



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

**SIMULACIÓN DE UNA RED INALÁMBRICA DE SENSORES EN
INDUSTRIAS DE GAS Y PETRÓLEO**

TESIS DE GRADO

Previo a la obtención del Título de:

MAGISTER EN TELECOMUNICACIONES

Presentada por:

ING. GINO ADRIÁN ALVARADO MEJÍA

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2013

AGRADECIMIENTO

En primer lugar quiero agradecer a Dios por llenar de bendiciones mi vida y estar siempre para darme fuerza, sabiduría e iluminarme la mente. Siendo el primer pilar importante de mi vida.

A mis padres por todo el apoyo que me han brindado a lo largo de mi vida personal y estudiantil por ser el segundo pilar más importante de mi vida.

A mi esposa por ser el tercer pilar importante dentro de mi vida, y siempre estar ahí apoyándome, siendo mi amiga, mi confidente y el amor de mi vida.

A mi Director de Tesis por su ayuda y paciencia en el desarrollo de esta tesis ya que sin su asesoramiento no hubiera sido posible su culminación.

DEDICATORIA

Este gran logro se lo dedico a Dios quien ha sido y es guía de mi vida, a mi padre quien ha sido tutor a lo largo de mi vida y de quien he aprendido a ser un hombre de bien, a mi madre quien siempre estuvo apoyándome, ella ha sido ejemplo a seguir en este largo camino llamado vida, sin ella no hubiera sido posible la realización de tan importante paso. Todos los éxitos de mi vida fueron, son y serán gracias a ellos.

Gracias por creer, apoyar y estar siempre constantes en mi vida.

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

**Dr. Boris Vintimilla
SUB-DECANO FIEC
PRESIDENTE**

**Dr. Stefano Savazzi
DIRECTOR DE TESIS**

**MSc. Patricia Chávez B.
MIEMBRO PRINCIPAL**

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponden exclusivamente: y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de graduación de la ESPOL)

Ing. Gino A. Alvarado Mejía

RESUMEN

La creciente demanda de petróleo y gas con frecuencia requiere el diseño y ejecución de plantas de producción, transformación y transporte de gran tamaño (gasoductos) en lugares remotos con duras condiciones ambientales y retos de logística.

La adopción de cableado para interconectar totalmente máquinas y supervisar/controlar un gran número de procesos se está convirtiendo en una solución no viable. La posibilidad de sustituir el cableado mediante el despliegue de una red de sensores inalámbrico se está convirtiendo en una solución de interés estratégico para la mayor parte del petróleo y los contratistas de gas.

Una ubicación típica de los sensores inalámbricos o dispositivos de monitoreo de procesos que se utilizarán para el control remoto y monitoreo de las plantas de industrias petroquímicas (ej., refinería de petróleo) o tuberías son caracterizados por condiciones severas y con la dispersión de densos objetos metálicos (tubos, estructuras,...). Esto motiva la adopción de estrategias de implementación avanzadas basadas en herramientas 3D de radio de predicción de cobertura en relación con los modelos empíricos.

El presente proyecto establece un diseño de metodologías consistentes para la implementación de una red de sensores inalámbricos la cual será usada para el monitoreo y control remoto de las plantas petroquímicas y las plantas de poder de las industrias de Petróleo y Gas.

El proyecto propuesto consiste en la implementación de una herramienta SW (ej. Usando Matlab o Simulink) para:

- Simulación de una red de sensores inalámbricos y el modelo de la cobertura de radio para las pruebas de conectividad.

- Optimización de despliegue de red en diferentes escenarios.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|------|
| RESUMEN..... | vi |
| ÍNDICE GENERAL..... | viii |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | xi |
| ÍNDICE DE TABLAS..... | xiii |
| INTRODUCCIÓN..... | xiv |
| CAPÍTULO 1..... | 16 |
| MARCO TEÓRICO..... | 16 |
| 1.1 Descripción del problema..... | 16 |
| 1.2 Antecedentes..... | 17 |
| 1.3 Justificación..... | 17 |
| 1.4 Objetivos..... | 18 |
| 1.5 Sugerencia de modelo para la solución de los problemas..... | 19 |
| CAPÍTULO 2..... | 21 |
| REDES SENSORIALES INALÁMBRICAS..... | 21 |
| 2.1 Evolución Histórica..... | 22 |
| 2.2 Tecnología..... | 22 |
| 2.2.1. Normas..... | 23 |
| 2.2.2 Suministro de Energía..... | 24 |
| 2.2.4. Sistemas Operativos..... | 25 |
| 2.3 Interconexión de Redes Sensoriales Inalámbricas..... | 28 |
| 2.3.1 Arquitectura de redes sensoriales inalámbricas..... | 28 |
| 2.3.2 Protocolos utilizados en Redes de Sensores Inalámbricas..... | 29 |
| 2.3.3 Protocolos de enrutamiento multi-hop..... | 36 |
| 2.3.4 Protocolo LEACH..... | 37 |
| 2.3.5 Protocolo PEGASIS..... | 39 |
| 2.3.6 Protocolos de ruteo y propagación en Redes de Sensores Inalámbricas..... | 41 |

| | |
|---|----|
| 2.4 Tecnologías y estándares industriales para Redes Sensoriales | |
| Inalámbricas | 42 |
| 2.4.1 WirelessHART | 43 |
| 2.4.2 ISA100.11a..... | 45 |
| 2.4.3 6LoWPAN | 46 |
| 2.4.4 IEEE 802.15.4..... | 48 |
| 2.4.5 Arquitectura de los protocolos..... | 49 |
| 2.4.6 Modelo de Red..... | 50 |
| 2.4.7 Arquitectura de transporte de datos..... | 51 |
| 2.4.8 Fiabilidad y Seguridad..... | 53 |
| 2.4.9 ZigBee PRO..... | 54 |
| CAPÍTULO 3..... | 57 |
| METODOLOGÍA..... | 57 |
| 3.1 MATLAB para simular redes de sensores inalámbricas..... | 57 |
| 3.1.2 Ventajas y Desventajas de MATLAB para simulaciones..... | 58 |
| 3.1.3 Funcionabilidad..... | 59 |
| 3.1.4 Limitaciones y alternativas..... | 61 |
| 3.2 Definición del ambiente sobre el que se va a simular..... | 62 |
| 3.2.1 Plantas Industriales Petroleras y Gaseoductos..... | 62 |
| 3.2.2 Cambios climáticos y afectaciones típicas en la propagación de las redes sensoriales inalámbricas..... | 62 |
| 3.3 Requerimientos técnicos en las redes sensoriales inalámbricas, para el ambiente seleccionado..... | 63 |
| 3.3.1 Características del hardware para redes sensoriales inalámbricas..... | 66 |
| 3.3.2 Desafíos técnicos y especificaciones del diseño de redes sensoriales inalámbricas..... | 67 |
| 3.3.3 Diseño de las pruebas y descripción de los indicadores para una red Sensorial inalámbrica..... | 68 |
| 3.4 Diseño de la red sensorial inalámbrica..... | 70 |
| CAPÍTULO 4..... | 72 |

| | |
|---|-----|
| MODELO DE LAS REDES SENSORIALES INALÁMBRICAS ENFOCADO EN LA CAPA FÍSICA PARA MEDIR EL COMPORTAMIENTO DE LA RED Y PROPAGACIÓN EN AMBIENTES HOSTILES PROPIOS DE INDUSTRIAS DE PETRÓLEO/GAS..... | 72 |
| 4.1 Descripción del modelo en Matlab de la red sensorial inalámbrica. | 73 |
| 4.2 Modelamiento de propagación por medio de multi-hop | 74 |
| 4.3 Modelamiento del comportamiento de la red y la propagación bajo las condiciones ambientales seleccionadas. | 76 |
| 4.4 Modelamiento de la capa física..... | 82 |
| 4.4.1 Planificación de la red mediante la predicción de conectividad inalámbrica. | 82 |
| CAPÍTULO 5..... | 86 |
| RESULTADOS..... | 86 |
| 5.1 Validación del simulador como apoyo para la planificación de una red sensorial inalámbrica mediante la predicción de conectividad. | 87 |
| 5.2 Pruebas de simulación en escenarios industriales de Gas/Petróleo. | 88 |
| 5.4 Compilación de resultados, demostrando el alcance del simulador. | 98 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 100 |
| Conclusiones..... | 100 |
| Recomendaciones..... | 101 |
| APÉNDICE..... | 103 |
| Código utilizado en MATLAB..... | 103 |
| Base de datos utilizada | 111 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 113 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| FIGURA 2.1 Capacidades de una red de sensores..... | 23 |
| FIGURA 2.2 Arquitectura de un nodo sensor..... | 28 |
| FIGURA 2.3 Topología de red de sensores con evento y recolector..... | 33 |
| FIGURA 2.4 Agregación de datos..... | 34 |
| FIGURA 2.5 Pila de capas de protocolo para RED DE SENSORES..... | 37 |
| FIGURA 2.6 Diagrama de la elección de nodo principal del clúster en el protocolo LEACH..... | 38 |
| FIGURA 2.7 Ejemplos de distribución en una Wireless Sensor Network..... | 43 |
| FIGURA 2.8 Red basada en WirelessHART..... | 44 |
| FIGURA 2.9 Red usando ISA100.11a 46 | 45 |
| FIGURA 2.10 6LoWPAN Layer | 46 |
| FIGURA 2.11 Redes basadas en 6LoWPAN..... | 47 |
| FIGURA 2.12 Distribución de protocolos..... | 49 |
| FIGURA 2.13 Arquitectura Dcentralizada..... | 53 |
| FIGURA 2.14 Arquitectura Distribuida..... | 54 |
| FIGURA 4.1 Estructura de la red de sensores para la industria..... | 73 |
| FIGURA 4.2 Estructura de transmisión de datos..... | 84 |

| | |
|---|----|
| FIGURA 4.3 Distribución de la red con la ruta más corta usando la función grshortpath..... | 81 |
| FIGURA 5.1 Resultados para la validación mediante predicción de conectividad..... | 86 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| TABLA I Tipos de técnicas de tiempo..... | 32 |
| TABLA II Clasificación de los protocolos de ruteo acorde a la estructura de red | 40 |
| TABLA III Protocolos de ruteo y propagación..... | 41 |
| TABLA IV Comparación entre tecnologías..... | 42 |
| TABLA V Matlab y Simulink..... | 63 |
| TABLA VI Factores y Redes..... | 71 |

INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia de la humanidad, es característica del ser humano en tratar de llevar el control de todo y más aun de poder tener el control sobre circunstancias o eventos.

Es por esto que el intelecto ha desarrollado más de una forma de poder medir y predecir factores críticos como temperatura, presión, fuerza, energía y demás fuerzas naturales.

Actualmente no es la excepción y existe la necesidad de poder manejar ciertos factores en diversos ambientes y para diferentes necesidades. Y según datos encontrados el origen del uso de sensores inalámbricos empezó con necesidad de espionaje para el control durante la guerra fría con esta premisa en la actualidad estas necesidades de guerra son puntos claves para varias industrias, ya que con esta necesidad surgen las redes de sensores inalámbricas originales, las cuales son formadas por un sin número de sensores individuales autoalimentados que intercambian información entre sí inalámbricamente, recopilan datos pre configurados y los mismos son almacenados para el respectivo uso.

Hasta entonces no era conocido el alcance total de las redes de sensores inalámbricas, pero la necesidad de competitividad y de control de grandes compañías a través de investigaciones descubrieron un amplio campo de aplicación de las mismas, como por ejemplo en el campo ambiental en el cual los

sensores facilitan el estudio de los procesos fundamentales y el desarrollo del campo estudiado, el campo atmosférico en el que los sensores se encargan de medir parámetros que posteriormente mediante una recopilación muestra patrones y permite predecir o deducir lo estudiado.

En esta tesis, se ha considerado la simulación de una red de sensores inalámbrica en la cual se mostrará la densidad máxima y mínima de propagación y distribución para un ambiente de Petrolero ya que es uno de los ambientes más duros. La simulación se realizará mediante un software llamado MATLAB.

Para el diseño se ha tomado en consideración los ambientes críticos y difíciles condiciones que se encuentra en estas industrias. Este estudio tiene como propósito tratar de mostrar una idea de que parámetros considerar fuera del ambiente para una interconexión completa y eficaz entre sensores para evitar perder datos y tener el mayor control posible en el campo de la industria petrolera y gas. Adicionalmente puede servir como base para futuros estudios o para la implementación de esta red.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO

1.1 Descripción del problema

En la actualidad la creciente demanda del siempre consumo del petróleo así como de gas con frecuencia requiere del continuo mejoramiento de procesos para cubrir la demanda por parte de las industrias lo cual lleva a diseñar, innovar y desarrollar nuevas plantas de producción, transformación, además

de gasoductos en lugares remotos con duras condiciones ambientales. La adopción de cableado para interconectar totalmente máquinas y supervisar/controlar un gran número de procesos se está convirtiendo en una solución no viable, por costos y baja vida útil.

Sin embargo la posibilidad de sustituirlo mediante el despliegue de una red de sensores inalámbrico, se está convirtiendo en una solución de interés para industrias petroleras así como contratistas de gas. Además, la cobertura total con Wi-Fi abre la puerta a muchas nuevas aplicaciones que van a ser solicitadas por los usuarios finales en un futuro.

1.2 Antecedentes

Las redes inalámbricas de sensores están siendo consideradas hoy en día en las diversas industrias para tener un ambiente de control de procesos industriales en diferentes escenarios. Debido al estrés del entorno industrial, el cual abarca la seguridad de los trabajadores hasta la producción ininterrumpida.

Para cumplir con estos requisitos las redes de sensores deben ser capaces de proporcionar un rendimiento, garantías para una comunicación por radio. En este proyecto se va a estudiar el despliegue de una red de sensores en una refinería de petróleo o gas mediante una simulación.

1.3 Justificación

Una ubicación típica de los sensores inalámbricos o dispositivos de monitoreo de procesos es que se utilicen para el control remoto y monitoreo de las plantas de industrias petroquímicas (ej., refinería de petróleo).

El ambiente cotidiano de este tipo de industrias se caracteriza por tener condiciones laborales severas, donde existen agravantes como la dispersión de densos objetos metálicos (tubos, estructuras,...); esto motiva la adopción de estrategias de implementación avanzadas basadas en herramientas 3D de radio con predicción de cobertura en relación con los modelos empíricos para el monitoreo y control remoto de dichas plantas con la capacidad de soportar el ambiente y las condiciones.

Tomando en cuenta las exigencias de condiciones y ambiente, las variaciones altas de temperaturas influyen en el rendimiento de entrega y calidad del enlace de radio en baja potencia; además que a altas temperaturas se necesita mayor energía pero; a bajas temperaturas y en las noches es posible ahorrar hasta un 16% de energía en dichas condiciones.

1.4 Objetivos

La meta del proyecto es proponer un diseño de metodologías consistentes mediante una simulación para la implementación de una red de sensores inalámbricos, la cual será usada para el monitoreo y control remoto de las plantas petroquímicas y las plantas de poder de las industrias de Petróleo y Gas. El proyecto propuesto consiste en la implementación de una herramienta SW (ej. Usando Matlab o Simulink) para la simulación de una red de sensores inalámbricos y el modelo de la cobertura de radio para las pruebas

de conectividad; y la optimización de despliegue de red en diferentes escenarios y para varias topologías de red

1.5 Sugerencia de modelo para la solución de los problemas

Con los antecedentes y necesidades se sugiere un modelo de malla basada en una plataforma de red de sensores capaz de realizar tareas de detección, recolección y transmisión de los datos capturados para su gestión y monitoreo.

Estos sensores denominados nodos, detectan los cambios de temperatura, presión, profundidad, y demás parámetros necesarios o demandados por la industria. Los cuales deben poder transmitir esta información a una central la cual actuará de cara a internet y que a su vez procesa los datos y los guarda en un servidor local central que envía estos datos, los reprocessa y los reenvía a los paneles indicativos situados en las máquinas de los operadores y monitoreo para informar el estado actual de la zona en cuestión.

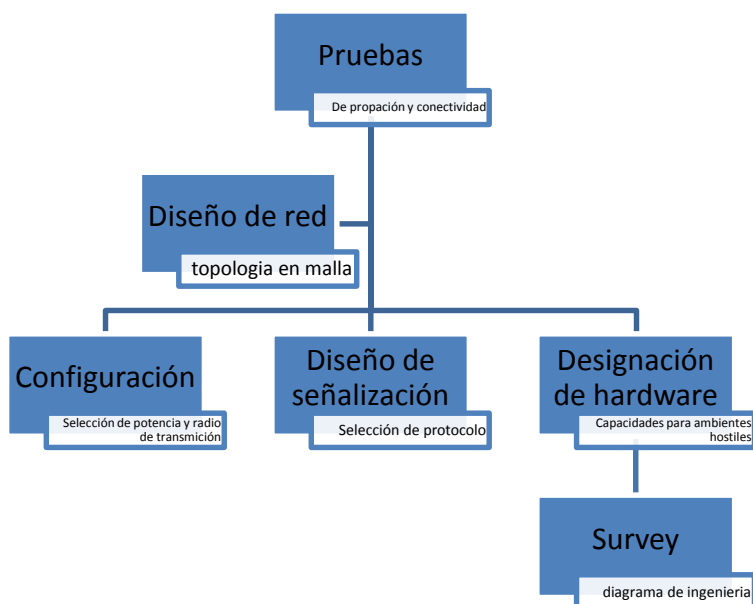
La comunicación entre nodos debería utilizar un protocolo propietario y técnicas de comunicación avanzadas para realizar la transmisión de manera energéticamente eficiente y con una propagación multi-hop garantizando la recepción de los datos.

Por lo tanto el proceso sugerido se basaría en la realización de un Survey (diagrama de ingeniería), diseño de red en el área, designar el hardware adecuado, para soportar las condiciones duras de trabajo. De acuerdo al estudio de red, colocar los sensores en los lugares críticos o a monitorear/manejar, se debe designar el protocolo de comunicación a utilizar,

realizar pruebas de conectividad y configurar el nivel de potencia de transmisión en máximas temperaturas y autorregulación a bajas temperaturas. Por último realizar pruebas de propagación en ambas condiciones y revisar los datos entregados por la red de sensores

- a) Revisión en los paneles de control en tiempo real de los datos entregados.
- b) Entrega de resultados.

Esta estructura sugiere el estudio previo al montaje de una red de sensores en una industria petrolera o de gas.



CAPÍTULO 2

REDES SENSORIALES INALÁMBRICAS

El progreso periódico de la tecnología a lo largo del tiempo es algo fantástico, y ésta evolución va orientada a hacer más comprensible y fácil las necesidades de la sociedad, en el afán de controlar la información y diferentes datos nació el concepto de redes inalámbricas, las cuales tienen un uso importante hoy en día.

2.1 Evolución Histórica

Con el inicio de la guerra fría, los diferentes departamentos de defensa de países como Estados Unidos y Rusia se centraron en el desarrollo de nuevas tecnologías y tácticas de guerras cada vez más efectivas y de alta tecnología, con lo cual cerca de 1980 un proyecto con fines militares por parte del departamento de estado de los estados unidos empezó la investigación de un proyecto llamado DSN el cual consistía en el despliegue de sensores autónomos.

“Durante la Guerra Fría, redes de radares de aérea fueron desarrollados y desplegados para defender a Estados Unidos y Canadá”. [21] Así como una red de boyas fue desplegada en el mar por los soviéticos para así poder detectar submarinos enemigos.

Con estos antecedentes se puede decir que, el origen de las redes de sensores inalámbricas se dio con el inicio de la guerra fría. Por lo que gracias a la carrera armamentista de la época, hoy en día las redes de sensores inalámbricas tienen un amplio campo de utilidad.

2.2 Tecnología

Una red de sensores inalámbricos es una conglomeración autónoma de varios nodos sensores independientes interconectados entre sí que tienen una tarea de recolección en común.

Con el avance diario de la tecnología y la continua investigación, en la actualidad las redes de sensores son capaces de formar redes ad hoc sin infraestructura física preestablecida.

