







Wireless communication system between Environmental Sensor Nodes

C. Morales–Morales¹ , E.E. Salgado-Lampart² , A. González-Lorence¹ , M. Castro-Bello² , A.L. Mondragón-Solís³ , M.A. Farias-Padilla⁴ 

¹Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de San Juan del Río, Querétaro, México.
cornelio.mm@sjuanrio.tecnm.mx, armida.gl@sjuanrio.tecnm.mx

²Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Chilpancingo, Guerrero, México
mg23520005@chilpancingo.tecnm.mx, mirna.cb@chilpancingo.tecnm.mx

³Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Celaya, Guanajuato, México
ana.mondragon@itcelaya.edu.mx

⁴Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Lázaro Cárdenas, Michoacán, México
afariasp0@gmail.com

Abstract– This article presents a research focused on generating a bidirectional communication mechanism of the WSN IoT intercommunication, between the nodes of the network (without internet access) and the central node (connected to the internet), a service API, a cloud database and a mobile App with a graphical interface for data consultation. The nodes use digital sensors for temperature, humidity, water level, and GPS. The contribution of the work aims to improve the communication mechanism (protocol) between the IoT devices of a wireless network (WSN), providing security and reliability benefits in the reading, transmission and sending of data through the network. This communication mechanism uses data encryption in standard Java Script Object Notation (JSON) communication format. The sections it includes are: 1) Assembly of the LoRa+Antenna device, 2) Sending data between devices with standard data encryption and data package in JSON format, 3) Consumption of APIs in the cloud for storage and consultation of sensor information.

Keywords– Sensors, LoRa, IoT, JSON, Web Services, WSN.

Sistema de comunicación inalámbrica entre nodos de sensores ambientales

C. Morales–Morales¹, E.E. Salgado-Lampart², A. González-Lorence¹, M. Castro-Bello², A.L. Mondragón-Solís³, M.A. Farias-Padilla⁴

¹Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de San Juan del Río, Querétaro, México.
cornelio.mm@sjuanrio.tecnm.mx, armida.gl@sjuanrio.tecnm.mx

²Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Chilpancingo, Guerrero, México
mg23520005@chilpancingo.tecnm.mx, mirna.cb@chilpancingo.tecnm.mx

³Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Celaya, Guanajuato, México
ana.mondragon@itcelaya.edu.mx

⁴Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Lázaro Cárdenas, Michoacán, México
afarias0@gmail.com

Abstract– Este artículo presenta una investigación centrada en generar un mecanismo de comunicación bidireccional de la intercomunicación de la WSN IoT, entre los nodos de la red (sin acceso a internet) y el nodo central (conectado a internet), una API de servicio, una base de datos en la nube y una App móvil con interfaz gráfica para consulta de datos. Los nodos usan sensores digitales de temperatura, humedad, nivel de agua y GPS. La contribución del trabajo atiende mejorar el mecanismo de comunicación (protocolo) entre los dispositivos IoT de una red inalámbrica (WSN), brindando beneficios de seguridad y confiabilidad en la lectura, transmisión y envío de datos a través de la red. Este mecanismo de comunicación usa un cifrado de datos en formato estándar de comunicación Java Script Object Notation (JSON). Las secciones que incluye son: 1) Ensamble del dispositivo LoRa+Antena, 2) Envío de datos entre dispositivos con cifrado de datos estándar y paquete de datos en formato JSON, 3) Consumo de APIs en la nube para almacenamiento y consulta de información de los sensores.

Keywords– Sensores, LoRa, IoT, JSON, Web Services, WSN.

I. INTRODUCCIÓN

El uso y disponibilidad de las tecnologías de comunicación inalámbrica permiten construir nuevos desarrollos tecnológicos miniaturizados que cubran necesidades específicas, donde demandan consumo de energía baja para su funcionamiento y distribución del procesamiento ubicuo en la red. Por lo que, este trabajo explora la posibilidad de utilizar estándares de comunicación tanto en el cifrado de datos del canal de transmisión como en el estandarizado de intercambio de datos mediante la notación JSON, la cual usa dos modelos de antena y prueba la viabilidad de integrar redes de sensores inalámbricas con la capacidad de comunicación bidireccional en una red.

