

Red de sensores inalámbricos multisalto para sistemas domóticos de bajo costo y área extendida

Mendoza, E.^{a,*}, Fuentes, P.^a, Benítez, I.^b, Reina, D.^b, Núñez, J.^{c,*}

^a Departamento de Automática, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Av. Carlos Julio Arosemena Km. 1.5, Guayaquil, Ecuador.

^b Departamento de Automática, Facultad Ingeniería Eléctrica, Universidad de Oriente, Ave Las Américas, s/n, 90300, Santiago de Cuba, Cuba.

^c Departamento de Energía, Facultad de Ingeniería, Universidad de la Costa, Calle 58 No 55-66, 080002, Barranquilla, Colombia.

To cite this article: Mendoza, E., Fuentes, P., Benítez, I., Reina, D., Núñez, J. 2020. Network of multi-hop wireless sensors for low cost and extended area home automation systems. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial 17, 412-423. <https://doi.org/10.4995/riai.2020.12301>

Resumen

Las redes de sensores inalámbricos disponen de un campo muy amplio de aplicaciones y aún muchos desafíos pendientes, especialmente aquellos relacionados con la evolución de la electrónica digital, ancho de banda, reducción de costos de implementación, cobertura de red y capacidad de procesamiento. Este documento propone una configuración de red inalámbrica multisalto orientada a instalaciones domóticas inteligentes, basadas en microcontroladores de 32 bits y módulos de comunicación inalámbrica de bajo costo, que permita tener cobertura completa entre los dispositivos del sistema domótico con una reducida pérdida de datos, mejora en la capacidad de procesamiento, adaptabilidad y escalabilidad en los nodos. La evaluación del desempeño de la red considera las siguientes métricas: tiempo de respuesta, alcance de red, escalabilidad y precisión. Los resultados experimentales determinaron una adaptación exitosa del protocolo multisalto AODV, permitiendo una cobertura suficiente para una vivienda unifamiliar, a una velocidad de transmisión de 250Kbps, que garantiza la integridad y seguridad de los datos.

Palabras Clave: Sensores, redes, sistemas de comunicaciones, redes de comunicaciones, microprocesadores, arquitecturas, control distribuido.

Network of multi-hop wireless sensors for low cost and extended area home automation systems

Abstract

Wireless sensor networks have a wide range of applications and many pending challenges, especially those related to the evolution of digital electronics, bandwidth, reduction of implementation costs, network coverage and processing capacity. This document proposes a configuration of multi-hop wireless network oriented to intelligent domotic installations, based on 32-bit microcontrollers and low cost wireless communication modules, which allows to have complete coverage between the devices of the home automation system with a reduced loss of data, improvement in the processing capacity, adaptability and scalability in the nodes. The evaluation of network performance considers the following metrics: response time, network reach, scalability and precision. The experimental results determined a successful adaptation of the AODV multi-hop protocol, allowing sufficient coverage for a single-family house, at transmission speeds of 250Kbps, which guarantees the integrity and security of the data.

Keywords: Sensors, networks, communications systems, communications networks, microprocessors, architectures, distributed control.

1. Introducción

Las redes de sensores inalámbricos (WSN) han emergido como una tecnología muy prometedora para el futuro (Rawat

et al., 2014), que ha ido ganando mucha importancia a nivel mundial, a tal punto que ha sido considerada como una de las áreas más investigadas en la última década (Randhawa,

*Autor para la correspondencia: jnunez22@cuc.edu.co; eduardo.mendoza01@cu.ucsg.edu.ec
Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0)

2014). Además, las WSN se están expandiendo a muchos sectores socioeconómicos (Paavola and Leiviska, 2010), (Yu *et al.*, 2013), (Peñín *et al.*, 2017), lo cual representa al mismo tiempo grandes desafíos desde las diversas aristas de sus aplicaciones, (Benítez *et al.*, 2017), (Núñez *et al.*, 2019).

Otro aspecto asociado a los avances de las WSN, es la evolución de la microelectrónica programable, que ha posibilitado la implementación de redes de alto grado de complejidad y tecnológicamente más avanzadas, extendiendo el número de aplicaciones y algoritmos que pueden ser implementados en estas redes (Di Nisio *et al.*, 2016), al mejorar su función en términos de latencia y rendimiento específico (Ahmad *et al.*, 2017). Estas características están comprendidas en las denominadas QoS (del inglés, Quality of Service) o calidad de servicio (Snigdh and Gupta, 2016), (Baroudi *et al.*, 2019), (Saravanan *et al.*, 2018), (Núñez *et al.*, 2019), que evalúan el rendimiento global de la red o sistema (Valencia *et al.* 2019), (Benítez *et al.*, 2017).

Las WSN tienen ventajas respecto a las redes alámbricas al no usar cables, ser sencillas de reparar e instalar y por tanto reducir costos (Zhang *et al.*, 2018). Otras tecnologías como X10 pueden tener incompatibilidad con los dispositivos instalados, interferencia, bajas velocidades y falta de cifrado (Kailas *et al.*, 2012), Por otro lado (Manda *et al.*, 2018) (Rawat *et al.*, 2014), consideran que las WSN son muy apropiadas para adaptarse a redes de gestión de dispositivos en sistemas de domóticos inteligentes, vastos y heterogéneos.

La literatura científica revisada coincide en que las WSN constituyen la tecnología predominante en las actuales arquitecturas domóticas (Li and Lin, 2015) y se prevén estén presentes en los proyectos de las futuras casas inteligentes, (Kelly *et al.*, 2013), puesto que permiten la gestión inteligente en los dispositivos que comunican, (Yu *et al.*, 2013), (Peñín *et al.*, 2017) y se adaptan al concepto de computación ubicua o inteligencia artificial, cada vez más común en los sistemas domóticos (Asencio *et al.*, 2011), (Suárez and Núñez, 2019).

Aunque las WSN han sido el centro de muchas investigaciones por más de dos décadas, aún poseen muchos desafíos por superar, especialmente en lo relacionado con el consumo de energía, ancho de banda, capacidad de memoria y potencia de cálculo (Qin *et al.*, 2016), (Liao *et al.*, 2016), (Belagali *et al.*, 2015), (Benítez *et al.*, 2017), (Sutagundar *et al.*, 2016). Por ejemplo, en el caso de la cobertura de la red inalámbrica, si la WSN no abarca un cierto rango del área de la vivienda, no puede proporcionar una señal adecuada, generando alta tasa de errores y/o pérdida de datos (Li and Lin, 2015). Utilizar módulos de comunicación más potentes incrementa el costo de implementación y el consumo energético, a diferencia de utilizar una comunicación multisalvo (Fischione, 2014), (Al-Haija *et al.*, 2013), (Campamá, 2012) que sería más conveniente para reducir el consumo de energía y bajar el costo de los transeptores. En estos sistemas no es necesario que cada nodo sensor tenga su propia batería, pues la mayoría pueden ser energizados directamente de la red eléctrica.

En este trabajo se analiza la arquitectura de una red de sensores inalámbricos basada en microcontroladores de 32 bits y dispositivos de comunicación de bajo costo, orientada al control de sistemas domóticos distribuidos, utilizando un protocolo de enrutamiento AODV para mejorar la cobertura de la red WSN en viviendas unifamiliares. El presente documento está estructurado de la siguiente manera: en el

apartado 2 se propone el diseño de nodos de la red inalámbrica; en el apartado 3 se analiza la arquitectura de dicha red; el apartado 4 describe y analiza el funcionamiento de los nodos de red, donde se definen los protocolos de esta, las subredes y se analiza el descubrimiento de rutas. Finalmente, en el apartado 5 se presentan los resultados y las conclusiones.

2. Análisis de la red inalámbrica

Como punto de partida del análisis de la WSN, se ha considerado que en la implementación de la red inalámbrica se utilicen componentes de bajo costo, que exista una baja tasa de errores en la transmisión, que haya una velocidad de transmisión de datos requerida para sistemas multi-agentes, que sea un sistema escalable y que la cobertura de la red sea suficiente para abarcar una residencia unifamiliar.

Se propone una red inalámbrica de estructura jerárquica que permite la comunicación entre dispositivos inteligentes y dispone de dos tipos de nodos: nodo padre (NP) que se encarga de administrar las direcciones y comunicaciones de otros nodos inferiores denominados nodos hijos (NH), los cuales se ocupan de controlar los sensores y actuadores. Entre los componentes seleccionados para esta red está el módulo de radio frecuencia nRF24L01 (Nordic Semiconductor, 2008) y el microcontrolador STM32F030F4P6 (STMicroelectronics, 2019), que se han dispuesto para la comunicación a nivel de nodos hijos (NH) y el módulo ESP8266 (Espressif, 2018) y el microcontrolador STM32F103RC (STMicroelectronics, 2018) para los nodos padres (NP). Los microcontroladores seleccionados son de 32 bits de gama baja y media, están basados en un núcleo ARM, de capacidad de procesamiento entre 48 y 90 MIPS respectivamente y tienen suficientes recursos internos para controlar las señales de múltiples sensores/actuadores. El microcontrolador STM32F030F4P6 y el microcontrolador PIC de 8 bits 16F628A (Microchip, 2020), pueden utilizarse en la implementación de los nodos de red. Al ser ambos dispositivos de gama baja, bajo costo y reducido consumo de energía, pueden compararse teniendo en cuenta sus prestaciones, evidenciándose que el microcontrolador de 32 bits tiene mayor velocidad de procesamiento, mejores recursos internos y menor precio que el de 8 bits (Digikey, 2020). Una mayor capacidad de procesamiento en los microcontroladores permitirá ejecutar sin retardos significativos los algoritmos requeridos en un sistema multiagente.

