



Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), Noviembre-Diciembre 2025,
Volumen 9, Número 6.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i6

SISTEMA DUAL BLE-LORAWAN CON MÓDULOS PARA MONITOREO REMOTO DE POZOS PETROLEROS

DUAL BLE-LORAWAN SYSTEM WITH MODULES FOR REMOTE MONITORING OF OIL WELLS

José Manuel Morales Guerrero
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

Arturo Corona Ferreira
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

Carlos González Zacarías
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

Carlos Arturo Custodio Izquierdo
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

Eduardo Cruces Gutiérrez
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

Sistema dual BLE-LoRaWAN con módulos para monitoreo remoto de pozos petroleros

José Manuel Morales Guerrero¹

202H17151@egresados.ujat.mx

<https://orcid.org/0009-0001-7543-2778>

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
México

Arturo Corona Ferreira

arturo.corona@ujat.mx

<https://orcid.org/0000-0001-8245-0838>

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
México

Carlos González Zacarías

Carlos.gonzalez@ujat.mx

<https://orcid.org/0000-0001-5307-3332>

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
México

Carlos Arturo Custodio Izquierdo

carlos.custodio@ujat.mx

<https://orcid.org/0000-0002-8639-3858>

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
México

Eduardo Cruces Gutiérrez

eduardo.cruces@ujat.mx

<https://orcid.org/0000-0003-0573-812x>

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

RESUMEN

El presente trabajo describe el desarrollo e implementación de un sistema IoT para el monitoreo remoto de variables ambientales mediante módulos RAK, basado en una arquitectura dual de comunicación que integra Bluetooth Low Energy (BLE) y LoRaWAN. El sistema fue diseñado para evaluar su desempeño en condiciones tropicales, con miras a su aplicación en entornos industriales y petroleros donde la conectividad tradicional presenta limitaciones. La metodología adoptada siguió un enfoque incremental e iterativo, integrando los módulos de hardware y software. El sistema se orientó al monitoreo de variables críticas como temperatura, humedad relativa, presión barométrica y concentración de gases, desplegando tres nodos IoT estratégicamente interconectados donde la red LoRaWAN permitió la transmisión a larga distancia. Los resultados experimentales evidenciaron una adquisición y transmisión de datos confiable en intervalos de 30 segundos, con un rango operativo de hasta 10 km, en concordancia con estudios previos. La incorporación de mecanismos de seguridad y autenticación dinámica, como el cifrado con protección MITM, incrementó la confiabilidad del sistema. En conclusión, la arquitectura propuesta demostró viabilidad técnica, escalabilidad y aplicabilidad en el monitoreo ambiental industrial, planteando como trabajo futuro la optimización del consumo energético y su validación en escenarios más complejos.

Palabras Clave: Bluetooth Low Energy (BLE), Industria Petrolera, Internet de las Cosas (IoT), LoRaWAN

¹ Autor principal

Correspondencia: 202H17151@egresados.ujat.mx

Dual BLE-LoRaWAN system with modules for remote monitoring of oil wells

ABSTRACT

This paper describes the development and implementation of an IoT system for the remote monitoring of environmental variables using RAK modules, based on a dual communication architecture that integrates Bluetooth Low Energy (BLE) and LoRaWAN. The system was designed to evaluate its performance in tropical conditions, with a view to its application in industrial and oil environments where traditional connectivity presents limitations. The methodology adopted followed an incremental and iterative approach, integrating the hardware and software modules. The system was oriented to the monitoring of critical variables such as temperature, relative humidity, barometric pressure and gas concentration, deploying three strategically interconnected IoT nodes where the LoRaWAN network allowed long-distance transmission. The experimental results showed reliable data acquisition and transmission at 30-second intervals, with an operating range of up to 10 km, in agreement with previous studies. The incorporation of security and dynamic authentication mechanisms, such as encryption with MITM protection, increased the reliability of the system. In conclusion, the proposed architecture demonstrated technical feasibility, scalability and applicability in industrial environmental monitoring, proposing as future work the optimization of energy consumption and its validation in more complex scenarios.

Keywords: Bluetooth Low Energy (BLE), Oil Industry, Internet of Things (IoT), LoRaWAN

Artículo recibido 10 septiembre 2025

Aceptado para publicación: 15 octubre 2025



INTRODUCCIÓN

En la era moderna actual, tanto en la vida cotidiana como en el ámbito industrial, el Internet de las Cosas (IoT) ha ido en ascendencia al punto de convertirse en una herramienta indispensable para automatizar tareas, recolectar datos en tiempo real y transformar procesos industriales. Dentro de este panorama es donde a pasos agigantados las tecnologías inalámbricas han empezado a jugar un papel importante. Aunque existen opciones como BLE (Bluetooth Low Energy) o infrarrojos implementados en instalaciones compactas, lo cierto es que esta es una solución limitada a cortas distancias, sin embargo, existen tecnologías que tratan con estas limitaciones, tal y como es el caso de la red LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) la cual es una solución que combina el largo alcance teniendo la posibilidad de llegar a operar entre 5 y 10 km sin condenar el consumo energético del dispositivo, además de contar con la ventaja de operar en bandas no licenciadas, lo que es de mucha ayuda para desplegar redes privadas que sean eficazmente gestionables (LoRa Alliance, 2020; Bankov et al., 2017).