Las tecnologías de transmisión y recepción de información a través de LoRa permiten el envío de pequeños paquetes de datos entre dispositivos a distancias considerables, que van desde unos pocos centímetros hasta varios kilómetros, permitiendo la ubicuidad de la red de sensores distribuidos en espacios abiertos sin la necesidad de conexión a internet. Esto

hace posible que un sistema de Internet de las Cosas IoT incluya en sus componentes de hardware como de software el monitoreo de parámetros ambientales, datos de industrias o incluso monitorización de estado de la salud de las personas [1]. A continuación, se presentan las secciones de la literatura revisada.

II. REVISIÓN DE LA LITERATURA

Las La literatura referente al campo de las Redes Inalámbricas de Sensores (WSN) se enfocan en aspectos de la fabricación de sensores, las tecnologías disponibles de los canales de comunicación de los Nodos IoT, las topologías de las WSN, los protocolos de comunicación y los campos de aplicación.

A. RFID, Sensores y WSN

Parte fundamental de las redes WSN es el uso de los RFID, que son capaces de identificar y rastrear dispositivos, mientras que las WSN cooperan para recopilar y proporcionar información a partir de sensores interconectados [1]. En los sistemas de transporte inteligentes toman la identificación proporcionada por los RFID para el control y seguimiento interno [2]. Y la interrelación entre las redes 3G, las WSN y los RFID son determinantes para el control de acceso y gobernabilidad de las redes inalámbricas [3], para el aseguramiento de la identificación de los nodos IoT que son generadores de la información recabada se asocian los datos obtenidos, con el identificador del RFID tal como es requerido para el uso en aplicaciones de seguimiento y monitores de datos médicos, obtenida por bioparches, y transmitidos en tiempo real mediante redes 3G hacia los médicos, para el análisis de datos y elaboración de los planes de tratamiento para su posterior ejecución en los pacientes [4]. El desarrollo de metamateriales que incluyen la integración de los sensores en la ropa, mediante superficies conductoras estructuradas en láminas de metal incorporadas en la ropa, cableado y placa de circuitos flexibles [5] permiten disponer de un adecuado seguimiento de los signos. La miniaturización de los sensores fabricados en materiales piezoeléctricos con cableados de

óxido de zinc para convertir la energía vibratoria del cuerpo en electricidad, almacenarla en una nano batería y utilizada en el dispositivo [6] han permitido tener integrados en la ropa los medios necesarios para una adecuada monitorización.

B. Tecnologías de comunicación

La disponibilidad de los canales de comunicación para las WSN ha evolucionado, adaptando las necesidades de conectividad, con base en las nuevas necesidades del mercado, dado que actualmente existen tecnologías de conectividad de dispositivos que van desde unos pocos centímetros hasta llegar a varios kilómetros de distancia entre ellos. La tecnología Bluetooth Low Energy BLE, reduce el consumo de energía para realizar las conexiones entre teléfonos inteligentes, ofreciendo conectividad de fácil manejo, pero reduciendo la distancia de conexión, lo que hace que este protocolo de comunicación sea poco eficiente para las WSN [7].

Los protocolos más extendidos para comunicación entre dispositivos inalámbricos, es la tecnología WiFi que opera en las bandas de 2.4 y 5.0 Ghz [7] su capacidad de escalabilidad es elevada al poder integrar más nodos en la red [8] sin mucho esfuerzo.

El uso de esta tecnología por una gran cantidad de usuarios hace que se tengan mayores destrezas para lanzar un ciberataque como la denegación de servicio a la red [9] pero la potencia de conectividad a internet en combinación con tecnologías como ZigBee o LoRa dan buenos resultados en espacios abiertos como granjas [10] y actualmente existen en el mercado, ensambles de módulos de energía inspirados en el WiFi con parámetros de energía y modelos de potencia específicos para las transmisiones LoRa [11] y en aplicaciones de uso doméstico donde están integradas estas dos tecnologías [12].

El aumento del tráfico en las redes WSN exigen un mayor consumo de energía [3], la tecnología LoRa identifica dispositivos finales que tienen energía restringida y transmiten pocos datos por el canal de comunicación y estableciendo la conectividad como una entidad externa a las redes tradicionales, lo que la vuelve una excelente opción de interconectividad para aplicaciones de ciudades inteligentes, cuidado de la salud, monitoreo ambiental e industrias [13]. Esta tecnología ha sido propuesta para la optimización de las redes de área amplia de bajo consumo energético LPWAN, mejorando su vida útil, el costo y la eficiencia de las baterías utilizadas en los dispositivos [14].

