



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y
AUTOMATISMO

TEMA:

**Estudio de una red de sensores inalámbricos con tecnología Wi-Fi y
radiofrecuencia, aplicado a un sistema de control domótico inteligente
distribuido**

AUTOR:

Fuentes Espinoza, Pablo Gustavo

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO ELECTRÓNICO EN CONTROL Y AUTOMATISMO

TUTOR:

Ing. Mendoza Merchán, Eduardo Vicente, Mgs.

Guayaquil, Ecuador

12 de marzo de 2018



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y
AUTOMATISMO

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo de titulación, fue realizado en su totalidad por **Fuentes Espinoza, Pablo Gustavo**, como requerimiento para la obtención del Título de **Ingeniero Electrónico en Control y Automatismo**.

TUTOR

f. _____
Ing. Mendoza Merchán, Eduardo Vicente, Mgs.

DIRECTOR DE LA CARRERA

f. _____
Ing. Heras Sánchez, Miguel Armando, MSc.

Guayaquil, a los 12 días del mes de marzo del año 2018



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y
AUTOMATISMO

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, Fuentes Espinoza, Pablo Gustavo

DECLARO QUE:

El Trabajo de Titulación, **Estudio de una red de sensores inalámbricos con tecnología Wi-Fi y radiofrecuencia, aplicado a un sistema de control domótico inteligente distribuido**, previo a la obtención del Título de **Ingeniero Electrónico en Control y Automatismo**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

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

Guayaquil, a los 12 días del mes de marzo del año 2018

EL AUTOR

f. _____
Fuentes Espinoza, Pablo Gustavo



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y
AUTOMATISMO

AUTORIZACIÓN

Yo, Fuentes Espinoza, Pablo Gustavo

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación, **Estudio de una red de sensores inalámbricos con tecnología Wi-Fi y radiofrecuencia, aplicado a un sistema de control domótico inteligente distribuido**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 12 días del mes de marzo del año 2018

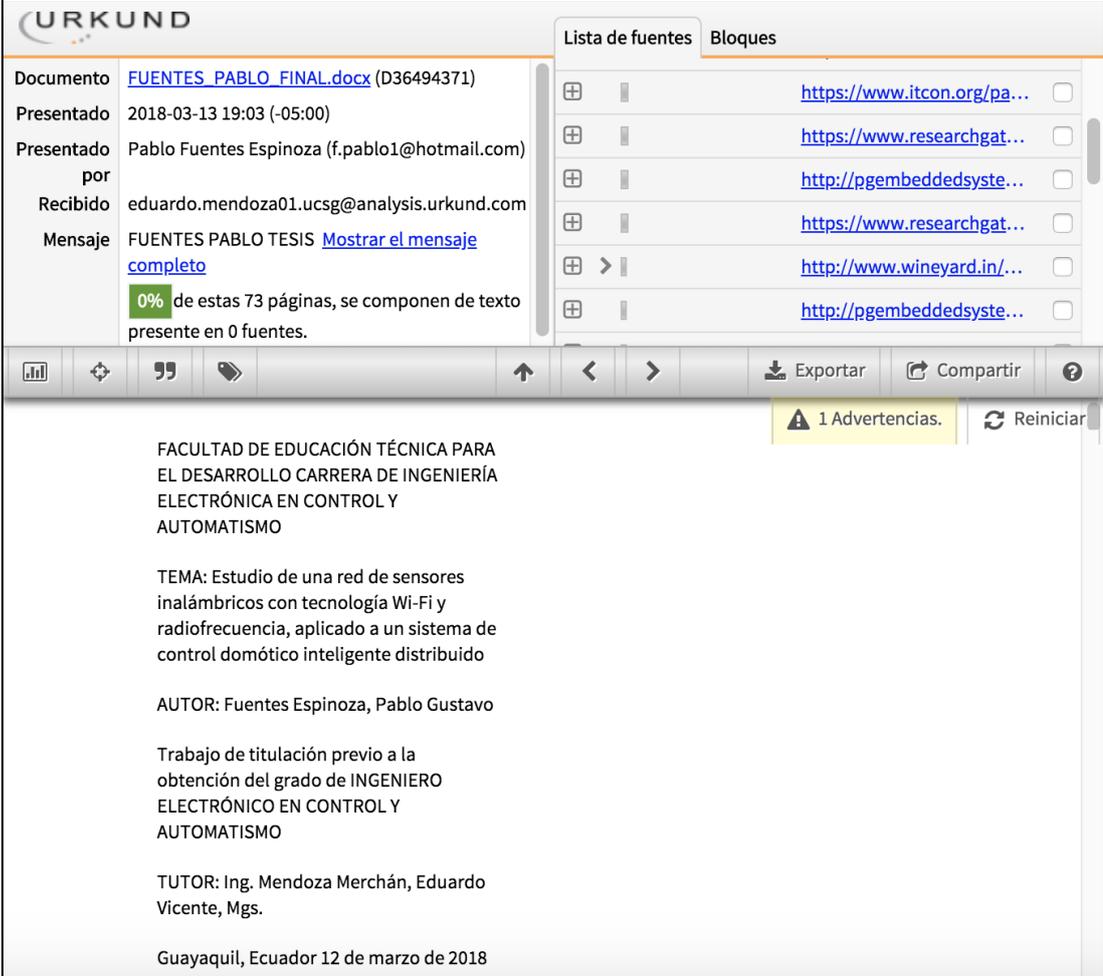
EL AUTOR:

f. _____
Fuentes Espinoza, Pablo Gustavo

REPORTE URKUND

TÍTULO: “Estudio de una red de sensores inalámbricos con tecnología Wi-Fi y radiofrecuencia, aplicado a un sistema de control domótico inteligente distribuido.”

AUTOR: Fuentes Espinoza, Pablo Gustavo.



The screenshot shows the URKUND interface. On the left, document details are listed: 'Documento' is 'FUENTES_PABLO_FINAL.docx' (ID: D36494371), 'Presentado' is '2018-03-13 19:03 (-05:00)', 'Presentado por' is 'Pablo Fuentes Espinoza (f.pablo1@hotmail.com)', 'Recibido por' is 'eduardo.mendoza01.ucsg@analysis.orkund.com', and 'Mensaje' is 'FUENTES PABLO TESIS' with a link to 'Mostrar el mensaje completo'. A green box indicates '0% de estas 73 páginas, se componen de texto presente en 0 fuentes.' On the right, a 'Lista de fuentes' tab is active, showing a list of URLs with checkboxes. The main content area displays the document text: 'FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y AUTOMATISMO', 'TEMA: Estudio de una red de sensores inalámbricos con tecnología Wi-Fi y radiofrecuencia, aplicado a un sistema de control domótico inteligente distribuido', 'AUTOR: Fuentes Espinoza, Pablo Gustavo', 'Trabajo de titulación previo a la obtención del grado de INGENIERO ELECTRÓNICO EN CONTROL Y AUTOMATISMO', 'TUTOR: Ing. Mendoza Merchán, Eduardo Vicente, Mgs.', and 'Guayaquil, Ecuador 12 de marzo de 2018'. A yellow warning box at the top right says '1 Advertencias.' and a 'Reiniciar' button is visible.

El trabajo de titulación del estudiante: **FUENTES ESPINOZA PABLO GUSTAVO**, observa un porcentaje del 0% de coincidencias con otros documentos encontrados en Internet.

DOCENTE-TUTOR:

f. _____
Ing. Mendoza Merchán, Eduardo Vicente, Mgs.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primer lugar a Dios por ser lumbrera en mi camino, por guiarme en todo este proceso formativo, y porque a pesar de todas las fallas, siempre estuvo allí conmigo, evitando que tome el sendero equivocado.

Agradezco a mis padres Darwin y Karina por darme siempre ánimo para seguir adelante, por apoyarme en todo lo que necesité, por darme momentos de alegría que permitieron desocupar mi mente del estrés, y sin duda, por siempre aconsejarme y querer lo mejor para mí.

A mi hermana Joselyn por siempre estar a mi lado, levantándome siempre el ánimo cuando algo no iba bien, y por ayudarme a entender y escribir algunos textos en inglés que forman parte de esta tesis.

A mis amigos de la universidad, por permitir que mi paso por este período de formación profesional haya sido agradable y entretenido, y por darme ánimo en el desarrollo de este trabajo, en especial a Joseph, Geovanny, Erik L., Alejandro T., Erick G. y Eliana.

Agradezco a mi tutor, Ing. Eduardo Mendoza, por estar siempre presto a ayudar y resolver cualquier duda que tuve, por guiarme en la elaboración de este texto, y por ser quien me introdujo en el mundo de la programación de los microcontroladores.

Finalmente, agradezco a todos los profesores de la facultad, por aportar con su granito de arena en mi formación profesional y desarrollo de este trabajo.

Pablo Fuentes Espinoza

DEDICATORIA

Este trabajo, en primer lugar, se lo dedico a Dios, pues sin Él hubiera sido imposible la realización de éste. A mis padres y a mi hermana por ser mi fuente de inspiración y apoyo incondicional a lo largo de esta investigación.

Pablo Fuentes Espinoza



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y
AUTOMATISMO

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. _____

ING. ROMERO PAZ, MANUEL DE JESÚS, MSc.
DECANO

f. _____

ING. CÓRDOVA RIVADENEIRA, LUIS SILVIO, MSc.
COORDINADOR DEL ÁREA

f. _____

ING. BASTIDAS CABRERA, TOMÁS GASPAS, MSc.
OPONENTE

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS	XII
ÍNDICE DE TABLAS	XV
RESUMEN	XVI
ABSTRACT	XVII
INTRODUCCIÓN	2
CAPÍTULO I: ASPECTOS GENERALES	4
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	5
1.3. DELIMITACIÓN.....	6
1.4. OBJETIVOS	6
1.4.1. Objetivo general.....	6
1.4.2. Objetivos específicos.....	6
1.5. HIPÓTESIS.....	7
1.6. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	7
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	9
2.1. ESTADO DE ARTE	9
2.2. REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS	14
2.2.1. Tecnologías de Comunicaciones Inalámbricas.....	15
2.2.2. Componentes de una Red de Sensores Inalámbricos.....	16
2.2.3. Integración con Internet	18
2.2.4. Pila de protocolos	18
2.2.5. Problemas, requerimientos y características de los protocolos MAC.....	25
2.2.6. Topologías	28
2.2.7. Arquitectura general de un nodo sensor	30
2.2.8. Aplicaciones de las WSN.....	32
2.2.9. Desafíos y limitaciones de las WSN	34
2.3. MICROCONTROLADOR	36
2.3.1. Arquitectura ARM.....	39
2.3.2. Microcontroladores STM32.....	42

2.3.3. Aplicaciones.....	43
2.4. DOMÓTICA.....	44
2.4.1. Beneficios y aplicaciones de la domótica.....	45
2.5. INTELIGENCIA ARTIFICIAL DISTRIBUIDA.....	46
2.5.1. Campos de investigación de la IAD.....	46
2.5.2. Beneficios de la IAD.....	47
2.5.3. Consideraciones para el diseño de un sistema IAD.....	48
2.5.4. Aprendizaje distribuido.....	49
2.5.5. Toma de decisiones distribuida.....	50
CAPITULO III: ANÁLISIS DE LA RED DE SENSORES INALÁMBRICOS	51
3.1. CONSIDERACIONES GENERALES DEL SISTEMA.....	51
3.1.1. Descripción de la red de sensores inalámbricos.....	51
3.1.2. Caracterización del sistema.....	53
3.1.3. Funciones del sistema.....	54
3.2. ANÁLISIS DE LA RED INALÁMBRICA.....	55
3.2.1. Análisis del ambiente de operación de la Red de Sensores Inalámbricos.....	55
3.2.2. Definición de la arquitectura del sistema.....	56
3.2.3. Definición de topologías y gestión de información de la red.....	57
3.3. DESCRIPCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE LOS NODOS DE LA RED.....	58
3.3.1. Nodo Padre.....	58
3.3.2. Nodo Hijo.....	72
3.4. PROTOCOLOS DE RED EN LA SUBRED NP-NH.....	81
3.4.1. Búsqueda de nodo padre.....	82
3.4.2. Descubrimiento de rutas.....	84
3.4.3. Gestión de información (Light User Datagram – LUD).....	87
3.5. PROTOCOLOS DE RED EN LA SUBRED NP-NP.....	88
3.6. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO.....	89
3.6.1. Prueba del protocolo AODV.....	90
3.6.2. Prueba de tiempo de respuesta de solicitudes de lectura.....	93
3.6.3. Prueba de cantidad de solicitudes de lectura perdidas.....	96
3.6.4. Prueba de tiempo de respuesta de solicitudes de escritura.....	97
3.6.6. Prueba de adopción de nodos hijos.....	100

3.7. CÁLCULO DE COSTOS	101
CAPÍTULO IV: PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	103
4.1. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	103
4.1.1. Resultados referentes al estado del arte	103
4.1.2. Resultados de hardware	104
4.1.3. Resultados de software	106
4.1.4. Resultados de interfaz de usuario	107
4.1.5. Resultados de las pruebas de prototipo.....	108
4.1.6. Resultados generales del sistema: descripción, características y funciones	109
4.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	110
4.2.1. Análisis de las características y funciones del sistema.....	110
4.2.2. Cumplimiento de los objetivos	112
4.2.3. Análisis de la metodología	113
4.2.4. Análisis de la hipótesis.....	113
4.2.5. Análisis de la solución del problema de investigación	114
4.2.6. Discusión final.....	114
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	115
5.1. CONCLUSIONES	115
5.2. RECOMENDACIONES.....	116
5.3. TRABAJOS FUTUROS.....	116
BIBLIOGRAFÍA	117
ANEXOS.....	125
ANEXO A. COMUNICACIÓN MULTI-SALTO EN REDES INALÁMBRICAS.	125
ANEXO B. ESTÁNDAR 6LOWPAN: VISIÓN GENERAL	126

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Composición física de un nodo sensor.	17
Figura 2. Estructura de una red inalámbrica de sensores típica.	17
Figura 3. Pila de protocolos simplificada de una WSN.	19
Figura 4. Proceso de descubrimiento de rutas del protocolo AODV.	23
Figura 5. El problema del terminal oculto. El nodo A no puede detectar las transmisiones del nodo C, lo que resulta en una colisión en el nodo receptor B.	27
Figura 6. El problema del terminal expuesto. El nodo B detecta la transmisión del nodo C, y no transmite, incluso cuando la transmisión del nodo B no causa colisiones en A o D.	27
Figura 7. Topologías del estándar IEEE 802.15.4.	29
Figura 8. Topología en árbol clúster.	29
Figura 9. Arquitectura de un nodo sensor.	32
Figura 10. Diagrama de bloques de un microcontrolador.	37
Figura 11. Relación entre un microcontrolador Cortex M y su núcleo Cortex M.	39
Figura 12. Espacio de direcciones de memoria en un microcontrolador Cortex M.	41
Figura 13. Diseño de memoria del Área de código de un microcontrolador STM32.	41
Figura 14. Ejemplo de un sistema domótico.	45
Figura 15. Modelo general para agentes que aprenden.	49
Figura 16. Arquitectura de la red.	52
Figura 17. Organización de los nodos de la subred NP-NH en una casa. ...	56
Figura 18. Arquitectura del sistema.	57
Figura 19. Comunicación entre nodos hijos, padres y el gateway.	58
Figura 20. Módulo nRF24L01 en el nodo padre.	60
Figura 21. Patillaje del módulo nRF24L01.	60
Figura 22. Módulo ESP8266 en el nodo padre.	61
Figura 23. Patillaje del módulo nRF24L01.	61

Figura 24. Microcontrolador STM32F103RC sobre la placa de evaluación utilizada.....	62
Figura 25. Componentes del nodo padre.....	62
Figura 26. Prototipo de nodo padre desarrollado.....	63
Figura 27. Interfaz gráfica de usuario desarrollada para el nodo padre.....	63
Figura 28. Funcionamiento general del nodo padre en la subred NP-NH...	64
Figura 29. Proceso "nRF24Net" ejecutado en el nodo padre.	65
Figura 30. Proceso "Solicitud de lectura" ejecutado en el nodo padre.....	67
Figura 31. Proceso "Solicitud de escritura" ejecutado en el nodo padre.....	68
Figura 32. Proceso "Respuestas NH" ejecutado en el nodo padre.....	69
Figura 33. Procesos "GUI" e "Interfaz ESP8266" ejecutados en el nodo padre.	70
Figura 34. Funcionamiento del nodo padre en la subred NP-NP.....	71
Figura 35. Módulo nRF24L01 en el nodo hijo.	73
Figura 36. Microcontrolador STM32F030F4 sobre la placa de evaluación utilizada.....	74
Figura 37. Sensor DHT en el nodo hijo desarrollado.	74
Figura 38. Componentes del nodo hijo.	75
Figura 39. Prototipo de nodo hijo desarrollado.	75
Figura 40. Interfaz gráfica de usuario desarrollada para el nodo hijo.	76
Figura 41. Funcionamiento general del nodo hijo.	77
Figura 42. Proceso "nRF24Net" ejecutado en el nodo hijo.	78
Figura 43. Proceso "Solicitudes de nodo padre" ejecutado en el nodo hijo.	79
Figura 44. Proceso "GUI" ejecutado en el nodo hijo.	80
Figura 45. Estructura del paquete de datos general de la subred NP-NH. .	81
Figura 46. Protocolo para la búsqueda de un nodo padre.	82
Figura 47. Estructura del paquete PS.	83
Figura 48. Estructura del paquete PSR.	83
Figura 49. Descubrimiento de rutas.	84
Figura 50. Estructura del paquete RREQ.	85
Figura 51. Estructura del paquete RREP.	85

Figura 52. Comunicación de nodos en la subred NP-NP bajo el protocolo ESP-Mesh.....	88
Figura 53. Nodos padres y nodos hijos desarrollados.	89
Figura 54. Subred NP-NH conectada a la GUI desarrollada.....	90
Figura 55. Solicitudes de lectura con rutas de 1 salto.....	94
Figura 56. Solicitudes de lectura con rutas de 2 saltos.....	95
Figura 57. Solicitudes de lectura con rutas de 3 saltos.....	95
Figura 58. Solicitudes de lectura con rutas de 4 saltos.....	96
Figura 59. Resultados de la prueba de cantidad de SL perdidas.	97
Figura 60. Solicitudes de escritura con rutas de 1 salto.....	98
Figura 61. Solicitudes de escritura con rutas de 2 saltos.....	99
Figura 62. GUI del nodo padre mostrando los nodos hijos adoptados.	101
Figura 63. Detalle de conexión de los componentes del nodo padre.....	104
Figura 64. Detalle de conexión de los componentes del nodo hijo.	105

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Duración del protocolo AODV respecto al número de saltos.	91
Tabla 2. Ciclos de trabajo realizados antes de la estabilización del sistema.	92
Tabla 3. Solicitudes fallidas a diferentes distancias entre nodos.	100
Tabla 4. Costo de desarrollo del nodo padre.	102
Tabla 5. Costo de desarrollo del nodo hijo.....	102
Tabla 6. Consumo de energía del nodo padre desarrollado.	105
Tabla 7. Consumo de energía del nodo hijo desarrollado.....	106

RESUMEN

En el presente trabajo de titulación se realiza el estudio de una red de sensores inalámbricos basada en microcontroladores de 32 bits y componentes de bajo costo, orientada al campo de la domótica, mediante el desarrollo de nodos prototipos de red que permitan verificar experimental y analíticamente la eficiencia de la arquitectura de red elegida, así como la de los protocolos de comunicación implementados para proporcionar dinamismo, flexibilidad y escalabilidad al sistema. Para llevar a cabo lo anterior, se realizó una investigación de tipo correlacional con enfoque cuantitativo, y se aplicó los métodos bibliográfico y experimental, el primero permitió comprender las características más importantes de las redes de sensores inalámbricos junto con los estándares más utilizados en este campo, mientras que el segundo permitió evaluar cuantitativamente parámetros importantes del sistema para determinar los tiempos de respuesta del sistema y su capacidad de reorganización, y comprobar que la arquitectura de red escogida sea la adecuada. Como resultado del presente trabajo, se implementó una red inalámbrica de dos nodos padres comunicados mediante Wi-Fi, uno de los cuales dispuso de cinco nodos hijos que se comunican por RF; y se realizaron diferentes pruebas que permitieron determinar tiempos de respuesta bajos con una alta tasa de eficiencia en la recepción de datos, que la hacen apropiada para sistemas domóticos inteligentes.

Palabras claves: Microcontroladores, Red de Sensores Inalámbricos (WSN), Domótica, Red Ad-Hoc Inalámbrica, Red Multi-salto, Nodo sensor.

ABSTRACT

In this degree work, we developed a survey about a wireless sensor network based on 32-bit microcontrollers and low-cost components, for home automation applications, through the development of network prototype nodes that allow us to verify experimentally and analytically the efficiency of the chosen network architecture, as the implemented communication protocols to give dynamism, flexibility and scalability to the system. To perform the above mentioned, we carried out a correlational investigation with a quantitative approach, and we applied bibliographic and experimental methods. The first one let us to understand the most important features of the wireless sensor networks and the most used standards in this area, while the second one allowed us to evaluate some important system parameters, quantitatively, to define the response time of the system, its reorganizational capacity, and to verify that the chosen architecture was the right one. As a result of this work, we implemented a wireless network with two parent nodes communicated by Wi-Fi, which one of them has five child nodes communicated by RF; and we did different tests, which allowed us to determine low response times with a high efficiency ratio in the data reception, making this network appropriated for smart home automation systems.

Keywords: MICROCONTROLLERS, WSN, HOME AUTOMATION, MANET, MULTI-HOP, SENSOR NODE.

INTRODUCCIÓN

La ciencia y la tecnología han avanzado vertiginosamente en los últimos años y seguramente lo seguirán haciendo, pues el interés del hombre por lo desconocido parece no tener límites. Estos avances han permitido la apertura de nuevas áreas de investigación, entre las que se resalta la domótica. La automatización del hogar, también conocida como domótica, es un gran avance tecnológico que ha revolucionado al mundo, mejorando el confort y seguridad de las personas en el hogar. Un sistema domótico requiere de una red de varios elementos conectados entre sí, que puedan recoger datos del entorno, y que puedan comunicarse sin requerir de una infraestructura estática física; a esta red se la denomina red de sensores inalámbricos (WSN), la misma que, por sus diversas aplicaciones, ha sido estudiada mucho en los últimos años.

Una WSN es, en esencia, una red inalámbrica de nodos pequeños y de bajo costo, que se comunican colaborativamente para recolectar información del ambiente y/o actuar sobre variables físicas. El desarrollo de una WSN implica la elección de la arquitectura de red más adecuada de acuerdo al campo de acción a la que está destinada, como también el diseño de protocolos de comunicación eficientes que garanticen la seguridad e integridad de los datos, así como tiempos de respuesta bajos.

En este trabajo se presenta el estudio de una red sensores inalámbricos de bajo costo para su aplicación en sistemas domóticos, tema que surgió con el propósito de solucionar un problema actual que es el alto costo de estas redes en el campo de la domótica, lo que hace que este tipo de sistemas no estén al alcance de todos.

Previo al desarrollo de este proyecto, se estudió diversos trabajos de investigación, los cuales revelaron las características principales de estas redes en la actualidad, los enfoques de investigación, y los estándares y protocolos de comunicación más utilizados, en especial, en la automatización del hogar. Entre los estándares comúnmente aplicados se tiene a ZigBee y 6LoWPAN, ambos basados en el estándar IEEE 802.15.4. Estos estándares,

y en especial 6LoWPAN, fueron escogidos como punto partida para la elección de la arquitectura de red y para el diseño de los protocolos de comunicación del sistema desarrollado.

Este proyecto tiene un gran valor académico, debido a que, permite explorar y estudiar esta área mediante el desarrollo de una red con componentes de bajo costo, que puede estar al alcance de estudiantes universitarios, quienes pueden analizar y experimentar diversos protocolos y topologías de red, y así obtener sus propias conclusiones. Además, posee un considerable valor investigativo, al utilizar componentes y plataformas no muy comunes, lo que implica un mayor esfuerzo e investigación para cumplir con los resultados que se esperan. Su aplicación al campo de la domótica y su bajo costo, lo hace importante también para la sociedad, que desea convertir una casa tradicional en una casa inteligente.

El bajo costo de los elementos necesarios para el desarrollo de los nodos que conforman el sistema, facilitó enormemente la realización de este trabajo, sin embargo, el hecho de que estos componentes no se puedan conseguir localmente, supuso un impedimento para probar las diferentes opciones disponibles en el mercado, así como limitó el número de nodos desarrollados para la realización de las pruebas de funcionamiento del sistema.

El objetivo central de este texto es realizar un análisis de la arquitectura de una red inalámbrica de sensores orientada a la domótica, para lo cual se propone el diseño de una red inalámbrica prototipo y protocolos de comunicación, que permitan evaluar la arquitectura de red propuesta.

El desarrollo de este sistema permitió cumplir con los objetivos planteados y concluir que la arquitectura de red escogida hizo posible disminuir las colisiones de mensajes en el medio inalámbrico, mejorar los tiempos de respuesta y brindar mayor flexibilidad y escalabilidad al sistema. Con este preámbulo se invita al lector a conocer el proceso de desarrollo y análisis del presente proyecto.

CAPÍTULO I: ASPECTOS GENERALES

En este capítulo se abordarán algunas generalidades del tema central de este trabajo, entre estas se encuentra la definición del problema, la justificación, las delimitaciones y los objetivos que guiarán el presente trabajo. Finalmente, se determinará la metodología a seguir, considerando el tipo de investigación y métodos utilizados.

1.1. Planteamiento del problema

El propósito de este proyecto es realizar un estudio de una red de sensores inalámbricos (WSN) que permita su aplicación en el campo de la domótica, lo que implica el desarrollo de protocolos para tratar y organizar la comunicación entre los diferentes elementos de la red. Actualmente, se han realizado investigaciones exhaustivas en el ámbito de las WSN, en especial, en términos de consumo de energía, pues este tipo de sistemas están orientados a su uso en áreas de difícil acceso y sin disponibilidad de una fuente de alimentación fija (Khan, Khan, & Ali, 2016). Otras investigaciones se enfocan en la capacidad del sistema de auto-configurarse prescindiendo de una infraestructura fija y permitiendo la movilidad de sus elementos (Loo, Mauri, & Ortiz, 2012). Estos estudios tuvieron como resultado el desarrollo de protocolos más eficientes que satisfagan las necesidades mencionadas. De esta manera, comercialmente se puede encontrar varios protocolos para redes de sensores inalámbricos como ZigBee y 6LoWPAN.

Sin embargo, varios de los protocolos y sistemas ya existentes resultan muy costosos de implementar, puesto que para mejorar su desempeño emplean componentes que en algunas aplicaciones no son de extrema necesidad, como por ejemplo el uso de un Sistema Global de Posicionamiento (GPS) para identificar la posición física de los nodos del sistema (Guo, Low, & Nguyen, 2011). En consecuencia, en este trabajo se presenta el desarrollo de un sistema que comparte en esencia las mismas características que los ya posicionados en el mercado, pero con elementos de menor costo, lo cual conlleva a un mayor esfuerzo en cuanto al desarrollo de protocolos de red modificados y ajustados a estos nuevos elementos, y las metodologías que

guiarán este proceso. En base a esto, se ha establecido la siguiente pregunta de investigación:

“¿Cómo incide el uso de componentes y dispositivos de bajo costo en la implementación y desempeño de una red de sensores inalámbricos orientada a aplicaciones domóticas?”

1.2. Justificación

Los rápidos avances en la tecnología y la popularidad de las redes de sensores inalámbricos en los diferentes campos de acción hacen imprescindible el estudio de estos sistemas, pues grandes y comprobados son sus beneficios (Polo, Hornero, Duijneveld, García, & Casas, 2015). Entre estos beneficios se encuentra una mejor monitorización de las variables que intervienen en un proceso, acceso y control remoto de datos y toma de decisiones automáticas. Lo antes anotado, debido a los elevados costos de los dispositivos y protocolos propietarios puede privar a muchos sectores y/o usuarios de beneficiarse de estos avances tecnológicos. Frente a esto, el desarrollo de una red compuesta de elementos económicos adquiere gran importancia, para así satisfacer las necesidades de aquellos usuarios que no pueden alcanzar los precios de los sistemas actuales, en especial en el campo de la domótica.

El estudio y desarrollo de una WSN trae, por otro lado, un gran valor académico, porque no se trata de un tema que se aborda comúnmente en el país, permitiendo conocer la estructura interna de éstas, sus componentes y protocolos necesarios para su funcionamiento; como también, el uso de nuevas metodologías y propuestas de acuerdo a los requerimientos inherentes de cada situación planteada.

Con el sistema propuesto en este trabajo se pretende reducir el problema de alto costo de estas redes, permitiendo así el uso de éstas por un grupo de usuarios mayor. Se procura, también, eliminar barreras propias de los componentes utilizados como su radio de alcance y el número máximo posible de datos a enviar. Adicionalmente, se provee de una importante cantidad de información actualizada pertinente al tema con metodologías y pruebas

experimentales adecuadamente documentadas para su uso académico, que ayude a docentes y estudiantes que deseen iniciar o continuar en el estudio de este campo.

1.3. Delimitación

Este trabajo tendrá un enfoque, específicamente, en las áreas de automatización y domótica, teniendo como meta el desarrollo de una maqueta con componentes prototipos para el análisis y estudio del comportamiento del sistema y la eficiencia de los protocolos elaborados. Asimismo, se pretende elaborar un análisis del sistema cuando la red prototipo se encuentre, específicamente en el campo para lo cual fue creada, es decir, en una casa.

El uso de nuevos y económicos componentes para el desarrollo de esta red imposibilita el uso de protocolos comerciales y estandarizados para redes de sensores inalámbricos, por lo que, el sistema no será compatible con las tecnologías de WSN existentes en la actualidad.

1.4. Objetivos

A continuación, se presentan el objetivo general y los objetivos específicos que se establecieron para este trabajo.

1.4.1. Objetivo general

Analizar la arquitectura de una red de sensores inalámbricos a través de una red prototipo basada en microcontroladores y componentes de bajo costo, para su aplicación en sistemas domóticos distribuidos.

1.4.2. Objetivos específicos

- Diseñar un prototipo de red inalámbrica, mediante el uso de microcontroladores de 32 bits y módulos de comunicación de bajo costo.
- Proponer protocolos de comunicación para una red de sensores inalámbricos, orientada a aplicaciones domóticas distribuidas.
- Determinar la eficiencia de la red en cuanto a su capacidad de conectividad frente a diferentes disposiciones de sus elementos,

mediante el análisis del funcionamiento de la red prototipo implementada.

1.5. Hipótesis

Con el desarrollo de este sistema se pretende llegar a una red constituida de elementos de bajo costo y alto rendimiento, que cuente con flexibilidad, dinamismo y adaptabilidad frente a cualquier disposición de sus nodos; como resultado de la eficiencia de los protocolos diseñados para la misma. Con estas características, este sistema puede ser expandible fácilmente a más elementos de red, permitiendo formar sistemas mucho más complejos.

De esta manera, se planteó la siguiente hipótesis:

“El desarrollo de este trabajo permitirá disponer de un sistema flexible, dinámico, adaptable y escalable, que asegure la comunicación eficaz entre sus elementos a una distancia de más de 10 metros sin línea de vista, implementado con dispositivos de bajo costo.”

1.6. Metodología de la investigación

El estudio de una red de sensores inalámbricos involucra algunos factores como la latencia de la red, su adaptabilidad, eficiencia, etc. Estos parámetros definen que el tipo de investigación a utilizar en este trabajo sea del tipo correlacional con enfoque cuantitativo, puesto que se quiere determinar la relación de estos factores o variables dentro de una red, a través de mediciones numéricas experimentales con la ayuda de un prototipo de red. Para conseguir lo anterior se emplea métodos bibliográficos y experimentales. El primero se lo lleva a cabo mediante el análisis de investigaciones y trabajos previos referentes al tema, como también, el estudio de protocolos y sistemas ya existentes y probados en el mercado. El segundo método se lo ejecuta mediante la elaboración de elementos prototipos de la red, mediante los cuales se ha establecido experimentos que permitan determinar y cuantificar el comportamiento del sistema de forma global y por subsistemas.

En referencia a lo anteriormente mencionado, se presenta algunos pasos necesarios para el desarrollo de este proyecto:

- Investigación bibliográfica de trabajos previos y estudio de redes y protocolos de red existentes.
- Identificación del lugar en donde actuarán los elementos de la red.
- Determinar la cantidad de nodos necesarios para lograr la comunicación eficaz de todos los elementos de la red.
- Determinar los tipos de sensores y/o actuadores que contarán cada uno de los nodos del sistema.
- Diseño hardware de los nodos padres e hijos de la red.
- Diseño de los protocolos de red que regirán la comunicación entre los elementos del sistema.
- Programación de nodos padres e hijos implementando los protocolos de red diseñados.
- Pruebas de comunicación y funcionamiento del sistema en maqueta y en el lugar establecido en el segundo punto.
- Corrección de errores y mejoras de prototipos de la red.
- Cálculo de costos para los nodos prototipos padres e hijos.
- Estudio y análisis de los resultados obtenidos en las pruebas de funcionamiento de la red.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

En este capítulo se revisa el estado de arte de las redes de sensores inalámbricos de los últimos cinco años, como también sus características más importantes, sus problemas más comunes que ocurren durante su operación y los estándares y protocolos que utilizan para llevar a cabo una correcta comunicación entre sus elementos.

2.1. Estado de arte

Las redes de sensores inalámbricos es un tema que ha ganado importancia en los últimos años (Randhawa, 2014) y se han expandido en muchos sectores del quehacer humano, desde casas hasta fábricas (Paavola & Leiviska, 2010). La necesidad de conocer las variables de un determinado entorno, para actuar inmediatamente frente a una eventualidad, hacen de esta red, una solución adecuada en el desarrollo de cualquier sistema basado en microprocesadores. Estas redes además de monitorear los cambios en determinadas variables, permiten tomar acciones de control. Por ello, es fundamental la revisión de literatura técnica actualizada existente en esta área, con la finalidad de conocer los avances e investigaciones del tema, al menos de los últimos cinco años. Un breve resumen de los trabajos recopilados que se han considerado más relevantes para esta investigación, se muestra en los párrafos siguientes.

Las redes de sensores inalámbricos se pueden aplicar en cualquier área de trabajo, así Gutiérrez, Villa, Nieto & Porta (2013) en su artículo “Automated Irrigation System Using a Wireless Sensor Network and GPRS Module” desarrollaron un sistema de riego automático usando una red de sensores. Para este sistema, los autores se decantaron por una red distribuida usando sensores de humedad y temperatura, que se conectan a un servidor web con la ayuda de un gateway basado en microcontroladores con conexión a la red de celular e Internet. Como fuente de alimentación utilizaron paneles solares. Esta red de sensores se implementó bajo el estándar IEEE 802.15.4, debido a su flexibilidad, bajo consumo energético y bajo costo. Los resultados de este trabajo fueron un ahorro del 90% de agua respecto al riego tradicional, un

ahorro significativo de energía y bajo costo. Finalmente, concluyeron que el uso de una configuración modular del sistema permite que éste sea escalable para grandes invernaderos o para campos abiertos.

En el estudio titulado “Wireless sensor networks: A survey on recent developments and potential synergies” por Rawat, Singh, Chaouchi & Bonnin (2013), se hace hincapié en los desarrollos recientes en tecnologías para redes de sensores inalámbricos. En este documento, los autores presentaron el estándar de comunicación inalámbrica más usado para este tipo de redes es IEEE 802.15.4, que en comparaciones con estándares muy conocidos como IEEE 802.11 y IEEE 802.15, cuenta con mejores prestaciones en lo que respecta a un bajo consumo de energía, bajo tráfico de datos y bajo costo; características fundamentales que debe tener una red de sensores inalámbricos. Enfatizaron también que la mayoría de las tecnologías utilizadas en redes de sensores operan en la banda ISM (Industrial, Scientific and Medical radio band), la cual es internacionalmente reservada para el uso del espectro de radiofrecuencia en área industrial, científica y médica. En este estudio se presentó también una comparación entre las distintas tecnologías y estándares usados en estas redes como ZigBee, UWB, Bluetooth, BLE, Z-wave, Wavenis, Dash7 y EnOcean. Además, se concluyó que la eficiencia energética es aún el parámetro más atractivo para los investigadores, y que la estandarización es un tema clave en el mercado de estas redes, siendo el estándar IEEE 802.15.4 el más adecuado para aplicaciones con bajo tráfico de datos y BLE para aplicaciones de grandes transferencias de datos.

Rault (2017) en su tesis, titulada “Energy-efficiency in wireless sensor networks “, propone nuevas estrategias para la conservación de energía en redes de sensores inalámbricos, de tal forma que el tiempo de operación de estas redes pueda ser extendido; así como también una aplicación de sensores portátiles en el campo de la salud. Su primera propuesta fue optimizar el desplazamiento de una estación base móvil como el enrutamiento de datos en los sensores. Su segunda propuesta fue optimizar la implementación de cargadores inalámbricos en la red para así satisfacer la demanda energética de los nodos sensores. Al finalizar su estudio, Rault desarrolló una nueva arquitectura que permite ahorrar el consumo energético

entre los sensores y las estaciones bases, la cual fue implementada en una aplicación en el campo de la medicina, obteniendo resultados óptimos.

En el artículo “Combining Multi-Agent Systems and Wireless Sensor Networks for Monitoring Crop Irrigation” desarrollado por Villarrubia, De Paz, De La Iglesia & Bajo (2017), se propone un sistema multiagente (MAS) para controlar el riego de cultivos, usando la plataforma PANGEA, que cuenta con una red de sensores inalámbricos que proporcionan diferentes parámetros referentes al entorno del cultivo como temperatura, radiación solar, humedad del suelo, etc. La topología usada en esta red de sensores fue una topología en estrella para la transferencia de información, usando la modulación por desplazamiento de amplitud (ASK). La banda de frecuencia seleccionada para la emisión y recepción de datos fue 433 MHz. Esta red se caracterizó por contar con dos tipos de nodos: un nodo esclavo que se encarga medir las variables del entorno y enviar estos datos a un nodo maestro, el cual actúa como un gateway, transmitiendo los datos de los sensores al agente inteligente que reside en el servidor web. El sistema de irrigación se implementó con lógica difusa para estimar el flujo necesario de agua para el riego del cultivo en cada momento. Los resultados de esta implementación fueron óptimos, pues los autores lograron crear un sistema de bajo costo para el control de riego de cultivos, de aproximadamente 100 €/250 m²; además de no necesitar de algún tipo de instalación especial, por su característica de autoconfiguración.

Fauzi & Shazali (2012) en su estudio acerca de las aplicaciones de las redes de sensores inteligentes, mostraron la importancia de este tipo de redes en el monitoreo de parámetros ambientales, además de los requerimientos para esta clase de sistemas, como: autonomía, confiabilidad, robustez y flexibilidad. Entre las aplicaciones de estas redes en el campo ambiental se tiene el monitoreo agrícola, del hábitat, de ambientes internos, de invernaderos, de clima y de bosques. En este estudio se concluye que las características más importantes con las que debe contar una red de sensores son un bajo consumo de energía, bajo costo, y una manera conveniente para el control y monitorización en tiempo real, en especial para aquellas aplicaciones en donde no se tiene acceso a una fuente de energía fija.