Debido a la eficiencia de esta tecnología, se ha ido acumulando cierto auge dentro del sector industrial, teniendo aplicaciones tales como el caso de la Organización Europea para la Investigación Nuclear (CERN) donde se implementó una infraestructura basada en LoRaWAN, diseñada para el monitoreo de radiación ambiental. Este sistema, denominado Waste radiation MONitoring (W-MON) se apoya de miles de sensores de radiación gamma, los cuales transmiten información de manera continua hacia un servidor, abarcando un amplio terreno al aire libre, esta infraestructura permitió automatizar controles radiológicos en contenedores de residuos y facilitar la integración con plataformas de supervisión centralizadas, evidenciando el potencial de LoRaWAN para gestionar infraestructuras críticas en escenarios complejos (Manzano et al., 2021).

En un ámbito más específico, dentro de la industria petrolera ya se han comenzado a aprovechar estas capacidades para la optimización de actividades, además de reducir costos y mejorar la seguridad, especialmente en entornos remotos donde la conectividad tradicional resulta limitada. Tal es la importancia de la tecnología en este sector que ya existen casos tangibles, como es el caso que muestra a un estudio, el cual reportó el uso de sistemas inalámbricos con LoRa con el objetivo de monitorear paneles solares y componentes eléctricos en un pozo remoto, de forma que sea posible registrar datos como lo son tensión, corriente y condiciones operativas (ResearchGate, 2024).



También existen guías especializadas las cuales destacan como LoRaWAN facilita la supervisión de infraestructuras críticas como oleoductos, válvulas y tanques remotamente o en entornos adversos (Tektelic, 2022; Timbergrove, 2023).

De manera complementaria, es importante mencionar que la adopción del IoT en el sector petrolero ha mostrado cambios significativos en la eficiencia y en la seguridad. Esto se sustenta con el hecho de que, al realizar implementaciones de monitorización en tiempo real y mantenimiento predictivo, se logra mejorar la productividad y a su vez también se anticipan fallos críticos sin que se generen interrupciones costosas (HiveMQ, 2023). Esto está apoyado en que tecnologías como MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) y plataformas en la nube integradas de forma operativa en sistemas de pozos petroleros dan un mayor soporte para una supervisión más instantánea y segura (DRPress, 2023).

Desde otro punto de vista, así como LoRaWAN ofrece ventajas superiores a las demás tecnologías, también es importante considerar los nuevos retos que plantea. Estos están principalmente enfocados en la escalabilidad y la eficiencia del acceso al canal, donde el rendimiento de la red puede verse afectado por la cantidad de nodos presentes, así como también la pérdida de paquetes (Bankov et al., 2017). Es gracias a estas limitaciones que surgen varias estrategias, las cuales permiten balancear la eficiencia energética, la confiabilidad en la transmisión y la latencia de estas redes (Georgiou et al., 2017).

La seguridad en este tipo de sistemas también constituye un aspecto central en aplicaciones industriales críticas. Diversos estudios y especificaciones oficiales de LoRaWAN estipulan que la configuración adecuada de parámetros como DEVEUI, APPEUI y APPKEY es esencial para garantizar la autenticidad, la integridad de los mensajes y el cifrado extremo a extremo dentro de la red LoRaWAN, reduciendo el riesgo de ataques o interceptación de datos (LoRa Alliance, 2020; Loukil et al., 2022). Es en este contexto donde la integración de mecanismos de respaldo como BLE puede aportar una capa adicional de seguridad y disponibilidad local en caso de fallos en la red principal.

Es aquí donde surge la propuesta de analizar los alcances y capacidades de la red LoRaWAN aplicada al monitoreo remoto en la industria petrolera, por lo que en el siguiente documento se detalla la información necesaria sobre la integración y el desarrollo del software para los dispositivos IoT usados en la investigación, además de mostrar cómo es posible complementar con otras tecnologías de

comunicación como es el caso de BLE, y el cómo esto ayuda a cubrir algunas limitaciones y posibles fallos de la red LoRa.

Algo de suma importancia con respecto a la propuesta, es analizar los comportamientos de este tipo de infraestructura en una región tropical, una zona que cuenta con factores de diversas variables, entre los que se destacan las condiciones ambientales tales como altas temperaturas constantes y lluvias abundantes, además del añadido de la densa vegetación. Estas condiciones representan factores críticos que pueden influir en la recepción y estabilidad de la señal de los dispositivos, de manera que la región denominada para el proyecto presenta un escenario realista que permite evaluar la viabilidad y las limitaciones de tecnología en entornos complejos.

En este contexto, el presente trabajo establece el siguiente objetivo: Desarrollar e implementar un sistema IoT de monitoreo remoto de variables ambientales utilizando módulos RAK4631 y RAK1906 con arquitectura de comunicación dual BLE/LoRaWAN, validando su desempeño operacional en términos de alcance de transmisión, tasa de éxito de entrega de paquetes y seguridad de datos en condiciones tropicales características de instalaciones petroleras.

Con este objetivo planteado, el trabajo busca comprobar la utilidad del software desarrollado en los dispositivos IoT para el monitoreo de variables ambientales en pozos petroleros, así como aportar evidencia sobre el rendimiento de la red LoRaWAN en una región con condiciones complejas. Esto con el fin de ayudar a identificar las fortalezas de esta tecnología, así como también mostrar las limitaciones y bajo qué escenarios es viable o no el uso de la tecnología en el sector energético, con la finalidad de diseñar soluciones resistentes y escalables en diversos entornos.