La WSN propuesta en este trabajo, constituye el soporte para un sistema domótico basado en inteligencia artificial distribuida (sistemas multiagente), que fundamentalmente realizará tareas de automatización y control, monitoreo, procesamiento de información, toma de decisiones y la comunicación (actos de habla) entre agentes.

De forma general, el sistema puede albergar 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, permite 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 1 muestra la interacción entre la subred NP-NH (enlaces NP-

NH-NH de color azul y encerrados en círculo azul), y la subred NP-NP (enlaces entre los NP de color rojo).

La subred NP-NH usa enlaces de radiofrecuencia (RF) para su comunicación y se caracteriza por ser del tipo multisalto, lo cual tuvo especial atención debido a que se desarrolla una adaptación de esta técnica para que se ajuste a la red propuesta. 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 entre los nodos. Aunque los NH no pueden comunicarse entre sí para llevar a cabo una tarea, pueden servir de enlace para enviar mensajes a otros NH, superando así las limitaciones de alcance que pueda tener cada NH con su NP. Además de actuar como enlaces, los NH son los encargados de recoger información o de actuar sobre su entorno con la ayuda de sensores y actuadores, para luego enviar datos o recibir órdenes del NP, cuando este lo requiera.

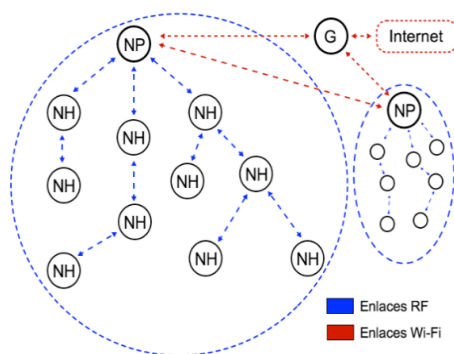


Figura 1. Arquitectura de la red propuesta.

La subred NP-NP, usa enlaces Wi-Fi para su comunicación y todos sus dispositivos poseen recursos y nivel de inteligencia similares, por lo que no requiere de un coordinador para la comunicación, de tal forma que todos los nodos pueden interactuar entre sí en función de los requerimientos o solicitudes. También, los nodos de esta subred (NP) tendrán la posibilidad de comunicarse con un gateway (puerta de enlace), el cual podrá subir la información de la red a un servidor ubicado en nivel superior o Internet. Esta última funcionalidad no será implementada en este trabajo, aunque gracias a la característica de escalabilidad de la red, puede extenderse a este tipo de comunicación.

En otros trabajos, como el de Magno *et al.*, 2015, orientado a un sistema de iluminación, la comunicación inalámbrica se realiza mediante una red ZigBee, que, aunque puede implementarse de forma sencilla, el costo de la red es elevado y la infraestructura no está preparada para procesar algoritmos complejos, como por ejemplo de inteligencia artificial. Aunque el protocolo Zigbee es ampliamente utilizado en aplicaciones domóticas (Nikoukar *et al.*, 2018), se eligió el módulo de NRF24L01 debido a su muy bajo costo con respecto a los dispositivos basados en el protocolo ZigBee (Fajriansyah *et al.*, 2016), por ejemplo, el costo del módulo Xbee S2C es, en promedio, 12 veces mayor que el módulo NRF24L01. Adicionalmente en el trabajo de Fajriansyah *et al.*, 2016, comparan experimentalmente ambos módulos, concluyendo en que los parámetros de velocidad de datos, estabilidad, precisión y tolerancia en el módulo NRF24L01 son mejores que el módulo Xbee. En la prueba de cobertura con un obstáculo y bajo consumo de energía, el

módulo Xbee supera al módulo NRF24L01 (Saha *et al.*, 2017). A pesar de estas ventajas del módulo Xbee con respecto al módulo NRF24L01, estas pueden ser superadas debido al uso de protocolos multisalto y la alimentación de los nodos sensores desde la red eléctrica, permitiendo implementar redes de bajo costo.

Villarrubia *et al.*, 2017, propone un Sistema Multi-Agente (MAS) para controlar el riego de cultivos agrícolas. Utiliza dos tipos de nodos: un nodo esclavo que mide las variables envía los datos al nodo maestro, el cual transmite los datos al agente inteligente que reside en el servidor web. La red conformada depende de la información que el servidor le proporcione, esto hace que pierda autonomía y sea dependiente de la web.

Una vez que se han analizado las características generales de la red, es importante considerar las funciones que debe cumplir la misma, y que se listan a continuación:

- Monitoreo de las variables medidas por los NH que provienen de los sensores utilizados en el sistema domótico.
- Realización de acciones de control en tiempo real considerando los valores de sensores y órdenes de usuarios.
- Introducción de hasta 254 nuevos NH por NP de forma dinámica.
- Mantenimiento de las rutas para el direccionamiento de los mensajes de la red.
- Registro de los NH adoptados por cada NP.
- Adaptabilidad frente a cambios de disposición de nodos en la red.

La cobertura de la red podría verse limitada debido a que las paredes de una vivienda actúan como obstáculos en las comunicaciones entre los elementos de red. Por esta razón se ha propuesto que la subred NP-NH sea del tipo multisalto, de tal forma que cada NH tenga la capacidad de retransmitir un mensaje encaminándolo hacia su destino, a través de él o de otros nodos. En la Figura 2, se muestra la distribución de NP y NH en una vivienda unifamiliar típica. La modificación de protocolos de estándares ya existentes como el 6LoWPAN (García, 2015), fue necesaria con el propósito de adaptarlos a las limitaciones del sistema basado en microcontroladores, puesto que para la red prototipo de este trabajo solo se pueden enviar mensajes con una longitud máxima de 32 bytes.

El protocolo AODV (Ad-Hoc On-Demand Vector) es un protocolo reactivo multisalto utilizado para el descubrimiento de ruta de difusión, estableciendo dinámicamente las entradas de una 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, debe verificar, en primer lugar, su tabla de enrutamiento para determinar si dispone de información actualizada para alcanzar el destino, (puede ser que la ruta expiró o es primera vez que envía a ese destino). De no tener información actualizada, inicia un proceso de descubrimiento de ruta, transmitiendo un mensaje “Solicitud de ruta” (RREQ - Route Request) a sus nodos vecinos. 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. Se ha considerado en este trabajo el uso del protocolo AODV debido a que presenta muy buenos resultados con respecto a otros protocolos multisalto (Benítez *et al.*, 2017), (Vidhya and Sasilatha,

2018). Más adelante, en la sección 3.1.1, se detalla la adaptación de este protocolo a microcontroladores de 32 bits. Los nodos del sistema pueden ser implementados en cualquier lugar de la vivienda, siempre y cuando se garantice una distancia de 12 metros entre nodos sensores sin línea de vista. Esto se debe a que cada NH tiene la capacidad de redireccionar los paquetes de datos al destino correspondiente. La distancia de 12 metros entre nodos sensores es objeto de análisis y pruebas en el apartado 5.

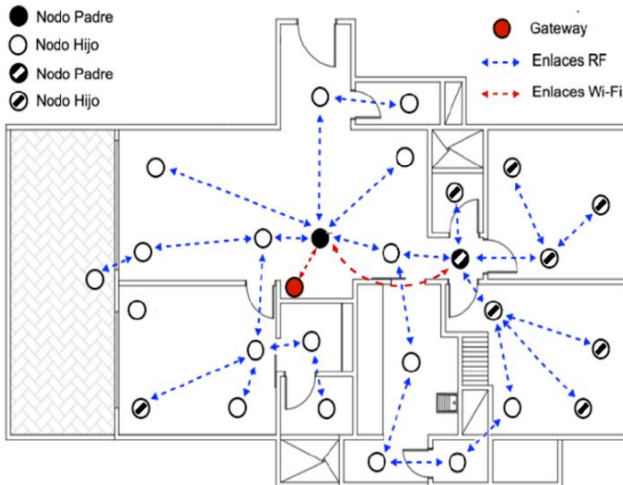


Figura 2. Organización de los nodos de la subred NP-NH en una casa.

La subred NP-NH cuenta con una topología en árbol. La selección de este tipo de topología se realiza considerando que es una de las más utilizadas y estables en el campo de las WSN bajo el estándar IEEE 802.15.4 (Yang, 2014). Aunque, esta subred no está regida estrictamente por este estándar, debido al tipo de transceptor de radio utilizado, sirve de guía para el diseño de la subred. La gestión de información entre los nodos de esta subred es del tipo maestro-esclavo, siendo el maestro el NP, y los esclavos los NH; de forma que, el maestro será el que determine en qué momento han de enviarse 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. La elección de este modo de gestión de información tiene como finalidad minimizar las colisiones de paquetes de datos en el medio inalámbrico y garantizar así una comunicación exitosa.