“Towards the Implementation of IoT for Environmental Condition Monitoring in Homes” es un trabajo que hace énfasis en las redes de sensores inalámbricas orientadas al Internet de las Cosas (IoT) en el campo de la domótica. En este artículo, se hace uso del estándar de comunicación ZigBee para la transmisión de datos entre los nodos sensores y un gateway que se encarga de traducir los datos recibidos en formato IPv6 UDP y enviarlos a un servidor que se encargará de almacenar los datos en una base de datos MySQL. Este gateway ejecuta el sistema operativo OpenWRT, el cual le provee la funcionalidad de administrar redes y conectarse a internet. De acuerdo a resultados experimentales, los investigadores determinaron que el sistema desarrollado tiene una confiabilidad del 97%, pues en 31 días se perdieron aproximadamente 7500 paquetes de los 272908 paquetes que se esperaban; concluyendo así que la interconexión de una red de sensores inalámbricos y el protocolo de internet IPv6 es confiable e ideal para el Internet de las Cosas. (Kelly, Suryadevara, & Mukhopadhyay, 2013)

En la investigación titulada “Routing Protocols in Wireless Sensor Networks” por Singh, Singh & Singh (2010) se estudia una de las características más importantes en redes de sensores inalámbricas complejas, la cual es el enrutamiento y procesamiento de los datos. Asimismo, se menciona los objetivos en el diseño de una red como son: nodos de pequeño tamaño, nodos de bajo costo, bajo consumo de energía, escalabilidad, confiabilidad, autoconfigurabilidad, adaptabilidad, tolerancia a fallos, seguridad y calidad de servicio (QoS). Se describen también los grandes desafíos que presenta el diseño de estas redes y que además complican el enrutamiento de datos como: limitada capacidad energética, administración de la localización de los sensores, limitados recursos de hardware, implementación masiva y aleatoria de nodos, ambientes hostiles, acumulación de datos y escalabilidad. Finalmente, después de describir varios protocolos de enrutamiento, los autores concluyeron que uno de los mayores desafíos en el diseño de protocolos de enrutamiento en estas redes es la eficiencia energética, debido a la carencia de recursos energéticos en los sensores; por lo que, los protocolos de enrutamiento deben procurar usar de forma eficiente la energía

para prolongar el tiempo de vida de los nodos sensores, y en consecuencia el tiempo de vida de la red.

Li & Lin (2013) en su trabajo “Design and Implementation of Smart Home Control Systems Based on Wireless Sensor Networks and Power Line Communications” usaron una red de sensores inalámbricos y comunicaciones mediante línea de potencia (PLC) para implementar una red de control inteligente para las casas. Su objetivo fue reducir el impacto de interferencias inalámbricas que derivan en la pérdida de paquetes de información en las redes de sensores convencionales. La arquitectura de esta red propuesta consta de un transceptor PLC en cada uno de los electrodomésticos, que le permita recibir comandos y enviar respuestas acerca de su estado a una estación base. A su vez, en esta red existe una red de sensores inalámbricos aislada, que incluye varios nodos sensores y un coordinador, el cual lleva equipado un transceptor PLC. De esta forma, la red sensores inalámbricos recolecta los parámetros ambientales y los transmite a los coordinadores; mientras la comunicación mediante de línea de potencia se utiliza para conectar todos los coordinadores y así transferir todos los datos recolectados a la estación base. Los resultados experimentales de este trabajo arrojaron una confiabilidad del 99.2%, pues únicamente el 0.8% del total de paquetes enviados se perdieron. Ante esto, Li y Lin concluyeron que su nueva propuesta de red simplifica el problema de configuración de nodos relé en una red de sensores inalámbrica, minimiza el impacto de interferencia inalámbrica y ofrece una mayor escalabilidad del sistema.

En el caso de estudio “A Wireless Sensor Network for Intelligent Building Energy Management based on Multi Communication Standards” se propone un modelo de red que aloja dos redes de sensores inalámbricos aisladas entre sí, con el uso de dos estándares de comunicación distintos 6LoWPAN y ZigBee, estas redes a su vez se comunican con una interfaz de usuario web que permite el control de interruptores y análisis y presentación de los datos de los sensores. Los nodos sensores en ambas redes fueron energizados mediante baterías, y entraban en modo de ahorro energía entre lecturas, lo que minimizó el consumo de energía de los mismos. Este estudio concluyó que es posible la combinación de redes de sensores inteligentes comerciales

disponibles de diferentes fabricantes operando con varios estándares de comunicación para el monitoreo y medición de datos en tiempo real como temperatura, luz, humedad y consumo de energía. (Grindvoll, y otros, 2012)

Magno, Polonelli, Benini & Popovici (2015) en su artículo “A Low Cost, Highly Scalable Wireless Sensor Network Solution to Achieve Smart LED Light Control for Green Buildings” propusieron un enfoque para reducir el consumo de energía de un sistema de iluminación LED genérico usando una red flexible implementada en el mismo campo objetivo reduciendo así los costos de instalación y garantizando un ahorro energético. Los nodos sensores de este enfoque se comunican inalámbricamente mediante una red ZigBee, con un coordinador, varios routers y varios dispositivos finales. La topología de red que usaron fue una topología en malla, para garantizar la escalabilidad y la modularidad del sistema. Toda la red es supervisada por una sola unidad, el coordinador, el cual se encarga de administrar la red y asegurarse que todos los dispositivos de la red trabajen de manera adecuada; además funciona como un gateway con un host remoto para habilitar la interacción con el usuario. Finalmente, los autores concluyeron, después de implementar la red, que su enfoque permitió reducir el consumo de energía de una oficina en más del 55% en seis meses, superando los resultados de trabajos anteriores en este tema.

2.2. Redes de Sensores Inalámbricos

Una red de sensores inalámbricos (WSN – Wireless Sensor Network) es un grupo especializado de sensores autónomos y actuadores con una infraestructura de comunicaciones inalámbricas, destinados a monitorear y controlar las condiciones físicas o ambientales en diversas ubicaciones y a transmitir de forma cooperativa los datos a una ubicación principal y/o pasar un comando de control a un actuador deseado a través de la red (Yang & Cao, 2008). A continuación, se exponen las características, limitaciones y aplicaciones de estas redes, así como también su pila de protocolos, topología y diseño.

2.2.1. Tecnologías de Comunicaciones Inalámbricas

Las redes informáticas se han convertido en una parte esencial del mundo. Las redes permiten que la información y los servicios estén a disposición de cualquier dispositivo o usuario en la red, independientemente de la ubicación física de los mismos. Las redes informáticas, de acuerdo a Yang (2014), están divididas en varios tipos como Red de Área Personal (PAN - Personal Area Network), Red de Área Local (LAN – Local Área Network), Red de Área Metropolitana (MAN – Metropolitan Area Network) y Red de Área Amplia (WAN – Wide Area Network). Como indican los nombres, una red PAN es red de computadores organizadas alrededor de una sola computadora. Una red LAN es usada para conectar computadoras en un área pequeña como en un edificio o en un número de edificios, mientras que la red que conecta las computadoras dentro de una ciudad o pueblo se denomina una red MAN. Una red WAN conecta un gran número de computadoras a lo largo de un área extensa, como un país o un continente. Convencionalmente, todas estas redes se comunican a través de enlaces físicos, es decir, usan cables físicos para conectar los diferentes dispositivos de red. Las redes de computadoras cableadas permiten una transmisión de datos confiable, pero el cableado requerido eleva el costo de instalación, y en muchos casos es inconveniente. Las tecnologías de comunicaciones inalámbricas proveen la obvia solución para superar estos obstáculos, aunque éstas tienen sus propios desafíos como la interferencia, la confiabilidad y otros.

Las redes de sensores inalámbricos conectan cualquier dispositivo o computadora usando ondas de radio, infrarrojos, o cualquier otro medio inalámbrico (Yang, 2014). Pueden cubrir un área extensa, en cuyo caso se llaman redes WAN inalámbricas, o pueden cubrir una pequeña área o edificio, en cuyo caso se denominan redes LAN inalámbricas (WLAN – Wireless LAN). Alternativamente, pueden proporcionar una interconexión de dispositivos dentro del rango de una computadora individual, en cuyo caso se llaman redes PAN inalámbricas (WPAN – Wireless PAN). Una red de área personal inalámbrica de bajo costo (LR-WPAN – Low Rate Wireless PAN) es una red diseñada para comunicaciones inalámbricas de corto alcance, de bajo costo y bajo consumo de energía.

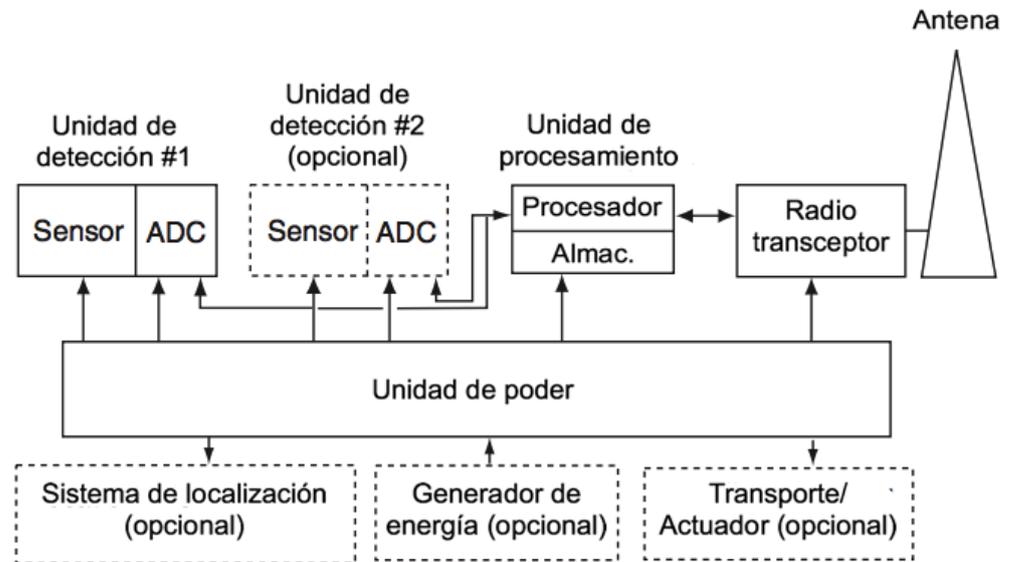
Existen varios estándares de comunicaciones inalámbricas como por ejemplo ZigBee, Wi-Fi, WiMax, GSM, etc. Estos estándares son categorizados según el rango de comunicación y las áreas de aplicación. Estándares como Wi-Fi, WiMax, Ultra Wide Band, y 802.11 a/g/n son normalmente usados para aplicaciones de alto rendimiento de datos, y generalmente requieren de una fuente de alimentación principal. Los sistemas construidos en base a estándares como GSM, GPRS, EDGE, UMTS y HSDPA son diseñados para conseguir una completa movilidad. El estándar Bluetooth se desarrolló principal para reemplazar los cables de interconexión de la computadora. El estándar ZigBee fue desarrollado para redes de sensores inalámbricas (Yang, 2014).

2.2.2. Componentes de una Red de Sensores Inalámbricos

Una WSN está compuesta por múltiples nodos, que van desde unos pocos hasta varios cientos o incluso miles, donde cada nodo está conectado a uno o más nodos. Los nodos pueden diseñarse para llevar a cabo una o más de las siguientes funciones: medición, retransmisión de datos o intercambio de datos con una red externa. Según Yang (2014), un nodo para la medición, se denomina nodo sensor, un nodo para la retransmisión de datos, se denomina router, un nodo para intercambiar datos con otras redes se denomina estación base o nodo receptor, el cual es similar a un gateway en una red tradicional.

Cada nodo sensor está equipado con un transductor, un microcontrolador, un transceptor de radio y una fuente de alimentación, usualmente una batería. El transductor genera señales eléctricas basadas en fenómenos naturales detectados y cambios ambientales. El microcontrolador procesa y almacena los valores de la detección. El radio transceptor con una antena interna o conexión a una antena externa recibe comandos desde una computadora central y transmite datos a esa computadora. La Figura 1 muestra de qué partes físicas está compuesto un nodo sensor, mientras que la Figura 2 muestra una WSN conceptual, donde los datos son recolectados por nodos sensores y luego son transmitidos a un nodo receptor, el cual está conectado a una red Internet o satelital. A través de la red de Internet o satelital, los datos recolectados son finalmente entregados a una aplicación de usuario. Los

Los nodos sensores no tienen una posición fija y muchos de ellos se implementan aleatoriamente para monitorear un campo de sensores. Los nodos sensores usualmente se comunican entre sí a través de un transceptor de radio incorporado (Yang, 2014).



ADC = Convertidor Análogo-Digital

Figura 1. Composición física de un nodo sensor.
Fuente: (Sohraby, Minoli, & Znati, 2007)

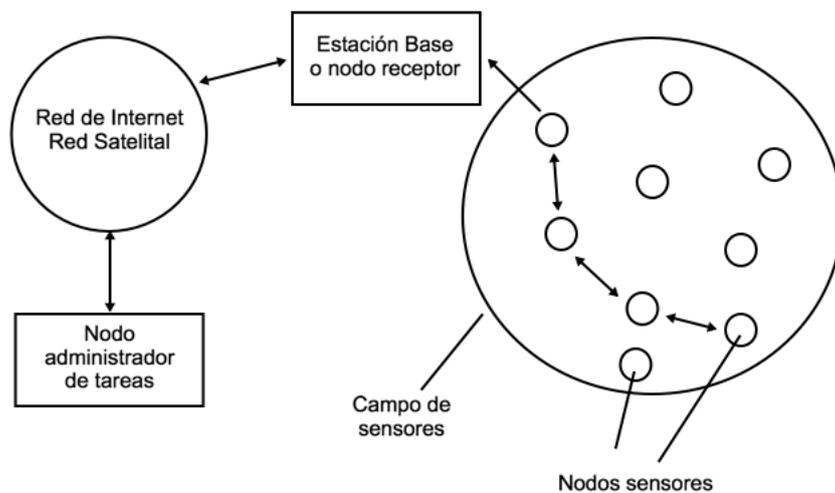


Figura 2. Estructura de una red inalámbrica de sensores típica.
Fuente: (Yang, 2014)

2.2.3. Integración con Internet

En la gran mayoría de redes de sensores, se supone que el receptor se encuentra muy cerca del campo de sensores, lo que lo hace parte de la comunicación multisalto (ver Anexo A), donde existen uno o más nodos intermedios entre el transmisor y receptor que reciben y retransmiten paquetes de datos hacia su destino (Braun, y otros, 2009), al recibir las lecturas de los nodos sensores. Sin embargo, es importante poder acceder a la red de sensores desde un nodo de supervisión o gestión distante que reside en la Internet inalámbrica. Para ello, es crucial la integración con Internet. En esta dirección, el estándar 6LoWPAN (ver Anexo B) ha sido desarrollado para integrar el estándar IPv6 con nodos sensores de bajo consumo de energía. Gracias a este estándar, el paquete IPv6 puede comprimirse a tamaños adecuados para los nodos sensores. Esto proporciona una integración eficiente para la comunicación entre un dispositivo basado en IPv6 y el nodo sensor. Sin embargo, aún existen desafíos importantes en la integración perfecta entre una WSN e Internet en las capas superiores de la pila de protocolos (Fischione, 2014). Además, los protocolos de Internet, generalmente, son propensos a la ineficiencia energética y de memoria, a diferencia de los protocolos WSN, que están diseñados para proporcionar una alta eficiencia en memoria y en energía (Fischione, 2014).

2.2.4. Pila de protocolos

Un protocolo es un conjunto de reglas que rigen un comportamiento determinado. En las redes de comunicación, los protocolos determinan las especificaciones y pautas de funcionamiento, garantizando que las redes cumplan con sus objetivos previstos. Una pila de protocolos en una WSN es precisamente un conjunto de estas especificaciones y pautas organizadas en capas que definen cómo se ha de comunicar la red (Fahmy, 2016).

Una pila de protocolos simplificada para una red de sensores inalámbricos se muestra en la Figura 3.



Figura 3. Pila de protocolos simplificada de una WSN.
Fuente: (Di Marco, 2008)

Según Matin & Islam (2012), se consideran cinco principales niveles o capas:

- Capa de Aplicación: Define un conjunto estándar de servicios e interfaces disponibles para un programador independientemente de su implementación en todo tipo de plataforma.
- Capa de Transporte: Ayuda a mantener el flujo de datos si la aplicación de redes de sensores lo requiere. Esta capa es especialmente necesaria cuando se planea acceder al sistema a través de Internet u otras redes externas.
- Capa de Red: Se encarga de enrutar o direccionar los datos. Realiza el proceso de selección de rutas a lo largo de las cuales se enviarán los datos en la red.
- Capa de Enlace: Proporciona la multiplexación de datos, detección de paquetes de datos y control de acceso al medio (MAC).
- Capa Física: Es la responsable de la selección de la frecuencia y potencia, la modulación y el cifrado de datos.

A continuación, se hablará de cada capa en detalle.

2.2.4.1. Capa Física

Los nodos de una red de sensores inalámbricos deben tener la capacidad de transmitir y/o recibir mensajes con éxito a través del canal inalámbrico que sirve como medio físico para el enlace de comunicación digital entre los nodos. En la capa física de la pila de protocolos, una comunicación fiable depende

de la potencia del transceptor de radio, la atenuación del canal inalámbrico, la modulación y la codificación.

En las WSN comerciales disponibles en el mercado, la capa física utiliza tres bandas de frecuencias diferentes para la comunicación. En la práctica, se utiliza un canal de frecuencia de una banda de frecuencia para transmitir un mensaje. El canal de frecuencia corresponde a la frecuencia portadora que se utiliza. A este canal de frecuencia también se le suele llamar canal de comunicación. Las tres bandas de frecuencias para propósitos de automatización industrial y del hogar con WSN son 2.4 GHz, 915 MHz en América y 868 MHz en Europa. Entre estas bandas de frecuencias se distribuyen 47 canales; un canal está asociado con la banda 868 MHz con una velocidad de datos de 20-250 kbps, 30 canales están definidos para la banda 915 MHz y 16 se usan en el rango de 2.4 GHz. Sobre estas frecuencias y utilizando potencias de transmisión de radio típicas de transceptores comerciales, el rango de transmisión de los nodos puede variar de 10-100 m con velocidades de datos de 20 a 250 kbps (Fischione, 2014).

2.2.4.2. Capa de Enlace

En las redes de sensores inalámbricos, la capa de enlace se la utiliza para implementar el control de acceso al medio (MAC). Así, el objetivo principal de esta capa es garantizar la transmisión confiable de datos a través del enlace que la capa física ya ha determinado. Además, se encarga de determinar la forma en que se controla el acceso en el canal de comunicación, una función fundamental en el caso de WSN de difusión (broadcast) donde el medio físico es compartido por una gran cantidad de nodos sensores. Específicamente, en cualquier red de difusión, la cuestión importante es cómo determinar qué nodo usa el canal inalámbrico, en qué momento y en qué frecuencia. Por lo tanto, la regulación de transmisión de mensajes es necesaria para lograr una asignación de canales eficientes entre los nodos.

La capa de enlace junto a sus protocolos asociados que establecen las reglas para la comunicación entre el nodo emisor y el receptor, se refieren principalmente a mecanismos que controlan la temporización de los intervalos

de frecuencia para enviar un mensaje (paquete de datos) a través del canal y escucharlo (Fischione, 2014).

2.2.4.3. Capa de Red

En las redes de sensores inalámbricos, la capa de red se la utiliza para implementar el enrutamiento de los datos. El enrutamiento se define formalmente como el mecanismo para determinar una ruta entre el origen y el nodo de destino a pedido de un nodo determinado. En el caso de redes multi-salto grandes, el nodo que desea enviar un mensaje no puede alcanzar directamente su destino, y, por lo tanto, los nodos intermedios tienen que retransmitir sus mensajes. Un nodo intermedio tiene que decidir a qué nodo vecino debe reenviar el mensaje entrante si el mensaje no está destinado para sí mismo.

Tradicionalmente, se utilizan tablas de enrutamiento que enlistan el vecino más apropiado para cualquier destino de mensaje dado. La implementación de tablas de enrutamiento referentes a un algoritmo de enrutamiento en particular proporciona las rutas para cada destino. La construcción y mantenimiento de estas tablas es la tarea crucial de un protocolo de enrutamiento centralizado y distribuido en una WSN. La construcción de estas tablas básicamente se reduce a establecer cuál es el camino desde un nodo dado para llegar a un destino dado (Fischione, 2014).

Una de las formas más sencillas para el enrutamiento en redes centralizadas es por inundación. Cuando se usa este método, cada nodo recibe datos y los retransmite (broadcast) a cada vecino a menos que se haya alcanzado el tiempo de vida máximo de saltos o el nodo receptor sea el destino. La principal ventaja de este método es la simplicidad. No requiere un mantenimiento costoso de topología o descubrimiento de rutas complejas. Sin embargo, este método tiene algunos inconvenientes. El primero de ellos es la implosión, la cual sucede cuando dos nodos tienen comparten múltiples vecinos. El segundo es la superposición, cuando dos nodos comparten la misma región de detección. Finalmente, el tercero y tal vez uno de los más importantes, es que este método no toma en cuenta la disponibilidad de recursos energéticos.

Otro protocolo un poco más sofisticado es SPIN (Sensor Protocols for Information via Negotiation). Este protocolo reduce la cantidad de energía consumida, soluciona los problemas de implosión, superposición y asegura que solo los nodos interesados gastarán energía en recibir datos (Fahmy, 2016); sin embargo, no garantiza que los datos lleguen al destino, especialmente para redes con una alta densidad de nodos (Rathi, Saraswat, & Bhattacharya, 2012).

2.2.4.3.1. Descubrimiento de rutas

El descubrimiento de rutas es un proceso importante en una red WSN multi-saltos. En este apartado se hablará acerca del protocolo Ad-Hoc On-Demand Vector (AODV). El protocolo AODV se basa en un mecanismo de descubrimiento de ruta de difusión, que se utiliza para establecer dinámicamente las entradas de la tabla de enrutamiento en los nodos intermedios (Fischione, 2014).

Cuando un nodo necesita enviar un mensaje a otro nodo que no es un nodo vecino, inicia un proceso de descubrimiento de ruta, transmitiendo un mensaje "Solicitud de ruta" (RREQ - Route REQuest) a sus nodos vecinos. Los nodos que reciben el RREQ actualizan su información sobre la fuente, y también configuran un enlace hacia atrás a la fuente en sus tablas de enrutamiento. Cada mensaje RREQ contiene las direcciones de la fuente y el destino, un valor de conteo de saltos, una ID de difusión y dos números de secuencia. El valor de conteo de saltos realiza un seguimiento del número de saltos desde la fuente, mientras que la ID de difusión se incrementa cada vez que el nodo fuente emite un nuevo mensaje RREQ y se combina con la dirección del nodo fuente para identificar de forma única un RREQ.

Al recibir un paquete RREQ, un nodo que posee una ruta actual al destino especificado, éste responde enviando una "Respuesta de Ruta" (RREP – Route REPLY) directamente al nodo vecino del cual recibió el RREQ. De no ser así, el RREQ se retransmite a los vecinos del nodo intermedio y su conteo de saltos se incrementa en uno. Cabe señalar, que los nodos intermedios responden a un RREQ sólo si el número de secuencia de su ruta al destino

es mayor o igual que el número de secuencia destino especificado en el paquete RREQ.

Cuando el nodo fuente recibe el RREP, verifica si tiene una entrada para la ruta. Si no la tiene en su tabla de enrutamiento, el nodo crea una nueva entrada en la tabla de enrutamiento. De lo contrario, verifica el número de secuencia del RREP. Si el RREP llega con el mismo número de secuencia que en sus tablas, pero con un conteo de saltos menor o un número de secuencia mayor (que indica una ruta más reciente), actualiza su tabla de enrutamiento y comienza a utilizar esta mejor ruta. Una vez que se ha creado una entrada para la nueva ruta en la tabla, el nodo puede iniciar la comunicación con el nodo destino. La Figura 4 resume el procedimiento del descubrimiento de rutas del protocolo AODV.

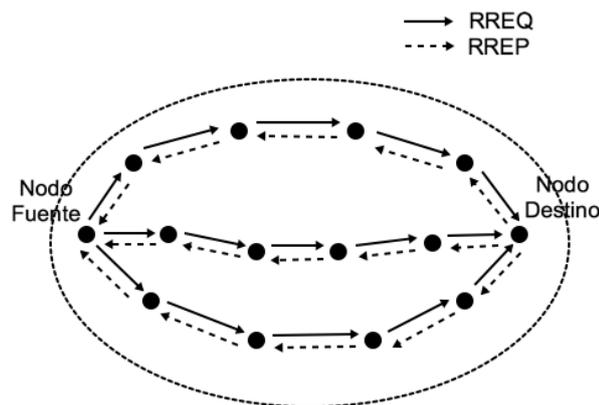


Figura 4. Proceso de descubrimiento de rutas del protocolo AODV.
Fuente: (Fischione, 2014)

2.2.4.4. Capa de Transporte

Esta capa y los protocolos de ésta, según Wang, Sohraby, Hu, Li, & Tang (2005), se deben encargar de las siguientes funciones en una WSN:

- Control de congestión de datos y confiabilidad: Cuánto más datos fluyen desde los nodos sensores a las estaciones bases en una WSN, más congestión de datos ocurrirá alrededor de las estaciones bases. Por ello, es necesario diseñar mecanismos efectivos para detectar, evitar y controlar la congestión de datos. Así, el protocolo de transporte en una WSN debe tener un mecanismo de recuperación de pérdida de

paquetes, como ACK o un ACK selectivo, para garantizar la confiabilidad.

- Simplificar el proceso de conexión inicial o usar un protocolo sin conexión para acelerar el inicio de la red y garantizar el rendimiento y el menor retardo de transmisión.
- Evitar que se pierdan los paquetes como sea posible para disminuir el consumo de energía.
- Garantizar la equidad para diferentes nodos sensores, para que cada nodo pueda alcanzar un rendimiento justo.
- Habilitar la interacción entre capas. Si un algoritmo de enrutamiento puede notificar una falla de ruta al protocolo de transporte sabrá que la pérdida de datos no proviene de una congestión sino de una falla de ruta.

2.2.4.5. Capa de Aplicación

La capa de aplicación se debe encargar de la fusión y administración de los datos, la sincronización de reloj, y posicionamiento. Una WSN está diseñada para ser implementada en ambientes donde los sensores pueden estar expuestos a circunstancias que podrían interferir con el proceso de medición de los mismos. Estas circunstancias pueden ser fuerte variaciones de presión, temperatura, radiación y ruido electromagnético. Por ello, las mediciones pueden ser imprecisas. La fusión de datos se utiliza para superar estas fallas del sensor, limitaciones tecnológicas y problemas de cobertura espacial y temporal. La fusión de datos consiste en combinar datos de múltiples fuentes y reunir esta información para lograr inferencias, que serán más eficientes y potencialmente más precisas que si se lo hiciera de una única fuente. La fusión de datos puede ser implementada en sistemas centralizados o distribuidos (Fahmy, 2016).

2.2.4.6. Protocolos de capa cruzada (Cross-Layer)

Las severas restricciones de energía de los nodos sensores alimentados con batería requieren protocolos de comunicación de eficiencia energética para cumplir los objetivos de la aplicación de las WSN. De acuerdo con algunas investigaciones, es mucho más eficiente en cuanto a los recursos tener un

esquema unificado que combine las funcionalidades comunes de la capa de protocolo en un módulo de capa cruzada (Cross-Layer) para nodos sensores con recursos limitados (Fahmy, 2016). Esta clase de protocolos considera los efectos de reemplazar las capas de transporte, de red, de enlace y física. El objetivo de estos protocolos es una comunicación altamente confiable con un consumo de energía mínimo, decisiones de comunicación adaptativas y evitar la congestión local.

2.2.5. Problemas, requerimientos y características de los protocolos MAC

2.2.5.1. Eficiencia energética

MAC es uno de los principales componentes del consumo de energía en las redes de sensores inalámbricos. Las fuentes típicas de desperdicio de energía en WSNs, según Fischione (2014), incluyen:

- Colisión de paquetes de datos: Una colisión de paquete de datos ocurre cuando un nodo envía un paquete de datos que colisiona o se superpone en el tiempo con otro. La colisión se indica por una falla del receptor para devolver una confirmación de lectura (ACK - Acknowledgement) del paquete de datos. Cuando se produce una colisión, el nodo debe retransmitir el mensaje perdido, aumentando el consumo de energía. Un protocolo debe reducir las colisiones de mensajes.
- Recepción de mensajes: En este caso, el gasto de energía se produce por recibir un mensaje destinado a otro nodo. La recepción y el descarte de mensajes destinados a otros nodos se emplean comúnmente en redes sin limitaciones de energía para aumentar el rendimiento y disminuir la latencia. Un método eficiente en términos energéticos es el rechazo anticipado del mensaje. Este método permite que el nodo sensor apague su transceptor de radio una vez que ha leído un campo de destino diferente para un mensaje entrante.
- Escucha inactiva: La escucha inactiva ocurre cuando dispositivo escucha un canal inalámbrico libre de transmisiones. Los protocolos MAC basados en contención intentan sincronizar el tráfico de la red

para que las transmisiones comiencen sólo en intervalos de tiempo predeterminados. Una vez que todas las transmisiones se hayan completado en un ciclo de tiempo, los protocolos permiten que los nodos vuelvan “dormir” hasta el siguiente periodo de transmisión.

- Sobrecarga de protocolo: La sobrecarga en los protocolos MAC puede resultar de sobrecargas por mensaje, de colisiones o del intercambio de mensajes de control adicionales. Los protocolos MAC deben tener un número reducido de mensajes de control.

Si dos nodos están fuera de alcance, ellos no pueden interactuar entre sí; esto da lugar a los conocidos problemas de terminales ocultos y terminales expuestos.

2.2.5.2. El problema del terminal oculto

El problema del terminal oculto o problema del nodo oculto ocurre cuando un nodo detecta si el medio está libre para comenzar la transmisión de un mensaje. En redes inalámbricas, este problema ocurre cuando un nodo es visible desde el nodo receptor, pero no desde otros nodos que se comunican con este nodo receptor. Esta situación se puede observar en la Figura 5. Si por ejemplo un nodo A quiere enviar un mensaje a un nodo B, el nodo A no podrá detectar que el nodo C está enviando mensajes a los nodos B y D. El nodo receptor B está en el rango de transmisión del nodo A y del nodo C; por lo que, es posible que ocurra una colisión en B cuando los nodos A y C envíen mensajes a B al mismo tiempo. Esta colisión no puede ser directamente detectada, pues una operación de escucha de la señal portadora (carrier-sense) realizada por el nodo C mostrará que el canal inalámbrico está libre, porque ni el nodo A ni el nodo C se pueden escuchar entre sí.

Este problema es particularmente relevante en los protocolos de Acceso Múltiple con Escucha de Señal Portadora (CSMA - Carrier-Sense Multiple Access).

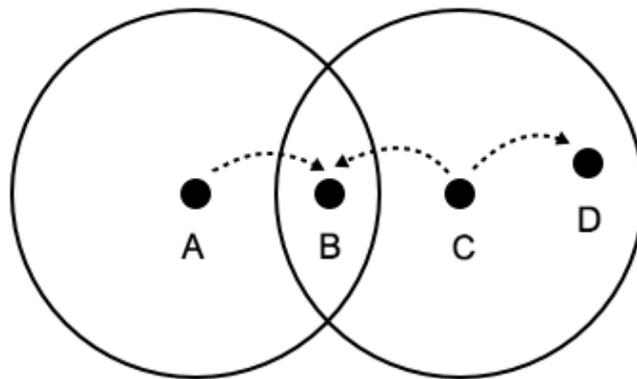


Figura 5. El problema del terminal oculto. El nodo A no puede detectar las transmisiones del nodo C, lo que resulta en una colisión en el nodo receptor B.
Fuente: (Fischione, 2014)

2.2.5.3. El problema del terminal expuesto

Este problema se ilustra en la Figura 6. De acuerdo a este escenario, el nodo B desea enviar un mensaje al nodo A. Además, el nodo C quiere enviar un mensaje al nodo D. Aunque la transmisión y recepción de datos en este caso se puede dar sin ningún problema, la operación de escucha de la señal portadora del nodo C, puede suprimir la transmisión del nodo B, debido a que asume que el nodo B, durante su transmisión de mensajes al nodo A, provocará alguna colisión, cuando no es así. Esto provoca que se desperdicie el ancho de banda.

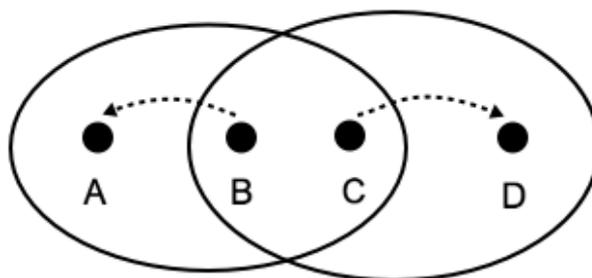


Figura 6. El problema del terminal expuesto. El nodo B detecta la transmisión del nodo C, y no transmite, incluso cuando la transmisión del nodo B no causa colisiones en A o D.
Fuente: (Fischione, 2014)

2.2.5.4. Características de los protocolos MAC

Las características de los protocolos MAC, según Fischione (2014), se pueden resumir como:

- Demora en la transmisión: Se define como la cantidad de tiempo que un mensaje pasa en el protocolo MAC. El problema de la demora requiere que el protocolo MAC sea simple y tenga los menos mecanismos posibles. Los principios de diseño deben comprometer la simplicidad y bajos retardos en el control de errores, retransmisiones y prevención de colisiones.
- Rendimiento: Se define como velocidad a la que se procesan los mensajes. El rendimiento se puede medir en mensajes o símbolos por segundo, pero lo más común es medir en bits por segundo. El objetivo es maximizarlo.
- Equidad: Un protocolo MAC es equitativo si asigna un canal entre los nodos competidores de acuerdo con algunos criterios de equidad. Sin embargo, en una WSN el término equidad puede resultar complejo, pues la asignación de canales entre nodos puede ser o no justa.
- Escalabilidad: Describe la capacidad del sistema de comunicación para cumplir con las características de rendimiento independientemente del tamaño de la red y el número de nodos competidores. En el diseño del protocolo MAC se debe considerar cómo manejar la competencia por el acceso al canal, la retransmisión y qué sucede si el tráfico de datos aumenta debido a un aumento del número de nodos.
- Robustez: Describe la sensibilidad y confiabilidad del protocolo para manejar un alto tráfico de datos durante un período sostenido de tiempo.
- Estabilidad: Describe qué tan bueno es el protocolo manejando fluctuaciones en el tráfico de datos durante un período de tiempo sostenible.

2.2.6. Topologías

El estándar IEEE 802.15.4 es el más utilizado en las redes de sensores inalámbricos, por lo que en esta sección se hablará acerca de las topologías que este estándar soporta. Este estándar soporta topologías en estrella y peer-to-peer (Yang, 2014). La topología en estrella se utiliza para formar redes estrella y árbol, y la topología peer-to-peer para formar redes de árbol y malla clúster. La Figura 7 muestra estas topologías.

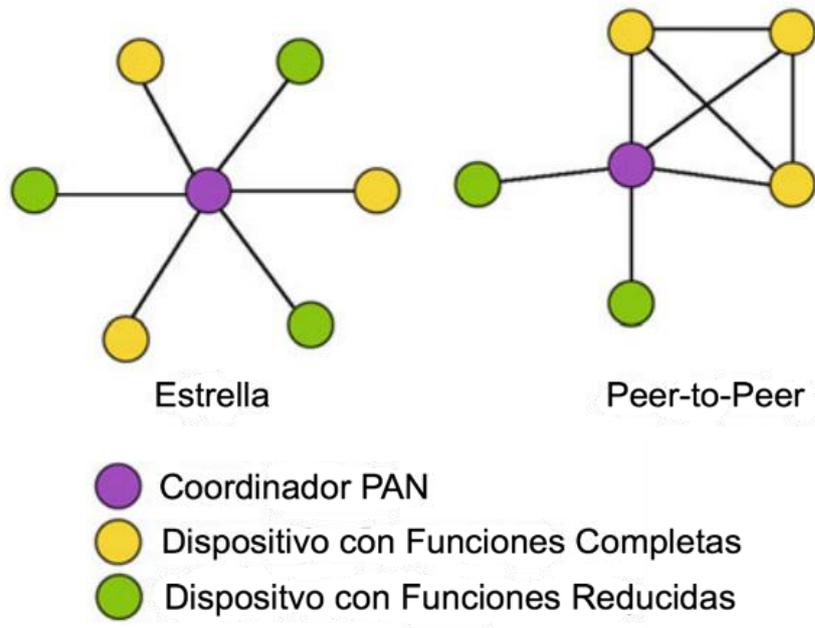


Figura 7. Topologías del estándar IEEE 802.15.4.
Fuente: (Yang, 2014)

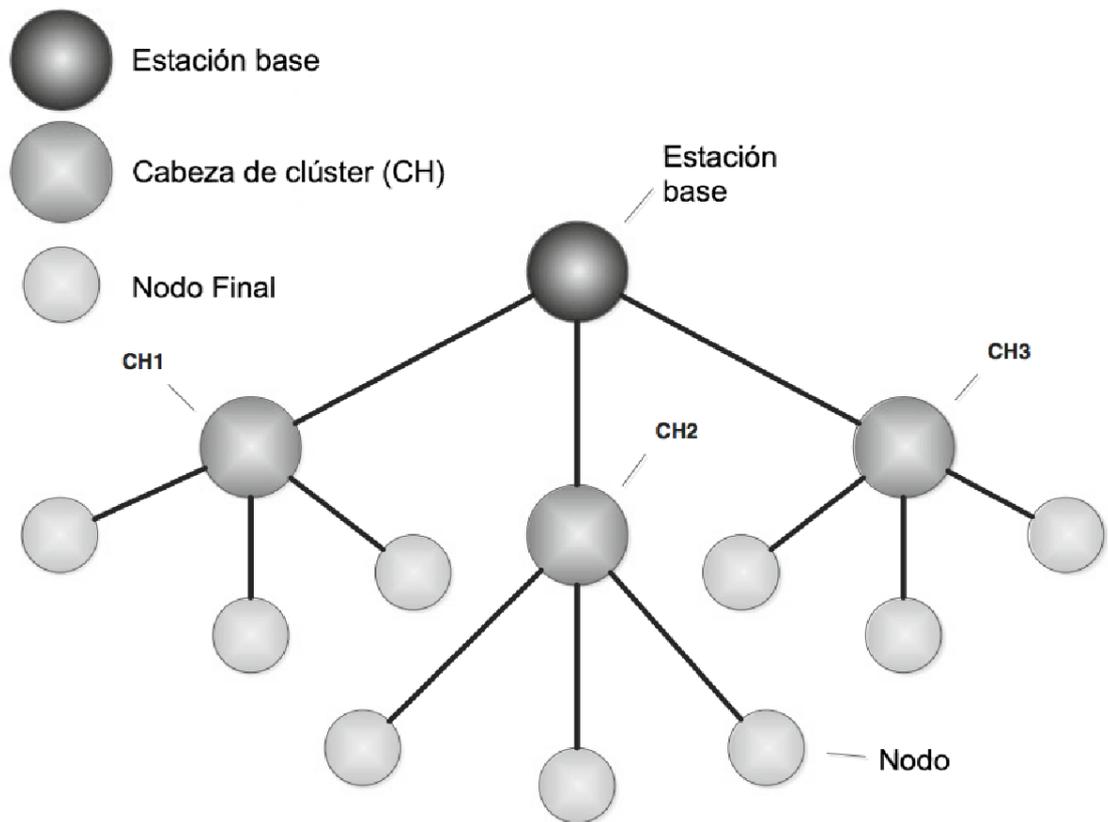


Figura 8. Topología en árbol clúster.
Fuente: (Yang, 2014)

En la topología estrella, un dispositivo actúa como coordinador, siendo este el dispositivo central, que se denomina coordinador PAN, el cual se encarga de inicializar y administrar toda la red. Los otros dispositivos de la red deben unirse a la red asociándose con el coordinador PAN. El coordinador PAN controla todas las comunicaciones de la red. La topología peer-to-peer también requiere un coordinador PAN para inicializar el proceso de inicio de la red. Sin embargo, las comunicaciones dentro de la red están basadas en la topología peer-to-peer y no se limitan por el coordinador PAN. Cualquier dispositivo con funciones completas puede hablar libremente con otro dispositivo de similares características dentro de un rango de comunicación. Cualquier dispositivo con funciones reducidas puede solo hablar con su dispositivo padre de funciones completas, y no puede hablar directamente con otro dispositivo de funciones reducidas. Los dispositivos con funciones reducidas y con funciones completas forman una topología en árbol (Yang, 2014).