Además estas redes son ampliamente configurables y tienen cada día una mejor y más fácil capacidad de despliegue.

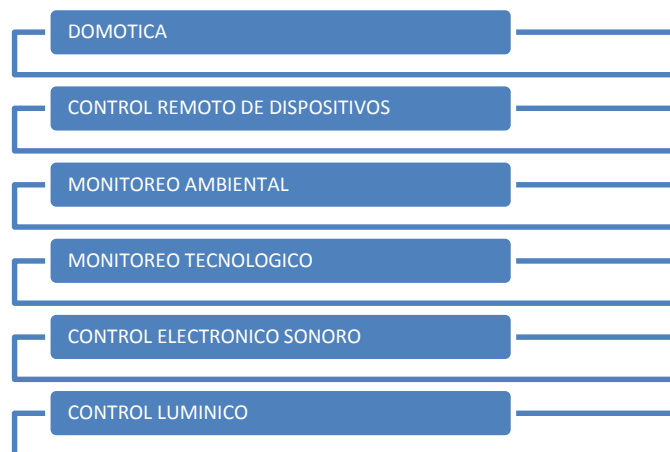


Figura. 2.1. Capacidades de una red de sensores

2.2.1. Normas

Las normas estándares más comúnmente utilizadas en las comunicaciones de Sensores inalámbricos son:

- ✓ WirelessHART
- ✓ IEEE 1451

✓ ZigBee / 802.15.4

2.2.2 Suministro de Energía

A lo largo de la evolución tecnológica el principal interés de los inventores y científicos, ha sido que sus creaciones o avances sean autónomos e independientes.

La alimentación energética es sin duda uno de los problemas más comunes en el entorno tecnológico en general y uno de los de principal interés en los nodos de RED DE SENSORES, ya que determina la vida útil de las redes inalámbricas de sensores.

Debido a que este tipo de redes se trata de utilizar en regiones remotas y hostiles, donde la medición de factores es crucial para los intereses de grandes empresas se busca siempre que la vida útil de los dispositivos debe ser lo más prolongada posible para poder tener un mejor control.

Por lo que con varios estudios se logró integrar baterías a los dispositivos y se pudo configurar los nodos para poder conservar la energía en el nodo cuando no esté en uso. Y así poder salvaguardar la alimentación y duración tanto de la batería como del nodo.

2.2.3. Áreas de aplicación

Existen varias y amplias áreas de aplicación, sin embargo mencionaré un listado de las más comunes:

- ✓ Control de electricidad
- ✓ Centrales nucleares
- ✓ Domótica
- ✓ Naturaleza
- ✓ industrias
- ✓ Medición de procesos
- ✓ Medicina
- ✓ Plantas Nucleares
- ✓ Presas

2.2.4. Sistemas Operativos

Los sistemas operativos para nodos de redes de sensores suelen ser menos complejos que los sistemas operativos de propósito general ya que como se mencionó en el punto 2.2.2 es prioridad de este tipo de redes la sobrevivencia de los nodos y con un sistema sencillo no se necesita mucha energía ni mucho procesamiento.

Los sistemas operativos más usados en estas prácticas según [12] y [13] son:

- ecos
- uC/OS
- TinyOS
- LiteOS
- Contiki

- Protothreads.
- Bertha (pushpin computing platform)
- Nut/OS
- Contiki
- CORMOS
- eCos
- EYESOS
- Magnetos
- MANTIS (Multimodal Networks Insitu Sensors)
- TKernel
- LiteOS
- FreeRTOS

2.2.5 Características

Existen varias ventajas y características del uso de las redes de sensores, por lo que mencionaré las principales y más destacadas como la Topología Dinámica la cual permite flexibilidad de implementación, una de las características primordiales de una red de sensores es que no se utiliza infraestructura de red, adicionalmente utiliza comunicaciones multisalto o broadcast. Una de las principales y más importante característica que debe tener es un consumo energético bajo, lo que va con una serie de hardware sencillos más costes de producción bajos.

2.2.6 Hardware, software y topologías.

El software que se utiliza como se mencionó en el punto 2.2.4 es sencillo de poco procesamiento y utiliza circuitos digitales siempre que es posible además de que tiene la inteligencia artificial necesaria para dejar de usar los circuitos cuando no esté en proceso de recopilación el nodo y así ahorrar energía.

El hardware es sencillo también, y el estándar que se usa más comúnmente es ZigBee que corresponde a la norma 802.15.4 de la IEEE el cual es de bajo costo y sirve para básicamente para monitorización y control.

Las topologías utilizadas en las redes de sensores inalámbricas varían según el fin. Sin embargo existen tres tipos principales de distribución:

- Topología en estrella
- Topología en árbol
- Topología de malla

La topología más utilizada (debido al uso de ZigBee) es la topología de malla. Ésta permite tener redundancia masiva debido a que están interconectados todos los nodos, con lo que si en un momento dado, un nodo del camino falla y se cae, se conmuta inmediatamente la información por otro camino y así no se pierde la información recaudada.

2.3 Interconexión de Redes Sensoriales Inalámbricas.

Como todos sabemos es vital en cualquier tipo de red, la interconexión. Y la red de sensores no es la excepción por lo que veremos una breve reseña de lo que una red de sensores inalámbrica necesita para un despliegue de interconexión.

2.3.1 Arquitectura de redes sensoriales inalámbricas.

Las redes de sensores inalámbricos usan varios caminos para enviar los datos a través de la red. Este es uno de los principios esenciales de las redes de sensores, pues así es más precisa la recopilación y recolección de datos en tiempo real.

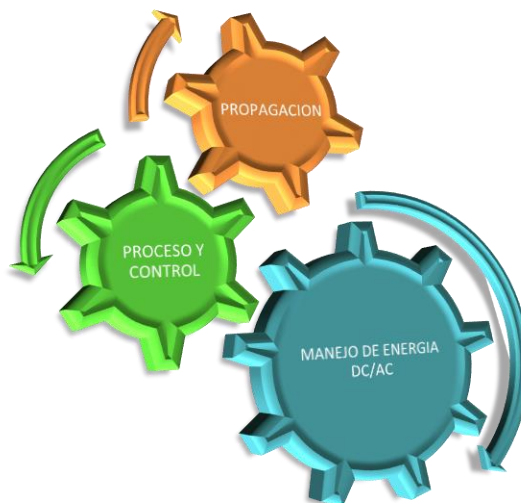


Figura 2.2 Arquitectura de un nodo sensor

Existen dos tipos de redes desplegables las cuales son:

- Redes homogéneas.
- Redes heterogéneas.

Las redes homogéneas son de fácil despliegue y las heterogéneas son de despliegue más complejo; sin embargo, éstas últimas son más versátiles y funcionales.

Entendido las posibles redes que se pueden utilizar, se menciona adicionalmente las formas en las cuales estas redes pueden presentarse o montarse en:

- ✓ Single-Hop (directamente conectado), donde todos los nodos de la red se conectan directamente con el centro de procesamiento central.
- ✓ Flat ad hoc, donde algunos nodos de la red implementan funciones de Routing e interconexión, permitiendo que el resto de nodos de la red envíen la información a través de ellos.
- ✓ Multihop, los sensores forman clústeres y en cada uno de estos se selecciona un nodo central al cual envían la información el resto de nodos pertenecientes al clúster. Este tipo de arquitectura es jerárquica.

2.3.2 Protocolos utilizados en Redes de Sensores Inalámbricas.

Debido a utilidad y la demanda se ha buscado desarrollar a nivel tanto de hardware como software nuevas formas para cubrir las exigencias de las industrias.

2.3.2.1 Protocolos para Capa de Aplicación

Existen tres protocolos aplicativos más usados:

- ✓ Las redes de sensores Protocolo de Administración del sensor (SMP), este protocolo hace que el hardware y software de los estratos inferiores sean transparentes para las aplicaciones de manejo de las redes de los sensores.
- ✓ Protocolo de asignación de tareas y de aviso de datos (TADAP), aplicado para la diseminación de intereses. Los usuarios envían su interés a un nodo sensor, un subconjunto o a la red entera donde los datos están disponibles para los usuarios.
- ✓ Protocolo de búsqueda de sensores y diseminación de datos (SQDDP), provee a las aplicaciones de usuario interfaces para búsqueda de diversos datos al mismo tiempo. Estas generalmente no son expedidas a nodos particulares; sino es basado en atributos o en posiciones. A pesar de la existencia de protocolos para esta capa, los protocolos permanecen mayormente inexplorados.

2.3.2.2 Protocolo de Localización

Para que un nodo pueda transmitir lo requerido necesita entre otras cosas saber su localización contra otros nodos, de manera que un nodo puede detectar y rastrear la posición del nodo vecino usando una técnica colaboradora de estimación.

Bajo este preámbulo un protocolo de localización debe constar con:

- ✓ Robustez para las fallas del nodo
- ✓ Menos sensible para medir ruido
- ✓ Bajo en errores de estimación de ubicación
- ✓ Flexible en cualquier terreno.

Para aumentar la exactitud de la estimación de la posición, todos los nodos a lo largo del camino deben aumentar el número de pruebas para el filtrado de la partícula y la potencia de transmisión por un breve lapso de tiempo.

2.3.2.3 Protocolo de sincronización de tiempo.

Los nodos sensores deben mantener un tiempo de sincronización con cierta tolerancia a lo largo del tiempo de vida de la red para un correcto envío de datos con pocas pérdidas por transmisión.

Para la transmisión multi-hop de distancias cortas, el tiempo de procesamiento de datos y la variación en el tiempo de procesamiento de los mismos, puede contribuir a la mayoría de fluctuaciones entre tiempo y diferencias de retrasos de ruta.

La diferencia de tiempo entre dos nodos sensores es significativa a lo largo del tiempo.

Los factores más comunes que influyen en la sincronización de tiempo y son:

- ✓ Temperatura.
- ✓ Fase de ruido.
- ✓ Ruido de frecuencia.
- ✓ Retraso asimétrico.
- ✓ Fallos en el sistema de reloj.

Tabla I Tipos de Técnica de tiempo

| TIPO | Descripción |
|--|---|
| (1) Retransmisión en servidores de tiempos fijos para sincronizar la red | Los nodos son sincronizados con servidores de tiempo fijos que están realmente disponibles. Estos servidores deben ser robustos y altamente precisos. |
| (2) Traspasan el tiempo a través de la red | El tiempo es traspasado salto a salto desde la fuente al recolector. En esencia es un servicio de traspaso de tiempo. |
| (3) Se auto-organizan para sincronizar la red | El protocolo no depende de servidores de tiempo especializados. Automáticamente organiza y determina los modos maestros como servidores de tiempo temporales. |

2.3.2.4 Protocolos para capa de Transporte

También de gran importancia se considera la capa de transporte, ya que los objetivos de esta capa son:

- Unir las capas de aplicación y de red por medio de la multiplexación y demultiplexación.
- Proveer servicio de entrega de datos entre la fuente y el recolector.
- Regular la cantidad de tráfico inyectando a la red vía mecanismos de control de flujo y congestión.

Bajo estas premisas, se implica una comunicación fidedigna de las características del evento, por lo que se usa el transporte desde el evento medido al sensor que capta la información.

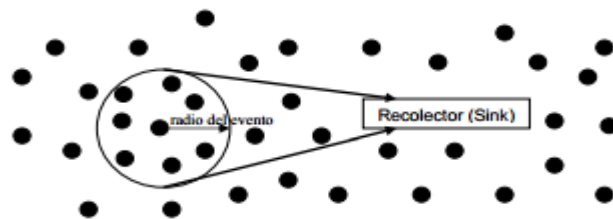


Figura 2.3 Topología de red de sensores con evento y recolector [11]

El protocolo de transporte se basa en la confiabilidad y provee información fidedigna. Y al ser una parte importante la capa de transporte el intelecto humano desarrolló la tecnología

ESRT la cual es una nueva solución de transporte desarrollada para lograr la recopilación confiable de eventos a medir en las redes de sensores con un gasto mínimo de energía.

2.3.2.5 Protocolos para la capa de Red

En la capa de red se utiliza la agregación de datos, Como se muestra en figura 2.4, el sensor busca la red de sensores para observar la condición y recopilar la información que se necesita. La red de sensores es usada para recopilar la información que se necesita de acuerdo a los parámetros que se pongan. Los datos vienen de nodos sensores múltiples o nodos esclavos los cuales son encargados de la recopilación de datos y son agregados como si fuera el mismo atributo del fenómeno cuando alcanzan el mismo nodo de ruta en el camino de vuelta al recolector.

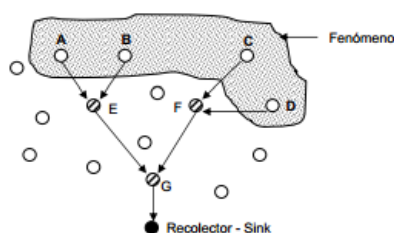


Figura 2.4. Agregación de datos [11]

La agregación de datos puede ser percibida como fusión de datos.

2.3.2.6 Protocolos para la capa de enlace de datos

En rasgos generales, la capa de enlace de datos en telecomunicaciones como concepto general, es primordialmente responsable de la multiplexación, acceso al medio, control de errores y asegura conexiones punto a punto y punto-multipunto confiables en una red.

Con estos antecedentes los protocolos de capa de enlace de datos en una red de sensores multi-hop son los MAC (media Access control).

Los protocolos MAC buscan:

- (1) Establecer enlaces de comunicación para crear una infraestructura básica de red necesaria para la comunicación inalámbrica multi-hop
- (2) Regular el acceso a los medios de comunicación compartidos los cuales son por TDMA, TDMA/FDMA y CSMA.

Otra función sumamente importante de la capa de enlace de datos es el control de errores de los datos transmitidos.

En general, los mecanismos de control de errores en las redes de comunicación pueden ser clasificados en dos

categorías principales: corrección de errores en envío (FEC) y solicitud repetitiva automática (ARQ).

2.3.3 Protocolos de enrutamiento multi-hop

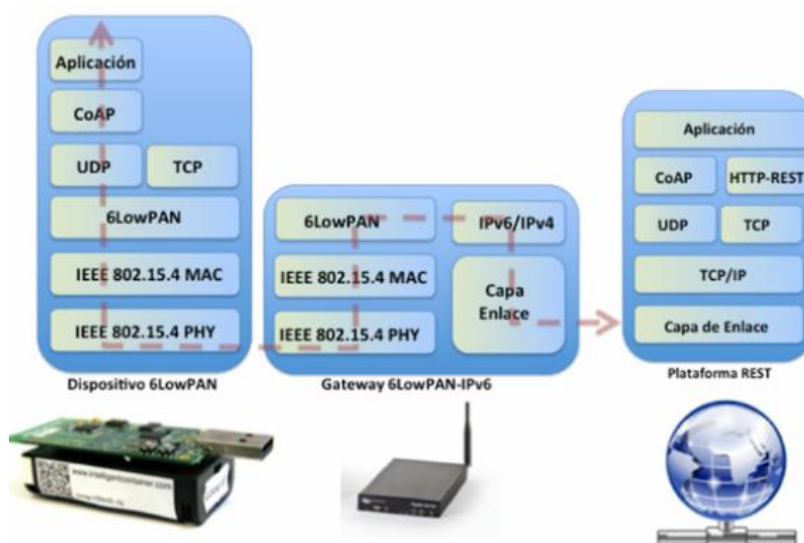
Una de las principales metas de diseño para las red de sensores como se mencionó con anterioridad es prolongar el tiempo de vida de la red y prevenir la degradación en la conectividad.

Por lo que los protocolos de enrutamiento tienen como característica extraer, o agregar datos en “caliente” sin perder transmisión ni ocasionar jitter en la red y deben ser capaces de realizar esto en cualquier campo y en cualquier hardware en nuestro caso del sensor con el mínimo de recursos y procesos para poder garantizar una prolongada vida de la red.

Existen diversos protocolos de enrutamiento entre los principales están:

1. Direccionalidad Multi Métricas (DMM), explota el conocimiento de la ubicación de la estación destino en su proceso de búsqueda de ruta.
2. Direccionalidad x-permisos, Multi Métricas (Dx-MM) es una versión más “permisiva” del algoritmo D-MM al considerar la direccionalidad en el proceso de búsqueda de ruta entre los nodos fuente y destino.

- Direccionalidad – Multi Métricas (hrD-MM) ha sido diseñada para buscar un compromiso entre el rendimiento del algoritmo MM y la eficiencia de DMM. En este contexto, el algoritmo hrD-MM realiza su primera búsqueda utilizando el algoritmo D-MM, y si no es capaz de crear la ruta, los sucesivos intentos búsqueda de ruta son realizados con el algoritmo MM para maximizar las probabilidades de creación de ruta.



Fuente: blogthinkbig.com

Figura 2.5 Pila de capas de protocolos para una red de sensores

2.3.4 Protocolo LEACH

Según lo leído en [23] se puede decir que LEACH es un protocolo basado en clúster que incluye formación distribuida del clúster, haciendo una breve explicación se puede decir que el protocolo usa una coordinación que permite escalabilidad para redes dinámicas ya

que este protocolo incorpora en la capa 3 un mecanismo de reducción de envío de información lo que permite enviar solamente los datos requeridos y nada más.

Los inventores del LEACH hicieron uso del MAC TDMA/CDMA para reducir las colisiones entre los clúster y dentro de los mismos. Debido a que la recolección de la información es centralizada y se hace periódicamente, este protocolo es el más apropiado cuando se necesita hacer un monitoreo constante por medio de la red de sensores.

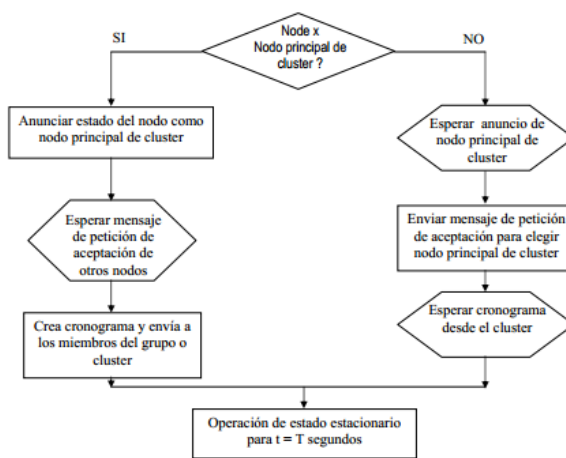


Figura 2.6 Diagrama de la elección de nodo principal del clúster en el protocolo LEACH. [12]

El funcionamiento de LEACH se divide en dos fases:

1. Fase de configuración
2. Fase de estado estacionario

En la fase de configuración los clúster se organizan y definen nodos esclavos y el maestro. Y en la fase de estado estacionario se transfieren todos los datos recolectados a la estación base.

Los autores del LEACH, basados en su modelo de simulación, determinan que solo el 5% de los nodos necesitaban actuar como nodos principales de clúster.

2.3.5 Protocolo PEGASIS

Tomando como referencia [23] Podemos decir que este protocolo es un protocolo que nace con orígenes del LEACH y se convierte en una versión mejorada del LEACH ya que no utiliza clústeres sino tan solo usa un nodo en serie para transmitir a la estación base. La base de este protocolo es la comunicación a corta distancia, esto significa que cada nodo se comunica solamente con su vecino más cercano y así sucesivamente, con este proceso se puede alargar el tiempo de vida de la red.

Bajo esta premisa, cuando termina el ciclo de comunicación de todos los nodos con la estación base, un nuevo ciclo empezará y así sucesivamente. Este mecanismo reduce la energía necesaria en cada ciclo para transmitir los datos recolectados enfocándose también en el ahorro de energía ya que como base esencial la energía es distribuida uniformemente hacia todos los nodos.

Al igual que LEACH el PEGASIS tiene dos objetivos principales:

- (1) Incrementar el tiempo de vida de cada nodo usando técnicas de apoyo para así incrementar el tiempo de vida de la red.
- (2) Permitir coordinación local solamente entre los nodos que se encuentran cerca unos de otros para que sea reducido el ancho de banda consumido en la comunicación.