METODOLOGÍA

Este estudio descriptivo de campo implementó tres nodos IoT con sensores ambientales bajo un enfoque de desarrollo incremental de software, evaluando el comportamiento del sistema en condiciones reales de operación en un entorno tropical. Los tres nodos fueron desplegados estratégicamente en diferentes ubicaciones para evaluar el alcance y la confiabilidad de la red LoRaWAN en condiciones variables de terreno y vegetación. El alcance de la investigación es descriptivo-exploratorio, caracterizando el desempeño de la arquitectura propuesta en términos de alcance de transmisión, confiabilidad de datos y seguridad de comunicación.



La metodología que se adoptó en este proyecto se enfocó principalmente en una secuencia exploratoria e incremental, de manera que se desarrolló un software basado en la programación por bloques, implementando diversos bloques de códigos ya proporcionados por la documentación oficial de los dispositivos. Complementario a esto, la tecnología que se usó para el desarrollo del proyecto fue la de RAKwireless, esto principalmente debido a que es de carácter abierto, por lo que la documentación oficial fue de gran soporte al momento del desarrollo de un software funcional para el dispositivo.

Gran parte del software fue proporcionado por estos documentos, otorgando fragmentos de código que fungieron como base inicial, sin embargo, era necesario complementar con otras alternativas para mostrar una solución completa (RAKwireless, 2022a). Es por esta razón que el desarrollo comenzó con una fase de análisis, en la que se validó el funcionamiento correcto de cada módulo para su correcta integración.

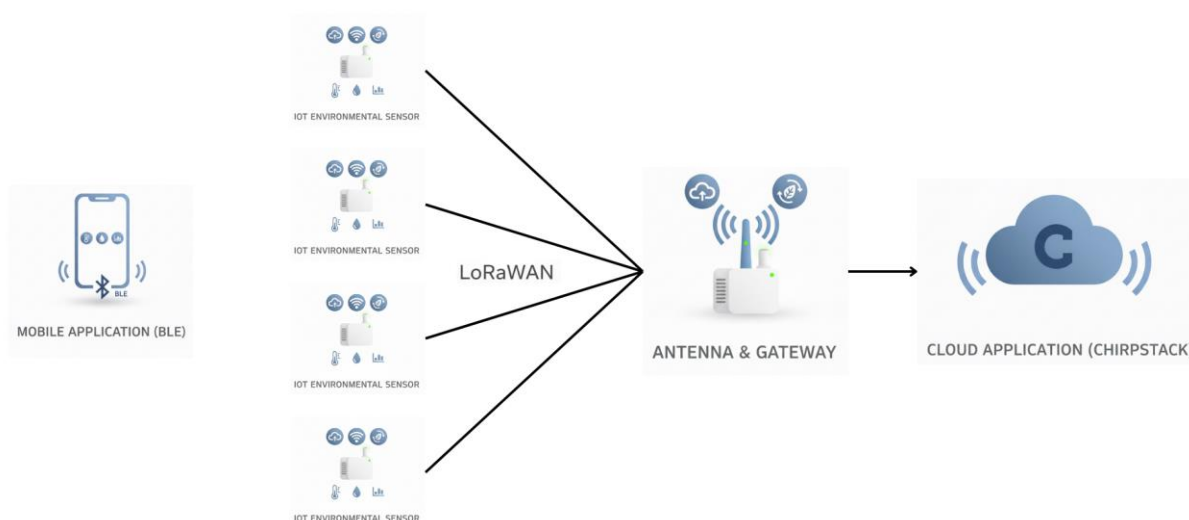
Este enfoque fue de ayuda para garantizar la estabilidad del software, de manera que fue posible reducir errores de integración entre librerías, protocolos y funciones específicas, lo cual es un aspecto importante para este tipo de sistemas, donde la modularidad y la reutilización del código son factores clave para la escalabilidad y el mantenimiento (Reyna et al., 2018).

Es gracias a esto que la construcción del software fue progresando de manera iterativa, alternando entre pruebas y validación, para que con cada nueva función agregada se analizará cómo funcionaba el dispositivo en conjunto, iniciando por la adquisición de datos, la transmisión por medio de la vía LoRaWAN y la implementación de BLE como un sistema de respaldo en caso de fallos, entre algunas tareas y funciones menores. Este enfoque permitió la depuración temprana de errores, lo que a su vez concluyó en un software final estable y adaptable a las condiciones de la infraestructura propuesta.

En cuanto a la infraestructura propuesta, tal y como se muestra en la Figura 1, los dispositivos IoT con sensores actúan como nodos recolectores de datos, los cuales envían la información recopilada por medio de LoRaWAN a la antena en un radio de hasta 10 km, donde la información es procesada y enviada a la aplicación instalada en la nube, configurada con ChirpStack. En esta capa, los datos son decodificados, estructurados y almacenados, quedando disponibles para su consulta, análisis y posible integración con aplicaciones de supervisión o plataformas de análisis avanzado.