La realización de redes sobre el protocolo IPV6 de redes de área personal inalámbricas de bajo consumo (6LowPAN) en la cual, cada nodo dispone de su propia dirección IPV6 y permite una conexión directa a internet mediante el uso de estándares abiertos [7], en la red IPV6 con 10,128 direcciones, protocolos, almacena la dirección del emisor y receptor integrados en la red, y no se requiere de ningún servidor centralizado [15], el enrutador conectado a nodos 6LowPAN realiza la conversión a la red IPV6 [4], para la salida de datos entre la red WSN hacia la red conectada a internet.

En la arquitectura TCP/IP, cada capa tiene sus aplicaciones ligeras y específicas, pero en la Capa 7 (Aplicación), los protocolos alternativos al estándar HTTP son: protocolos de cola de transferencia de mensajes (MQTT), de aplicación restringida (CoAP), de Servicio de Distribución de Datos (DDS), protocolo extensible de mensajería y presencia (XMPP) y web sockets [16]. Por lo tanto, para la capa 7 se pueden fabricar aplicaciones específicas y diseñar un protocolo para cada solución buscada en el traslado de información entre nodos de la red WSN.

C. Topologías de red

Las topologías de red utilizadas en las WSN, varían según la aplicación de la red, que van desde estrella, malla e hipercubo, dicha configuración modifica el desempeño de la red en diversos aspectos como la precisión, eficiencia y resiliencia; mostrando mayor desempeño las redes que proporcionan menor tiempo de demora y mejor consumo energético [17].

La topología de estrella se utilizó siguiendo el protocolo ALOHAnet desarrollado en la universidad de Hawái. Realizando mediciones de la calidad del servicio del tráfico de los nodos y las estaciones base [18].

De forma general LoRa considera una capa física mientras que LoRaWAN es la capa de control de acceso al medio (MAC) de la pila LoRa, esta topología en red permite la comunicación entre múltiples dispositivos finales y la puerta de enlace [19].

Las redes locales de baja potencia con alcance inferior a los 1000 metros, son aplicables a redes de poca extensión territorial; sin embargo, en una topología de malla, se puede aplicar en áreas más grandes de cobertura [13].

La solución propuesta para una red LoRaWAN se basa en una topología de estrella a estrella, compuesta por tres elementos básicos, los dispositivos finales, una puerta de enlace y un servidor central de la red [20] y en comparación con la topología de malla de tecnología ZigBee, la cual no necesita nodos adicionales que funcionen como enrutadores, reduce el costo y la complejidad de la red [21].

III. MATERIALES Y MÉTODOS

D. Pruebas experimentales de comunicación

Las pruebas experimentales de comunicación bidireccional se realizaron entre los dos dispositivos denominados nodos de sensor usando dos modelos diferentes de antenas LoRa. Las ubicaciones variaron a medida que se lograron mayores distancias de conectividad, como se muestra en la Fig. 1.



FIG. 1. VISTA 3D CHILPANCINGO, GRO.

E. Diseño del dispositivo IoT

El envío de datos del dispositivo, se basó en la configuración de sensores comúnmente encontrados en estaciones climatológicas. Los sensores considerados fueron: nivel de agua, temperatura ambiental, humedad y con alimentación a través de un panel solar.

Los dispositivos tipo SensorNode disponen de un sensor de temperatura de la tarjeta de comunicación LoRa y un GPS incorporado. El dispositivo GatewayNode dispone adicionalmente la conectividad WiFi para el traslado de información de la red WSN hacia los WebServices. El diagrama del componente del dispositivo se muestra en la Fig. 2.



FIG. 2. COMPONENTES DEL DISPOSITIVO DEL NODO.

F. Componentes del Nodo de Sensor

Los componentes funcionales de los nodos son:

- Unidad central basada en Arduino
- Antena LoRa + sensor de temperatura de tarjeta.
- Sensor nivel de agua.
- Sensor de temperatura ambiental y humedad.
- Panel solar.
- GPS.

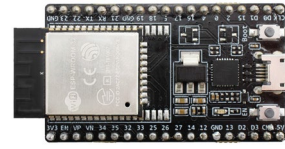
IV. HARDWARE

Una parte fundamental del desarrollo del prototipo de dispositivo SensorNode es el hardware, el cual en sí mismo proporciona energía, conectividad física a los sensores conectados, obtiene las lecturas de los sensores, procesa los datos, forma el paquete de información y realiza el envío de información hacia el dispositivo GatewayNode.