Como método de reconocimiento y localización del nodo aledaño más cercano, cada nodo usa una intensidad de señal para medir la distancia de todos los nodos vecinos y luego ajusta la intensidad para que solamente un nodo pueda ser escuchado.

Una de las características del PEGASIS es que asume que cada nodo sensor puede comunicarse con la estación base directamente. Otra característica es que el PEGASIS puede incrementar el tiempo de vida de la red al doble del tiempo que tiene bajo el protocolo LEACH. Sin embargo, una desventaja del PEGASIS es que usa suposiciones que pueden no ser siempre realistas.

Tabla II Clasificación de los protocolos de ruteo acorde a la estructura de red.

| Protocolos Planos | Protocolos Jerárquicos | Protocolos Adaptivos | Protocolos basados en localización |
|-------------------------------------|-------------------------------|----------------------|------------------------------------|
| SAR | LEACH | SPIN | GAF |
| Difusión Directa | PEGASIS | | GEAR |
| Rumor | TEEN y APTEEN | | MFR |
| MCFA | MECN y SMECN | | DIR |
| Ruteo basado en gradiente | SOP | | GEDIR |
| CADR | Sensor Aggregates Routing | | GOAFR |
| COUGAR | Cluster de tamaño fijo | | SPAN |
| ACQUIRE | Arquitectura de malla virtual | | |
| Ruteo de uso eficiente de energía | HPAR | | |
| Protocolo de ruteo con random walks | TTDD | | |

2.3.6 Protocolos de ruteo y propagación en Redes de Sensores Inalámbricas

A continuación se muestra los protocolos de ruteo y propagación que están presentes en las redes de sensores inalámbricas.

Tabla III Clasificación de los protocolos de ruteo y propagación.

| | Clasificación | Movilidad | Consumo de Energía | Basado en Negociación | Agregación de Datos | Localización | QoS | Complejidad | Escalabilidad | Multicamino | Basado en Requerimiento |
|--------------------|---------------|--------------|--------------------|-----------------------|---------------------|--------------|-----|-------------|---------------|--------------|-------------------------|
| SPIN | Plano | Posible | Limitado | Si | Si | No | No | Baja | Limitada | Si | Si |
| Difusión Directa | Plano | Limitada | Limitado | Si | Si | Si | No | Baja | Limitada | Si | Si |
| Rumor Routing | Plano | Muy Limitada | N/A | No | Si | No | No | Baja | Buena | No | Si |
| GBR | Plano | Limitada | N/A | No | Si | No | No | Baja | Limitada | No | Si |
| MCFA | Plano | No | N/A | No | No | No | No | Baja | Buena | No | No |
| CADR | Plano | No | Limitado | No | Si | No | No | Baja | Limitada | No | No |
| COUGAR | Plano | No | Limitado | No | Si | No | No | Baja | Limitada | No | Si |
| AOQUIRE | Plano | Limitada | N/A | No | Si | No | No | Baja | Limitada | No | Si |
| EAR | Plano | Limitada | N/A | No | No | No | No | Baja | Limitada | No | Si |
| LEACH | Jerárquico | Fija • BS | Máximo | No | Si | Si | No | Alta | Buena | No | No |
| TEEN & APTEEN | Jerárquico | Fija • BS | Máximo | No | Si | Si | No | Alta | Buena | No | No |
| PEGASIS | Jerárquico | Fija • BS | Máximo | No | No | Si | No | Baja | Buena | No | No |
| MECN & SMECN | Jerárquico | No | Máximo | No | No | No | No | Baja | Baja | No | No |
| SOP | Jerárquico | No | N/A | No | No | No | No | Baja | Baja | No | No |
| HPAR | Jerárquico | No | N/A | No | No | No | No | Baja | Buena | No | No |
| VGA | Jerárquico | No | N/A | Si | Si | Si | No | Alta | Buena | Si | No |
| Sensor Aggregation | Jerárquico | Limitada | N/A | No | Si | No | No | Baja | Buena | No | Posiblemente |
| TTDD | Jerárquico | Si | Limitado | No | No | No | No | Moderada | Baja | Posiblemente | Posiblemente |
| GAF | Localización | Limitada | Limitado | No | No | No | No | Baja | Buena | No | No |
| GEAR | Localización | Limitada | Limitado | No | No | No | No | Baja | Limitada | No | No |
| SPIN | Localización | Limitada | N/A | Si | No | No | No | Baja | Limitada | No | No |
| MFR GEDIR | Localización | No | N/A | No | No | No | No | Baja | Limitada | No | No |
| GOAFR | Localización | No | N/A | No | No | No | No | Baja | Buena | No | No |
| SAR | QoS | No | N/A | Si | Si | No | Si | Moderada | Limitada | No | Si |
| SPEED | QoS | No | N/A | No | No | No | Si | Moderada | Limitada | No | Si |

2.4 Tecnologías y estándares industriales para Redes Sensoriales Inalámbricas

Los estándares inalámbricos más conocidos son:

- IEEE 802.11b (Wifi)
- IEEE 802.15.1 (Bluetooth IEEE, 2002)
- IEEE 802.15.4 (ZigBee IEEE, 2003).

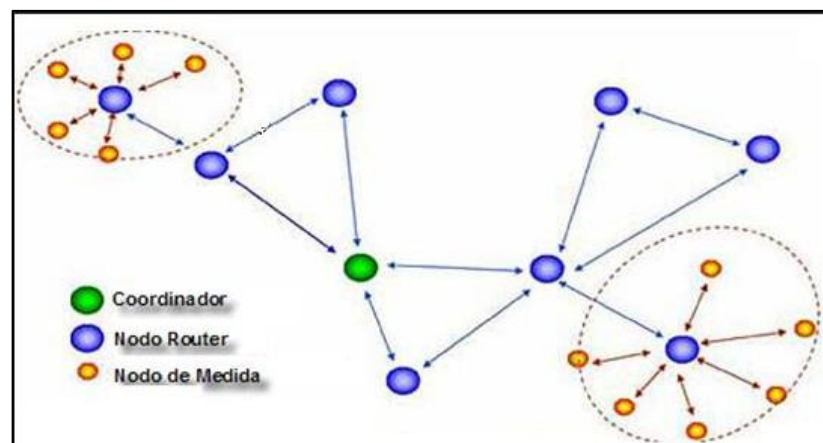
Tabla IV Clasificación de los protocolos de ruteo y propagación.

| Comparación entre tecnologías inalámbricas wi-fi, bluetooth, Zigbee | | | |
|---|--------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|
| | WiFi (IEEE 802.11g) | Bluetooth (IEEE 802.15.1) | ZigBee (IEEE 802.15.4) |
| | película, ficheros | películas, ficheros | datos |
| Alcance (m) | 100 | 10 (v1.1) | 70 - 100 |
| Expansión | Roaming | no | si |
| Duración batería | 12 y 48 horas | 1 semana | 100 – 1000 días |
| Costo \$ | 9 | 9 | 9 |
| Complejidad | complejo | Muy complejo | Sencillo |
| Aplicación Principal | WLAN | WPAN | Control y monitorización |
| Memoria necesaria | 1 MB + | 250KB+ | 4KB – 32 KB |
| Parámetros mas importantes | Velocidad y flexibilidad | Costes y perfiles de aplicación | Fiabilidad, bajo consumo y bajo coste |

Las redes de sensores actuales están basadas en estándar IEEE 802.15.4 ZigBee.

Este estándar incluye multi-hop, lo que implica que un mensaje puede utilizar varios saltos en las ondas de radio para llegar a su destino. Por lo que ZigBee resulta ideal para aplicaciones de monitorización de activos.

Cuando el número de nodos a interconectar es muy alto, la solución son redes de más de un nivel con distintas tecnologías (redes híbridas).



Fuente: www.innovation-labs.com

Figura 2.7 Ejemplos de distribución en una Wireless Sensor Network

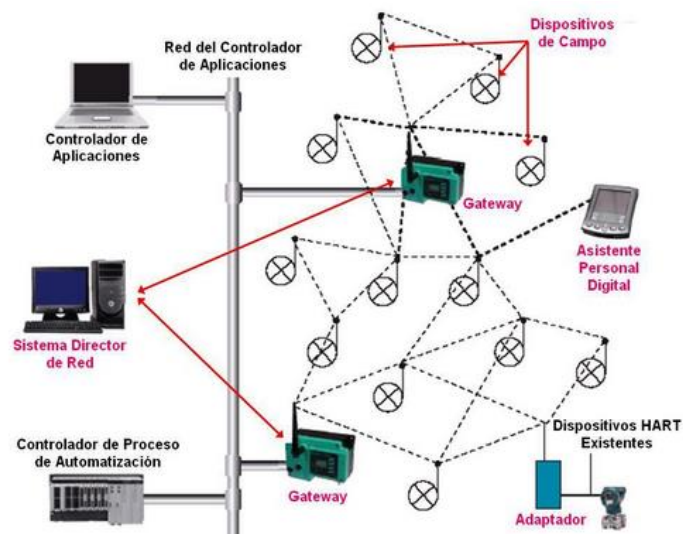
2.4.1 WirelessHART

Este protocolo opera en la banda ISM de 2,4 GHz usando el estándar IEEE 802.15.4. Esta tecnología tiene una topología única de función de tipo malla, que le da la propiedad de auto-organizar y auto-reparar, según [19]

“La norma se inició a principios de 2004 y desarrollado por la función de comunicaciones 37 HART (HCF) las empresas que entre otros incluyen: ABB,

Emerson, Endress/Hauser, Pepperl/Fuchs, Siemens, las cuales conforman WITECK, un proceso abierto, sin fines de lucro cuya misión es proporcionar un sistema fiable, rentable y de alta calidad de la cartera de software de sistema central que permite a las aplicaciones inalámbricas de sensores industriales, en virtud de una compañía y neutral plataforma umbrella.” [19]

WirelessHART proporciona un protocolo inalámbrico robusto, además permite a los usuarios obtener los datos deseados de forma rápida y fácil por medio de las diversas tecnologías inalámbricas, mientras que mantiene la compatibilidad con los dispositivos existentes, herramientas y sistemas.



Fuente: rii.galeon.com

Figura 2.8 Red basada en WirelessHART

Las ventajas de WirelessHART según [19] son:

- ✓ La fiabilidad
- ✓ Seguridad y privacidad de las comunicaciones de red mediante el cifrado.

- ✓ Administración de energía efectiva a través de la publicación de datos inteligentes.

2.4.2 ISA100.11a

Como es costumbre y siguiendo la tendencia de los software libres, ISA fue desarrollada como una red inalámbrica de código abierto estándar, la descripción oficial según [21] es “Sistemas inalámbricos para la automatización industrial: Control de procesos y aplicaciones relacionadas”.

“El comité ISA100 es parte de ISA y se formó en 2005 para establecer las normas y la información relacionada en los que se definen los procedimientos para la implementación de sistemas inalámbricos en la automatización y el ambiente de control con un enfoque en el terreno.



Fuente: www.automationworld.com

Figura 2.9 Red usando ISA100.11a

ISA100.11^a maneja un volumen mucho mayor de datos de proceso y asegura la interoperabilidad entre los equipos de campo inalámbricos de diferentes fabricantes”. [21]

2.4.3 6LoWPAN

Según [13]y como menciona [12]Se puede concluir que el nacimiento de este protocolo fue basado bajo el pensamiento de que el protocolo que se usa en internet debía poder funcionar y ser acoplado a dispositivos más pequeños, partiendo de esa idea se define a 6LoWPAN como un protocolo que tiene mecanismos de encapsulación y compresión de cabecera. Que permiten el envío y recepción de paquetes IPv6 por medio de las redes basadas en IEEE 802.15.4.

IPv4 e IPv6 son las plataformas de trabajo para la entrega de datos hacia redes LAN, WAN, GPON. Del mismo modo los dispositivos IEEE 802.15.4 proporcionara la capacidad de detección de la comunicación en el ámbito inalámbrico.

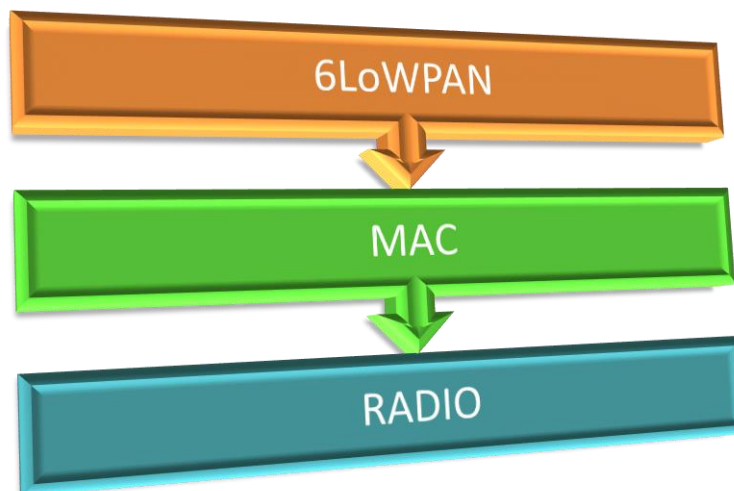


Figura 2.10. Trama 6LoWPAN

El objetivo de la creación de redes IP para la comunicación de mecanismos que utilizan el radio de baja potencia como medio de propagación, son las aplicaciones que necesitan conexión inalámbrica en internet, por este motivo se puede decir que:

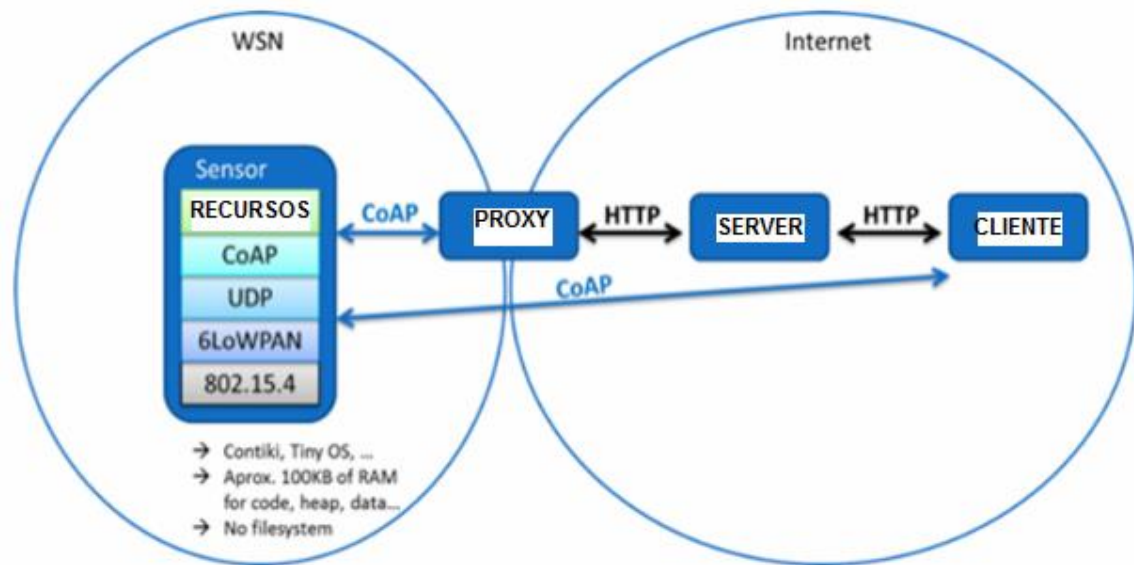


Figura 2.11. Red basada en 6LoWPAN [12]

Las funciones principales según [13] del protocolo 6LoWPAN son las siguientes:

- ✓ Adaptar el tamaño de los paquetes de las 2 redes.
- ✓ Resolución de direcciones.
- ✓ Diferentes diseños de dispositivos.
- ✓ Optimización de parámetros para manejar los problemas de red comunes como la congestión.
- ✓ Adaptación para los formatos de interoperabilidad.

- ✓ Mecanismos de gestión de direcciones.
- ✓ Consideraciones de enrutamiento y protocolos para topologías malla.
- ✓ Dispositivos y descubrimiento de servicios.

2.4.4 IEEE 802.15.4

IEEE 802.15.4 es un estándar que define el nivel físico y el control de acceso al medio de redes inalámbricas.

“Una de las características básicas es que cubre un área de comunicación de 10 metros con una tasa de transferencia de 250 kbps”. Para ello se definen no uno, sino varios niveles físicos.

Otra característica es que pueden lograr tasas aún menores con la respectiva reducción de consumo de energía. Pero la verdadera ventaja de este protocolo es que los costos de fabricación son muy muy bajos.

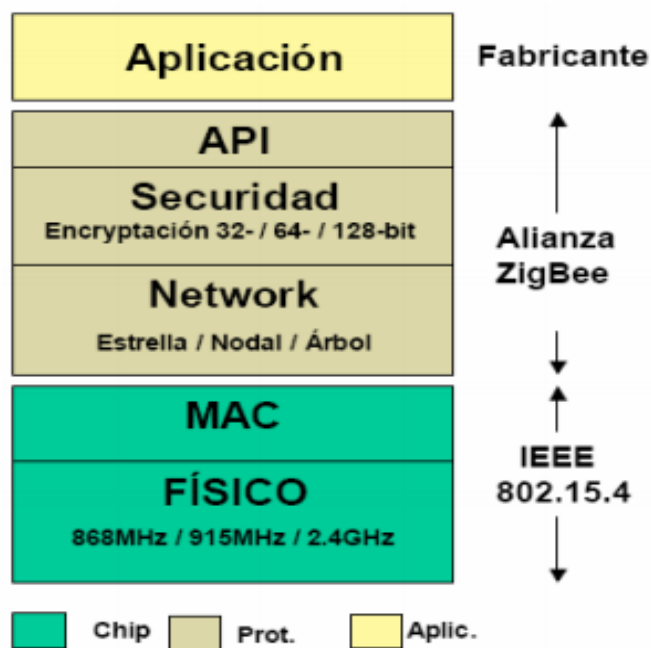
“Entre los aspectos más importantes se encuentra la adecuación de su uso para tiempo real por medio de slots de tiempo garantizados, evasión de colisiones por CSMA/CA y soporte integrado a las comunicaciones seguras. También se incluyen funciones de control del consumo de energía como calidad del enlace y detección de energía”. [21]

Opera en una de tres posibles bandas de frecuencia de uso no regulado.

- 868-868,8 MHz: Europa.
- 902-928 MHz: Norte América.
- 2400-2483,5 MHz: uso en todo el mundo.

2.4.5 Arquitectura de los protocolos

Para realizar una arquitectura se debe tomar en consideración varios términos entre ellos que los dispositivos puedan y deban relacionarse entre sí a través de una red inalámbrica sencilla o compleja, y toda la arquitectura debe basarse bajo los niveles que se basa el modelo OSI.



Fuente: redescontent.blogspot.com

Figura 2.10 Distribución de protocolos

Como es de conocimiento general la capa física provee el servicio de transmisión de datos sobre el medio físico por medio del cual se puede acceder a todos los servicios de gestión. Bajo este concepto así es como la capa física controla el transceptor de RF y realiza la selección de canales junto con el control de consumo y de la señal.

“La versión inicial especifica dos niveles físicos basados en espectro ensanchado por secuencia directa (Direct sequence spread spectrum, DSSS): uno en las bandas de 868/915 MHz con tasas de 20 y 40 kbps; y otra en la banda de 2450 MHz con hasta 250 kbps”. [15]

El control de acceso al medio (MAC) transmite tramas MAC usando para ello el canal físico.

2.4.6 Modelo de Red

El progreso periódico de la tecnología orientada a medir eventos o situaciones en distintos escenarios ha permitido el avance de las redes de sensores, las cuales a su vez para poder adecuarlas a cualquier ambiente a estudiar se debe tomar en cuenta los siguientes puntos:

- Tiempo de vida de la red.
- Facilidad de programación y reprogramación.
- Facilidad de repoblación.
- Dinamismo de la red
- Fácil adaptabilidad y flexibilidad
- Fácil distribución de algoritmos
- Homogeneidad

Una vez tomado en cuenta estos puntos, se puede iniciar el diseño de una red de sensores, adicionalmente se debe precisar qué tipo de red se va a utilizar, para esto existen varios tipos los cuales son explicados brevemente a continuación.