Una topología en árbol clúster puede ser una red de clúster o una red multi-clústers. Una red clúster contiene sólo una cabeza de clúster (CH – Cluster Head). Todos los nodos están conectados a la cabeza de clúster con un salto, y la topología de red se convierte en una topología en estrella. Una red multi-clúster contiene más de una cabeza de clúster. Cada nodo en un clúster sólo puede hablar con su cabeza clúster. Todas las cabezas de clúster forman una subred de nivel superior, la cual puede comunicarse directamente con su cabeza, la cual podría la estación base, conectada a una red externa o a una cabeza de las cabezas de clúster. Los nodos en diferentes clústers no pueden comunicarse directamente entre sí, pero se pueden comunicar entre ellos mismos a través de sus cabezas de clúster. La Figura 8 muestra la topología en árbol clúster.

2.2.7. Arquitectura general de un nodo sensor

Una arquitectura es la identificación de los componentes de un sistema y sus relaciones entre sí, que permite a los diseñadores comprender cómo los componentes encajan en el sistema (IGI Global, 2017).

Debido al gran número de nodos sensores que se implementan en una red de sensores inalámbricos, éstos deben ser pequeños, baratos, eficientes en términos de energía y tener la suficiente capacidad de almacenamiento, computación y comunicación. Por lo tanto, los nodos sensores no pueden usar baterías de larga duración y gran capacidad ni una fuente de alimentación principal como fuente de energía debido a la limitación de su tamaño. Los requisitos de que sean de bajo costo y eficiencia energética, determinan que los nodos sensores deben usar procesadores de bajo consumo de energía y pequeños transceptores de radio con ancho de banda y rango de transmisión limitados. Por esto, el diseño del nodo sensor está limitado por las capacidades requeridas de computación y comunicación. De acuerdo a Yang (2014), los nodos sensores se componen de cuatro subsistemas principales:

- Un subsistema de detección que consiste de uno o más sensores y actuadores para monitorear el entorno físico.
- Un subsistema de computación que consiste de un microcontrolador o microprocesador con memorias para almacenar y procesar los datos recolectados por el subsistema de detección.
- Un subsistema de comunicación que consiste de un sistema de radio de corto alcance para la comunicación inalámbrica.
- Un subsistema de suministro de energía, lo que normalmente corresponde al uso de baterías, que energiza a todo el nodo sensor. Un generador de energía podría ser incluido en este subsistema, si se emplean las tecnologías de recolección de energía.

La arquitectura típica de un nodo sensor inalámbrico se muestra en la Figura 9. El subsistema de detección se puede dividir en dos partes. El primero es un dispositivo de detección básico que incluye elementos sensores que adquieren información del mundo físico alrededor del nodo sensor y la convierten en una señal analógica, luego un convertidor análogo-digital convierte esta señal analógica en un valor digital. La segunda parte es un dispositivo de detección inteligente que puede proporcionar funcionalidades adicionales, como el preprocesamiento de datos de muestreo y la compensación de cualquier error de medición. El subsistema de detección

debe proporcionar una interfaz compatible con la tarea llevada a cabo por el microcontrolador.

El subsistema de computación lleva a cabo todo el trabajo de procesamiento de datos del sensor, administración de la operación de la batería del sistema, establecimiento de los parámetros de los sensores y la ejecución del protocolo de capa alta.

El subsistema de comunicación es el responsable de transmitir y recibir los paquetes de datos. En este subsistema es donde se consume la mayor parte de energía del nodo sensor.

El subsistema de suministro de energía consta de una batería y un convertidor dc-dc con un circuito de control auxiliar. El convertidor dc-dc proporciona varios voltajes para soportar todos los dispositivos del sistema y permite trabajar en diferentes modos para reducir el consumo de energía (Yang, 2014).

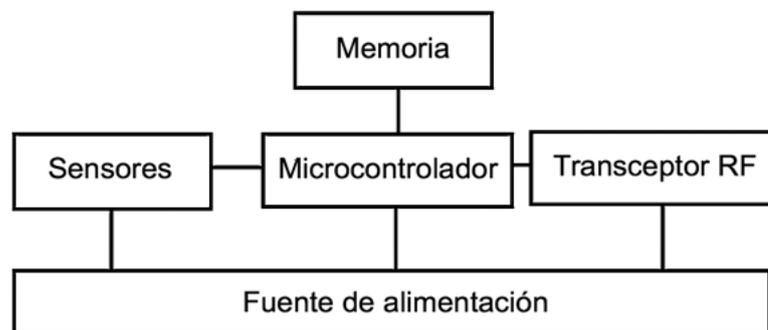


Figura 9. Arquitectura de un nodo sensor.
Fuente: (Yang, 2014)

2.2.8. Aplicaciones de las WSN

Tradicionalmente, las redes de sensores han sido utilizadas en el contexto de aplicaciones de gama alta, como sistemas de detección de amenazas nucleares y de radiación, aplicaciones biomédicas, detección de hábitats y monitoreo sísmico. En estos últimos años, el interés se ha centrado en redes de sensores biológicos y químicos para aplicaciones de seguridad nacional; además, el interés se ha extendido a aplicaciones directas al consumidor. Las aplicaciones existentes y potenciales de redes de sensores incluyen entre

otras, detección militar, seguridad física, control de tráfico aéreo, vigilancia de tráfico, videovigilancia, automatización industrial y de manufactura, control de procesos, administración de inventarios, robótica distribuida, detección del clima, monitoreo ambiental, monitoreo de la frontera nacional, y construcción y monitoreo de estructuras. Una pequeña lista de las aplicaciones, según Sohraby, Minoli & Znati (2007), se muestra a continuación:

- Aplicaciones militares
 - Monitoreo de fuerzas adversarias
 - Monitoreo de fuerzas aliadas
 - Vigilancia de campo de batalla
 - Evaluación del daño de batalla
 - Detección de ataque nuclear, biológico y químico, etc.
- Aplicaciones ambientales
 - Microclimas
 - Detección de incendios forestales
 - Detección de inundaciones
 - Agricultura
 - Acuicultura, etc.
- Aplicaciones de salud
 - Monitoreo remoto de datos fisiológicos
 - Seguimiento y monitoreo de médicos y paciente dentro de un hospital
 - Administración de drogas
 - Asistencia a personas mayores, etc.
- Aplicaciones para el hogar
 - Automatización del hogar
 - Lectura automática de variables del entorno, etc.
- Aplicaciones comerciales
 - Control ambiental en edificios industriales y de oficinas
 - Control de inventario
 - Seguimiento y detección de vehículos
 - Vigilancia del flujo de tráfico, etc.

Las redes de detección y control pretenden expandirse aún más en los próximos años, y esta expansión se relaciona no sólo con aplicaciones de ciencia e ingeniero, sino también con una gran cantidad de aplicaciones de consumo nuevas. En el área industrial se espera que en un futuro cercano sea posible integrar sensores en productos y sistemas comerciales para mejorar el rendimiento y vida útil de una variedad de productos. Las aplicaciones de consumidor incluyen, entre otras, protección y seguridad de infraestructura crítica, cuidado de salud, medio ambiente, energía, procesamiento de producción y calidad de vida. También se espera que las WSN brinden a los consumidores un nuevo conjunto de comodidades, que incluyen calefacción e iluminación doméstica controladas a distancia, diagnóstico de salud personal, telemetría de mantenimiento automático de automóviles, entre otros. Así también prevé que esta tecnología permita al consumidor hacer un seguimiento de sus pertenencias, mascotas y niños pequeños. No existe un límite definido para las redes de sensores inalámbricos, por lo que se espera una expansión total entre todos los aspectos de la vida cotidiana (Sohraby, Minoli, & Znati, 2007).

2.2.9. Desafíos y limitaciones de las WSN

Si bien las redes de sensores inalámbricos comparten muchas similitudes con otros sistemas distribuidos, están sujetas a una variedad de desafíos y limitaciones únicas. Estas restricciones afectan en el diseño de una WSN, lo que conlleva al uso de protocolos y algoritmos que difieren de sus contrapartes en otros sistemas distribuidos.

2.2.9.1. Consumo de energía

Los nodos sensores que conforman una WSN usualmente tienen fuentes de energía limitadas. Por lo general, se alimentan con baterías, que deben reemplazarse o recargarse cuando se agoten. Si la batería se puede recargar o no afecta significativamente a la estrategia aplicada al consumo de energía. Debido a esta limitación, los protocolos de WSN se centran principalmente en el ahorro de energía (Fischione, 2014).

2.2.9.2. Distribución de los nodos

En una WSN, la posición de los nodos no necesita ser predeterminada. Esto permite una distribución aleatoria en terrenos inaccesibles o en operaciones de socorro. Sin embargo, esta distribución aleatoria requiere el desarrollo de protocolos de auto-organización para la pila de protocolos de comunicación.

Los nodos deben tener la capacidad de configurarse, operar y colaborar con otros nodos y adaptarse a fallas y cambios en el entorno. La gran mayoría de WSN deben operar sin supervisión, de modo que, la adaptación, mantenimiento y reparación deben realizarse de forma autónoma.

En las redes de sensores con limitaciones de energía, todas estas características de autogestión deben diseñarse e implementarse de manera tal que no incurran en gastos excesivos de energía (Fischione, 2014).

2.2.9.3. Medio inalámbrico

Una señal de radiofrecuencia (RF) se atenúa mientras se propaga a través de un medio inalámbrico. La potencia recibida es proporcional al inverso del cuadrado de la distancia desde la fuente de la señal. Como consecuencia, una distancia creciente entre un nodo sensor y una estación base aumenta rápidamente la potencia de transmisión requerida. Por lo tanto, es más eficiente, en términos de energía, dividir una gran distancia en varias distancias más cortas, lo que lleva al desafío de admitir comunicaciones y enrutamiento de múltiples saltos. La comunicación de múltiples saltos requiere que los nodos en una red cooperen entre sí para identificar rutas eficientes y para servir como relevos (Fischione, 2014).

2.2.9.4. Limitaciones por hardware

El objetivo principal de una red de sensores inalámbricos es crear dispositivos más pequeños, más baratos y más eficientes. Estas características afectan en el diseño de muchos protocolos y algoritmos utilizados en una WSN. Por ejemplo, las tablas de enrutamiento que contienen entradas para cada destino potencial en una red pueden ser demasiado grandes para caber en la memoria de un nodo sensor. Solo una pequeña cantidad de datos, como una lista de

nodos vecinos, puede almacenarse en la memoria de un nodo sensor. Por lo tanto, muchas arquitecturas y soluciones software deben diseñarse para operar de manera eficiente en un hardware muy limitado en recursos (Fischione, 2014).

2.2.9.5. Seguridad

La operación remota y desatendida de los nodos sensores aumenta su exposición a ataques e intrusiones maliciosas. Las consecuencias de una posible intrusión pueden ser graves y dependen del tipo de aplicación que tiene la red. Las lecturas del sensor deben enviarse a la estación base con una probabilidad dada de éxito, pues de lo contrario, la falta de lecturas del sensor podría impedir la correcta ejecución de acciones de control. Sin embargo, maximizar la confiabilidad puede incrementar el consumo de energía de la red sustancialmente. Aunque existen muchas técnicas y soluciones para sistemas distribuidos en cuanto a seguridad, muchas de éstas necesitan requisitos computacionales, de comunicación y de almacenamiento significativos que, por lo general, no pueden ser satisfechos por nodos sensores con recursos limitados. Es por esto que, para el diseño de una WSN, se debe considerar la compensación entre la confiabilidad de las comunicaciones y el consumo de energía (Fischione, 2014).

2.3. Microcontrolador

Un microcontrolador es un dispositivo programable, basado en un procesador, el cual está equipado con memoria, temporizadores, pines de entrada y salida y otros periféricos (Gridling & Weiss, 2007). Este chip puede ser programado con un código de usuario, controlando así, el comportamiento del mismo. Esto hace que los microcontroladores sean muy versátiles, reconfigurables y adecuados para implementar comportamientos digitales complejos. Los microcontroladores se encuentran en casi todos los productos electrónicos existentes: desde relojes hasta teléfonos celulares y automóviles (E.T.S.V. Scintilla, 2017).

Los microcontroladores pueden tener muchos periféricos. Estos periféricos son bloques de hardware integrados que el procesador puede leer y controlar.

Algunos ejemplos de periféricos son los pines de entrada y salida de propósito general (GPIO – General Purpose Input Output), convertidores análogo-digital, buses de comunicación digital, etc. Los microcontroladores vienen en diferentes tipos con diferentes velocidades de reloj, tamaños de memoria, tipos y número de periféricos y arquitecturas de procesador (E.T.S.V. Scintilla, 2017).

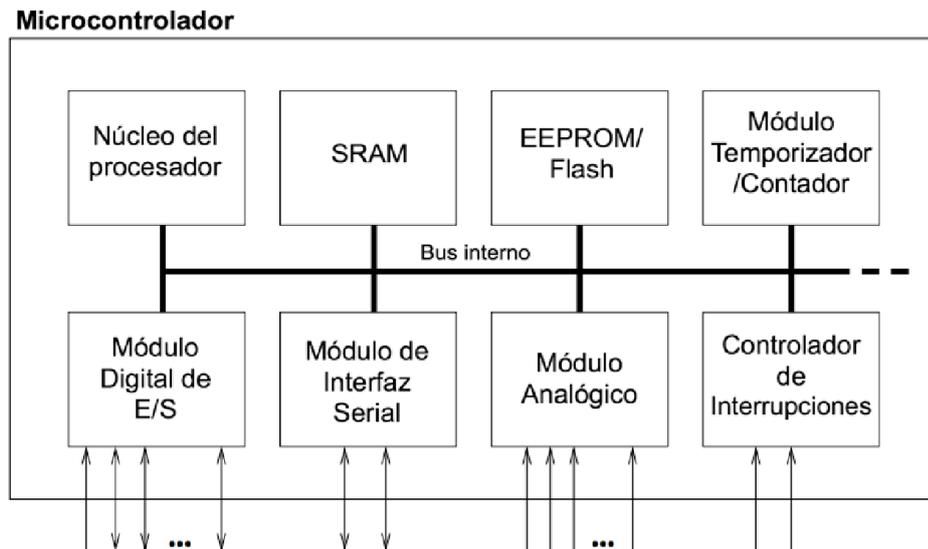


Figura 10. Diagrama de bloques de un microcontrolador.
Fuente: (Gridling & Weiss, 2007)

Los diseños internos básicos de los microcontroladores son bastante similares entre los distintos fabricantes. La Figura 10 muestra el diagrama de bloques de un microcontrolador típico. Todos los componentes están conectados a través de un bus interno y están integrados en un solo chip. Los módulos de conectan al mundo exterior a través de pines de entrada y salida.

A continuación, se describe brevemente cada uno de estos módulos, según Gridling & Weiss (2007):

- Núcleo del procesador: Es el CPU del controlador. Éste contiene la unidad aritmética lógica, la unidad de control y los registros.
- Memoria: Es donde se almacenan los datos del controlador, se suele dividir en memoria de programa y memoria de datos. En controladores grandes, un controlador DMA (Direct Memory Access) es el que maneja la transferencia de datos entre los periféricos y la memoria.

- Controlador de interrupciones: Las interrupciones son útiles para interrumpir el flujo normal de un programa en caso de eventos internos o externos. Este módulo permite tener control sobre éstas.
- Temporizador/Contador: La mayoría de los controladores tienen al menos uno o más temporizadores/contadores, los cuales pueden ser usados como eventos por marcas de tiempo, eventos por conteo, o medición de intervalos. Muchos controladores también contienen salidas PWM (Pulse Width Modulation), las cuales pueden ser usadas para controlar motores, leds, etc.
- E/S Digitales: Los puertos digitales paralelos de entrada y salida (E/S) son una de las principales características de los microcontroladores. El número de pines de E/S puede variar desde 3-4 hasta más de 90 pines, dependiendo de la familia del controlador y el tipo del controlador.
- E/S Analógicas: A excepción de unos pocos controladores pequeños, la gran mayoría cuentan con conversores análogo/digital integrados, que difieren en el número de canales (2-16) y su resolución (8-16 bits). El módulo analógico generalmente también cuenta con un comparador analógico. En algunos casos, los microcontroladores suelen incluir conversores digital/análogo.
- Interfaces: Los controladores usualmente tienen al menos una interfaz serial que puede usarse para descargar el programa en el mismo controlador y para comunicarse con la PC de desarrollo en general. Debido a que, las interfaces seriales también se usan para comunicarse con dispositivos periféricos externos, la mayoría de controladores ofrecen varias y variadas interfaces como SPI y UART. Muchos controladores también contienen controladores de bus integrados para los buses de campo más comunes como I²C y CAN. Los microcontroladores más grandes pueden además tener interfaces PCI, USB o Ethernet.
- Perro Guardián (Watchdog Timer): El temporizador “perro guardián” se usa para restablecer el controlador en caso de que el software falle.

- Unidad de depuración: Algunos controladores vienen equipados con hardware adicional para permitir la depuración remota del chip desde una PC.

2.3.1. Arquitectura ARM

Los microcontroladores pueden tener diferentes tipos de arquitecturas, y una de las más utilizadas en términos de cantidad es la arquitectura ARM. Los procesadores basados en ARM equipan aproximadamente el 75% de los dispositivos móviles del mundo (Noviello, 2017).

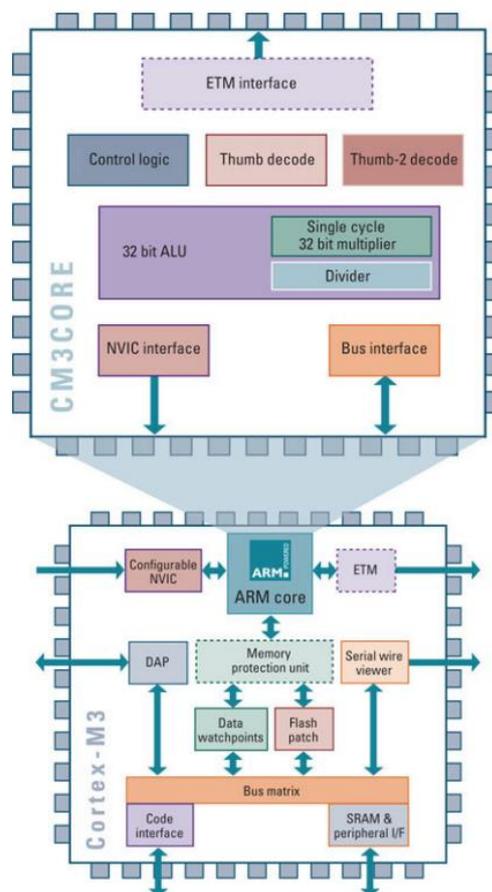


Figura 11. Relación entre un microcontrolador Cortex M y su núcleo Cortex M.
Fuente: (Noviello, 2017)

Una arquitectura ARM es un conjunto de especificaciones con respecto al conjunto de instrucciones, el modelo de ejecución, la organización y el diseño de la memoria, los ciclos de instrucciones y más, que describen con precisión una máquina que implementará dicha arquitectura (Noviello, 2017).

Cortex M es una familia de núcleos físicos diseñada para integrarse con dispositivos de silicio específicos del fabricante para formar un microcontrolador terminado. La forma en la que funciona un núcleo no solo está definida por su arquitectura ARM, sino también por los periféricos integrados y capacidades de software definidas por el fabricante. La Figura 11 muestra la relación entre un microcontrolador basado en Cortex M y su núcleo Cortex M.

La compañía británica ARM Holdings es la que desarrolló la arquitectura y el conjunto de instrucciones para productos basados en ARM, sin embargo, esta compañía no fabrica dispositivos. Esto es un aspecto importante y la razón de por qué hay muchos fabricantes de dispositivos que desarrollan, producen y venden microcontroladores basados en la arquitectura ARM. STMicroelectronics es uno de estos fabricantes, y fue el primero en vender todo el portafolio de los procesadores basados en Cortex M.

Hoy en día, los microcontroladores de 32 bits basados en la arquitectura ARM se han hecho tan populares por su alta eficiencia, bajo consumo de energía y bajo costo que han comenzado a abarcar incluso el mercado de los microcontroladores de 8 bits (Pitcher, 2013). El lanzamiento del núcleo Cortex M0 en el 2009 y el lanzamiento del núcleo Cortex M0+ en el 2012, provocaron que poco a poco se comience a desplazar a los microcontroladores de 8 bits. Esto debido a que las mejoras incorporadas en el núcleo Cortex M0+ y el rendimiento son significativamente mejor que sus competidores de 8 y 16 bits, sumado al increíble bajo costo de estos nuevos microcontroladores con este núcleo (Pitcher, 2013).

2.3.1.1. Mapa de memoria

ARM define un espacio de direcciones de memoria estandarizado común para todos los núcleos Cortex M, lo cual asegura la portabilidad de código entre los diferentes fabricantes de microcontroladores. El espacio de memoria tiene un ancho de 4 GB y está organizado en varias subregiones con diferentes funcionalidades lógicas. La Figura 12 muestra el diseño de la memoria de un procesador Cortex M.

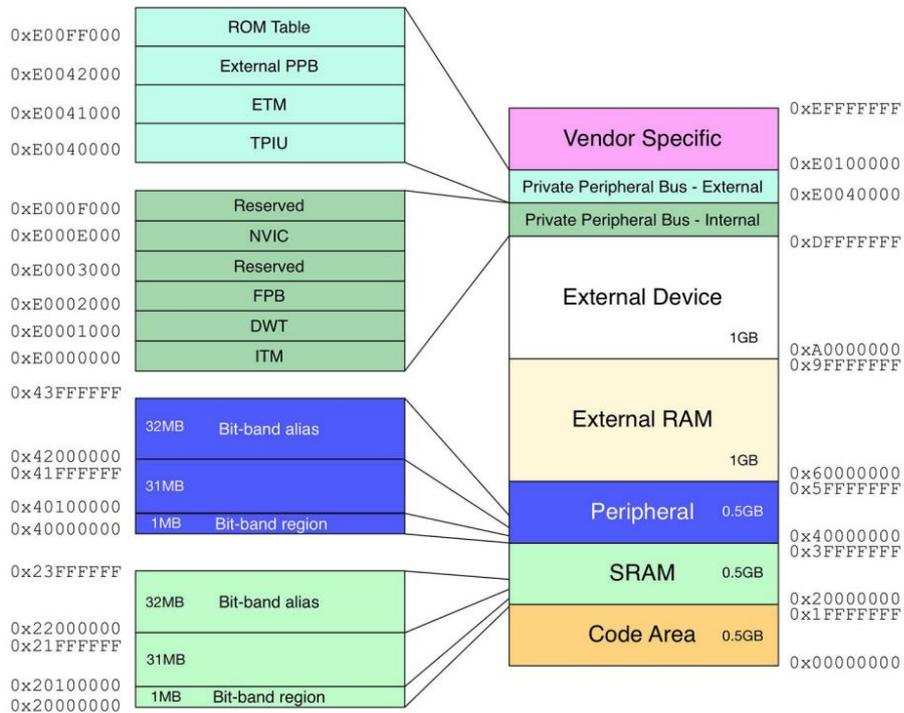


Figura 12. Espacio de direcciones de memoria en un microcontrolador Cortex M.
Fuente: (Noviello, 2017)

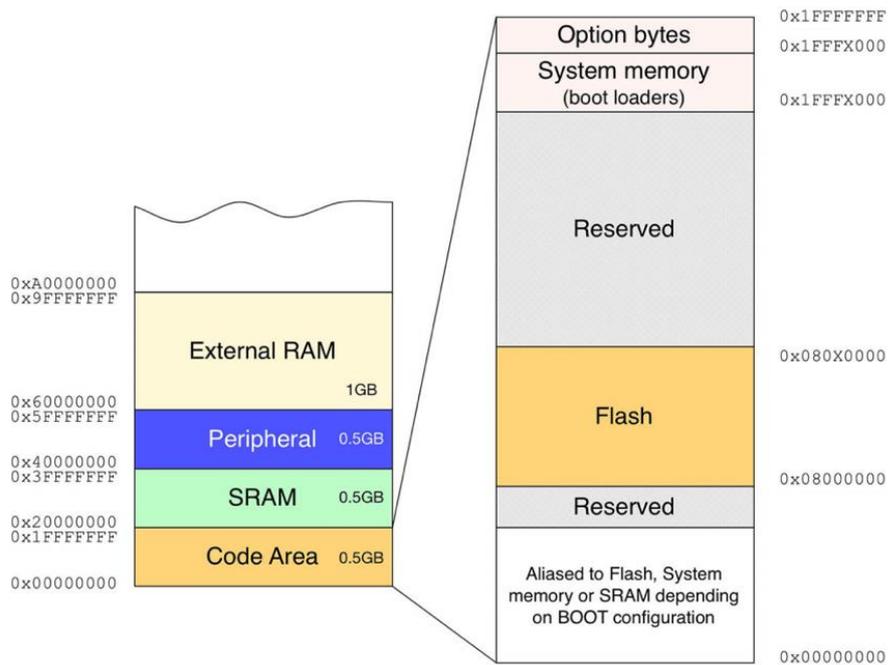


Figura 13. Diseño de memoria del Área de código de un microcontrolador STM32.
Fuente: (Noviello, 2017)

En el caso de los microcontroladores STM32 (de la empresa STMicroelectronics) el área de código (Code Area) está dividida en algunas subregiones como se muestra en la Figura 13.

En todos los procesadores Cortex M el área de código comienza en la dirección 0x00000000. La posición del área de código está estandarizada entre todos los proveedores de Cortex M, incluso si la arquitectura central es suficientemente flexible para permitir a los fabricantes organizar esta área de una manera diferente. De hecho, para todos los dispositivos STM32, un área que comienza en la dirección 0x08000000 está vinculada a la memoria flash interna de un microcontrolador, y es el área donde reside el código del programa.

Las dos últimas secciones están dedicadas a la Memoria del Sistema (System Memory) y a los Bytes de Opciones (Option Bytes). La primera es una región ROM reservada para los bootloaders. Cada familia STM32 cuenta con un bootloader, el cual es preprogramado durante la producción del chip. La región de los bytes de opciones contiene una serie de bits que se utilizan para configurar varios aspectos del microcontrolador como protección de lectura flash, vigilancia de hardware, modo de arranque, etc).

2.3.2. Microcontroladores STM32

STM32 es una amplia gama de microcontroladores divididos nueve subfamilias, cada una con sus propias características. ST comenzó la producción de microcontroladores STM32 en el 2007, comenzando con la serie STM32F1, que aún está en desarrollo. A continuación, se presentan algunas ventajas del uso de estos microcontroladores, según Noviello (2017):

- Todos están basados en Cortex M, lo que asegura la disponibilidad de herramientas en el mercado para desarrollar aplicaciones.
- Cadena de herramientas basada en ARM gratis.
- Compatibilidad entre dispositivos de la misma familia.
- Compatibilidad pin a pin.
- Muchos de sus pines son tolerantes a 5 V.
- 32 centavos por 32 bits: El bajo costo de la familia STM32F0 hace que ésta sea la elección correcta para migrar desde los microcontroladores

de 8/16 bits a una plataforma poderosa y coherente, manteniendo precios comparables.

- Bootloader integrado: Los microcontroladores STM32 cuentan con un bootloader integrado, el cual permite reprogramar la memoria flash interna usando algún periférico de comunicación como USART, SPI, etc.

Aunque los microcontroladores STM32 cuentan con todas estas ventajas, también tienen ciertas desventajas como la falta de herramientas de desarrollo oficiales, la falta de documentación y algunos errores en las librerías oficiales que ofrece ST.

2.3.3. Aplicaciones

Los microcontroladores están destinados a dispositivos integrados, en comparación con los microprocesadores que se utilizan en PCs u otros dispositivos de uso múltiple. Los microcontroladores se emplean en invenciones y aplicaciones como herramientas eléctricas, dispositivos médicos implantables, sistemas de control en automóviles, máquinas de oficina, dispositivos de control remoto, juguetes, etc. Debido a su reducido tamaño y costo, los microcontroladores son económicos para controlar cada vez más dispositivos y operaciones. A continuación, se presentan las aplicaciones de los microcontroladores según el campo de acción (Electronics Hub, 2015):

- Aplicaciones en el hogar
 - Dispositivos para la detección y control de luces.
 - Dispositivos para la detección y control de temperatura.
 - Dispositivos detectores de incendios y de seguridad.
 - Internet de las cosas.
- Aplicaciones en el control industrial
 - Dispositivos de instrumentación industrial.
 - Dispositivos de control de procesos.
- Aplicaciones en dispositivos de medición
 - Voltímetro
 - Medición de objetos giratorios

- Amperímetro
- Sistemas de medición manuales.

2.4. Domótica

La domótica es el concepto de controlar y automatizar el uso de electrodomésticos y otros equipos eléctricos, como bombillas, indicadores de temperatura o cerraduras de puertas (Andersson, y otros, 2015).

El concepto de Internet de la Cosas (IoT – Internet of Things) puede vincularse estrechamente con la domótica. Los dispositivos IoT como los termómetros inteligentes, pueden controlarse desde un teléfono inteligente y, por lo tanto, pueden tener un alcance mundial con la ayuda de Internet. La domótica con dispositivos IoT proporciona una gran comodidad y medios para optimizar el consumo de energía, por ejemplo, habilitar automáticamente el modo de ahorro de energía de los equipos bajo ciertas circunstancias o la presentación de datos de consumo de energía a un usuario en tiempo real. Sin embargo, una de las desventajas de los dispositivos IoT son los diferentes protocolos que pueden utilizar para comunicarse. En un sistema domótico ideal, los protocolos de comunicación utilizados deben ser preferentemente aquellos soportados por dispositivos comunes de consumo, con el objetivo de proporcionar la máxima compatibilidad (Andersson, y otros, 2015).

Un ejemplo básico de un sistema domótico es el encendido de luces cada vez que alguien ingresa a la sala o en una hora específica del día, sin activar el interruptor de luz. De esta forma, el sistema actuó de manera inteligente, determinando qué hacer en función de la configuración establecida.

La configuración de los sistemas domóticos generalmente se administra desde un portal en línea accesible desde un computador de escritorio o dispositivos móviles. Esto brinda al usuario, el control remoto de su hogar, en cualquier momento y desde cualquier lugar. Todo lo que se requiere es una conexión de Internet y una infraestructura (sensores, cámaras, dispositivos, etc.) en funcionamiento (Miller, 2013).

En la Figura 14, se muestra un ejemplo de un sistema domótico con diversos equipos eléctricos inteligentes.

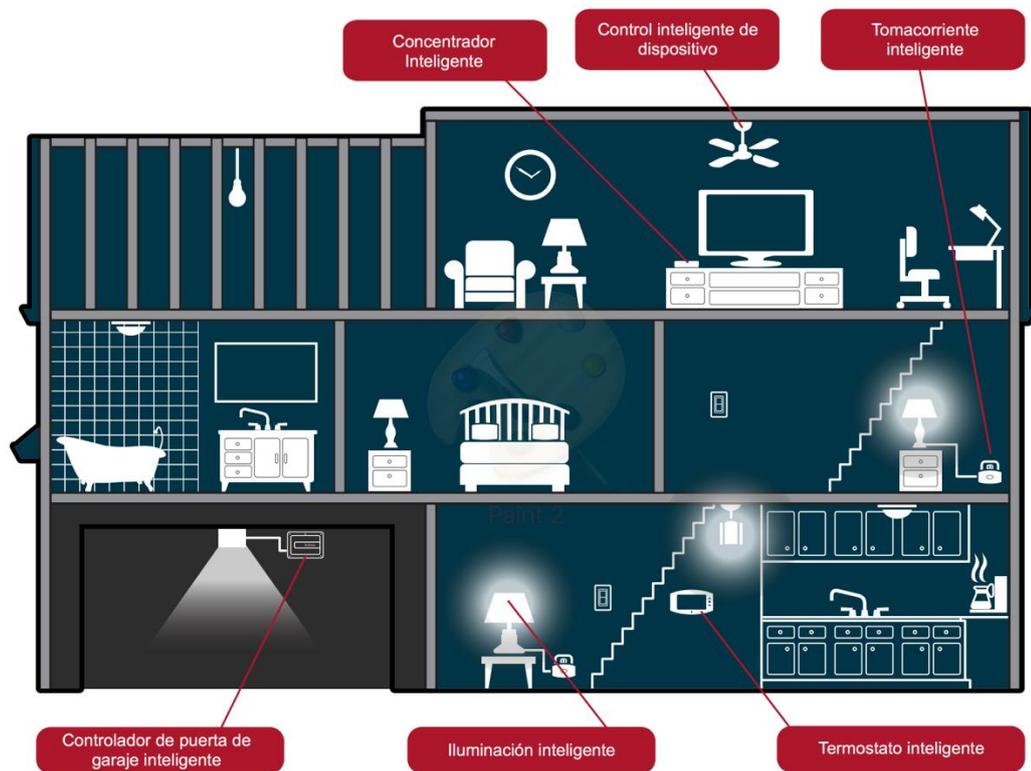


Figura 14. Ejemplo de un sistema domótico.
Fuente: (NuTone, 2016)

2.4.1. Beneficios y aplicaciones de la domótica

En base a las funciones básicas de un sistema domótico, se incluyen algunas aplicaciones de la domótica más comunes (Miller, 2013):

2.4.1.1. Confort y ahorro de energía

- Iluminación interior y exterior
 - Encendido y apagado automático de luces, para simular que existe alguien en la casa como medio seguridad contra ladrones.
 - Encendido de las luces del interior automáticamente cuando se abra la puerta del garaje, para no ingresar a la casa en oscuridad.
 - Sincronización de luces con sensores para su encendido automático cuando alguien entra a una habitación.
 - Controlar las luces de la casa cuando se active o se desactive el sistema de seguridad.
- Calefacción y aire acondicionado
 - Encender el aire acondicionado desde fuera de casa en días calurosos.

- Programar la temperatura del hogar para que se ajuste automáticamente en función de las personas que hay en la casa para un consumo óptimo de energía.

2.4.1.2. Seguridad

- Sistemas de seguridad
 - Iniciar sesión remotamente en el sistema de seguridad para activarlo o desactivarlo.
 - Enviar alarmas por correo electrónico o mensaje de texto, en caso de que sensores hayan detectado movimiento cerca de la caja de seguridad, armario de armas, etc.
 - Controlar remotamente las cámaras de seguridad.
- Cerraduras
 - Recibir recordatorios de seguridad directamente en un dispositivo móvil si avanza más de una distancia predefinida, pero no cerró las puertas, y permitir cerrarlas de forma remota.
 - Desbloquear las puertas desde un teléfono inteligente para permitir que un visitante ingrese a la casa.

2.5. Inteligencia Artificial Distribuida

La inteligencia artificial distribuida (IAD) es la ciencia de distribuir, coordinar y predecir el desempeño de tareas, metas o decisiones en un entorno de múltiples agentes (Deshmukh, 2004). La IAD, que comenzó como una rama de la inteligencia artificial hace unos veinticinco años, se ha convertido en una disciplina de investigación independiente que representa la confluencia de ideas de la inteligencia artificial, la economía, la psicología, la sociología, la investigación operativa y la teoría organizacional.

2.5.1. Campos de investigación de la IAD

Las investigaciones alrededor de la inteligencia artificial distribuida originaron campos más específicos: Inteligencia Artificial Paralela (PAI – Parallel Artificial Intelligence), Solución de Problemas Distribuidos (DPS – Distributed Problem Solving) y Sistemas Multi-agente (MAS – Multi-agent System).

La computación paralela permite manejar cantidades de datos significativamente elevadas en tiempo real, lo que cambia la forma en que se pueden construir los sistemas de inteligencia artificial, lo que a su vez hace que el razonamiento basado en la memoria y los sistemas de visión basados en redes neuronales se vuelvan prácticos. La informática paralela proporciona una plataforma para modelar y construir sistemas inteligentes al simular los procesos (masivamente paralelos) que ocurren en la naturaleza, originando el campo de investigación de Inteligencia Artificial Paralela (PAI).

Los límites de DPS y MAS no están bien definidos. Ambos están compuestos por un grupo de entidades que interactúan. Se puede considerar que en un sistema DPS, todas las entidades trabajan juntas con un interés común de resolver un problema bien definido, a diferencia de las entidades de un MAS que pueden tener intereses diferentes (Correia, 2010).

2.5.2. Beneficios de la IAD

Los beneficios y ventajas de la IAD frente a los sistemas tradicionales son los siguientes (Correia, 2010):

- **Adaptabilidad:** Con los sistemas distribuidos es posible alcanzar perspectivas alternativas en situaciones emergentes.
- **Cooperación:** Los sistemas cooperativos tienen la capacidad de resolver problemas más grandes que los sistemas individuales y con una mejor eficiencia.
- **Contexto definido:** Si cada parte está bien definida en un contexto, sería mejor para el control, extensibilidad y comprensión.
- **Costo:** Normalmente, múltiples computadores de bajo costo son mejor que un sistema inteligente centralizado con un alto costo con sensores asociados.
- **Desarrollo paralelo:** Un sistema IAD puede separarse en partes, que son desarrolladas separadamente por expertos en cada dominio de conocimiento.
- **Eficiencia:** Si el sistema se encuentra bien sincronizado, las tareas paralelas son más rápidas de calcular que las tareas secuenciales.

- Extensibilidad: Nuevas partes pueden ser desarrolladas y fácilmente integradas en un sistema IAD.
- Confiabilidad: Las partes más importantes del sistema pueden ser redundantes.
- Calidad de resultados: Los resultados pueden combinarse, logrando mejores resultados que un sistema no distribuido.

2.5.3. Consideraciones para el diseño de un sistema IAD

En el diseño de un sistema de inteligencia artificial distribuida es importante tomar en cuenta la correcta división del problema a través de los agentes y la comunicación entre ellos.

Primero, es necesario formular, describir, descomponer y asignar correctamente los problemas y sintetizar los resultados entre un grupo de agentes inteligentes (Bond & Gasser, 1988). Si se trata de un sistema enfocado a la resolución de un problema (DSP), entonces es importante separar el problema en otros más pequeños y distribuir esos pequeños problemas entre los agentes. De forma que, un solo agente se enfoca en un área pequeña, actuando como “experto” en la resolución de sus tareas (Correia, 2010).

Los agentes inteligentes con gran capacidad de resolver problemas juntos no son realmente útiles si no se comunican en el mismo idioma o si no saben cómo interactuar entre ellos. En todos los sistemas IAD es necesario definir protocolos y lenguajes de comunicación. Pero esto no es suficiente, los agentes necesitan saber qué y cuándo comunicarse entre sí, asumiendo a veces interacciones sociales similares a los seres humanos, pero de una manera más limitada. Estas interacciones deben diseñarse cuidadosamente para evitar interacciones dañinas entre los agentes. Entonces, es necesaria coordinación. Un agente individual necesita representar y razonar acerca de las acciones, los planes y el conocimiento de otros agentes para coordinarse con ellos (Correia, 2010).

Finalmente, es necesario reconocer diferentes puntos de vista de cada agente e incluso combinarlos para lograr un resultado.

2.5.4. Aprendizaje distribuido

En general, el aprendizaje de un solo agente implica mejorar el rendimiento o incrementar el conocimiento de un solo agente (Decker, 1987). Un agente con un rendimiento mejorado o un mayor conocimiento resuelve problemas pasados con una mejor eficiencia o calidad. Se puede alcanzar un mejor rendimiento redistribuyendo el conocimiento o modificando la forma en que se usa ese conocimiento para resolver un problema. Se puede adquirir un mayor conocimiento con la experiencia de problemas pasados o mediante hechos insertados manualmente en la base de conocimiento.