La subred NP-NP cuenta con una topología en malla, de modo que todos los NP se pueden comunicar entre sí, y el fallo en uno de ellos no afecte la normal operación de la red. La gestión de información será del tipo productor-consumidor (Rodríguez, 2011), de tal forma que en un momento determinado cada nodo puede ser un productor para emitir un mensaje broadcast (envío de información a una multitud de nodos receptores de manera simultánea) 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 se hace para garantizar que la red, especialmente los NP, tengan capacidad de actuar como agentes de un sistema multi-agente (MAS). Finalmente, cada NP tiene la capacidad de enviar la información recopilada por sus NH a un gateway o estación base para el manejo de dicha información fuera del área local de la red.

3. Descripción y funcionamiento de los nodos de la red

En este apartado se describe cómo están constituidos internamente los NP y NH y cómo actúan en la red.

3.1. Características de un nodo padre

Para el NP se han dispuesto las siguientes funciones:

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

Entre los componentes del NP se encuentran el Módulo nRF24L01, el módulo ESP8266 y el microcontrolador STM32F103RC. El módulo ESP8266 posee un microcontrolador de 32 bits Tensilica L106, de bajo consumo de energía, y 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, 2018). En la Figura 3 se observa el módulo ESP8266 y el módulo nRF24L01 en el nodo.

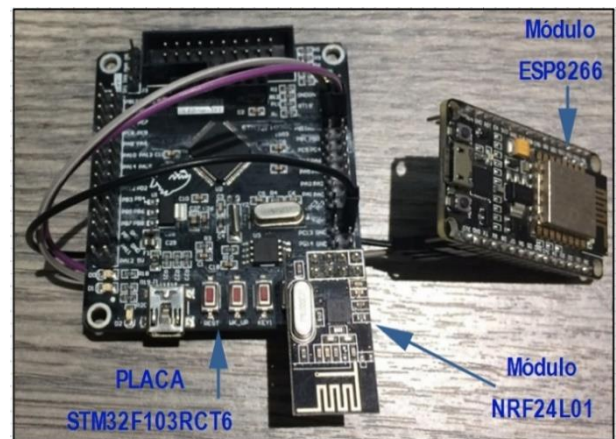


Figura 3. Módulo ESP8266 en el nodo padre.

Para observar los eventos y procesos que ocurren en el NP, y mostrar la información enviada por sus NH se desarrolla una interfaz gráfica de usuario (GUI), la cual se muestra en la Figura 4.



Figura 4. Interfaz gráfica de usuario desarrollada para el nodo padre.

En esta interfaz se pueden visualizar los valores de sus sensores, escribir sobre sus actuadores y determinar cuándo el NP realiza la lectura a sus NH. También permite determinar el tiempo utilizado en la transmisión, y conocer si se ha ejecutado el protocolo AODV para el descubrimiento de rutas.

3.1.1. Funcionamiento en la subred NP-NH

El funcionamiento general del NP en esta subred se puede apreciar en el diagrama de flujo de la Figura 5. Este proceso lo ejecuta el microcontrolador STM32F103RC.

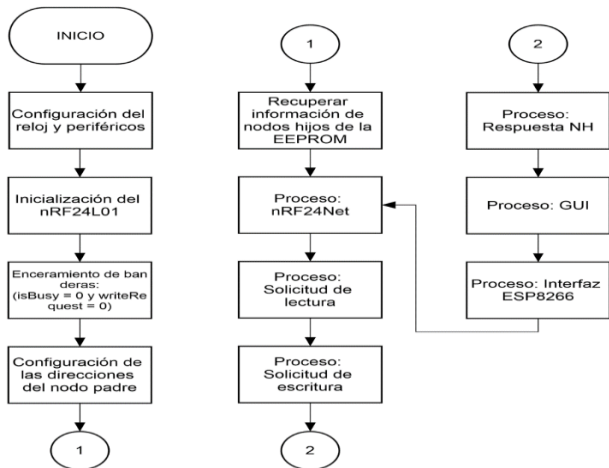


Figura 5. Funcionamiento general del nodo padre en la subred NP-NH.

El proceso “Solicitud de Lectura” mostrado en la Figura 5 se ocupa de realizar la lectura de los sensores que se encuentran en los NH, lo cual se explica a continuación:

Cada NP guarda una tabla donde se almacenan los datos de todos sus NH. De modo que, para este proceso, primero se obtienen los datos de un NH de la tabla y luego se verifica si realmente este nodo existe. Si el nodo no existe, el proceso termina. Si el nodo existe, entonces verifica si la aplicación está ocupada o no (en otro proceso de lectura o escritura); si la aplicación está ocupada, el proceso termina. Si la aplicación no está ocupada, entonces pasa a estarlo y se procede a enviar una solicitud de lectura al NH 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 NH.

El protocolo de descubrimiento de ruta (AODV) se ejecuta cuando no se recibe un ACK de un NH. Si se encuentra una ruta activa hacia el destino, se notifica a la GUI, y se limpia la bandera “isBusy” (usada para indicar que la aplicación está ocupada realizando otro proceso), y se vuelve a 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 intenta tres veces más; si fallan 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 y luego se procede a la lectura del siguiente nodo de la tabla.

El proceso “Solicitud de Escritura” cumple la función de enviar una solicitud para escribir en un determinado actuador de un NH. Primero se procede a leer las banderas del sistema “isBusy” y “writeRequest” (usada para indicar que se

realizará una solicitud de escritura, es 0 si no hay una solicitud de lectura). Para que se proceda a enviar una solicitud de escritura, la aplicación no debe estar ocupada (isBusy = 0) y no 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 NH señalado en la bandera “writeRequest”, luego se espera recibir un ACK. Si no se recibe el ACK, 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 encuentra una ruta, se notifica a la GUI y se resetean las banderas isBusy y writeRequest, y regresa a leer las banderas del sistema, dando por perdida 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 resetean las banderas del sistema, y se regresa a leer las banderas.

3.1.2. Funcionamiento en la subred NP-NP

El funcionamiento del NP en esta subred se puede visualizar en el diagrama de flujo de la Figura 6. Todo este proceso se lleva a cabo en el microcontrolador Tensilica L106, que inicia la comunicación UART con el microcontrolador STM32F103RC (encargado de la subred NP-NH). Si hay un mensaje entrante del microcontrolador se identifica el tipo de mensaje, el mismo puede ser de dos tipos: NewChild o Upload. El mensaje de tipo NewChild significa que hay nuevos NH en el NP, y la información de éstos se envía con este tipo de mensaje, al recibir este mensaje se agrega esta información a la tabla de NH del microcontrolador.

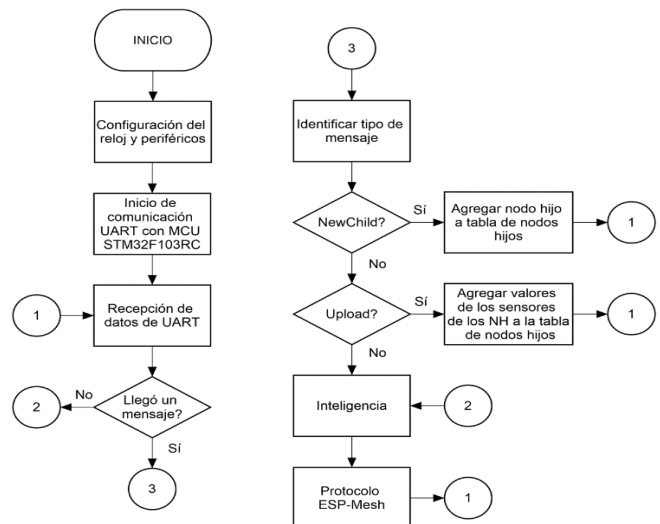


Figura 6. Funcionamiento del nodo padre en la subred NP-NP.

El mensaje de tipo Upload significa que los valores de los sensores de un NH han llegado al NP, y estos valores se envían con este tipo de mensaje, al recibir este mensaje se agregan dichos valores a la tabla de NH del microcontrolador.

3.2. Características de un nodo hijo

En este apartado se analiza el NH, el cual forma parte de la subred administrada por un único NP, que lee cada uno de los sensores con los que cuenta y escribe sobre sus actuadores

según lo necesite el NP, y también se comunica con otros NH para lograr que los mensajes lleguen a su destino.

Al NH se le han asignado las siguientes funciones:

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

La arquitectura propuesta para el NH se muestra en la Figura 7 y se caracteriza por ser de bajo costo y eficiente en términos de consumo de energía. Este nodo dispone de un microcontrolador de 32 bits de gama baja (STM32F030F4) que controla diversos sensores/actuadores. La comunicación con el NP se realiza a través del módulo nRF24L01.

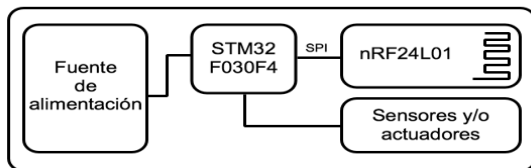


Figura 7. Componentes del nodo hijo.

Los sensores/actuadores son la razón de ser de estos nodos. Se trata de la interfaz que tiene el NH para conocer su entorno y actuar sobre él de acuerdo con la inteligencia de su NP. En la Figura 8 se puede observar un sensor digital de temperatura y humedad integrado en un NH.