- Las redes punto a punto pueden formar patrones arbitrarios de conexión, y su extensión está limitada únicamente por la distancia existente entre cada par de nodos.
- Las redes adhoc no soportan funciones de ruteo de forma directa, aunque si dicho nivel pueden realizarse comunicaciones en varios saltos.
- Las redes en malla, cuyos nodos son tratados como clústeres, los cuales cuentan con un coordinador local y un coordinador global.
- Las redes en estrella, en las que el coordinador va a ser siempre el nodo central.

2.4.7 Arquitectura de transporte de datos

Para el transporte de datos las tramas son la unidad básica de transporte. El análisis del transporte se basa en la transferencia de datos la cual requiere una fase de sincronización para evitar tener jitter y pérdidas innecesarias en la transmisión de datos, seguida por una transmisión con CSMA/CA con confirmación.

A continuación se muestra dos tipos de arquitectura, las cuales

Según [11] son las más usadas:

- Arquitectura Centralizada
 1. Durante toda la vida de un nodo se realiza las acciones:
 - a. Despertar-Medir-Transmitir-Dormir
 2. Desventajas:
 - a. Cuello de botella en los Gateway
 - b. Gran consumo de energía
 - c. Tiempo de vida de la red corto

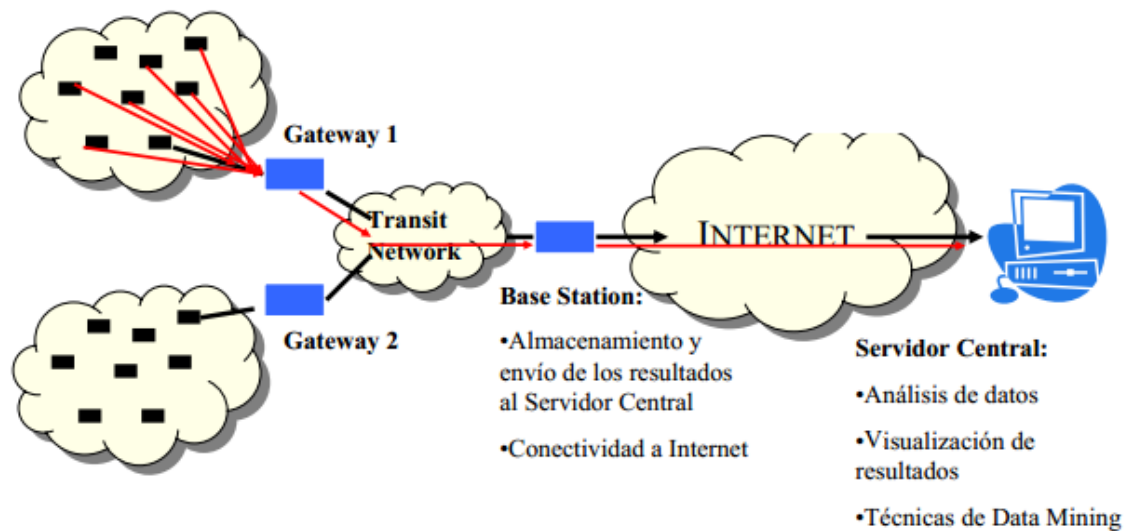


Figura 2.11 Arquitectura centralizada [11]

- Arquitectura Distribuida
 1. Tiende a una computación distribuida:

- a) Los nodos sensores se comunican solo con otros sensores dentro de una vecindad.
- b) Los nodos cooperan en el clúster y ejecutan algoritmos distribuidos.
- c) Respuestas más elaboradas

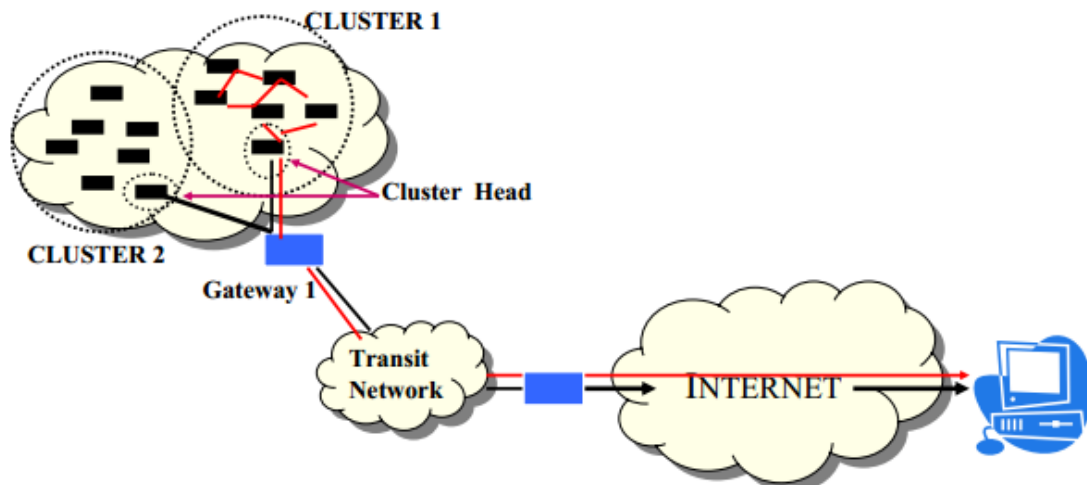


Figura 2.12 Arquitectura distribuida [11]

En general los modelos siguen un patrón de clasificación de las primitivas en petición-confirmación/indicación-respuesta.

2.4.8 Fiabilidad y Seguridad

Las redes de sensores inalámbricos dan la fiabilidad como seguridad para su uso, partiendo de un origen militar estas redes fueron creadas para la recopilación rápida de datos y para no poder ser detectadas.

Por lo que respecta a seguridad en las comunicaciones, se ofrece funcionalidades como claves simétricas para proteger los datos y restringir éstos a un grupo de dispositivos o a un enlace punto a punto. Se pueden especificar listas de control de acceso o ACL. Además, realizar comprobaciones de frescura entre recepciones sucesivas para asegurar que las tramas viejas, cuyo contenido no se considera útil o válido ya, no trascienden.

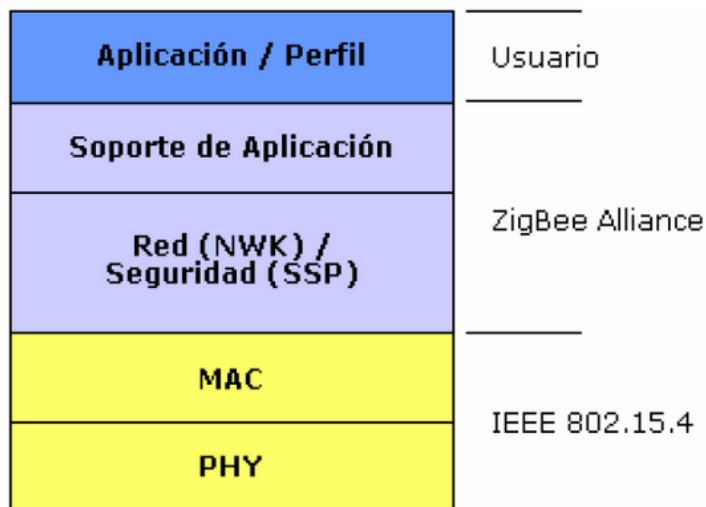
Adicionalmente, existe un modo MAC inseguro que permite el uso de listas de control de acceso únicamente como mecanismo de decisión de aceptación de tramas en base a su (supuesto) origen.

2.4.9 ZigBee PRO

ZigBee nace de la iniciativa de varias empresas para una comunicación inalámbrica en pequeños dispositivos, su especialidad es brindar aplicaciones para comunicaciones seguras con un bajo procesamiento lo cual ofrece una baja tasa de envío de datos, con estas características ZigBee también da una maximización de la vida útil ahorrando al máximo la energía utilizada por el hardware sin mencionar que esta tecnología es de bajos costos y aplicación simple.

ZigBee tiene las siguientes características:

- Modos PHY dual 2.4GHz y 868/915 MHz, lo que representa 3 bandas de licencias libres.
- Bajo consumo de energía, lo que hace que la batería de los dispositivos llegue a durar meses o años bajo las premisas de, conexión de red continua y lenta o una conexión intermitente.
- Velocidades de transmisión de datos fijadas a 250kps en 2.4GHz, 40 kbps en 915 MHz y 20 kbps en 868 MHz.
- Alto rendimiento y baja latencia para aplicaciones con ciclo de trabajo sumamente cortos (<0,1%)
- Consta de CSMA-CA
- Tiene un rango típico de 50 metros.
- Soporta diversas topologías (estrella, punto-punto y malla)



Fuente: sx-de-tx.wikispaces.com

Figura 2.13 ZigBee Protocolo

En las redes con ZigBee, se pueden usar dos tipos de entornos o sistemas:

- **CON BALIZAS:** *“Es un mecanismo de control del consumo de potencia en la red. Permite a todos los dispositivos saber cuándo pueden transmitir. En este modelo, los dos caminos de la red tienen un distribuidor que se encarga de controlar el canal y dirigir las transmisiones”. [3]*

- **SIN BALIZAS:** *“Se usa el acceso múltiple al sistema ZigBee en una red punto a punto cercano. En este tipo, cada dispositivo es autónomo, pudiendo iniciar una conversación, en la cual los otros pueden interferir. A veces, puede ocurrir que el dispositivo destino puede no oír la petición, o que el canal esté ocupado”. [3]*

Para ZigBee se define 3 tipos de dispositivos según su papel en la red:

- ✓ Coordinador: El tipo de dispositivo más completo.
- ✓ Router ZigBee: Interconecta dispositivos separados en la topología de la red.
- ✓ Dispositivo final: Posee la funcionalidad necesaria para comunicarse con su nodo padre.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

En este capítulo veremos la metodología utilizada para un despliegue de una red de sensores.

3.1 MATLAB para simular redes de sensores inalámbricas.

MATLAB es un software versátil y muy completo, de simulación matemática y computarizada con bases matriciales que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propia, compleja y cerrada.

Entre sus prestaciones básicas se hallan:

- la manipulación de matrices
- la representación de datos y funciones
- la implementación de algoritmos
- la creación de interfaces de usuario
- la comunicación con programas en otros lenguajes

“Matlab es un entorno que proporciona análisis numérico, cálculos matriciales e interfaces gráficas para usuarios. Además, existen varios toolboxes que suministran soluciones de aplicación específicas en áreas como procesamiento de señal, diseño de sistemas de control, redes neuronales, sistemas de potencia, etc.” [16]

3.1.2 Ventajas y Desventajas de MATLAB para simulaciones

Las principales ventajas de la simulación en MATLAB según [16] son:

- ✓ Nuevos procesos pueden ser estudiados casi en su totalidad simulando las pro y contra de un sistema real.
- ✓ Todo tipo de sistema puede ser testeado antes de que se tome alguna decisión con respecto a cualquier solución.

- ✓ Se puede determinar hipótesis de cómo y por qué ciertos fenómenos o eventos ocurren.
- ✓ El tiempo es moldeable, puede ser comprimido y expandido, permitiendo que el objeto de estudio pueda ser acelerado o retardado.
- ✓ Mediante saturación se puede encontrar los puntos débiles así como estancamiento donde las informaciones o materiales tienen sus flujos comprometidos pueden ser identificados.

Las principales desventajas son:

- ✓ La construcción de modelos requieren un tratamiento y conocimiento especial.
- ✓ Código cerrado, complejo de entender y utilizar.
- ✓ Los resultados de la simulación pueden ser difíciles de interpretar.
- ✓ Un modelamiento, estudio, simulación de un sistema puede consumir mucho tiempo y muchos recursos.

3.1.3 Funcionabilidad

Las funcionalidades de Matlab son diversas y se clasifican en las siguientes categorías:

Tabla V Matlab y Simulink

| MATLAB (Cajas de herramientas) | Simulink |
|--|--|
| Matemáticas y Optimización | Modelado de punto fijo |
| Estadística y Análisis de datos | Modelado basado en eventos |
| Diseño de sistemas de control y análisis | Modelado físico |
| Procesado de señal y comunicaciones | Gráficos de simulación |
| Procesado de imagen | Diseño de sistemas de control y análisis |
| Pruebas y medidas | Procesado de señal y comunicaciones |
| Biología computacional | Generación de código |
| Modelado y análisis financiero | Prototipos de control rápido y SW/HW HIL |
| Desarrollo de aplicaciones | Tarjetas integradas |
| Informes y conexión a bases de datos | Verificación, validación y comprobación |

3.1.4 Limitaciones y alternativas

Matlab al igual que Apple tienen la misma restricción, al ser un producto propietario de “The Mathworks”, los usuarios están sujetos y bloqueados al vendedor y el producto no es barato. Por lo que es la limitante más importante.

Sin embargo recientemente se ha proporcionado una herramienta adicional llamada SIMULINK el cual puede utilizar funciones como base de datos además del uso de biblioteca que pueden ser usados con ambientes de creación de circuitos, simulaciones gráficas, ingeniería, electrónica, etc.

Pero la desventaja es que el ordenador en el cual se use la aplicación debe tener, aparte del programa, el complemento de MCR (MATLAB Component Runtime) para que los archivos MATLAB funcionen correctamente. Es por esa razón que se compara con Apple, ya que además de ser de complejo funcionamiento se debe prácticamente pagar por todo lo que se quiera utilizar.

Otras alternativas a MATLAB serían:

- ✓ LabVIEW
- ✓ GNU Octave, software libre similar a matlab.
- ✓ SAS
- ✓ Scilab
- ✓ Mathcad
- ✓ SciPy & Numerical Python

✓ Lenguaje R

3.2 Definición del ambiente sobre el que se va a simular.

A continuación se definen los diversos ambientes en los cuales se realizó el estudio

3.2.1 Plantas Industriales Petroleras y Gaseoductos.

El sector de petróleo y gas requiere del manejo intensivo de datos, así como la facilidad de acceder a ellos desde cualquier parte del mundo. Es de conocimiento público que todas las refinerías se encuentran muy dispersas y las instalaciones petroleras o gaseoductos exigen aún más la capacidad de poder obtener rápidamente información desde cualquier parte del mundo.

Las redes de sensores pretenden unir la brecha entre el mundo físico y sus exigencias y el mundo de recolección y manejo virtual.

3.2.2 Cambios climáticos y afectaciones típicas en la propagación de las redes sensoriales inalámbricas.

Los cambios climáticos típicos en las industrias petroleras y de gas son las variaciones bruscas de temperatura, así como obstáculos propios de la naturaleza además de los de la industria misma. Lo cual consta como una limitante importante ya que los equipos utilizados deben poder soportar temperaturas altas y bajas.

3.3 Requerimientos técnicos en las redes sensoriales inalámbricas, para el ambiente seleccionado.

Tomando en cuenta todas las investigaciones y la teoría podemos decir que la mayoría de las redes de sensores inalámbricas usan la arquitectura de red con preferencia ad-hoc o multi-hop.

Esta preferencia es debido a que se necesita que las redes sean móviles, auto-configurables y con optimización de energía, para poder formar una red eficaz, útil, confiable de alto rendimiento y barata.

Los nodos móviles manejan el control necesario y tareas de conexión de red en una forma distribuida.

La arquitectura ad-hoc y multi-hop son altamente recomendable para las redes de sensores por muchas razones las cuales según [12] son:

- ✓ *Las arquitecturas ad-hoc supera las dificultades que surgen por las configuraciones de infraestructura predeterminada de otras familias de redes de sensores.*
- ✓ *Las redes ad-hoc se pueden adaptar fácilmente a las distintas aplicaciones.*
- ✓ *Esta arquitectura multi-hop es altamente robusta para fallas simples de los nodos y proporciona un alto nivel de tolerancia*

de avería debido a la redundancia del nodo y a su naturaleza distribuida.

- ✓ *El rendimiento energético se puede ahorrar usando el enrutamiento Multihop.*

- ✓ *Las redes ad-hoc tienen la ventaja de la reutilización del ancho de banda, que también beneficia al dividir el salto de largo alcance a multi-saltos más pequeños; cada salto tiene una distancia corta considerable. En este caso, la comunicación es local y dentro de una gama pequeña.*

Partiendo de lo investigado, la estructura de las redes de sensores varía según los aspectos necesitados, y tienen varios elementos susceptibles a la simulación los cuales son:

- ✓ Los nodos y su hardware
- ✓ La red, su comportamiento y los protocolos asociados
- ✓ El software asociado
- ✓ A nivel de aplicación
- ✓ A nivel de Sistema Operativo

Las Variables a medir de la red de sensores tienen un rango amplio de condiciones físicas, tales como (las variables dependen de lo que la industria necesite):

- ✓ Temperatura

- ✓ Luz
- ✓ Voltaje
- ✓ Velocidad
- ✓ Magnetismo
- ✓ Presión
- ✓ Nivel de ruido
- ✓ Características de un objeto tales como peso, tamaño.

Lo que debe constar en la red de sensores para la industria petrolera o de gas es lo siguiente:

- Red de Acoplamiento.
- Programación por aire y actualización remota.
- Sistema Operativo de Bajo Consumo de Energía.
- Gateway server Middleware.
- Monitoreo y Administración Remota.

Haciendo sugerencias breves de los puntos anteriores se menciona que:

Para la Red de Acoplamiento se aconseja utilizar una topología de red en malla, ya que esta permite una comunicación más confiable de los nodos y garantiza mejor propagación en una red inalámbrica.

Para la Programación por aire y actualización remota se aconseja utilizar la programación XOTap que facilita el desarrollo de las aplicaciones de la red de sensores eliminando una conexión física con el nodo de la red.

Como sistema Operativo de Bajo Consumo de Energía, se recomienda MoteWorks™ que incluye el TinyOS, este sistema operativo al igual que Unix, Linux es de código abierto, sin mencionar que es muy estable este sistema operativo y fue exclusivamente diseñado para el uso en redes de sensores enfocado en un bajo consumo de energía con requisitos pequeños de memoria.

Para el Servidor Gateway se recomienda utilizar el software XServe que es un componente que proporciona una simple interface para la comunicación Intranet/Internet a la red de sensores. Esto significa que hace posible la integración de los sistemas de monitoreo, control y administración de las red de sensores y a su vez hace posible que estas tengan salida a la red.

Para el monitoreo y administración remota se recomienda usar MotV que es la interfaz utilizada por el cliente final en pocas palabras es la aplicación que el usuario ve y es la cara para el manejo desde un ordenador.

3.3.1 Características del hardware para redes sensoriales inalámbricas.

El sensor recomendado es la placa MTS310 la cual incorpora sensor de luz, sensor de temperatura, sensor magnético, de aceleración, altavoz y micrófono.

Las Motas, son las plataformas sobre las cuales se insertan las placas sensoras. Están dotadas de procesador, memoria flash y chipset ZigBee para comunicación de radio. Llevan incorporado un conector tanto para las placas sensoras como para el programador.

El Gateway se escoge dependiendo del tipo de interfaz a conectar, se recomienda utilizar el MIB510 que usa una interfaz a través de un puerto serial RS-232. Este Gateway proporciona la conexión para la programación de MOTAS y para el envío de información hacia el PC.

El protocolo más recomendable es el ZigBee. Se basa en el estándar IEEE 802.15.4. Bajo lo estudiado se dice que es un nuevo estándar para redes de telemetría inalámbrica. Y tiene diversas aplicaciones residenciales e industriales debido a su gran flexibilidad, bajo costo, bajas tasas de velocidad, bajo consumo de potencia, largos periodos de operación basados en el ahorro de energía lo cual según fuentes el periodo de vida de una batería podría tener varios meses y hasta años. Puede operar desde un rango de nodo de 50m hasta 200m con una velocidad de hasta 250 kbps y 16 canales.