De manera similar al aprendizaje de un solo agente, el aprendizaje distribuido también implica mejorar el rendimiento o aumentar el conocimiento. Sin embargo, este aprendizaje distribuido está relacionado a un grupo de agentes, no sólo a uno. Es importante notar que mejorar el rendimiento de un solo agente no necesariamente significa que el rendimiento global del grupo mejorará. Para mejorar el rendimiento global es necesario que agentes individuales se adapten entre sí.

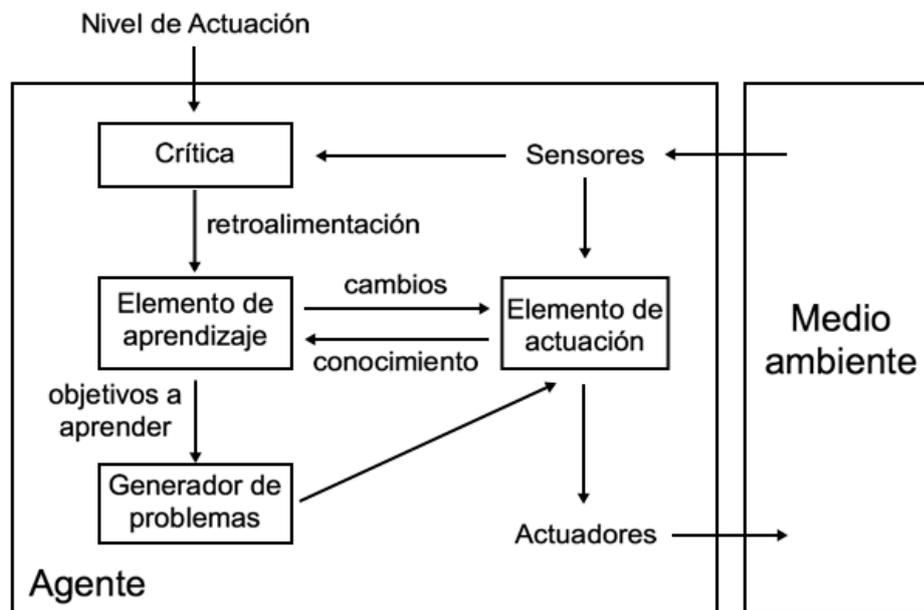


Figura 15. Modelo general para agentes que aprenden.
Fuente: (Russel & Norvig, 2008)

El aprendizaje distribuido también incluye aumentar el conocimiento de comunicación. Un aumento en el conocimiento de comunicación puede

conducir a un aumento en el rendimiento al permitir que los agentes se comuniquen de una manera más eficiente (Dowell & Bonnell, 2002). Una de las mejoras que se pueden hacer es la asignación de tareas a cada uno de los agentes. Si un agente conoce qué tareas realizan los otros agentes, esto mejorará significativamente la efectividad de la comunicación, porque el agente no se comunicará erróneamente con otro agente que no puede realizar la tarea actual (Correia, 2010).

En la Figura 15, se muestra un modelo general para un agente que aprende de su entorno.

2.5.5. Toma de decisiones distribuida

El proceso de toma de decisiones en un sistema IAD se puede realizar en una unidad centralizada que adquiera los resultados de agentes individuales o puede realizarse con una unidad distribuida. En el primer caso, la unidad central debe decirle a cada agente qué tareas tiene que realizar, en cambio, en el segundo caso, cada agente es responsable de sus propias decisiones. Las principales ventajas de un enfoque descentralizado sobre uno centralizado son la eficiencia y la no dependencia del sistema de un solo agente (Correia, 2010).

CAPITULO III: ANÁLISIS DE LA RED DE SENSORES INALÁMBRICOS

En este capítulo se describirá las consideraciones generales del sistema, sus funciones y características. Además, se expondrá el diseño del mismo, junto con los protocolos de comunicación desarrollados para el correcto funcionamiento de la red. Finalmente, se realizarán seis tipos de pruebas a la red prototipo diseñada y desarrollada con el fin de evaluar su comportamiento y analizar la correcta elección o no de la arquitectura de red propuesta.

3.1. Consideraciones generales del sistema

Previo al análisis y diseño de la red de sensores inalámbricos de interés en este trabajo, se presenta la descripción, características y funcionamiento de este sistema, con el objetivo de proporcionar una visión general y detallada del mismo.

3.1.1. Descripción de la red de sensores inalámbricos

La red de sensores inalámbricos, objeto de estudio en el presente trabajo de investigación, se analiza y se diseña considerando requerimientos de un sistema domótico, aunque la red puede ser utilizada en propósitos muy diversos, para lo cual se utiliza componentes y dispositivos de bajo costo. A continuación, se describe el funcionamiento general del sistema.

Tal como se afirmó al inicio de esta sección, el sistema constituye una red inalámbrica que permita la comunicación entre dispositivos inteligentes, para lo cual la red dispone de dos tipos de nodos. El primero que se lo denomina nodo padre (NP) debido a que se encarga de administrar las direcciones y comunicación de otros nodos inferiores denominados nodos hijos (NH).

De forma general, el sistema alberga varios NP, cada uno de los cuales cuenta con varios NH. La existencia de varios NP que se pueden comunicar entre sí y a su vez comunicarse con sus respectivos NH, hacen que el sistema pueda dividirse en dos subredes: una subred compuesta de un NP y sus NH (subred NP-NH), y una segunda subred compuesta por varios NP (subred NP-NP). La

Figura 16 muestra la interacción de las dos subredes, la subred NP-NH se encuentra encerrada en un círculo azul, mientras que la subred NP-NP se la identifica por los enlaces de color rojo entre los NP. En los párrafos siguientes se describirá cada una de estas subredes.

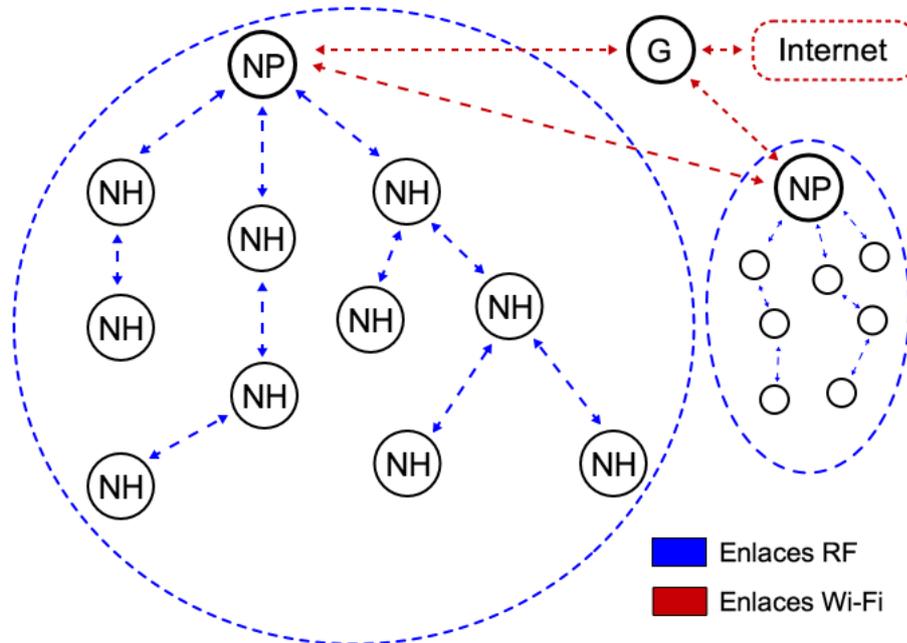


Figura 16. Arquitectura de la red.
Fuente: Elaboración propia.

La subred NP-NH usa enlaces de radio-frecuencia (RF) para su comunicación y se caracteriza por ser del tipo multi-salto. En esta subred, el NP se encarga de dar “nombre” o direcciones a cada uno de sus NH, y además se encarga de iniciar y coordinar la comunicación con los mismos. Aunque los NH no pueden comunicarse entre sí para llevar a cabo una tarea, pueden servir de relevadores de mensajes de otros NH, superando así los límites de alcance que pueda tener cada NH con su NP. A parte de actuar como relevadores, los NH serán los encargados de recoger información de su entorno o actuar sobre su entorno con la ayuda de sensores y actuadores, para luego enviar datos o recibir órdenes del NP, cuando este último lo requiera.

La subred NP-NP, a diferencia de la subred anterior, usa enlaces Wi-Fi para su comunicación y todos sus dispositivos poseen el mismo nivel de inteligencia. Esto implica que no existirá un coordinador o jefe en la comunicación, sino que todos los nodos pueden interactuar entre sí

libremente, según lo necesiten. También, los nodos de esta subred (NP) tendrán la posibilidad de comunicarse con un gateway (G), el cual podrá subir la información de la red a un servidor alojado en Internet. Esta última funcionalidad no será implementada en este trabajo, aunque la red es escalable y puede extenderse a este tipo de comunicación.

3.1.2. Caracterización del sistema

En esta sección se hablará de las características técnicas del sistema de estudio, para lo que se hablará de los dos tipos de nodos y subredes que componen el sistema.

Los nodos padres del sistema, considerando que requieren una capacidad de procesamiento y almacenamiento superior que los nodos hijos, cuentan con las siguientes características:

- Este nodo será gobernado por un microcontrolador STM32F103RCT6, el cual cuenta con una frecuencia máxima de operación de 72 MHz, una memoria flash de 256 Kb y una memoria RAM de 48 Kb, suficientes para realizar las tareas de procesamiento y almacenamiento de tablas de rutas, nodos hijos, etc., de las que está encargado el nodo padre en la red.
- El nodo padre contará con dos transceptores de radio para la comunicación inalámbrica, un transceptor de radio será utilizado para la comunicación con sus nodos hijos y un segundo transceptor (Wi-Fi) se utilizará para su comunicación con otros nodos padres. Para el primer transceptor se ha considerado el módulo nRF24L01, el cual trabaja en el ancho de banda de 2.4 GHz y que por sus prestaciones y su bajo costo lo hace ideal para este tipo de aplicaciones. El segundo transceptor considerado es el módulo ESP8266, que gracias a su conectividad Wi-Fi y al microcontrolador integrado en el mismo, le permite al nodo padre manejar la comunicación con sus nodos hijos y otros nodos padres de forma aislada y paralela.
- Puesto que todos los componentes que constituyen al nodo padre trabajan con un voltaje de alimentación de 3.3 V, este nodo trabajará a dicho voltaje.

Los nodos hijos del sistema contarán con las siguientes características:

- Estos nodos serán gobernados por un microcontrolador STM32F030F4P6, el cual tiene menores prestaciones que el que se utilizará para los nodos padres, debido a que no se requiere una gran capacidad de procesamiento y almacenamiento. Este microcontrolador cuenta con una frecuencia máxima de operación de 48 MHz, una memoria flash de 16 Kb y una memoria RAM de 4 Kb.
- Contarán con un único transceptor de radio, el cual al igual que los nodos padres será el módulo nRF24L01. Mediante este módulo se llevarán a cabo todas las comunicaciones entre nodos vecinos y el nodo padre.
- El sistema microcontrolador y transceptor de radio funcionará a un voltaje de 3.3 V, sin embargo, puesto que los nodos hijos contarán con sensores y/o actuadores, este voltaje de operación cambiará, y de esto dependerá también la viabilidad o no de que el nodo se energizado con baterías.

Las características del sistema, de manera general, son las siguientes:

- Contará con una topología tipo árbol clúster con dos niveles generales, un nivel superior en donde se encontrarán los nodos padres (subred NP-NP) y un nivel inferior donde se encontrarán sus nodos hijos (subred NP-NH), tal y como se puede observar en la Figura 16.
- La subred NP-NH será flexible y adaptable a cambios de la disposición de los nodos. Puede extenderse hasta 254 nuevos nodos hijos por nodo padre, de forma dinámica. Será del tipo multi-salto, de forma que el mensaje pueda alcanzar el destino, aun cuando el emisor no tenga una conexión directa con el mismo. La velocidad de transmisión de datos de esta subred será de 250 Kbps.
- La subred NP-NP será flexible y adaptable a cambios en cuanto a la disposición y organización de sus nodos. La velocidad de transmisión de datos de esta subred será de 7 Mbps.

3.1.3. Funciones del sistema

Este sistema contará con las siguientes funciones:

- Monitoreo de cada una de las variables medidas por los nodos sensores.
- Toma de acciones de control en tiempo real con ayuda de los datos entregados por los sensores y la intervención directa del usuario.
- Introducción de hasta 254 nuevos nodos por padre de forma dinámica.
- Mantenimiento de las rutas para el enrutamiento de los mensajes de la red.
- Registro de los nodos hijos adoptados por cada nodo padre.
- Adaptabilidad frente a cambios de disposición de nodos de la red.

3.2. Análisis de la red inalámbrica

3.2.1. Análisis del ambiente de operación de la Red de Sensores Inalámbricos

La aplicación de esta red de sensores inalámbricos está relacionada con la automatización del hogar, campo al que se lo denomina domótica. Como ya se mencionó en el capítulo anterior, la domótica se encarga del control y automatización de los elementos que conforman una casa, sin embargo, para poder lograr esta automatización es necesario una comunicación eficaz entre los elementos que componen el sistema, es aquí donde la importancia de una red de sensores inalámbricos toma gran valor.

Puesto que la red, en cuestión, será diseñada para su implementación en una casa, se debe considerar la línea de visión. La línea de visión es un tipo de propagación en el que se transmite y recibe datos, sólo si el emisor y receptor se ven uno al otro sin ningún tipo de obstáculo entre ellos (Techopedia, 2017). Las ondas radio frecuencia (RF) son un ejemplo de comunicación por línea de visión. Dicho esto, las paredes de la casa significan un gran problema para la comunicación de los nodos de la subred NP-NH.

Para solucionar este problema se ha propuesto que la subred NP-NH sea de tipo multi-salto, de tal forma que cada nodo hijo de la red tenga la capacidad de retransmitir el mensaje encaminándolo hacia su destino, de modo que debería existir al menos un nodo en la intersección de los diferentes ambientes que tenga una casa, como si puede observar en la Figura 17.

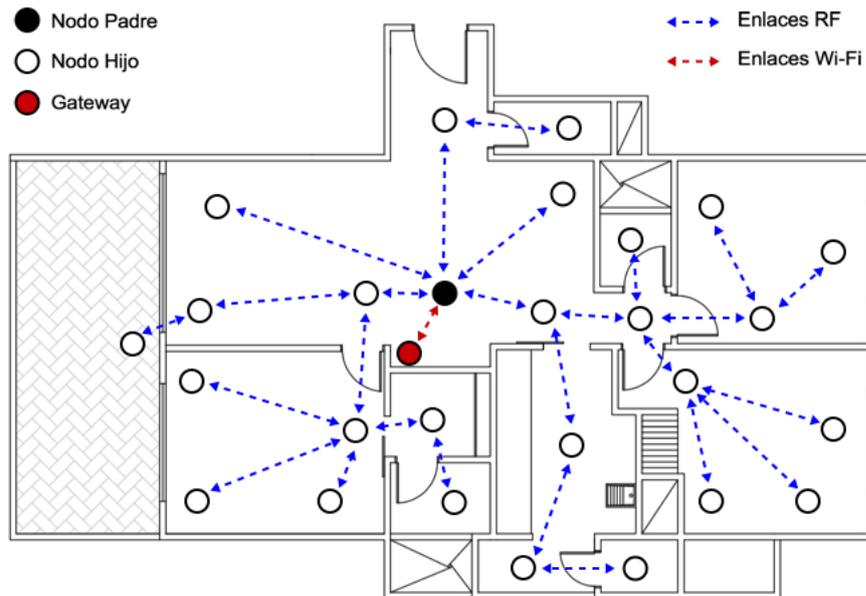


Figura 17. Organización de los nodos de la subred NP-NH en una casa.
Fuente: Elaboración propia.

3.2.2. Definición de la arquitectura del sistema

Para el estudio de este sistema, se ha propuesto los siguientes niveles de jerarquía:

- Nivel de supervisión: En este nivel se ha desarrollado un software utilizando el programa LabWindows, el cual permite recoger algunos datos de la red como el tiempo de respuesta de los nodos hijos, número de paquetes perdidos y el tiempo que toma la ejecución del protocolo AODV.
- Nivel de gestión: Este nivel permitirá al usuario un acceso y control remoto de los datos del sistema, a través de un servidor alojado en Internet.
- Nivel de control: Este nivel cuenta con dispositivos inteligentes encargados de llevar a cabo tareas de forma cooperativa.
- Nivel de campo: El nivel más bajo de la jerarquía, que contará con los sensores y actuadores del sistema.

La Figura 18 muestra los diferentes niveles descritos representados en una pirámide de jerarquía.

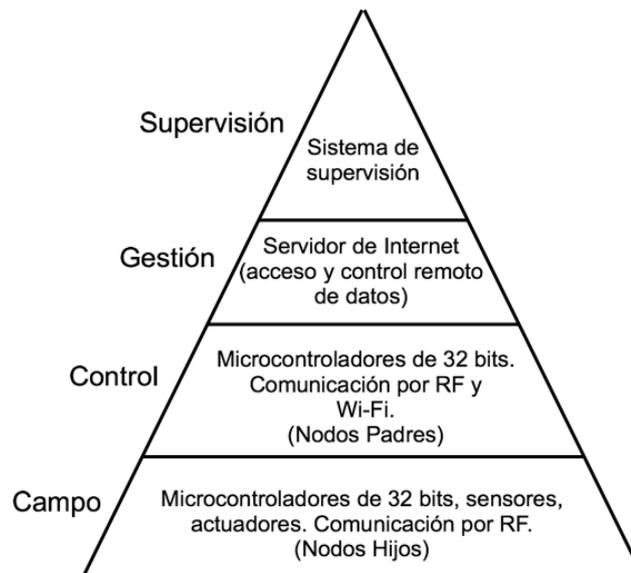


Figura 18. Arquitectura del sistema.
Fuente: Elaboración propia.

3.2.3. Definición de topologías y gestión de información de la red

Los nodos de este sistema pueden ser implementados en cualquier lugar de la casa, siempre y cuando se garantice una distancia de 12 m entre nodos sensores sin línea de vista. Esto debido a que cada nodo hijo tiene la capacidad de redireccionar los paquetes de datos al destino correspondiente. En la Figura 19 se muestra la forma en que se comunica el nodo padre con sus nodos hijos y viceversa y cómo se comunica el nodo padre con otro nodo padre y el gateway.

La subred NP-NH cuenta con una topología en árbol clúster tal cual se observó en la Figura 8 del capítulo anterior. La selección de este tipo de topología se la realizó considerando que es una de las topologías más utilizadas y estables en el campo de las WSN bajo el estándar IEEE 802.15.4 (Yang, 2014). Aunque, esta subred no estará regida estrictamente por este estándar, debido al tipo de transceptor de radio usado, este estándar servirá de guía para el desenvolvimiento de la subred. La gestión de información entre los nodos de esta subred será del tipo maestro-esclavo, siendo el maestro el nodo padre, y los esclavos los nodos hijos. De forma que, el maestro será el que determine en qué momento han de enviar datos cada uno de los esclavos. El envío de datos del maestro a un esclavo determinado puede estar compuesto de N-1 saltos entre otros esclavos según sea necesario, tal cual se observa en la

Figura 19. La elección de este modo de gestión de información se realizó con la finalidad de minimizar colisiones de paquetes de datos en el medio inalámbrico, garantizando una comunicación exitosa.

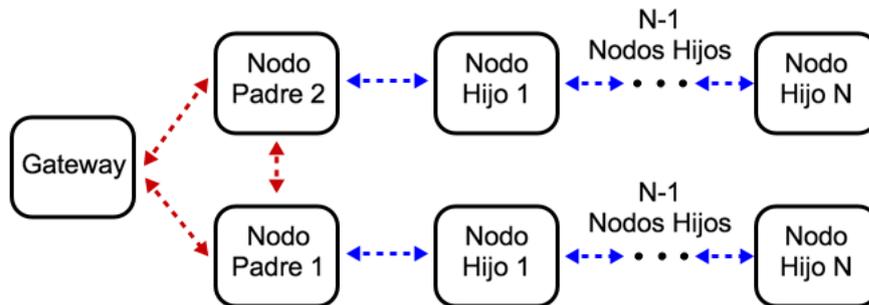


Figura 19. Comunicación entre nodos hijos, padres y el gateway.
Fuente: Elaboración propia.

La subred NP-NP cuenta con una topología en malla, de modo que todos los nodos padres se pueden comunicar entre sí, y el fallo en uno de ellos no afecta en la normal operación de la red. La gestión de información será del tipo productor-consumidor, de tal forma que en su momento cada nodo puede ser un productor para emitir un mensaje broadcast en la red, y cada nodo consumidor puede tomar este mensaje y determinar si lo necesita o no. La elección de esta forma de gestión de información surgió, porque se pretende que los nodos padres actúen como agentes inteligentes en un sistema multiagente (MAS). Finalmente, cada nodo padre tendría la capacidad de enviar la información recopilada por sus nodos hijos a un gateway o estación base para el manejo de dicha información fuera del área local de la red.

3.3. Descripción y funcionamiento de los nodos de la red

La red propuesta, como ya se había mencionado, cuenta con dos tipos de nodos: nodos padres y nodos hijos. En este apartado se describirá cómo están constituidos internamente estos nodos y cómo actúan en la red.

3.3.1. Nodo Padre

En este acápite se analiza el nodo padre, el cual constituye una subred del sistema, que administra un número determinado de sensores/actuadores inteligentes y puede comunicarse con otros nodos padres a fin de gestionar y compartir recursos del sistema.

3.3.1.1. Definición de funciones del nodo padre

El nodo padre cuenta con las siguientes funciones:

- Coordinar la transferencia de información en la subred NP-NH.
- Administrar y proporcionar direcciones a nuevos nodos hijos en la red.
- Descubrir la ruta disponible hacia un nodo hijo determinado.
- Escribir sobre los actuadores que estén disponibles en un nodo hijo determinado.
- Tomar datos para la autoevaluación de la subred NP-NH.
- Compartir datos de sus nodos hijos con otros nodos padres.
- Retransmitir la información de los nodos hijos a un gateway.

3.3.1.2. Análisis de la estructura interna

Los nodos, como se había descrito anteriormente, están compuestos principalmente de un microcontrolador, una memoria, sensores, una fuente de alimentación y un transceptor de radio. El nodo padre propuesto debe tener la capacidad de administrar los dos tipos de subredes comentadas en el apartado anterior. Por este motivo, este nodo gozará básicamente de dos microcontroladores, uno para cada subred, con la posibilidad de comunicarse entre sí mediante una comunicación serial (UART). El primer microcontrolador, STM32F103RC, se encargará de administrar la subred NP-NH y además llevará a cabo toda la inteligencia del nodo; mientras que el segundo microcontrolador, Tensilica L106 (embebido en el módulo ESP8266), se encargará de administrar la subred NP-NP, además de subir la información a un servidor en Internet.

Los componentes más relevantes del nodo padre se enlistan a continuación y son analizados brevemente en los siguientes apartados:

- Módulo nRF24L01
- Módulo ESP8266
- Microcontrolador STM32F103RC

i) Módulo nRF24L01.- Este módulo cuenta con un chip transceptor de radiofrecuencia, el cual integra un protocolo banda base llamado “Enhanced ShockBurst™”, adecuado para aplicaciones inalámbricas de muy baja

potencia. Está diseñado para funcionar en la banda de frecuencia ISM mundial a 2.400 – 2.4835 GHz (Nordic Semiconductor, 2008). La facilidad y suficiente eficacia para el envío y recepción de datos junto a su bajo costo, lo hacen ideal para el desarrollo de este trabajo. Este transceptor será el encargado de transmitir y recibir la información en la subred NP-NH. La Figura 20 muestra el módulo nRF24L01 en el nodo padre y en la Figura 21 se muestra el patillaje de este módulo.

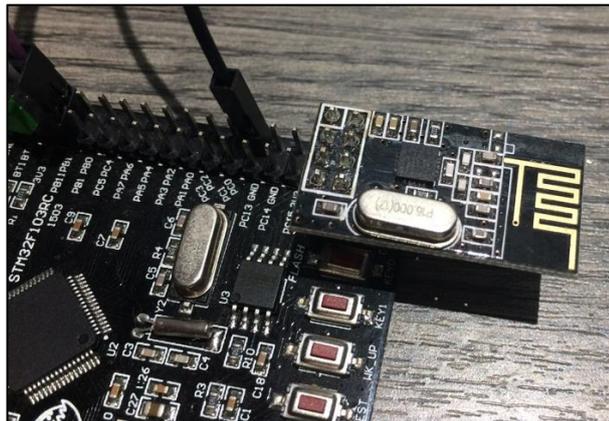


Figura 20. Módulo nRF24L01 en el nodo padre.
Fuente: Elaboración propia.

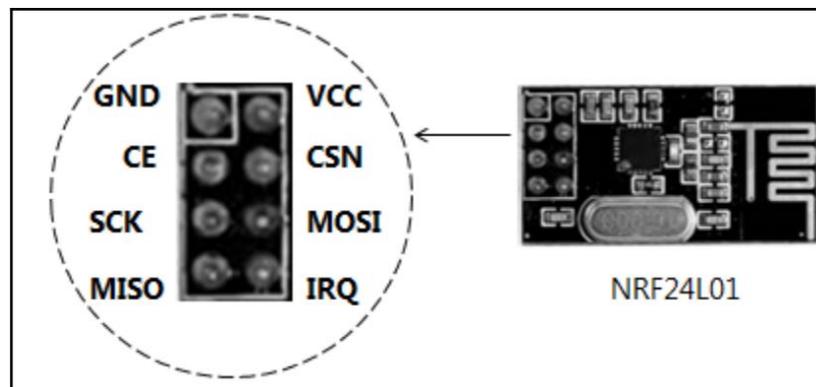


Figura 21. Patillaje del módulo nRF24L01.
Fuente: (Roy, 2017)

ii) Módulo ESP8266.- Este módulo integra un microcontrolador de 32 bits Tensilica L106, el cual se caracteriza por su bajo consumo de energía, alcanzando una frecuencia de reloj máxima de 160 MHz. Cuenta con un sistema operativo de tiempo real (RTOS – Real Time Operating System) y la pila de protocolos Wi-Fi, dejando así un 80% de flash disponible para la aplicación de usuario (Espressif, 2017). Su alta popularidad y su fácil manera de programar, sumado a su bajo costo, fue decisivo para tomarlo en cuenta

en este trabajo. Este módulo será el encargado de transmitir y recibir la información en la subred NP-NP, además de administrar completamente esta misma subred. En la Figura 22 se observa el módulo ESP8266 en el nodo padre y en la Figura 23 se muestra los pines del módulo usado.

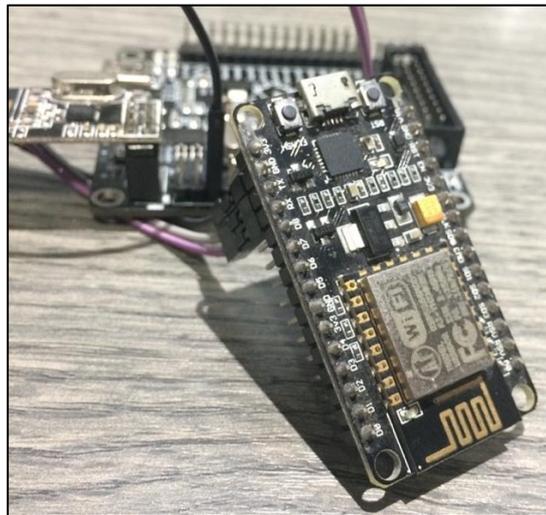


Figura 22. Módulo ESP8266 en el nodo padre.
Fuente: Elaboración propia.

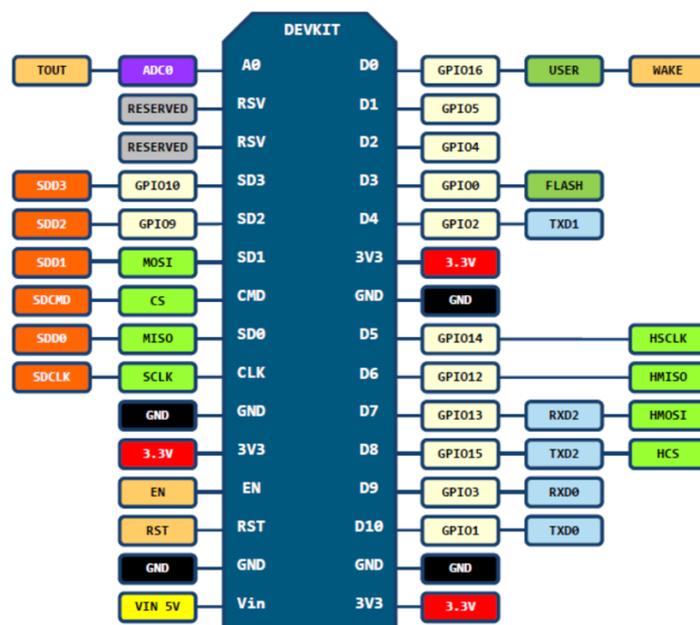


Figura 23. Patillaje del módulo nRF24L01.
Fuente: (NodeMcu Team, 2018)

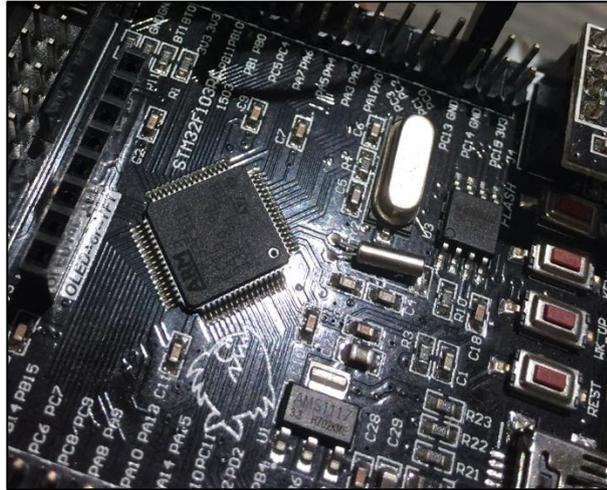


Figura 24. Microcontrolador STM32F103RC sobre la placa de evaluación utilizada.
Fuente: Elaboración propia.

iii) Microcontrolador STM32F103RC.- Este microcontrolador cuenta con la arquitectura ARM de 32 bits, pudiendo trabajar a una frecuencia de reloj máxima de 72 MHz, una memoria flash de 256 Kb y una memoria RAM de 48 Kb (STMicroelectronics, 2015). Su alto rendimiento de operación y características, y su costo relativamente inferior a los microcontroladores de 8 bits comúnmente utilizados, fueron determinantes para su elección en este proyecto. En este microcontrolador se encuentra toda la inteligencia del nodo en la subred NP-NH. Con el fin de almacenar los datos de configuración y nodos hijos adoptados por el nodo padre, se emula una EEPROM (Memoria Programable y Borrable Eléctricamente) en este microcontrolador. La Figura 24 muestra el microcontrolador STM32F103RC sobre la placa prototipo utilizada.

La Figura 25 muestra los componentes internos de este nodo y la Figura 26 muestra el nodo padre prototipo desarrollado.

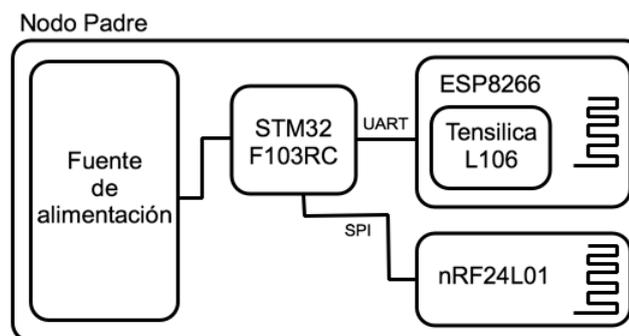


Figura 25. Componentes del nodo padre.
Fuente: Elaboración propia.

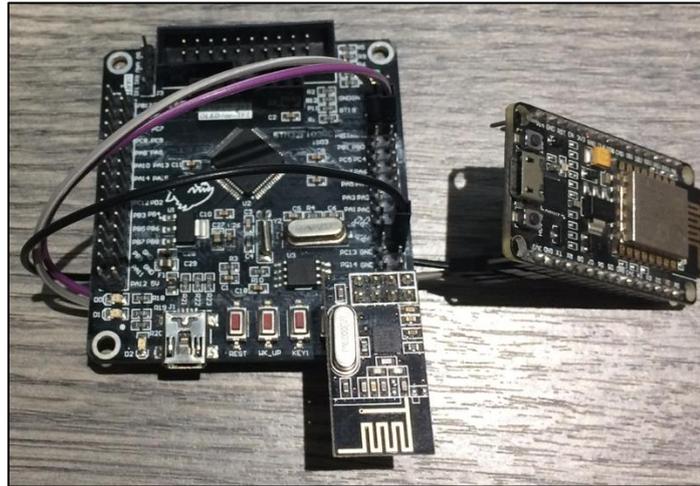


Figura 26. Prototipo de nodo padre desarrollado.
Fuente: Elaboración propia.

3.3.1.3. Interfaz gráfica del nodo padre

Para observar los eventos y procesos que ocurren en el nodo padre, así como también, mostrar la información enviada por sus nodos hijos, se diseña una interfaz gráfica de usuario (GUI) sencilla, la misma que se visualiza en la Figura 27.

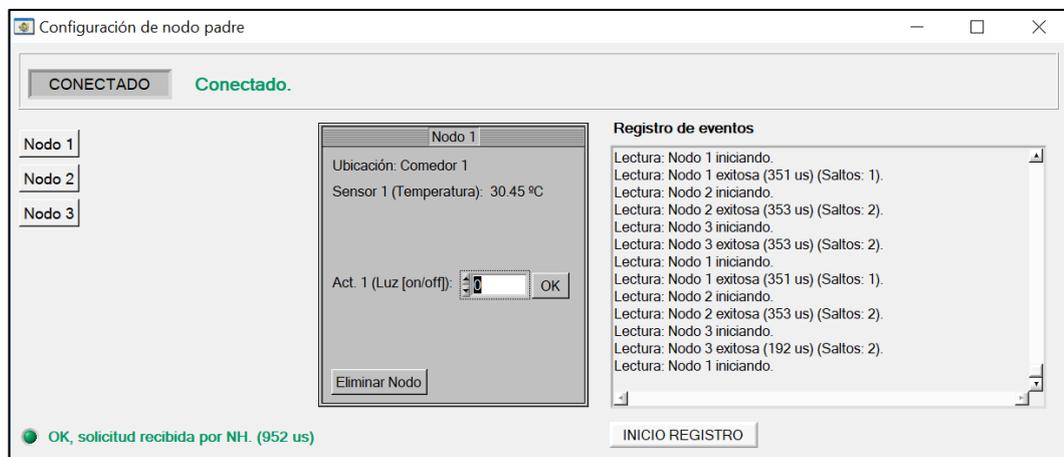


Figura 27. Interfaz gráfica de usuario desarrollada para el nodo padre.
Fuente: Elaboración propia.

Inicialmente, la interfaz cuenta con un único botón habilitado y etiquetado con el texto “Conectar”. Al presionar este botón, la interfaz establecerá conexión con el nodo padre y cargará los nodos hijos adoptados por el NP en forma de botones. Al presionar cualesquiera de estos botones emergerá un nuevo panel con datos del nodo hijo seleccionado, pudiendo observar los valores de sus sensores y escribir sobre sus actuadores. Además, del lado derecho se

integra un panel para el registro de eventos, donde se podrá inspeccionar cuándo el nodo padre realiza la lectura a sus nodos hijos, cuánto tiempo ha demorado, y cuándo se ha ejecutado el protocolo AODV para el descubrimiento de rutas. Finalmente, debajo de este panel, se tiene un botón para grabar todos estos eventos en tres archivos .csv, el primero registrará las lecturas realizadas por el nodo padre, como también el tiempo en que ha demorado cada una de ellas, el segundo guardará la cantidad de paquetes perdidos en la subred NP-NH, y el tercero almacenará información referente al protocolo AODV.

3.3.1.4. Funcionamiento en la subred NP-NH

El funcionamiento general del nodo padre en esta subred se puede visualizar en el diagrama de flujo de la Figura 28. Todo este proceso se llevará a cabo en el microcontrolador STM32F103RC.

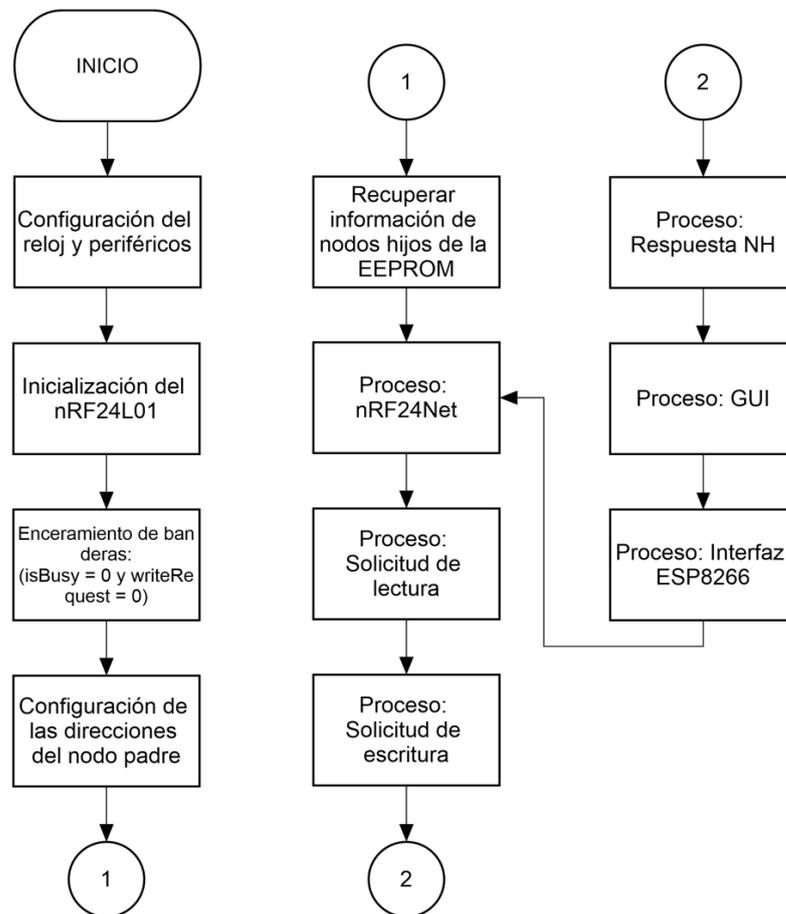


Figura 28. Funcionamiento general del nodo padre en la subred NP-NH.
Fuente: Elaboración propia.

En este diagrama de flujo se puede notar que, en primer lugar, se realiza la configuración del reloj y periféricos usados del microcontrolador. Luego, se procede a inicializar el transceptor de radio nRF24L01, inmediatamente después se encera algunas banderas del sistema como “isBusy” (usada para indicar que la aplicación está ocupada realizando otro proceso) y “writeRequest” (usada para indicar que se realizará una solicitud de escritura, es 0 si no hay una solicitud de lectura, o es el ID del nodo al que se quiere enviar la solicitud). Posteriormente, se determina las direcciones que tendrá el nodo padre dentro de la red, tanto para transmitir mensajes a sus NH como para recibir las respuestas de ellos. Terminada la fase de inicialización, el nodo padre realiza seis procesos secuencialmente e indefinidamente. Estos seis procesos se explicarán a continuación con su respectivo diagrama de flujo.