Figura 1. Infraestructura propuesta para el proyecto (fuente: elaboración propia)



Esta propuesta concuerda con otras metodologías ya publicadas por otros autores, en la cual el foco principal de dicha infraestructura es la escalabilidad de los nodos, es decir, que se puedan agregar más dispositivos al sistema, tal y como lo muestra el estudio de Basford et al. (2020) en donde se desplegaron 20 nodos terminales en diversos puntos de la ciudad, transmitiendo datos de calidad del aire, temperatura, humedad, etc.

Especificaciones de los módulos

Como tal, en la primera etapa se verificaron los roles específicos que tendrá cada componente en la integración final del dispositivo, teniendo tres módulos principales: el RAK4631 como procesador y coordinador de las comunicaciones, el sensor ambiental RAK1906 como fuente de datos, y el RAK5005-O como la placa base, sirviendo como el elemento de integración. Todos estos módulos fueron integrándose de manera progresiva, verificando su funcionamiento y la compatibilidad para el correcto desempeño del sistema (Bankov et al., 2017).

El primer componente relevante es el RAK4631, el cual constituye el núcleo del dispositivo IoT. Este módulo funciona como procesador principal encargado de coordinar la adquisición y transmisión de datos. Está basado en el microcontrolador Nordic nRF52840 (ARM Cortex-M4F a 64 MHz), que incorpora 1 MB de memoria Flash y 256 kB de RAM, además de soporte nativo para Bluetooth Low Energy (BLE).

Para la comunicación de largo alcance, el RAK4631 integra el transceptor Semtech SX1262, compatible con la red LoRaWAN en las principales bandas de frecuencia, incluyendo el rango de 902–928 MHz utilizado en América. Esta combinación permite establecer enlaces inalámbricos de varios kilómetros con un consumo energético reducido, lo que lo convierte en una opción idónea para entornos industriales y de monitoreo remoto.

En este módulo se ejecuta el software desarrollado en lenguaje C mediante Arduino IDE, encargado de la lectura del sensor, el procesamiento de los datos y su transmisión por medio de BLE y LoRaWAN. Gracias a su compatibilidad con la plataforma WisBlock, el RAK4631 puede integrarse de forma modular con otros componentes, lo que facilita el diseño y la escalabilidad de aplicaciones IoT.

El sensor ambiental RAK1906, basado en el chip Bosch BME680, se empleó para la recolección de parámetros ambientales. Este dispositivo mide de manera simultánea la temperatura, humedad relativa, presión barométrica y compuestos orgánicos volátiles (COVs), transmitiendo la información al procesador RAK4631 mediante el bus de comunicación I²C. La Tabla 1 resume sus principales características técnicas, que reflejan un equilibrio entre amplio rango de operación, alta precisión y bajo consumo energético. Su precisión lo hace adecuado para aplicaciones de monitoreo ambiental: ± 0.5 °C en temperatura, ± 3 % en humedad relativa y ± 1 hPa en presión barométrica.

En cuanto a los gases, el sensor genera un índice de calidad del aire (IAQ) que refleja la concentración de compuestos presentes en el entorno, lo que permite una evaluación práctica de las condiciones ambientales. Estas características lo convierten en un sensor versátil y eficiente para dispositivos IoT de bajo consumo, con aplicaciones directas en entornos industriales que requieren la supervisión continua de variables ambientales críticas.



Tabla 1. Especificaciones del sensor ambiental RAK1906 (Bosch BME680) (fuente: Adaptado de RAKwireless, 2022b)

Parámetro	Rango de medición	Precisión típica	Resolución
Temperatura	-40 °C a +85 °C	±0.5 °C	0.01 °C
Humedad relativa	0 % a 100 %	±3 % RH	0.008 % RH
Presión barométrica	300 hPa a 1100 hPa	±1 hPa	0.18 Pa
Compuestos orgánicos volátiles (COVs)	0 a 500 IAQ (Índice de calidad del aire)*	Dependiente del entorno	N/A
Tensión de alimentación	1.71 V a 3.6 V	—	—
Consumo en modo ultra-bajo	~0.09 mA	—	—

El sensor RAK1906 no solo permite la recopilación de variables básicas como temperatura, humedad y presión, sino que, al estar basado en el chip Bosch BME680, incorpora la capacidad de estimar la calidad del aire mediante la detección de compuestos orgánicos volátiles (COVs). Esta característica amplía significativamente sus posibilidades de aplicación en entornos industriales y urbanos, al facilitar el monitoreo de condiciones de ventilación y la identificación temprana de riesgos asociados con la acumulación de gases nocivos. Estudios recientes validan el uso del BME680 en sistemas embebidos de análisis de muestras de aire, resaltando su versatilidad para aplicaciones de monitoreo ambiental y seguridad ocupacional (Kwiatkowski et al., 2021).

Como último punto, tenemos a la placa base RAK5005-O WisBlock la cual cumple la función de interconectar los diferentes módulos del sistema, esto sirve para asegurar la compatibilidad y la estabilidad de las señales a través de buses estándar como I²C, UART y GPIO. También implementa funciones útiles como la gestión de la alimentación del dispositivo, ya que trae consigo la posibilidad de utilizar diferentes fuentes de energía, además de que incorpora un regulador de 3.3 V con capacidad de hasta 750 mA. Una ventaja al usar esta placa es que ofrece la opción de controlar desde el

microcontrolador hasta la alimentación de los sensores durante periodos de inactividad lo que optimiza significativamente el consumo energético.

