo descentralizado.
- FIGURA 2-6. Explicación del problema del nombramiento para este algoritmo.
- FIGURA 3-1. Topología lineal de N nodos.
- FIGURA 3-2. Topología tipo anillo de N nodos.
- FIGURA 3-3. Topología geométrica aleatoria de N nodos.
- FIGURA 3-4. Desempeño de algoritmos en topología lineal.
- FIGURA 3-5. Desempeño de algoritmos en topología anillo.
- FIGURA 3-6. Desempeño de algoritmos en topología aleatoria.
- FIGURA 3-7. Algoritmos en topología aleatoria para 40 nodos.
- FIGURA 4-1. Disposición física de la red implementada.
- FIGURA 4-2. Resultados de la topología anillo.

FIGURA 4-3. Resultados del RGAM para una frecuencia de envío de 0.2 Hz.

FIGURA 4-4. Resultados del RGAM para una frecuencia de envío de 0.67 Hz.

FIGURA 4-5. Resultados del DRG para una frecuencia de envío de 0.2 Hz.

FIGURA 4-6. Resultados del DRG para una frecuencia de envío de 0.67 Hz.

FIGURA 4-7. Envío de potencia consumida. Medición con multímetro.



## ÍNDICE DE TABLAS

- TABLA 1-1. Tareas de comunicación.
- TABLA 1-2. Comparación entre WSN y redes ad-hoc.
- TABLA 1-3. Capas Físicas específicas por IEEE 802.15.4.
- TABLA 2-1. Resultados tabulados de algoritmo de ruteo global.
- TABLA 3-1. Tabla de parámetros del flooding en red lineal.
- TABLA 3-2. Tabla de parámetros del flooding en red anillo.
- TABLA 3-3. Tabla de flooding en topología aleatoria para 40 nodos.
- TABLA 3-4. Tabla de parámetros de RGA en red lineal.
- TABLA 3-5. Tabla de parámetros de RGA en red anillo.
- TABLA 3-6. Tabla de RGA en topología aleatoria para 40 nodos.
- TABLA 3-7. Tabla de parámetros de DRG en red lineal.
- TABLA 3-8. Tabla de parámetros de DRG en red anillo.
- TABLA 3-9. Tabla de DRG en topología aleatoria para 40 nodos.
- TABLA 3-10. Tabla de RGAM en topología aleatoria para 40 nodos.
- TABLA 4-1. Cuadro comparativo de transceptores.
- TABLA 4-2. Cuadro comparativo de módulos.

## INTRODUCCIÓN

En décadas recientes se ha observado un crecimiento en las redes computacionales, con mención especial en las comunicaciones inalámbricas, a una velocidad proporcional a los avances tecnológicos. En ese sentido, las redes de sensores representan un rubro en auge, ya que satisfacen los requerimientos actuales relacionados con el establecimiento de redes que poseen una comunicación flexible, autónoma e independiente de una estructura fija. La idea de implementar dispositivos de bajo costo y alta duración sin requerir mantenimiento nos ofrece inimaginables oportunidades de aplicaciones.

Con la motivación de poder cumplir con las ideas mencionadas en el párrafo anterior, en la presente tesis se realizará un análisis acerca del funcionamiento e importancia de los algoritmos de distribución en redes de sensores, posterior al cual se estudiará más al detalle el tema de sus funciones y su desempeño o eficacia en diversas topologías de redes. La elección de los algoritmos de gossiping para enrutamiento en redes se debe a un estudio previo realizado en la University of Oklahoma, en la cual durante mi año de experiencia de intercambio estudiantil realicé un proyecto de estudio de un algoritmo del rubro. Propiedades como el asincronismo, la escalabilidad, la tolerancia a fallos y bajo consumo de energía son razones para justificar un estudio más profundo de estos.

Para cumplir con el objetivo, en el capítulo 1 se realiza un análisis del funcionamiento y características básicas de las redes de sensores inalámbricas o WSN. Posterior a ello, se trabaja con el análisis de los algoritmos en redes de sensores, tanto de enrutamiento como de otra índole, y profundizando en los algoritmos de cotilleo en el capítulo 2. Es en el capítulo 3 donde se elabora un grupo de librerías desde cero para poder simular diversos tipos de redes, así como el desempeño de varios de los algoritmos de gossiping (RGA y DRG), y sus derivados en topologías tipo bus, anillo y geométrica aleatoria. Con los resultados del capítulo anterior, se dispone a diseñar e implementar una aplicación de los algoritmos en menor escala, con el fin de corroborar nuestras premisas de bajo consumo de energía, tolerancia a errores, entre otros.



## CAPÍTULO 1

### PROBLEMÁTICA DE REDES DE SENSORES EN LA ACTUALIDAD Y SU DESARROLLO

Una red de sensores es un grupo de dispositivos compuestos por un controlador y un sensor específico que se comunican entre sí, a fin de poder cumplir una tarea en conjunto [1]. El uso de estos presenta ventajas como la de poder utilizar un “computador pequeño” que nos permite obtener información de sus alrededores o de otros computadores para el procesamiento o desarrollo de cualquier aplicación, en especial si se trata de “sensar” algún fenómeno en el ambiente. Las dos propiedades intrínsecas de estas redes según AKYLLDIZ [2]:

- La posición de estos no es necesariamente fija, lo cual nos permite una distribución aleatoria de los mismos y a su vez les brinda facilidad de adaptación al terreno en el cual se plantee su disposición. La robustez de la comunicación para dichos casos dependerá de los protocolos y algoritmos planteados para su funcionamiento correcto.
- El esfuerzo cooperativo entre nodos: dado que cada uno posee su propio procesador la transmisión de datos no se realiza con información cruda, sino con una información ya procesada y transmitida a los que la requieran.

#### 1.1. Redes de sensores inalámbricas

Una red inalámbrica de sensores es aquella que presenta una colección de nodos organizados en cooperación conjunta. Cada uno de sus nodos sensores posee una unidad con capacidad de procesamiento (microcontrolador, CPU, etc.), un transceptor RF, una fuente de energía (pueden ser baterías o celdas solares), un grupo de sensores y/o actuadores. Con lo anterior podemos trabajar con un puñado de estos a fin de cambiar la manera como trabajamos (en la industria) o vivimos (domótica) [3]. A su vez, la ausencia de un material físico en la transmisión de información trae algunas desventajas como el manejo de energía portátil, pues el uso de los nodos en terrenos lejanos y con baja intensidad solar no beneficia a los paneles solares y el uso de baterías limitaría el tiempo de funcionamiento en la red. Una ventaja de las redes inalámbricas es su costo por instalación; por ejemplo, por un lado se tiene un número pequeño de motes comunicados a través de routers y un panel de control, mientras que en otro caso se tiene una red formada por

gateways para la misma tarea. Acorde con National Instruments, un cable RJ45 para conectar los gateways puede llegar a costar 150 dólares para una distancia de 5 metros, por lo que en distancias cortas el sistema cableado es barato y en caso de largos tramos el costo del cable será mucho mayor que el precio de un mote (para 5 nodos a una distancia de 30 metros el precio bordará los US\$ 3000).

## 1.2. Topologías y elementos de una red inalámbrica

Una red inalámbrica involucra la existencia de un sistema de comunicación, el cual implica la necesidad de transmitir datos entre dos o más sistemas. Cada uno de estos sistemas está compuesto por los siguientes elementos según BAUTISTA [4]:

- **Transmisor:** Es la fuente de la información a ser enviada por una antena a través de señales electromagnéticas, con previa codificación, en un formato de paquetes de datos a fin que pueda ser entendido por el destinatario.
- **Sistema de transmisión:** Es la manera como se lleva a cabo la transmisión, ya sea una línea directa entre sistemas o una red compleja de transmisión.
- **Receptor:** La señal recibida por la antena es decodificada y llevada al destinatario para que lo entienda como el mensaje original.
- **Destino:** Es el punto final de la transmisión.
- **Canal:** Agrego este elemento pues es el que hace la diferencia entre las redes cableadas donde el canal es un medio físico, y la segunda que se realiza por medio del mismo ambiente.

La comunicación y sus partes que la componen se puede entender de forma más detallada y para un conocimiento general por medio de la siguiente tabla:

TABLA 1-1. Tareas de comunicación, tomada de Bautista [4].

<i>Tareas de comunicación</i>	
<i>1 Utilización del sistema de transmisión</i>	<i>8 Direccionamiento</i>
<i>2 Interfase</i>	<i>9 Ruteo</i>
<i>3 Generación de señales</i>	<i>10 Recuperación</i>
<i>4 Sincronización</i>	<i>11 Formato de mensajes</i>
<i>5 Administrador de intercambios</i>	<i>12 Seguridad</i>
<i>6 Detección y corrección de errores</i>	<i>14 Administración de la red</i>
<i>7 Control de flujo</i>	

### 1.2.1. Elementos en la red

Los elementos presentes en la red inalámbrica son aquellos que representan el hardware del sistema, los cuales se consideran al momento de diseñar una red a implementar como parte de las especificaciones y se presentan a continuación:

- Gateways: Nexos entre los nodos que están en la red y sirve para la transformación de más de un protocolo de comunicación; en otras palabras, hace de adaptador para retransmitir los mensajes en otro formato. Permite comunicarse con el usuario para el monitoreo o modificación de parámetros.
- Nodos secundarios: Son los puntos de red que se encargan de “retransmitir” la información a través de toda la red. También conocidos como routers, estos sirven de puntos de paso en la comunicación.
- Nodos finales: Son los destinatarios de la información, y además no pueden retransmitir; sin embargo, su labor es la de conexión final en la jerarquía y, como tal, forma parte de la aplicación para la cual fue destinada la red.
- Sensores y/o actuadores: Reciben la información de la red de comunicación y convierten las señales de los transceptores a señales analógicas para cumplir con la tarea requerida. Si se busca monitorear algún parámetro del ambiente se usan sensores y si se busca cambiar el medio, actuadores.
- Aplicación en PC: Se emplea para que el usuario de la red de sensores pueda recibir la información suministrada y procesada por el gateway, así como realizar la modificación de parámetros desde un medio amigable.

### 1.2.2. Topologías

Una topología de red es el arreglo de los dispositivos en un medio. En una topología tipo bus o lineal se tiene a todos los nodos que forman parte de la red conectados entre sí de forma lineal. En cambio, la topología estrella presenta una distribución nodal centralizada, debido a que existe un nodo principal en el centro de la red que monitorea la información transmitida en el sistema. Los nodos alrededor pasan a tener un rol secundario.

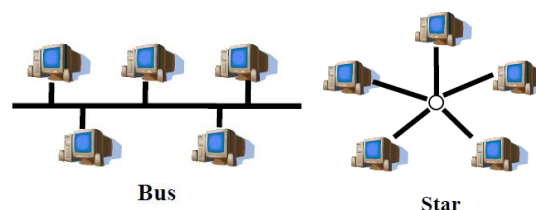


FIGURA 1-1. Topologías tipo bus y estrella [5].

La topología anillo presenta una distribución semejante a la lineal, con la excepción que sus extremos si pueden hablar entre si todos los nodos tienen la misma jerarquía en el sistema, por lo que todos hacen la labor de recepción y transmisión de información a sus nodos vecinos.

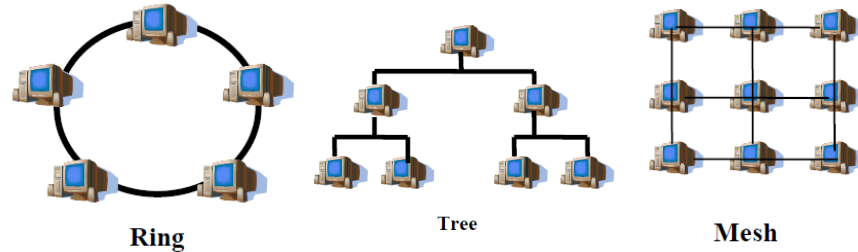


FIGURA 1-2. Topología tipo anillo, árbol y mesh [5].

La topología árbol recoge su nombre de la forma de los mismos en las que se tiene elementos por jerarquías; por ello, se tiene unos nodos principales, secundarios y últimos, donde las tareas dependen de su nivel jerárquico. La topología mesh presenta interconexión y comunicación mayoritaria de nodos, así como la tolerancia a fallos, ya que si un nodo no funciona en el sistema la transmisión de los datos se puede hacer a través de otros nodos con tal de llegar al nodo destino.

### 1.3. Características generales

Como toda tecnología por estas épocas, las redes de comunicación inalámbricas poseen ciertas características que las hacen únicas y explican las razones de su importancia por encima de otras.

#### 1.3.1. Propiedades generales

A manera de comprender las propiedades generales se realiza una comparación entre las redes inalámbricas de sensores y las redes ad hoc, aquellas que involucran una red descentralizada de nodos que, sin embargo, es controlada en función a los parámetros definidos por usuario en cooperación con un nodo principal que hace de coordinador de datos. Un ejemplo de estos son los PRNET creados por la agencia DARPA del Ministerio de Defensa de Estados Unidos en la década de los 70.

TABLA 1-2. Comparación entre WSN y redes ad-hoc, basada en [2].

	Redes de sensores inalámbricas (WSN)	Redes Ad-hoc
Número de elementos	La cantidad de sensores presentes en una red puede ser de grandes cantidades en el orden de los cientos de nodos.	El número de nodos que la red puede soportar es de una pequeña cantidad cercana a las decenas.
Densidad de nodos	La densidad de número de nodos presentes en un área para realizar las aplicaciones requeridas debe ser grande	La densidad no es un parámetro crítico en la red, más si lo es la cantidad de elementos.
Modo de transmisión	Emplea modos de transmisión que trabajen con un envío de datos a través de toda la red (multicast).	La manera como transmite la información es mayormente de punto a punto (peer-to-peer).
Topologías	La topología en la cual se desempeña la red puede variar en cualquier momento. Es flexible a cambios.	Tiene una topología definida para la cual se ha implementado.
Limitaciones de hardware	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fuente de energía</li> <li>- Memoria y capacidad de procesamiento</li> </ul>	Dado que una red ad hoc puede ser un grupo de PC interconectadas, no tiene en su mayoría limitaciones de hardware.
Identificación	La identificación de cada uno de los sensores en la red va a variar en función a la tecnología que se aplique, por lo que no es estándar. Debido al gran número de nodos no es una tarea fácil.	La identificación se puede llevar a cabo por medio de una identificación global.

### 1.3.2. Arquitectura de la red

Se refiere al esquema general de la composición de un sensor “inteligente”, que como ya lo mencionamos es conocido como “mote” y, a diferencia de los sensores simples, estos no solo reciben la información sino que también la procesan y transmiten a juicio. Acorde con el estándar de la IEEE 1451.2, el sensor o transductor inteligente brinda las funciones necesarias para poder cumplir con las tareas de monitoreo e integrarse a las aplicaciones de un entorno de red [6]. El entorno inteligente depende de los datos reales del ambiente, por medio de los parámetros de diversos tipos de dispositivos y de diferentes ubicaciones. La manera como cada uno de ellos trabaja se simplifica en el siguiente esquema [7]:



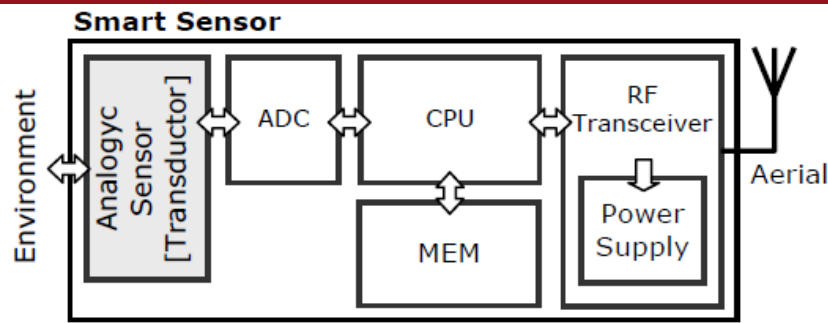


FIGURA 1-3. Arquitectura de un sensor inteligente [7].

De la Figura 1-3 se observa que el funcionamiento general del sistema de un sensor inteligente comienza por la recepción de información desde una antena, la cual nos sirve para transmisión y recepción de datos (transceptor), posterior al cual envía la trama de información hacia un CPU o microprocesador, el cual nos sirve para el procesamiento de la data en función a los algoritmos y/o tareas que hayan sido programadas, por ello y para el registro y almacenamiento de información necesaria para futuras aplicaciones se tiene una memoria no volátil. También el dispositivo cuenta con una fuente de energía portátil para el funcionamiento del resto de componentes. En cuanto a la comunicación entre el CPU y el transductor o sensor, este se lleva a cabo por medio de un convertor analógico-digital. Finalmente, con la información convertida en señal analógica se dispone a llevar a cabo la aplicación para la cual se dispuso el diseño de la red. Al momento de enviar la información sensada hacia otros dispositivos el camino por el que recorre la información es a la inversa del anterior.

### 1.3.3 Jerarquía de red

En función a las tareas que deben realizar los dispositivos de la red, existe una jerarquía de red en la cual se indica qué dispositivos son de mayor y menor relevancia. No se puede definir que uno sea más importante que el otro pues la tarea que desarrolla es parte del paquete de aplicaciones para el cual la red fue elaborada; sin embargo, algunos dispositivos sirven para controlar parámetros generales del sistema, o para retransmitir información hacia otros que la requieran.