En la revisión bibliográfica se ha comprobado la eficiencia de la combinación de tecnologías WiFi - Lora utilizadas como puente de información inicialmente

transmitida mediante LoRa enviándola posteriormente hacia internet vía WiFi.

G. Placa de desarrollo Arduino



La placa de desarrollo de Arduino ESP32-WROOM-32 es un módulo aplicable para diversas aplicaciones, como sensores IoT, redes de bajo consumo energético y alta demanda de procesamiento.

El chip posee dos núcleos que pueden ajustar la velocidad de frecuencia de reloj, desde los 80 MHz hasta los 240 MHz. El usuario final puede decidir el modo de trabajo encendiendo o apagando el procesador para minimizar el consumo energético.

La integración con WiFi lo hace ideal como puerta de enlace entre las dos tecnologías de comunicación de datos.

El canal WiFi soporta los protocolos 802.11 b/g/n con velocidades de transmisión de datos hasta 150 Mbps. Soporta el rango de frecuencia de los 2.4 Ghz. Y rangos de temperatura operacional de -40°C hasta los $+85^{\circ}\text{C}$. La placa de desarrollo Arduino UNO es una placa de desarrollo que permite la conexión de diversos tipos de periféricos. Su rango de operacional de temperatura de -40°C a $+85^{\circ}\text{C}$. En temperatura extrema, el componente EEPROM, el regulador de voltaje y el cristal del oscilador no funcionan de manera correcta. La información de estos periféricos conectados se traslada al microcontrolador, el cual se encargará de procesar los datos obtenidos.

H. Antena Lora



Las antenas del fabricante REYAX modelo RYL998 y RYL993, tienen una interface de comandos UART compatible con Arduino. El control de la comunicación mediante comandos AT y se pueden establecer los parámetros de operación como Baudios, cantidad de bits de datos, paridad, bit de parada, conectar a la red LoRaWAN, definir el ID único del dispositivo, la sesión de la red, y el identificador en la red, banda de transmisión y la clase de la tecnología LoRa.

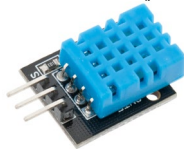
I. Sensor de nivel de agua



Es un dispositivo con una serie de alambres paralelos expuestos con el fin de determinar el nivel de agua en valores de salida de conversión de señales analógicas y digitales. Puede obtener nuevos datos cada 2 segundos. Se alimenta a

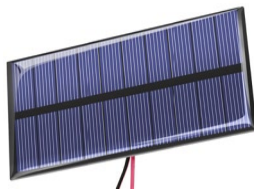
5V, devuelve un pin de valor analógico comprendido entre VCC y GND. El pin S se conecta al Arduino como entrada analógica, el valor de la lectura será mayor en función de la superficie del sensor esté cubierto de agua.

J. Sensor de temperatura ambiental y humedad



Es un sensor que mide la temperatura y la humedad con salida digital hacia el microcontrolador de 8 bits, garantizando la adquisición como señal digital confiable dado el sensor de temperatura de tipo resistivo NTC. Da respuesta rápida para mediciones frecuentes con capacidad de anti interferencias. Posee coeficientes de mediciones almacenadas y utilizadas en el proceso de detección de señal en el sensor. Bajo consumo de energía y un solo cable serial como interfaz de salida de datos. Rangos de mediciones desde 0 a 50 °C y de 20 a 90 % de Humedad. Y consumo de energía de 3 a 5.5 VCC.

K. Panel solar



Es un dispositivo que aprovecha la energía solar y la transforma en electricidad. Otorga la energía necesaria para el funcionamiento del dispositivo, elaborado en silicio policristalino que otorga 5 Vcc y 160 mA en condiciones de buena luminosidad solar.

L. GPS



Es una antena inteligente detectora de hasta 66 satélites a la vez, otorga actualización de la navegación, actualización de lecturas desde 1 Hz hasta 10 Hz, de bajo consumo de energía y buena recepción en ciudades y caminos con follaje denso. Rango de operación desde -15 hasta 18,000 msnm. Voltajes desde 3 hasta 5.25 Vcc a 2 mA. Su rango de operacional de temperatura de -30°C a +85°C.