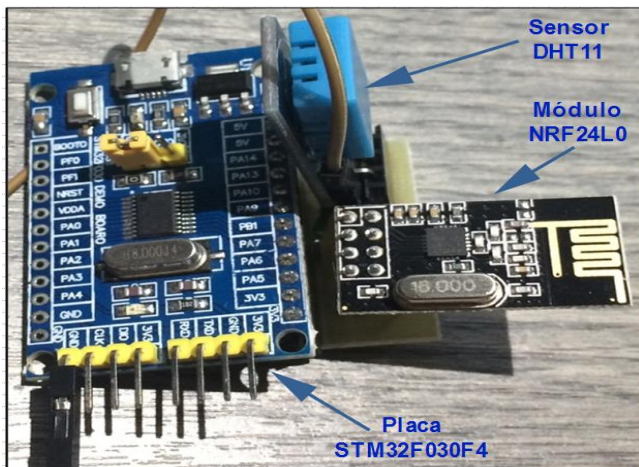


Figura 8. Sensor DHT en el nodo hijo desarrollado.

Se desarrolla una interfaz gráfica de usuario como se muestra en la Figura 9, que permite configurar la ubicación que tiene el NH dentro de la vivienda. También se puede desvincular un NH de su NP y visualizar los sensores y actuadores con los que cuenta.

El funcionamiento general del NH se puede apreciar en el diagrama de flujo de la Figura 10, donde el proceso “nRF24Net” se encarga de la recepción de mensajes transmitidos. Este proceso comienza mediante la recepción de datos por medio del transceptor nRF24L01. Si se identifica que ha llegado un mensaje, entonces se determina el tipo de mensaje, en caso contrario, el proceso se da por terminado.

El proceso “Solicitudes de NP” se encarga de procesar las solicitudes enviadas por el NP al NH. El proceso comienza buscando un mensaje en la cola de mensajes del Datagrama de Usuario Ligero (LUD, del inglés Light User Datagram), Si no hay mensajes sin procesar, el proceso termina. En caso

contrario, se verifica si el emisor es el NP, de no serlo el proceso se reinicia.

Para la subred NP-NH se han diseñado tres protocolos de comunicación, los cuales están basados en protocolos ya existentes de WSN. Todos los nodos de esta subred tendrán una única dirección o ID de 1 byte; donde el ID “0” está reservado para el NP de la subred, y el ID “255” está reservado para la dirección broadcast de todos los NH.

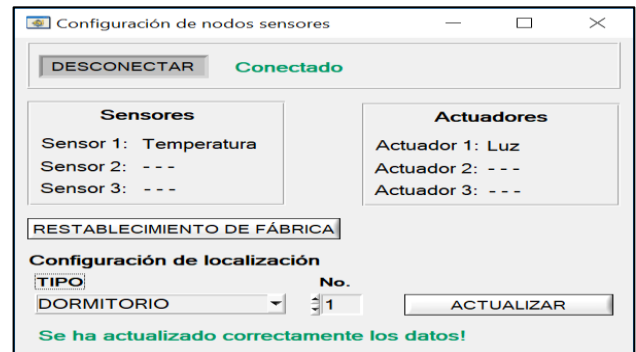


Figura 9. Interfaz gráfica de usuario desarrollada para el nodo hijo.

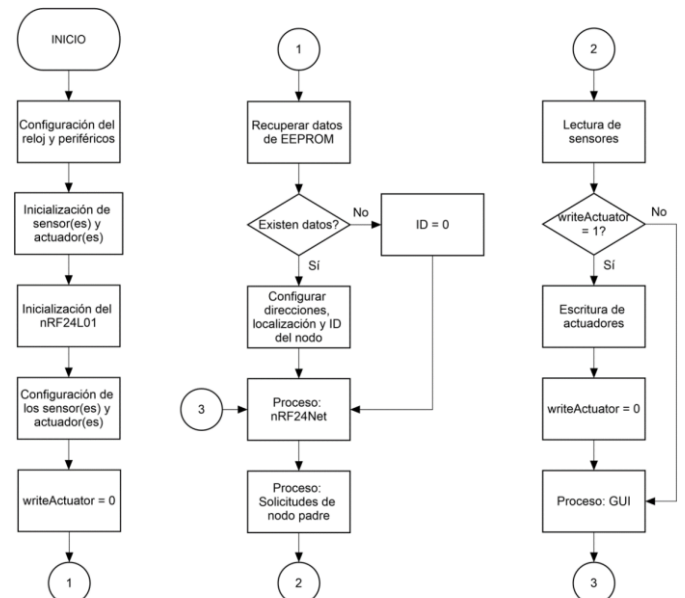


Figura 10. Funcionamiento general del nodo hijo.

4. Protocolos de red en la subred NP-NH

Debido a las características del transceptor de radio de esta subred (nRF24L01), la máxima longitud del paquete es de 32 bytes. Tomando en cuenta esta limitación, para cualquier comunicación en esta subred, todo paquete deberá contener la cabecera mostrada en la Tabla 1.

Tabla 1. Estructura del paquete de datos general de la subred NP-NH.

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

- Los campos de cabecera T, D, O, L y datos representan:
- T: Este byte indica el tipo del mensaje.
 - D: Este byte indica el ID del nodo destino del mensaje.
 - O: Este byte indica el ID del nodo origen del mensaje.
 - L: Este byte indica la longitud de los datos del paquete.
 - datos: Datos del paquete acorde al tipo del mensaje.

Se consideran los siguientes tipos de mensajes:

- NCM (Network Control Message): Mensaje de Control.
- PS (Parent Solicitation): Solicitud de Padre.
- PSR (Parent Solicitation Response): Respuesta de la Solicitud del Padre.
- RREQ (Route Request): Solicitud de ruta.
- RREP (Route Reply): Respuesta de ruta.
- LUD: Datagrama de Usuario Ligero.

4.1. Búsqueda del nodo padre

Como se puede ver en el funcionamiento de los NH en las secciones anteriores, la primera acción a realizar es encontrar a un NP que les asigne una ID única en la red de 1 byte, para lo cual siguen el protocolo que se muestra en la Figura 11, el cual está basado en el protocolo “Neighbor Discovery for IP versión 6” (Narten *et al.*, 2007).

Este protocolo permite que un NH pueda encontrar un NP disponible en la red, y que éste último lo adopte dándole una ID única en la nueva subred, para lo cual hace uso de los mensajes de tipo NCM (PS y PSR) mencionados anteriormente. La estructura de estos mensajes se puede observar en las Tablas 2 y 3.

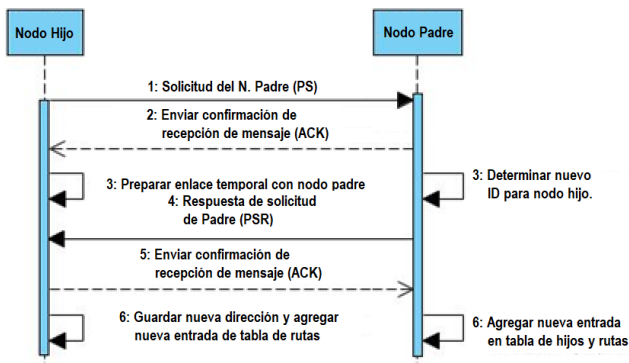


Figura 11. Protocolo para la búsqueda de un nodo padre.

Tabla 2. Estructura del paquete PS.

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

Tabla 3. Estructura del paquete PSR.

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

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

- En el paquete PS, los campos de no cabecera representan:
- NT: Tipo de mensaje NCM. Este campo tendrá el valor de 0xC6, valor de los mensajes de tipo NCM PS.
 - TID: ID temporal del NH para crear un enlace con el NP.
- En el paquete PSR, los campos de no cabecera son:
- NT: Tipo de mensaje NCM. Este campo tendrá el valor de 0xC5, valor de los mensajes de tipo NCM PSR.
 - DP: Dirección del NP.
 - NIH: Nuevo ID para el NH.

4.2. Descubrimiento de rutas

Con el fin de tener flexibilidad en la organización de los nodos en la subred, se hace 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 12, el cual está basado en el protocolo “Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing” (Perkins *et al.*, 2003). Las Tablas 4 y 5 muestran las estructuras de los mensajes RREQ y RREP utilizados en este protocolo.

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

- CS: Contador de saltos.
- RID: Identificador del RREQ.
- RD: Destino del RREQ.
- RDS: Número de secuencia del destino.
- RO: Origen del RREQ.
- ROS: Número de secuencia del origen.

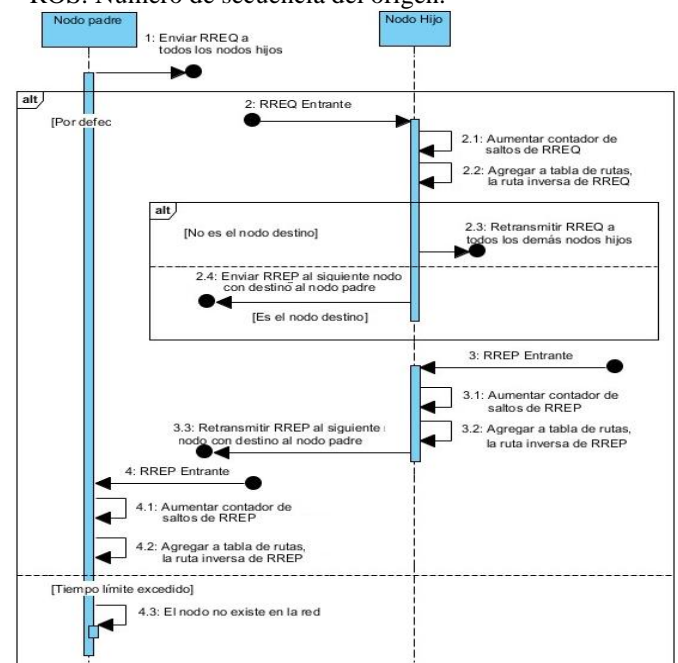


Figura 12. Descubrimiento de rutas.