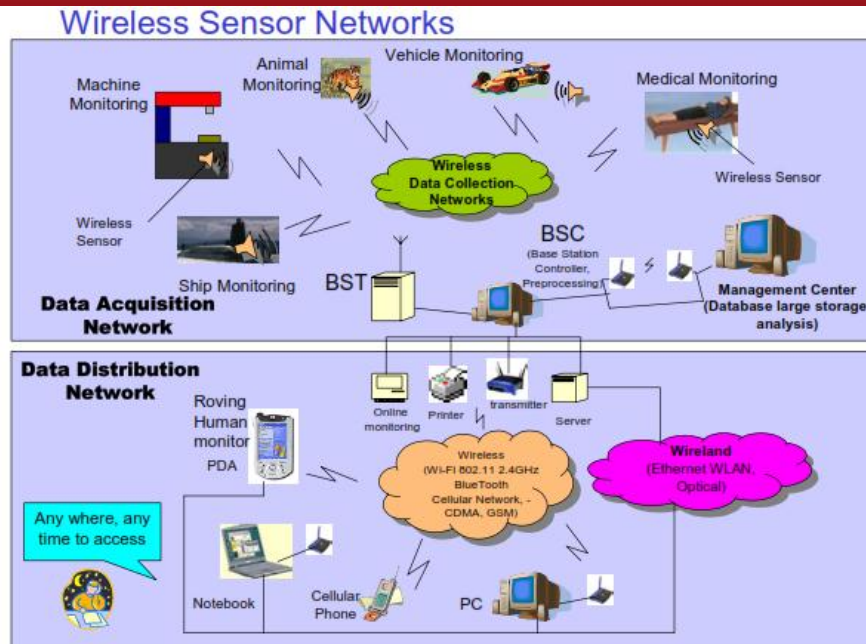


FIGURA 1-4. Esquema de un sistema de dispositivos inalámbricos [5].

De la anterior figura se observa que en un primer orden el Ethernet WLAN es la capa más crítica en la transmisión de información, por lo cual viene a ser el canal de comunicación por el que se conecta al resto de dispositivos. En un segundo plano existe los Database Management Centers para el análisis de los datos, los BSC o estación de control de pre-procesamiento y los servidores o servers; todos ellos encargados de la regulación de la transmisión de los datos y modificación de condiciones de la red instalada. Finalmente y en un menor plano se tiene a los dispositivos finales o end devices, los cuales poseen una tarea propia definida en base a los sensores o actuadores que poseen. Como en la figura se observa, por un lado de la red se lleva a cabo el monitoreo de una máquina (red de adquisición de datos) y esta información es analizada y, de ser necesario, sirve para llevar a cabo modificaciones a distancia por medio de una PC (red de distribución de datos).

#### 1.3.4 Bandas de frecuencia

Para que la transmisión de la información en un sistema de dispositivos inalámbricos sea a través del mismo ambiente se requiere la estandarización de frecuencias en la cuales se puede llevar a cabo, a fin que no ocurra interferencias en la comunicación. Además, la definición de bandas de frecuencias permite que se pueda licenciar algunas de ellas, a fin que no todas trabajen en un mismo rango, por lo cual algunas se deben pagar para su uso. En nuestro caso, es más

conveniente utilizar una banda de transmisión universal, que nos permita trabajar con varios dispositivos o incluso que sea compatible con otras redes que trabajen en la misma banda. La ITU (Unión Internacional de Telecomunicaciones) ha definido las bandas de frecuencias orientadas a las aplicaciones para la industria, la ciencia y la medicina, y que son de uso libre (véase Anexo A). Para aplicaciones generales es conveniente trabajar en la banda de 2.4 GHz pues varios estándares como Zigbee o Bluetooth emplean aquel rango y debido a su difusión en la industria la compatibilidad es beneficiosa para la creación de aplicaciones.

### 1.3.5 Protocolos

Cuando hablamos de protocolos, nos referimos a la manera como se transmite la información; del cual se precisa el formato de la trama de datos y las reglas que se debe seguir. El modelo OSI (Open Systems Interconnection) muestra un lineamiento de funciones a cumplir en las comunicaciones entre sistemas interconectados, por lo cual no define un estándar fijo. Sin embargo, los estándares y protocolos de comunicación se basan en su mayoría de dicho modelo [4]. El OSI predica que los niveles de interacción para la conexión de computadoras han de ser uniformizado, de tal forma que sin importar el fabricante, SO u arquitectura sea posible comunicarse entre sí. Además, jerarquiza el sistema protocolar por capas de nivel, a fin de que las tareas de algunos beneficien a los de otra jerarquía. Los niveles son presentados en la siguiente tabla (para mayor descripción véase ANEXO B):

<i>Niveles del modelo OSI.</i>
Aplicación.
Presentación.
Sesión.
Transporte.
Red.
Enlace de datos.
Físico.

FIGURA 1-5. Niveles del modelo OSI [4].

#### 1.4 Estándares empleados

Como toda tecnología emergente, las redes de sensores se basan en estándares determinados, con el objeto de uniformizar y relacionar las diversas aplicaciones que se trabajen en este rubro. Para este caso se tiene dos estándares.

El IEEE 802.15.4 es el estándar de la IEEE que define las especificaciones de las capas de control (Wireless Medium Access Control o MAC) y física (Physical Layer o PHY) para redes inalámbricas de área personal o WPAN. Este define el protocolo e interconexión de dispositivos vía RF en una red de área personal (PAN). También indica el uso del CSMA-CA o Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance como mecanismo de acceso al medio o MAC, para las topologías estrella y peer-to-peer. El acceso al medio puede ser modificado mediante el uso de una estructura multicapa y los tiempos pueden ser definidos por el coordinador PAN hacia otros dispositivos mediante datos en tiempo crítico. Incluye la conectividad a redes de mayor rendimiento. Especifica hasta 4 diferentes capas físicas o PHY:

TABLA 1-3. Capas Físicas específicas por IEEE 802.15.4 [8].

Capas Físicas en IEEE 802.15.4	Frecuencia	Tipo de espectro ensanchado	Tipo de modulación digital y/o analógica
Opción 1	868/915 MHz	Secuencia directa (DSSS)	BPSK
Opción 2	868/915 MHz	Secuencia directa (DSSS)	O-QPSK
Opción 3	868/915 MHz	Secuencia paralela (PSSS)	BPSK, ASK
Opción 4	2450 MHz	Secuencia directa (DSSS)	O-QPSK

Por otro lado, el IEEE 1451.2 define los sensores inteligentes y busca desarrollar una familia de dispositivos inteligentes para facilitar la elaboración de los mismos a los fabricantes y que estos sean compatibles en redes, sistemas e instrumentos con existentes y emergentes tecnologías de sensado. El mayor logro de este estándar es la definición de las hojas de datos para transductores electrónicos o TEDS, el cual consiste en una memoria adjunta al transductor y cuya función es la de almacenar la información relacionada con la identificación, calibración, rango de medición y corrección de datos proveniente del dispositivo.

## 1.5 Actualidad

En estos tiempos, la utilización de sistemas automatizados que permitan monitorear procesos o el control inalámbrico de sistemas por medio de redes de dispositivos ha favorecido el incremento en la investigación de este rubro. Para elaborar una red como la mencionada anteriormente se debe cumplir ciertas características [2]:

- Tolerancia a fallos
- Escalabilidad
- Costos de producción
- Limitaciones de hardware
- Topología de red
- Medio ambiente
- Medio de transmisión
- Consumo de energía

En el mercado de transductores con procesamiento interno se tiene una amplia variedad y su elección dependerá de la aplicación que se busque. Para una descripción de los diversos tipos de sensores véase ANEXO C.

## 1.6 Aplicaciones y desarrollos innovadores

### 1.6.1 VigilNet

Es un sistema implementado por la University of Virginia que involucró el diseño e implementación de un grupo de 70 motes MICA2, con el objetivo de registrar la posición de objetivos móviles bajo un consumo eficiente de la energía.

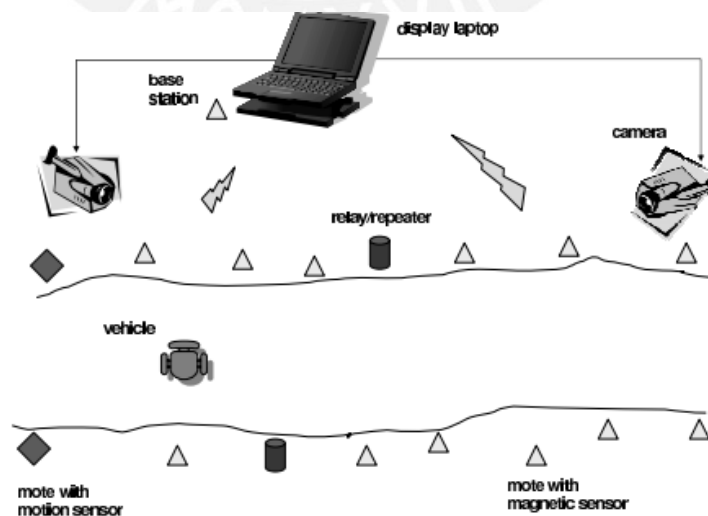


FIGURA 1-6. Disposición de la red de sensores [9].



Este estudio logró la implementación de un sistema integrado con cuidado en el consumo de energía y el uso de mecanismo para control dinámico de la sensibilidad del sistema entre la performance del sistema y la eficiencia de energía.

### 1.6.2 AlarmNet

Este sistema permite integrar sensores fisiológicos y medio ambientales en una arquitectura heterogénea. El protocolo empleado permite la recolección y procesamiento de los datos recibidos en tiempo real para el monitoreo de la actividad de ritmo cardiaco de los residentes, manejo de la energía, etc.

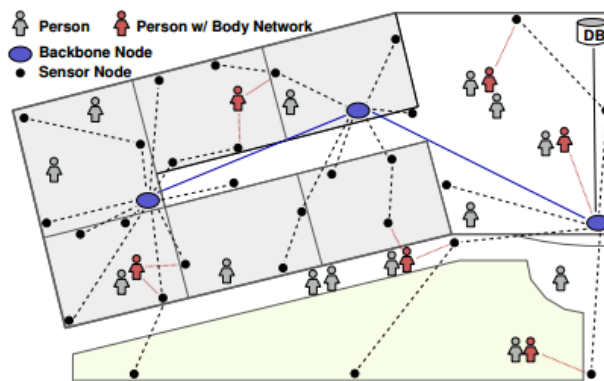


FIGURA 1-7. Distribución de una WSN con AlarmNet [10].

Este estudio contribuyó a la creación de una arquitectura capaz de soportar una distribución enorme de sensores en una red ad-hoc e integra dispositivos embebidos con interfaz de usuarios. Se agrega el desarrollo de SecureComm, un protocolo de mensajería implementada en el sistema operativo TinyOS.

### 1.6.3 Smart Dust

El proyecto Smart Dust fue concebido por la University of California Berkeley desde el 2001, con el objetivo de crear una manera de poder sentir y comunicar de forma autónoma en un milímetro cúbico [15].

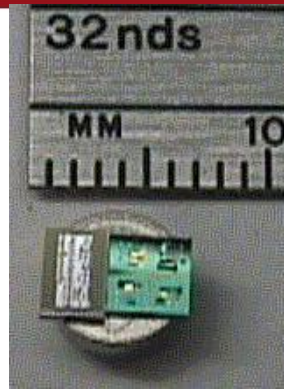


FIGURA 1-8. Tamaño real de un dispositivo de tecnología Smart Dust [11].

De la misma página de sus creadores nos brindan un resumen del sinfín de aplicaciones que se pueden llevar a cabo con los micromotes como redes de sensado de defensa, teclado virtual, control de inventario, etc. (para información más amplia véase ANEXO D)

## 1.7 Proyección a futuro

La mayor limitación de estas tecnologías emergentes es la falta de investigación en varios rubros que pueden favorecer la eficiencia y el servicio brindado por estas redes. Según STANKOVIC [3], los estudios a futuro serian en los siguientes temas:

### 1.7.1 Protocolos MAC

Los protocolos MAC han sido estudiados para la coordinación de acciones en el canal de transmisión compartido, donde la estrategia común ha sido la contención, para lo cual antes de transmitir se prueba si el canal está ocupado: si no lo está transmite y si lo está espera; lo mismo se aplica cuando se prevé la colisión de mensajes de nodos. En la actualidad, los protocolos MAC sugieren la presencia de un modo de operación en el cual los nodos que no están involucrados en algún envío de datos pasen a un modo sleep, a fin de reducir el consumo de energía.

### 1.7.2 Protocolos de enrutamiento

Para el caso del enrutamiento, emplear algoritmos usados en Internet y redes MANET no es conveniente dado que en el primero se tiene conexiones físicas confiables en los cuales rara vez se tiene un error de envío de paquetes, mientras que en el segundo caso se espera tener conexiones simétricas entre vecinos, lo

cual no se ajusta necesariamente a la realidad puesto que las redes inalámbricas de sensores son semejantes a las ad hoc en el sentido que poco a poco los nodos van identificando a sus vecinos cercanos, mas no son predeterminado.

### 1.7.3 Localización

La localización geográfica de nodos es uno de los problemas más críticos y dado que depende de varios parámetros hace que su labor sea aún más compleja, considerando además algunos problemas como el costo de extra hardware en el sistema, localización en 2D o 3D, etc. Se espera que a futuro sea posible obtener un grado de precisión de localización, obtener la posición en un corto plazo, el sistema ha de estar sujeto a protección contra ataques, entre otros.

### 1.7.4 Sincronización

La sincronización entre nodos nos sirva para tareas como: historial de los eventos ocurridos en la red inalámbrica, aplicaciones de sleep/wake-up (despertar y apagado), algoritmos de localización, etc. Las consideraciones para usar un protocolo que incluya sincronización del reloj incluye la elección de frecuencias de re-sincronización, determinación de cambios del reloj han de ser requeridos entre tiempo de sincronizado y reducción de costos de energía y de congestión de la red.

### 1.7.5 Manejo de energía

Las soluciones para este manejo se basan en la técnica de sleep/wake-up, lo cual implica mantener despiertos a la menor cantidad de nodos posibles para poder cubrir el rango de sensado y, a la vez, permitir el descanso del resto de dispositivos; todo ello realizado por horario definido. La determinación de un ciclo de trabajo o duty cycle favorece en el ahorro pero su elección dependerá de la aplicación en la red.

## CAPÍTULO 2

## ALGORITMOS DE TRANSMISIÓN EN REDES INALÁMBRICAS

Del capítulo anterior sabemos la existencia de dificultades como el consumo de la energía y el tiempo de procesamiento en el diseño de una red. Ante la imposibilidad de hacer una modificación considerable en el hardware nos vemos en la necesidad de lograr superar esos problemas por otro medio como la elaboración de algoritmos de transferencia. La creación de estos nos da sinfín de soluciones y, con la base de modelos matemáticos, poder cumplir con los requerimientos de solución de problemas en la transmisión de datos.

## 2.1 Estado del arte

La presente tesis se centra en el estudio de algoritmos de gossiping y, por tal motivo, se presenta un desarrollo de redes que trabajan con esa base: el proyecto MyriaNed [12]. Desarrollada por DevLab, se basa en la comunicación masiva o epidémica, a manera que todos los dispositivos pertenecientes a la red reciben la información del resto, lo cual se asemeja a las interacciones humanas, de ello su nombre de algoritmo de chateo o cotilleo. Este presenta 2 ventajas fundamentales:

- En primer lugar, los nodos no requieren de informarse quienes son sus vecinos o dispositivos aledaños al momento de enviar el mensaje, por lo que no existe un enrutamiento planificado, solo se transmite al instante.
- Segundo, las rutas de comunicación pueden trabajar en paralelo, con lo cual la pérdida de alguna transmisión no determinará la pérdida de la información, pues otro dispositivo la recibe (sistema más robusto)

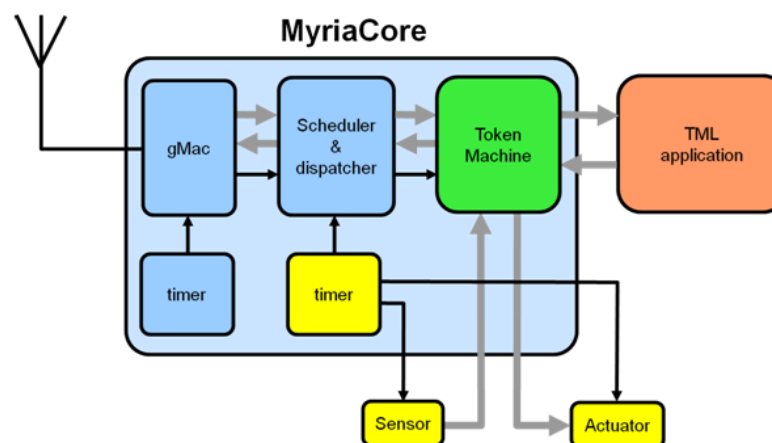


FIGURA 2-1. Arquitectura de MyriaCore [12].

Como tal, el MyriaCore de la Figura 2-1 está compuesto de un Medium Access Controller o gMac que emplea un protocolo de comunicación basado en TDMA (Time Division Multiple Access) con sincronización entre nodos. Los eventos de entrada y salida de datos son sincronizados y establecidos con el Scheduler & dispatcher que lo regula y el Token Machine que lo convierte en lenguaje TML para poder realizar la aplicación específica. Los actuadores y sensores dependen de los anteriores en función a un timer que es sincronizado con los dos bloques mencionados anteriormente. El sistema de comunicación que desarrollan los dispositivos MyriaCore conocido como LAGS (Locally Asynchronous Globally Synchronous) trabaja de la siguiente manera:

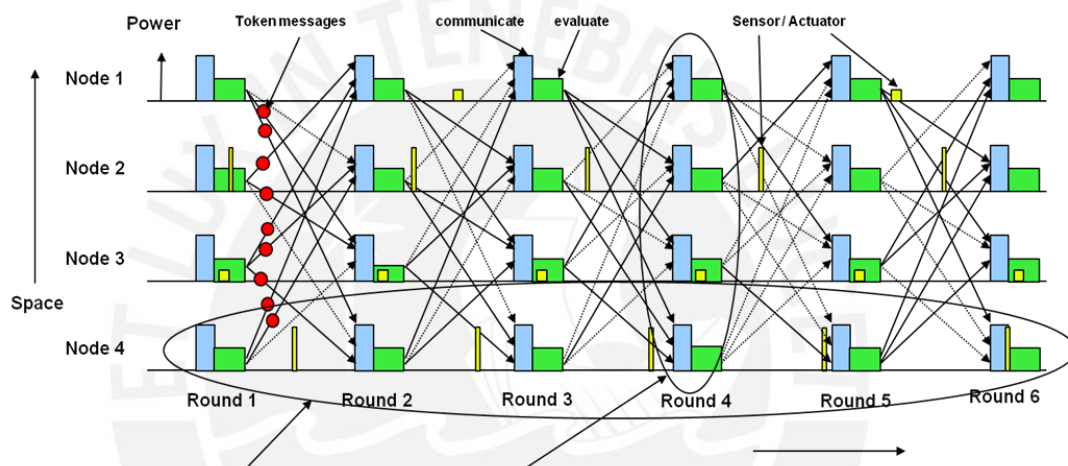


FIGURA 2-2. Funcionamiento de los dispositivos LAGS [12].