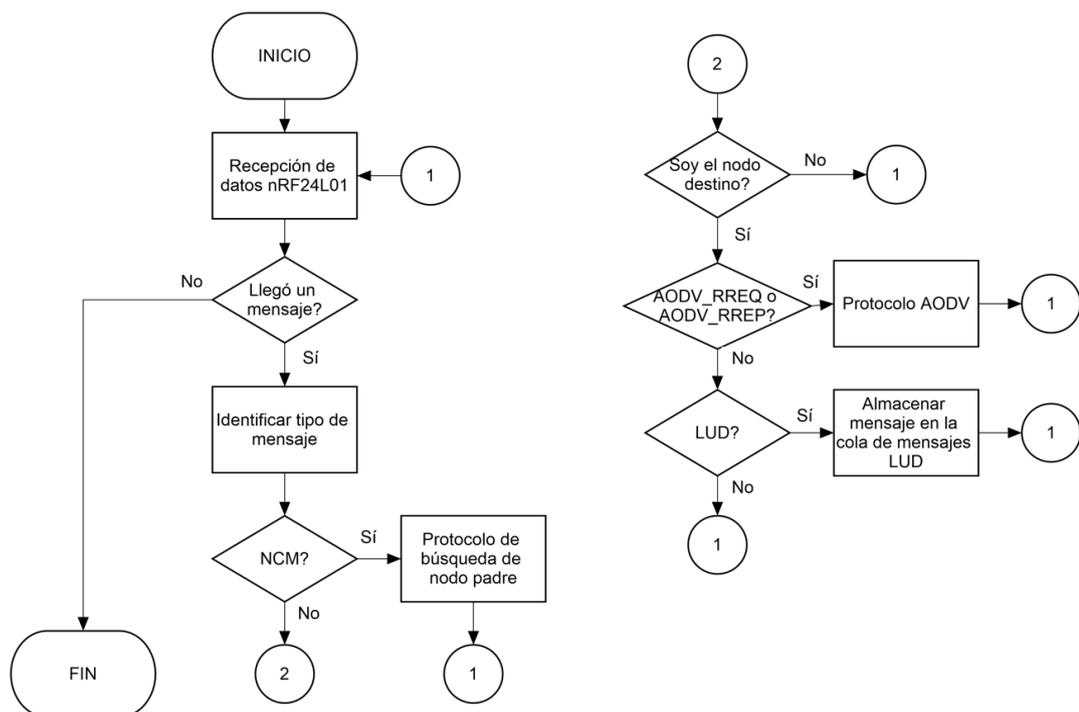


Figura 29. Proceso "nRF24Net" ejecutado en el nodo padre.
Fuente: Elaboración propia.

El proceso “nRF24Net” que se muestra en la Figura 29, se encarga de la recepción de mensajes transmitidos por radiofrecuencia. De tal forma, este proceso comienza mediante la recepción de datos por medio del transceptor nRF24L01, si se identifica que ha llegado un mensaje, entonces se identifica

que tipo de mensaje es, caso contrario, el proceso se da por terminado. Si el mensaje es del tipo NCM, entonces se ejecuta el protocolo de búsqueda de nodo padre (ver apartado 3.4.1), caso contrario, se verifica si el mensaje tiene como destino el nodo padre, si no es así, se lo desecha y se intenta verificar si hay un nuevo mensaje. Si el mensaje tiene como destino el nodo padre, entonces el mensaje puede ser del tipo AODV_RREQ, AODV_RREP o LUD, si el tipo es cualesquiera de los dos primeros se ejecutará el protocolo AODV (ver apartado 3.4.2), de lo contrario, si el mensaje es del tipo LUD, se almacena dicho mensaje en la cola de mensajes LUD para su posterior procesamiento. Si el mensaje no es de ninguno de los tipos mencionados, significa que el mismo no se envió correctamente, por lo que, se lo desecha y se vuelve a verificar si hay nuevos mensajes.

El proceso “Solicitud de Lectura” mostrado en la Figura 30, es el que se ocupa de realizar la lectura de los sensores que se encuentran en los nodos hijos. Cada nodo padre guarda una tabla en donde se almacenan los datos de todos sus nodos hijos. De modo que, para este proceso, primero se obtiene un nodo hijo de la tabla (el primero en la tabla), se verifica si realmente este nodo existe, si el nodo existe, entonces se verifica si la aplicación está ocupada o no, de lo contrario, si el nodo no existe, el proceso termina; asimismo si la aplicación está ocupada, el proceso termina. Si la aplicación no está ocupada en otro proceso, entonces ahora pasa a estarlo y se procede a enviar una solicitud de lectura al nodo hijo obtenido de la tabla; si se recibe un acuse de recibo (ACK) entonces se notifica a la interfaz gráfica de usuario (GUI) y se espera la respuesta de solicitud del nodo hijo, de lo contrario, si no se recibe un ACK, se ejecuta el protocolo de descubrimiento de ruta (AODV), si se encuentra una ruta activa hacia el destino, se notifica a la GUI, y se limpia la bandera “isBusy”, y se vuelve a intentar enviar la solicitud a dicho nodo; si no se encuentra una ruta, se notifica a la GUI, se obtiene el siguiente nodo en la tabla de NH, se limpia la bandera “isBusy” y se envía una nueva solicitud al nodo obtenido. En caso de no recibir una respuesta de solicitud del NH, se intentará tres veces más; si falla todos los intentos, la lectura se da por perdida, se notifica a la GUI y comienza la lectura del siguiente nodo. Si se

recibe una respuesta de solicitud de NH, entonces se notifica a la GUI, luego se procede la lectura del siguiente nodo en la tabla.

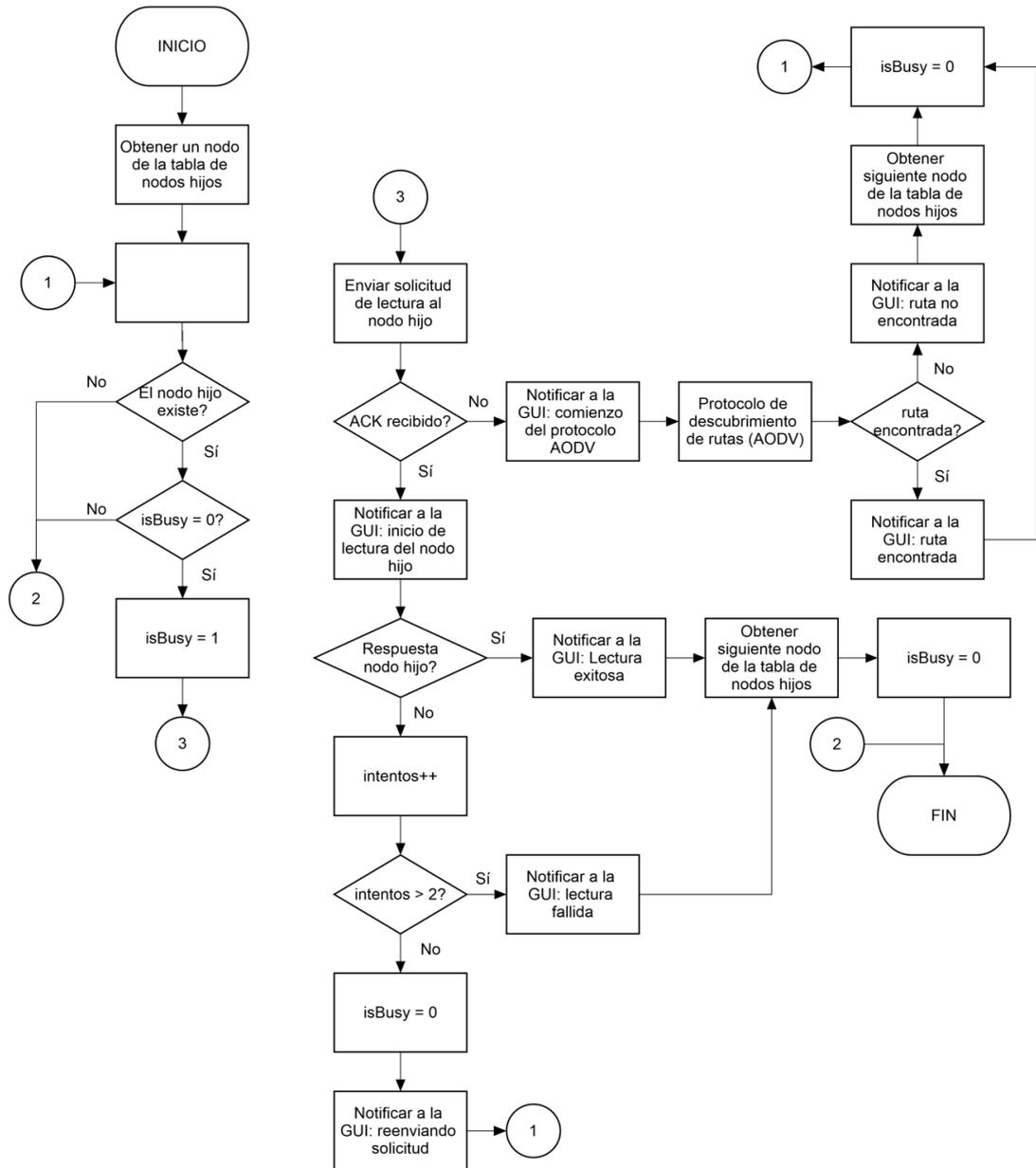


Figura 30. Proceso "Solicitud de lectura" ejecutado en el nodo padre.
Fuente: Elaboración propia.

El proceso "Solicitud de Escritura" que se muestra en la Figura 31, cumple la función de enviar una solicitud para escribir en un determinado actuador de un nodo hijo. Primero se procede a leer las banderas del sistema "isBusy" y "writeRequest". Para que se proceda a enviar una solicitud de escritura, la aplicación no debe estar ocupada (isBusy = 0) y debe haber en espera alguna solicitud a enviar (writeRequest != 0), de lo contrario el proceso termina. Si lo

anterior se cumple, se establece la bandera isBusy (isBusy = 1), se espera a que el medio inalámbrico esté libre (escucha de la señal portadora – Carrier sense) y se envía una solicitud de escritura al nodo hijo señalado en la bandera “writeRequest”, luego se espera recibir un ACK, si no se recibe, se notifica a la GUI y se ejecuta el protocolo AODV, si el protocolo encuentra una ruta activa, notifica a la GUI e intenta reenviar la solicitud, si no se haya una ruta, se notifica a la GUI y se encera las banderas isBusy y writeRequest, y se regresa a leer las banderas del sistema, dando por pérdida la solicitud de escritura. Si un ACK es recibido, se espera la respuesta del NH, si existe una respuesta o no, se notifica este hecho a la GUI, se encera las banderas del sistema, y se regresa a leer las banderas del sistema.

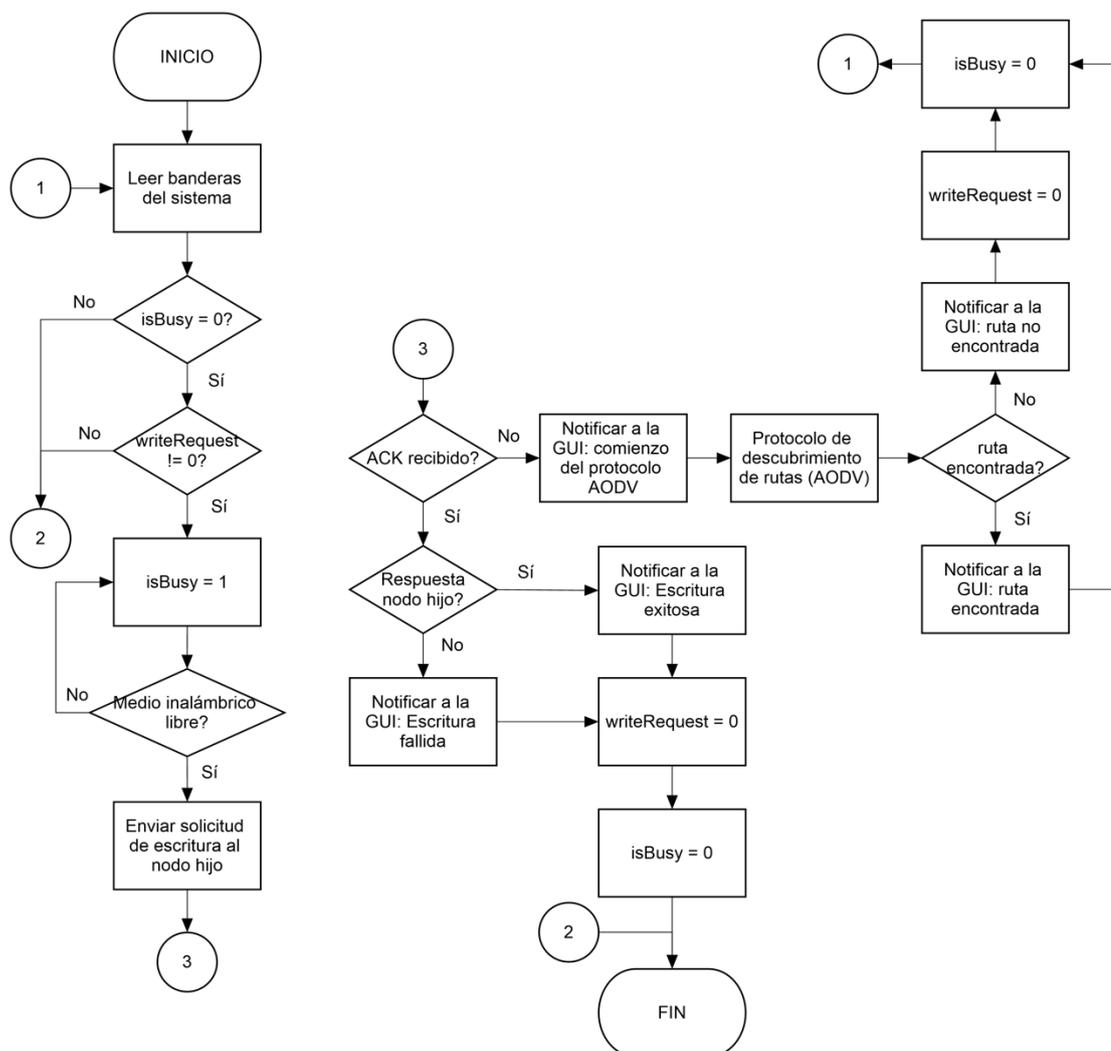


Figura 31. Proceso "Solicitud de escritura" ejecutado en el nodo padre.
Fuente: Elaboración propia.

El proceso “Respuesta NH” que se observa en la Figura 32, se encarga de procesar los mensajes LUD obtenidos de los nodos hijos en el proceso “nRF24Net”. El proceso comienza buscando un mensaje en la cola de mensajes LUD, si no hay mensajes sin procesar, el proceso termina. En caso de haberlos, se identifica el tipo de mensaje LUD, el cual puede ser de dos tipos RRR (Read Request Reply – Respuesta de Solicitud de Lectura) y WRR (Write Request Reply – Respuesta de Solicitud de Escritura). Si se trata del primer tipo, se agregan los valores de los sensores del nodo hijo a la tabla de nodos hijos, se envía estos valores a las interfaces GUI y ESP8266, y se busca el siguiente mensaje sin procesar. Si el mensaje es del tipo WRR, entonces se confirma que el nodo hijo ha recibido con éxito una solicitud de escritura, y se procede a buscar el siguiente mensaje sin procesar.

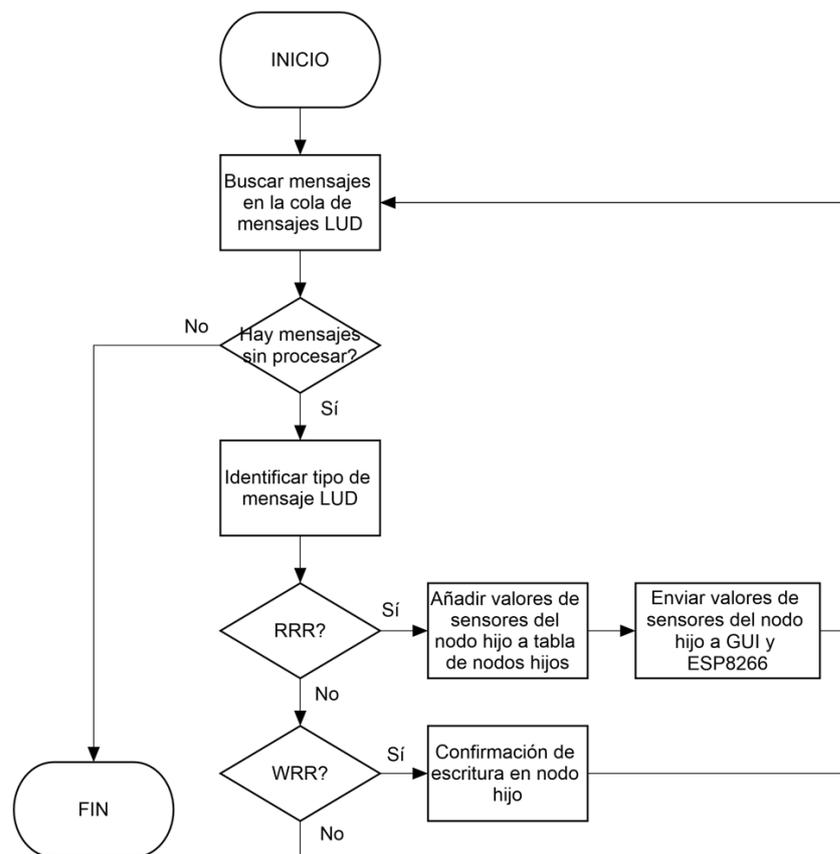


Figura 32. Proceso "Respuestas NH" ejecutado en el nodo padre.
Fuente: Elaboración propia.

Los procesos “GUI” e “Interfaz ESP8266”, comparten el mismo proceso, con la sola diferencia que el primero se comunica con una aplicación de computadora y el segundo con el módulo ESP8266. Las dos interfaces

pueden enviar acciones de control sobre la subred NP-NH, de manera que en estos procesos se procesará estas acciones. El diagrama de flujo de la Figura 33 explica el funcionamiento de estos procesos.

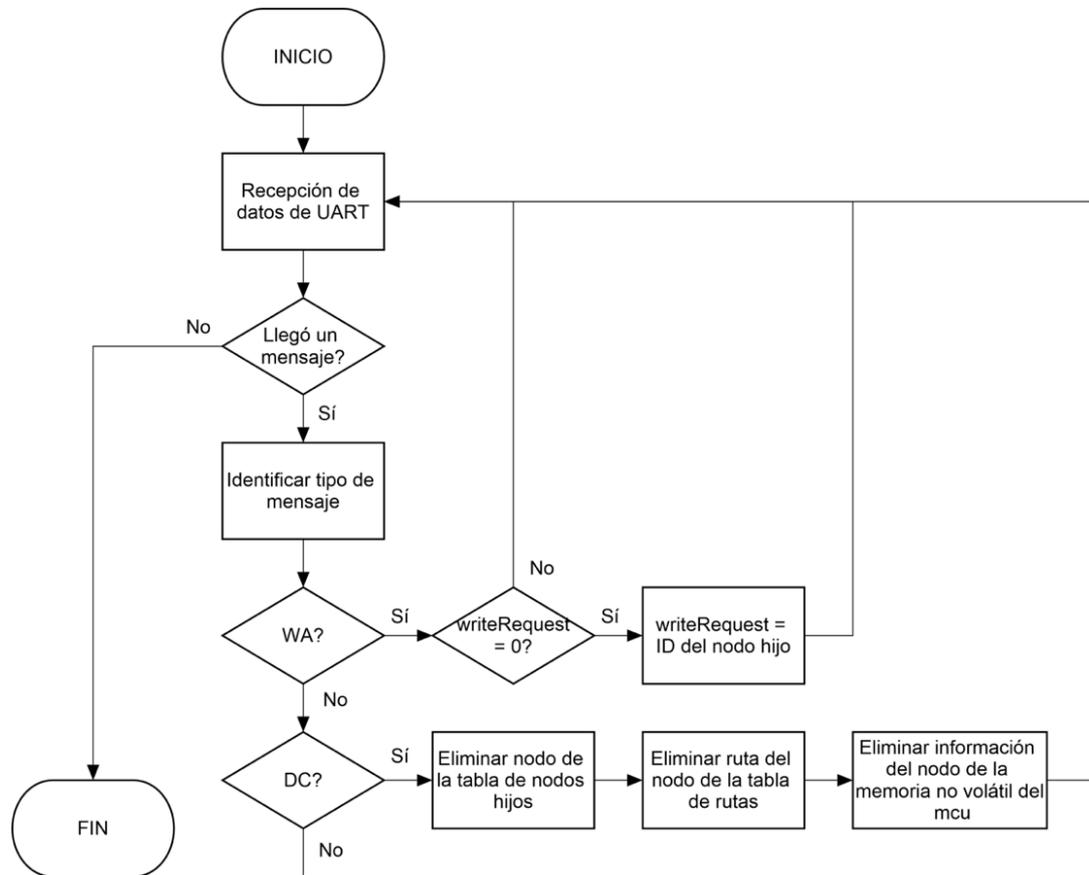


Figura 33. Procesos "GUI" e "Interfaz ESP8266" ejecutados en el nodo padre.
Fuente: Elaboración propia.

Primero, el microcontrolador verifica si ha llegado un mensaje desde cualesquiera de las dos interfaces (GUI y ESP8266), si no ha llegado ningún mensaje, el proceso termina. Si llegó un mensaje, se procede a identificar el tipo de mensaje, el cual puede ser de dos tipos WA (WriteActuator) o DC (DeleteChild). El primer tipo indica que una de las interfaces requiere que se escriba en el actuador de un nodo hijo, para ello primero se verifica que no haya ninguna solicitud de escritura en espera ($writeRequest = 0$), y se establece el valor de $writeRequest$ igual al ID del nodo a escribir, y se regresa a verificar si hay otros mensajes UART. El segundo tipo indica que una de las interfaces requiere que se elimine un nodo hijo, de ser este tipo de mensaje, el microcontrolador procede a eliminar el nodo hijo de su tabla de nodos hijos, la ruta del nodo hijo y la información del mismo almacena en la EEPROM

emulada del microcontrolador, después se regresa a comprobar si hay otros mensajes UART. Si el mensaje que ha llegado no es de ninguno de los dos tipos, se lo desecha y se procede a verificar si hay más mensajes entrantes.

3.3.1.5. Funcionamiento en la subred NP-NP

El funcionamiento del nodo padre en esta subred se puede visualizar en el diagrama de flujo de la Figura 34. Todo este proceso se llevará a cabo en el microcontrolador Tensilica L106.

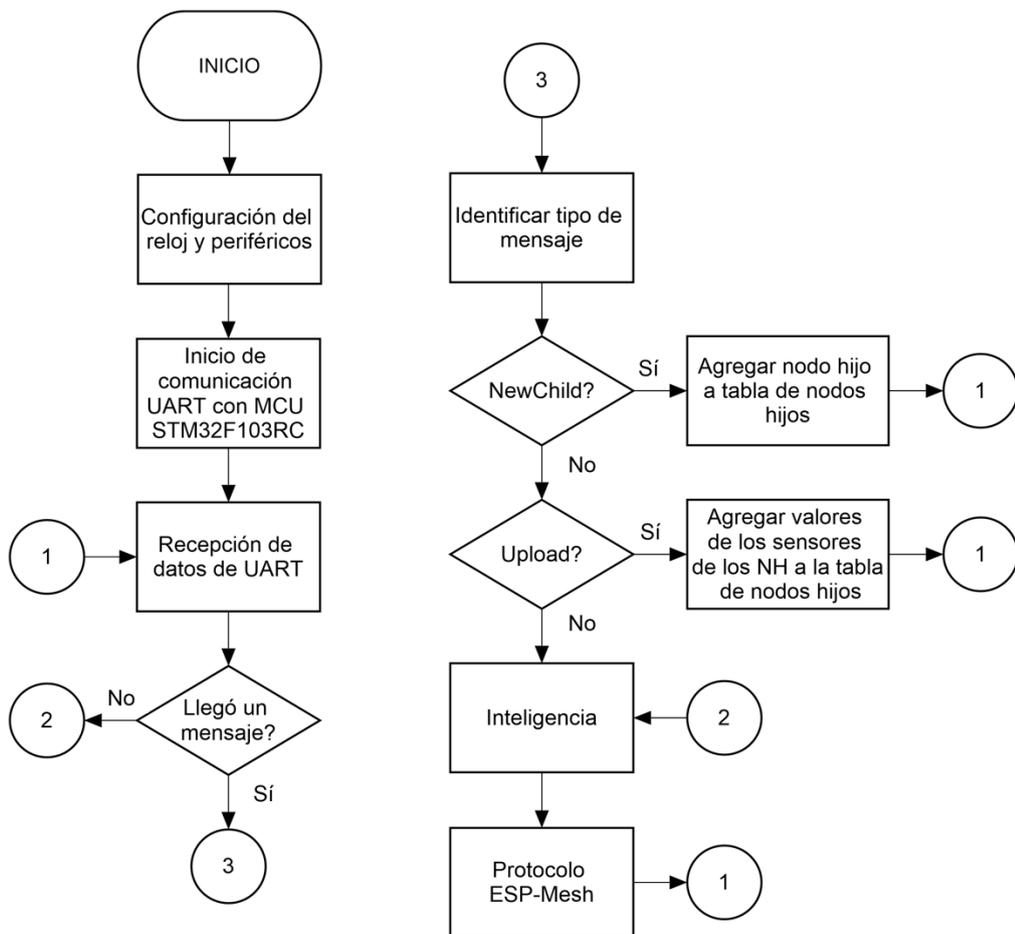


Figura 34. Funcionamiento del nodo padre en la subred NP-NP.
Fuente: Elaboración propia.

Para comenzar, se configura el reloj y los periféricos del microcontrolador, luego se inicia la comunicación UART con el microcontrolador STM32F103RC (encargado de la subred NP-NH). Si hay un mensaje entrante del microcontrolador ST, se identifica el tipo de mensaje. Este mensaje puede ser de dos tipos NewChild o Upload. El mensaje de tipo NewChild significa que hay nuevos nodos hijos en el nodo padre, y la información de éstos se envía

con este tipo de mensaje, al recibir este mensaje se agrega esta información a la tabla de nodos hijos no volátil del microcontrolador. El mensaje de tipo Upload significa que los valores de los sensores de un nodo hijo han llegado al padre, y estos valores se envían con este tipo de mensaje, al recibir este mensaje se agrega dichos valores a la tabla de nodos hijos del microcontrolador. Si el mensaje no es de ninguno de estos tipos o no ha llegado algún mensaje, se pasa a la parte de "Inteligencia". En esta parte, se deja libertad a trabajos futuros para implementar algún protocolo de comunicación entre NP de alto nivel como FIPA en el caso de desarrollo de agentes inteligentes. Además, aquí también ocurrirán envíos de mensajes de tipo WA (WriteActuator) o DC (DeleteChild), mencionados en el funcionamiento del NP en la subred NP-NH, según la aplicación lo necesite. Finalizada esta parte, se procede a ejecutar el protocolo ESP-Mesh desarrollado por Espressif (2016), este protocolo se encargará de administrar la comunicación en bajo nivel de los nodos padres, así como el direccionamiento de los mensajes en esta subred.

3.3.2. Nodo Hijo

En este apartado se analiza el nodo hijo, el cual forma parte la subred administrada por un único nodo padre, que lee cada uno de los sensores con los que cuenta y escribe sobre sus actuadores según lo necesite el NP, como también se comunica con otros NH para permitir llegar un mensaje a su destino.

3.3.2.1. Definición de las funciones del nodo hijo

El nodo hijo cuenta con las siguientes funciones:

- Responder solicitudes de lectura y escritura de su nodo padre.
- Leer continuamente los sensores integrados a él.
- Escribir sobre sus actuadores en caso de que su nodo padre lo solicite.
- Retransmitir mensaje hacia nodo destino.

3.3.2.2. Estructura interna

El nodo hijo propuesto para esta red se caracteriza por ser un dispositivo de bajo costo y eficiente en términos de consumo de energía. Este nodo, a

diferencia del nodo padre, gozará de un sólo microcontrolador y contará con sensores/actuadores. El microcontrolador seleccionado para este nodo es STM32F030F4, debido a su bajo costo y sus altas prestaciones. Éste se encargará de la lectura del o los sensores con el que se equipe el nodo, así como también, de todo el proceso de selección de un nodo padre y el envío de datos cuando el padre lo solicite. Para su comunicación con el nodo padre contará con un solo transceptor de radio nRF24L01. Esencialmente, este nodo cuenta con tres componentes, los cuales se enlistan a continuación y se describen brevemente:

- Módulo nRF24L01
- Microcontrolador STM32F030F4
- Sensores/actuadores

i) Módulo nRF24L01.- Este módulo ya fue descrito en el apartado del nodo padre. Su función en este nodo es la de transmitir y recibir mensajes desde el nodo hijo hacia el nodo padre o desde el nodo hijo hacia otro nodo hijo, en caso de actuar como relevador de mensaje. La Figura 35 muestra este módulo en el nodo hijo prototipo desarrollado.

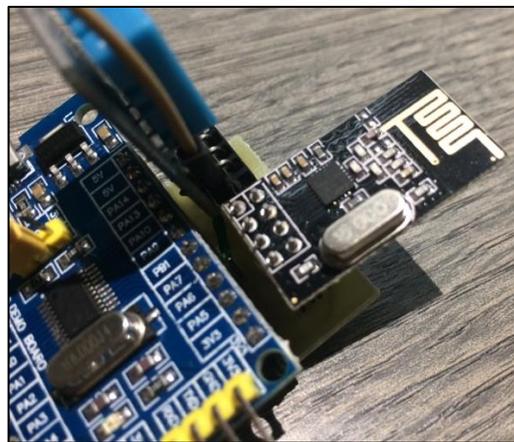


Figura 35. Módulo nRF24L01 en el nodo hijo.
Fuente: Elaboración propia.

ii) Microcontrolador STM32F030F4.- Este microcontrolador cuenta con la arquitectura ARM de 32 bits, pudiendo trabajar a una frecuencia de reloj máxima de 48 MHz, una memoria flash de 16 Kb y una memoria RAM de 4 Kb (STMicroelectronics, 2017). Su alta eficiencia energética y de procesamiento, y su costo altamente inferior a los microcontroladores de 8

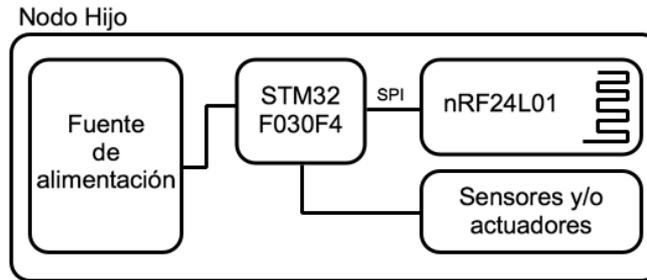


Figura 38. Componentes del nodo hijo.
Fuente: Elaboración propia.

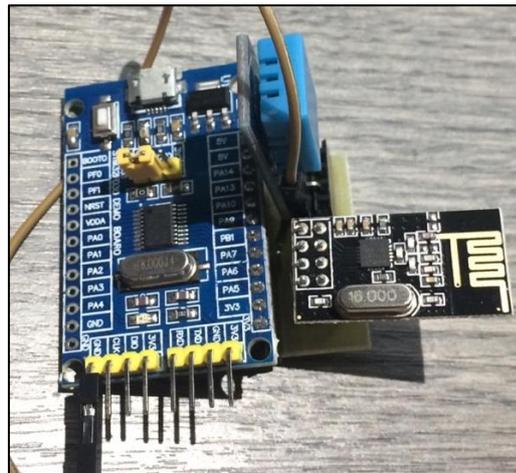


Figura 39. Prototipo de nodo hijo desarrollado.
Fuente: Elaboración propia.

3.3.2.3. Interfaz gráfica del nodo hijo

Para configurar la ubicación que tendrá el nodo hijo dentro de una casa, para desvincular un nodo hijo de su nodo padre y para visualizar los sensores/actuadores con los que cuenta, se desarrolla una interfaz gráfica de usuario (GUI) sencilla, la cual se observa en la Figura 40.

Inicialmente, la interfaz cuenta con un único botón habilitado y etiquetado con el texto “Conectar”. Al presionar este botón, la interfaz establecerá conexión con el nodo hijo y cargará toda la información del mismo. Con esto, se podrá hacer uso del menú lista para seleccionar la ubicación que tendrá el nodo dentro de la casa, y con el botón “Actualizar” escribiremos dicha información en el nodo. El botón “Restablecimiento de fábrica” permitirá borrar toda la configuración del nodo, desvinculándolo completamente de su nodo padre. Finalmente, para desconectar el nodo de la interfaz se debe pulsar una vez el botón “Conectar”, ahora etiquetado con “Desconectar”.

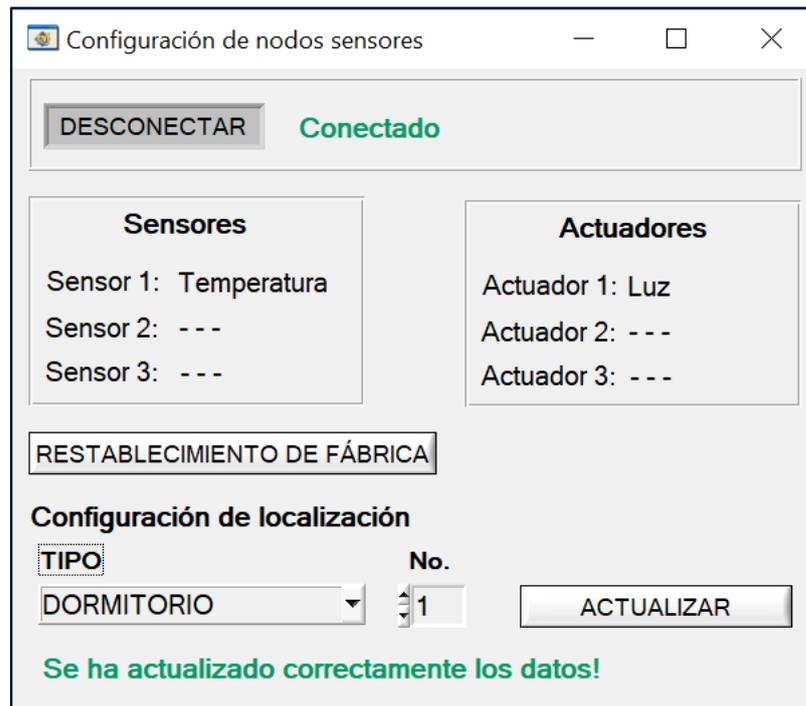


Figura 40. Interfaz gráfica de usuario desarrollada para el nodo hijo.
Fuente: Elaboración propia.

3.3.2.4. Funcionamiento

El funcionamiento general del nodo hijo se puede visualizar en el diagrama de flujo de la Figura 41. Todo este proceso se llevará a cabo en el microcontrolador STM32F030F4.

En este diagrama de flujo se puede notar que, en primer lugar, se realiza la configuración del reloj y periféricos usados del microcontrolador. Luego, se procede a inicializar los sensores y/o actuadores y el transceptor de radio nRF24L01. Después, se configura a los sensores/actuadores para que sean parte del nodo hijo, y pueda así el nodo padre conocer los sensores y/o actuadores que el nodo hijo posee. Se limpia la bandera writeActuator ($\text{writeActuator} = 0$) y se recuperan datos de la EEPROM, estos datos incluyen la configuración de direcciones del nodo hijo en caso de ya haber sido vinculado a un nodo padre, el ID del nodo en la red y la ubicación que tiene el nodo en un hogar dado. En caso de no haber datos en la EEPROM, entonces el ID es 0 y pasa al proceso “nRF24Net”, luego al proceso “Solicitudes de nodo padre”, luego se lee los sensores del nodo hijo, después se verifica la bandera writeActuator, si ésta es 1, entonces se escribe en el actuador del nodo y se limpia la bandera writeActuator ($\text{writeActuator} = 0$), y se pasa al proceso

“Interfaz USB”; de lo contrario, si la bandera writeActuator no es 1, se pasa directamente al proceso “GUI”. Cuando éste último proceso termine, el microcontrolador vuelve a ejecutar el proceso “nRF24Net” y entra en un bucle repitiendo cada uno de los procesos secuencialmente. Estos tres procesos se explicarán a continuación con sus respectivos diagramas de flujo.

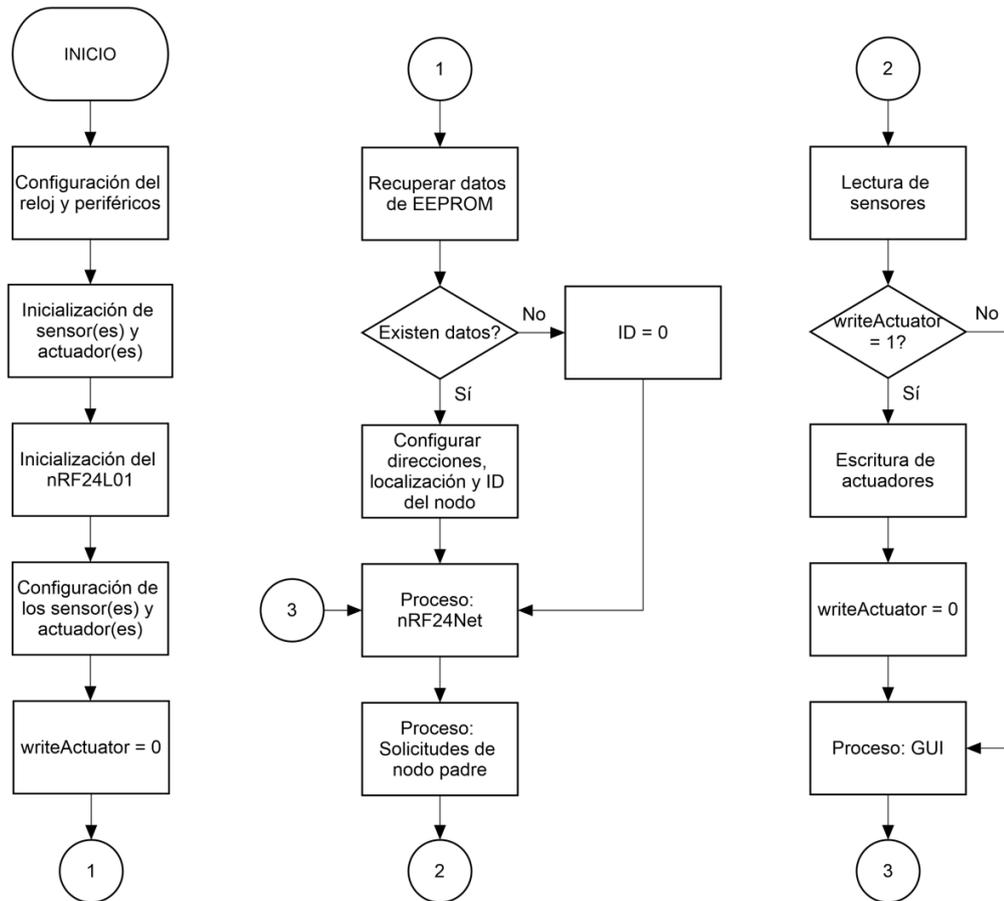


Figura 41. Funcionamiento general del nodo hijo.
Fuente: Elaboración propia.