3.3.2 Desafíos técnicos y especificaciones del diseño de redes sensoriales inalámbricas.

El diseño de las RED DE SENSORES ha sido motivado e influenciado por uno o más de los siguientes desafíos técnicos:

- ✓ Despliegue aleatorio y masivo

- ✓ Redundancia de Información
- ✓ Recursos Limitados
- ✓ Arquitectura a la medida y operación desatendida
- ✓ Entorno y topologías dinámicas
- ✓ Posible-Error de Medio Inalámbrico
- ✓ Aplicaciones Diversas
- ✓ Seguridad y Privacidad
- ✓ Preocupaciones de QoS

Para el diseño se toma las especificaciones orientadas en los objetivos del proyecto.

3.3.3 Diseño de las pruebas y descripción de los indicadores para una red Sensorial inalámbrica.

Los siguientes objetivos y direcciones son identificados en el diseño para poder hacer frente a los desafíos y satisfacer varios requerimientos

- ✓ Dispositivos pequeños de micro-sensores.
- ✓ Arquitecturas y Protocolos Escalables y Flexibles.
- ✓ Procesamiento localizado y fusión de la información.
- ✓ Diseño de eficiencia de recursos.
- ✓ Auto-Configuración.
- ✓ Adaptabilidad para realizar intercambios entre los recursos, precisión, y requerimientos de latencia.
- ✓ Confiabilidad y tolerancia.

- ✓ Diseño de QoS con recursos dirigidos.

Bajo estos parámetros se modeló los indicadores en los cuales se denominó las variables:

- Rango de nodo
- Densidad de nodos
- Potencia promedio de transmisión intermitente
- Exponente de pérdida

Naturalmente, los nodos sensores desplegados masiva y aleatoriamente deben ejecutar auto-configuración para poder configurar la conexión de la red y comenzar la rutina de operación. Las RED DE SENSORES son altamente dinámicas durante el tiempo de vida de la red. Los nodos sensores realizan transiciones entre los estados de apagado, dormido, inicio, en espera, transmitiendo, recibiendo y fallas para el propósito de conservación de la energía

Como sugerencia se menciona que en base a lo es impráctico alcanzar todos los objetivos en una red en particular. Ya que la mayoría de diseños de las redes de sensores son de aplicación específica y tienen diferentes concentraciones en algunos de los objetivos descritos previamente. Y se recomienda hacer el estudio y alcance de acuerdo a lo que se desea obtener.

3.4 Diseño de la red sensorial inalámbrica

Para el diseño de la red se parte de un estudio previo de ingeniería (Survey) de donde se define qué tipo de topología y diseño de red de sensores se va a utilizar para que el ambiente escogido sea estudiado y controlado adecuadamente, los requerimientos técnicos pueden diferir en gran manera dependiendo del ambiente y parámetros a medir. Es por eso que, el diseño de una red de sensores es usualmente orientado a una aplicación. Como resultado, el hardware, software, las arquitecturas, protocolos, y algoritmos de las redes de sensores no son siempre iguales y varían dependiendo del caso y parámetros. Sin embargo, diferentes redes de sensores tiene algunas propiedades en común y generalmente, pueden ser clasificados en categorías basadas en diferentes criterios importantes.

Dependiendo del número de nodos por unidad de área, una red de sensores puede ser escasa o densa, pero para fines de estudio se tomó 3 rangos de densidad 50, 100 y 200 nodos respectivamente. En términos de componentes de los nodos, la red de sensores puede ser clasificada de forma general en dos categorías: redes de sensores homogéneas y redes de sensores heterogéneas. En una red de sensores homogénea, los nodos sensores tienen capacidad y funcionalidad idéntica con respecto a varios aspectos de detección, comunicación y limitación de recursos. En una red de sensores heterogénea, cada nodo puede tener diferente capacidad y ejecutar diferentes funciones. Por lo que para efectos de estudio se asume una red homogénea.

Los elementos que conforman la RED DE SENSORES a implementar son:

- ✓ Sensores: de distinta naturaleza y tecnología toman del medio la información y la convierten en señales eléctricas.
- ✓ Nodo sensor: toman los datos del sensor a través de sus puertas de datos, y envían la información a la estación base.
- ✓ Puerta de enlace: elementos para la interconexión entre la red de sensores y una red TCP/IP.
- ✓ Estación base: recolector de datos basado en un ordenador común o sistema embebido.
- ✓ Comunicación Inalámbrica: Típicamente basada en el estándar 802.15.4 ZigBee.

Tabla VI Factores y Redes a usar

| Factores | Tipo de Red |
|-----------------------------------|--|
| Comunicación con la estación base | Salto simple vs. Multi-salto |
| Dependencia de la información | No-Agregación vs. Agregación |
| Distribución de Sensores | Determinista y Dinámica |
| Esquema de control | No Auto-configurable vs. Auto-configurable |
| Por el manejo | Por tiempo o por evento |
| Componentes de los nodos | Homogéneas vs. Heterogéneas |
| Número de nodos | Escasa vs. Densa |

CAPÍTULO 4

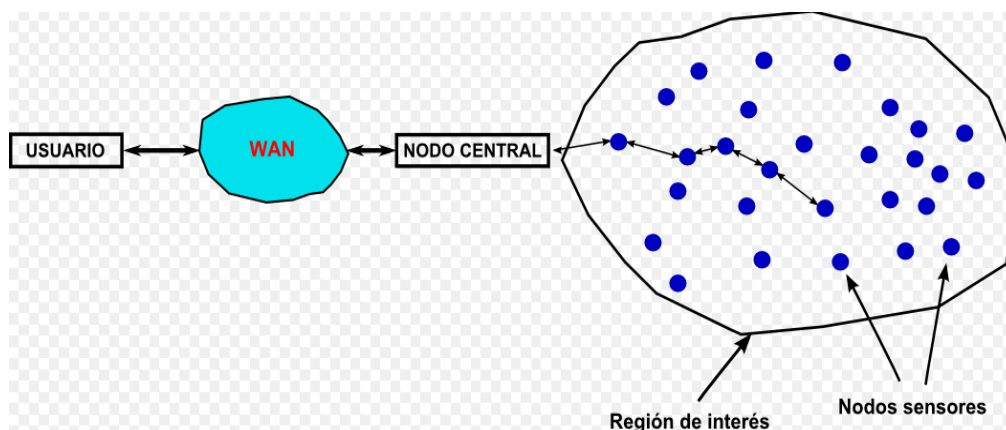
MODELO DE LAS REDES SENSORIALES INALÁMBRICAS ENFOCADO EN LA CAPA FÍSICA PARA MEDIR EL COMPORTAMIENTO DE LA RED Y PROPAGACIÓN EN AMBIENTES HOSTILES PROPIOS DE INDUSTRIAS DE PETRÓLEO/GAS

En este capítulo se explicara y mostrará el modelo de una red de sensores partiendo del análisis del ambiente a estudiar y de acuerdo a los objetivos planteados.

4.1 Descripción del modelo en Matlab de la red sensorial inalámbrica.

Para efectos del estudio, se realizó la parte operativa por medio del software MATLAB 7.10.0 (R2010a), por lo cual se desarrollará y mostrará los resultados, gráficos del estudio.

Partiendo del análisis de que un ambiente petrolero es de compleja hostilidad ambiental, es necesaria la difusión de cientos a miles de sensores inalámbricos pequeños y auto configurables con un tiempo de vida largo, distribuidos en un área geográfica determinada para poder tener un mejor control del entorno. El objetivo de la monitorización del entorno es para obtener lecturas en un período corto pero preciso de tiempo para detectar cambios en tiempo real, de los parámetros claves que afectan directamente o indirectamente del ambiente y que tienen un impacto crítico a la industria estudiada.



Fuente: www2.imse-cnm.csic.es

Figura 4.1 Estructura de la red de sensores para la industria estudiada

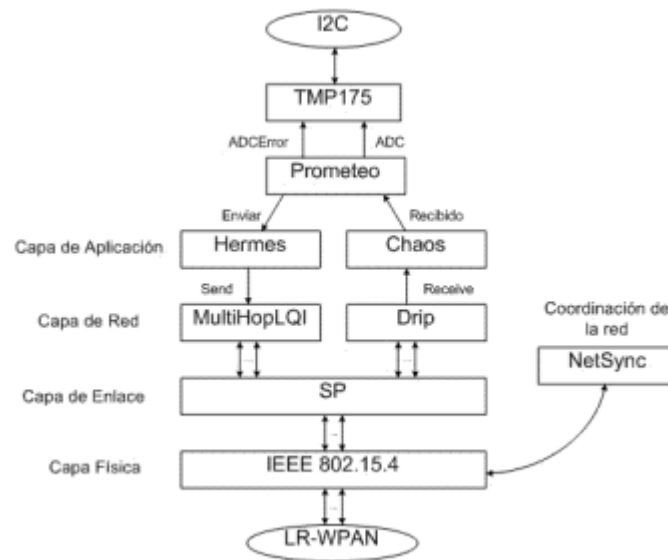
Nuestra red de sensores contiene de 50, 100 a 200 de nodos sensores, los cuales tienen la habilidad de comunicarse con cualquier otro nodo o directamente con una estación base externa.

Cabe recalcar que el alcance del modelamiento es netamente físico y demuestra un despliegue físico además de mostrar la conectividad dependiendo de los parámetros considerados.

4.2 Modelamiento de propagación por medio de multi-hop

Para el estudio se usará el principio multi-hop, ya que los protocolos que se utilizan en multi-hop, son robustos frente a variaciones importantes en la calidad de enlace entre nodos, además estos permiten tener una redundancia utilizando caminos lsp (label switched path) para poder converger. Esta convergencia ayuda a que la propagación de datos recopilados en el medio no tenga ninguna pérdida de paquetes transmitidos, lo que a su vez permite que cada vez que se incorporen físicamente nuevos nodos dentro del rango, estos sean capaces reconocerlo inmediatamente y seguir funcionando.

Esta arquitectura nos da la posibilidad de autonomizar en gran medida nuestra red, creando nodos Maestro y esclavos con lo que los que definamos como maestro se encargan de organizar la red, y hacer llegar los datos al servidor designado para la tarea de almacenaje.



Fuente: www.ibm.com

Figura 4.2 Estructura de transmisión de datos

Con estas ventajas a nuestro favor una breve explicación del funcionamiento sería:

1. el protocolo de capa de red envía un dato desde un sensor hasta la base.
2. este elige las rutas de acuerdo con la calidad del enlace de los vecinos proporcionado por la capa inferior actuando como lsp.

Bajo este principio se modeló bajo Matlab la capacidad del código a dibujar una red multi-hop. Restringiendo el número de nodos a 50, 100 y 400 para efecto de estudio.

4.3 Modelamiento del comportamiento de la red y la propagación bajo las condiciones ambientales seleccionadas.

Una red con “N” nodos puede ser modelada como un gráfico no directo, donde una posición 2D/3D, “p” por cada vértice “i” es identificado por el grupo de coordenadas $P_i = (X_i, Y_i, Z_i)$ respectivamente). Una longitud euclidiana $d_{i,j}$ entre dos vértices $i, j \in V$ es referido como E. la topología de red es después interpretada por una matriz de tres por cuatro, donde el las posiciones 2D/3D de los nodos están almacenadas en columnas individuales.

Sin embargo para dar una mejor explicación se tomará en cuenta una simulación en el plano 2D mediante la siguiente matriz.

| | | | | | |
|---------------|-------|-------|-------|-----|-------|
| ID | 1 | 2 | 3 | ... | N |
| X_coor | x_1 | x_2 | x_3 | ... | x_N |
| Y_coor | y_1 | y_2 | y_3 | ... | y_N |

Para la explicación se realizó la siguiente simulación, se tomó en consideración inicialmente una red totalmente conectada, refiriéndose a que todos los nodos son alcanzables a través de una comunicación multi-hop. La conectividad depende del rango de radio, y el rango de radio de los nodos. Uno puede estimar el rango de radio óptimo de manera empírica o usando una ecuación que estima el rango de radio mínimo asegurando la conectividad total.

$$R = \Theta \sqrt{\frac{\log N}{N}}$$

Ecuación (1,4)

El parámetro “teta” refiere a un diámetro plano 2D directamente proporcional al número de nodos “N”. Calculando “R” para 100 nodos colocados al azar en el plano 2D con una dimensión de 300m x 500m.

Una vez creada la matriz de red y el rango de radio a usar es definido, la red puede ser graficada de modo aleatorio.

El link entre dos nodos puede ser graficado solo en el caso que la distancia euclidiana $d_{i,j}$ entre dos nodos i, j es más pequeña que “R” en los nodos a considerar, dependiendo también del factor de pérdida a través de la distancia el cual se explicará más adelante.

Dado que los enlaces de la red inalámbrica son considerados bidireccionales y asimétricos entonces; $d_{i,j} = d_{j,i}$

Ahora, se considera que el rango de error de la medición de distancias tiene una distribución Gaussiana. El rango de error E_r es modelado por una distribución Gaussiana con un $\mu = 0$ y con una desviación estándar σ .

Esta distancia $r_{i,j}$ medida bajo E_r puede ser calculada:

$$r_{i,j} = d_{i,j} \pm \left(\frac{d_{i,j}}{100} \times \varepsilon_r \right)$$

Ecuación (2,4)

Existen algunos algoritmos que tienen un rendimiento comparado, a estos casos se aconseja evaluarlos en condiciones idénticas.

Como fue expresado, el rango del nodo debe estar entre 8 y 26. Este rango es tomado del trabajo de Bettstetter. El investigó sobre el rango de radio para asegurar la conectividad de una red lo cual será evaluado en redes de tamaño $N = 50, 100, 400$.

Sin embargo para una buena comunicación hay que tomar en cuenta 4 parámetros importantes en general y estos son:

- Sensibilidad de Receptor
- Potencia de salida
- Frecuencia
- Medio de propagación de la señal (atenuaciones)

Es por eso que al modelo se incorpora como parámetro, coeficiente de pérdida a lo largo de la distancia. Para poder determinar la pérdida de la señal a través de la distancia, con lo que se podría sacar la potencia mínima y el punto de quiebre para una conexión estable.

Para el espacio libre, donde no existe ningún tipo de atenuación el coeficiente de pérdida es 2 y este ambiente viene expresado por:

$$P(d) = (P_0) - 10 * \alpha \log(f) - 10 \alpha \log \frac{d}{d_0}$$

Ecuación (3,4)

Donde $P(d)$ es la potencia de la señal en dBm a una distancia “d”, P_0 es la potencia de la señal en dBm a una distancia “0”, f es definido como la frecuencia y “d/d₀” es la distancia en metros y alfa es el coeficiente de pérdida en este caso “2”.

Sin embargo el espacio libre no es un ambiente real encontrado en la industria a estudiar, por lo que un ambiente con atenuaciones constantes es el más adecuado para simular. Bajo esta premisa y para poder involucrar el parámetro alfa se partió de la siguiente ecuación:

$$P_{Rx} = P_{Tx} - PL$$

Ecuación (4,4)

Donde P_{Rx} es la potencia recibida en dBm, P_{Tx} es la potencia en el transmisor o potencia de transmisión y PL es la perdida de trayectoria. Para poder calcular la perdida de trayectoria debemos declarar el valor de $L(d)$ entre un nodo transmisor y un nodo receptor localizado a una distancia “d” del primero. Para este cálculo se utilizó la siguiente ecuación:

$$PL(d) = PL(d_0) + 10 \alpha \log \frac{d}{d_0}$$

Ecuación (5,4)

Donde alfa es el exponente de pérdida el cual vamos a variar para que defina la conectividad de la red con los diferentes escenarios. El valor de alfa para la simulación va a variar de 2 a 4.

En la siguiente tabla mostraré los valores de alfa de acuerdo a los ambientes.

Tabla VII. Tabla de valores de alfa

| α | ENTORNO |
|----------|----------------------|
| 2 | Espacio Libre. |
| 4 | Edificios, fábricas. |
| 6 | Refinerías. |
| 7 | Gaseoductos. |
| 8 | Estaciones marinas |

Una vez definido el alfa, partimos con $L(d_0)$ que es la pérdida a una distancia d_0 . Ahora a partir de lo mencionado la fórmula se expresa de la siguiente forma:

$$P_{Rx} = P_{Tx} - L(d_0) - 10 \alpha \log \frac{d}{d_0}$$

Ecuación (6,4)

Otro obstáculo que existe para las señales inalámbricas en una red de sensores es el efecto doppler; pero este en la aplicación ZigBee es despreciable.

Bajo estas ecuaciones podemos saber cuál debería ser comportamiento de nuestra potencia a través de la distancia.

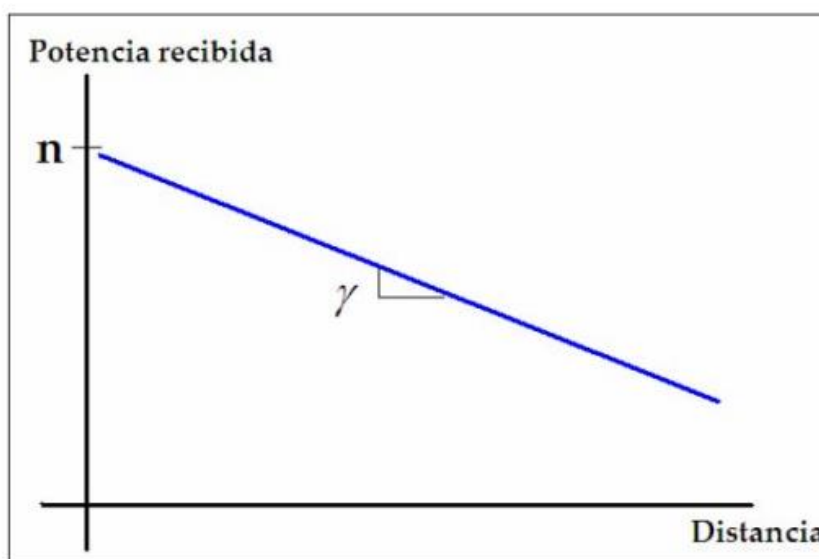


Figura 4.3 Grafica general de potencia vs distancia

Es así como bajo estos parámetros se va a partir la evaluación en sí de los objetivos planteados al inicio, por lo que serán considerados para el modelamiento del código para la simulación.

Los datos de enrutamiento en las redes inalámbricas de sensores, se realiza en la comparación de enlaces. Los enlaces considerados entre un emisor y un receptor pueden ser comparados en términos de la longitud, enlace de calidad o la energía residual de los pares de nodos. No obstante el camino

con el menor valor investigado es seleccionado como la ruta para la entrega de datos.

4.4 Modelamiento de la capa física

Considerando el mejor de los escenarios y el peor, se tomó como condiciones la potencia, número de nodos y el coeficiente de pérdida a través de la distancia.

4.4.1 Planificación de la red mediante la predicción de conectividad inalámbrica.

La ruta entre dos nodos en un gráfico de estructura de datos, puede ser visualizada mediante una implementación Dijkstra en Matlab.

Este algoritmo menciona que:

“Teniendo un grafo dirigido ponderado de N nodos no aislados, sea x el nodo inicial, un vector D de tamaño N guardará al final del algoritmo las distancias desde x al resto de los nodos.

1. Inicializar todas las distancias en D con un valor infinito relativo ya que son desconocidas al principio, exceptuando la de x que se debe colocar en 0 debido a que la distancia de x a x sería 0.
2. Sea $a = x$ (tomamos a como nodo actual).
3. Recorremos todos los nodos adyacentes de a , excepto los nodos marcados, llamaremos a estos nodos no marcados v_i .
4. Si la distancia desde x hasta v_i guardada en D es mayor que la distancia desde x hasta a , sumada a la distancia desde a hasta v_i ; esta se sustituye con la segunda nombrada, esto es:
 si $(D_i > D_a + d(a, v_i))$ entonces $D_i = D_a + d(a, v_i)$

5. Marcamos como completo el nodo a.
6. Tomamos como próximo nodo actual el de menor valor en D (puede hacerse almacenando los valores en una cola de prioridad) y volvemos al paso 3 mientras existan nodos no marcados.
7. Una vez terminado al algoritmo, D estará completamente lleno." [22]

El algoritmo de Dijkstra se implementa con la función: grshortpath

$$[dSP, sp_{i,j}] = grShortPath(E, ID_i, ID_j) ;$$

Ecuación (7,4)

La función grshortpath toma una matriz "E" de los vecinos, donde i: fuente y j: nodo de destino.