De lo anterior se observa que todos los nodos operan a la vez; o sea, transmiten los mensajes o token messages hacia el resto de dispositivos, posterior al cual cada uno procesa la información y evalúa la activación o no de los sensores y actuadores. La comunicación entre ellos se realiza periódicamente; mas, las aplicaciones locales de cada uno son asíncronas o no tienen un intervalo fijo de trabajo, de ahí el nombre de LAGS.

## 2.2 Tipos de redes inalámbricas

Al momento de transmitir datos entre dispositivos sin ningún medio físico intermediario se requiere de un formato de transmisión para que la información sea comprendida. El espectro de redes inalámbricas existentes es grande y los algoritmos de transmisión no pueden ser aplicados a todos ellos. Para ello debemos entender que tipos de redes existen a fin de determinar cuál algoritmo es



adecuado en cada caso. Las redes se han definido en función a la cantidad de dispositivos conectados entre sí, su rango y la velocidad de transferencia (para una explicación más detallada véase ANEXO E) [13]:

- Wireless PAN - Wireless Personal Area Network
- Wireless LAN – Local Area Network
- Wireless MAN – Metropolitan Area Network
- Wireless WAN
- Redes para dispositivos móviles o celulares:
  - i) GSM – Global System for Mobile Communications
  - ii) PCS – Personal Communication Service
  - iii) D-AMPS Digital Advanced Mobile Phone Service
- TAN – Tiny Area Network
- CAN – Campus Area Network

### 2.3 Algoritmos MAC

Se tiene algoritmos de transmisión que pueden trabajar en el rubro de las redes de sensores (incluidas en las WPAN) y el resto de algoritmos que mayormente se aplican a los WLAN, WMAN Y WWAN. La mayoría de algoritmos en estas redes son de acceso al medio o algoritmos MAC. Estos sirven para permitir a varios usuarios coexistir en un mismo medio de comunicación para maximizar el uso de los canales sin interferencias ni coaliciones [14].

#### 2.3.1 Algoritmos MAC tradicionales

Estos fueron creados en el pasado y hasta ahora son empleados debido a su simplicidad y confiabilidad. Uno de ellos es el ALOHA [15], sistema creado en la década de los 70 y que sirvió como base para la mayoría de redes celulares en el acceso a los canales de comunicación. A la fecha, se usa como base para la creación de algoritmos reformulados en aplicaciones como el desarrollado por BACCELLI [16], el cual optimiza los fundamentos del protocolo ALOHA para redes inalámbricas móviles multisalto, donde se promedia las configuraciones de Poisson en la localización de los móviles que interfieren, con una evaluación del SNR. Otro algoritmo es el algoritmo CSMA o Carrier Sense Multiple Access, el cual dice que cada estación que conforma la red pueda sensar el canal antes de la transmisión de paquetes de datos, con lo cual se puede reducir la probabilidad de coaliciones [14].

### 2.3.2 Algoritmos MAC en la actualidad

Son las redes WLAN actuales en las cuales la comunicación se realiza entre puntos de acceso y terminales inalámbricas. Estos se dividen entre los algoritmos en WLAN con estructura, algoritmos MAC sin estructura con antenas direccionales y omnidireccionales, conocidas como MANET o redes móviles pues no requiere de unos puntos de acceso fijo, ni de una topología de red determinada lo cual les da flexibilidad, y de algoritmos MAC en WSN (para información de algoritmos MAC véase ANEXO F) [14].

## 2.4 Algoritmos de transmisión para redes de sensores inalámbricas

Existe una variedad considerable de algoritmos de esta índole pero solo incluimos en este estudio a los más representativos y que han tenido mayor influencia en su implementación para redes de sensores. A diferencia de los algoritmos MAC centrados en el control de acceso al medio, los de enrutamiento trabajan como los routers físicos; es decir, buscan seleccionar el camino que debe seguir un paquete de datos hacia su destinatario, ya sea por la línea más rápida, menos saturada, etc. Mientras los MAC trabajan con las direcciones del mismo nombre, los de ruteo analizan el contenido presente en el paquete de datos para verificar la mejor ruta de envío de los datos [4].

### 2.4.1 Algoritmos de ruteo global o estado-enlace

Se basan en el cálculo del camino con menor coste o requerimientos entre fuente y destino, para lo cual emplea información global en la red; por lo tanto, este tipo de algoritmos tiene como característica clave la total información de la conectividad y de los costos por enlace en la red [4]. Estos analizan la información de las conexiones entre los nodos y sus costes como entradas (condiciones para lograr conexión satisfactoria entre un par de nodos), el cual puede no aplicarse en WSN pero en función de un algoritmo abstracto no altera su desarrollo.

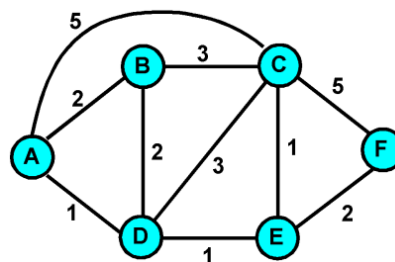


FIGURA 2-3. Ejemplo de WSN con enlaces con coste definido [17].

Un ejemplo es el algoritmo de Dijkstra el cual ha sido explicado por BAUTISTA [4] con una inicialización de este mismo seguido por un lazo que se repite en igual cantidad al número de nodos presentes. Al final de las iteraciones se habrá obtenido el camino de menor coste entre el nodo origen y el destino. Los pasos se detallan en el anexo G [17]. Del mismo libro de KUROSE y ROSS se tiene un ejemplo de diagrama de conexiones en la FIGURA 2-3, junto a los resultados tabulados del algoritmo de Dijkstra resultante en esa topología:

TABLA 2-5. Resultados tabulados de algoritmo de ruteo global [17].

step	N	D(B),p(B)	D(C),P(C)	D(D),P(D)	D(E),P(E)	D(F),p(F)
0	A	2,A	5,A	1,A	infly	infly
1	AD	2,A	4,D		2,D	infly
2	ADE	2,A	3,E			4,E
3	ADEB		3E			4E
4	ADEBC					4E
5	ADEBCF					

### 2.4.2 Algoritmos de ruteo descentralizado

Estos, por su parte, realizan la estimación de las rutas con menor coste a base de iteraciones de forma distribuida: al inicio de la red ningún nodo posee la información total; en vez de ello, los algoritmos se encargan de hacer el reconocimiento de esos parámetros por medio de iteraciones de cálculo e intercambio de información con nodos vecinos. Al final de las operaciones se obtiene para el nodo que se estudió sus caminos con menor coste al destino deseado [4].

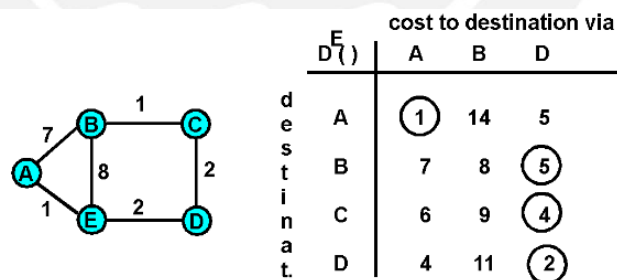


FIGURA 2-4. WSN con costes tabulados [17].

Un ejemplo de este tipo de algoritmo es el de Bellman-Ford o algoritmo de vector-distancia, el cual es iterativo, asíncrono (los nodos no operan de forma conjunta) y distribuido (cada nodo recibe datos de los vecinos para llevar y procesar resultados). Finalmente, el algoritmo concluye por cuenta propia, sin necesidad de una señal de aviso de fin de operaciones. Los pasos que explican este algoritmo son explicados en el anexo H [17]. Del libro de KUROSE y ROSS se toma el ejemplo mostrado en la FIGURA 2-5 acerca de cómo trabaja el algoritmo de Bellman-Ford para el caso de 3 nodos:

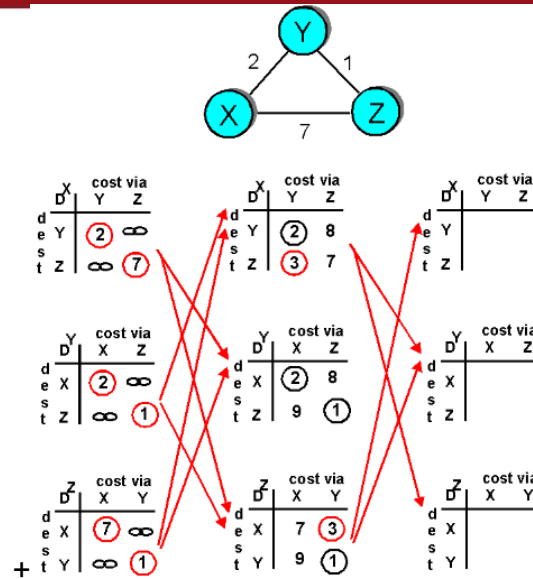


FIGURA 2-5. Explicación del funcionamiento del ruteo descentralizado [17].

### 2.4.3 Algoritmo de encaminamiento por gradiente

Este algoritmo fue elaborado por CONCEPCIÓN et al. En este, los nodos que conforman la red realizan una exploración periódica de los dispositivos cercanos para identificar cuales están a su alcance, posterior a lo cual cada nodo que exploró enviará su mensaje a quienes desee. Sin embargo, si no puede alcanzar al nodo destino, le envía a un nodo que si pueda alcanzar y que le requiera menos reenvíos para llegar al nodo final, a fin de optimizar el menor número de intermediarios [18]. El algoritmo separa a los nodos bases del resto con el “nombramiento amigable”, donde cada nodo tiene un número afín a su importancia en la red: menor el número, menor el tiempo que tomará en transmitir la información a ese nodo. No obstante, el renombramiento puede provocar conflictos al momento de considerar nodos dentro del rango de comunicación como se ve en la Figura 2-6. El formato de trama para este algoritmo se basa en el High-Level Data Link Control (HDCL), pues lleva un conteo del número de trama enviado o recibido, y así el nodo base pueda recuperar la información. El diagrama de flujo del algoritmo se detalla en el ANEXO I.

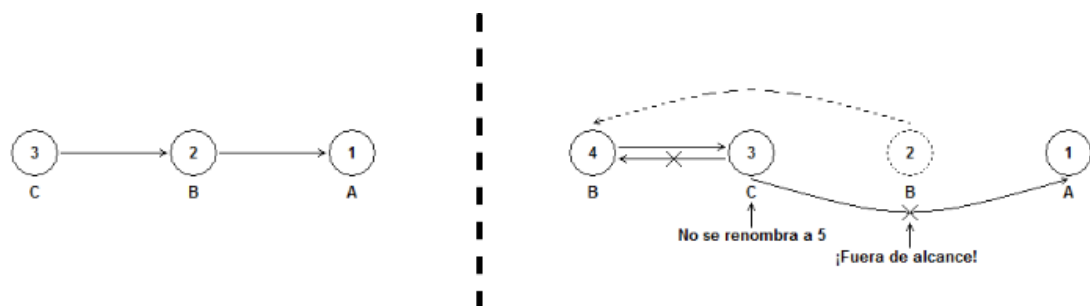


FIGURA 2-6. Explicación del problema del nombramiento para este algoritmo [18].

#### 2.4.4 Algoritmos basados en gossiping

Los algoritmos basados en el cotilleo o gossiping se fundamentan en el principio de comunicación entre personas, esto es, que los sensores en red repliquen la manera como se comportan los seres humanos al momento de difundir la información entre ellos. Una de las propiedades de este tipo de algoritmos es el intercambio de información de manera asíncrona; sin embargo, como cualquier algoritmo actual, también posee sus limitaciones y que obliga a que se adapte a redes particulares. En el presente apartado se presentan los tipos de algoritmos de gossiping ya existentes, así como su utilidad en las redes de sensores inalámbricos o WSN. Acorde con el libro de SHAH acerca de algoritmos de gossiping [19], estos se dividen en cuatro grupos: algoritmos de disseminación de información, de computación lineal, de computación de funciones por separado y de planificación de red.

##### 2.4.4.1 De computación lineal

Del mismo libro, se discute la relevancia de realizar computación promedio de valores de forma distribuida, ya sea para estimaciones, control y optimización de una misma naturaleza distributiva. Por ello, una manera de resolver esa dificultad es por medio de sistemas de ecuaciones lineales. Para este tipo de algoritmo el objetivo es el de lograr el menor tiempo de computación, el cual se define así:

$$T_{ave}(\varepsilon) = \Theta(\log n + \tau(\varepsilon, \bar{W}))$$

- Dónde:
- $T_{ave}$  = Tiempo promedio de computación
  - $n$  = Número de nodos comunicados
  - $\tau$  = Tiempo mixto, basado en la variación de la distancia
  - $W$  = Matriz de transición del tiempo mixto

Una ventaja de estos algoritmos es el número mínimo de operaciones en redes mayormente expandidas; no obstante, tienen complicaciones con gráficos con una forma definida o geometría, pues el tiempo mixto de un camino aleatorio en la red es muy grande. Para reducirlo, se recomienda agregar caminos semi-aleatorios o caminos aleatorios no reversibles, a fin de reducir el tiempo de los caminos más distantes, los cuales generan un mayor tiempo de computación.

De los estudios realizados en este rubro se resaltan el hecho por TSITSIKLIS [20] sobre los métodos de convergencia y optimización en la toma de decisiones para la



aceleración de la computación de tareas, el cual sirvió de base para estudios desarrollados en la actualidad como el hecho por JADBABAIE [21] et al. sobre el uso de algoritmos basados en convergencia entre nodos vecinos para la coordinación de agentes móviles, asemejándose a una MANET. Este último buscaba la coordinación grupal, para lo cual todos los agentes presentes deben converger a una misma dirección. Por ello, se define un nuevo modelo de sistema lineal basado en las funciones cuadráticas de Lyapunov y modificado del sistema lineal en tiempo discreto de Vicsek. Es así que se modifica el primer modelo [21]:

$$\langle \theta_i(t) \rangle_r = \frac{1}{1 + n_i(t)} \left( \theta_i(t) + \sum_{j \in \mathcal{N}_i(t)} \theta_j(t) \right)$$

Que trabaja con los vecinos de forma uniforme a un modelo “con liderazgo”:

$$\theta_i(t+1) = \frac{1}{1 + n_i(t) + b_i(t)} \left( \theta_i(t) + \sum_{j \in \mathcal{N}_i(t)} \theta_j(t) + b_i(t)\theta_0 \right)$$

De las anteriores ecuaciones  $n$  se refiere al número de agentes vecinos presentes en la red,  $\theta_i$  es el agente actual y  $\theta_j$  es cada uno de sus vecinos. La diferencia en el nuevo modelo es la presencia de un “agente cero”  $\theta_0$  o líder siempre que esté en el rango. El líder posee la información de la dirección deseada y que corresponde al promedio del resto de los agentes de la red de iteraciones pasadas, y así logrando un análisis más preciso de la convergencia de la dirección del resto hacia el líder.

#### 2.4.4.2 De computación de funciones separadas

Algunas aplicaciones requieren que el procesamiento de información sea rápido y para ello se prefiere separar funciones designadas a una tarea en particular, por lo que se creó el algoritmo de suma computacional [19]. Este nos dice que en un instante de tiempo cada nodo presente en la red puede contactar a lo más otro nodo individual; sin embargo, uno de estos puede ser contactado por múltiples nodos de forma simultánea. El teorema sigue la siguiente fórmula [19]:

$$f(\mathbf{x}, S) = \sum_{i \in S} f_i(x_i).$$

Donde  $x_i$  representa el vector de los valores correspondientes al nodo  $i$  y  $f$  se refiere a cada función separada. Con ello se obtiene el resultado en un tiempo  $T_{\text{sum}}$  :

$$T_{\text{sum}}(\varepsilon, \delta) = O \left( \frac{\log n + \log \varepsilon^{-1} + \log \delta^{-1}}{\delta^2 \Phi(P)} \right).$$

Donde  $P$  es una matriz simétrica,  $n$  es el número de nodos y tanto  $\epsilon$  como  $\delta$  ( $0, 1/2$ ) son funciones probabilísticas. De lo anterior, el  $x_{sum}$  se obtiene en un rango entre  $[(1 - \delta) x_{sum}, [(1 + \delta) x_{sum}]$ , con una probabilidad de mínimo  $1 - \epsilon/2$ .

Para este algoritmo se trabaja con el cálculo de mínimos valores por nodo, mediante el desarrollo de una distribución exponencial en una transformación probabilística, a fin de computar la sumatoria en los nodos con los valores mínimos. Su carácter asíncrono le da robustez a comparación al de sistemas lineales y lo favorece en gráficas definidas. Como desventaja, para un grupo pequeño de nodos y una tarea de precisión mayor este algoritmo no tiene un buen desempeño. Además, este trabaja con envío de valores reales, mientras que en los sistemas digitales se hace con bits de datos, por lo que existiría un retardo en el traspaso de un número a código binario y, a su vez, aumenta el tiempo de computación, siempre y cuando la cuantización sea exitosa.

#### 2.4.4.3 De planificación de red

Los algoritmos en este rubro combinan las propiedades de diseminación de información (algoritmos de gossiping), hacen uso de modificaciones en el acceso al medio o MAC y realizan una planificación de acceso a nodos (algoritmos de computación separada).