V. SOFTWARE

El grupo de componentes del dispositivo es el software utilizado desde el proceso de diseño, programación, modelado de datos, programación de APIs y aplicaciones de servicio.

M. IDE Arduino

Es un programa integrador de las funcionalidades requeridas para el desarrollo de programas basados en Arduino, integra un editor de código, con instalador de bibliotecas de forma directa y un administrador de paquetes para las placas de desarrollo, integra el compilador y el cargador de código hacia las placas de desarrollo, administrador de librerías, monitor y graficador de datos del puerto serial.

N. JSON formatter

Es un software en línea que permite administrar nodos de datos en notación JavaScript Object Notation (JSON). Es un formato creado por Douglas Crockford dado a que el formato XML y otros formatos de datos eran demasiado detallados y no lo suficientemente legibles para los humanos. La estructura del contenido del JSON establece una colección de pares ordenados nombre/valor donde los nombres son cadenas y los valores pueden ser cadenas, números, valores booleanos, nulos o incluso otros objetos. JSON es un estándar en el consumo de las API web debido la cantidad de caracteres optimizada y no requiere ninguna declaración previa de variables. Se puede utilizar en cualquier lenguaje de programación en lugar de limitarse a un solo lenguaje, lo que lo hace más interoperable con otros lenguajes e interfaces de software.

O. Plataforma WEB

Es un software desarrollado para la consulta y visualización de los datos generados desde los dispositivos SensorNode. Realizado en framework Angular v11.0.2 programado con el lenguaje de programación TypeScript.

VI. WEB SERVICES

El Componente intermedio entre los dispositivos GatewayNode, la base de datos y la plataforma de consulta o entre la base de datos y las aplicaciones móviles.

P. API de servicio

Este componente de software disponible como recurso en la nube, recibe y entrega peticiones desde los nodos hacia la base de datos y es intermediario entre la base de datos y los aplicativos de consulta de datos. Desarrollada en framework Laravel v8.83.27 para internet con núcleo desarrollado en lenguaje PHP v8.0.29. Dispone de métodos de manipulación de datos GET, POST, PUT, DELETE y se utiliza como el estándar para el consumo de servicios web. Cada entidad en la base de datos tiene signado un punto de conexión para cada tabla o entidad y ofrece un adecuado control de los datos ingresados y consultados.

VII. RESULTADOS

La propuesta de diseño funcional y operacional de los dispositivos SensorNode y GatewayNode se realizó de forma satisfactoria tanto en sus componentes de hardware como de software. Logrando energizar los dispositivos con paneles solares, que inician la lectura de los sensores conectados, la formación del JSON de datos y el envío mediante la antena

LoRa. Del lado del GatewayNode se logró energizar mediante el panel solar del dispositivo, realizando la conectividad a una red Wifi cercana, disponible y cada vez que se recibía un paquete de datos vía LoRa, se realizaba el reenvío a la API vía Wifi.

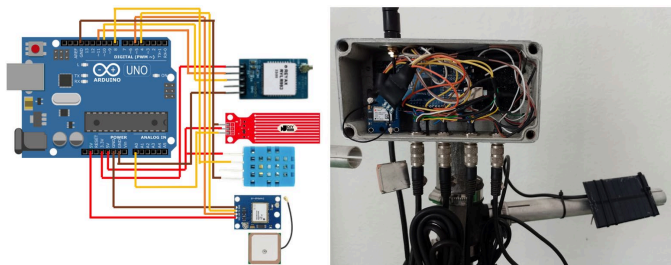


FIG. 3. SENSORNODE

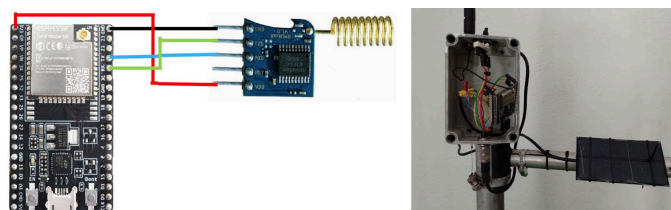


FIG. 4. GATEWAYNODE

Las distancias de comunicación bidireccional se realizaron inicialmente de solo algunos metros de distancia, hasta lograr nueve kilómetros de separación entre los dispositivos. Derivado de la orografía de la ciudad, las distancias disponibles para realizar las transmisiones de un punto a otro no exceden los cuatro kilómetros. La comunicación a lo largo de la ciudad debido a problemas de latencia y por los diversos obstáculos físicos y electrónicos produce interferencia de radiofrecuencia, lo cual dificultaron las pruebas de lograr una distancia mayor a nueve kilómetros.