Integración de los módulos

El primer paso del desarrollo consistió en aplicar pruebas aisladas a cada componente, empezando con establecer la comunicación entre el sensor ambiental y el procesador central, de forma que el sensor recopila las 4 variables intrascendentes para el proyecto que son: temperatura, humedad relativa, presión barométrica y concentración de gas. Una vez obtenidas, el procesador se encargaba de mostrar las variables en la consola serial, para de esta forma comprobar la confiabilidad de los datos obtenidos y la estabilidad del enlace.

Posteriormente, se implementó un mecanismo de muestreo periódico con intervalo ajustable. Inicialmente, este intervalo fue establecido en 30 segundos para corroborar el funcionamiento correcto del módulo muestreador; sin embargo, se dejó como parámetro configurable para optimizar la autonomía del dispositivo, el consumo energético, la memoria disponible, o para adaptarse a la criticidad del entorno monitoreado. Estos criterios coinciden con los expuestos por Mataloto et al. (2019), quienes en su plataforma *LoBEMS* subrayan que la flexibilidad del intervalo de muestreo es clave para balancear precisión y eficiencia energética en sistemas IoT.

Enfocándose en este contexto, en un escenario donde la variabilidad de las condiciones ambientales puede representar un riesgo, la reducción del intervalo de muestreo puede resultar esencial para disponer de información en tiempo real y así posibilitar la detección temprana de anomalías, para una toma de decisiones más oportuna, previniendo una situación crítica.

El segundo paso consistió en la transmisión de datos por medio de la red de conectividad LoRaWAN, durante lo cual fue necesario considerar y configurar varios parámetros críticos para garantizar la segura integración del dispositivo, la conectividad estable y la interoperabilidad con el gateway. Uno de los elementos fundamentales en esta configuración corresponde a los identificadores y claves de seguridad: Device EUI (DEVEUI) y Application EUI (APPEUI), que permiten identificar de forma única cada nodo. Estos parámetros aseguran que cada dispositivo pueda diferenciarse del resto, evitando colisiones de identidad y garantizando la correcta asociación con la aplicación correspondiente.

De manera complementaria, se configuró la Application Key (APPKEY), un valor crítico para los procesos de autenticación y encriptación. Este parámetro es compartido únicamente entre el nodo y el servidor de aplicaciones (en este caso, se usó ChirpStack), y constituye la base para el establecimiento de una comunicación segura mediante el mecanismo de activación por aire (OTAA, Over-The-Air Activation). Gracias a esta clave, los datos transmitidos desde el dispositivo son cifrados antes de ser enviados, reduciendo significativamente la vulnerabilidad frente a accesos no autorizados o intentos de suplantación (Haxhibeqiri et al., 2018).

La correcta asignación y gestión de estos parámetros no solo posibilita la transmisión de datos ambientales desde el nodo hacia el gateway LoRaWAN, sino que también garantiza que la información sea recibida únicamente por la aplicación autorizada en la infraestructura de Chirpstack. En este sentido, DEVEUI, APPEUI y APPKEY constituyen el núcleo de la seguridad, trazabilidad y autenticidad del sistema IoT, aspectos esenciales en entornos críticos como el monitoreo ambiental en instalaciones industriales (LoRa Alliance, 2020).

También fue necesario configurar otros parámetros para garantizar la correcta integración del dispositivo dentro de la red privada administrada en ChirpStack. Para ello, se emplearon comandos AT, con los cuales se definió el comportamiento del nodo en cuanto a consumo energético, seguridad, confiabilidad y mecanismos de enlace.

Para optimizar consumo energético y adaptar el nodo al entorno experimental, se seleccionó la Clase A, esencial para nodos finales dados sus períodos de sueño prolongados y ventanas de recepción restringidas, lo cual reduce el uso de energía. Asimismo, se deshabilitó el mecanismo ADR (Adaptive Data Rate) para tener control manual sobre tasa de datos y potencia de transmisión, lo que permite evaluar rendimiento real del enlace sin dependencia de ajustes automáticos (Haxhibeqiri et al., 2018). Esta decisión fue para un enfoque de escenario más experimental, donde lo ideal es evaluar el rendimiento real del enlace sin necesidad de depender de ajustes automáticos.

Para garantizar la entrega de los datos, el nodo fue configurado en modo Confirmed Uplink (AT+CFM=1), lo que implica que cada paquete transmitido debe recibir un acuse de recibo (ACK) por parte del servidor de red. Este enfoque incrementa la confiabilidad de la transmisión, aunque conlleva un mayor consumo de energía y tiempo de comunicación. Asimismo, se estableció un máximo de tres

intentos por mensaje fallido ($AT+RETY=3$), con el fin de equilibrar la resiliencia del sistema frente a pérdidas de paquetes sin comprometer excesivamente la autonomía energética del dispositivo (Augustin et al., 2016).

Por otro lado, se deshabilitó el Public Network Mode (PNM) ($AT+PNM=0$), lo que aseguró que el nodo operara únicamente en una red privada configurada en ChirpStack. Este aspecto resulta especialmente relevante en entornos industriales, ya que incrementa el nivel de seguridad y control sobre la información transmitida (Reyna et al., 2018).