Tabla 4. Estructura del paquete RREQ.

	Cabecera				NCM PSR					
BYTES	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	T	D	O	L	CS	RID	RD	RDS	RO	ROS

Tabla 5. Estructura del paquete RREP.

	Cabecera				NCM PSR			
BYTES	1	1	1	1	1	1	1	1
	T	D	O	L	CS	RD	RDS	RO

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

- CS: Contador de saltos.
- RD: Destino del RREP.
- RDS: Número de secuencia del destino.
- RO: Origen del RREP.

El procedimiento de este protocolo es el siguiente: cuando el NP requiere una ruta a un NH emite un RREQ broadcast a todos sus NH 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 RREQ, de modo que el RREP puede ser unicast desde el destino a lo largo de una ruta hasta el que originó el RREQ (Perkins *et al.*, 2003).

Los mensajes de interacción directa entre los NP y los NH se realizan bajo este tipo de mensaje LUD, 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).
- Solicitud de escritura (Write Request-WR).
- Respuesta de solicitud de escritura (Write Request Reply-WRR).
- Respuesta de solicitud de lectura (Read Request Reply-RRR).

4.3. Protocolos de comunicación NP-NP

Para la comunicación a bajo nivel entre los NP, se utiliza el protocolo ESP-Mesh (Espressif, 2016). Bajo este protocolo se puede formar una red de hasta 87 dispositivos, a una distancia de hasta 100 metros y cinco niveles de mallas de red. La comunicación en esta subred bajo este protocolo se observa en la Figura 13; los NP se pueden comunicar entre sí y comunicarse por un gateway que permita subir los datos a un servidor alojado en nivel superior o Internet.

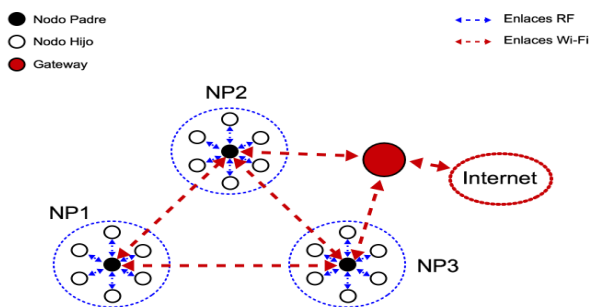


Figura 13. Comunicación NP-NP bajo el protocolo ESP-Mesh.

La comunicación de alto nivel entre los NP puede estar regida por cualquier protocolo de comunicación, 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 multi-agente (Hsieh and Lin, 2014).

5. Resultados

El desarrollo del firmware para los NP y NH, incluido la elaboración de librerías, ha llevado un esfuerzo y tiempo considerable, dado la mayor complejidad de los microcontroladores de 32 bits que disponen de una cantidad elevada de registros. Se ha elaborado una librería para controlar el módulo nRF24L01 y así poder incrementar su direccionamiento, puesto que, originalmente solo puede conectarse a seis nodos. Se adaptó a los microcontroladores de 32 bits la librería original del protocolo AODV, limitando 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 bits.

Las pruebas experimentales del prototipo se describen en los siguientes acápites y permiten determinar el cumplimiento

de las funciones definidas en el trabajo. En la Figura 14 se muestran los NP y los NH implementados que se utilizan para llevar a cabo las pruebas del sistema.

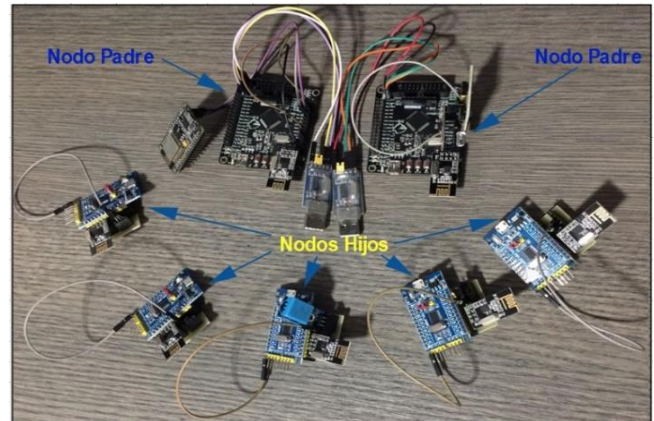


Figura 14. Nodos padres y nodos hijos implementados.

5.1. Prueba del protocolo AODV

Esta prueba se desarrolla con el objetivo de determinar el tiempo de descubrimiento de rutas hacia los NH. Las variables que intervienen son el número de saltos y el tiempo y se utilizan cinco NH ubicados aleatoriamente en una vivienda, cuya distribución se mostró en la Figura 2. El NP conoce que existen cinco NH, pero no conoce la ruta para lograr la comunicación con ellos. Al poner la red en funcionamiento, el NP comienza a ejecutar el protocolo AODV en cada uno de los nodos, para así encontrar una ruta activa y estable; la GUI diseñada se encarga de registrar el tiempo transcurrido hasta que la red se estabiliza y el tiempo que demora en completar el descubrimiento de rutas.

Los tiempos de duración obtenidos en el descubrimiento de rutas se pueden observar en la Tabla 6, concluyendo que el mayor tiempo que demora el protocolo AODV en ejecutarse con éxito es de 94 ms, mientras que el menor es de 59 ms. No obstante, estos tiempos dependen también de cuánto tráfico existe en la red en el momento de ejecución del protocolo.

Tabla 6. 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

En el trabajo de Benítez *et al.*, 2017, se realizan modificaciones al protocolo original a fin de mejorar la vida útil de los nodos, pero no prestan atención al retardo originado por el protocolo multsalto en las comunicaciones, y su estudio se limita a simulaciones. Similar al caso anterior, Mezghani and Abdellaoui, 2015, simulan un sistema basado en la topología Khalimsky (Abdellaoui *et al.*, 2014), que permite reducir la ruta entre nodos en un 25% con respecto al protocolo AODV, pero ejecutan un algoritmo complejo que resultaría pesado de procesar para un microcontrolador. Otro trabajo es el de Baroudi *et al.*, 2019, que utiliza un algoritmo genético para buscar la ruta más apropiada, logrando una mejora del 28% sobre el protocolo AODV.

Al comparar el tiempo de respuesta del protocolo AODV obtenido en este trabajo con estudios similares, se observa que este tiempo se encuentra dentro de rangos aceptables en cuanto a los requerimientos de un sistema domótico. Por ejemplo, el tiempo promedio que obtuvieron Bondorf and Jens, 2010, fue de 90 ms, siendo este valor un 15% mayor al promedio obtenido en el nuestro que fue de 76.5 ms

5.2. Prueba de tiempo de respuesta de solicitudes de lectura

Esta prueba se desarrolla con el objetivo de determinar el tiempo de respuesta de las solicitudes de lectura enviadas a los NH. Las variables que intervienen en la misma son el número de saltos y el tiempo. Se utilizan cinco NH; el NP ejecuta las solicitudes de lectura a cada uno de los nodos, esperando recibir respuesta de ellos. El tiempo de respuesta de una solicitud de lectura comienza desde que el NP envía una solicitud de lectura y se recibe la respuesta desde el NH. Este tiempo se determina con la ayuda de la interfaz gráfica de usuario desarrollada para el NP. La prueba finaliza cuando se alcanzan 2000 solicitudes exitosas de lectura. Se ha estimado el envío de 2000 solicitudes en las pruebas realizadas, considerando que con ese número de paquetes enviados el resultado alcanzado es estable, y, además, el número es mayor a los paquetes enviados en otros trabajos (Vidhya and Sasilatha, 2018), (Saravanan et al., 2018), (Mostafaei, 2019).

De las solicitudes enviadas se identifican que 1019 se efectúan 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 el tiempo de respuesta de los NH se ve afectado por la cantidad de saltos que debe recorrer el mensaje hasta su destino, se realizan diferentes análisis para conocer su comportamiento.

La Figura 15 muestran el tiempo de respuesta a una solicitud de lectura con rutas de 1 salto, obteniendo un tiempo promedio de respuesta de 199.92 μs. El mayor valor de tiempo que tarda un NH en responder es de 563 μs, mientras que el menor es de 191 μs.