Posteriormente, al llevar a cabo pruebas de conectividad en localidades foráneas a la ciudad, se logró la conectividad de los dispositivos a una distancia de 9,001 metros y subiendo los datos a la API de servicio tal como se observa en la Fig. 6, la cual almacena los datos de las lecturas en una base de datos en la nube.

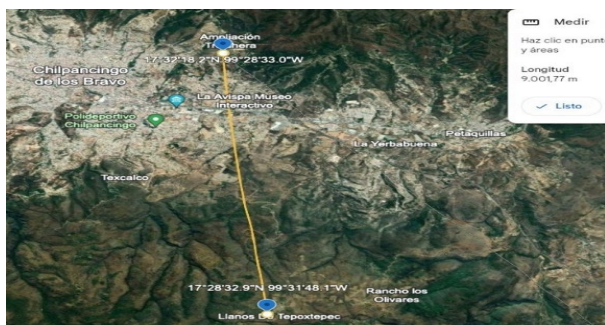


Fig. 5. Conectividad a una distancia de 9,001m

FIG. 6. PANEL DE VISUALIZACIÓN DE LOS DATOS

Tabla 1
LECTURAS DEL SENSORNODE

Id	Lat.	Lon.	Alt.	Lo t	Tem p.	Hu m	Ag ua
56049	17.5307	99.49242	1065.8	30	27.3	29	28
56048	17.53082	99.49264	1065.8	0	27.3	29	28
56047	17.53082	99.49267	1065.8	29	27.3	29	28
56046	17.53084	99.49273	1065.8	30	27.3	29	28
56045	17.53078	-99.4928	1065.3	29	27.3	29	28

VIII. CONCLUSIONES

Este trabajo contempló el diseño de dos dispositivos IoT, SensorNode encargados de leer, procesar los sensores ambientales; y los dispositivos GatewayNode que son los que reciben información desde la antena LoRa y retransmiten los datos vía WiFi a la API disponible en la nube como un Webservice.

Realizar la comunicación bidireccional entre los SensorNodes y GatewayNode utilizando un cifrado de datos AES y un estándar de intercambio de datos JSON a distancias relativamente grandes, logrando la conectividad a 9 kilómetros, permitió comprobar y validar el diseño de los dispositivos, el establecimiento de una red ad hoc entre ellos, la lectura de los sensores conectados, la transmisión y recepción de la información de manera cifrada, el consumo de la API de servicio y el almacenamiento de los datos en la base de datos en la nube, demostró que es factible realizarlo mediante el uso de tecnologías LoRa-WiFi para proyectos de conectividad en grandes extensiones.

En trabajos futuros se recomienda revisar aspectos del rendimiento del consumo de energía, uso de baterías de respaldo para lograr autonomía. Además, mejorar los problemas de latencia de los dispositivos SensorNode y GatewayNode, explorando técnicas de ruteo incorporadas en los dispositivos y procedimientos disparadores de esos procesos de exploración de mejores rutas invocadas desde la plataforma web e inyectada a los dispositivos SensorNode y GatewayNode.