Para el cálculo de la ruta más óptima, se toma en consideración tres columnas, donde las primeras dos columnas contienen todos los nodos de la red, que son vecinos uno de otro y la tercera columna contiene las distancias euclidianas en metros.

Todos los pares de nodos son comparados con el rango de radio uniforme "R" y si la condición $d_{i,j} < R$ se cumple, el enlace es mostrado. La matriz es creada con esta condición mientras todos los parámetros como las IDs de los vecinos y sus distancias "d" se conoce y condiciona el peso propuesto de los enlaces.

Si la calidad del enlace o el residuo de energía van a ser usados en vez de la distancia entre nodos para establecer una ruta, la información de la tercera columna de la matriz puede ser sustituida por la información requerida.

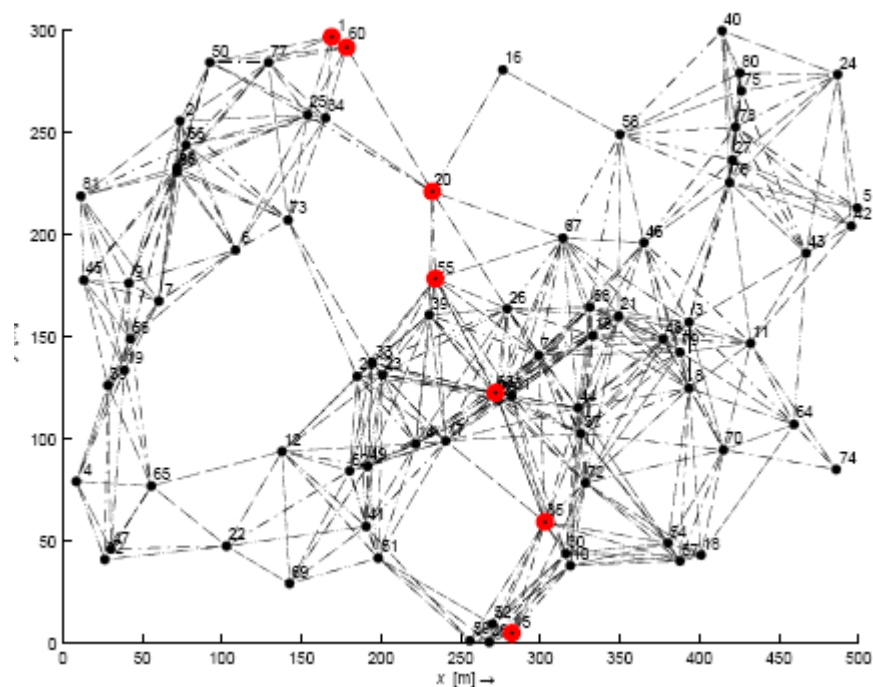


Figura 4.4 Distribución de red con la ruta más corta usando la función grshortpath

Una vez que los caminos de todos los nodos están definidos, se define la estación base, la cual recolecta los mensajes (datos) enviados por todos los nodos.

RxTx MATRIX

| | | | | | |
|--------------|----|-----|----|-----|----------|
| ID | 1 | 2 | 3 | ... | <i>N</i> |
| Rx | 10 | 44 | 6 | ... | 154 |
| Tx | 2 | 56 | 15 | ... | 89 |
| Ox | 15 | 89 | 22 | ... | 354 |
| TOTAL | 27 | 189 | 43 | ... | 597 |

Ahora, para definir el modelo de procesamiento del mensaje se utiliza ZigBee definido por la IEEE 802.15.4.

Cuando un mensaje es recibido por el receptor, este hace una transición de Rx al modo Tx (192Us) y envía de respuesta un ACK (con tamaño 5bytes). Una vez que el ACK es recibido por el origen este empieza a transmitir el dato requerido. Expresado:

$$\begin{aligned}
 t_{\text{total}} &= (\text{CCA})+(\text{Tx data_request})+(\text{Rx/Tx receiver})+ \\
 &+ (\text{Rx ack})+(\text{Rx/Tx sender})+(\text{Tx data})+ \\
 &+ (\text{Rx/Tx receiver})+(\text{Rx ack})= \\
 &= 2.368 + 0.32 + 0.192 + 0.16 + 0.192+ \\
 &+ 0.96 + 0.192 + 0.16 = 4.54 \text{ ms}
 \end{aligned}$$

Ecuación (8,4)

Cabe recalcar que esta es una guía, una orientación para que las redes de sensores sean evaluadas en Matlab. Proponiendo las aplicaciones y los algoritmos adecuados para su realización, se ha propuesto un modelo de despliegue físico y de enlace.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS

Después de realizar el estudio basado en los objetivos planteados se mostrará a continuación los resultados obtenidos de los estudios y simulaciones realizadas en Matlab.

5.1 Validación del simulador como apoyo para la planificación de una red sensorial inalámbrica mediante la predicción de conectividad.

Tomando únicamente los factores a considerar en el modelo y bajo la premisa multi-hop, los parámetros a colocar definirán la conectividad total, parcial o nula de la red sensorial inalámbrica. Dichos parámetros son:

- ✓ Número de nodos deseados. “n”
- ✓ Potencia de transmisión “p”
- ✓ Coeficiente de pérdida “alfa”

Donde “n” es el número de nodos deseados, “p” la potencia de transmisión y “alfa” el exponente de pérdida que variara entre 2 y 4.

Una vez definidos estos parámetros se puede ver que la potencia de transmisión y la pérdida a través de la distancia son inversamente proporcionales, a mayor distancia menor potencia de recepción y por ende menos conectividad entre nodos.

A continuación mostraré diversos escenarios así como la relación potencia distancia del ambiente seleccionado, con lo que se espera dar por aceptados los objetivos planteados al inicio del proyecto. Así mismo se podrá saber el punto de quiebre y la potencia mínima de transmisión a la mínima distancia requerida. El despliegue de la gráfica distancia versus potencia nos dará una visión que predecirá el % de aceptabilidad de la red.

5.2 Pruebas de simulación en escenarios industriales de Gas/Petróleo.

Para satisfacer la exigente industria de Gas/Petróleo con un ambiente hostil adoptando como hostil un coeficiente de pérdida alfa de 2.8. Adicionalmente, ya que los factores como el calor y cambios bruscos de clima ocasionan un medio difícil para la sobrevivencia de cualquier equipo electrónico sin alimentación propia he tomado 100 nodos de población para que la pérdida de unos pocos no vaya a afectar la interconexión de la red, adicionalmente a esto se toma las siguientes especificaciones de un nodo sensor marca "XBee" las cuales son: Potencia de transmisión máxima con valor de 60 mW, trabaja a una frecuencia de 2,4Ghz (ZigBee) tiene una sensibilidad de -90dBm y según especificaciones alcanza a los 100m con un alfa de 3.1 en exteriores.

A continuación se muestran las pruebas con diferentes parámetros, los cuales claramente mostrarán la capacidad de conectividad de la red dependiendo del valor de dichos parámetros.

Primordialmente se mostrará los parámetros ideales, tomando el espacio libre como ambiente (alfa=2), a la potencia mínima requerida y con una familia de 100 nodos.

Simulación con una Potencia de = 0.6mW, un alfa = 2 y con el número de nodos = 100.

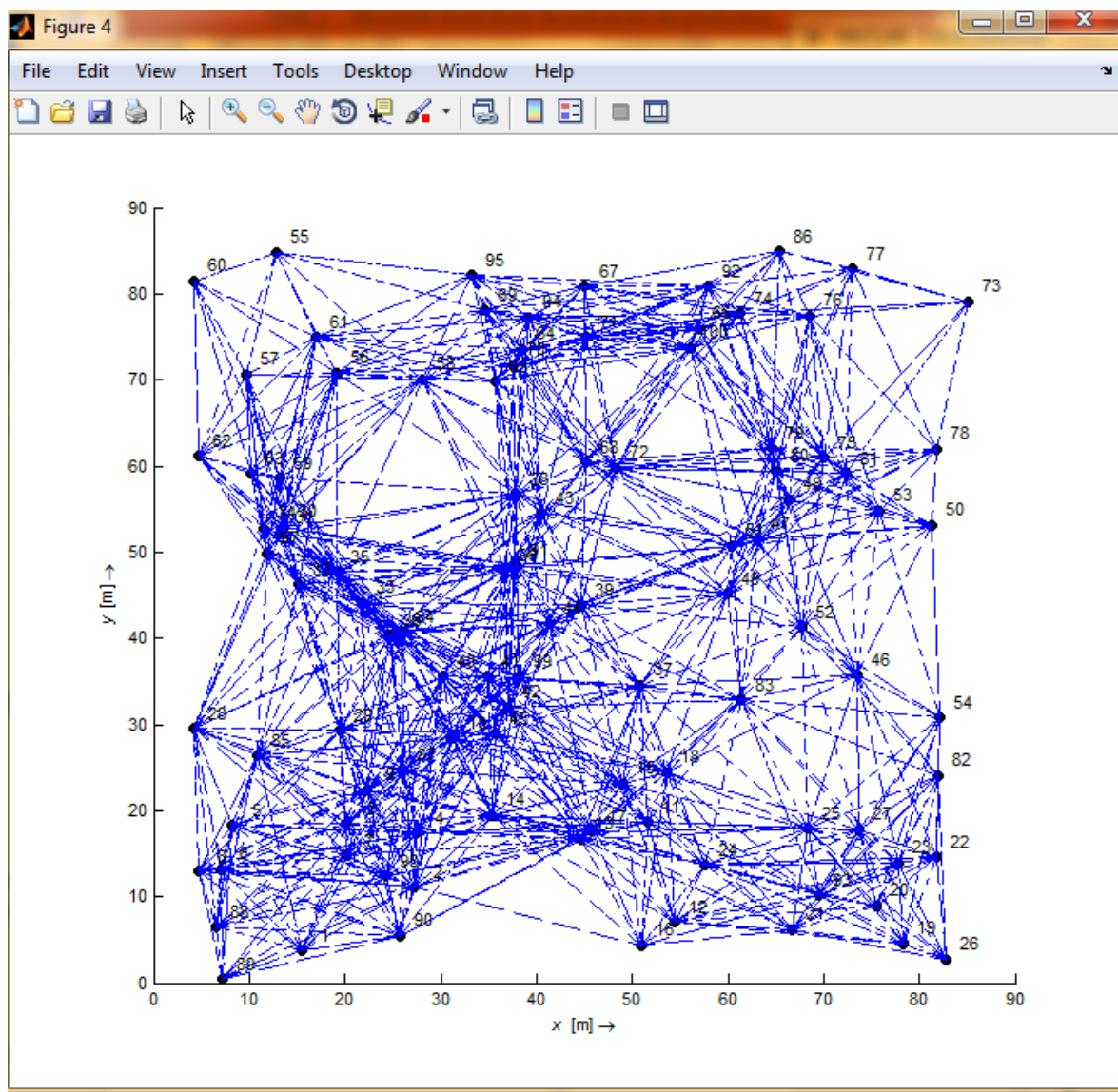


Fig. 5.1 Parámetros ideales de la red considerando el espacio libre (alfa=2)

Considerando el mejor y peor escenario se tomó como consideración 100 nodos para una mejor visualización de simulación, adicionalmente se colocó una distancia entre nodos de 80m desplegados al azar, bajo las condiciones propias en un ambiente hostil. Lo cual mostró los siguientes resultados.

Utilizando un ALFA 4 y 5

El mejor caso (1):

Con una Potencia= 0.6mW, un alfa = 5 y con el número de nodos = 100.

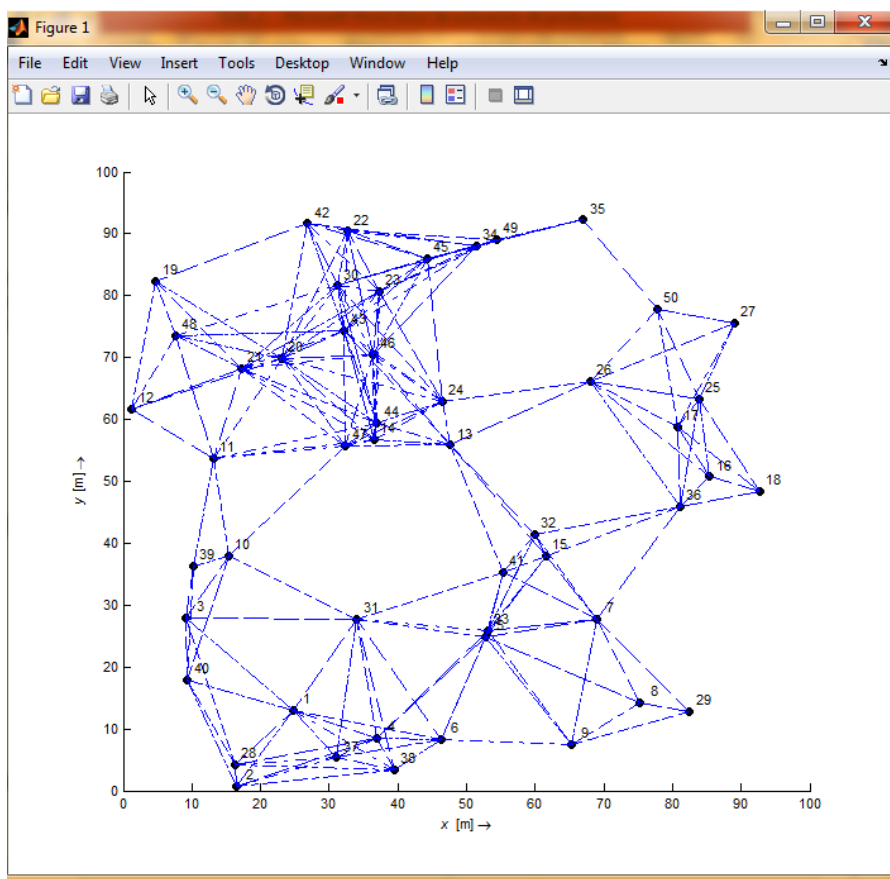


Fig. 5.2 Simulación a la mínima potencia, adoptando un coeficiente de pérdida alfa de 5 propio del ambiente real

El mejor caso (2):

Con una Potencia= 40mW, un alfa = 4 y con el número de nodos = 100.

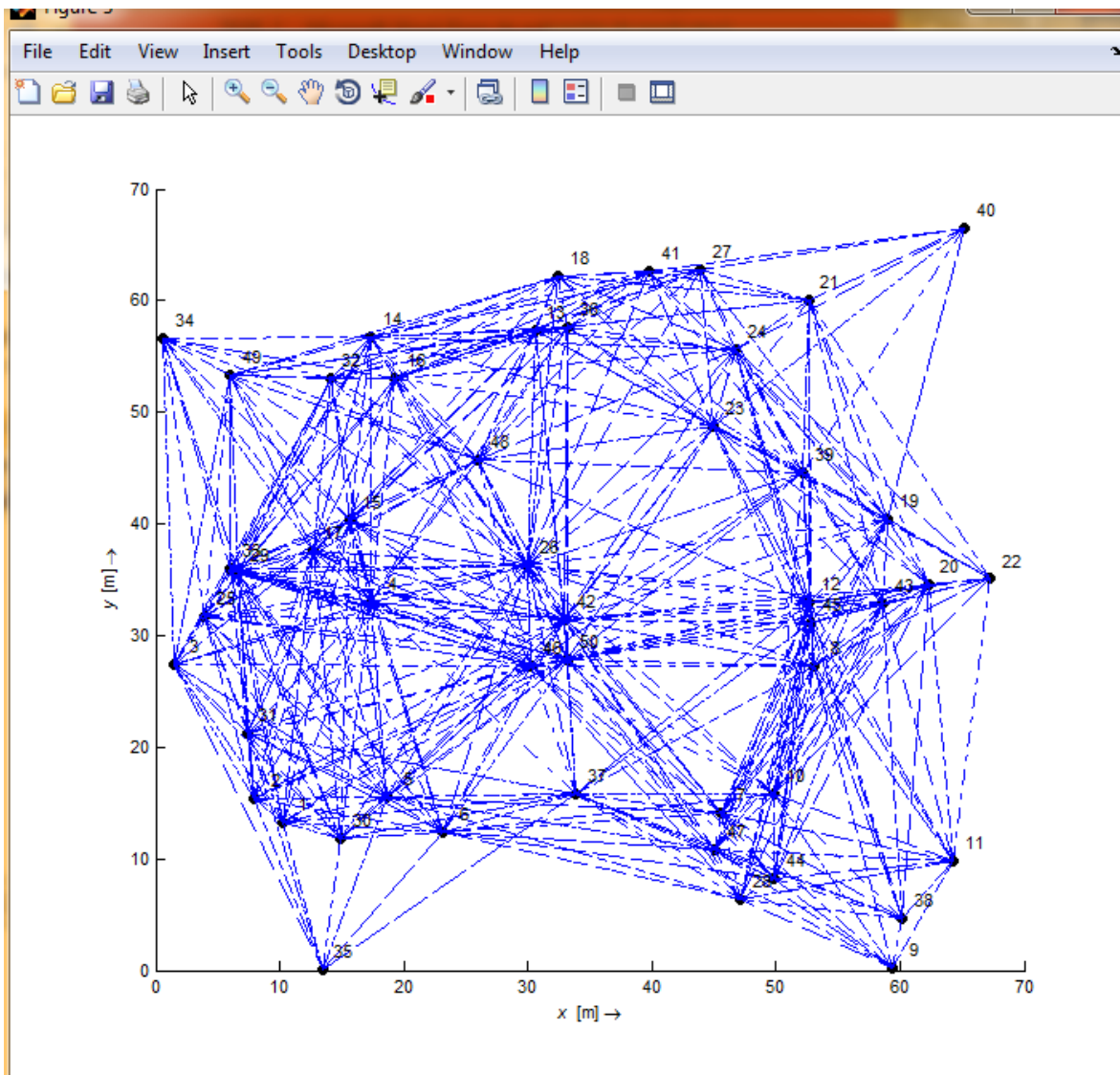


Fig. 5.3 Simulación con la máxima potencia, adoptando un coeficiente de pérdida alfa de 4 propio del ambiente real

El peor caso (3):

Con una Potencia= 1mW, un alfa = 5 y con el número de nodos = 50.