El SCH [19] es un algoritmo que se apoya en 2 subrutinas: SAMP y COMP. El primero es un algoritmo de muestreo distribuido basado en los siguientes principios:

- Cada nodo  $i$  perteneciente a la red  $V$  elige un  $I_i = 0$  o  $1$  con una probabilidad de  $1/2$ , donde  $I$  es el peso que tiene el nodo en la red.
- Si nodo  $i$  encuentra algún  $j$  perteneciente a la red tal que  $I_j = 1$ , cambia  $I_i = 0$ .
- La salida de  $I = [I_i]$ , del nodo  $i$  es tomada como una muestra independiente con probabilidad de  $2^{-n}$  como mínimo.

En el caso de COMP, este trabaja con la computación de los pesos de los nodos para muestras independientes, por lo cual todos los nodos pueden lograr el mismo estimado y permite realizar una decisión distribuida para SCH. Estos siguen las

ecuaciones:  $x_i = I_i W_i$  y  $x_{sum} = \sum_i x_i$  para la ponderación, donde  $W$  es el valor individual del nodo,  $I$  es el peso en la red y  $x_{sum}$  es la sumatoria de los nodos. De la etapa de SAMP se enmascara a los nodos con valor de cero en la red en un instante de tiempo (en otro instante estos pueden cambiar a 1) y formar parte de la

operación, con lo cual se reduce el tiempo de cálculo de la sumatoria. Una explicación más detallada se encuentra en el libro de SHAH [19]. Un estudio es el de EPHREMIDES [22] que confirma que el método de planificación por pesos es óptimo en la solución de problemas en redes, sobre todo en redes con multi-salto.

## 2.5 Problemática y modelo teórico

Los algoritmos de diseminación de información son básicos en el rubro de gossiping, por lo cual son los más importantes en este grupo y se desea estudiar. Como se mencionó anteriormente, se va a trabajar con el RGA y el DRG, ambos parte del grupo de diseminación de la información o enrutamiento de datos. La elaboración de la simulación para ambos algoritmos se llevará a cabo en el software MATLAB y en redes con topologías simuladas. Además, se comparan ambos con la técnica de flooding y un RGA modificado, las cuales son variantes de los dos primeros en base a parámetros a ser definidos previa simulaciones.

La tarea distributiva en la red será la ponderación de los valores nodales presentes en la red al momento que un grupo de nodos se comunica, y donde a cada nodo se le ha asignado un valor interno de forma aleatoria. El desempeño se observa en función a la relación del número de nodos en la red inalámbrica simulada versus la cantidad de iteraciones necesarias o mensajes transmitidos para obtener el valor final de la ponderación de la sumatoria nodal. Adicionalmente, en la topología aleatoria se da un análisis que compare el número de iteraciones con la densidad (R). Para este mismo, se requerirá un algoritmo que permita obtener la densidad mínima posible a fin que todos los nodos situados aleatoriamente estén conectados de manera directa o indirecta al resto.

Una vez concluida la etapa de simulación se dispone a definir algunas condiciones de diseño de la red inalámbrica a implementar, así como la selección de un “mote” de prueba en función a las condiciones asignadas para esta. Con la selección completada se dispone a implementar los algoritmos de gossiping en diversas topologías principalmente para ver su funcionamiento en base al tiempo de respuesta en la red, la existencia de pérdidas de paquetes de datos y, más importante, el consumo de la energía requerida para la transmisión entre estos. Con lo anterior podemos contrastar los resultados y analizar en qué aplicaciones será conveniente su uso.

## CAPÍTULO 3

### SIMULACIÓN Y EVALUACIÓN DE WSN EN DIVERSAS TOPOLOGÍAS

Del capítulo anterior donde se estudio los algoritmos de transmisión basados en gossiping se procede a trabajar con los dos algoritmos más representativos de cotilleo y que han sido mencionados anteriormente: el Randomized Gossip Algorithm (RGA) y el Distributed Random Grouping (DRG). Ambos están en el rubro de algoritmos de diseminación de la información, por lo cual comparten algunas propiedades que son la base de las mencionadas en el apartado previo.

#### 3.1. Algoritmos de diseminación de la información

Según SHAH [19], son los básicos y de los cuales se derivan los otros tipos de algoritmos y sus derivados. Para ver su desempeño en redes inalámbricas, se explica sus propiedades mediante un ejemplo:

1. Una red de  $n$  nodos conectados entre sí en una gráfica de conexiones lógicas (no físicas) que representan que nodo se comunica con quien.
2. Cada nodo presente posee su información particular  $x_i$  el cual puede ser un paquete de datos, conjunto de bits, etc.
3. Se espera difundir la información  $x_i$  hacia otros grupos de nodos presentes en la red, puesto que la transmisión de este tipo es pertinente y beneficiosa en distribución de procesamiento de datos o aplicación generales tanto para redes de sensores como para redes punto a punto (peer-to-peer).
4. La diseminación de información puede ser de un punto al resto de los nodos presentes (single-piece dissemination), como por ejemplo de una alarma en un edificio se envíe la misma información de evacuación al resto de alarmas.
5. Se puede dar que en la red cada nodo posea información individual y que se debe transmitir hacia el resto de nodos (multi-piece dissemination). Por ejemplo en redes punto a punto si se quiere enviar propaganda que posee cada nodo en la red al resto de nodos para que esta sea mostrada.

Con lo explicado anteriormente podemos definir a los algoritmos DRG y RGA dentro del grupo de algoritmos de diseminación de piezas múltiples, y cada uno de estos con sus variantes que les dan una ventaja sobre la otra en ciertas redes.

### 3.2. Conceptos Preliminares

Para poder explicar con mayor precisión el funcionamiento de los algoritmos de cotilleo es conveniente definir una serie de parámetros de un algoritmo de gossiping tal y como lo realizó FREDERICK [23]:

1. Sistema: Nos referimos a la red de comunicación, para nosotros el entorno MATLAB utilizado para simular redes de sensores.
2. Problema de computación distributiva: Se refiere a la tarea asignada en la red, en nuestro caso será la de promedia el valor individual de cada nodo, con el fin de que todos los nodos obtengan el valor promedio final.
3. Probabilidad: Se refiere al rango estimado de fin del algoritmo (valor máx. y min. de iteraciones cuando se obtenga el promedio en cada nodo).
4. Time complexity o Complejidad temporal: Se refiere al tiempo necesario en resolver el problema o número de rondas requeridas. El rango de respuesta o limitación es el límite del resultado considerar que se obtuvo un promedio definitivo. Se ha asignado que el rango sea del 1% respecto al mayor y menor número de todos los nodos de la red.
5. Message complexity o Complejidad de mensajes: Cantidad de mensajes transmitidos en total durante la ejecución del algoritmo.
6. Connectivity complexity o Complejidad de conexiones: Número total de conexiones presentes en la red.
7. Space complexity o Complejidad espacial: Cantidad de memoria empleada en almacenar la información de las transmisiones. En nuestro caso será la matriz que guarda los valores de cambios de dato en la red para cada nodo.
8. Efficacy o eficacia: Se refiere a que tan eficiente es el algoritmo en la red, la cual puede ser medida en función al porcentaje de nodos en la red que han recibido mensaje luego de N rondas, donde N equivale al número de nodos.
9. Overlays o superposiciones: Especifica que nodo tiene visibilidad a cada nodo y sirve de guía para escalar la red. En nuestro caso, tenemos una función dedicada a la afiliación de cada miembro en la red (DRG).
10. Fase de comunicación y fase de procesamiento: Se refieren a la etapa de intercambio de la información, donde un grupo de participantes es habilitado para intercambiar datos, y la de cambios que experimenta cada nodo comunicado después del intercambio de datos, respectivamente
11. Push and pull: Es el método por el cual trabaja el intercambio de información donde se envía activamente información de un nodo al resto de nodos (push) y la información es recibida constantemente de otros nodos (pull).



12. Spread Rate o Tasa de difusión: Se refiere a la cantidad de nodos que reciben información en una misma ronda.
13. Total affected population o Total de población afectada: Se refiere al número de nodos que recibieron mensajes luego de un número N de rondas (N es núm. de nodos).
14. Degree Distribution o Distribución de Grado: Se refiere a la cantidad de conexiones que van y vienen de los nodos, el cual nos servirá de parámetro en la velocidad de difusión en la red.
15. Closeness o Cercanía: Se refiere a la distancia promedio entre los nodos, pues hay probabilidad de que el mensaje no llegue al nodo final deseado.
16. Betweenness o Intermediación: Es la medida de cuantos caminos cortos un nodo en particular posee, o sea sirve como nodo de paso. Mayor es la intermediación, mayor es la repetición en algunos caminos de difusión.
17. Eigenvector o vector propio: Describe el número de nodos “populares” que están conectados con un nodo en particular.
18. Assortativity and Disassortativity: Es la tendencia de nodos a formar conexiones con otros nodos y es usado como referencia para difundir rápidamente un mensaje en particular en un grupo especializado de nodos. El segundo funciona de forma opuesta.
19. Density o Densidad: Se refiere a la cantidad de conexiones presentes en un área de la red. Si existen muchas conexiones a los mismos nodos hay una probabilidad que ocurra una alta incidencia de mensajes redundantes.

### 3.3 Simulación y evaluación de los algoritmos de gossiping

Ahora con las definiciones de desempeño podemos proceder con la simulación en diferentes topologías de red y en diferente cantidad de nodos presentes. En un principio, los algoritmos basados en las conversaciones humanas para la transferencia de información han sido estudiados en base a cómo se propagan las epidemias. No obstante, existe un método previo que también opera de manera similar al cotilleo: el flooding o diseminación indiscriminada. Se debe agregar que para cada número de nodos y algoritmo a ser empleado se lleva a cabo 5 muestras para tener un resultado con mayor precisión.

### 3.3.1 Flooding

La técnica de flooding se refiere a la transferencia de datos de punto a punto de manera directa entre 2 nodos que se pueden relacionar mediante una comunicación en ambos sentidos (half-duplex). Ahora bien, el flooding puro [3] trabaja de la siguiente manera: cuando algún nodo recibe mensaje, este se encarga de enviar a otro nodo, siempre y cuando haya ocurrido un primer mensaje, a fin de tener un historial de nodos y detectar mensajes duplicados. Para comparar el flooding con el resto de algoritmos vamos a modificar el funcionamiento de este, a fin que se acomode con el problema de computación distributiva de promedio de valores de los nodos. La función creada flooding.m sigue la siguiente estructura:

% FLOODING

- 1: Inicialización
- 2: De gráfica G, se tiene un número total de N nodos y cada nodo tiene un valor  $x_i$
- 3: Para todos los nodos n pertenecientes a grafica G
- 4: Mientras  $x_{i \max} - x_{i \min} \leq 1\%$  del promedio final
- 5:     Se elige 2 nodos de manera aleatoria:  $n_i$  y  $n_j$
- 6:     Si distancia entre  $n_i$  y  $n_j$  permite comunicación (distancia  $\leq R$ , son vecinos)
- 7:          $x_{i \text{new}} = x_{j \text{new}} = (x_i + x_j)/2$
- 8:         Para todos los nodos  $n - \{n_i, n_j\}$
- 9:              $x_{k \text{new}} = x_k$
- 10:         Matriz V almacena  $x_{\text{new}}$  para todos los nodos n
- 11:         Verificamos valor max y min en última columna V (los últimos valores actualizados)
- 12:         actualizados)
- 13:         Obtenemos  $x_{i \max} - x_{i \min}$
- 14:         Incrementa cuenta (número de transmisiones half-duplex)
- 15:     Si  $x_{i \max} - x_{i \min} \leq 1\%$
- 16:         Break (termina algoritmo)
- 17: Fin

De manera aleatoria se eligen 2 nodos conectados y se promedia los valores que cada uno de ellos posee y ambos obtienen como nuevo valor el promediado. En una red real esto se entiende que para un nodo i y un nodo j, el primer nodo le envía la información al nodo j, el cual procesa la información para su uso posterior y le devuelve esa información al nodo i por si la necesita más adelante. Durante todo

ese proceso se llevan a cabo dos transmisiones half-duplex donde los nodos involucrados actualizan su información y el resto mantiene la suya, y así sucesivamente hasta que de los nodos luego de  $N$  rondas el de mayor valor y el de menor valor de la información la diferencia sea menor al 1% del máximo valor posible; donde este valor fue seleccionado con el prof. Tang en OU. Además, hemos definido una eficacia propia del 5 % como parámetro adicional para ver si el rango de fin influye o no en los resultados.

### 3.3.2 Evaluación del flooding en diversas topologías

Para poder ver el desempeño de la técnica de flooding en redes de sensores se ha preparado la simulación de las mismas en MATLAB.

#### 3.3.2.1 Topología Lineal

Es la primera red a ser analizada, para lo cual se creó una función `line_network.m`, capaz de elaborar una red lineal o tipo bus para  $N$  nodos presentes en la misma, la cual puede ser revisada al detalle en la sección de anexos.

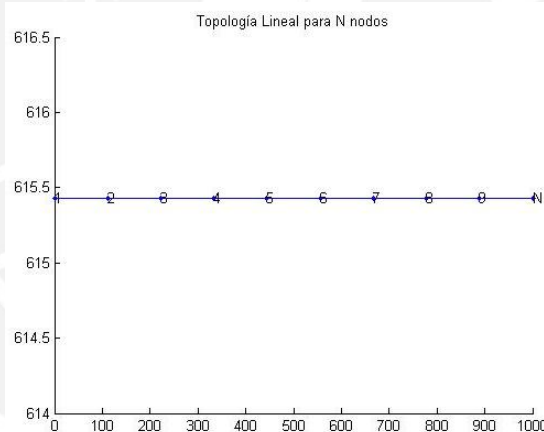


FIGURA 3-1. Topología lineal de  $N$  nodos. Elaboración propia.

La característica principal en este tipo de redes es que para cada nodo o punto en la red existe a lo más 2 conexiones hacia diferentes puntos, por lo que se puede interactuar con estos nada más; con la excepción de los extremos de la red los cuales solo se conectan a un punto cercano o vecino. Un análisis previo nos dice que para que interactúen los extremos de la red se requerirá de  $N-1$  rondas como mínimo, lo cual incrementará el número de rondas para lograr el rango de fin. Ahora se tiene una tabla de resultados obtenidos para diferente cantidad de nodos con los parámetros definidos en el apartado inicial del presente capítulo, donde se ponderaron 5 escenarios distintos para cada número de nodos, a fin de tener una proyección de resultados más pareja y menos dependiente de aleatoriedad:

TABLA 3-1. Tabla de parámetros del flooding en red lineal. Elaboración propia.

PARÁMETROS	Número de nodos (N)				
	10	20	30	40	50
FLOODING	10	20	30	40	50
<b>BASICOS</b>	Parámetros generales de desempeño				
Complejidad temporal	530.4	4492.6	12543	27217.6	45460.4
Complejidad de mensajes	1060.8	8985.2	25086	54435.2	90920.8
Complejidad de conexiones	9	19	29	39	49
Complejidad espacial	5304	89852	376290	1088704	2273020
Probabilidad de fin	[505;692]	[3284;5404]	[5076;18027]	[9756;35578]	[11340;63709]
Eficacia (%)	80%	76%	82%	86.50%	84%
<b>AVANZADOS</b>	Parámetros adicionales ligados al algoritmo empleado				
Tasa de difusión	2	2	2	2	2
Total de población afectada	8	15.2	24.6	34.6	42
Distribución de grado	1.8	3.8	5.8	7.8	9.8
Cercanía(área 1 x 1)	0.11121	0.05273	0.03448	0.02564	0.2051
Intermediación	80%	90%	93.30%	95%	96%
<b>DEFINICIONES PROPIAS</b>	Parámetros definidos por el autor				
Densidad mínima (área 1000 x 1000)	111.21	52.73	34.48	25.64	20.51
Eficacia propia (%)	47.50%	41.33%	40.32%	36.22%	35.56%
Rango de finalización	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

Se puede observar un incremento considerable y proporcional entre el número de nodos en la red y el número de rondas requeridas en cumplir con el rango de finalización el cual es el 1% de 10, pues se asigna a cada nodo un valor interno que va a compartir con sus vecinos de forma aleatoria y que será un número entero entre el rango de 1 a 10. Estos parámetros serán constantes en el resto de simulaciones.

### 3.3.2.2 Topología Anillo

La segunda red a tomar en cuenta es la que posee forma de un círculo o anillo, con lo cual cada nodo o punto de red esta comunicado con 2 vecinos si o si. De igual forma al caso anterior se elaboró una función para la simulación de una red topología anillo para N nodos.

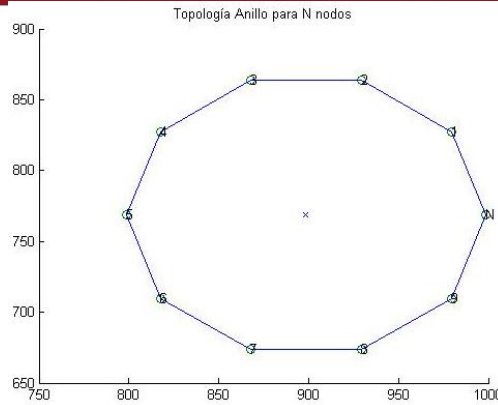


FIGURA 3-2. Topología tipo anillo de N nodos. Elaboración propia.

Desde un análisis cualitativo vemos que si los extremos de la red desean intercambiar información requerirán como mínimo  $(N/2 \pm 1)$  rondas, lo cual es una mejora considerable respecto al  $N-1$  anterior. De una comparación con los mismos valores aleatorios gracias a la función rand ('state', n), donde el n representa el estado de la semilla que asigna los números. Para más detalle ver anexos el programa ring\_network.m. Se presenta un cuadro resumen del funcionamiento del flooding en una red tipo anillo para N nodos (5 samples por caso).

TABLA 3-2. Tabla de parámetros del flooding en red anillo. Elaboración propia.