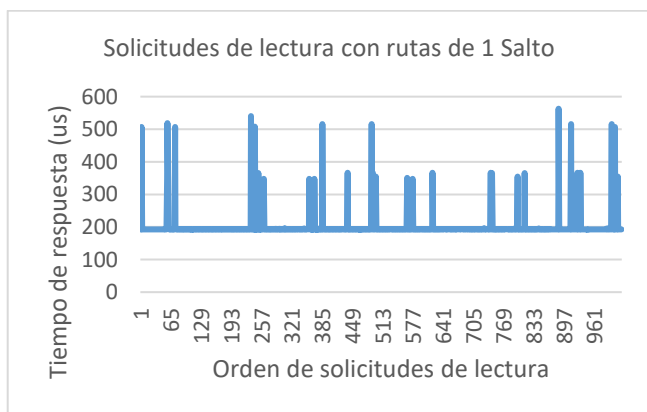


Figura 15. Solicitudes de lectura con rutas de 1 salto.

También se realizaron las pruebas del tiempo de respuesta a una solicitud de lectura con rutas de 2 saltos, obteniendo un tiempo promedio de respuesta de 226.89 μs. El mayor tiempo que tarda un NH en responder es de 916 μs y el menor tiempo es de 192 μs. En el caso del tiempo a una solicitud de lectura con rutas de 3 saltos, el tiempo promedio de respuesta es de 292.30 μs, siendo el mayor tiempo que tarda un NH en responder de 909 μs y el menor de 292.30 μs. Para el caso del tiempo a una solicitud de lectura con rutas de 4 saltos, el

tiempo promedio de respuesta es de 806.50 μs, siendo el mayor tiempo de 985 μs y el menor de 193 μs.

La Figura 16 muestra resultados de diferentes estudios de WSN, donde los valores promedios de los tiempos de respuesta de 1 salto varían en dependencia de la capacidad de la red. En el eje horizontal, la letra A representa la respuesta promedio obtenida en este trabajo, la letra B es el resultado logrado por Vidhya and Sasilatha, 2018, la C fue obtenida por Saravanan et al., 2018, la D por Jaggi and Wasson, 2016 y la E por Mostafaei, 2019. Como puede apreciarse en la Figura 16, solo el resultado del trabajo C logra un tiempo inferior al obtenido en nuestro trabajo.

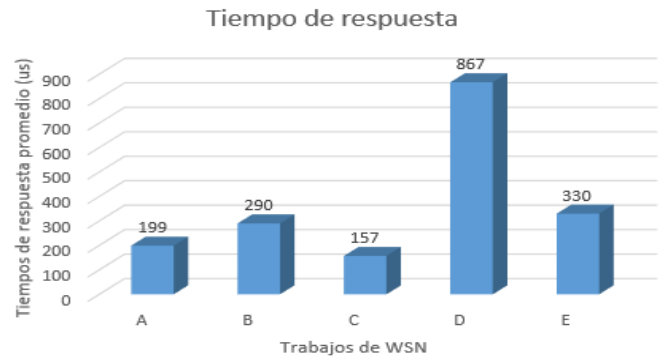


Figura 16. Comparativa de tiempos de respuesta con otros trabajos.

Otras investigaciones orientadas a WSN muestran valores elevados del tiempo de respuesta en las comunicaciones. Es el caso de Medina, 2017, que obtuvo un valor de 9.5 ms; en el trabajo de Baroudi et al., 2019, se obtuvo un tiempo de 1.7 ms y los autores Mezghani and Abdellaoui, 2015, reportan un tiempo de 4,95 ms. Cabe indicar que en estos estudios se procesan algoritmos complejos con características especiales de las redes simuladas.

Considerando el valor 199.92 μs, como tiempo promedio de respuesta utilizando cinco NH, se puede extrapolar al número máximo de nodos hijos permitidos en la subred, que es de 254, obteniendo un valor promedio de 10.16 ms. Si se consideran tiempos adicionales debidos a solicitudes de escritura (1.76 ms), o solicitudes fallidas, el tiempo de respuesta de las solicitudes de lectura bajo condiciones máximas de operación no superará los 20 ms. El resultado obtenido es mejor que el que declara Saravanan et al., 2018, el cual utiliza cinco nodos experimentales y obtiene un tiempo de respuesta de 290 ms.

Según (López, 2014), 200 ms es un tiempo bueno para un sistema domótico, que inclusive pueden llegar hasta 1 segundo. (Posadas & Poza, 2009) considera que el tiempo de respuesta depende de los escenarios del sistema domótico, pero en general no son exigentes en cuestiones de tiempo ni de volumen de información. Considerando los valores de tiempos obtenidos y dado que no se han encontrado otros datos en la literatura revisada, se considera que, para un sistema domótico inteligente, un tiempo de 100 ms es adecuado y suficiente para cumplir eficientemente las tareas asignadas. El tiempo de respuesta obtenido en este trabajo es menor a 20 ms, por lo que el uso de los componentes de bajos costo ha permitido una baja latencia.

5.3. Prueba de cantidad de solicitudes de lecturas perdidas

Esta prueba se desarrolla con el objetivo de determinar la precisión en la comunicación, considerando la cantidad de

solicitudes de lecturas (SL) perdidas o sin respuesta en la red. Las variables que intervienen en la misma son el número de solicitudes de lecturas enviadas y el número de solicitudes de lecturas perdidas. Con un total de cinco NH, se deja a la red operar hasta que se consigan 2000 solicitudes de lecturas exitosas. En este proceso, se registra la cantidad de solicitudes de lecturas que se perdieron en el canal analámbico, o no tuvieron respuesta.

Como resultados de esta prueba se tiene el envío de 2057 solicitudes de lecturas, de las cuales 2000 llegaron a su destino y 57 se perdieron o no tuvieron respuesta. A partir de estos valores se puede determinar el error relativo en la precisión, obteniendo tan solo un 2.77%, frente a un 97.22% de precisión en la transmisión.

La Figura 17 recoge un análisis comparativo de diferentes estudios de WSN, mostrando los valores de porcentajes de solicitudes entregadas. Los resultados de nuestro trabajo corresponden a la letra A, el por ciento de la letra B lo establecen Vidhya and Sasilatha, 2018, los de la letra C corresponden a Saravanan *et al.*, 2018, los de la letra D a Wadhwa *et al.*, 2016, los de la letra E es el resultado obtenido por Jaggi and Wasson, 2016, los de la letra F lo obtiene Medina, 2017 y la letra G corresponde al porcentaje de solicitudes entregadas en la investigación de Mostafaei, 2019.

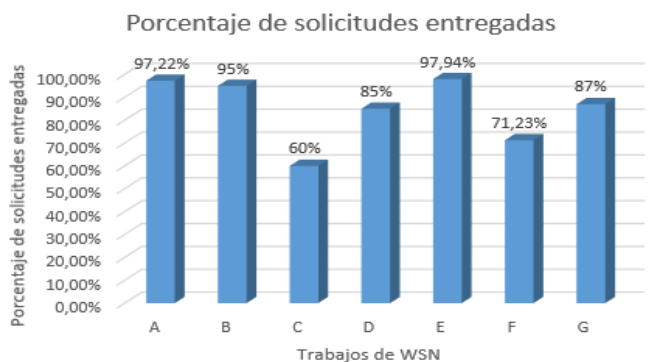


Figura 17. Comparativa de solicitudes entregadas con otros trabajos.

Como se aprecia en la Figura 17, los porcentajes de entrega de solicitudes de este trabajo son elevados, sin considerar que la mayoría de los trabajos consultados son simulaciones. Los resultados obtenidos del número de solicitudes entregadas muestran que los algoritmos y la arquitectura utilizada son válidos en términos de eficiencia de solicitudes entregadas y una alta precisión en las comunicaciones.

5.4. Prueba del tiempo de respuesta de solicitudes de escritura

El objetivo de esta prueba es determinar el tiempo de respuesta de las solicitudes de escritura enviadas a los NH. Las variables que intervienen en la misma son el número de saltos y el tiempo.

En este experimento se contó con un NP y tres NH, donde uno de estos últimos fue forzado a trabajar con una ruta de 2 saltos. Las solicitudes de escritura se enviaron manualmente a través de la GIU del NP, y con la ayuda de esta se obtuvo el tiempo de respuesta de cada solicitud. En esta prueba se enviaron 25 solicitudes de escritura a los nodos con rutas de 1 salto y otras 25 con rutas de 2 saltos (25 muestras proporcionan valores promedios suficientemente estables). La

Figura 18 muestra el tiempo de respuesta obtenido en esta prueba para rutas de 1 salto; para dos saltos se muestran solo los valores.

Para las solicitudes de escritura con rutas de 1 salto, se obtiene un tiempo promedio de respuesta de 1762.52 μ s. El mayor valor de tiempo que tarda un NH en responder es de 1817 μ s, mientras que el menor corresponde a 1715 μ s.

En el caso de las solicitudes de escritura con rutas de 2 saltos, se obtuvo un tiempo promedio de respuesta de 36684.20 μ s, mientras que el mayor tiempo que tarda un NH en responder es de 43580 μ s y el menor tiempo es de 29770 μ s.

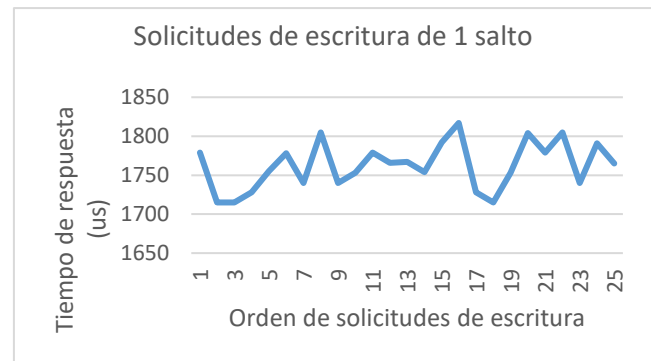


Figura 18. Solicitudes de escritura con rutas de 1 salto.