Finalmente, se configuró la unión mediante OTAA (Over-The-Air Activation) ($AT+JOIN=1:0:8:0$), considerada el método más seguro para el registro de nodos en LoRaWAN, debido a que genera claves de sesión dinámicas en cada proceso de activación. De esta manera, se garantiza que los dispositivos cuenten con credenciales renovadas para cada sesión de comunicación, reforzando la seguridad de extremo a extremo.

En general, esta configuración adoptada se encarga de priorizar la seguridad y la confiabilidad de la transmisión de datos durante la fase experimental del proyecto, enfocándose en validar la robustez de la red antes de realizar optimizaciones relacionadas con la eficiencia y el tiempo de respuesta.

Con todos estos parámetros configurados, el dispositivo logró establecer exitosamente la conexión con el gateway LoRaWAN, validando su correcta integración dentro de la red privada. A partir de este momento, el nodo IoT pudo transmitir de manera periódica los datos recopilados por el sensor ambiental, con un intervalo inicial de 30 segundos entre cada envío. Este esquema de transmisión periódica permitió no solo validar la estabilidad del enlace, sino también garantizar que la información crítica estuviera disponible en tiempo real para su posterior análisis en ChirpStack y herramientas adicionales.

Adicionalmente, la configuración mediante OTAA y los modos de confirmación de mensajes proporcionó un nivel reforzado de seguridad y fiabilidad, asegurando que cada paquete transmitido fuera protegido y validado por la red antes de su almacenamiento. De esta forma, la arquitectura implementada no solo posibilitó la recolección de datos ambientales, sino que también garantizó que dichos datos permanecieran íntegros y protegidos durante su transmisión, aspecto esencial en aplicaciones industriales y de monitoreo remoto (Haxhibeqiri et al., 2018).



El último paso dentro de la fase de configuración fue la habilitación de los servicios Bluetooth Low Energy (BLE) en el dispositivo IoT. Esta conectividad se incorporó como un mecanismo complementario a la red LoRaWAN, con el propósito de optimizar el consumo energético y, al mismo tiempo, dotar al sistema de una capa adicional de autonomía. La motivación principal detrás de esta implementación fue garantizar un respaldo local de la información en caso de fallos en la conectividad principal (ya sea por pérdida de acceso a Internet, interrupciones en el gateway o indisponibilidad temporal del servidor). De esta forma, se aseguró que los datos recopilados por el sensor pudieran ser accesibles directamente desde el dispositivo, sin necesidad de desmontarlo o interrumpir su operación. No obstante, la incorporación de BLE también implicó la necesidad de abordar aspectos de seguridad en la transmisión de datos. Dado que esta tecnología permite el acceso mediante aplicaciones móviles, existía el riesgo de que agentes externos pudieran intentar interceptar la comunicación y extraer información sensible. Para mitigar este riesgo, se configuraron parámetros de cifrado y autenticación basados en códigos de emparejamiento, lo que asegura que únicamente aplicaciones autorizadas, provistas de la clave de acceso, puedan interactuar con el dispositivo. Este mecanismo garantiza que, incluso si un tercero dispusiera de herramientas técnicas avanzadas, no sería posible obtener los datos recolectados sin la autorización correspondiente.

Para la configuración de los servicios Bluetooth Low Energy (BLE) en el dispositivo, se definieron tres aspectos fundamentales. En primer lugar, se estableció un PIN de emparejamiento dinámico, es decir, el dispositivo genera un número aleatorio de seis dígitos cada cierto intervalo de tiempo, que debe ser introducido en la aplicación móvil para poder conectarse. Esto evita que un tercero pueda acceder al dispositivo con un PIN fijo o predecible.

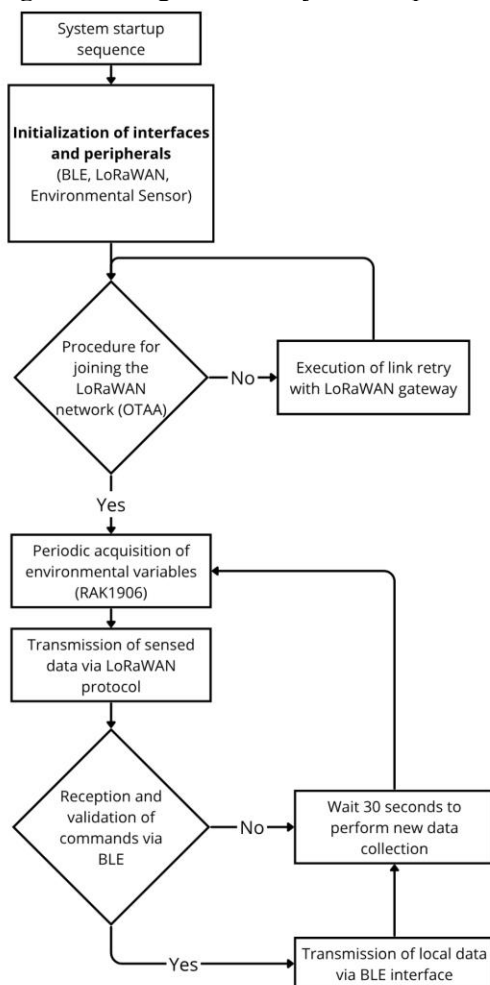
En segundo lugar, se configuró un mecanismo de cifrado con protección MITM (Man-In-The-Middle). Este parámetro asegura que, incluso si un atacante intenta interceptar la comunicación, los datos no podrán ser descifrados ni manipulados sin la clave correspondiente.