PARÁMETROS	Número de nodos (N)				
	10	20	30	40	50
FLOODING	10	20	30	40	50
<b>BASICOS</b>	Parámetros generales de desempeño				
Complejidad temporal	185.4	1323	4029.2	9564.4	16715.2
Complejidad de mensajes	370.8	2646	8058.4	19128.8	33430.4
Complejidad de conexiones	10	20	30	40	50
Complejidad espacial	1854	26460	120876	382576	835760
Probabilidad de fin	[167;206]	[999;1546]	[2306;4791]	[8062;11534]	[13533;18685]
Eficacia (%)	90%	77%	84%	88%	86%
<b>AVANZADOS</b>	Parámetros adicionales ligados al algoritmo empleado				
Tasa de difusión	2	2	2	2	2
Total de población afectada	9	15.4	25.2	35.2	43
Distribución de grado	2	2	2	2	2
Cercanía(área 1 x 1)	0.06283	0.03142	0.02094	0.0157	0.01256
Intermediación	100%	100%	100%	100%	100%
<b>DEFINICIONES PROPIAS</b>	Parámetros definidos por el autor				
Densidad mínima (área 1000 x 1000)	62.83	31.42	20.94	15.7	12.56
Eficacia propia (%)	57.08%	45.85%	45.61%	44.11%	38.31%
Rango de finalización	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1



A simple vista se observa que el número de rondas se reduce considerablemente respecto a la topología lineal. Como nota adicional se tiene que todas las simulaciones de topología anillo se realizaron con un radio de círculo de  $R = 100$  (para un área de simulación en MATLAB de  $1000 \times 1000$ ).

### 3.3.2.3 Topología Geométrica Aleatoria

La última topología a ser estudiada es también conocida como red de nodos aleatoria, debido a que su condición principal es que los nodos o puntos de red se posicionan en el sistema de manera aleatoria y la mínima distancia para que “hablen” entre sí es la que nos asegura de tener a cada nodo en la red conectado de alguna forma al resto, siendo esta conexión directa o indirecta.

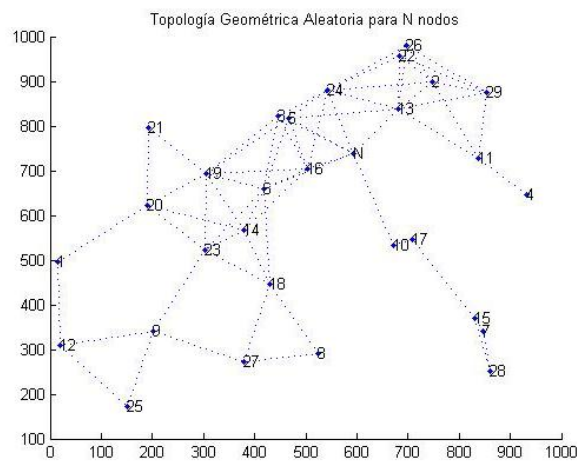


FIGURA 3-3. Topología geométrica aleatoria de N nodos. Elaboración propia.

Este tipo de red requiere tomar casos distintos, por lo cual en un primer caso se va a cambiar la densidad mínima o radio de salto mientras mantenemos el número de nodos presentes en la red, en cambio para otro caso se mantendrá un valor de densidad fijo y se incrementará el número de nodos involucrados en la red.

#### 3.3.2.3.1. Radio de salto constante

Dado que para un radio de  $R = 1.0$  (en un área de  $1 \times 1$ ) la conexión entre todos los nodos entre sí es casi asegurada vamos a tomar la mitad de dicho radio  $R = 0.5$ , a fin de no tener una alta densidad de conexiones en la red. En una red simulada de  $100 \times 100$  como la empleada para la función `finalrandomgrid.m` el  $R = 0.5$  equivale a que para que 2 nodos puedan intercambiar información deben encontrarse a una distancia como máximo de 50. De un muestreo de 5 simulaciones para diferentes

números de nodos se obtuvo su respectiva tabla resumen (véase anexo tabla J-1). Se observa que el número de rondas requeridas para concluir la tarea de promediar los valores propios se incrementa considerablemente al inicio y el incremento va decreciendo con el tiempo. Asimismo, dicho número de rondas se reduce en gran cantidad si se compara con las otras topologías.

### 3.3.2.3.2 Número de nodos constante

El análisis a un número de puntos de red constante en el sistema se lleva a cabo para medir la influencia de la densidad de conexiones presentes en la red respecto al número de rondas o iteraciones necesarias para concluir con el problema computacional del sistema. Se ha decidido en utilizar el número de 40 puntos de red dado que es una cantidad ni muy pequeña ni muy grande de nodos que pueden estar presentes en una red implementada en la realidad. En primer lugar se obtiene el valor mínimo posible de R para que todos los nodos se encuentren conectados. De las 5 muestras para  $N = 40$  se obtuvieron  $R_{\min} = 0.278/0.263/0.3/0.251/0.213$ , donde el valor promedio resultante es de 0.261; y por consiguiente se ha definido el segundo caso como muestra de comparación ya que el R resultante es cercano al ponderado. Se presenta así los resultados tabulados:

TABLA 3-3. Tabla de flooding en topología aleatoria para 40 nodos. Elaboración propia.

Datos	Topología Geométrica Aleatoria N = 40								
	0.263	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
R	0.263	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
Complejidad temporal	5522	3221	1376	1287	800	558	362	358	374
Complejidad de mensajes	11044	6442	2752	2574	1600	1116	724	716	748
Complejidad de conexiones	132	160	264	372	471	561	646	704	746

Como se esperaba, para un número creciente de R el tiempo requerido en concluir la tarea va decreciendo considerablemente, debido a que los nodos entran en una mayor cantidad de conversaciones, por lo que se tiene mayor número de caminos por donde transmitir. Sin embargo la existencia de conexiones en una gran cantidad llega a un punto que el número de transmisiones requeridas se incrementa o disminuye en un porcentaje pequeño como se observa a partir de  $R = 0.8$ . El análisis de nodos constante es más relevante al momento de comparar con otros algoritmos por lo que se discutirá a fondo en el último apartado del capítulo.

### 3.3.3 Randomized Gossip Algorithm (RGA)

El primer algoritmo de gossiping a analizar es el RGA mediante la función creada RGA.m, el cual es muy semejante al flooding en el sentido que los datos se transfieren de punto a punto y en ambos sentidos pero en instantes de tiempo distintos (half-duplex). Sin embargo, el aspecto 100 % aleatorio del sistema es reemplazado por un sistema más estructurado detallado en las siguientes líneas:

% RGA algoritmo

1: Inicialización

2: De gráfica G, se tiene un número total de N nodos y cada nodo tiene un valor  $x_i$

3: Para todos los nodos n pertenecientes a grafica G

4: Mientras  $x_{i \max} - x_{i \min} \leq 1\%$  del promedio final

5: Se elige un nodo central de manera aleatoria:  $n_i$

6: % El nombramiento del nodo también implica prioridad sobre el resto

7: Para j que va de i+1 hasta N

8: Si distancia entre  $n_i$  y  $n_j$  permite comunicación (distancia  $\leq R$ )

9:  $x_{i \text{new}} = x_{j \text{new}} = (x_i + x_j)/2$

10: Para todos los nodos  $n - \{n_i, n_j\}$

11:  $x_{k \text{new}} = x_k$

12: Matriz V almacena  $x_{\text{new}}$  para todos los nodos n

13: Verificamos valor max y min en última columna V (los últimos valores actualizados)

15: Obtenemos  $x_{i \max} - x_{i \min}$

16: Incrementa cuenta (número de transmisiones half-duplex)

17: Si  $x_{i \max} - x_{i \min} \leq 1\%$

18: Break (termina algoritmo)

19: Fin

Luego de que la red haya sido asignada a una topología definida, cada nodo presente en esta tiene un número que se considera como su nombre en la red (nodo 1, nodo 2, nodo 40, etc.) y, de igual forma, se le asigna un valor interno aleatorio que va del 1 al 10, y que va a ser ponderado durante el desarrollo de la simulación. Hasta este punto es idéntico al caso anterior; sin embargo, el número que se representa en la red implica prioridad en intercambio de información, lo cual en pocas palabras significa que si el nodo 4 está conectado al nodo 5 y al nodo 8, en una ronda va a interactuar con el nodo 5 y luego el nodo 8; por otro lado si nodo

8 quiere iniciar la conversación no va a poder pues su jerarquía no lo permite, y así se discrimina ciertos caminos a fin de reducir tiempos en rondas de transmisión.

### 3.3.4 Evaluación del RGA en diversas topologías

Así como en el flooding se ha realizado simulaciones en diversas topologías para poder ver el desempeño del RGA en las mismas. Cabe agregar que las simulaciones han sido realizadas con las mismas redes simuladas para el caso anterior a fin de poder comparar los algoritmos en igualdad de condiciones.

#### 3.3.4.1 Topología Lineal

De igual manera al flooding se emplea la función line\_network.m. Para un muestro de 5 simulaciones por número de nodos presentes en la red se obtuvo lo siguiente:

TABLA 3-4. Tabla de parámetros de RGA en red lineal. Elaboración propia.

PARÁMETROS	Número de nodos (N)				
	10	20	30	40	50
RGA	10	20	30	40	50
<b>BASICOS</b>	Parámetros generales de desempeño				
Complejidad temporal	386.8	3392	10858.4	17498.6	35643.4
Complejidad de mensajes	773.6	6784	21716.8	34997.2	71286.8
Complejidad de conexiones	9	19	29	39	49
Complejidad espacial	3868	67840	325752	699944	1782170
Probabilidad de fin	[249;721]	[1849;4598]	[8625;13738]	[4224;35127]	[13046;50000]
Eficacia (%)	82%	82%	77%	73%	74%
<b>AVANZADOS</b>	Parámetros adicionales ligados al algoritmo empleado				
Tasa de difusión	2	2	2	2	2
Total de población afectada	8.2	16.4	23	29	36.8
Distribución de grado	1.8	3.8	5.8	7.8	9.8
Cercanía(área 1 x 1)	0.111	0.05273	0.03448	0.02564	0.02051
Intermediación	80%	90%	93.30%	95%	96%
<b>DEFINICIONES PROPIAS</b>	Parámetros definidos por el autor				
Densidad mínima (área 1000 x 1000)	111.21	52.73	34.48	25.64	20.51
Eficacia propia (%)	55.67%	51.06%	41.24%	50.96%	37.97%
Rango de finalización	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

En una primera instancia se puede decir que la cantidad de iteraciones necesarias para concluir la ponderación en el sistema se incrementa de manera proporcional, aunque el número de rondas en todos los casos es menor al del flooding.

### 3.3.4.2 Topología Anillo

De igual forma al caso previo, se consideró una red con N nodos donde para cada valor de N se emplea 5 simulaciones con diferentes valores aleatorios en la asignación de su posición en el sistema y los valores internos de cada uno de ellos. Se obtuvo la tabla resumen presentada a continuación:

TABLA 3-5. Tabla de parámetros de RGA en red anillo. Elaboración propia.

PARÁMETROS	Número de nodos (N)				
	10	20	30	40	50
RGA	10	20	30	40	50
<b>BASICOS</b>	Parámetros generales de desempeño				
Complejidad temporal	224.4	1467.8	4672.4	10445.4	17126.2
Complejidad de mensajes	448.8	2935.6	9344.8	20890.8	34252.4
Complejidad de conexiones	10	20	30	40	50
Complejidad espacial	2244	29356	140172	417816	856310
Probabilidad de fin	[154;261]	[1035;2076]	[2548;6312]	[7717;12108]	[13196;21397]
Eficacia (%)	88%	75%	74%	80%	75%
<b>AVANZADOS</b>	Parámetros adicionales ligados al algoritmo empleado				
Tasa de difusión	2	2	2	2	2
Total de población afectada	8.8	15	22.2	32	37.4
Distribución de grado	1.8	3.8	5.8	7.8	9.8
Cercanía(área 1 x 1)	0.6283	0.3142	0.2094	0.157	0.1256
Intermediación	100%	100%	100%	100%	100%
<b>DEFINICIONES PROPIAS</b>	Parámetros definidos por el autor				
Densidad mínima (área 1000 x 1000)	62.83	31.42	20.94	15.7	12.56
Eficacia propia (%)	50.32%	57.78%	45.02%	43.31%	39.64%
Rango de finalización	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

A simple vista se observa que el número de rondas se reduce considerablemente respecto a la topología lineal. Como nota adicional se tiene que todas las simulaciones de topología anillo se realizaron con un radio de círculo de  $R = 100$  (área 1000 x 1000).

### 3.3.4.3 Topología Geométrica Aleatoria

La última topología es la red de nodos aleatoria que ha sido explicada en el caso del flooding y tiene el mismo funcionamiento para este caso. Nuevamente, se realiza el análisis desde el punto de vista de mantener un mismo valor de densidad mínima o rango de conexión e incrementando el número de nodos en la red



(condiciones semejantes a la simulación de las topologías lineal y anillo) y el segundo caso con el cambio del R a un número fijo de nodos.

#### 3.3.4.3.1. Radio de salto constante

Se mantienen las condiciones de la simulación anterior ( $R = 0.5$ ) en la función finalrandomgrid.m por lo que se logran los resultados tabulados (véase anexo tabla J-2). La cantidad de rondas se incrementa con el número de rondas, sin embargo, tanto para  $N = 40$  como para  $N = 50$  se tiene valores parecidos, lo cual explica que ese número es el valor que se tomará para nodos de mayor valor y que ya no se incrementará.

#### 3.3.4.3.2 Número de nodos constante

Se mantiene en uso de la segunda muestra como ejemplo de comparación de las 5 posibles ( $R_{\min} = 0.278/0.263/0.3/0.251/0.213$ ) y se presenta así los resultados para  $N = 40$ :

TABLA 3-6. Tabla de RGA en topología aleatoria para 40 nodos. Elaboración propia.

Datos	Topología Geométrica Aleatoria N = 40								
R	0.263	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
Complejidad temporal	2855	3213	5911	9090	11784	14153	16422	17853	18742
Complejidad de mensajes	5710	6426	11822	18180	23568	28306	32844	35706	37484
Complejidad de conexiones	132	160	264	372	471	561	646	704	746

Al igual que en el flooding, para un número creciente de R el número de rondas se incrementa aunque es un incremento no proporcional, dado que la diferencia de un caso al otro va decreciendo.

### 3.3.5 Distributed Random Grouping (DRG)

El desempeño global del RGA va a ser comparado con los resultados obtenidos por el DRG, dado que este último toma la idea del RGA de definir un nodo central principal en una ronda para la transmisión y recepción de información, y la idea básica del flooding de intercambiar la información de manera indiscriminada. El funcionamiento de DRG.m al detalle se explica en las líneas siguientes:

% DRG algoritmo

1: Inicialización

2: De gráfica G, se tiene un número total de N nodos y cada nodo tiene un valor  $x_i$

3: Para todos los nodos n pertenecientes a grafica G

4: Mientras  $x_{i \max} - x_{i \min} \leq 1\%$  del promedio final

5: Se elige un nodo central de manera aleatoria:  $n_i$

6: % El nodo central va a tener conocimiento de que nodo están conectados a este,

7: o sea los cuales comparten membresía.

8: Para j que va de 1 hasta N

9: Si distancia entre  $n_i$  y  $n_j$  permite comunicación (distancia  $\leq R$ )

10:  $n_j$  se incluye al vector membresía de  $n_i$

11: Se acumula el valor  $x_j$  de los miembros

12: Incrementa cuenta (número de transmisiones half-duplex)

13: Fin Loop

14: Ponderación del acumulado entre cantidad de miembros

15: Para miembros de vector membresía de  $n_i$

16:  $x_{j \text{new}} = x_{\text{pond}}$

17:

18: Para todos los nodos n – {miembros de vector membresía de  $n_i$ }

19:  $x_{k \text{new}} = x_k$

20: Matriz V almacena  $x_{\text{new}}$  para todos los nodos n

21: Verificamos valor máx. y min. en última columna V (los últimos valores

22: actualizados)

23: Obtenemos  $x_{i \max} - x_{i \min}$

24: Si  $x_{i \max} - x_{i \min} \leq 1\%$

25: Break (termina algoritmo)

26: Fin

La diferencia más notoria entre este algoritmo con los dos previos es el hecho que por ronda el nodo central le pide a todos los nodos o puntos de red conectados información. Por lo tanto si nodo 1 está conectado a nodo 2,4 y 5 el primero le pide a los 3 que les den la información para ser procesada y al concluir con esta les devuelve los resultados para que puedan emplear la información más adelante. De igual manera, si nodo 4 está conectado a nodo 1 y nodo 3, les pide información a ambos (no hay jerarquía en la red). Otra diferencia es que para la primera ronda se requirió 6 transmisiones half-duplex y en la segunda 4; mientras que en el flooding y el RGA sólo se permite una interacción entre 2 nodos (2 transmisiones).

### 3.3.6 Evaluación del DRG en diversas topologías

EL DRG evaluará en las topologías lineal, anillo y de geometría aleatoria para ver su nivel de desempeño con el resto. Dado que el intercambio de información no siempre se realiza en parejas se espera que el número de iteraciones disminuya enormemente; sin embargo, a nosotros nos interesa ver el número de transmisiones necesarias, dado que ese parámetro y la cantidad de energía necesaria para resolver el problema están relacionados directamente.

#### 3.3.6.1 Topología Lineal

Para la red lineal de nodos, sensores o puntos de red se tienen los siguientes resultados en función a 5 simulaciones por cada cantidad fija de nodos presentes en la red:

TABLA 3-7. Tabla de parámetros de DRG en red lineal. Elaboración propia.