REFERENCIAS

- [1] H. Landaluce, L. Arjona, A. Perallos, F. Falcone, I. Angulo, and F. Muralter, "A review of iot sensing applications and challenges using RFID and wireless sensor networks," *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 9. MDPI AG, May 01, 2020. doi: 10.3390/s20092495.
- [2] T. Kavitha *et al.*, "Data congestion control framework in Wireless Sensor Network in IoT enabled intelligent transportation system," *Measurement: Sensors*, vol. 24, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.measen.2022.100563.
- [3] M. Heydari, A. Mylonas, V. H. F. Tafreshi, E. Benkhelifa, and S. Singh, "Known unknowns: Indeterminacy in authentication in IoT," *Future Generation Computer Systems*, vol. 111, pp. 278–287, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.future.2020.03.005.
- [4] Afef Mdhaffar *et al.*, *IEEE EUROCON 2017: 17th International Conference on Smart Technologies: conference proceedings: 6-8 July 2017, Ohrid, Mcedonia*. 2017.
- [5] X. Tian *et al.*, "Wireless body sensor networks based on metamaterial textiles," *Nat Electron*, vol. 2, no. 6, pp. 243–251, Jun. 2019, doi: 10.1038/s41928-019-0257-7.
- [6] D. V. Queiroz, R. D. Gomes, I. E. Fonseca, C. Benavente-Pecas, and M. S. Alencar, "Using nanosensors in wireless sensor networks," in *Nanosensors for Smart Cities*, Elsevier, 2020, pp. 515–526. doi: 10.1016/B978-0-12-819870-4.00029-3.
- [7] C. S. Abella *et al.*, "Autonomous Energy-Efficient Wireless Sensor Network Platform for Home/Office Automation," *IEEE Sens J*, vol. 19, no. 9, pp. 3501–3512, May 2019, doi: 10.1109/JSEN.2019.2892604.
- [8] B. A. Begum and S. V. Nandury, "Data aggregation protocols for WSN and IoT applications – A comprehensive survey," *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, vol. 35, no. 2. King Saud bin Abdulaziz University, pp. 651–681, Feb. 01, 2023. doi: 10.1016/j.jksuci.2023.01.008.
- [9] S. Halder and T. Newe, "Radio fingerprinting for anomaly detection using federated learning in LoRa-enabled Industrial Internet of Things," *Future Generation Computer Systems*, vol. 143, pp. 322–336, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.future.2023.01.021.
- [10] G. Routis and I. Roussaki, "Low Power IoT Electronics in Precision Irrigation," *Smart Agricultural Technology*, vol. 5, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.atech.2023.100310.
- [11] S. Dawaliby, A. Bradai, and Y. Pousset, "Adaptive dynamic network slicing in LoRa networks," *Future Generation Computer Systems*, vol. 98, pp. 697–707, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.future.2019.01.042.
- [12] R. Pueyo Centelles, R. Meseguer, F. Freitag, L. Navarro, S. F. Ochoa, and R. M. Santos, "LoRaMoto: A communication system to provide safety awareness among civilians after an earthquake," *Future Generation Computer Systems*, vol. 115, pp. 150–170, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.future.2020.07.040.
- [13] J. Carvalho *et al.*, "LoRaWAN-A Low Power WAN Protocol for Internet of Things: a Review and Opportunities Modeling and Simulation of ATM Networks View project NovaGenesis View project LoRaWAN-A Low Power WAN Protocol for Internet of Things: a Review and Opportunities," 2017. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/318866065>
- [14] S. Naoui, M. E. Elhdhili, and L. A. Saidane, "Enhancing the security of the IoT LoraWAN architecture," 2016. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/315496449>
- [15] K. Shafique, B. A. Khawaja, F. Sabir, S. Qazi, and M. Mustaqim, "Internet of things (IoT) for next-generation smart systems: A review of current challenges, future trends and prospects for emerging 5G-IoT Scenarios," *IEEE Access*, vol. 8. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 23022–23040, 2020. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2970118.
- [16] M. A. A. da Cruz, J. J. P. C. Rodrigues, P. Lorenz, P. Solic, J. Al-Muhtadi, and V. H. C. Albuquerque, "A proposal for bridging application layer protocols to HTTP on IoT solutions," *Future Generation Computer Systems*, vol. 97, pp. 145–152, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.future.2019.02.009.
- [17] H. N. Almajed, A. S. Almogren, and A. Altameem, "A resilient smart body sensor network through pyramid interconnection," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 51039–51046, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2909557.
- [18] O. Khutsoane, B. Isong, and nwuacza M. Adnan Abu-Mahfouz, "IoT Devices and Applications based on LoRa/LoRaWAN," 2017.
- [19] M. Jouhari, N. Saeed, M.-S. Alouini, and E. M. Amhoud, "A Survey on Scalable LoRaWAN for Massive IoT: Recent Advances, Potentials, and Challenges," Feb. 2022, doi: 10.1109/COMST.2023.3274934.
- [20] K. Evizal, E. Akmar, and R. Sri Listia, *Application of Lora WAN Sensor and IoT for Environmental Monitoring in Riau Province Indonesia*. 2018.
- [21] Danco Davcev *et al.*, *WFCS 2018: 2018 14th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems: 13 - 15 June 2018, Imperia, Italy*. 2018.