En base a estos resultados, se puede notar que el tiempo de respuesta a una solicitud de escritura con rutas de 2 saltos es mucho mayor, aproximadamente 20 veces, que el tiempo de respuesta con solicitudes de rutas de 1 salto. Esta diferencia se debe 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.

5.5. Prueba de distancia de alcance

Esta prueba se desarrolla con el objetivo de determinar el alcance máximo de comunicación entre nodos cuando existen obstáculos de por medio. Para este caso de estudio, serán las paredes de bloque de la vivienda, los obstáculos entre nodos. Las variables que intervienen en la misma son la distancia entre nodos y el número de solicitudes fallidas. La prueba de alcance se realiza con la ayuda de un solo NP y un solo NH. Se envían 100 solicitudes de lectura a 10 distancias diferentes sin línea de vista, y con la GIU del NP se registra la cantidad de solicitudes de lectura que no llegaron a su destino.

Los resultados de esta prueba están recogidos en la Tabla 7, la cual muestra la relación de la distancia entre los nodos y el número de solicitudes fallidas. Con estos resultados se identifica que, a una distancia máxima de 12 metros entre nodos, aunque exista una pared de obstáculo, se asegura una comunicación eficiente, es decir, sin solicitudes fallidas.

Tabla 7. 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

La prueba de alcance demuestra que el sistema puede trabajar en áreas grandes, siempre que la distancia entre nodos no sea mayor a 12m. Además, las WSN para sistemas domóticos no necesitan grandes distancias de alcance si cuentan con una comunicación de multisaltos. El trabajo de Hong *et al.*, 2007, analiza una red WSN domótica y cuenta con nodos cuyo alcance es de 10m y en el trabajo de Escribano, *et al.*, 2011, consiguen distancias entre 10 y 15 metros.

5.6. Prueba de adopción de nodos hijos

Esta prueba se desarrolla con el objetivo de determinar la adopción dinámica de NH por parte de un NP. Las variables que intervienen son la cantidad de NH dispuestos en la red y el número de NH adoptados por el NP. Para esta prueba se dispone de cinco NH y un NP. El NP inicialmente no conoce a ninguno de los NH, y debe adoptarlo para hacerlos parte de su subred.

En esta prueba se identifican los cinco NH de la red, con lo que se determina que el NP es capaz de adoptar los cinco NH. Este número de NH no es el máximo que puede administrar el NP; puesto que cada NP podría adoptar 254 NH. Aunque por motivos económicos y de tiempo, no fue posible demostrar experimentalmente lo anterior, se debe tener en cuenta que, a mayor cantidad de nodos, mayor será el tiempo del ciclo de trabajo, disminuyendo así la frecuencia con que se actualizan los datos de los NH con el NP. También es de indicar que además de la adopción de los NH, el NP puede realizar cambios en la configuración de los NH, para que se ajusten a los requerimientos del sensor o actuador que tenga a cargo. Si durante la adopción de NH, el sistema usa saltos, se incrementa el tiempo de adopción. En este caso se toma un tiempo de 292 ms para descubrir la ruta y de 293 μ s, para realizar la adopción.

De los trabajos de investigación consultados, la mayor parte de trabajos analizados se limitan al uso de simuladores en computadora, donde no es una restricción el número de nodos. Uno de los trabajos que realizan experimentos es el Bondorf and Jens, (2010), donde la subred puede alcanzar hasta 223 nodos. En el caso de nuestro trabajo se pueden conectar hasta 254 nodos en la subred NP-NH, lo cual permite cubrir los requerimientos de un sistema domótico en una vivienda unifamiliar, tal como la que se había mostrado en la Figura 2.

6. Conclusiones

Se describe el diseño e implementación de una red de sensores inalámbricos orientada a aplicaciones domóticas, donde se logra adaptar exitosamente el protocolo multisalto AODV a microcontroladores de 32 bits, permitiendo extender el área de cobertura de la red. Este protocolo aumenta ligeramente el tiempo de respuesta entre nodos en aproximadamente 30 μ s sin afectar la efectividad del sistema. En las pruebas experimentales se logró un alcance sin línea de vista de 12 metros entre nodos sensores, que sumado a la extensión lograda por el protocolo AODV, garantiza una cobertura total del área de una vivienda unifamiliar.

La red se configura a velocidades moderadamente bajas (250 Kbps), para garantizar la integridad y seguridad de los datos, reflejada en una alta precisión lograda en las pruebas

de comunicación realizadas. La prueba del protocolo AODV demuestra que el sistema puede adaptarse a cambios de desempeño de los nodos de la red y estabilizarse en tiempos reducidos además de incrementar la escalabilidad de la red.

El uso de componentes de muy bajo costo reduce significativamente el costo de los nodos de red, aunque se incrementa la dificultad en la programación, pero eleva la capacidad de procesamiento, permitiendo la ejecución de algoritmos de inteligencia artificial y operaciones matemáticas complejas en tiempos muy cortos, garantizando de esta forma, una baja latencia del sistema. Los resultados logrados son comparables con los obtenidos en otros trabajos de investigación, y en algunos casos, se obtiene mayor cobertura de red y un tiempo de respuesta menor.

La arquitectura de red propuesta permite disminuir las colisiones de mensajes en el canal inalámbrico, mejorar los tiempos de respuesta de la red e incrementar la flexibilidad frente a cambios de organización física de los nodos sensores.

Finalmente, la red propuesta en el trabajo puede evolucionar a una red de agentes inteligentes, aunque para ello será necesario añadir otras funciones y algoritmos de inteligencia artificial al NP, que le permita comportarse como un agente inteligente y conformar un sistema multi-agente.

Referencias

- Ahmad, A., Roslan, M. F., & Amira, A., 2017. Throughput, latency and cost comparisons of microcontroller-based implementations of wireless sensor network (WSN) in high jump sports. In AIP Conference Proceedings (Vol. 1883, No. 1, p. 020010). AIP Publishing.
- Abdellaoui, M., Gargouri, R., Mezghani, M., 2014. Optimization of WSNs Flooding Rates by Khalimsky Topology. Transactions on Networks and Communications, 2(6), 25-38.
- Al-Hajja, Q. A., Al-Qadeeb, H., & Al-Lwaimi, A., 2013. Case Study: Monitoring of AIR quality in King Faisal University using a microcontroller and WSN. Procedia Computer Science, 21, 517-521.
- Asencio, G., Maestre, J., Escaño, J., Martín Macareno, C., Molina, M., Camacho, E., 2011. Interoperabilidad en Sistemas Domóticos Mediante Pasarela Infrarrojos-ZigBee. Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial 8(4), 397-404. DOI:10.1016/j.riai.2011.09.002
- Baroudi, U., Bin-Yahya, M., Alshammari, M., Yaqoub, U., 2019. Ticket-based QoS routing optimization using genetic algorithm for WSN applications in smart grid. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 10(4), 1325-1338.
- Belagali, R., Anusha, A. M., Sangulagi, P., 2015. Energy-Efficient Secure Routing and Aggregation in Military Sensor Network using Multi-Agent Approach. In Applied and Theoretical Computing and Communication Technology (iCATecT), 2015 International Conference on 286-292. IEEE. DOI: 10.1109/ICATCCT.2015.7456897
- Benítez, J. D., Sosa, E. O., Godoy, D. A., Belloni, E. A., Favret, F., Bareiro, H., Urdinola, R., Olivera, M., 2017. Ampliando la Vida Útil de las WSN por Medio de los Protocolos de Ruteo, Modificación de AODV. In XIX Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación (WICC 2017, ITBA, Buenos Aires). URL: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/61567>
- Bondorf, S., Jens, B. S., 2010. Statistical response time bounds in randomly deployed wireless sensor networks. In Local Computer Networks (LCN). IEEE 35th Conference on 340-343. IEEE. DOI: 10.1109/LCN.2010.5735738
- Campamá, D. S., 2012. Sistema operativo para redes inalámbrica de sensores. Tesis de maestría, Pontificia Universidad católica de Chile. URL: <https://repositorio.uc.cl/handle/11534/1723>
- Di Nisio, A., Di Noia, T., Carducci, C. G. C., & Spadavecchia, M., 2016. High dynamic range power consumption measurement in microcontroller-based applications. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 65(9), 1968-1976.
- Escribano, J., García, A., de la Fuente, M., 2011. Monitorización de la Condición Física de Personas en Espacios Confinados Mediante Etiquetas RFID con Sensores y Redes Inalámbricas Eficientes. Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial 8(4), 371-384.