PARÁMETROS	Número de nodos (N)				
	10	20	30	40	50
<b>BASICOS</b>	Parámetros generales de desempeño				
Complejidad temporal	145	1225.8	3176.2	7106	12442.2
Complejidad de mensajes	528.4	4666.4	12286.4	27713.2	48765.6
Complejidad de conexiones	9	19	29	39	49
Complejidad espacial	1450	24516	95286	284240	622110
Probabilidad de fin	[58;214]	[971; 1523]	[2793;4848]	[5419;9232]	[3052;16588]
Eficacia (%)	96%	93%	93%	98%	94%
<b>AVANZADOS</b>	Parámetros adicionales ligados al algoritmo empleado				
Tasa de difusión	2.8221	2.9034	2.9341	2.9500	2.9597
Total de población afectada	9.6	18.6	28	39.2	47.2
Distribución de grado	2	2	2	2	2
Cercanía(área 1 x 1)	0.11121	0.05273	0.03448	0.02564	0.02051
Intermediación	100%	100%	100%	100%	100%
<b>DEFINICIONES PROPIAS</b>	Parámetros definidos por el autor				
Densidad mínima (área 1000 x 1000)	111.21	52.73	34.48	25.64	20.51
Eficacia propia (%)	53.90%	47.18%	39.91%	34.74%	34.97%
Rango de finalización	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

El cambio más notorio en este algoritmo es el hecho que el spread rate o tasa de difusión es diferente de cero y en la mayoría es cercana a 3. Esto se debe a que este indicador es para saber cuántos nodos conversan en una misma ronda y casi todos los nodos de la red está conectado a otros 2 vecinos con excepción de los

extremos por lo que a medida que se tiene más nodos en la red la probabilidad de tener a más de 2 nodos en una ronda es mayor. Las iteraciones se incrementan de forma directamente proporcional.

### 3.3.6.2 Topología Anillo

En esta red el DRG tiene la particularidad que como todos los nodos están conectados si o si con 2 vecinos la tasa de difusión va a ser siempre 3. El resto de resultados se encuentran en la siguiente tabla:

TABLA 3-8. Tabla de parámetros de DRG en red anillo. Elaboración propia.

PARÁMETROS	Número de nodos (N)				
	10	20	30	40	50
<b>BASICOS</b>	Parámetros generales de desempeño				
Complejidad temporal	55	353.6	983.4	2382.2	4254.2
Complejidad de mensajes	220	1414.4	3933.6	9528.8	17016.8
Complejidad de conexiones	10	20	30	40	50
Complejidad espacial	550	7072	29502	95288	212710
Probabilidad de fin	[40;77]	[336;384]	[904;1184]	[2218;2748]	[3332;4819]
Eficacia (%)	100.00%	88.00%	96.67%	96.50%	94.80%
<b>AVANZADOS</b>	Parámetros adicionales ligados al algoritmo empleado				
Tasa de difusión	3	3	3	3	3
Total de población afectada	10	17.6	29	38.6	47.4
Distribución de grado	2	2	2	2	2
Cercanía(área 1 x 1)	0.06283	0.03142	0.02094	0.0157	0.01256
Intermediación	100%	100%	100%	100%	100%
<b>DEFINICIONES PROPIAS</b>	Parámetros definidos por el autor				
Densidad mínima (área 1000 x 1000)	62.83	31.42	20.94	15.7	12.56
Eficacia propia (%)	53.78%	53.47%	43.80%	43.86%	39.63%
Rango de finalización	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

Para la red tipo anillo se observa que el número de iteraciones va decreciendo considerablemente como se había estimado. Al momento de comparar con las otras simulaciones se debe considerar la complejidad de mensajes o message complexity para ver cuán beneficioso es este algoritmo.

### 3.3.6.3 Topología Geométrica Aleatoria

Para está topología se tiene en cuenta dos casos en los que se mantiene el valor de nodos (40 puntos de red en nuestro caso) y en otro el rango de conexión o densidad de conexiones para la red.

### 3.3.6.3.1. Radio de salto constante

Dado que para un radio de  $R = 1.0$  (en un área de  $1 \times 1$ ) la conexión entre todos los nodos entre sí es casi asegurada vamos a tomar la mitad de dicho radio  $R = 0.5$ , a fin de no tener una alta densidad de conexiones en la red, por lo cual para que 2 nodos puedan intercambiar información deben encontrarse a una distancia como máximo de 50. De 5 pruebas se obtuvo la tabla resumen (véase anexo tabla J-3). Como se esperaba el número de iteraciones o rondas va disminuyendo; aunque, por otra parte el número de mensajes transmitidos en todo el sistema sigue incrementándose, lo cual era previsible considerando que cada vez están más nodos participando en la red. Se añade que a pesar de la gran cantidad de puntos de red el número de mensajes es bajo a comparación de otros algoritmos.

### 3.3.6.3.2 Número de nodos constante

De las 5 muestras para  $N = 40$  se obtuvieron  $R_{\min} = 0.278/0.263/0.3/0.251/0.213$ , donde el valor promedio resultante es de 0.261; por lo que la segunda muestra se mantiene como la muestra de comparación entre algoritmos. Para el DRG se obtiene los siguientes resultados:

TABLA 3-9. Tabla de DRG en topología aleatoria para 40 nodos. Elaboración propia.

Datos	Topología Geométrica Aleatoria $N = 40$									
	R	0.263	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
Complejidad temporal	397	399	90	36	14	8	5	5	3	
Complejidad de mensajes	5278	3790	1234	548	390	172	202	212	146	
Complejidad de conexiones	132	160	264	372	471	561	646	704	746	

Como se observa, el número de rondas requeridas va disminuyendo enormemente a medida que el  $R$  de conexión se incrementa, ya que los nodos van relacionándose con más nodos hasta que el procesamiento de toda la tarea es llevada por unos cuantos puntos en la red.

## 3.3.7 RGA modificado

El desempeño del DRG desde un punto de vista cualitativo es aparentemente superior al RGA y al flooding por lo que se consideraría como el algoritmo de gossiping ideal para las redes de sensores inalámbricos. Para ver su superioridad



sobre otro tipo de algoritmo se propone un nuevo algoritmo con mínima aleatoriedad y ver si el carácter híbrido del DRG lo puede superar. Para poder cumplir con ello, se ha propuesto el modificar el algoritmo del RGA en una función RGAM.m con el que se logra un desarrollo explicado en las siguientes líneas:

% RGA modificado o RGAM

1: Inicialización

2: De gráfica G, se tiene un número total de N nodos y cada nodo tiene un valor  $x_i$

3: Para todos los nodos n pertenecientes a gráfica G

4: Mientras  $x_{i \max} - x_{i \min} \leq 1\%$  del promedio final

5: % Se realiza una inspección ordenada de los nodos desde el de menor número

6: Para i que va de 1 hasta N

7: Para j que va de i+1 hasta N

8: Si distancia entre  $n_i$  y  $n_j$  permite comunicación (distancia  $\leq R$ )

9:  $x_{i \text{new}} = x_{j \text{new}} = (x_i + x_j)/2$

10: Para todos los nodos n -  $\{n_i, n_j\}$

11:  $x_{k \text{new}} = x_k$

12: Matriz V almacena  $x_{\text{new}}$  para todos los nodos n

13: Verificamos valor máx. y min. en última columna V (los

14: últimos valores actualizados)

15: Obtenemos  $x_{i \max} - x_{i \min}$

16: Incrementa cuenta (número de transmisiones half-duplex)

17: Si  $x_{i \max} - x_{i \min} \leq 1\%$

18: Break (termina algoritmo)

19: Fin

Como se puede observar, la elección aleatoria de un nodo central para una ronda es eliminado y sustituido por un sistema planificado donde se realiza un barrido desde el nodo 1 hasta el nodo N, y aun manteniendo la aleatoriedad en los valores internos de cada nodo, al igual que la transmisión en parejas por cada ronda. Adicionalmente, dado que carece en su mayoría de aspectos aleatorios no se le puede medir su desempeño con los parámetros del resto; a pesar de ello, para efectos de comparación se evalúa los parámetros de time complexity y message complexity en el RGAM. Los resultados obtenidos en las 3 topologías se resumen en una tabla (véase anexo tabla J-4). De los resultados, se puede afirmar que el desempeño de este algoritmo es mucho mejor que el del flooding y el RGA, sin

embargo no podemos afirmar lo mismo para con el DRG. Al analizar con un número constante de nodos ( $N = 40$ ) se logran los siguientes resultados:

TABLA 3-10. Tabla de RGAM en topología aleatoria para 40 nodos. Elaboración propia.

Datos	Topología Geométrica Aleatoria $N = 40$								
	R	0.263	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
Complejidad temporal	4039	2656	1562	2897	4825	3144	10509	13375	15656
Complejidad de mensajes	8078	5312	3124	5794	9650	6288	21018	26750	31312
Complejidad de conexiones	132	160	264	372	471	561	646	704	746

La diferencia del DRG con el RGAM es es notoria en este caso, puesto que en un R cercano al 0.4 el segundo logra su mejor desempeño y a partir de ese punto en adelante el desempeño decrece puesto que se requiere mucho más mensajes transmitidos a fin de completar con la tarea de ponderación distribuida.

### 3.4 Resultados

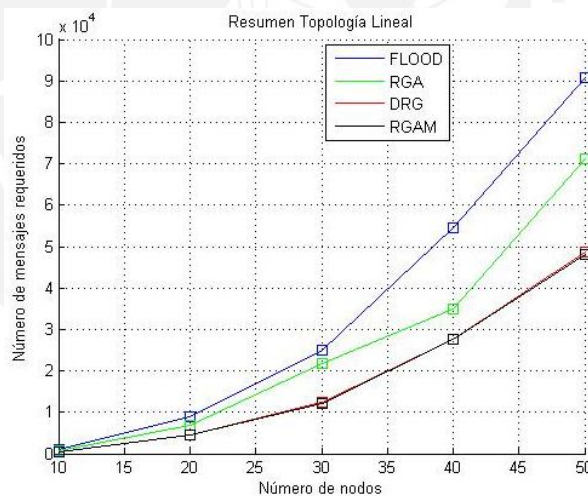


FIGURA 3-4. Desempeño de algoritmos en topología lineal. Elaboración propia.

Para la topología lineal o bus se ve en los resultados de la Figura 3-4 que la técnica de flooding es la más ineficiente; mientras que el RGA nos brinda como mínimo una reducción del 20 % en mensajes requeridos para completar la tarea en redes de más de 30 nodos, lo cual se debe a la existencia de un nodo central por ronda que reduce la posibilidades de repetición de caminos. Por otra parte, el DRG requiere un 32% menos y un 50% menos en promedio de mensajes transmitidos respecto al RGA y al flooding. También, el RGAM y el DRG tienen desempeños parecidos por

lo que no hay un favoritismo de uno al otro como implementación en una red, aunque el DRG es ligeramente superior debido a que lleva a cabo la tarea en menor número de rondas como se observa en las tablas resúmenes.

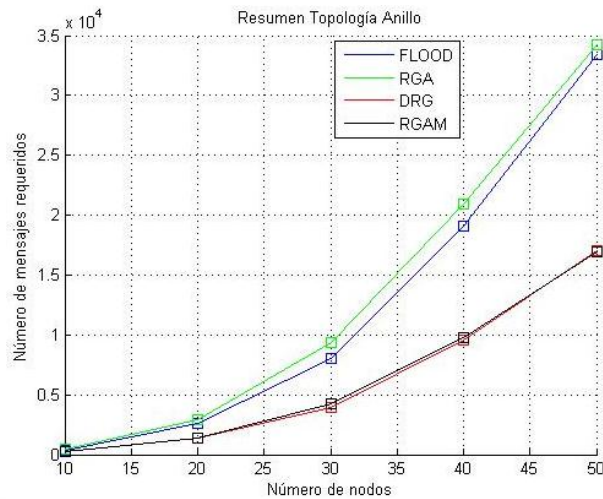


FIGURA 3-5. Desempeño de algoritmos en topología anillo. Elaboración propia.

Para la red tipo anillo el desempeño del flooding o del RGA es indiferente pues nos ofrece los mismos resultados, mientras que una vez más el DRG y el RGAM obtienen resultados similares y superiores a los dos primeros, donde el DRG incrementa su desempeño en 45% y 53% promedio respecto al RGA y al flood. Nuevamente en este tipo de red se le da la razón al DRG por el hecho que concluye con la ponderación en menos rondas que el RGA modificado.

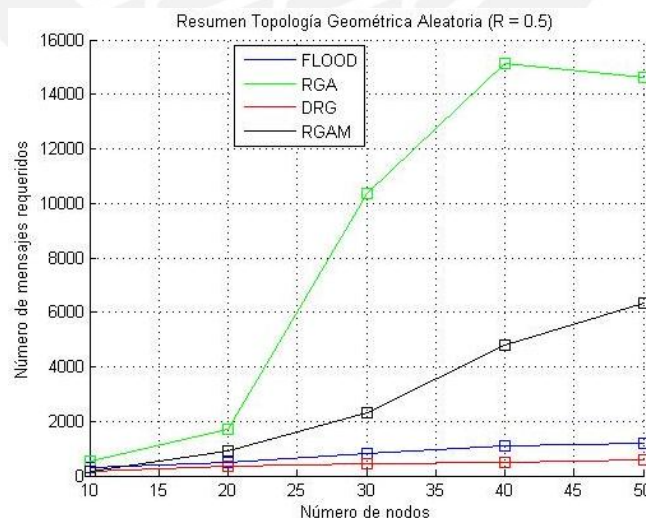


FIGURA 3-6. Desempeño de algoritmos en topología aleatoria. Elaboración propia.

Es en la topología geométrica aleatoria donde las diferencias entre algoritmos se vuelven más notorias: por un lado en el RGA el número de mensajes necesarios

para la tarea se incrementa drásticamente desde un número pequeño de puntos de red hasta cercano a los 40 nodos presentes en el sistema, posterior al cual se llega al máximo nivel de transferencia requerida en el sistema, lo cual explica un pequeño decrecimiento en redes con más miembros. Por otra parte, el RGAM sigue obteniendo resultados positivos respecto a su predecesor y nos muestra un desempeño con mayor linealidad del número de mensajes con el de nodos. Aparte de los mencionados, tanto el DRG como el flooding presentan linealidad entre mensajes y nodos, aunque el primero requiere de un 55 % menos cantidad de estos para cumplir la tarea. Una vez más, el DRG es más eficiente por su corto número de rondas necesarias para obtener el valor promedio.

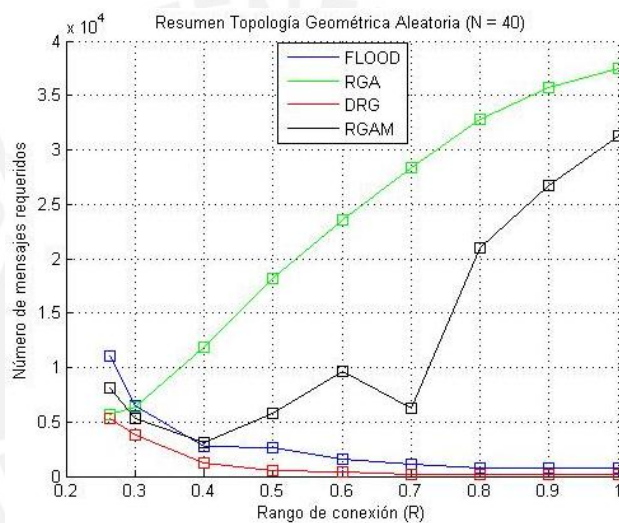


FIGURA 3-7. Algoritmos en topología aleatoria para 40 nodos. Elaboración propia.

Finalmente, el último análisis está relacionado con el desempeño de los algoritmos en redes donde la densidad de conexiones puede variar. De la misma se identifica un incremento constante de cantidad de mensajes necesarios para el RGA y de un caso ideal de número de nodos con mensajes para el RGAM, en el cual para un  $R = 0.4$  aproximadamente se tiene un message complexity ideal para la red. En anexos se agrega ejemplos con otras cantidades de nodos y que también cumplen con resultados cercanos a 0.4. Una vez más el flooding y el DRG son los de mejor desempeño, aunque este último requiere ligeramente menos transmisiones en la red.

## CAPÍTULO 4

### IMPLEMENTACIÓN Y RESULTADOS FINALES

Con los resultados obtenidos en el capítulo anterior acerca de la eficiencia de los algoritmos de cotilleo en determinadas topologías queda por confirmar si los resultados obtenidos de forma preliminar se mantienen en una red de sensores inalámbrica implementada con unos motes de prueba a ser seleccionados.

#### 4.1 Consideraciones iniciales

El estudio de esta tesis se basa en el análisis de algoritmos de difusión de la información por medio de la técnica de gossiping, por lo que se necesita seleccionar motes y transceptores adecuados a las características de estas redes. Las consideraciones principales serían las siguientes para ambos dispositivos:

- a. De bajo consumo de energía y bajo precio.
- b. Tolerante a fallos en transmisiones.
- c. Que permita escalabilidad en la red a ser implementada
- d. Buen desempeño en ambientes indoors y outdoors, para el transceptor.
- e. Que tenga flexibilidad para instalación de hardware adicional (no exista limitaciones), para el mote.

#### 4.2 Tecnologías de comunicación inalámbrica

De un sondeo de radios transceptores para implementar en una red de sensores inalámbrica se obtuvo el siguiente cuadro comparativo:



TABLA 4-1. Cuadro comparativo de transeptores. Elaboración propia.

CARACTERÍSTICAS	UHF (TWS-418 & RWS-418) [24]	Bluetooth 2.0 (MPE-20250231) [25]	Radio Xbee series 2 [26]	Criterios de selección
Costo	S/. 50	S/. 60	S/.80	Variación de precio no significativa.
Disponibilidad	Importación	Mercado Local	Mercado Local	Falta de disponibilidad inmediata.
Velocidad de transmisión máx.	9600 baudios	115200 baudios	115200 baudios	Velocidad de transmisión alta.
Frecuencia de trabajo (Frecuencia de la transmisión)	418 MHz / 433,9 MHz	2.4 GHz	2.4 GHz	Una mayor frecuencia evita cruce con otras señales
Voltaje de alimentación	5 – 12 VDC	5 VDC	3.3 VDC	Todos cumplen el requerimiento.
Corriente salida (nominal y pico)	Nominal: 5 mA Pico: 9 mA	Nominal: 8 mA Pico: 30 mA	Nominal: 40 mA Pico: 50 mA	Corriente de trabajo a bajo nivel.
Alcance de transmisión	20 m	100 m	125 m	Mayor distancia de transmisión permite mayor rango de operación remota.
Escalabilidad	Máximo 2 nodos	Hasta 8 nodos en una red	Hasta 63 nodos para un coordinador	Permite la ampliación de la red para aplicaciones futuras
Documentación disponible	Hoja de datos del fabricante	Hoja de datos del fabricante	Circuitos en internet	Diseños no estandarizados ni garantizados por el fabricante.