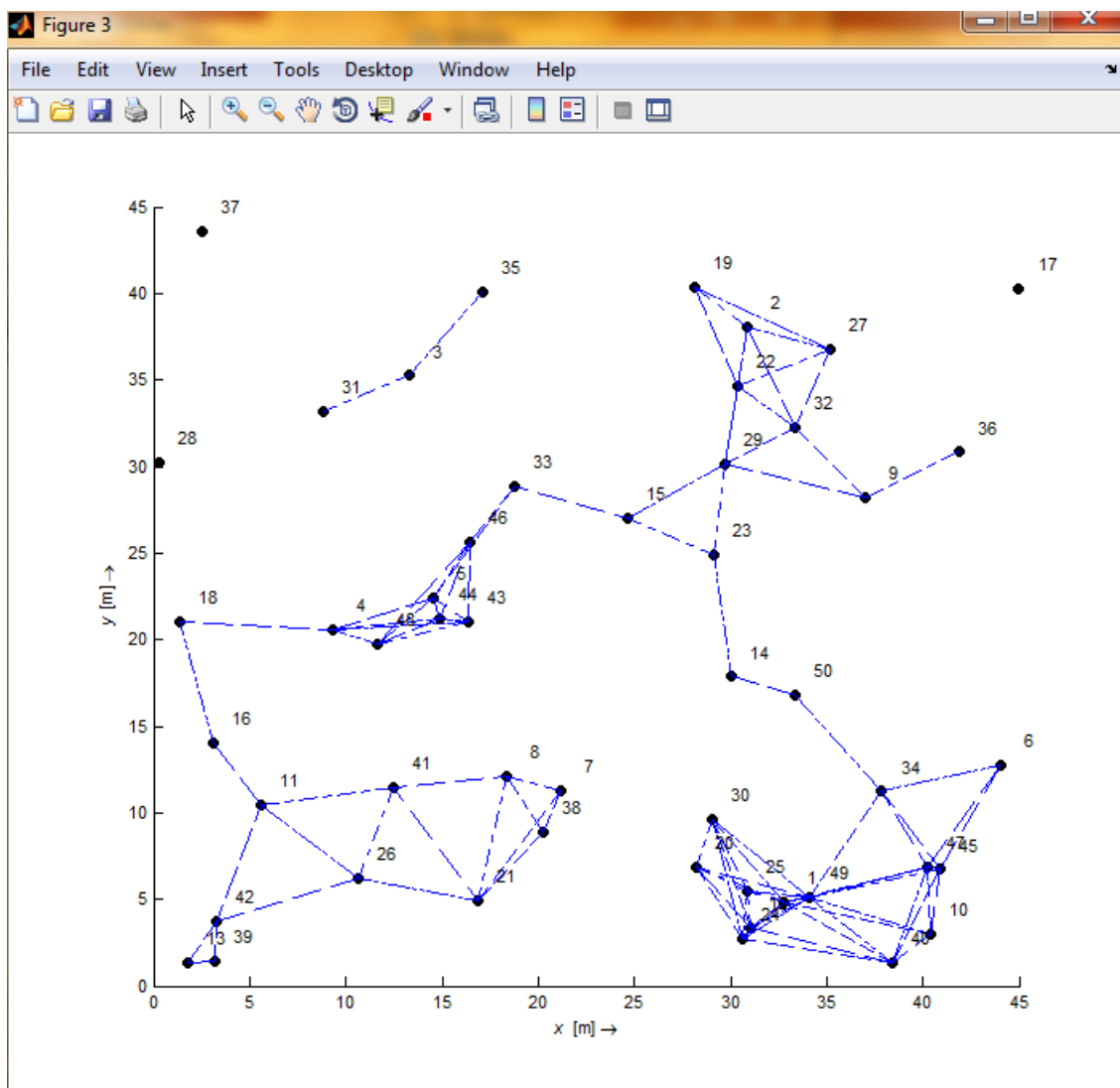


Fig. 5.5 Simulación con una mínima potencia, adoptando un coeficiente de pérdida alfa de 5 propio del ambiente real asumiendo una distancia de 150m

El peor caso (4):

Con una Potencia= 0.6mW, un alfa= 6 y con el número de nodos = 50.

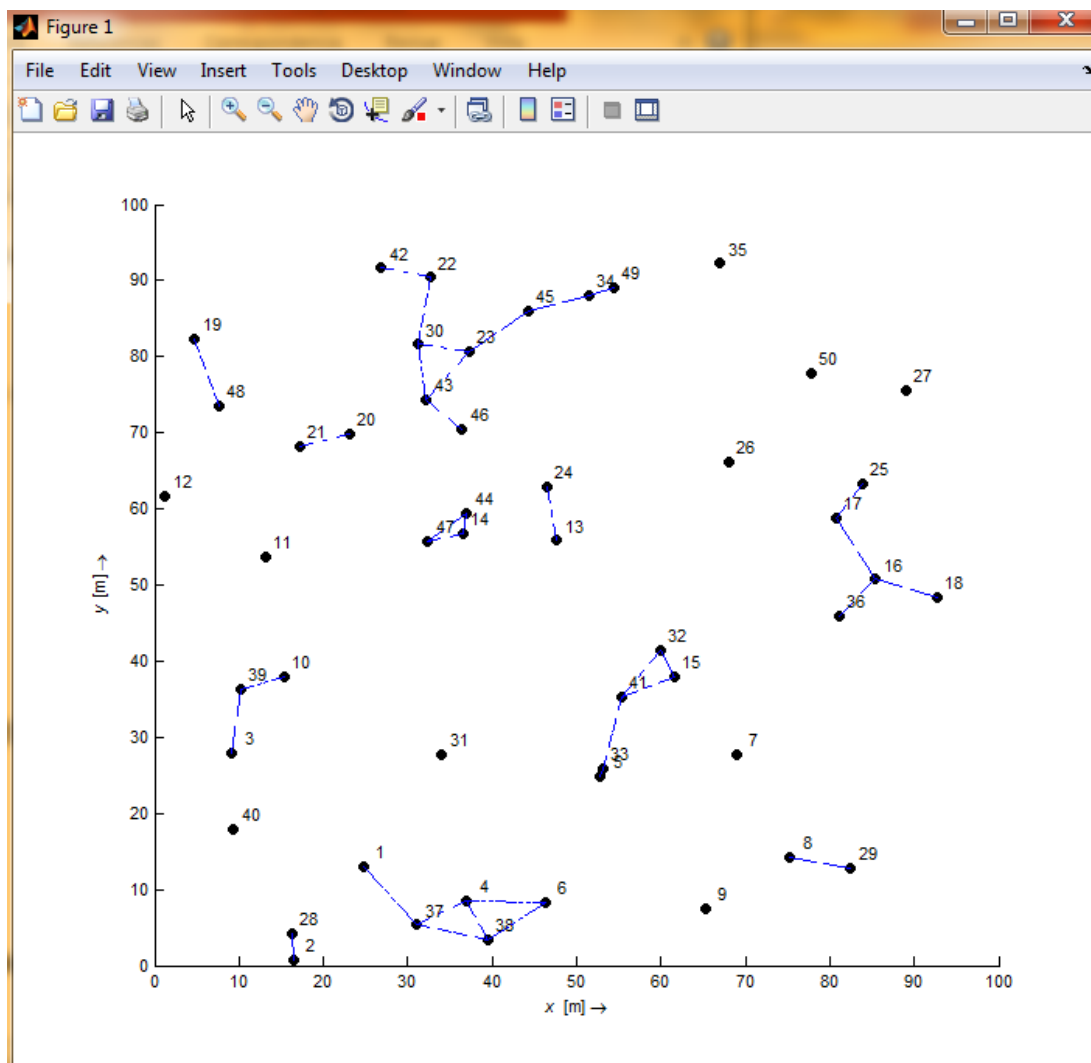


Fig. 5.4 Simulación con la mínima potencia, adoptando un coeficiente de pérdida alfa de 6 propio del ambiente real asumiendo una distancia de 100m

Ahora veamos que sucede si variamos el ALFA:

Usando un ALFA de 6 y 7

Con una Potencia= 10mW, un alfa = 6 y con el número de nodos = 50.

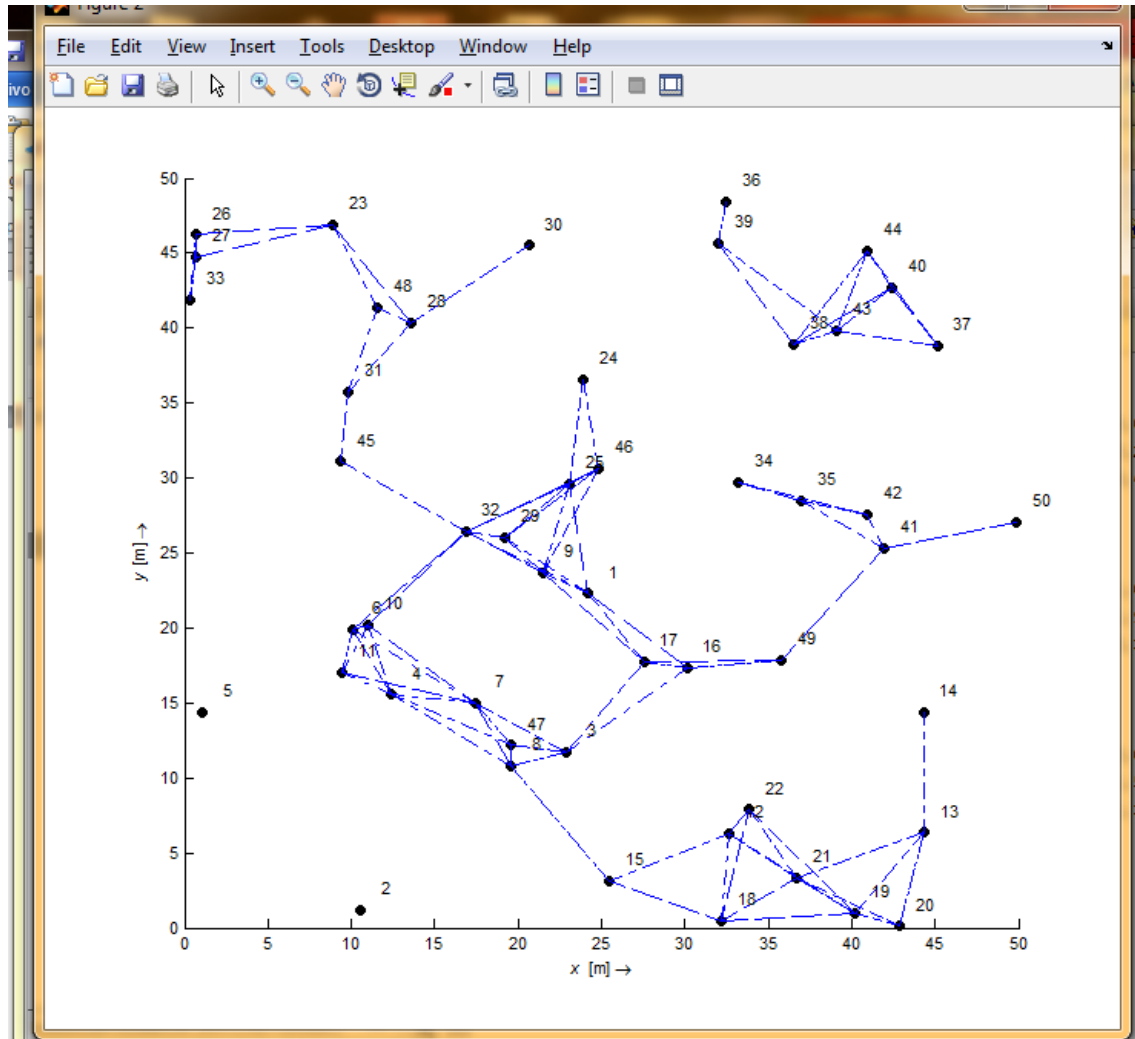


Fig. 5.6 Simulación con una potencia intermedia, adoptando un coeficiente de pérdida alfa de 7, asumiendo una distancia de 100m

Con una Potencia= 5mW, un alfa = 7 y con el número de nodos = 50.

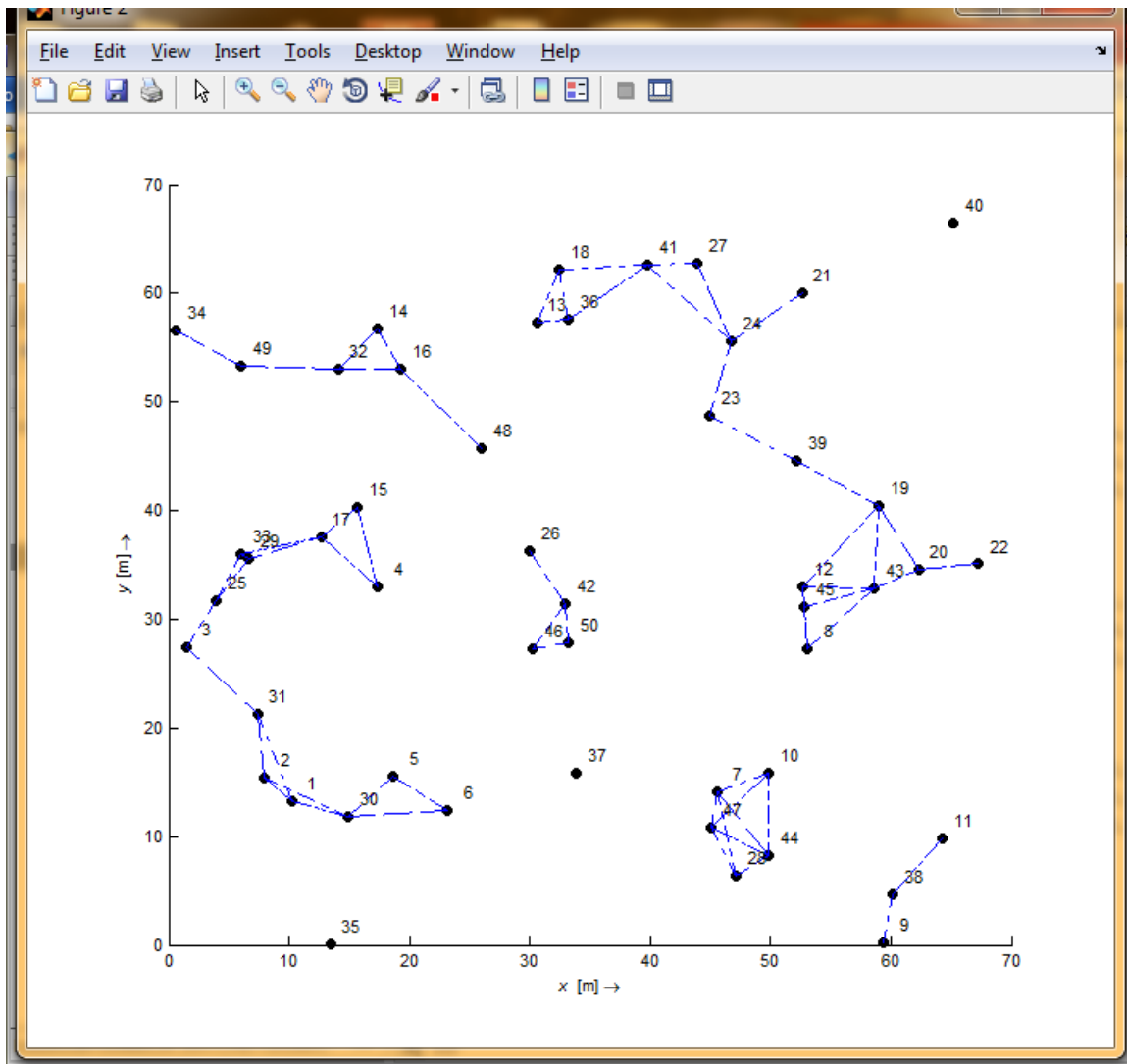


Fig. 5.7 Simulación con una potencia intermedia, adoptando un coeficiente de pérdida alfa de 7, asumiendo una distancia de 100m

Una vez visto que la simulación tiene el comportamiento esperado, podemos deducir la relación potencia vs distancia a través de las formulas antes mencionadas, por lo que partiremos de lo siguiente para poder determinar el punto de quiebre, una frecuencia de 2400Hz, un $d_0 = 1\text{m}$, $P_L = 90\text{dBm}$, $d > d_0$ y $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$

$$P_L = P_L(d_0) + 10 \alpha \log \frac{d}{d_0} = 40.046[\text{dB}] + 10(3.1) \log \left[\frac{d}{1\text{m}} \right]$$

$$d = 71.80 [\text{m}] \approx 72[\text{m}]$$

Así definimos el punto de quiebre de la relación distancia vs potencia de un equipo con las especificaciones mencionadas.

Sin embargo no cumple en la teoría con lo especificado en el dispositivo que se tomó de ejemplo, ya que las especificaciones indican que es estable a distancias de 100m con un exponente de atenuación de 3.1 pero teóricamente el funcionamiento estable llega a 71,80m. A pesar de esto a 2.8 si cumple con los 100m de estabilidad, lo que garantizaría nuestra propagación.

Otra forma de poder calcular la D_{min} es la siguiente:

$$D_{min} = d_0 * (P_{tx}/\beta)^{1/\alpha}$$

Donde D_{min} es el rango mínimo entre nodos d_0 es una distancia inicial por lo general 1m, P_{tx} es la potencia del transmisor, Beta es la sensibilidad del receptor y alfa el coeficiente de perdida. Esta fórmula es válida cuando $P_r \geq \beta$ por lo que

$$P_r = P_{tx} * \left(\frac{d_0}{d_{min}} \right)^\alpha = \beta$$

Ahora la potencia mínima que se necesita viene bajo los parámetros de fábrica es -2dBm o su equivalente a mW el que encontramos con la relación:

$$P_{(mW)} = 1mW \cdot 10^{(P_{(dBm)} / 10)}$$

Lo que nos da un equivalente a 0.63 mW.

La cual se calcula partiendo de la idea de que para tener conectividad se debe tener $P_r \geq \beta$ siendo beta la sensibilidad del receptor con lo que la relación es:

$$P_{Rx} = P_{Tx} * (D_{min})^\alpha = \beta$$

$$P_{Tx} = 0.6 mW$$

Para ver de mejor manera se simulo la relación distancia vs potencia con diferentes valores de alfa para los mismos parámetros:

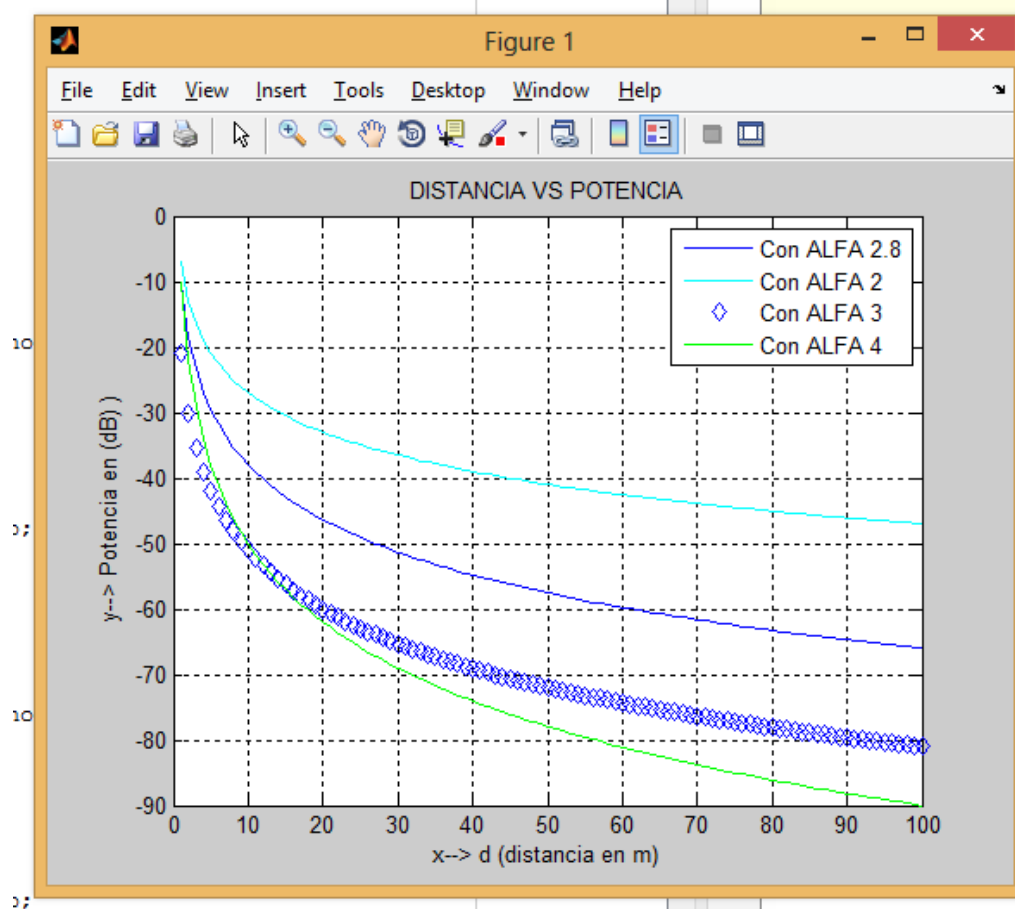


Fig. 5.8 Simulación de la relación Distancia vs Potencia a diferentes valores alfa

5.4 Compilación de resultados, demostrando el alcance del simulador.

Compilando los resultados, como se muestra en la Fig.5.8 de este capítulo 5 y en los respectivos casos mostrados. Se puede demostrar que el alcance del simulador es el adecuado, ya que combina multi-hop así como la validación mediante la predicción de conectividad a través de diversos escenarios considerando las pérdidas a diferentes coeficientes alfa. Dando

como resultado un comportamiento esperado y a su vez muy pegados a la realidad de acuerdo a los parámetros y las especificaciones de los nodos sensores de acuerdo a sus respectivas marcas. Demostrando así los parámetros mínimos en los cuales nuestra red tiene un correcto funcionamiento, así mismo muestra cómo se comportaría la red con diversos parámetros moldeables a diversas exigencias del medio.