- Espressif Systems, 2018. ESP8266 Non-OS SDK. Version 3.0. URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/2c-esp8266_non_os_sdk_api_reference_en.pdf
- Espressif, 2016. ESP8266 Mesh User Guide. Version 1.2. URL: <https://docplayer.net/33922006-Esp8266-mesh-user-guide.html>
- Fajriansyah, B., Ichwan, M., & Susana, R., 2016. Evaluasi Karakteristik XBee Pro dan nRF24L01 sebagai Transceiver Nirkabel. ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, 4(1), 83.
- Fischione, C., 2014. An Introduction to Wireless Sensor Networks. Royal Institute of technology. Draft, version 1.8. URL: https://www.kth.se/social/files/5431a388f276540a05ad2514/An_Introduction_WSNS_V1.8.pdf
- García, D., 2015. Estudio de 6loWPAN para su aplicación a Internet de las Cosas. Trabajo de fin de grado. URL: <https://riull.uil.es/xmlui/bitstream/handle/915/945/Estudio+de+6loWPAN+para+su+aplicacion+a+Internet+de+las+Cosas.pdf?sequence=1>
- 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. IEEE Transactions on Consumer Electronics 53(3), 945-951. DOI: 10.1109/TCE.2007.4341570
- Hsieh, F. S., Lin, J. B., 2014. A multiagent approach for managing collaborative workflows in supply chains. In Proceedings of the 2014 IEEE 18th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD) 71-76. IEEE. DOI: 10.1109/CSCWD.2014.6846819
- Jaggi, S., and Wasson, E., 2016. Enhanced OLSR Routing Protocol Using Link-Break Prediction Mechanism for WSN. Industrial Engineering & Management Systems, 15(3), 259-267.
- Kailas, A., Cecchi, V., & Mukherjee, A., 2012. A survey of communications and networking technologies for energy management in buildings and home automation. Journal of Computer Networks and Communications, 2012(932181), 1-6. DOI: 10.1155/2012/932181.
- Kelly, S. D. T., Suryadevara, N. K., Mukhopadhyay, S. C., 2013. Towards the Implementation of IoT for Environmental Condition Monitoring in Homes. IEEE Sensors Journal 13(10), 3846-3853. DOI: 10.1109/JSEN.2013.2263379
- Li, M., Lin H. J., 2015. Design and Implementation of Smart Home Control Systems Based on Wireless Sensor Networks and Power Line Communications. IEEE Transactions On Industrial Electronics 62(7), 4430-4442. DOI: 10.1109/TIE.2014.2379586
- Liao, C., Zhu, K., Tang, J., Zhang, S., 2016. Wireless Sensor Network Performance Research for LEACH Based on Multi-Agent Simulation. IEEE International Conference on Agents (ICA) 98-99. IEEE. DOI: 10.1109/ICA.2016.031
- López Torres, V. 2014. Diseño de un modelo de red doméstica libre basada en componentes OpenDomo para aplicación a un pequeño hotel.
- 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. IEEE Sensors Journal 15(5), 2963-2973. DOI: 10.1109/JSEN.2014.2383996
- Manda, S., Shukla, Y., Shrivastava, K., Patil, T. B., & Sawant-Patil, S. T., 2018. A Literature Survey on Wireless Sensor Network in Home Automation Based on Internet of Things.
- Medina, C., 2017. Control de Congestión en Redes Inalámbricas de Sensores. Tesis de maestría, Pontificia Universidad Javeriana. Bogota - Colombia.
- Mezghani, M., Abdellaoui, P., 2015. WSN intelligent communication based on Khalimsky theory using multi-agent systems. In 2015 SAI Intelligent Systems Conference (IntelliSys) (pp. 871-876). IEEE.
- Microchip, 2020. URL: <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/PIC16F628A>
- Mostafaei, H., 2019. Energy-efficient algorithm for reliable routing of wireless sensor networks. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 66(7), 5567-5575.
- Narten, T., Nordmark, E., Simpson, W., Soliman, H., 2007. Neighbor Discovery for IP version 6 (IPv6). RFC 4861, DOI 10.17487/RFC4861.
- Nikoukar, A., Raza, S., Poole, A., Güneş, M., & Dezfouli, B., 2018. Low-power wireless for the internet of things: Standards and applications. IEEE Access, 6, 67893-67926.
- Nordic Semiconductor. (2008). nRF24L01 Single Chip 2.4GHz Transceiver. URL: <https://www.nordicsemi.com/DocLib?Product=nRF24>
- Núñez, José Ricardo et al., 2019. Metodología de diagnóstico de fallos para sistemas fotovoltaicos de conexión a red. Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial, [S.l.], v. 17, n. 1, p. 94-105. <https://doi.org/10.4995/riai.2019.11449>
- Núñez, J. R., Benítez, I.F., Rodríguez, A., Díaz, S., Oliveira, D., 2019. Tools for the implementation of a SCADA system in a desalination process. IEEE Latin America Transactions, 17(11), 1858-1864. DOI: 10.1109/TLA.2019.8986424
- Paavola, M., Leiviska, K., 2010. Wireless Sensor Networks in Industrial Automation. In Factory Automation. InTech. DOI: 10.5772/9532.
- Peñín, P., Díaz, A., Medina, J., Sánchez P., 2017. High-Level Design of Wireless Sensor Networks for Performance Optimization Under Security Hazards. ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN) 13(3), 19. DOI: 10.1145/3078359.
- Perkins, C., Belding, E., Das, S., 2003. Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing. (No. RFC 3561). DOI: 10.17487/RFC3561
- Posadas Yagüe, J. L., & Poza Luján, J. L. (2009). Revisión de las arquitecturas de control distribuido. URL: <https://riunet.upv.es/handle/10251/6407>
- Qin, J., Fu, W., Gao, H., Xing W., 2016. Distributed k-Means Algorithm and Fuzzy c-Means Algorithm for Sensor Networks Based on Multiagent Consensus Theory. IEEE transactions on cybernetics, 47(3), 772-783. DOI: 10.1109/TCYB.2016.2526683.
- Randhawa, S., 2014. Research Challenges in Wireless Sensor Network: A State of the Play. Conference Proceeding of National Conference of Science, Engineering y Management in Education and Research. arXiv preprint arXiv:1404.1469v1 [cs.NI]
- Rawat, P., Singh, K. D., Chaouchi, H., Bonnin, J. M., 2014. Wireless sensor networks: A survey on recent developments and potential synergies. The Journal of Supercomputing 68(1), 1-48. DOI:10.1007/s11227-013-1021-9
- Rodríguez, A., 2011. Sistemas SCADA. Tercera Edición. Marcombo: Barcelona. ISBN: 978-8426717818.
- Saha, Himadri & Mandal, Shashwata & Mitra, Shinjan & Banerjee, Soham & Saha, Urmi., 2017. Comparative Performance Analysis between nRF24L01+ and XBEE ZB Module Based Wireless Ad-hoc Networks. International Journal of Computer Network and Information Security. 9, 36-44. 10.5815/ijcnis.2017.07.05.
- Saravanan, S., Poovazhaki, R., Shanker, N., 2018. Cluster Topology in WSN with SCPS for QoS. Wireless Personal Communications, 99(3), 1295-1314.
- STMicroelectronics, 2018. STM32F103xC STM32F103x, STM32F103xE. DS5792 Rev 13. URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f103rc.pdf>
- STMicroelectronics, 2019. STM32F030x4 STM32F030x6 STM32F030x8 STM32F030xC. DS9773 Rev 4. URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f030f4.pdf>
- Snigdha, I., & Gupta, N. 2016. Quality of service metrics in wireless sensor networks: A survey. Journal of The Institution of Engineers (India): Series B, 97(1), 91-96.
- Suárez, A., and Núñez, J. R., 2019. 1D Convolutional Neural Network for Detecting Ventricular Heartbeats. IEEE Latin America Transactions, 17(12), 1970-1977. DOI: 10.1109/TLA.2019.9011541.
- Sutagundar, A., Bennur, V., Anusha, A., Bhanu, K., 2016. Agent Based Fault Tolerance in Wireless Sensor Networks. 2016 International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT) 1, 1-6. IEEE.
- Valencia, G., Núñez, J., Vanegas, M., 2020. Data set on wind speed, wind direction and wind probability distributions in Puerto Bolívar-Colombia. Data in Brief, 27, 104753. DOI: 10.1016/j.dib.2019.104753
- Vidhya, S., Sasilatha, T., 2018. Secure Data Transfer Using Multi Layer Security Protocol with Energy Power Consumption AODV in Wireless Sensor Networks. Wireless Personal Communications, 103(4), 3055-3077.
- Villarrubia, G., De Paz, J., De La Iglesia, D., Bajo, J., 2017. Combining Multi-Agent Systems and Wireless Sensor Networks for Monitoring Crop Irrigation. 17(8), 1775. DOI: <https://doi.org/10.3390/s17081775>
- Wadhwa, L., Deshpande, R., Priye, V., 2016. Extended shortcut tree routing for ZigBee based wireless sensor network. Ad Hoc Networks, 37, 295-300.
- Yang, S.H., 2014. Wireless Sensor Network. Londres, Reino Unido: Springer. ISBN 978-1-4471-5505-8.
- Yu, K., Xie, Z., Qian, J., y Jin, G., 2013. The Implementation of Electronic Intelligent Tag System Based on Wireless Sensor Network. Communications and Network 5(01), 39. Doi:10.4236/cn.2013.51B010.
- Zhang, Z., Mehmood, A., Shu, L., Huo, Z., Zhang, Y., & Mukherjee, M., 2018. A survey on fault diagnosis in wireless sensor networks. IEEE Access, 6, 11349-11364.