Por su escalabilidad para redes grandes de sensores y su rango se decidió utilizar el transeptor Xbee. Para información adicional de este véase anexo K.

### 4.3 Selección del mote

Una vez seleccionadas las radios Xbee como transeptores para el envío de datos es preferible trabajar con módulos con alimentación cercana a 3.3 V, de bajo costo y con documentación suficiente para entender cómo implementar WSN.

TABLA 4-2 Cuadro comparativo de módulos. Elaboración propia.

CARACTERÍSTICA	Seeeduino Stalker v 2.1 [27]	Waspote Libelium v 2.1 [28]	Advantic SYS CM5000 + RF CC2420 [29]	Criterios de selección
Costo (más componentes extras)	\$ 39	\$ 120	\$ 110	Variación de precio favorable del Seeeduino.
Disponibilidad	Importación	Importación	Importación	Falta de disponibilidad inmediata.
Modelo del microcontrolador	ATMEGA 328P	ATMEGA 1281	MSP430F1611	Programables con lenguaje C
Frecuencia de trabajo	8 MHz	8 MHz	8 MHz	Una misma frecuencia de operación
Voltaje de alimentación	3.7 VDC	3.3 – 4.2 VDC	2.1 - 3.6 VDC	Todos cumplen el requerimiento.
Corriente salida (nominal y pico)	Nominal: 3.64 mA Pico: 22.43 mA	Nominal: 62 uA Pico: 9 mA	Nominal: 1.1 uA Pico: 330 uA	Corriente de trabajo a bajo nivel.
Memoria	2 KB (SRAM), 1 KB (EEPROM), 32 KB (FLASH)	8 KB (SRAM), 4 KB (EEPROM), 128 KB (FLASH)	10 KB (SRAM), 48KB + 256 B (FLASH)	Todos poseen cantidades suficientes de SRAM y FLASH
ADC	4 canales (resolución de 10 bits)	7 canales (resolución de 10 bits)	8 canales (resolución de 12 bits)	Cantidad de canales adecuada
Interfaces	I2C, UART, USB	I2C, USB, 2 UARTS	UART, SPI, I2C, USB	Permite interactuar con varias opciones.

Adicionalmente a la información suministrada en la parte superior, el precio del Waspote se dispara por la existencia de sensores integrado en el módulo, mientras que del CM 5000 su precio se debe a la incorporación de su propio chip RF transceptor. Como nuestro objetivo es el análisis de los algoritmos de cotilleo, no vamos a utilizar más de un sensor en el monitoreo de parámetros ambientales. Por todo lo anterior, el Seeeduino Stalker es la mejor opción para la implementación. Para ver más información del módulo véase anexo L.

#### 4.4 Implementación de la red

Con los componentes elegidos se procedió a hacer la solicitud de los componentes; no obstante, debido a que los tiempos de entrega generaban conflicto con el cronograma de trabajo se optó por buscar otras opciones y con el apoyo del Grupo de Telecomunicaciones Rurales (GTR), se coordinó para el préstamo de los mismos. Asimismo, se pidió el préstamo de las radios Xbee series 2 que no eran utilizadas, por lo que no había uniformidad en las radios. En general se consiguió los siguientes componentes:

- 2 Módulos Seeeduino Stalker v 2.1
- 1 Módulo Arduino Diecimila
- 1 Radio Xbee 2mW RPSMA Series 2
- 1 Radio XBee Pro 50mW RPSMA - Series 2
- 1 Radio XBee Pro 50mW Wire Antenna - Series 2
- 1 Radio XBee 2mW Wire Antenna - Series 2 (suministrado por otra persona)
- 3 LM 35 (sensor de temperatura, de propiedad personal)

Las baterías de Ion Litio, los paneles solares, el UartsBee v. 3.1 y los cable conectores están incluidos con cada módulo Seeeduino + Waterproof Solar Kit.

La red implementada se va a realizar con los 3 módulos mencionados, los cuales reciben la información sensada por los LM 35, y de ahí se envía una trama de datos, donde se incluye la temperatura sensada, a través de las radios Xbee hacia la PC, la cual está conectada a una radio Xbee (coordinador) por medio de un Xbee USB adapter (también se puede usar el UartSbee v 3.1). La información recibida es mostrada en el HyperTerminal del X-CTU para observar los paquetes recibidos y su orden según el formato de trama: CABECERA+TEMPERATURA, donde la cabecera es A, B o C dependiendo del nodo (véase esquemático en anexo M)

Aparte del X-CTU, se elaboró un programa en Visual Basic 6 para recibir los datos y mostrarlos en una gráfica que nos permita monitorear la temperatura en tiempo real. Dependiendo de la aplicación que se le dé al software, este puede servir para monitoreo o para procesamiento de los datos recibidos. Esto se explicará más adelante al momento de implementar la red en la topología que se desee. La disposición física de la red es la siguiente:

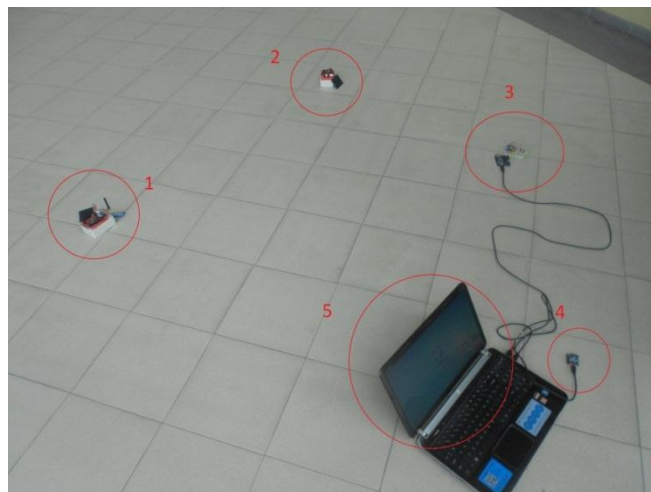


FIGURA 4-1. Disposición física de la red implementada. Elaboración propia.

Donde 1 es el Nodo A, 2 el Nodo B, 3 el Nodo C, 4 es el nodo coordinador y conectado a la PC, la cual es 5 e incluye la aplicación de red que nos permite trabajar el sistema como monitoreo de temperatura (telemetría) o para el chequeo de pérdida de paquetes (comunicación full-duplex).

#### 4.4.1 Pruebas en topología lineal y anillo

Para este caso, los 3 nodos trabajan en modo broadcast, para enviarle a la PC sus datos actuales y a los nodos que les corresponda comunicarle. Para el caso de topología anillo se obtuvo el siguiente gráfico:

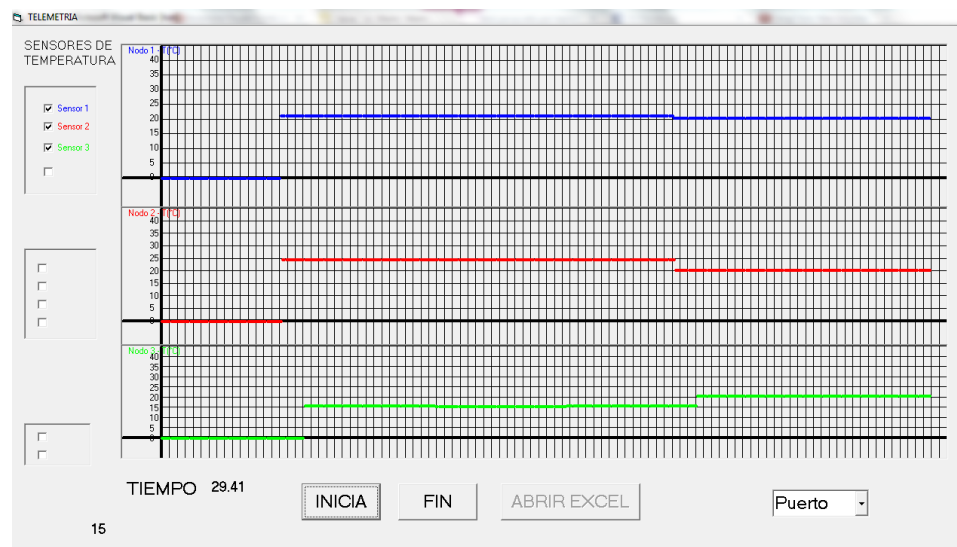


FIGURA 4-2. Resultados de la topología anillo. Elaboración propia.

El DRG empleado en ambas topologías no tendrá efecto considerable, debido a que el número de nodos en la red son solamente 3 (en este caso la PC solo monitorea los cambios que ocurran en la red) y se observa que los 3 ponderan en instantes de tiempo cercanos: los nodos A y B “hablaron” primero y luego el nodo C también se pondera con ellos. Los mismos resultados se logran para el caso de topología lineal por lo que la prueba no brindó resultados concluyentes.

#### 4.4.2 Pruebas en topología aleatoria-árbol

Es en esta topología donde le podemos hacer un uso completo a la aplicación de programa para los sensores de temperatura. Esto es posible debido a que los 3 nodos routers envían su información a la PC (modo unicast), que posee el nodo Xbee coordinador. Para poder estudiar los algoritmos de cotilleo se seleccionó el de mejor desempeño en esta red y se buscó comparar con otro que se pudiera

implementar. Es así que por los resultados del capítulo 3 mostrados en la Figura 3-6, sabemos que el DRG se desempeña con resultados favorables en estas redes. El segundo que tiene un desempeño con resultados semejantes es el RGA modificado, el cual es síncrono y carece de carácter aleatorio, pues las transmisiones tienen un orden.

Para comparar el DRG con el RGAM vamos a tomar medidas de los módulos por un lapso de 100 segundos, en donde cada módulo en promedio envía su información cada 5 segundos para el RGAM (síncrono) y en un lapso de 3.5 a 6.5 segundos para el DRG (asíncrono). Una segunda prueba se realiza para un intervalo de 30 segundos con un muestreo más corto: de 1.5 segundos para el RGAM y de 1 a 2 segundos para el DRG. Los resultados obtenidos son los siguientes:

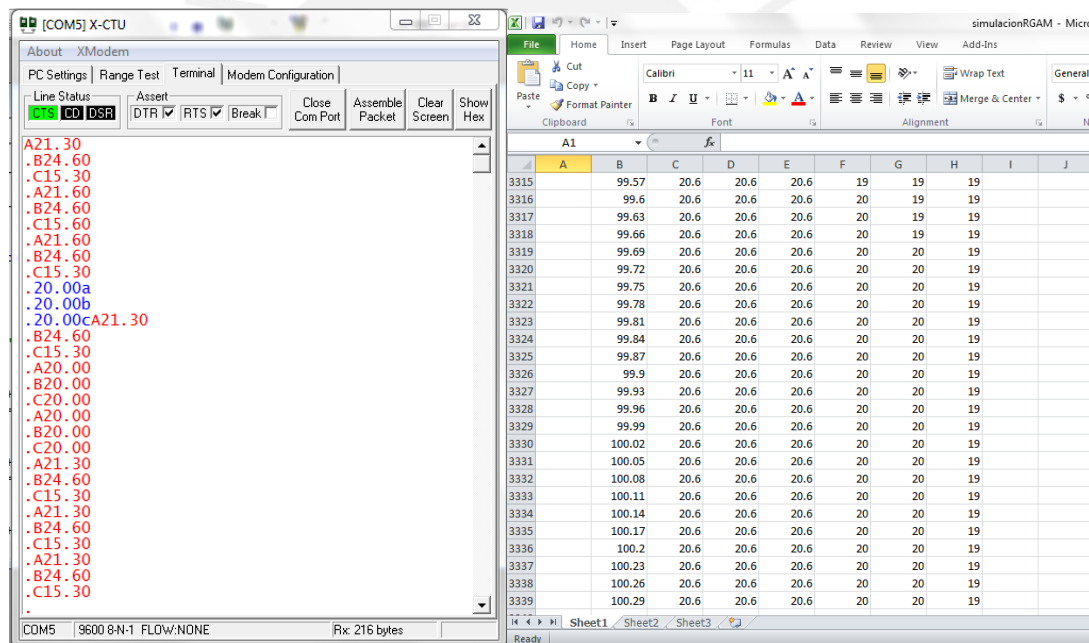


FIGURA 4-3. Resultados del RGAM para una frecuencia de envío de 0.2 Hz.

En esta muestra se observó que no hubo pérdida alguna y en el intervalo de 100 segundos se logró el envío de 59 paquetes en ese lapso. Luego de 5 muestras el promedio de envío total es cercano a 60 paquetes.



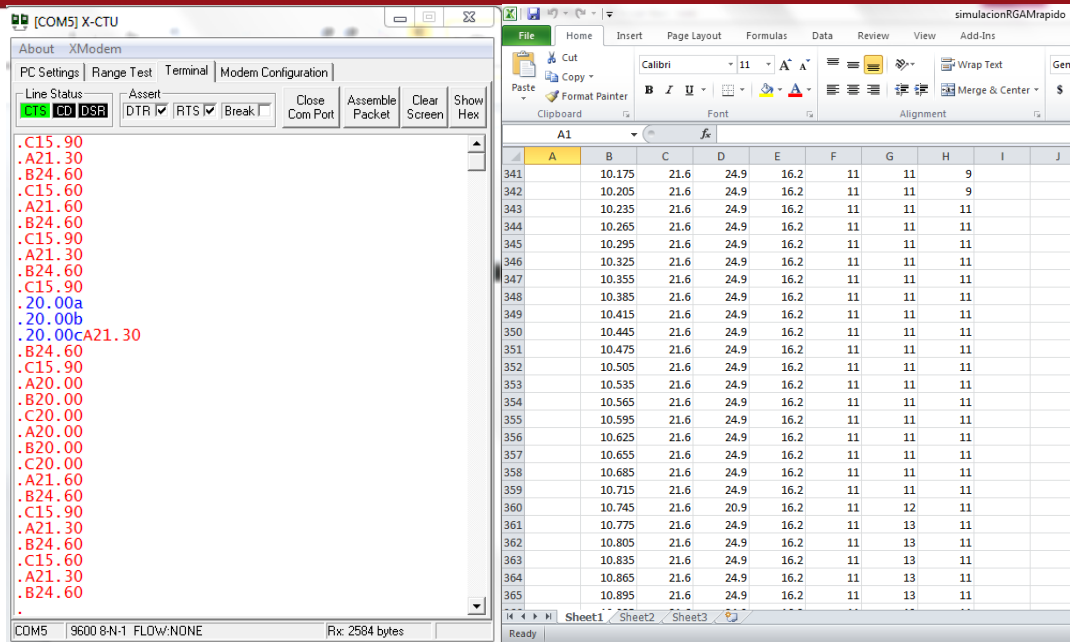


FIGURA 4-4. Resultados del RGAM para una frecuencia de envío de 0.67 Hz.

De la muestra referida en el dibujo anterior con envío de datos y devolución de estos, cada 10 recepciones se obtuvo una pérdida promedio de 32 paquetes de 113 con una eficiencia del 72 % aproximadamente. Después de un conjunto de 5 pruebas o muestra realizadas en promedio se bordea el 70 % de eficiencia.

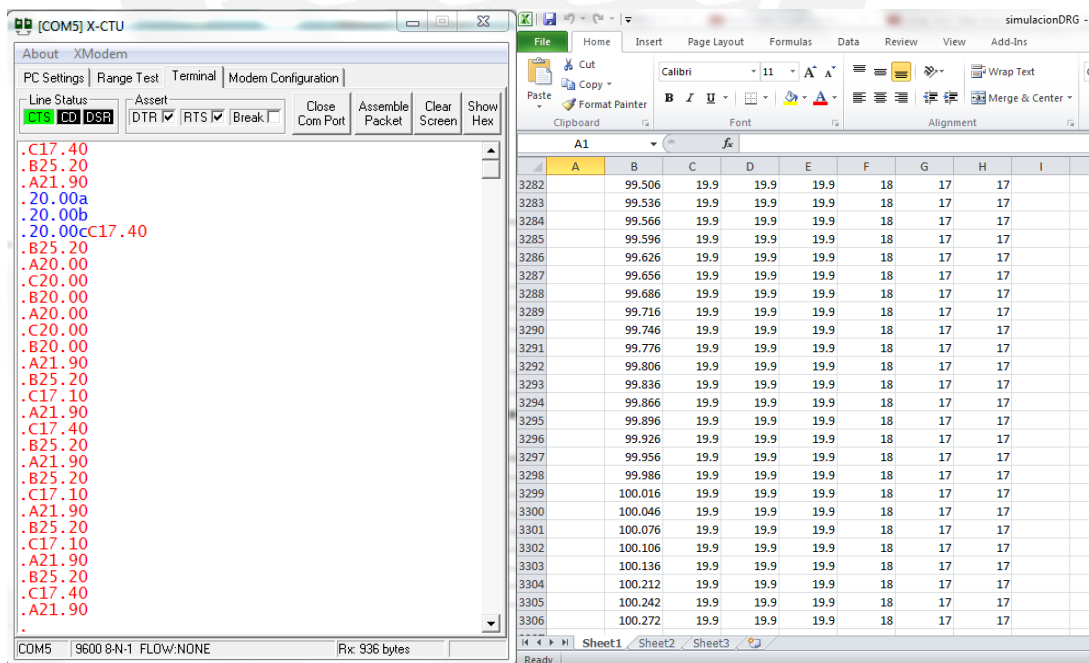


FIGURA 4-5. Resultados del DRG para una frecuencia de envío de 0.2 Hz.