Adicionalmente se pudo sacar la distancia mínima de funcionamiento entre nodos la cual es de 72m entre nodos, distancia que es la máxima permitida para que exista una confiabilidad al 1%. La simulación da por confiable, segura, de fácil despliegue y proporciona parámetros importantes para que la red de los resultados esperados.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

1. El principal elemento diferenciador es el desarrollo de un software que puede simular el comportamiento de una red de sensores, tomando una típica propagación en los diferentes ambientes observados comúnmente en las plantas de industrias petroleras y de gas.

2. En base a los estudios realizados, se puede tener una visión de satisfacción con la validez del simulador. Se logró obtener una visión de las más populares arquitecturas inalámbricas de bajo consumo adoptado en la automatización industrial.
3. El simulador permite modelar:
 - i. los diferentes escenarios de propagación en el peor ambiente posible así como en el mejor de los ambientes
 - ii. topología de red basada en multi-hop.
4. Fue posible demostrar que las distancias marcadas por las especificaciones de cierta marca, si son aceptables y ajustadas a la realidad, así mismo como la potencia mínima necesaria para que exista conectividad.

Resultados que cumplen con certeza los objetivos trazados.

Recomendaciones

1. Adicionalmente se recomienda complementar el código de programación para que se pueda simular la conectividad adoptando otros tipos de topología.

2. Se sugiere realizar un estudio más profundo que simule la capa de transporte para los escenarios aquí mencionados.
3. Se recomienda complementar el código para también especificar el tiempo de vida del sensor a diferentes potencias, ya que es conocido que a mayor potencia mayor consumo de energía.
4. Se recomienda hacer una prueba con 3 nodos sensores de cualquier marca configurados de acuerdo a los parámetros estudiados para ver si los efectos reales de estos dispositivos son los mismos que los de la simulación.

APÉNDICE

Código utilizado en MATLAB

```
Function tesis1
load networksDB.mat
alfa = input ('elija el exponte de perdida de trayectoria (alfa)entre 2
y 4 ')
d = input ('elija la potencia desde -2 a 10 (mW) ')
N = input ('elija la población de nodos entre 50, 100 o 400 ')
R= 80;
SSD = 3.2;
PL_D0 = 55.0;
D0 = 1;

switch (alfa)
    case {2}
        h={2};
    case {2.1}
        h={2.1};
    case {2.2}
        h={2.2};
    case {2.3}
        h={2.3};
    case {2.4}
        h={2.4};
    case {2.5}
        h={2.5};
    case {2.6}
        h={2.6};
    case {2.7}
        h={2.7};
    case {2.8}
        h={2.8};
    case {2.9}
        h={2.9};
    case {3}
        h={3};
    case {3.1}
        h={3.1};
    case {3.2}
        h={3.2};
    case {3.3}
```

```

        h={3.3};
    case {3.4}
        h={3.4};
    case {3.5}
        h={3.5};
    case {3.6}
        h={3.6};
    case {3.7}
        h={3.7};
    case {3.8}
        h={3.8};
    case {3.9}
        h={3.9};
    case {4}
        h={4};
    otherwise
        error ('elija alfa entre 2 y 4')
end

switch lower(d)
    case{-2,-1}
        p=1;
    case{0,1}
        p=2;
    case{2,3}
        p=3;
    case{4,5}
        p=4;
    case{6,7}
        p=5;
    case{8,9}
        p=6;
    case{10}
        p=7;
    otherwise
        error('elija la potencia solo con los valores sugeridos(mW)')
end
switch lower(N)
    case{50}
        net=databaseNets.net50(:, :, p)

    case{100}
        net=databaseNets.net100(:, :, p)

    case{400}
        net=databaseNets.net400(:, :, p)

    otherwise
        error('elija la población de nodos entre 50, 100 o 400!')

```



```

end

printNet(R,net,alfa)

function printNet(R,netM,alfa)
    figure('Color','w','Position',[100 100 700 600])
    set(gca,'FontSize',8,'YGrid','off')
    xlabel('\it x \rm [m] \rightarrow')
    ylabel('\it y \rm [m] \rightarrow')
    hold on;

plot(netM(2,:),netM(3,:), 'ko', 'MarkerSize',5, 'MarkerFaceColor', 'k');
    hold on;

    for j=1:numel(netM(1,:))
        for jTemp=1:numel(netM(1,:))
            X1=netM(2,j);
            Y1=netM(3,j);
            X2=netM(2,jTemp);
            Y2=netM(3,jTemp);
            xSide=abs(X2-X1);
            ySide=abs(Y2-Y1);
            d=sqrt(xSide^alfa+ySide^alfa);
            if (d<R) && (j~=jTemp)
                vertice1=[X1,X2];
                vertice2=[Y1,Y2];
                plot(vertice1,vertice2,'-.b','LineWidth',0.1);
                hold on;
            end
        end
    end

    end

v=netM(1,:);
vv=v';
s=int2str(vv);

text(netM(2, :)+1,netM(3, :)+1,s, 'FontSize',8, 'VerticalAlignment', 'Baseline');

for j=1:numel(netM(1,:))
    for jTemp=1:numel(netM(1,:))
        X1=netM(2,j);
        Y1=netM(3,j);
        X2=netM(2,jTemp);
        Y2=netM(3,jTemp);
        xSide=abs(X2-X1);

```

```

        ySide=abs(Y2-Y1);
        d=sqrt(xSide^alfa+ySide^alfa);
        PL = - PL_D0 - (10*alfa*(log(dist/D0)/log(10))) + randn * SSD;
        rssi(jTemp,j) = Pout(jTemp) + PL;
        rssi(j,jTemp) = Pout(j) + PL;
    end
end

for j=1:numel(netM(1,:))
    for jTemp=1:numel(netM(1,:))
        if (jTemp==j)
            pe(jTemp,j) = 0;
        else
            snr = ( 10^((rssi(jTemp,j) - noiseFloor(j))/10) ) / .64;
            pe(jTemp,j) = 0.5*( exp(-0.5*snr) + Q( sqrt(snr) ) );
        end
    end
end

for jTemp=1:numel(netM(1,:))
    for j=1:numel(netM(1,:))
        if (jTemp == j)
            prrM(jTemp,j) = 1;
        else
            preseq = (1-pe(jTemp,j))^(8*PREAMBLE_LENGTH);
            prrM(jTemp,j) = preseq*(1-
pe(jTemp,j))^(8*(SSD)));
        end
    end
end

function tesis2
fieldX=500;
fieldY=300;
grid= 0;
alfa= 2,8;
numNodes = input ('elija número de nodos      ')
receiver = input ('elija la mota máster      ')

numNodesXY=round(sqrt(numNodes));
step=10;

R=calc_R(numNodes,fieldX,fieldY)
[netM,RxTxM]=create_netM(numNodesXY,step,grid,fieldX,fieldY);
figure('Color','w','Position',[100 100 800 500]);

```

```

E=printNet(R,netM,fieldX,fieldY);
pause;
RxTxM=simulation(netM,R,fieldX,fieldY,receiver,RxTxM,E,numNodes)
print_RxTxM(RxTxM,numNodes)

function R=calc_R(numNodes,fieldX,fieldY)
    p=sqrt((fieldX^2)+(fieldY^2));
    R=p*sqrt(log10(numNodes)/numNodes);

function [netM,RxTxM]=create_netM(numNodesXY,step,grid,fieldX,fieldY)
ID=1;
for i=1:numNodesXY
    for j=1:numNodesXY
        netM(1,ID)=ID;
        RxTxM(1,ID)=ID;
        if grid==1
            x=step*j+50;
            y=step*i+50;
        else
            x=rand*fieldX;
            y=rand*fieldY;
        end
        netM(2,ID)=x;
        netM(3,ID)=y;
        RxTxM(2,ID)=0;
        RxTxM(3,ID)=0;
        ID=ID+1;
    end
end

function E=printNet(R,netM,fieldX,fieldY)
    set(gca,'FontSize',8,'YGrid','off')
    xlabel('\it x \rm [m] \rightarrow')
    ylabel('\it y \rm [m] \rightarrow')

plot(netM(2,:),netM(3,),'ko','MarkerSize',5,'MarkerFaceColor','k');
axis([0 fieldX 0 fieldY]);
hold all;
radek=1;
for j=1:numel(netM(1,:))
    for jTemp=1:numel(netM(1,:))
        X1=netM(2,j);
        Y1=netM(3,j);
        X2=netM(2,jTemp);
        Y2=netM(3,jTemp);
    end
end

```

```

xSide=abs(X2-X1);
ySide=abs(Y2-Y1);
d=sqrt(xSide^2.2+ySide^2.2);
if (d<R) &&(j~=jTemp)
    vertice1=[X1,X2];
    vertice2=[Y1,Y2];
    plot(vertice1,vertice2,'-.k','LineWidth',0.1);
    hold all;
    E(radek,1)=j;
    E(radek,2)=jTemp;
    E(radek,3)=d;
    radek=radek+1;
end
end
end
v=netM(1,:);
vv=v';
s=int2str(vv);

text(netM(2,:)+1,netM(3,:)+3,s,'FontSize',8,'VerticalAlignment','Baseline');
    hold all;

function sp=shortestPath(E, sender, receiver)

    [dsp,sp]=grShortPath(E, sender, receiver);

function mark_Ref_Nodes (net, sp, barva)
    for j=1:numel(sp)
        node=sp(j);
        n_X=net(2,node);
        n_Y=net(3,node);
        plot (n_X,n_Y, 'bo', 'LineWidth',3 , 'MarkerEdgeColor',
barva, 'MarkerSize', 6);
    end

function [RxTxM, sp]=unicast(E, RxTxM, sender, receiver)
sp=shortestPath(E, sender, receiver)
for j=1:numel(sp)
    node=sp(j);
    if j==1
        RxTxM(3, node)=RxTxM(3, node)+1;
    elseif j==numel(sp)
        RxTxM(2, node)=RxTxM(2, node)+1;
    else
        RxTxM(2, node)=RxTxM(2, node)+1;
    end
end

```

```

        RxTxM(3,node)=RxTxM(3,node)+1;
    end

end

function print_RxTxM(RxTxM,numNodes)
figure('Color','w','Position',[100 100 800 500])
RxTxM(4,:)=RxTxM(2,:)+RxTxM(3,:);
bar(RxTxM(4,:));
set(gca,'FontSize',6,'YGrid','off','YGrid','on','XLim',[0
numNodes],'XMinorTick','on');
xlabel('\it node ID \rm [-] \rightarrow');
ylabel('\it Number of messages \rm [-] \rightarrow');

hold on;

function
RxTxM=simulation(net,R,fieldX,fieldY,receiver,RxTxM,E,numNodes)
    for j=1:numNodes
        sender=j;
        if sender~=receiver
            [RxTxM,sp]=unicast(E,RxTxM,sender,receiver);
            printNet(R,net,fieldX,fieldY);
            mark_Ref_Nodes (net,sp,'r');
            pause(0.01);
            hold off;
        end
    end
end

function tesis3
%grafica D vs P
clc;
close all;
clear all;
d = 1:1:100;
Pld = -2; %Potencia minima

%ALFA 2.8

alfa = 2.8;
Xrho = 8;
Pldo1 = Pld - 10*alfa*log10(d) - Xrho;

%ALFA 2
alfa = 2;

```

```
Xrho = 8;  
Pldo = Pld - 10*alfa*log10(d) - Xrho;  
  
%ALFA 3  
alfa = 3;  
Xrho = 8;  
Pldo0 = Pld - 10*alfa*log10(d) - Xrho;  
  
%ALFA 4  
alfa = 4;  
Xrho = 8;  
Pldx = Pld - 10*alfa*log10(d) - Xrho;  
  
figure(1);  
plot(d,Pldo1,'b',d,Pldo,'c',d,Pldo0,'d',d,Pldx,'g');  
xlabel('x--> d (distancia en m)');  
ylabel(' y--> Potencia en (dB) ');  
title('DISTANCIA VS POTENCIA');  
hold on;  
legend('Con ALFA 2.8', 'Con ALFA 2', 'Con ALFA 3','Con ALFA 4');  
grid on;
```

Base de datos utilizada

The screenshot displays the MATLAB 7.10.0 (R2010a) interface. The main window is the Variable Editor for a struct named 'databaseNets'. The struct contains three fields:

| Field | Value | Min | Max |
|--------|-------------------|--------|-----------|
| net50 | <3x50x10 double> | 0.0679 | 92.7316 |
| net100 | <3x100x10 double> | 0.0200 | 136.95... |
| net400 | <3x400x10 double> | 0.0307 | 400 |

The Command Window at the bottom shows a partial command: 'restore previous default settings by selecting'.

The image displays three MATLAB windows: Variable Editor, Command Window, and Workspace.

Variable Editor - databaseNets.net50
 databaseNets.net50 <3x50x10 double>
 val(:,:,1) =
 Columns 1 through 4
 1.0000 2.0000 3.0000 4.0000
 24.7035 16.4364 9.1561 36.9731
 12.9460 0.7854 27.9894 8.4312
 Columns 5 through 8
 5.0000 6.0000 7.0000 8.0000
 52.8425 46.3116 68.8934 75.3071
 24.8019 8.3565 27.6611 14.2249
 Columns 9 through 12

Command Window
 New to MATLAB? Watch this [Video](#), see [Demos](#), or read [Getting Started](#).
 16.0594 49.2802 47.4117 105.8657
 25.9523 0.1278 37.3489 102.8093
 Columns 85 through 88
 85.0000 86.0000 87.0000 88.0000
 65.8369 104.3021 88.5447 9.9939
 87.4562 52.9675 90.4373 19.8752
 Columns 89 through 92
 89.0000 90.0000 91.0000 92.0000
 30.6540 27.3791 103.6920 34.6619
 53.6424 92.0501 34.7449 50.9681
 Columns 93 through 96
 93.0000 94.0000 95.0000 96.0000
 16.0212 75.7479 107.1892 100.4238
 63.2901 27.2372 44.9265 45.2276
 Columns 97 through 100
 97.0000 98.0000 99.0000 100.0000
 80.1659 33.4350 100.5276 97.3774
 69.9314 33.9445 51.6655 90.5577

Workspace
 Name Value
 N 100
 R 25
 d 12
 databaseNets <1x3x50x10 double>
 net <3x50x10 double>
 p 3

Command Window
 end
 end
 end
 v=netM(1,:);
 vv=v';
 s=int2str(vv);
 text(netM(2,:),s);
 d=12
 N=100
 plot N
 plot (N,d)

BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. Maticsek: “Real-time communication mac protocols for wireless sensor networks”: Programa computacional para el análisis de estabilidad de voltaje por el método de continuación.
URL: http://dspace.epn.edu.ec/bitstream/15000/8884/4/t11025_capitulo_4.pdf
(Última visita: 19/10/2013)
- [2] Muaz Niazi, Amir Hussain: “A novel agent-based simulation framework for sensing in complex adaptive environments”. IEEE sensors journal, vol.11 no. 2, 404–412. Paper. 2011.
- [3] Adams, Jon y Bob Heile (2005-10) [IEEE]: “Busy as a ZigBee”
URL: <http://es.wikipedia.org/wiki/zigbee> (Última visita: 19/10/2013)
- [4] J. Hou, N. Lie, and I. Stojmenovic: “topology construction and maintainance in wireless sensor networks”, in handbook of sensor networks: “Algorithms and architectures”, I. Stojmenovic, Ed. John Wiley and sons, sep.2005, pp. 311–341.
- [5] M. koutny, J. Misurec, and P. Mlynek: “The new approaches of a multicasting in the wireless sensor networks”: in 33rd international conference on telecommunications and signal processing Tsp-2010. Budapest, 2010, pp. 342–345.

- [6] Web93 BCN: “norma isa s100 delta ingeniería”.
URL: <http://www.deltaingenieria.es/norma-isa-s100> (Última visita: 19/10/2013)
- [7] M. Simek. (2010): “Low power wireless & sensor laboratory”.
URL: <http://reddesensoresbase.utko.feec.vutbr> (Última visita: 20/10/2013)
- [8] S. Singh, C. Raghavendra: “pamas poweraware multi-access protocol with signalling for ad hoc networks”: Sigcomm comput. commun. rev., vol. 28, no. 3, pp. 5–26, 1998.
- [9] GC: “ZigBee tutorial” submitted on 18/02/2013.
URL: <http://www.tutorial-reports.com/wireless/zigbee/tutorial.php>
(Última visita: 20/10/2013)
- [10] Intech: “wireless standard for process industries wins approval” Tsp-june 2009
URL: http://www.isa.org/template.cfm?section=press_releases5&template=/contentmanagement/contentdisplay.cfm&contentid=78964
(Última visita: 20/10/2013)
- [11] M. Soledad Escolar Díaz: “wireless sensor network”: Estado del arte e investigación.
URL: http://arcos.inf.uc3m.es/~sescolar/index_files/presentacion/red_de_sensores.pdf (Última visita: 21/10/2013)

[12] Edgar J. Cobos H: “Estudio de las redes sensoriales como una nueva alternativa de comunicación inalámbrica”.

URL: <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/2372/1/t-espe-025074.pdf>

(Última visita: 21/10/2013)

[13] Javier Q. Morata: “Estudio y evaluación de prestaciones de redes inalámbricas de sensores”.

URL: http://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/10354/proyecto_querol.pdf

(Última visita: 21/10/2013)

[14] S. Lindsey, C. Raghavendra: “Pegasis: power-efficient gathering in sensor information systems”: IEEE aerospace conference proceedings, 2002, vol. 3, 9-16 pp. 1125-1130.

[15] D. Chicaiza García: “implementación de un sistema domótico de gran cobertura, monitoreado a través de internet, utilizando el estándar IEEE 802.15.4” 2009.

URL: repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/662/1/t-espe-020962.pdf

(Última visita: 21/10/2013)

[16] F. Gudiño: “programa computacional para el análisis de estabilidad de voltaje por el método de continuación” 2012.

URL: http://dspace.epn.edu.ec/bitstream/15000/8884/4/t11025_capitulo_4.pdf

(Última visita: 22/10/2013)

- [17] C. Bettstetter: “On the minimum node degree and connectivity of a wireless multihop network”: Proceedings of the 3rd acm international symposium on mobile ad hoc networking & computing. New York, NY, USA, 2002, pp. 80–91.
- [18] Fundación wikimedia inc.: “documento IEEE 802.15”
URL: http://es.wikipedia.org/wiki/ieee_802.15.4 (Última visita: 23/10/2013)
- [19] Wes Iversen: “Wirelesshart ready for prime time”
URL: <http://www.automationworld.com/information-management/wirelesshart-ready-prime-time> (Última visita: 23/10/2013)
- [20] Fundación Wikimedia inc.: “isa100.11”
URL: <http://en.wikipedia.org/wiki/isa100.11a> (Última visita: 23/10/2013)
- [21] J. Belando García: “Desarrollo de un prototipo para interconectar una red de sensores via GSM” 2008.
URL: <http://repositorio.bib.upct.es/dspace/bitstream/10317/744/1/pfc2847.pdf>
(Última visita: 24/10/2013)
- [22] Fundación Wikimedia inc.: “Algoritmo de Dijkstra”
URL: http://es.wikipedia.org/wiki/Algoritmo_de_Dijkstra
(Última visita: 1/12/2013)
- [23] Javier Querol Morata: “Estudio y evaluación de prestaciones de redes inalámbricas de sensores”
URL: http://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/10354/proyecto_querol.pdf
(Última visita: 1/10/2013)

[24] Dr. Faouzi Derbel, Notas del curso Wireless Sensor Networks in Sensor Systems, Qundis Advanced Measuring Solutions, EPSC, Febrero 2009

[25] Zhin Ren: "Simulation Modelling Theory", 19 (2011) pp. 17-18