El proceso “nRF24Net” que se muestra en la Figura 42, se encarga de la recepción de mensajes transmitidos por radiofrecuencia. De tal forma, este proceso comienza mediante la recepción de datos por medio del transceptor nRF24L01, si se identifica que ha llegado un mensaje, entonces se identifica qué tipo de mensaje es, caso contrario, el proceso se da por terminado. Si el mensaje es del tipo NCM, entonces se ejecuta el protocolo de búsqueda de nodo padre, caso contrario, se verifica si las ID del nodo es 0, si es así significa que el nodo no se ha vinculado a ningún nodo padre, por lo que no tiene una

ID en la red y debe volver a verificar si hay nuevos mensajes del tipo NCM; si el ID del nodo es distinto de 0, entonces el nodo se ha vinculado con un nodo padre y prosigue a identificar el mensaje es del tipo AODV_RREQ, AODV_RREP o LUD. Si el mensaje del tipo AODV_RREQ o AODV_RREP se ejecuta el protocolo AODV, finalizado éste, se regresará a comprobar si hay unos mensajes entrantes. Si el mensaje es del tipo LUD, se verifica si el destino del mensaje es el nodo o un mensaje broadcast, si cualesquiera de las dos condiciones se cumplen, entonces se almacena el mensaje en la cola de mensajes LUD, y se regresa a esperar nuevos mensajes, de lo contrario, significa que el mensaje debe direccionarse hacia otro nodo destino (multisaltos), después de redireccionar el mensaje, se regresa en espera de nuevos mensajes.

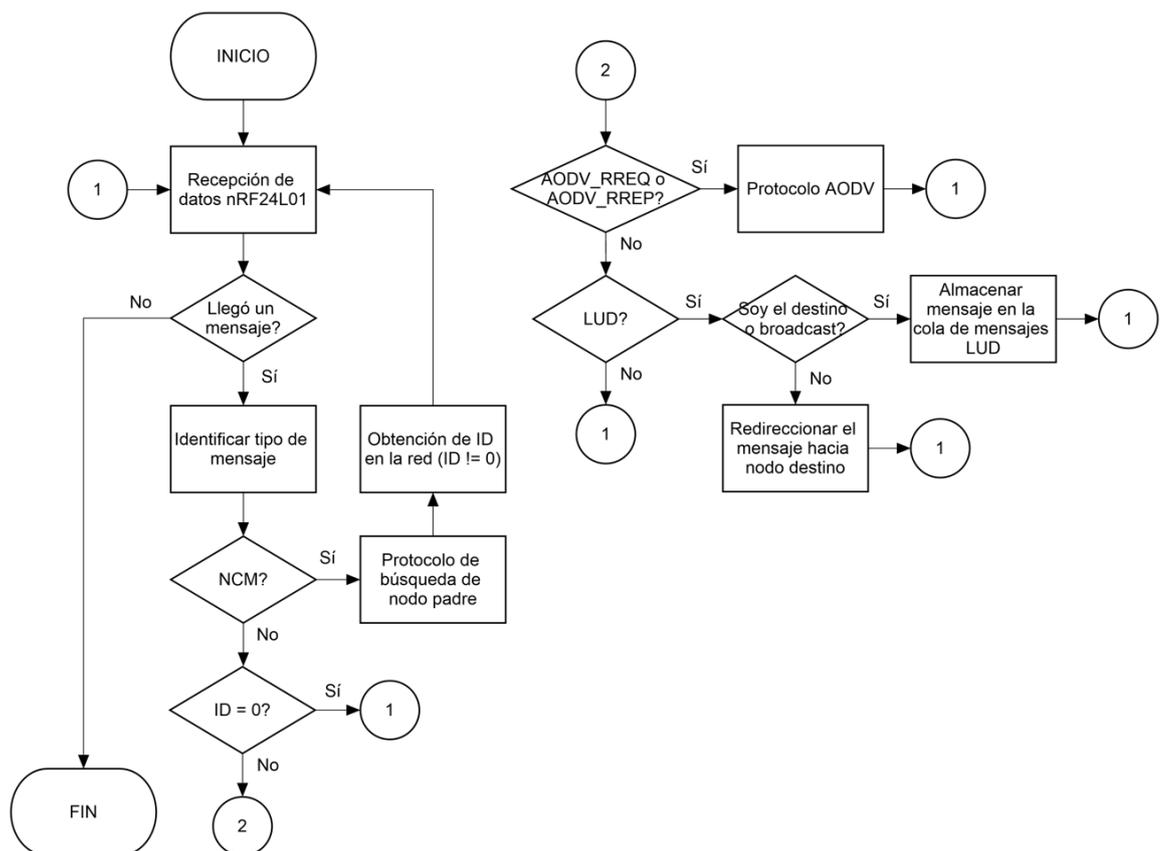


Figura 42. Proceso "nRF24Net" ejecutado en el nodo hijo.
Fuente: Elaboración propia.

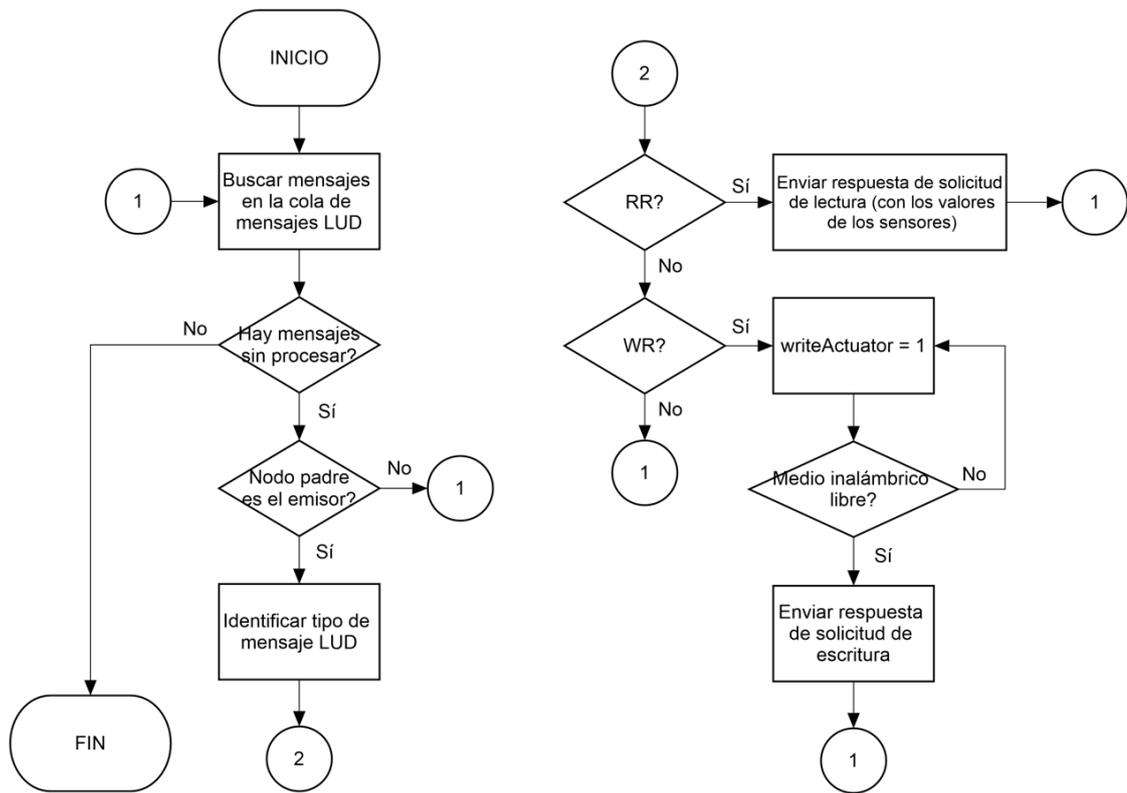


Figura 43. Proceso "Solicitudes de nodo padre" ejecutado en el nodo hijo.
Fuente: Elaboración propia.

El proceso "Solicitudes de Nodo Padre" mostrado en la Figura 43, se encarga de procesar las solicitudes enviadas por el nodo padre al nodo hijo. El proceso comienza buscando un mensaje en la cola de mensajes LUD, si no hay mensajes sin procesar, el proceso termina. En caso de haberlos, se verifica si el emisor es el nodo padre, de no serlo el proceso comienza desde el principio. Si el emisor es el nodo padre, entonces se identifica el tipo de mensaje LUD, el cual puede ser de dos tipos RR (Read Request – Solicitud de Lectura) y WR (Write Request – Solicitud de Escritura). Si se trata del primer tipo, se envía los valores de los sensores del nodo al nodo padre, y se busca el siguiente mensaje sin procesar. Si el mensaje es del tipo WR, entonces se escribe un 1 en la bandera "writeActuator", se espera a que el medio inalámbrico esté libre (escucha de la señal portadora), se envía una respuesta de confirmación al nodo padre, y se procede a buscar el siguiente mensaje sin procesar.

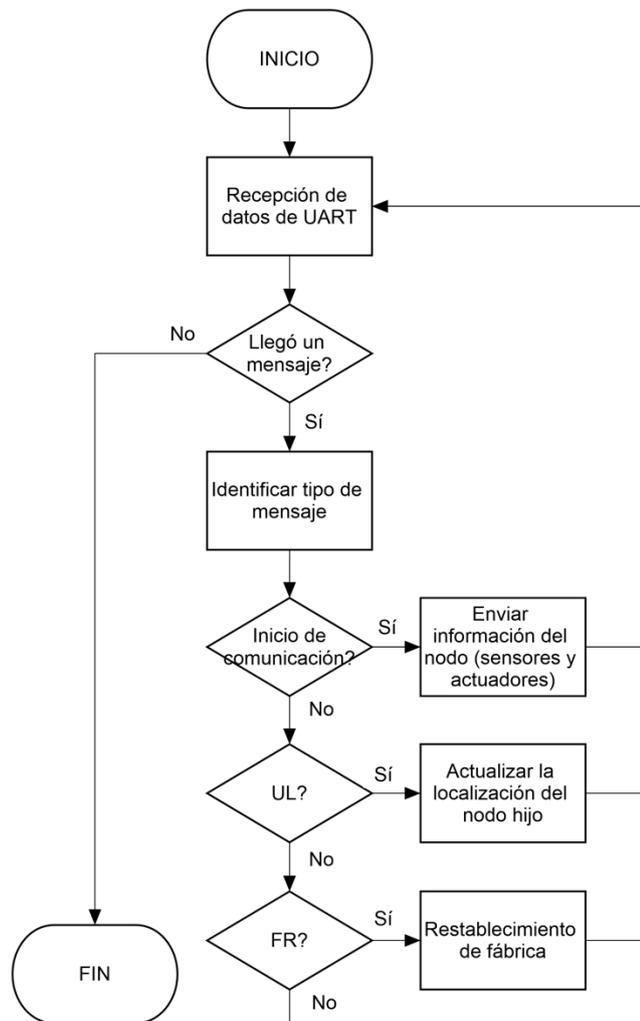


Figura 44. Proceso "GUI" ejecutado en el nodo hijo.
Fuente: Elaboración propia.

El proceso "GUI" que se muestra en la Figura 44, está destinado únicamente a la configuración del nodo hijo cuando éste se encuentre conectado a su interfaz gráfica de usuario (GUI). El proceso inicia receptando y verificando si hay datos en el UART del microcontrolador, si no ha llegado un mensaje, el proceso termina. En caso de haber un mensaje, se identifica el tipo de mensaje. El mensaje puede ser de tres tipos "Inicio de Comunicación", UL (UpdateLocation) o FR (FactoryReset). Si el mensaje es del tipo "Inicio de Comunicación", el nodo hijo deberá enviar a la interfaz la información acerca de sus sensores, actuadores y su ubicación actual. Si el mensaje es del tipo UL, entonces el nodo hijo actualizará su ubicación con la que se haya elegido en la interfaz. Si el mensaje es del tipo FR, entonces el nodo hijo eliminará toda su información almacenada en la EEPROM, desvinculándose de su nodo padre, en caso de haberlo estado. Al finalizar estas condiciones, o en caso de

que el mensaje no sea de ninguno de los tipos mencionados, se volverá a verificar si ha llegado un nuevo mensaje por UART.

3.4. Protocolos de red en la subred NP-NH

Para la subred NP-NH se ha diseñado tres protocolos de comunicación, los cuales se encuentran basados en protocolos ya existentes de WSN.

Todos los nodos de esta subred tendrán una dirección o ID única de 1 byte, donde el ID de 0 está reservado para el nodo padre de la subred, y el ID de 255 está reservado para ser la dirección broadcast de todos los nodos hijos.

Debido a las características del transceptor de radio de esta subred (nRF24L01), la máxima longitud del paquete que se puede enviar por el medio inalámbrico es de 32 bytes. Tomando en cuenta esta limitación, para cualquier comunicación en esta subred, todo paquete deberá contener la siguiente cabecera mostrada en la Figura 45.

	Cabecera				Contenido paquete
Bytes	1	1	1	1	28
	T	D	O	L	datos

Figura 45. Estructura del paquete de datos general de la subred NP-NH.
Fuente: Elaboración propia.

Los campos de cabecera T, D, O, L y datos representan lo siguiente:

- T: Este byte indicará el tipo del mensaje.
- D: Este byte indicará el ID del nodo destino del mensaje.
- O: Este byte indicará el ID del nodo origen del mensaje.
- L: Este byte indica la longitud de bytes de los datos del paquete.
- datos: Datos del paquete acorde al tipo del mensaje.

Se consideraron cuatro tipos de mensajes:

- NCM (Network Control Message): Mensaje de Control de Red.
 - PS (Parent Solicitation): Solicitud de Padre.
 - PSR (Parent Solicitation Response): Respuesta de la Solicitud de Padre.
- RREQ (Route Request): Solicitud de ruta.

- RREP (Route Reply): Respuesta de ruta.
- LUD (Light User Datagram): Datagrama de Usuario Ligero.

A continuación, se describirán los protocolos mencionados al inicio de esta sección.

3.4.1. Búsqueda de nodo padre

Como se puede ver en el funcionamiento de los nodos hijos en las secciones anteriores, la primera acción a realizar es encontrar a un nodo padre que les asigne una ID única en la red de 1 byte, para lo cual siguen el protocolo que se muestra en la Figura 46, el cual está basado en el protocolo “Neighbor Discovery for IP versión 6” (Narten, Nordmark, Simpson, & Soliman, 2007).

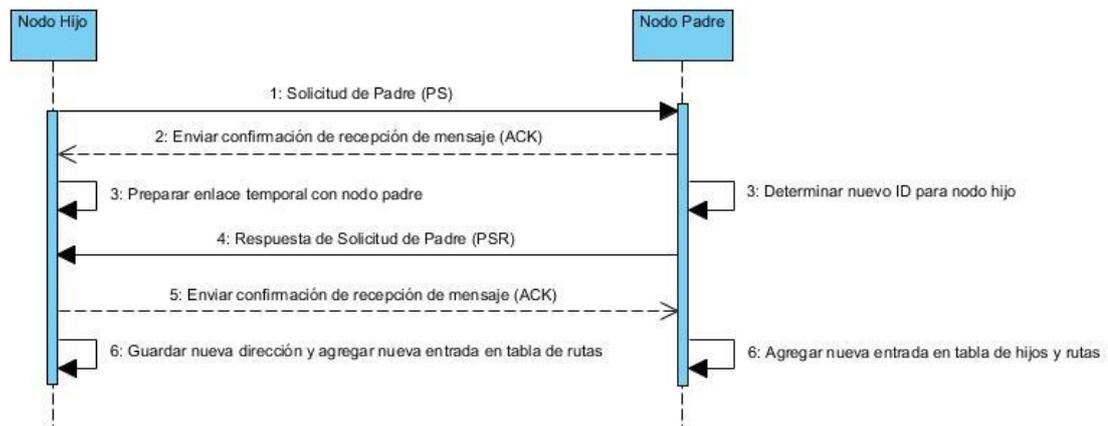


Figura 46. Protocolo para la búsqueda de un nodo padre.
Fuente: Elaboración propia.

Este protocolo permite que un nodo hijo pueda encontrar un nodo padre disponible en la red, y que éste último lo adopte dándole una ID única en la nueva subred. El flujo del protocolo se explicará en el siguiente párrafo.

Primero, un nodo hijo envía una Solicitud de Padre (PS) a todos los nodos padres existentes en la red. Este PS cuenta con una información que le permite al nodo hijo y a un nodo padre establecer una comunicación privada para los siguientes pasos del protocolo. Cuando un nodo padre detecta un PS, inmediatamente busca si tiene disponible algún ID para un nuevo nodo hijo, si existe disponibilidad, entonces el NP responde con una Respuesta de Solicitud de Padre (PSR), el cual contiene el nuevo ID del nodo hijo para integrarse a la subred; si no existe disponibilidad de IDs, el nodo padre

simplemente ignora nuevos PS. Cuando el nodo hijo recibe un PSR de algún nodo padre, extrae de este paquete de datos su nuevo ID, lo guarda y lo establece como una dirección para recibir datos, además agrega en la tabla de rutas el enlace directo hasta el nodo padre y almacena la dirección del nodo padre. De la misma manera, cuando el nodo padre haya recibido la confirmación de recepción de mensaje por parte del nodo hijo, agregará una nueva entrada en su tabla de hijo y en su tabla de rutas.

Este protocolo hace uso de los mensajes de tipo NCM (PS y PSR) mencionados anteriormente. La estructura de estos mensajes se puede observar en las Figuras 47 y 48.

	Cabecera				NCM PS	
Bytes	1	1	1	1	1	1
	T	D	O	L	NT	TID

Figura 47. Estructura del paquete PS.
Fuente: Elaboración propia.

	Cabecera				NCM PSR		
Bytes	1	1	1	1	1	5	1
	T	D	O	L	NT	DP	NIH

Figura 48. Estructura del paquete PSR.
Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en ambos paquetes se conserva la cabecera, tal cual se había indicado en un principio. Sin embargo, ahora el campo T (Tipo del mensaje) tendrá el valor de 0xA1, valor que corresponde a los mensajes de tipo NCM.

En el paquete PS, los campos que no son de cabecera representan lo siguiente:

- NT: Tipo de mensaje NCM. Este campo tendrá el valor de 0xC6, valor que corresponde a los mensajes de tipo NCM PS.
- TID: ID temporal del nodo hijo para crear un enlace privado con el nodo padre.

En el paquete PSR, los campos que no son de cabecera representan lo siguiente:

- NT: Tipo de mensaje NCM. Este campo tendrá el valor de 0xC5, valor que corresponde a los mensajes de tipo NCM PSR.
- DP: Dirección del nodo padre.
- NIH: Nuevo ID para el nodo hijo.

3.4.2. Descubrimiento de rutas

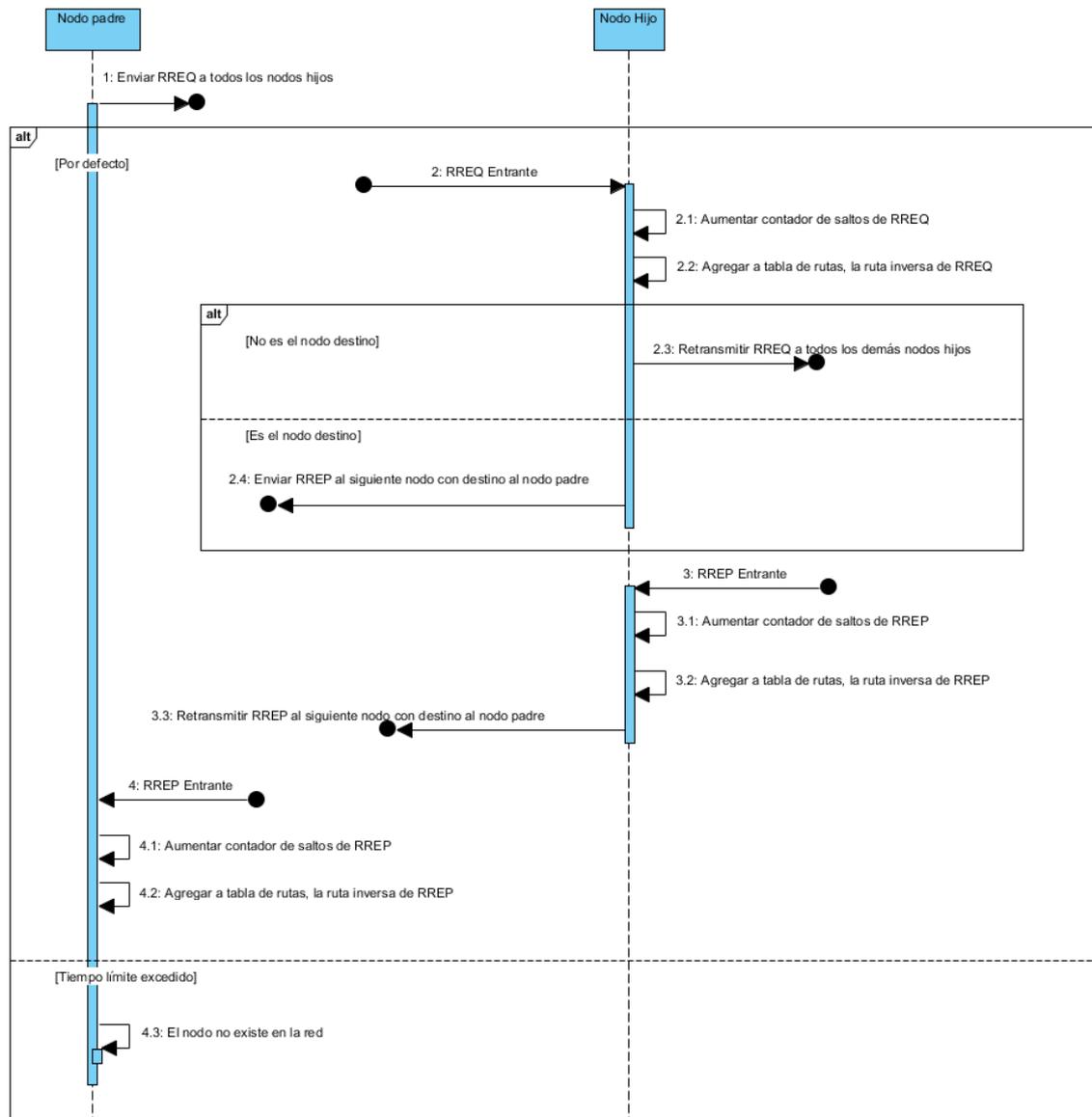


Figura 49. Descubrimiento de rutas.
Fuente: Elaboración propia.

Con el fin de tener flexibilidad en la organización de los nodos en la subred, es necesario tener un protocolo que permita encontrar la ruta que debe seguir un mensaje para llegar a su destino final.

El flujo de este protocolo está representado en la Figura 49, el cual está basado en el protocolo “Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing” (Perkins, Belding, & Das, 2003).

Antes de entrar en detalle la explicación del protocolo es necesario definir las estructuras de los mensajes RREQ y RREP utilizados en este protocolo. Esto se puede visualizar en las Figuras 50 y 51.

	Cabecera				RREQ					
Bytes	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	T	D	O	L	CS	RID	RD	RDS	RO	ROS

Figura 50. Estructura del paquete RREQ.
Fuente: Elaboración propia.

	Cabecera				RREP			
Bytes	1	1	1	1	1	1	1	1
	T	D	O	L	CS	RD	RDS	RO

Figura 51. Estructura del paquete RREP.
Fuente: Elaboración propia.

En el paquete RREQ, el campo T de la cabecera tendrá el valor 0xA3, valor que corresponde a los mensajes de tipo RREQ. Los demás campos que no forman parte de la cabecera representan lo siguiente:

- CS: Contador de saltos. Indica la cantidad de saltos que ha realizado el RREQ antes de llegar a su destino (RD).
- RID: Identificador del RREQ. Este identificador sirve para evitar leer varias veces la misma RREQ ya procesada.
- RD: Destino del RREQ. Es el ID del nodo hijo que se requiere conocer su ruta.
- RDS: Número de secuencia del destino. Este es un número único que permite verificar que tan actualizada está o no la ruta hacia el nodo.

- RO: Origen del RREQ. Este campo es el ID del nodo que envía el RREQ, en esta subred, este campo siempre será 0, que corresponde al ID del nodo padre.
- ROS: Número de secuencia del origen. Este es un número único que permite verificar que tan actualizada está o no la ruta hacia el nodo.

En el paquete RREP, el campo T de la cabecera tendrá el valor 0xA4, valor que corresponde a los mensajes de tipo RREP. Los demás campos que no forman parte de la cabecera representan lo siguiente:

- CS: Contador de saltos. Indica la cantidad de saltos que ha realizado el RREP antes de llegar a su destino (RO).
- RD: Destino del RREP. Este campo debe ser ID del nodo que crea el RREP.
- RDS: Número de secuencia del destino. Este es un número único que permite verificar que tan actualizada está o no la ruta hacia el nodo.
- RO: Origen del RREP. Este campo deber la ID del nodo al que se envía la RREP, en este caso será siempre 0, el cual corresponde la ID del nodo padre, puesto que el NP es el único nodo que puede crear un RREQ.

Una vez definido estos paquetes de datos, se explicará en detalle el procedimiento de este protocolo. Primero, se debe tomar en cuenta que el único que puede iniciar este protocolo es el nodo padre y no los nodos hijos; así, cuando el nodo padre necesita una ruta a un nodo hijo determinado, el NP emite un RREQ broadcast a todos sus nodos hijos para encontrar una ruta hacia el NH requerido. Se puede determinar esta ruta cuando el RREQ alcanza el nodo destino. La ruta disponible hacia el nodo destino se conoce mediante la unidifusión de un mensaje RREP de vuelta al origen del RREQ. Cada nodo que recibe un RREQ almacena una ruta de regreso al originador del RREQ, de modo que el RREP puede ser unicast desde el destino a lo largo de una ruta hasta el originador del RREQ (Perkins, Belding, & Das, 2003).

Para verificar si el nodo existe o se encuentra o no en la subred, en el instante en que el nodo padre envía un RREQ, un temporizador inicia su contador. Si

el temporizador llega a su tiempo límite, y ningún RREP se ha recibido en el nodo padre, entonces el NP puede concluir que el nodo hijo requerido no se encuentra más en la subred.

3.4.3. Gestión de información (Light User Datagram – LUD)

Los mensajes de interacción directa entre los nodos padres y los nodos hijos se realizan bajo este tipo de mensaje LUD (Light User Datagram), el cual aparte de los campos de cabecera, agrega un campo de “checksum” o suma de verificación para comprobar la integridad del mensaje en el lado de receptor y un campo para definir el subtipo de mensaje. Se definen cuatro subtipos:

- Solicitud de lectura (Read Request - RR): Este subtipo de mensaje es enviado por el nodo padre cuando requiere la lectura de uno de sus nodos hijos. No se agrega ningún campo adicional en LUD.
- Solicitud de escritura (Write Request - WR): Este subtipo de mensaje es enviado por el nodo padre cuando requiere escribir sobre un actuador de un determinado NH. Este subtipo de mensaje cuenta con dos campos:
 - Número de actuador (1 byte): El número o ID del actuador del NH que se quiere escribir.
 - Valor del actuador (2 bytes): El nuevo valor del actuador que se desea escribir en él.
- Respuesta de solicitud de lectura (Read Request Reply - RRR): Este subtipo de mensaje es enviado por el nodo hijo en respuesta a una solicitud de lectura de un NP. Cuenta con cuatro campos:
 - Número de sensores leídos (1 byte): Indica el número de sensores leídos por el NH de forma correcta (máximo tres).
 - Valor del sensor 1 (4 bytes): Valor del sensor 1 del NH codificado.
 - Valor del sensor 2 (4 bytes): Valor del sensor 2 del NH codificado.
 - Valor del sensor 3 (4 bytes): Valor del sensor 3 del NH codificado.
- Respuesta de solicitud de escritura (Write Request Reply - WRR): Este subtipo de mensaje es enviado por el nodo hijo en respuesta exitosa

de una solicitud de escritura realizada por su nodo padre. No se agrega ningún campo adicional en LUD.

3.5. Protocolos de red en la subred NP-NP

Para la comunicación de bajo nivel entre los nodos padres, se determinó utilizar el protocolo ESP-Mesh desarrollado por Espressif (2016), fabricante del transceptor Wi-Fi utilizado en este proyecto. De acuerdo a Espressif (2016), bajo este protocolo es posible formar una red de hasta 87 dispositivos, una distancia de hasta 100 m entre saltos y hasta cinco niveles de mallas de red. La comunicación en esta subred bajo este protocolo se puede observar en la Figura 52, los nodos padres se pueden comunicar entre sí y comunicarse con un Gateway que permita subir los datos a un servidor alojado en Internet, así también, los NP pueden retransmitir mensajes en caso de que el mismo tenga un destino fuera del alcance del emisor, así, por ejemplo, cuando el NP1 desee enviar datos al Gateway o viceversa, tendrá que hacer uso del NP2 o NP3 que si tienen alcance con el destino.

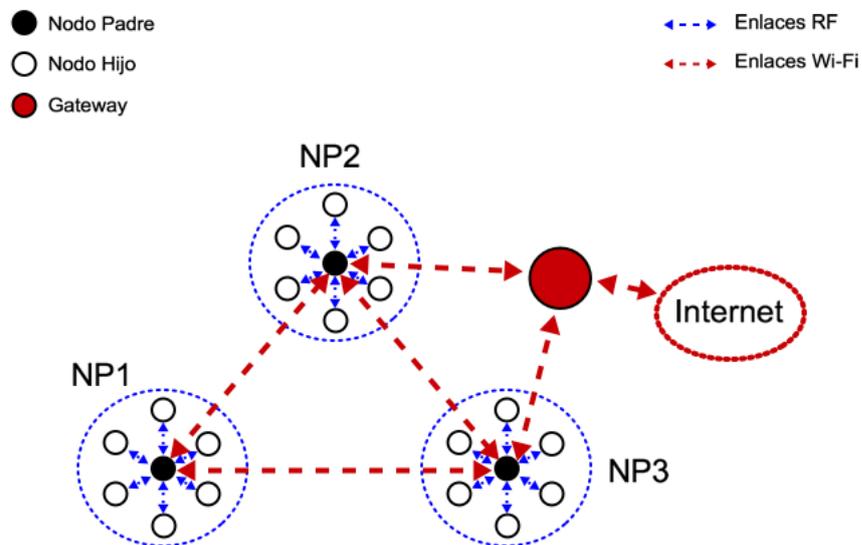


Figura 52. Comunicación de nodos en la subred NP-NP bajo el protocolo ESP-Mesh.
Fuente: Elaboración propia.

La comunicación de alto nivel entre los nodos padres puede estar regida por cualquier protocolo de comunicación que se requiera, dependiendo del alcance que se le quiera dar al sistema. Un ejemplo de protocolo de comunicación que puede ser implementado es el protocolo FIPA utilizado para

agentes inteligentes, de tal forma, que todo el sistema pueda formar parte de un sistema multiagente.

3.6. Pruebas de funcionamiento

Las pruebas experimentales del prototipo permiten determinar si el sistema cumple con las funciones del sistema. Las funciones del sistema, son el comportamiento o el conjunto de requisitos que el sistema debe de cumplir para resolver el problema que se ha planteado para este trabajo de investigación. En este apartado se desarrolla diferentes experimentos que permiten determinar el cumplimiento real de las funciones básicas definidas al inicio del capítulo. En la Figura 53 se muestra los nodos padres y nodos hijos desarrollados que se utilizaron para llevar a cabo las pruebas del sistema y la Figura 54 muestra una subred NP-NH conectada la GUI desarrollada en computadora.

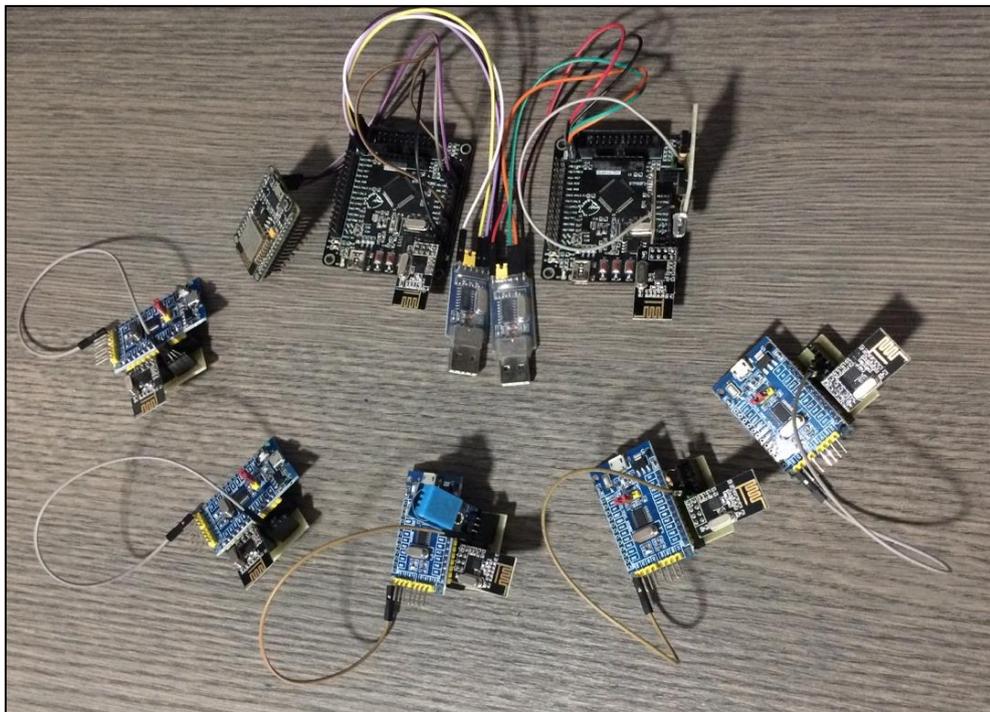


Figura 53. Nodos padres y nodos hijos desarrollados.
Fuente: Elaboración propia.

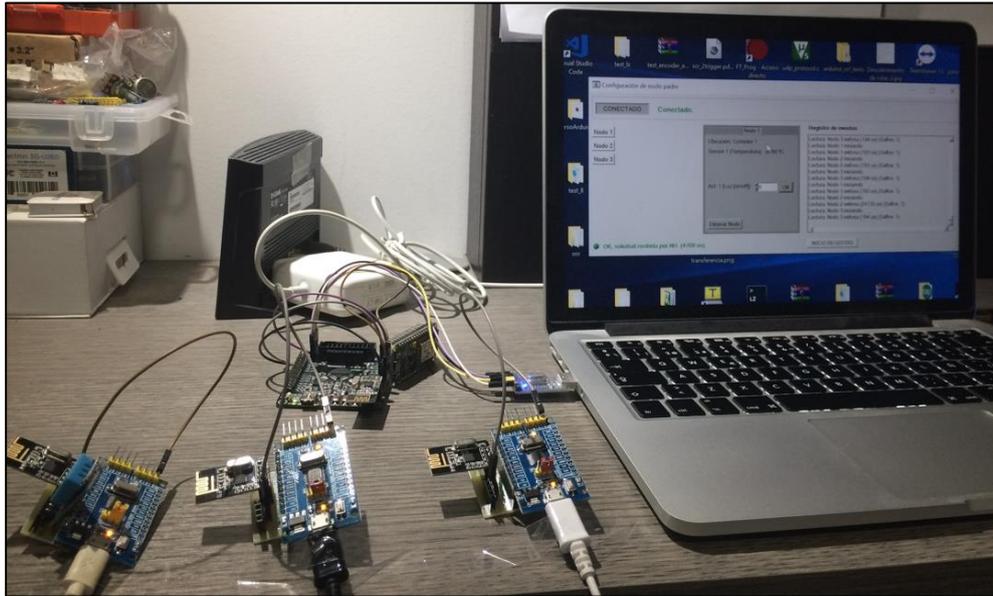


Figura 54. Subred NP-NH conectada a la GUI desarrollada.
Fuente: Elaboración propia.

Se realizaron seis pruebas distintas con la ayuda de la interfaz gráfica desarrollada para el nodo padre. La descripción de cada una de estas pruebas y sus resultados se muestran a continuación.

3.6.1. Prueba del protocolo AODV

Objetivo de la prueba: Determinar el tiempo de descubrimiento de rutas hacia nodos hijos.

Variables que intervienen: Número de saltos, tiempo.

Desarrollo del experimento: Para esta prueba se dispone de cinco nodos hijos ubicados aleatoriamente en una casa. El nodo padre conoce a los cinco nodos, pero no conoce la ruta que deben tomar los mensajes para comunicarse con ellos. Al poner la red en funcionamiento, el nodo padre empezará a ejecutar el protocolo AODV en cada uno de los nodos, para encontrar una ruta activa estable, y la GUI desarrollada se encargará de registrar los tiempos que transcurre hasta que la red se estabilice y el tiempo que ha tardado en completarse el descubrimiento de rutas de los nodos respecto al número de saltos necesarios para llegar hasta ellos.

Análisis de resultados: Los tiempos de duración obtenidos del descubrimiento de rutas con respecto a la cantidad de saltos necesarios para llegar a

determinado nodo, se puede observar en la Tabla 1. De lo anterior, se puede decir que lo máximo que tarda el protocolo AODV en realizarse con éxito es 94 ms, mientras que lo mínimo es de 59 ms. No obstante, estos tiempos como se puede observar no dependen en gran medida de la cantidad de saltos hacia su destino, sino de cuánto tráfico de red existe en el momento de ejecución del protocolo, debido a que, cada nodo retransmite mensajes de difusión a otros nodos de la red, obligando a otros nodos esperar a que el canal inalámbrico esté libre para enviar una respuesta.

Tabla 1. Duración del protocolo AODV respecto al número de saltos.

Número de saltos	Tiempo (ms)
1	59
1	71
1	63
2	69
2	65
2	94

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, el sistema logró estabilizarse después de 78.62 segundos. Durante este tiempo ocurrieron 6 ciclos de trabajo, dentro de los cuales se efectuaron en total 30 solicitudes de lectura, 24 de ellas exitosas y 6 de ellas perdidas. Cada ciclo de trabajo consiste en el envío de solicitudes de lectura a cada uno de los nodos hijos con que cuenta un nodo padre. Estos ciclos de trabajos se pueden observar en la Tabla 2.

Con ayuda de esta tabla, se evidencia cómo en cada ciclo de trabajo, los nodos hijos van adquiriendo una ruta activa para comunicarse con su nodo padre y viceversa. En algunas ocasiones, los nodos pierden su ruta activa como es el caso en la transición del primer ciclo al segundo ciclo, donde el nodo 3 pierde su ruta activa; esto se debe a que la primera ruta hallada para este nodo era eficiente, por lo que el sistema procede a encontrar una ruta

mejor. En el último ciclo se evidencia que los cinco nodos cuentan con ruta activa, permitiendo a la red funcionar de manera adecuada.

Tabla 2. Ciclos de trabajo realizados antes de la estabilización del sistema.

Ciclo de trabajo	Nodo destino	Número de saltos
1	1	1
	2	2
	3	1
	5	1
2	1	1
	2	2
	5	1
3	1	1
	2	2
	3	2
	5	1
4	1	1
	2	2
	3	2
	5	1
5	1	1
	2	2
	3	2
	4	2

6	1	1
	2	2
	3	2
	4	2
	5	1

Fuente: Elaboración propia.

3.6.2. Prueba de tiempo de respuesta de solicitudes de lectura

Objetivo de la prueba: Determinar el tiempo de respuesta de las solicitudes de lectura enviada a los nodos hijos.

Variables que intervienen: Número de saltos, tiempo.

Desarrollo del experimento: Se utiliza cinco nodos hijos. El nodo padre ejecutará las solicitudes de lectura a cada uno de los nodos, esperando recibir una respuesta de ellos. El tiempo de respuesta de una solicitud de lectura considerada para esta prueba, transcurre desde que el nodo padre envía una solicitud de lectura hasta que recibe la respuesta del nodo hijo. Este tiempo es medido con la ayuda de la interfaz gráfica de usuario desarrollada para el nodo padre. La prueba finaliza cuando se alcanzan 2000 solicitudes de lectura exitosas.

Análisis de los resultados: Finalizado el experimento, se obtuvieron los tiempos de respuesta de las 2000 solicitudes de lectura realizadas exitosamente. Dentro de estas 2000 solicitudes de lectura se identificó que 1019 se efectuaron con rutas de 1 salto, 872 con rutas de 2 saltos, 97 con rutas de 3 saltos y 12 con rutas de 4 saltos. Puesto que, una mayor cantidad de saltos que debe recorrer el mensaje a su destino afecta directamente al tiempo de respuesta de los NH, se ha realizado cuatro diferentes gráficos que muestran el tiempo de respuesta de los NH a lo largo de las diferentes solicitudes de lectura enviadas, para cada una de los cuatro tipos de rutas

mencionadas. Lo anterior, se visualiza en las Figuras 55, 56, 57 y 58, respectivamente.