Finalmente, el dispositivo se personalizó con el nombre de difusión BLE, esto permite identificarlo fácilmente en entornos con múltiples dispositivos IoT. Esto es especialmente útil en escenarios industriales donde es posible que coexistan diferentes sensores y nodos.

También, se desarrolló un sistema de comandos de acceso que solo funciona si el emparejamiento fue exitoso. De esta manera, únicamente el usuario autorizado puede solicitar y visualizar los datos recolectados por el sensor ambiental (temperatura, humedad, presión barométrica y concentración de gases), garantizando tanto la seguridad como la disponibilidad local de la información en caso de que falle la conectividad LoRaWAN.

Estas prácticas coinciden con los principios descritos en Internet of Things and LoRaWAN-Enabled Future Smart Farming (Citoni et al., 2019), donde se subraya la importancia de mecanismos de autenticación, el uso de claves seguras y la necesidad de asegurar tanto los canales de largo alcance como los locales para proteger la integridad, autenticidad y confidencialidad de los datos transmitidos.

Figura 2. Diagrama de flujo del dispositivo



En la Figura 2 se presenta el diagrama de flujo correspondiente al software desarrollado para el dispositivo IoT. El flujo inicia con la secuencia de inicialización, que comprende la configuración del

bus I²C, la puesta en marcha del sensor ambiental RAK1906 basado en el BME680, y la habilitación de las funciones de conectividad BLE y LoRaWAN. Este tipo de integración de sensores ambientales en plataformas embebidas ha sido ampliamente documentado en aplicaciones de monitoreo de aire (Kwiatkowski et al., 2021).

Posteriormente, el sistema ejecuta el procedimiento de asociación a la red LoRaWAN mediante parámetros de seguridad como DEVEUI, APPEUI y APPKEY, siguiendo el esquema de activación por aire (OTAA), el cual es considerado el más seguro y recomendado en la literatura (Haxhibeqiri et al., 2018; Raza et al., 2017). En caso de no establecerse la conexión, se activa un mecanismo de reintento hasta lograr la vinculación con el gateway. Una vez establecida, el dispositivo inicia la adquisición periódica de variables ambientales, con intervalos definidos de 30 segundos, decisión que coincide con enfoques donde la flexibilidad del muestreo es crítica para balancear consumo energético y disponibilidad de datos (Mataloto et al., 2019).

De forma paralela, el sistema mantiene habilitada la interfaz de comunicación local vía BLE, lo que permite tanto la recuperación de datos en caso de interrupción de la conectividad principal como la ejecución de comandos específicos por parte del usuario autorizado. Este mecanismo redundante, también destacado en propuestas recientes de IoT para entornos industriales, fortalece la autonomía y la resiliencia de la infraestructura (Citoni et al., 2019). Finalmente, la integración progresiva de cada módulo de software se realizó bajo un enfoque incremental, facilitando la depuración temprana y garantizando compatibilidad entre librerías y componentes, práctica recomendada en el diseño de arquitecturas escalables de IoT (Reyna et al., 2018).

RESULTADOS

Entre los principales resultados obtenidos, se destaca en primer lugar la adquisición y transmisión exitosa de variables ambientales. El dispositivo demostró su capacidad para registrar parámetros como temperatura, humedad relativa, presión barométrica y concentración de gas, tanto en entornos cerrados como en espacios abiertos. Estos datos fueron verificados en tiempo real mediante dos medios principales, la consola serial del dispositivo y por medio de la aplicación alojada en la nube, a través de la red LoRaWAN, permitiendo visualizar los datos de manera remota.