Se observa la ausencia de un orden cronológico en el envío de los datos y el envío de un total de 52 paquetes sin ninguna pérdida. Al término de 5 pruebas el número promedio de muestras era cercano a 55 paquetes en 100 segundos.

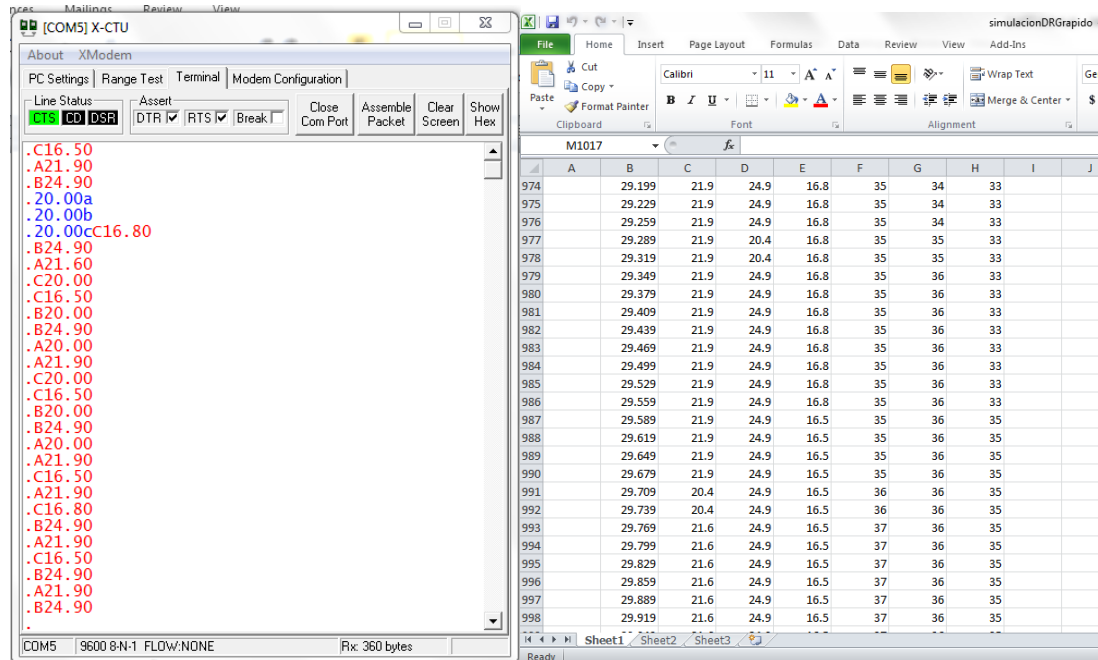


FIGURA 4-6. Resultados del DRG para una frecuencia de envío de 0.67 Hz.

De la figura se observa que los paquetes de datos no siguen un orden fijo (no es síncrono), pues al inicio el orden es CBA y por el final cambia a CBACBAB, lo cual es totalmente diferente a cuando se inició la transmisión. Además del documento en Excel se verificó la pérdida de 10 paquetes respecto a 108 enviados, con una eficiencia de 91%. Al término de un muestreo de 5 pruebas se tiene una eficiencia cercana al 90%.

El procesamiento en los análisis realizados lo realiza el nodo PC a fin de poder ver el cambio de datos en los nodos routers; sin embargo, en el anexo N se ven los resultados para el caso que el procesamiento lo realiza el nodo router sin ningún problema. Ahora bien, en el caso de 5 segundos no se observa la pérdida de paquetes en la red debido al largo muestreo que representa. Lo que sí se puede identificar es el mayor número de paquetes enviados en el caso síncrono sobre el DRG que es asíncrono, lo cual también se puede esperar dado que el delay entre el envío de paquetes cambia de forma aleatoria, y aun así la diferencia de transmisión no es considerable. En el caso 1.5 segundos logramos identificar nuestra premisa inicial de la superioridad del DRG sobre el RGAM, dado que el primero tiene una

perdida aproximada de 10% de los paquetes en muestreo rápido, mientras que el segundo tiene una pérdida mayor y cercana a 1 de cada 4 paquetes.

Finalmente, dado que el número de transmisiones está relacionado directamente con la cantidad de potencia consumida en la aplicación de monitoreo se modifica la trama de datos para que incluya el tiempo de transmisión desde el módulo; además se realizó la medición de consumo de batería de los módulos en modo stand-by (delay en el programa) y cuando transmite la información. La nueva trama sigue el formato: D – CORRIENTECONSUMIDA, donde esta última se logra midiendo los tiempos de envío y de stand-by del módulo como en la figura de la izquierda:

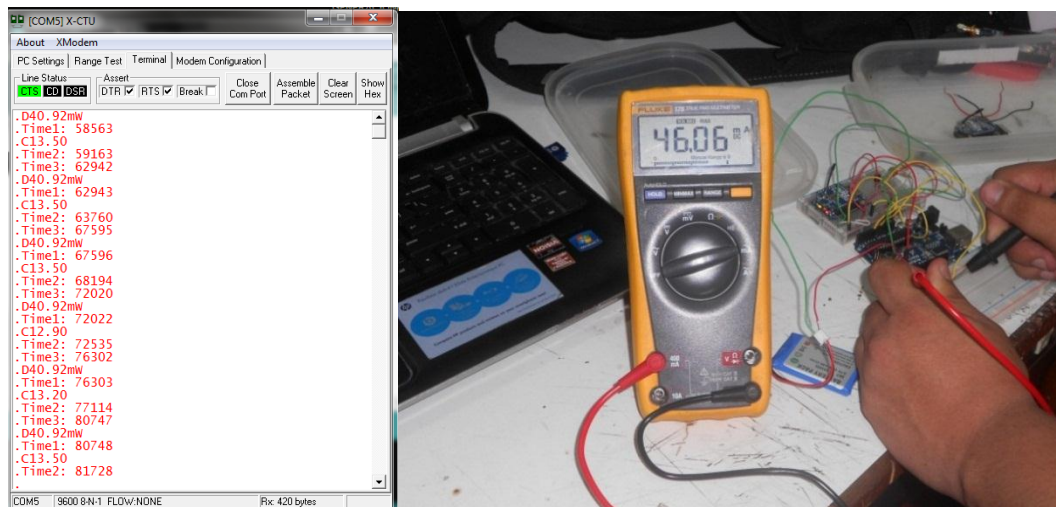


FIGURA 4-7. Envío de potencia consumida (izq.). Medición con multímetro (der.).

Para poder obtener ese dato se tomó los tiempos (time 1, 2 y 3) para identificar los tiempos de envío y de stand-by. Con la proporción hallada se tomó mediciones con multímetro de las corrientes pico (transmite) y de parada (módulo no hace nada), con lo cual para una alimentación de 3.3 V se obtiene la potencia consumida aproximada. Los valores medidos de cada módulo están en el anexo O.

## CONCLUSIONES

En el presente trabajo de tesis, se elaboró satisfactoriamente un grupo de librerías para la simulación de redes de sensores en diversas topologías, a fin de probar cualquier tipo de algoritmo de enrutamiento de datos (no solo de cotilleo) mediante el desarrollo de una tarea de computación distributiva, como lo es la ponderación de valores internos en la red.

Respecto a las simulaciones realizadas podemos decir que, de los 4 algoritmos estudiados el que ha tenido un mejor desempeño en las 3 topologías es el DRG, por lo que afirmamos su superioridad en su aplicación a WSN: 32% y 50% en topología lineal y 45% y 53% promedio en anillo, de mensajes requeridos para cumplir la tarea de ponderación, a comparación al RGA y al flooding, respectivamente. Adicionalmente, su desempeño en una red de topología aleatoria es cercano al 55% en el caso del flooding y va incrementándose considerablemente para el RGAM y RGA, el cual a partir de 40 nodos en la red su desempeño se mantiene constante (véase anexo J). Además, para el análisis de rango de conexión variable en todos los casos el DRG empleó menor número de mensajes transmitidos para cumplir la tarea, debido a su mayor tasa de difusión pues no se limita a un emparejamiento por ronda.

Se verificó la influencia del rango de conexión en las WSN, para lo cual se creó una función especial que asegura el menor número de conexiones necesarias para la conexión de todos los nodos en un área determinada, a fin de cumplir con la tarea de computación designada.

La implementación de una pequeña red de nodos sensores con la inclusión de algoritmos de cotilleo probó las ventajas de trabajar con asincronismo (DRG) sobre una planificación de red definida (RGA) en la tolerancia a pérdidas de mensajes, más no se probaron resultados contundentes para la comparación entre topologías anillo y lineal. Su desarrollo, además, requirió un menor consumo de la energía para cada nodo. En redes que se requiera precisión en corto plazo se obtendrá mejores resultados con el DRG, mientras que en las redes que no requieran un muestreo rápido el RGAM puede enviar una mayor cantidad de información que cualquier algoritmo asíncrono. Además, la red ha quedado para su uso por parte del Grupo de Telecomunicaciones Rurales en las aplicaciones que ellos deseen en el modo de telemetría o monitoreo de ambiente.

## RECOMENDACIONES

En cuanto a la simulación, se sugiere realizar más de 5 muestras por cada caso de algoritmo y número de nodos presentes en la red, a fin de acentuar los resultados obtenidos y presentados en este documento, con lo cual se pueda confirmar las proyecciones iniciales. Además, el desempeño del DRG en redes aleatorias implementadas puede ser limitado debido a la cantidad de procesamiento que requerirá en caso se relacione cada nodo con una gran cantidad del resto, por lo que se sugiere realizar un análisis con limitación de la tasa de difusión.

Por parte de la implementación, el trabajar con radios Xbee series 2 y series 2 PRO causaba un ruido o apantallamiento en la transmisión por lo que no siempre funcionaba. Se recomienda mantener una uniformidad en la compra de componentes, para que efectos inesperados como el comentado no alteren las pruebas. Además, se sugiere el uso de más de 3 nodos en la red, a fin de poder notar con mayor claridad la supremacía de alguna topología o algoritmo por encima del resto. El hecho de trabajar con un número pequeño reduce las probabilidades de error e interferencia por tráfico de datos en la red.

La aplicación de la red implementada como red telemétrica de temperatura presenta limitaciones que pueden ser mejoradas por software. Por otra parte, se recomienda el uso de un circuito de sensado de corriente, de tal forma que la medición sea en tiempo real y no aproximado.



## BIBLIOGRAFÍA

## [1] NUEVAS TECNOLOGÍAS

- 2012 "Redes de sensores". Colombia. (Consulta: 10 de Noviembre del 2012).  
<[http://nuevastechnologias.awardspace.com/redes\\_de\\_sensores.htm](http://nuevastechnologias.awardspace.com/redes_de_sensores.htm)>

## [2] AKYILDIZ y SU

- 2002 "A Survey on Sensor Networks". Georgia Institute of Technology. USA. (Consulta: 10 de Noviembre del 2012).  
<<http://meslab.snu.ac.kr/courses/dip2010f/papers/10-Akyildiz02.pdf>>

## [3] STANKOVIC, John

- 2006 "Wireless Sensor Networks". University of Virginia. USA. (Consulta: 12 de Noviembre del 2012).  
<<https://www.cs.virginia.edu/~stankovic/psfiles/wsn.pdf>>

## [4] BAUTISTA, Eduardo

- 2006 "Simulación de los Algoritmos Dijkstra y Bellman-Ford para ruteo de paquetes en redes de comunicaciones". UDLAP. Mexico. (Consulta: 12 de Noviembre del 2012).  
<[http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lem/bautista\\_h\\_e/capitulo\\_2.html#>](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/bautista_h_e/capitulo_2.html#>)

## [5] LEWIS, F.

- 2004 "Wireless Sensor Networks". University of Texas at Arlington. USA. (Consulta: 12 de Noviembre del 2012).  
<<http://arri.uta.edu/acs/networks/WirelessSensorNetChap04.pdf>>

## [6] IEEE

- 2011 "Project IEEE P1451". (Consulta: 10 de Octubre del 2012).  
<<http://ieee1451.nist.gov/>>

## [7] MORILLO, PEREZ y JORQUERA

- 2006 "Redes inalámbricas de Sensores Inteligentes. Aplicación en la Monitorización de variables fisiológicas". Universidad de Alicante

España. (Consulta: 13 de Noviembre del 2012).  
<<http://www.dtic.ua.es/grupoM/recursos/articulos/JDARE-06-H.pdf>>

[8] IEEE

2011 “IEEE 802.15.4”. (Consulta: 28 de Octubre 2012).  
<<http://standards.ieee.org/about/get/802/802.15.html>>

[9] HE, KRISHNAMURTHY, STANKOVIC et al.

2006 “VigilNet: An Integrated Sensor Network System for Energy-Efficient Surveillance”. University of Virginia. USA. (Consulta: 16 de Noviembre del 2012)  
<<http://www.cs.virginia.edu/wsn/vigilnet/paper/VigilNet-TOSN.pdf>>

[10] WOOD, VIRONE; DOAN et al.

2001 “ALARM-NET: Wireless Sensor Networks for Assisted-Living and Residential Monitoring”. University of Virginia. USA. (Consulta: 16 de Noviembre del 2012). <<http://ursuletz.com/~control/docs/papers/tr06-alarmnet.pdf>>

[11] PISTER, Kris

2007 “SMART DUST”. University of California at Berkeley. USA. (Consulta: 18 de Noviembre del 2012).  
<<http://robotics.eecs.berkeley.edu/~pister/SmartDust/>>

[12] MyriaNed

2012 “MyriaNed Technology Abstract (LAGS)”. (Consulta: 18 de Noviembre del 2012). <<http://wsn.chess.nl/?p=548>>

[13] Wifinotes

2007 “What is wireless networking”. (Consulta: 18 de Noviembre del 2012).  
<<http://www.wifinotes.com/wireless-networks.html>>

[14] TARIQ, Shoaib.

2005 “MAC Algorithms in Wireless Networks: Applications, Issues and Comparisons”. Umea University. Suecia.  
<<http://www8.cs.umu.se/education/examina/Rapporter/ShoaibTariq.pdf>>

- [15] ABRAMSON, Norman.  
1970 "The ALOHA System – Another alternative for computer communications". University of Hawaii. USA.
- [16] BACCELLI, BLASZCZYSZYN y MUHLETHALER.  
2006 "An ALOHA Protocol for Multihop Mobile Wireless Networks". USA.  
(Consulta: 21 de Noviembre del 2012)  
<[http://www.di.ens.fr/~trec/sg/maxtrput\\_itc1.pdf](http://www.di.ens.fr/~trec/sg/maxtrput_itc1.pdf)>
- [17] KUROSE y ROSS.  
2004 "Computer Networking: A Top-Down Approach Featuring the Internet". 3ra Edición.
- [18] CONCEPCIÓN, GOFFARD y GUTIÉRREZ.  
2010 "Algoritmos de Encaminamiento en Gradiente para Redes de sensores". (Consulta: 21 de Noviembre del 2012)  
<<http://eprints.ucm.es/11085/1/proyecto.pdf>>
- [19] SHAH, Devavrat.  
2009 "Gossip Algorithms". MIT. USA. Vol. 3. (Consulta: 27 de Noviembre del 2012).  
<<http://www.mit.edu/~devavrat/GossipBook.pdf>>
- [20] TSITSIKLIS, John.  
1984 "Problems in Decentralized Decision Making and Computation". MIT. USA. (Consulta: 25 de Noviembre del 2012).  
<<http://www.mit.edu/~jnt/Papers/PhD-84-jnt.pdf>>
- [21] JADBABAIE, LIN y MORSE.  
2003 "Coordination of Groups of Mobile Autonomous Agents Using Nearest Neighbor Rules". University of Pennsylvania. USA.  
(Consulta: 30 de Noviembre del 2012).  
<<http://www.seas.upenn.edu/~jadbabai/papers/cdc02-INV2101.pdf>>
- [22] EPHREMIDES y TASSIULAS  
1992 "Stability properties of constrained queueing systems and scheduling policies for maximum throughput in multihop radio networks".

(Consulta: 4 de Diciembre del 2012)  
<<http://www.ece.umd.edu/~leandros/papers/stability-properties.pdf>>

[23] FREDERICK, George.

2008 “Gossip Algorithms”. Florida Institute of Technology. USA.  
(Consulta: 4 de Diciembre del 2012).  
<<http://my.fit.edu/~gfrederi/ComplexNetworks/Gossip%20Algorithms.pdf>>

[24] CIKA

2012 “Datasheet for RWS-418”. (Consulta: 30 de Octubre del 2012).  
<[http://www.cika.com/soporte/Information/RFmodules/Wenshing/RWS-433\\_418-datasheet+pinout.pdf](http://www.cika.com/soporte/Information/RFmodules/Wenshing/RWS-433_418-datasheet+pinout.pdf)>

[25] SURE Electronics

2012 “Bluetooth Module Datasheet” (Consulta: 30 de Octubre del 2012)  
<<http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/123456789/1485/Anexo%204.pdf?sequence=5>>

[26] DIGI

2012 “Xbee Series 2 Datasheet” (Consulta: 30 de Octubre del 2012)  
<[ftp://ftp1.digi.com/support/documentation/90000866\\_A.pdf](ftp://ftp1.digi.com/support/documentation/90000866_A.pdf)>

[27] SEEEDSTUDIO

2012 “Seeeduino Stalker v 2.1”. (Consulta: 30 de Octubre del 2012).  
<[http://www.seeedstudio.com/wiki/Seeeduino\\_Stalker\\_v2.1](http://www.seeedstudio.com/wiki/Seeeduino_Stalker_v2.1)>

[28] LIBELIUM

2012 “Waspmote Hardware” (Consulta: 30 de Octubre del 2012)  
<<http://www.libelium.com/products/waspmote/hardware>>

[29] UC BERKELEY

2012 “CM5000” (Consulta: 30 de Octubre del 2012)  
<<http://www.advanticsys.com/wiki/index.php?title=CM5000>>