La Figura 55 muestra los tiempos de respuesta a una solicitud de lectura con rutas de 1 salto, de donde se obtiene que lo máximo que tardó un nodo hijo en responder fue de 563 us, mientras que lo mínimo fue de 191 us. Así, el tiempo promedio de respuesta a una solicitud de lectura con rutas de 1 salto es de 199.92 us.

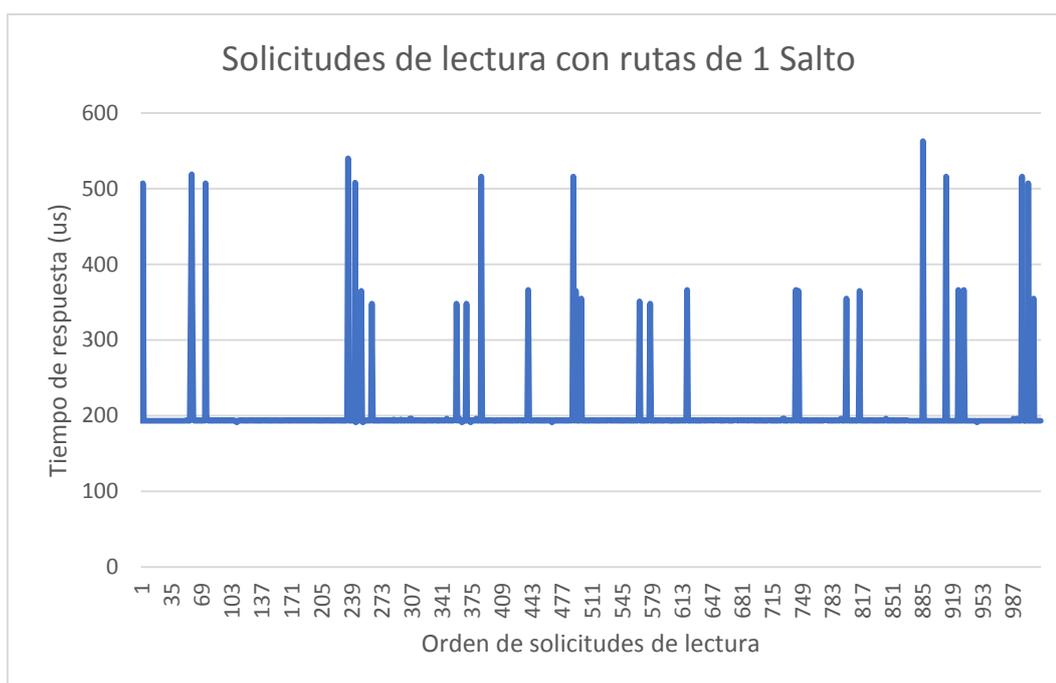


Figura 55. Solicitudes de lectura con rutas de 1 salto.
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 56 muestra los tiempos de respuesta a una solicitud de lectura con rutas de 2 saltos, de donde se obtiene que lo máximo que tardó un nodo hijo en responder fue de 916 us, mientras que lo mínimo fue de 192 us. Así, el tiempo promedio de respuesta a una solicitud de lectura con rutas de 2 saltos es de 226.89 us.

La Figura 57 muestra los tiempos de respuesta a una solicitud de lectura con rutas de 3 saltos, de donde se obtiene que lo máximo que tardó un nodo hijo en responder fue de 909 us, mientras que lo mínimo fue de 193 us. Así, el tiempo promedio de respuesta a una solicitud de lectura con rutas de 3 saltos es de 292.30 us.

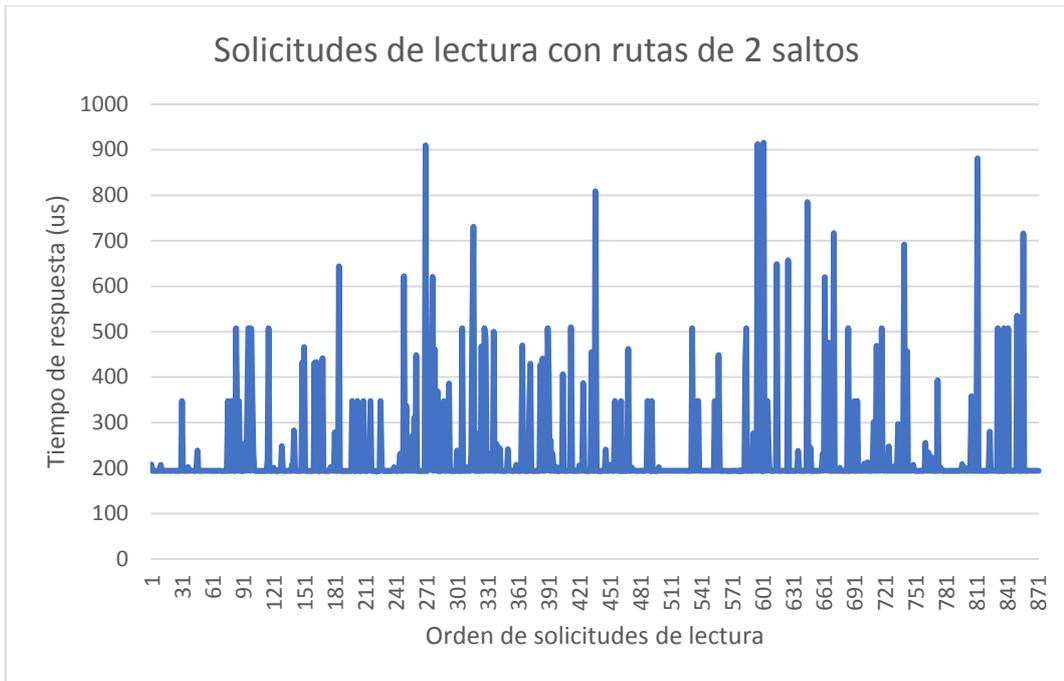


Figura 56. Solicitudes de lectura con rutas de 2 saltos.
Fuente: Elaboración propia.

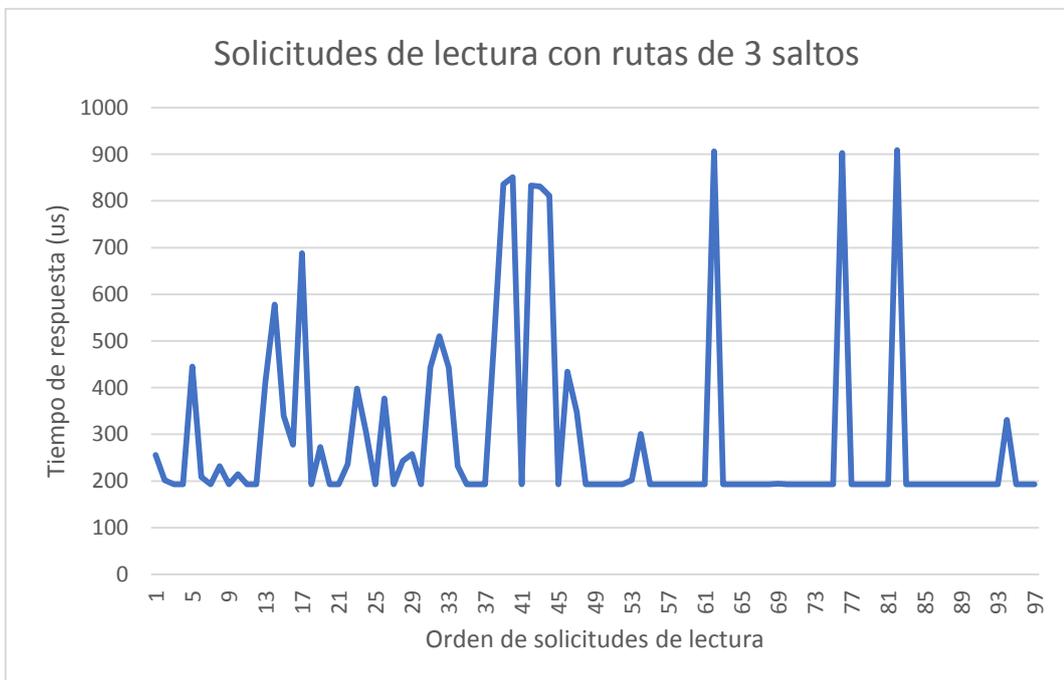


Figura 57. Solicitudes de lectura con rutas de 3 saltos.
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 58 muestra los tiempos de respuesta a una solicitud de lectura con rutas de 4 saltos, de donde se obtiene que lo máximo que tardó un nodo hijo en responder fue de 985 us, mientras que lo mínimo fue de 193 us. Así, el tiempo promedio de respuesta a una solicitud de lectura con rutas de 4 saltos es de 806.50 us.

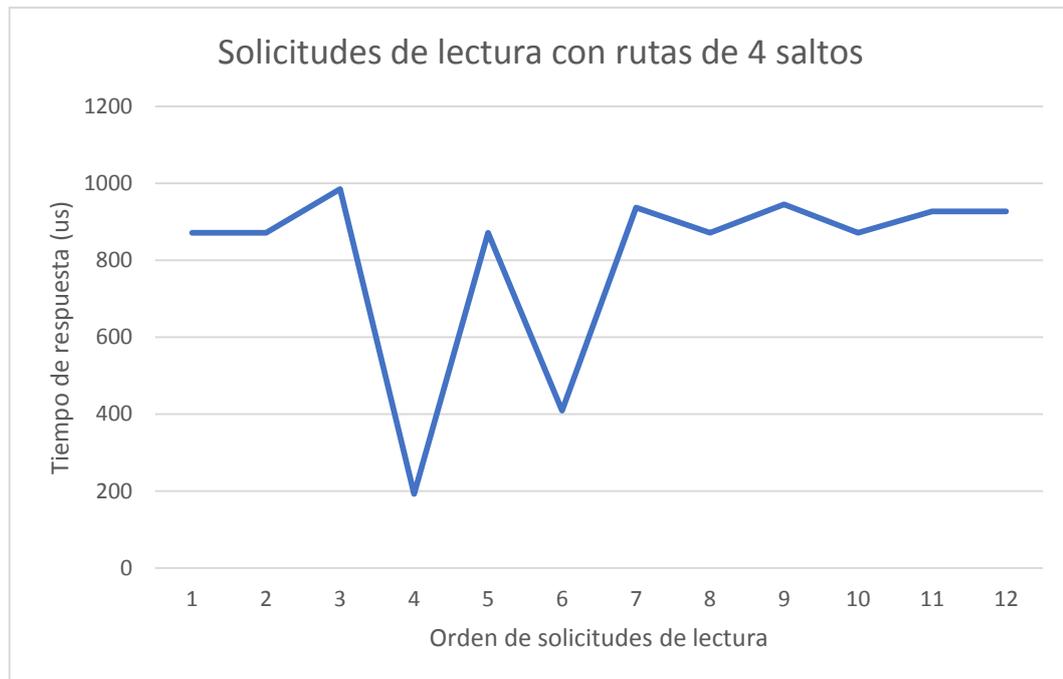


Figura 58. Solicitudes de lectura con rutas de 4 saltos.
Fuente: Elaboración propia.

3.6.3. Prueba de cantidad de solicitudes de lectura perdidas

Objetivo de la prueba: Determinar la cantidad de solicitudes de lectura (SL) perdidas o sin respuesta en la red.

Variables que intervienen: Número de solicitudes de lectura enviadas, número de solicitudes de lectura perdidas.

Desarrollo del experimento: Con un total de cinco nodos hijos, se dejó a la red operar hasta que se consiguieran 2000 solicitudes de lectura exitosas. En este proceso, se registran la cantidad de solicitudes de lectura que se perdieron en el canal inalámbrico, o no tuvieron respuesta.

Análisis de los resultados: De esta prueba se encontró que se enviaron 2057 solicitudes de lectura, de las cuales 2000 llegaron a su destino y 57 se perdieron o no tuvieron respuesta.

$$\%SL_{perdidas} = \frac{57 SL_{perdidas}}{2057 SL_{enviadas}} * 100\% = 2.77 \%$$

La Figura 59 muestra el porcentaje de solicitudes de lectura exitosas y perdidas en esta prueba. Se obtiene entonces que, el 97.22% de las solicitudes de lectura enviadas por esta red llegan a su destino exitosamente, y tan solo un 2.77% no tiene respuesta o se pierde en el canal inalámbrico.



Figura 59. Resultados de la prueba de cantidad de SL perdidas.
Fuente: Elaboración propia.

3.6.4. Prueba de tiempo de respuesta de solicitudes de escritura

Objetivo de la prueba: Determinar el tiempo de respuesta de las solicitudes de escritura enviada a los nodos hijos.

Variables que intervienen: Número de saltos, tiempo.

Desarrollo del experimento: Para este experimento se contó con un nodo padre y tres nodos hijos, donde uno de estos últimos fue forzado a trabajar con una ruta de 2 saltos. Las solicitudes de escritura se enviaron manualmente con la ayuda de la interfaz gráfica de usuario del nodo padre, y con la ayuda de la misma se obtuvo el tiempo de respuesta de cada solicitud. Para esta prueba se envió 25 solicitudes de escritura a los nodos con rutas de 1 salto y otras 25 al nodo con ruta de 2 saltos. Las solicitudes de escritura se diferencian de las solicitudes de lectura, por no formar parte del ciclo de

trabajo normal que ejecuta el nodo padre, pues el envío de éstas ocurre de forma arbitraria. Esta arbitrariedad obliga a que los nodos hijos tengan que esperar a que el canal inalámbrico esté libre para dar respuesta a una solicitud de escritura (SE), por ello el tiempo de respuesta de las SE es mayor que el de las SL.

Análisis de los resultados: Las Figuras 60 y 61 muestran los tiempos de respuesta obtenidos en esta prueba para rutas de 1 y 2 saltos, respectivamente. Para las solicitudes de escritura con rutas de 1 salto, se tiene que el máximo tiempo de respuesta fue de 1817 us y el mínimo fue de 1715 us, además se obtuvo un tiempo promedio de respuesta de 1762.52 us. Para las solicitudes de escritura con rutas de 2 saltos, se tiene que el máximo tiempo de respuesta fue de 43580 us y el mínimo fue de 29770 us, obteniendo un tiempo de promedio de respuesta de 36684.20 us.

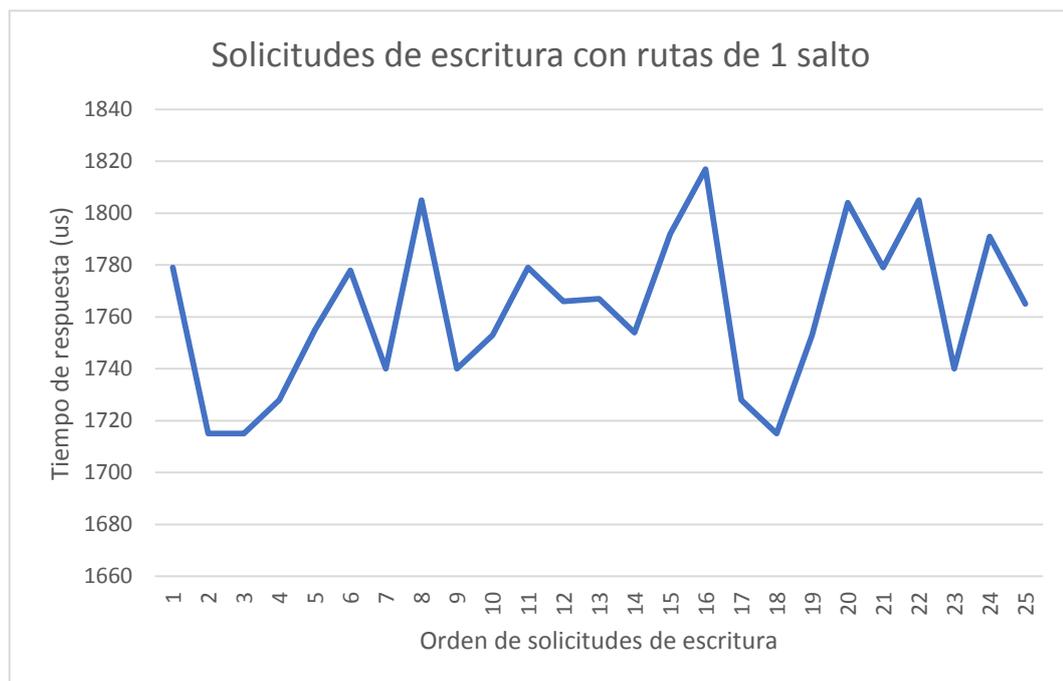


Figura 60. Solicitudes de escritura con rutas de 1 salto.
Fuente: Elaboración propia.

En base a estos datos, se puede notar que el tiempo de respuesta a una solicitud de escritura con ruta de 2 saltos es aproximadamente 21 veces mayor que el tiempo de respuesta con solicitudes con rutas de 1 salto. Lo anterior es debido a que, el envío de respuesta a las solicitudes de escritura se lleva a cabo después de verificar que el canal de transmisión esté libre para usarse,

y como el mismo debe ser retransmitido por otros nodos, incrementa la probabilidad de que se envíe la solicitud cuando el sistema se encuentre ejecutando su ciclo de trabajo normal, provocando así un retardo hasta que el canal inalámbrico se encuentre disponible.

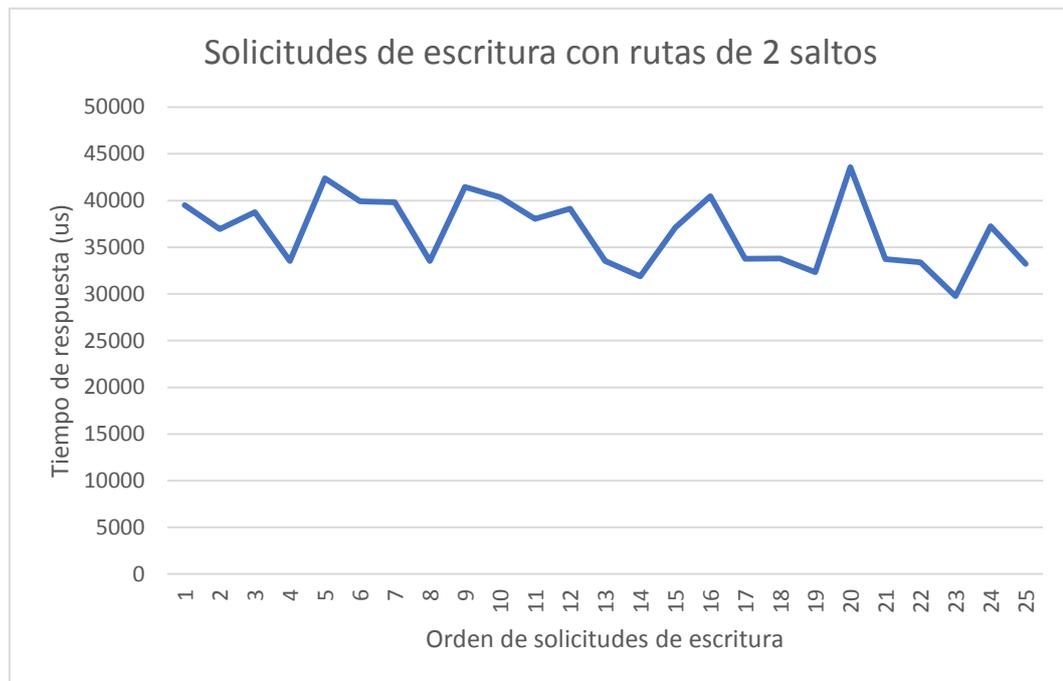


Figura 61. Solicitudes de escritura con rutas de 2 saltos.
Fuente: Elaboración propia.

3.6.5. Prueba de distancia de alcance

Objetivo de la prueba: Determinar el alcance máximo de comunicación entre nodos con una pared de obstáculo.

Variables que intervienen: Distancia entre nodos, número de solicitudes fallidas.

Desarrollo del experimento: La prueba de alcance se realizó con la ayuda de un solo nodo padre y un solo nodo hijo. Se realiza 100 solicitudes de lectura a 10 diferentes distancias sin línea de vista, y con la ayuda de la interfaz gráfica de usuario del nodo padre se registra la cantidad de solicitudes de lectura que no llegan a su destino.

Análisis de los resultados: En la Tabla 3 se muestra la relación entre la distancia entre los nodos y el número de solicitudes fallidas. Con la ayuda de esta tabla se puede identificar que, a una distancia máxima de 12 m entre

nodos con una pared de obstáculo se asegura una comunicación sin solicitudes fallidas. Durante el desarrollo de esta prueba, se determinó algunos módulos de radiofrecuencia se comportaron de forma inusual esporádicamente, impidiendo obtener los resultados mostrados en la Tabla 3.

Tabla 3. Solicitudes fallidas a diferentes distancias entre nodos.

Distancia (m)	Solicitudes fallidas
5	0
10	0
11	0
12	0
13	3
14	3
15	3
16	17
17	21
18	25

Fuente: Elaboración propia.

3.6.6. Prueba de adopción de nodos hijos

Objetivo de la prueba: Determinar la cantidad de nodos hijos que puede adoptar un nodo padre.

Variables que intervienen: Cantidad de nodos hijos en la red, cantidad de nodos hijos adoptados por el nodo padre.

Desarrollo del experimento: Para esta prueba se contó con cinco nodos hijos y un nodo padre. El nodo padre no conoce a ninguno de los nodos hijos en la

red, por lo que, los deberá adoptar de forma dinámica para hacerlos parte de su subred.

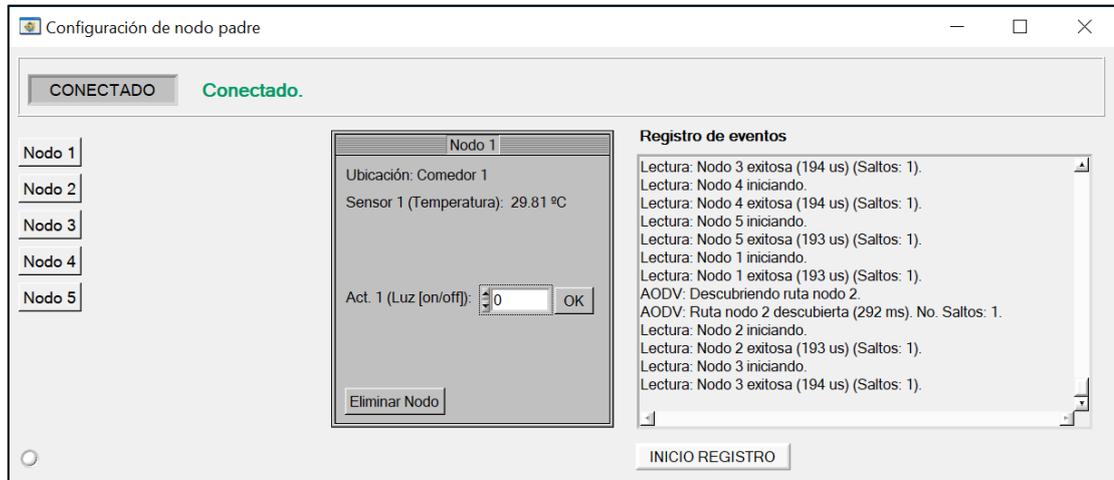


Figura 62. GUI del nodo padre mostrando los nodos hijos adoptados.

Fuente: Elaboración propia.

Análisis de los resultados: La Figura 62 muestra la interfaz gráfica de usuario del nodo padre en donde se identifica los cinco de la red, con lo que se concluye que el nodo padre es capaz de adoptar cinco nodos hijos. Este valor, sin embargo, no es la máxima cantidad de nodos hijos que puede administrar el nodo padre. A causa de que las direcciones de los nodos en la subred NP-NH fueron fijadas a un tamaño de 8 bits, y considerando que las direcciones 0x00 y 0xFF están reservados al mismo nodo padre y a mensajes de difusión, respectivamente, cada nodo padre es capaz de adoptar 254 nodos hijos. Aunque por motivos económicos y de tiempo, se ha hecho imposible demostrar experimentalmente lo anterior, se debe tener en cuenta que, a una mayor cantidad de nodos, mayor tiempo durará el ciclo de trabajo del mismo, ralentizando así la frecuencia con que se actualizan los datos de los nodos hijos en el nodo padre.

3.7. Cálculo de costos

En esta sección, se enlistarán los elementos utilizados para el desarrollo de los nodos prototipos del sistema propuesto, y se especificará el costo de cada uno de ellos. Las Tablas 4 y 5 muestran los elementos y el costo del nodo padre y nodo hijo (sin contar el costo de sensores y actuadores), respectivamente.

Tabla 4. Costo de desarrollo del nodo padre.

CANT.	DESCRIPCIÓN	P. UNITARIO	P. TOTAL
1	Placa de evaluación STM32F103RC	\$7.27	\$7.27
1	Módulo nRF24L01	\$1.20	\$1.20
1	Módulo ESP8266 (NodeMCU v1.0)	\$5.73	\$5.73
1	Convertidor USB a Serial (CH340G)	\$1.95	\$1.95
1	Jumpers	\$2.00	\$2.00
TOTAL			\$18.15

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5. Costo de desarrollo del nodo hijo.

CANT.	DESCRIPCIÓN	P. UNITARIO	P. TOTAL
1	Placa de evaluación STM32F030F4	\$2.50	\$2.50
1	Módulo nRF24L01	\$1.20	\$1.20
1	Adaptador nRF24L01 (PCB)	\$1.06	\$1.06
1	Convertidor USB a Serial (CH340G)	\$1.95	\$1.95
1	Jumpers	\$2.00	\$2.00
TOTAL			\$8.71

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO IV: PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Este capítulo tiene el propósito de presentar los resultados obtenidos del presente trabajo de investigación, analizar las características y funciones del sistema propuesto y discutir sobre su diferencia con respecto a otros sistemas de similares prestaciones.

4.1. Presentación de resultados

En esta sección, se exponen de forma resumida los resultados relacionados con el estado del arte, los componentes físicos del sistema, el firmware y las interfaces gráficas de usuario desarrollados para los nodos de la red inalámbrica y las pruebas experimentales del prototipo de red.

4.1.1. Resultados referentes al estado del arte

Con la finalidad de recabar información acerca de las redes de sensores inalámbricos y su estado en la actualidad, se estudiaron diferentes trabajos de investigación, los cuales forman parte del estado del arte de este trabajo. Los protocolos de comunicación, así como las características más importantes de este tipo de redes fueron temas claves para el desarrollo de este proyecto.

Del análisis de estos trabajos, se identificó que las WSN se caracterizan por contar con nodos intermedios que sirven para relevar mensajes de otros nodos, de manera que los datos a enviar deben realizar múltiples saltos para llegar a su destino; además se caracterizan por contar con velocidades de transmisión de datos bajas para garantizar la seguridad e integridad de los datos, siendo la velocidad más común de 250 Kbps. Los protocolos de comunicación, parte esencial en estas redes, fueron uno de los puntos más abordados en la literatura recopilada. La mayoría de los trabajos actuales utilizan el estándar ZigBee y 6LoWPAN en conjunto con sus protocolos, de aquí se determinó dos protocolos importantes que han sido utilizados por muchos investigadores obteniendo buenos resultados, éstos que sirvieron de base para el desarrollo del proyecto. El primero de ellos fue el protocolo

“Neighbor Discovery for IP versión 6” y el segundo el protocolo “Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing”.

4.1.2. Resultados de hardware

La red propuesta en este trabajo está compuesta por dos elementos principales: nodos padres y nodos hijos, de manera que, es preciso exponer la composición física interna de los nodos prototipos desarrollados.

Nodo padre: Este nodo se compone de tres elementos: el microcontrolador STM32F103RC, el módulo Wi-Fi ESP8266 y el módulo nRF24L01. El microcontrolador STM32F103RC es el encargado de administrar las comunicaciones en la subred NP-NH. Este microcontrolador se comunica mediante una interfaz SPI con el módulo nRF24L01, el cual es el encargado de transmitir y recibir paquetes RF a 2.4 GHz. El protocolo Enhanced ShockBurst™ que se encuentra embebido en este módulo facilita gran parte del manejo de paquetes de datos, pues cuenta con acuses de recibo automáticos y retransmisiones automáticas. El módulo ESP8266 cuenta con un microcontrolador Tensilica interno, el cual se encarga de administrar toda la subred NP-NP; por otro lado, cuenta con acceso a la pila de protocolos Wi-Fi, convirtiéndose en un verdadero transceptor, mediante el cual se envían los mensajes en la subred NP-NP. Este módulo se comunica con el microcontrolador STM32F103RC mediante una interfaz UART. Todas estas conexiones antes mencionadas, se muestran en más detalle en la Figura 63.

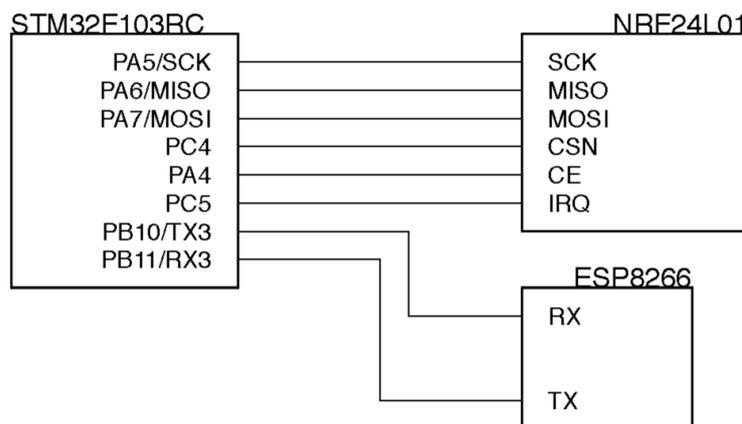


Figura 63. Detalle de conexión de los componentes del nodo padre.
Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 6 muestra el consumo de energía del nodo padre en diferentes eventos.

Tabla 6. Consumo de energía del nodo padre desarrollado.

Condición	Consumo de corriente (mA) @3.3V
Subred NP-NH	
Inactivo	53.1
TX	58.6
RX	59.4
Subred NP-NP	
Inactivo	83.2
TX	114.1
RX	91.3

Fuente: Elaboración propia.

Nodo hijo: El nodo implementado se compone básicamente de tres elementos: el microcontrolador STM32F030F4, el módulo nRF24L01 y sensores/actuadores.

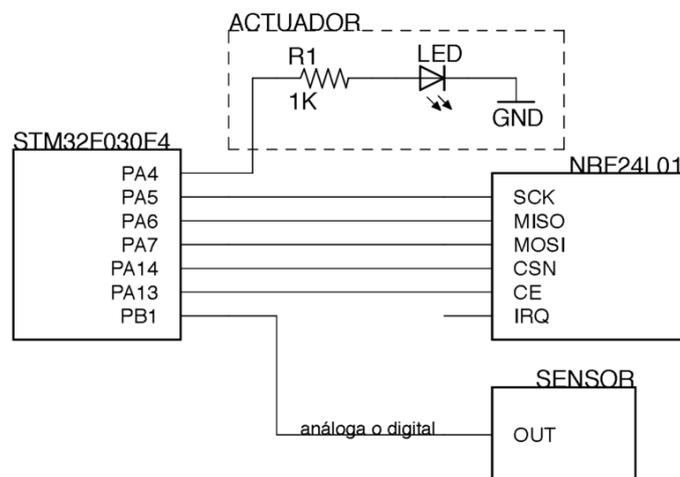


Figura 64. Detalle de conexión de los componentes del nodo hijo.
Fuente: Elaboración propia.

El microcontrolador STM32F030RC es el encargado de llevar a cabo toda la inteligencia del nodo y es responsable de la lectura de los sensores y la escritura de los actuadores que se encuentran en el nodo. Este microcontrolador se comunica mediante una interfaz SPI con el módulo nRF24L01, el cual es el encargado de transmitir y recibir paquetes RF a 2.4 GHz. Los sensores/actuadores pueden variar de acuerdo a la(s) variable(s) que se requiera leer o controlar. Los nodos hijos prototipos se diseñaron para que puedan equiparse con un sensor analógico o digital (OneWire) y un actuador (diodo LED). Todas estas conexiones antes mencionadas, se muestran en más detalle en la Figura 64.

La Tabla 7 muestra el consumo de energía del nodo hijo en diferentes eventos (no se considera el consumo de sensores y/o actuadores).

Tabla 7. Consumo de energía del nodo hijo desarrollado.

Condición	Consumo de corriente (mA) @3.3V
Inactivo	31.3
TX	34.8
RX	35.2

Fuente: Elaboración propia.

4.1.3. Resultados de software

El desarrollo del software del sistema constituyó el mayor tiempo y esfuerzo de este trabajo, debido a que se utilizó microcontroladores (MCU) cuya programación no es sencilla en comparación a otros en el mercado, sin embargo, tienen mejores recursos y son menos costosos. Para empezar, se diseñó una completa librería de alto nivel para el manejo de los principales periféricos de los microcontroladores STM32, la cual tiene la característica de ser altamente portable a las diferentes series de estos microcontroladores y ser lo suficientemente liviana para su uso en aquellos con recursos limitados.

Con la ayuda de las librerías alojadas en Internet para controlar el módulo nRF24L01, se logró diseñar un controlador completo del mismo que le permita

funcionar con los MCU que se utilizaron. Bajo la misma estrategia, se codificó el algoritmo de los protocolos de búsqueda de nodo padre y descubrimiento de rutas, los cuales fueron modificados de sus versiones originales para que puedan adaptarse al sistema. Esta modificación consistió en limitar la cantidad de información que usan los paquetes de datos de estos protocolos, debido a que, el módulo nRF24L01 sólo puede enviar y recibir paquetes de datos de hasta 32 bytes. Lo anterior, también limitó la cantidad de direcciones de nodos que pueden existir en la red a 255, siendo la dirección 0x00 reservada para el nodo padre y la dirección 0xFF para mensajes de difusión.

En resumen, se logró:

- Desarrollar el firmware para los nodos hijos, el cual les permitió formar parte de la red inalámbrica implementada, conociendo todos los protocolos de comunicación que esto implica.
- Desarrollar el firmware para los nodos padres, lo que les dio la facultad de administrar la subred NP-NH y recolectar datos de sus nodos hijos, como también ser parte de una subred NP-NP, con dispositivos de la misma jerarquía.
- Desarrollar librerías para el control de módulos de comunicación y microcontroladores, lo cual facilitó enormemente la escritura de los firmwares para los dos tipos de nodos con que cuenta la red.
- Desarrollar librerías portables, las cuales puedan ser usadas en cualquier plataforma y bajo cualquier arquitectura de microcontrolador, que admita una programación en C.

4.1.4. Resultados de interfaz de usuario

Se diseñó una interfaz gráfica de usuario para cada tipo de nodo (nodo padre y nodo hijo) con la ayuda de la herramienta software LabWindows. Estas dos interfaces cuales tienen propósitos diferentes, los cuales se detallarán a continuación.

Nodo padre: Se trata de la interfaz más compleja. Esta interfaz tiene el objetivo de mostrar los valores de los sensores de todos los nodos hijos del nodo padre, y enviar solicitudes escritura a los nodos hijos. Además, permite evaluar el funcionamiento de la red, pues cuenta con un panel en donde se

visualiza los eventos que ocurren en el nodo padre, y calcula el tiempo de respuesta de las solicitudes de lectura y escritura, así como también el tiempo que dura la ejecución del protocolo AODV. Finalmente, tiene la característica de almacenar todos estos parámetros de evaluación en archivos .csv de forma automática, para así analizar mejor y más rápidos dichos parámetros. Para su comunicación con el nodo padre utiliza una interfaz serial, siendo capaz de detectar automáticamente el puerto en donde se conecta el nodo.

Nodo hijo: La utilidad de esta interfaz está limitada a la configuración de algunos parámetros con que cuenta el nodo hijo. Permite cambiar la ubicación del nodo en la red, visualizar los sensores y actuadores con los que cuenta, y realizar un restablecimiento de fábrica para desvincularlo de un nodo padre, en caso de que se haya vinculado previamente. Al igual que la interfaz anterior, ésta se comunica con el nodo hijo a través de una interfaz serial, y tiene la capacidad de detectar automáticamente el puerto serial donde se encuentra el nodo.

4.1.5. Resultados de las pruebas de prototipo

Se realizaron seis diferentes pruebas a la red prototipo desarrollada. Los resultados de estas pruebas fueron óptimos, pues se estableció lo siguiente:

- La red es capaz de estabilizarse después de 78.62 segundos tras energizarse.
- El tiempo promedio de respuesta a solicitudes de lectura enviadas a los nodos hijos con rutas de 1 salto es de 199.92 us, el máximo es 563 us y el mínimo es 191 us.
- El tiempo promedio de respuesta a solicitudes de lectura enviadas a los nodos hijos con rutas de 2 saltos es de 226.89 us, el máximo es 916 us y el mínimo es 192 us.
- El tiempo promedio de respuesta a solicitudes de lectura enviadas a los nodos hijos con rutas de 3 saltos es de 292.30 us, el máximo es 909 us y el mínimo es 193 us.
- El tiempo promedio de respuesta a solicitudes de lectura enviadas a los nodos hijos con rutas de 4 saltos es de 806.50 us, el máximo es 985 us y el mínimo es 193 us.

- Sólo el 2.77% de solicitudes de lectura se pierden o no reciben respuesta en una red compuesta por cinco nodos hijos.
- El tiempo promedio de respuesta a solicitudes de escritura enviadas a los nodos hijos con rutas de 1 saltos es de 1762.52 us, el máximo es 1817 us y el mínimo es 1715 us.
- El tiempo promedio de respuesta a solicitudes de escritura enviadas a los nodos hijos con rutas de 2 saltos es de 36684.20 us, el máximo es 43580 us y el mínimo es 29770 us.
- Para mantener una comunicación 100% confiable entre nodos, la distancia máxima entre ellos con una pared de obstáculo es de 12 m.
- El nodo padre es capaz de adoptar hasta 254 nodos hijos, sin embargo, se ha de tomar en cuenta que a una mayor cantidad de nodos hijos, mayor durará cada ciclo de trabajo del sistema.

4.1.6. Resultados generales del sistema: descripción, características y funciones

La descripción y la definición de las características y funciones del sistema previo al desarrollo del mismo, fue el punto de inicio y guía para completar este proyecto. El sistema de forma general es una red que alberga dos tipos de nodos diferentes, nodos padres y nodos hijos. Esta red cuenta con una topología árbol clúster y se subdivide en dos subredes, a las cuales se las ha denominado subred NP-NH y subred NP-NP. Ambas subredes hacen uso de una comunicación multisalto para maximizar su radio de alcance.

La subred NP-NH se compone de un solo nodo padre y varios nodos hijos, los cuales se comunican entre sí a través de enlaces RF. En esta subred, el nodo padre siempre inicia la comunicación con los nodos hijos comportándose como maestro. La velocidad de transmisión de datos en esta subred es de 250 Kbps, para garantizar la integridad de los datos.

La subred NP-NP se compone de varios nodos padres que se pueden comunicar entre sí a través de enlaces Wi-Fi. En esta subred, todos los nodos tienen el mismo nivel de inteligencia, por lo que, los nodos se pueden comunicar en cualquier momento y no existe una regla de quien comienza la

comunicación. La velocidad de transmisión de datos en esta subred es de 7 Mbps.

Para poner en marcha el sistema, se debe contar con al menos un nodo padre y un nodo hijo, y energizar ambos nodos. Después de esto, el nodo hijo buscará unirse a algún nodo padre cerca de él; al encontrarlo, su nuevo nodo padre le asignará una ID única en la subred NP-NH para que pueda integrarse en la misma. Luego de esto, el nodo padre podrá enviar solicitudes de lectura y/o escritura a su nodo hijo, esperando la respuesta a dicha solicitud. Finalmente, el usuario puede visualizar y tomar control del sistema con la ayuda de la interfaz gráfica de usuario desarrollada.

El sistema cuenta con las funciones de monitorear cada uno de los sensores embebidos en los nodos hijos, toma de acciones en tiempo real, integrar hasta 254 nodos hijos por padre dinámicamente, mantener las rutas para el encaminamiento de mensajes, registrar los nodos hijos adoptados por un nodo padre y adaptarse a cambios de disposición de nodos de la red.

4.2. Discusión de resultados

En este apartado, se desarrollará un análisis de los resultados obtenidos del sistema desde diferentes instancias, que permitan avalar los logros de este trabajo, no solo como un diseño tecnológico, sino como un proceso de desarrollo sistemático y técnico que sirva como base para otros sistemas análogos, y que ha permitido cumplir con las expectativas planteadas al inicio del proyecto, apoyado en una metodología de la investigación científica, que garantiza el rigor científico y académico. Además, se contrastará el sistema propuesto con otros sistemas investigados.

4.2.1. Análisis de las características y funciones del sistema

Las características y funciones del sistema fueron analizadas y verificadas con la ayuda de las pruebas experimentales, las cuales han sido documentadas al final del Capítulo III.

La prueba del protocolo AODV permitió demostrar que el sistema es capaz de adaptarse a cambios de disposición de los nodos en la red y estabilizarse en

tan solo 78.62 segundos cuando la red se encuentra conformada por cinco nodos sin rutas conocidas. Este tiempo permite que la comunicación de los elementos de la red sea lo suficientemente fluida para el tipo de aplicación que se ha propuesto.

La prueba de tiempo de respuesta de la solicitud de lectura permitió confirmar que el sistema es capaz de monitorear eficazmente los nodos sensores en tiempos óptimos, siendo el mínimo de ellos 191 us y el máximo de 806.50 us para rutas de 4 saltos. Este tiempo de respuesta de solicitudes de escritura permite que la red pueda albergar un gran número de nodos sin que esto se vea reflejado significativamente en el ciclo de trabajo del sistema. Con la prueba de solicitudes de lectura perdidas se verificó que la red es capaz de mantener actualizadas las rutas necesarias para el encaminamiento correcto de los mensajes de red, y que tan sólo un 2.77% de los mensajes enviados se pierden o no tienen respuesta. Este último dato indica que el sistema es altamente confiable, pues el 97.22% de los mensajes que se envían en esta red llegan exitosamente a su destino.

La prueba de tiempo de respuesta de solicitudes de escritura reveló que el sistema puede responder en tiempo real a acciones de control, pues se obtuvo un tiempo promedio de respuesta de 1762.52 us para rutas de 1 salto, y 36684.20 us para rutas de 2 saltos. Este tiempo de respuesta es bajo considerando los tiempos de respuesta de WSN comunes, como se puede observar en el trabajo de Bondorf & Schmitt (2010), en donde el tiempo de respuesta mínimo que obtuvieron fue de 130 ms. Sin embargo, se debe considerar que este tiempo depende varios factores como el tráfico de red, el ciclo de trabajo del sistema y la arquitectura de la red, este último factor permitió que la red implementada pueda responder más rápido respecto a las WSN comunes.

La prueba de distancia de alcance demostró que el sistema puede trabajar en áreas grandes, pues garantizar la comunicación exitosa en la red, basta que cada nodo no se encuentre separado más de 12 m respecto a su vecino. Esta distancia de alcance se encuentra dentro de las expectativas que se plantearon al principio de este trabajo, la cual era una distancia mayor a 10 m.

Comúnmente, las redes de sensores inalámbricos aplicadas a sistemas domóticos no necesitan grandes distancias de alcance, pues se caracterizan por contar con una comunicación de múltiples saltos; lo anterior se puede evidenciar en el trabajo de Hong, Kim, & Eom (2007), donde la red WSN estudiada se encuentra aplicada al campo de la domótica cuenta con nodos cuyo radio de alcance es de 10 m; de manera que la distancia obtenida para el sistema propuesta es suficiente para su aplicación en la automatización del hogar.

Finalmente, la prueba de adopción de nodos hijos mostró que el nodo padre puede adoptar cinco nodos hijos sin problema. Aunque este nodo puede albergar un máximo de 254 nodos hijos, esto no se pudo probar por falta de más nodos prototipos.

4.2.2. Cumplimiento de los objetivos

A continuación, se expondrá si los objetivos planteados al inicio del presente trabajo fueron cumplidos o no por el sistema prototipo desarrollado y cómo estos objetivos se cumplen en el sistema.

4.2.2.1. Objetivo general

Se analizaron diferentes arquitecturas de red inalámbrica, antes de proponer la arquitectura utilizada en el diseño de la red inalámbrica implementada en este trabajo. Así, se logró analizar exitosamente la arquitectura de una red de sensores inalámbricos basada en componentes de bajo costo para su aplicación en la domótica, mediante la ejecución de diversas pruebas a la red prototipo que se desarrolló, cuyos resultados permitieron observar que la arquitectura elegida para esta red y la que usan normalmente estas redes permiten una comunicación eficaz entre cada uno de los elementos de una red.

4.2.2.2. Objetivos específicos

Se diseñó con éxito un prototipo de red inalámbrica, la cual se compuso de dos nodos padres y cinco nodos hijos. Los nodos fueron construidos con microcontroladores de la familia STM32 de 32 bits, y con módulos de

comunicación de bajo costo como el nRF24L01 y ESP8266. Se propuso dos protocolos de comunicación para el sistema prototipo, los cuales resultaron de una modificación de protocolos utilizados bajo el estándar 6LoWPAN, para que se puedan adaptar a los componentes empleados. Se determinó también que el sistema es eficiente en cuanto a su capacidad de conectividad frente a diferentes disposiciones físicas de los nodos, pues se consiguió tiempos bajos de estabilización del sistema cuando existen cinco nodos dispuestos aleatoriamente (78.62 segundos). Con lo anterior se pudo cumplir satisfactoriamente con los objetivos específicos planteados.

4.2.3. Análisis de la metodología

Para el desarrollo de este trabajo se utilizó un tipo de investigación correlacional con enfoque cuantitativo, para lo cual se utilizaron métodos bibliográficos y experimentales. Con la ayuda del primer método, se logró recopilar información fundamental acerca de las características y protocolos de comunicación que necesita toda red de sensores inalámbricos. Con esta información se desarrolló con éxito los protocolos de búsqueda de padre y descubrimiento de rutas presentados en este trabajo. Mediante el método experimental, se pudo comprobar que la red prototipo desarrollada funcionó de acuerdo a lo que se esperaba y se había propuesto al inicio de este trabajo. Puesto que, que se consiguió cumplir todas las metas propuestas, se concluye que la metodología escogida fue la adecuada para el desarrollo óptimo del trabajo.

4.2.4. Análisis de la hipótesis

La hipótesis planteada en el Capítulo I de este trabajo fue comprobada, gracias a las pruebas realizadas con la red prototipo. Así, se verificó que, en efecto, se dispuso de un sistema flexible, dinámico, adaptable y expandible, pues pudo adaptarse a diferentes configuraciones física de los nodos y tuvo la dinámica necesaria para encontrar rutas activas para encaminamiento de los paquetes de datos. Además, se verificó que, para asegurar una comunicación eficaz entre nodos, debe existir al menos una distancia de 12 m, 7 m más de lo que se estipuló en la hipótesis.

4.2.5. Análisis de la solución del problema de investigación

Con el desarrollo de este sistema, se soluciona el problema planteado en el Capítulo I, pues se logró desarrollar un sistema con elementos de bajo costo que comparte gran parte de las características de las redes de sensores inalámbricos en la actualidad basadas en ZigBee y 6LoWPAN. Se logró solucionar el problema en cuanto al desarrollo del sistema con componentes pocos comunes para el prototipado, así se escribió una librería completa para la programación de los microcontroladores utilizados en este trabajo, y se adaptó las librerías de los módulos de comunicación y sensores para que funcionen con estos microcontroladores. Asimismo, se logró modificar protocolos de estándares ya existentes como 6LoWPAN para que se adapten a las limitaciones del sistema, puesto que para la red prototipo presentada en este trabajo solo se pueden enviar mensajes con una longitud máxima de 32 bytes.

4.2.6. Discusión final

Los objetivos planteados en este trabajo pudieron cumplirse a cabalidad y con su cumplimiento se logra solucionar el problema planteado en el Capítulo I, al desarrollar una red de sensores inalámbricos con componentes de bajo costo.

El sistema presentado en esta investigación se pudo adaptar a cualquier disposición física de los nodos, y se obtuvo un tiempo de respuesta óptimo. Además, el sistema es expandible, pues puede formar parte de un sistema mucho más grande. Como parte de un trabajo futuro, se tiene el desarrollo de un nodo que sirva como gateway, el cual se encargará de enviar los datos de los sensores a Internet, y recibir acciones de control desde Internet. Adicionalmente, la inteligencia de los nodos padres puede mejorarse para que funcionen en un entorno de agentes inteligentes, realizando tareas de forma cooperativa.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se presentarán las conclusiones y recomendaciones que se obtuvieron al finalizar el análisis del sistema desarrollado, y además se introducirá a posibles trabajos futuros relacionados a este tema de investigación.

5.1. Conclusiones

El desarrollo de este trabajo permitió llegar a varias conclusiones importantes, las cuales se detallan a continuación:

- La comunicación multi-salto implementada permite que las redes inalámbricas puedan trabajar en áreas amplias sin necesidad de un alto consumo de energía.
- Las redes de sensores inalámbricos que trabajan a velocidades moderadamente bajas, en este estudio a 250 Kbps, garantizan la integridad y seguridad de los datos, reduciendo el consumo de energía de los elementos de la red.
- Una arquitectura de red, definida por una topología tipo árbol y una gestión de información maestro-esclavo, permitió disminuir las colisiones de mensajes en el canal inalámbrico, mejorar los tiempos de respuesta de la red y hacerla flexible frente a cambios de organización de nodos.
- En una red inalámbrica basada en módulos inalámbricos de bajo costo, el uso de la técnica multi-salto, permitió la escalabilidad de la red y el incremento significativo del número de nodos.
- El uso de componentes de bajo costo permite desarrollar aplicaciones muy eficientes y escalables, todo esto, sin embargo, a costa de un mayor tiempo de desarrollo.
- La adaptación de protocolos de comunicación utilizados ampliamente en las WSN comunes, a componentes de bajo costo es viable, pues esto permitió que el sistema propuesto en este trabajo funciones de acuerdo a lo esperado.

5.2. Recomendaciones

Se recomienda comprobar que los elementos usados para hacer los prototipos funcionen correctamente, de esta manera, las pruebas futuras que se realicen podrán arrojar resultados veraces, que demuestren sin interferencias el comportamiento real del sistema. Asimismo, se sugiere el uso de microcontroladores de 32 bits para próximos proyectos, pues cuentan con mejores características que sus similares de 8 bits, y actualmente, son menos costosos que los microcontroladores de 8 bits comúnmente usados.

En el proceso de programación de un sistema con un grado de complejidad significativo, se recomienda trabajar con sistemas operativos de tiempo real (RTOS), pues éstos permiten realizar tareas de forma “simultánea” sin provocar retrasos innecesarios.

El uso de herramientas software sencillas, como LabWindows, para el diseño de interfaces, es útil para evaluar de forma segura y rápida los parámetros de un sistema determinado.

5.3. Trabajos futuros

Para completar el desarrollo de este sistema, se requiere de la inclusión de un gateway en la red, de tal forma que la visualización de datos y las acciones de control se puedan realizar a través de Internet desde cualquier parte del mundo. Esta característica no ha sido implementada en la red prototipo desarrollada quedando esta propuesta como parte de un trabajo futuro. Además, se puede agregar una capa de transporte de seguridad de datos, para garantizar que los mensajes no puedan ser modificados o accedidos por otros.

Asimismo, esta red puede formar parte de una red de agentes inteligentes, para lo cual simplemente se debe añadir ciertas funciones e inteligencia al nodo padre que le permita comportarse como un agente inteligente real.

BIBLIOGRAFÍA

- ARM Ltd. (2016). *6LoWPAN overview*. Recuperado el 2 de febrero de 2018, de docs.mbed.com: https://docs.mbed.com/docs/arm-ipv66lowpan-stack/en/latest/quick_start_intro/
- Andersson, M., Bastos, A., Blomberg, S., Nyborg, E., Palsson, A., & Tham, P. (2015). *Home Automation for Existing Devices*. Recuperado el 6 de noviembre de 2017, de gupea.ub.gu.se: https://gupea.ub.gu.se/bitstream/2077/39601/1/gupea_2077_39601_1.pdf
- Arioua, M., El Assari, Y., Ez-zazi, I., & El Oualkadi, A. (2016). *Multi-hop Cluster Based Routing Approach for Wireless Sensor Networks*. Recuperado el 2 de febrero de 2018, de www.sciencedirect.com: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050916303106#bibl0005>
- Bond, A., & Gasser, L. (1988). *A Survey of Distributed Artificial Intelligence*. Recuperado el 7 de noviembre de 2017, de www.exso.com: <http://www.exso.com/nsurvo.pdf>
- Bondorf, S., & Schmitt, J. (2010). *Statistical Response Time Bounds in Randomly Deployed Wireless Sensor Networks*. Recuperado el 2 de febrero de 2018, de pdfs.semanticscholar.org: <https://pdfs.semanticscholar.org/4a27/e50a03ceeeec620c1711e6d4d77c6913476c2.pdf>
- Braun, T., Kassler, A., Kihl, M., Rakocevic, V., Siris, V., & Heijenk, G. (2009). *Multi-hop Wireless Networks*. Recuperado el 23 de noviembre de 2017, de www2.aueb.gr: http://www2.aueb.gr/users/vsiris/publications/k5_COST290_Book_Ch5.pdf
- Correia, A. (2010). *Distributed Artificial Intelligence*. Recuperado el 7 de noviembre de 2017, de www.dei.isep.ipp.pt:

<http://www.dei.isep.ipp.pt/~asilva/resources/SIBAG/Documentos/Distributed-AI---1070349---rev.pdf>

Decker, K. (1987). *Distributed problem-solving techniques: A survey*. Recuperado el 7 de noviembre de 2017, de ieeexplore.ieee.org: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6499280/>

Deshmukh, A. (2004). *Distributed Artificial Intelligence*. Recuperado el 7 de noviembre de 2017, de www.eolss.net: <https://www.eolss.net/Sample-Chapters/C15/E1-29-02-04.pdf>

Di Marco, P. (2008). *Protocol Design and Implementation for Wireless Sensor Networks*. Recuperado el 1 de noviembre de 2017, de www.researchgate.net: <https://www.researchgate.net/file.PostFileLoader.html?id=58f9241b96b7e420783e78ed&assetKey=AS%3A485332169826304%401492723614041>

Dowell, M., & Bonnell, R. (2002). *Learning for distributed artificial intelligence systems*. Recuperado el 7 de noviembre de 2017, de ieeexplore.ieee.org: <http://ieeexplore.ieee.org/document/138551/>

E.T.S.V. Scintilla. (2017). *Manual ARM Microcontroller Course*. Recuperado el 4 de noviembre de 2017, de www.scintilla.utwente.nl: https://www.scintilla.utwente.nl/docs/cursus/MicrocontrollerCourse2017/20170308-Microcontroller_Course_2017_Manual_Revision_5.0.pdf

Electronics Hub. (2015). *Microcontroller Types and Applications*. Recuperado el 5 de noviembre de 2017, de www.electronicshub.org: http://www.electronicshub.org/microcontrollers/#Microcontroller_Applications

Espressif. (2016). *ESP8266 Mesh User Guide*. Recuperado el 8 de enero de 2018, de <http://www.espressif.com>: http://www.espressif.com/sites/default/files/30a-esp8266_mesh_user_guide_en.pdf

- Espressif. (2017). *ESP8266*. Recuperado el 10 de diciembre de 2017, de www.espressif.com:
<https://www.espressif.com/en/products/hardware/esp8266ex/overview>
- Fahmy, H. (2016). *Wireless Sensor Networks: Concepts, Applications, Experimentation and Analysis*. Singapore: Springer.
- Fauzi, M., & Shazali, K. (2012). *Wireless Sensor Network Applications: A Study in Environment Monitoring System*. Recuperado el 5 de noviembre de 2017, de www.sciencedirect.com:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705812027026>
- Fischione, C. (2014). *An Introduction to Wireless Sensor Networks*. Recuperado el 31 de octubre de 2017, de www.kth.se:
https://www.kth.se/social/files/5431a388f276540a05ad2514/An_Introduction_WSNS_V1.8.pdf
- Gridling, G., & Weiss, B. (2007). *Introduction to Microcontrollers*. Recuperado el 4 de noviembre de 2017, de ti.tuwien.ac.at:
<https://ti.tuwien.ac.at/ecs/teaching/courses/mclu/theory-material/Microcontroller.pdf>
- Grindvoll, H., Vermesan, O., Crosbie, T., Bahr, R., Dawood, N., & Revel, G. (2012). *A Wireless Sensor Network for Intelligent Building Energy Management based on Multi Communication Standards*. Recuperado el 5 de noviembre de 2017, de www.itcon.org:
https://www.itcon.org/papers/2012_3.content.00598.pdf
- Guo, H., Low, K.-S., & Nguyen, H.-A. (2011). *Optimizing the Localization of a Wireless Sensor Network in Real Time Based on a Low-Cost Microcontroller*. Recuperado el 24 de enero de 2018, de pgembeddedsystems.com:
<http://pgembeddedsystems.com/securelogin/upload/project/IEEE/1/pg2012-2013e26/IEEE020.pdf>
- Gutiérrez, J., Villa, J., Nieto, A., & Porta, M. (2013). *Automated Irrigation System Using a Wireless Sensor Network and GPRS Module*.

Recuperado el 5 de noviembre de 2017, de www.wineyard.in:
<http://www.wineyard.in/Abstract/mtech/Embedded/bp/14EM20.pdf>

Hong, S.-H., Kim, B., & Eom, D.-S. (2007). *A Base-station Centric Data Gathering Routing Protocol in Sensor Networks Useful in Home Automation Applications*. Recuperado el 2 de febrero de 2018, de www.researchgate.net:

https://www.researchgate.net/profile/Sung_Hwa_Hong2/publication/3183220_A_base-station_centric_data_gathering_routing_protocol_in_sensor_networks_useful_in_home_automation_applications/links/56f125d408aecad0f31f26a3.pdf

IGI Global. (2017). *What is Hardware architecture*. Recuperado el 10 de noviembre de 2017, de www.igi-global.com: <https://www.igi-global.com/dictionary/hardware-architecture/12774>

Kelly, S., Suryadevara, N., & Mukhopadhyay, S. (2013). *Towards the Implementation of IoT for Environmental Condition Monitoring in Homes*. Recuperado el 5 de noviembre de 2017, de pgembeddedsystems.com:

http://pgembeddedsystems.com/securelogin/upload/project/IEEE/33/P_GEMB0063/Towards%20the%20Implementation%20of%20IoT%20for%20Environmental%20Condition%20Monitoring%20in%20Homes.pdf

Khan, S., Khan, A.-S., & Ali, N. (2016). *Wireless Sensor Networks: Current Status and Future Trends*. Boca Ratón, Florida, Estados Unidos: Taylor & Francis Group.

Li, M., & Lin, H.-J. (2013). *Design and Implementation of Smart Home Control Systems Based on Wireless Sensor Networks and Power Line Communications*. Recuperado el 5 de noviembre de 2017, de dreamerindia.com:

<http://dreamerindia.com/IEEE/IEEE2015/7.%20Design%20and%20Implementation%20of%20Smart%20Home%20Control%20Systems%20>

Based%20on%20Wireless%20Sensor%20Networks%20and%20Power%20Line%20Communication.pdf

Loo, J., Mauri, J., & Ortiz, J. (2012). *Mobile Ad Hoc Networks: Current Status and Future Trends*. Boca Ratón, Florida, Estados Unidos.

Magno, M., Polonelli, T., Benini, L., & Popovici, E. (2015). *A Low Cost, Highly Scalable Wireless Sensor Network Solution to Achieve Smart LED Light Control for Green Buildings*. Recuperado el 5 de noviembre de 2017, de www.researchgate.net: https://www.researchgate.net/profile/Tommaso_Polonelli/publication/274404323_A_Low-cost_Highly_Scalable_Wireless_Sensor_Network_Solution_to_Achieve_Smart_LED_Light_Control_for_Green_Buildings/links/56685d8c08ae8d6928fb0b44/A-Low-cost-Highly-Scalable-Wireless-Sensor-Network-Solution-to-Achieve-Smart-LED-Light-Control-for-Green-Buildings.pdf

Matin, M., & Islam, M. (2012). *Overview of Wireless Sensor Network*. Recuperado el 23 de noviembre de 2017, de cdn.intechopen.com: http://cdn.intechopen.com/pdfs/38793/InTechOverview_of_wireless_sensor_network.pdf

Miller, A. (2013). *Smart Home: The Basics of Home Automation*. Recuperado el 6 de noviembre de 2017, de www.vectorsecurity.com: <https://www.vectorsecurity.com/userfiles/File/pdf/blog/smart-home-interactive.pdf>

Narten, T., Nordmark, E., Simpson, W., & Soliman, H. (2007). *Neighbor Discovery for IP version 6 (IPv6)*. Recuperado el 26 de noviembre de 2017, de tools.ietf.org: <https://tools.ietf.org/html/rfc4861>

National Instruments. (2016). *What is a wireless sensor network?* Recuperado el 23 de noviembre de 2017, de www.ni.com: <http://www.ni.com/white-paper/7142/en/>

- NodeMcu Team. (2018). *NodeMCU Dev Kit V1.0*. Recuperado el 2 de febrero de 2018, de github.com: <https://github.com/nodemcu/nodemcu-devkit-v1.0>
- Nordic Semiconductor. (2008). *nRF24L01+ Product Especification v1.0*. Recuperado el 10 de diciembre de 2017, de www.nordicsemi.com: <http://www.nordicsemi.com/eng/Products/2.4GHz-RF/nRF24L01>
- Noviello, C. (2017). *Mastering STM32*. Nápoles, Italia: Leanpub.
- NuTone. (2016). *A Home Automation Solution*. Recuperado el 10 de noviembre de 2017, de www.nutone.com: <http://www.nutone.com/docs/catalogs/home-automation.pdf>
- Olsson, J. (2014). *6LoWPAN demystified*. Recuperado el 2 de febrero de 2018, de www.ti.com: <http://www.ti.com/lit/wp/swry013/swry013.pdf>
- Paavola, M., & Leiviska, K. (2010). *Wireless Sensor Networks in Industrial Automation*. Recuperado el 5 de noviembre de 2017, de www.intechopen.com: <https://www.intechopen.com/books/factory-automation/wireless-sensor-networks-in-industrial-automation>
- Perkins, C., Belding, E., & Das, S. (2003). *Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing*. Recuperado el 26 de noviembre de 2017, de www.ietf.org: <https://www.ietf.org/rfc/rfc3561.txt>
- Pitcher, G. (2013). *The days of 8bit microcontrollers are numbered as the Cortex-M0 and M0+ wagon gains momentum*. Recuperado el 4 de noviembre de 2017, de www.newelectronics.co.uk: <http://www.newelectronics.co.uk/electronics-technology/vendors-make-core-decisions/49425/>
- Polo, J., Hornero, G., Duijneveld, C., García, A., & Casas, O. (2015). *Design of a low-cost Wireless Sensor Network with UAV mobile node for agricultural applications*. Recuperado el 24 de enero de 2018, de agri.ckcest.cn: <http://agri.ckcest.cn/ass/NK006-20151130004.pdf>

- Randhawa, S. (2014). *Research Challenges in Wireless Sensor Network: A State of the Play*. Recuperado el 5 de noviembre de 2017, de arxiv.org: <https://arxiv.org/pdf/1404.1469.pdf>
- Rathi, N., Saraswat, J., & Bhattacharya, P. (2012). *A review on routing protocols for application in wireless sensor networks*. Recuperado el 23 de noviembre de 2017, de arxiv.org: <https://arxiv.org/pdf/1210.2940.pdf>
- Rault, T. (2017). *Energy-efficiency in wireless sensor networks*. Recuperado el 5 de noviembre de 2017, de tel.archives-ouvertes.fr: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01470489/document>
- Rawat, P., Singh, K., Chaouchi, H., & Bonnin, J.-M. (2013). *Wireless sensor networks: A survey on recent developments and potential synergies*. Recuperado el 5 de noviembre de 2017, de www.researchgate.net: https://www.researchgate.net/profile/Jean-Marie_Bonnin/publication/258165429_Wireless_sensor_networks_A_survey_on_recent_developments_and_potential_synergies/links/546b718d0cf2397f7831c078.pdf
- Roy, K. (2017). *Learn Arduino Prototyping in 10 days*. Birmingham, Reino Unido: Packt Publishing Ltd.
- Russel, S., & Norvig, P. (2008). *Inteligencia Artificial: Un enfoque moderno* (2da ed.). México: Pearson Educación.
- STMicroelectronics. (2017). *STM32F030x4 STM32F030x6 STM32F030x8 STM32F030xC Datasheet*. Recuperado el 10 de diciembre de 2017, de www.st.com: <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/a4/5d/0b/0e/87/c4/4d/71/DM00088500.pdf/files/DM00088500.pdf/jcr:content/translations/en.DM00088500.pdf>
- STMicroelectronics. (2015). *STM32F103xC, STM32F103xD, STM32F103xE Datasheet*. Recuperado el 10 de diciembre de 2017, de www.st.com: <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/>

59/f6/fa/84/20/4e/4c/59/CD00191185.pdf/files/CD00191185.pdf/jcr:content/translations/en.CD00191185.pdf

Shelby, Z., & Bormann, C. (2009). *6LoWPAN: The Wireless Embedded Internet*. Chichester, Reino Unido: John Wiley & Sons Ltd.

Singh, S., Singh, M., & Singh, D. (2010). *Routing Protocols in Wireless Sensor Networks – A Survey*. Recuperado el 5 de noviembre de 2017, de [pdfs.semanticscholar.org](https://pdfs.semanticscholar.org/f376/57052b3c8dc64052a1df8ae2f1959f438c19.pdf):
<https://pdfs.semanticscholar.org/f376/57052b3c8dc64052a1df8ae2f1959f438c19.pdf>

Sohraby, K., Minoli, D., & Znati, T. (2007). *Wireless Sensor Networks: Technology, Protocols, and Applications*. Nueva Jersey, Estados Unidos: John Wiley & Sons.

Techopedia. (2017). *Line of Sight (LoS)*. Recuperado el 22 de noviembre de 2017, de www.techopedia.com:
<https://www.techopedia.com/definition/5069/line-of-sight-los>

Villarrubia, G., De Paz, J., De La Iglesia, D., & Bajo, J. (2017). *Combining Multi-Agent Systems and Wireless Sensor Networks for Monitoring Crop Irrigation*. Recuperado el 5 de noviembre de 2017, de www.mdpi.com: <http://www.mdpi.com/1424-8220/17/8/1775/htm>

Wang, C., Sohraby, K., Hu, Y., Li, B., & Tang, W. (2005). *Issues of transport control protocols for wireless sensor networks*. Recuperado el 7 de noviembre de 2017, de ieeexplore.ieee.org:
<http://ieeexplore.ieee.org/document/1493441/>

Yang, S.-H. (2014). *Wireless Sensor Network*. Londres, Reino Unido: Springer.

Yang, S.-H., & Cao, Y. (2008). *Networked control systems and wireless sensor networks: theories and applications*. Recuperado el 23 de noviembre de 2017, de dl.acm.org:
<https://dl.acm.org/citation.cfm?id=1450726.1450727>

ANEXOS

Anexo A. Comunicación multi-salto en redes inalámbricas.

En las redes inalámbricas de múltiples saltos, los nodos se comunican entre sí mediante canales inalámbricos y no tienen la necesidad de una infraestructura común o un control centralizado. Los nodos pueden cooperar entre sí al reenviar o retransmitir paquetes, con ayuda de nodos relevadores intermedios. Esto permite que los nodos que no pueden comunicarse directamente se comuniquen a través de nodos intermedios sin aumentar su potencia de transmisión. Tal retransmisión de múltiples saltos es una solución muy prometedora para aumentar el rendimiento y proporcionar mejor cobertura para un área física grande. Al usar varios nodos intermedios, el emisor puede reducir la potencia de transmisión, lo que limita los efectos de interferencia y permite la reutilización espacial de las bandas de frecuencia. A continuación, se muestra una arquitectura de una red múltiples saltos tipo clúster.

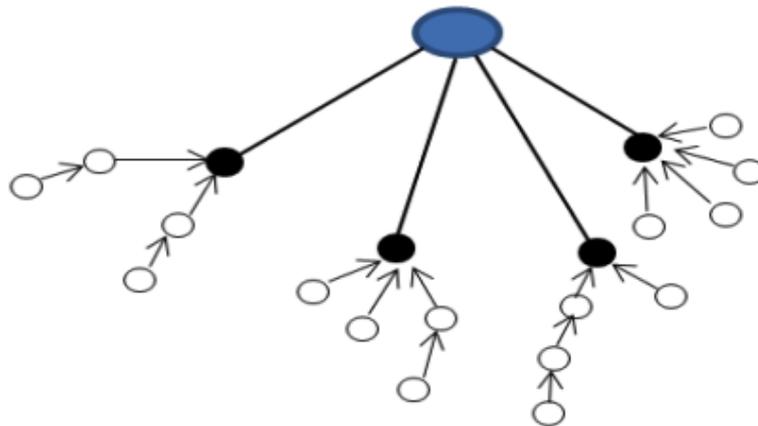


Figura. - Arquitectura de una red de múltiples saltos tipo clúster.
Fuente: (Arioua, El Assari, Ez-zazi, & El Oualkadi, 2016)

Anexo B. Estándar 6LoWPAN: Visión general

6LoWPAN es un estándar abierto definido en RFC6282 por el Grupo de Trabajo de Ingeniería de Internet (IETF – Internet Engineering Task Force), el organismo de estándares que define muchos de los estándares abiertos utilizados en Internet como UDP, TCP y HTTP, por nombrar algunos. Una característica poderosa de 6LoWPAN es que, aunque originalmente se concibió para admitir redes inalámbricas de baja potencia IEEE 802.15.4 en la banda 2.4GHz, ahora está siendo adaptado y utilizado a través de una variedad de otros medios de red incluidos Sub-1 GHz RF de baja potencia, Bluetooth® Smart, Comunicaciones mediante línea de potencia (PLC – Power Line Communications) y Wi-Fi® de baja potencia (Olsson, 2014).

Las primeras especificaciones de 6LoWPAN se lanzaron en el 2007, primero con RFC (Request for Comments) informativo [RFC4919] que especifica los requisitos y los objetivos de la estandarización inicial, y luego con un RFC [RFC4944] que especifica el formato y funcionalidad de 6LoWPAN. A través de la experiencia con implementaciones, el grupo de trabajo de 6LoWPAN continuó con mejoras en la compresión de la cabecera de red (6LoWPAN Header Compression), descubrimiento de nodos vecinos (6LoWPAN Neighbor Discovery) y requisitos de enrutamiento (6LoWPAN Route Requirements). En el 2008 se formó un nuevo grupo de trabajo de IETF, el cual se llamó “Routing over Low-power and Lossy Networks” (ROLL). Este grupo de trabajo especifica los requisitos de enrutamiento y las soluciones para redes de baja potencia, inalámbricas y no confiables (Shelby & Bormann, 2009).

Comúnmente, una red 6LoWPAN consiste de un router de borde o de frontera (border router en inglés) y múltiples nodos de baja potencia. Esta red se conecta a un servicio de nube de Internet para alojar los datos de los sensores y controlar datos. En este tipo de red, los dispositivos pueden tener diferentes roles, como se describe a continuación (ARM Ltd., 2016).

Router de borde (Border Router): Un router de borde es el coordinador de una red 6LoWPAN. Es el encargado de manejar la traducción entre las redes

6LoWPAN e IPv6. También se encarga de autorizar los nodos que se unen a la red y realizar un seguimiento de la topología de enrutamiento.

6LoWPAN router: Es un nodo que puede encaminar paquetes de datos. Este nodo es requerido para formar una red topológica o de malla. Esta configuración no admite que los nodos puedan “dormir” (estado de bajo consumo de energía) porque deben encaminar paquetes a otros nodos.

6LoWPAN host: Este tipo de nodo que no encamina ningún paquete de datos. Cuenta únicamente con una ruta para el envío de paquetes de datos.

6LoWPAN sleepy host: Es un nodo 6LoWPAN host que se le permite “dormir” y apagar su transceptor de radio, con la finalidad de disminuir el consumo de energía.

Usualmente, las redes 6LoWPAN pueden trabajar en dos tipos de topología: tipo estrella y tipo árbol clúster (ARM Ltd., 2016).

Topología estrella

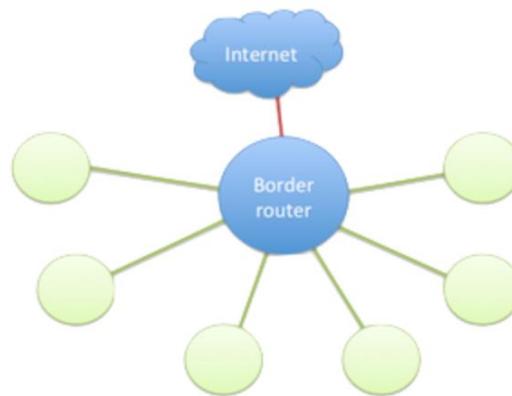


Figura. - Red 6LoWPAN con topología estrella.
Fuente: (ARM Ltd., 2016)

La topología estrella es la forma más simple de red 6LoWPAN. Cada nodo (6LoWPAN host) se conecta directamente al router de borde. En esta topología, los nodos pueden ser dispositivos de muy baja potencia con poca memoria RAM porque no tienen responsabilidades de encaminamiento de datos. También, permite que los nodos puedan “dormir” (6LoWPAN sleepy host) para ahorrar el consumo de energía. Esta topología se observa en la siguiente figura.

Topología árbol clúster

En este tipo de topología, todos los nodos son configurados como 6LoWPAN routers. En este tipo de red, el protocolo RPL (IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks) es usado para formar la topología de enrutamiento (las rutas de comunicación entre nodos). Cada nodo primero selecciona un padre principal para el enrutamiento de datos, entonces el resultado es una red con topología tipo árbol clúster. Este tipo de red permite cubrir grandes áreas porque cada nodo amplía el alcance de la red. Sin embargo, el paquete se transmite en cada salto, lo que significa que la capacidad de transferencia de la red disminuye a medida que aumenta el tamaño de la red. Este tipo de topología se observa en la siguiente figura.

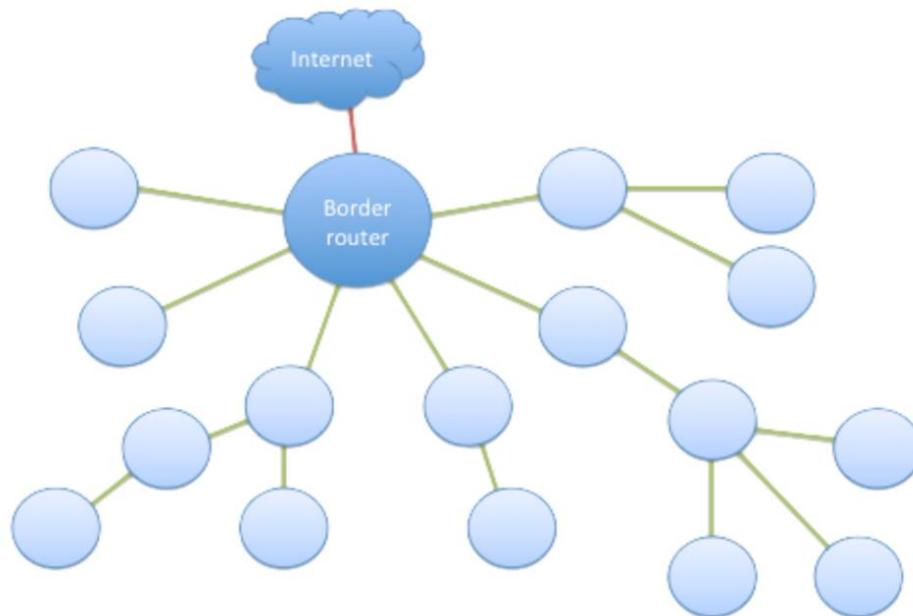


Figura. - Red 6LoWPAN con topología tipo árbol clúster.
Fuente: (ARM Ltd., 2016)



**Presidencia
de la República
del Ecuador**



**Plan Nacional
de Ciencia, Tecnología,
Innovación y Saberes**



SENESCYT

Secretaría Nacional de Educación Superior,
Ciencia, Tecnología e Innovación

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Fuentes Espinoza, Pablo Gustavo**, con C.C: # **0705275816** autor/a del trabajo de titulación: **Estudio de una red de sensores inalámbrico con tecnología Wi-Fi y radiofrecuencia, aplicado a un sistema de control domótico inteligente distribuido**, previo a la obtención del título de **Ingeniero Electrónico en Control y Automatismo** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

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

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

Guayaquil, **12 de marzo de 2018**

f. _____

Nombre: **Fuentes Espinoza, Pablo Gustavo**

C.C: **0705275816**



REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

TÍTULO Y SUBTÍTULO:	Estudio de una red de sensores inalámbricos con tecnología Wi-Fi y radiofrecuencia, aplicado a un sistema de control doméstico inteligente distribuido.		
AUTOR	Fuentes Espinoza, Pablo Gustavo		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	Ing. Mendoza Merchán, Eduardo Vicente, Mgs.		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo		
CARRERA:	Carrera de Ingeniería Electrónica en Control y Automatismo		
TÍTULO OBTENIDO:	Ingeniero Electrónico en Control y Automatismo		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	12 de marzo de 2018	No. DE PÁGINAS:	128
ÁREAS TEMÁTICAS:	Domótica, Redes inalámbricas, Automatización.		
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	Microcontroladores, Red de Sensores Inalámbricos (WSN), Domótica, Red Ad-Hoc Inalámbrica, Red Multi-salto, Nodo sensor.		
RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras):	<p>En el presente trabajo de titulación se realiza el estudio de una red de sensores inalámbricos basada en microcontroladores de 32 bits y componentes de bajo costo, orientada al campo de la domótica, mediante el desarrollo de nodos prototipos de red que permitan verificar experimental y analíticamente la eficiencia de la arquitectura de red elegida como de los protocolos de comunicación implementados para brindar dinamismo, flexibilidad y escalabilidad al sistema. Se realizó una investigación de tipo correlacional con enfoque cuantitativo, y se aplicó los métodos bibliográfico y experimental, los cuales permitieron comprender las características más importantes de las WSN y los estándares más utilizados; y evaluar cuantitativamente parámetros importantes del sistema para determinar los tiempos de respuesta del sistema y su capacidad de reorganización, y comprobar que la arquitectura de red escogida sea la adecuada. Como resultado del presente trabajo, se implementó una red inalámbrica de dos nodos padres comunicados mediante Wi-Fi, uno de los cuales dispuso de cinco nodos hijos que se comunican por módulos RF; y se realizaron diferentes pruebas que arrojaron tiempos de respuesta bajos con una alta tasa de eficiencia en la recepción de datos, que la hacen apropiada para sistemas domésticos inteligentes.</p>		
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: +593983915924	E-mail: f.pablo1@hotmail.com	
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE)::	Nombre: Ing. Mendoza Merchán, Eduardo Vicente, Mgs.		
	Teléfono: +593985086815		
	E-mail: eduardo.mendoza01@cu.ucsg.edu.ec		
SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA			
Nº. DE REGISTRO (en base a datos):			
Nº. DE CLASIFICACIÓN:			
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):			