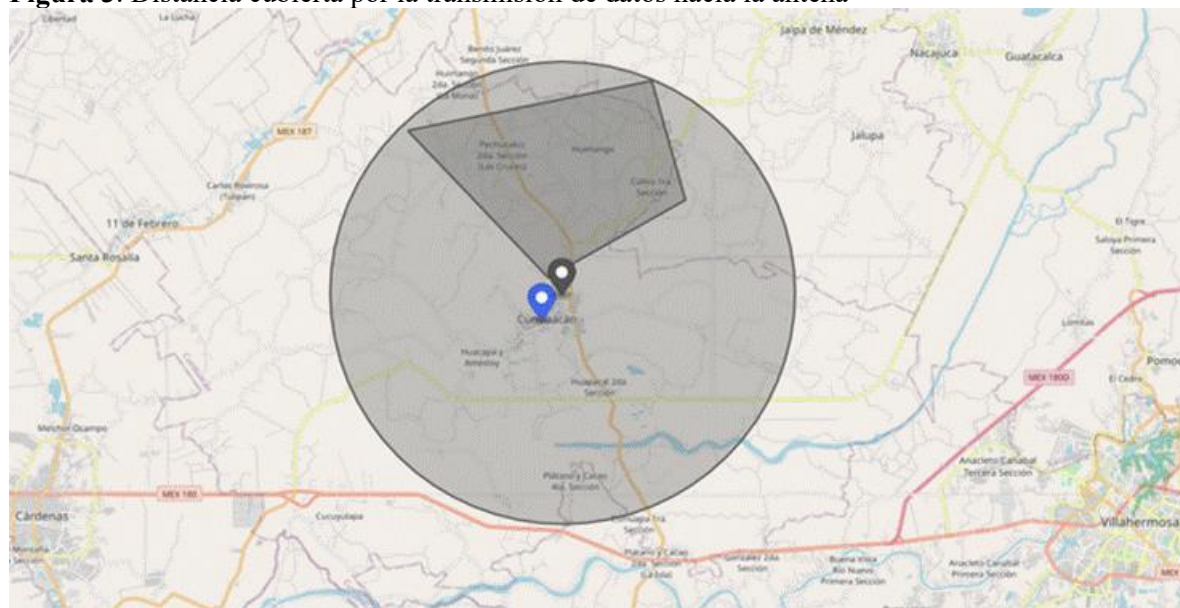


De forma complementaria, se probó la conexión cercana mediante BLE (Bluetooth Low Energy). El acceso a este canal se diseñó únicamente a través de una aplicación móvil desarrollada específicamente para el proyecto, ya que esta es la única vía disponible para obtener el código dinámico de autenticación. Gracias a este mecanismo, la conexión se realizó con éxito y los datos pudieron transmitirse localmente de forma segura, evitando riesgos de accesos no autorizados.

Durante las pruebas experimentales, se mantuvieron tres dispositivos en línea de manera simultánea, lo que permitió comprobar la correcta recolección y transmisión de la información. Este escenario evidenció la viabilidad de la arquitectura implementada para asegurar la continuidad en la comunicación de los nodos y su integración dentro de una misma red privada LoRaWAN.

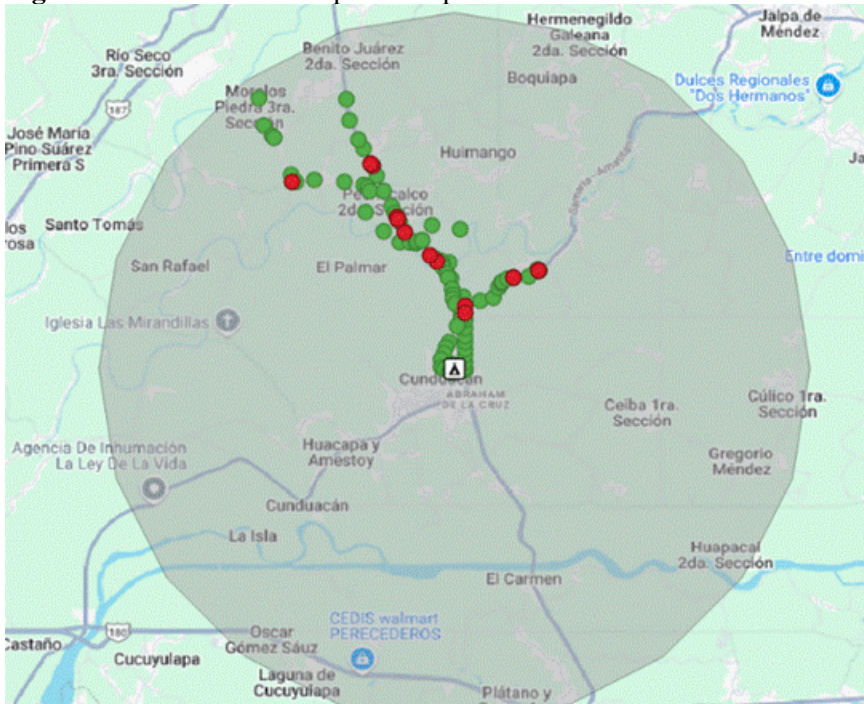
Otro resultado importante fue el alcance de la red del dispositivo, ya que en diversas pruebas de campo se pudieron obtener resultados de hasta 5 kilómetros de distancia en los que se mostraba el envío de datos de forma constante y sin interrupciones, sin embargo, quedó demostrado que las distancias pueden variar desde los 5 hasta los 10 kilómetros en un radio desde la antena, tomando en cuenta la ubicación geográfica, ya que el objetivo era analizar la transmisión de datos en un entorno con alta vegetación, humedad y constantes variables climatológicas.

Figura 3. Distancia cubierta por la transmisión de datos hacia la antena



La Figura 3 muestra un ejemplo de la cobertura alcanzada durante las pruebas de campo. En ella, el área circular representa el alcance máximo estimado de 10 kilómetros alrededor de la antena del gateway, mientras que el polígono evidencia las zonas en las cuales se realizó el mapeo y validación de los datos.

Figura 4. Señales enviadas por el dispositivo a la antena



El dispositivo fue programado para enviar señales de uplink cada 5 minutos durante un trayecto en automóvil. Como se observa en la Figura 4, varias de estas señales no fueron recibidas por el gateway. Los puntos verdes representan mensajes detectados exitosamente, mientras que los puntos rojos corresponden a señales perdidas. Aunque esta pérdida puede explicarse en parte por la geografía del entorno, también se considera la posibilidad de errores en la transmisión originados por el dispositivo, ya que en puntos con ubicación similar algunas señales fueron recibidas mientras que otras no. Adicionalmente, se constató que al superar los 10 kilómetros de distancia, el dispositivo perdía totalmente la conexión con la antena, lo que confirma el límite operativo de la red en este contexto experimental.

Los resultados obtenidos confirman la viabilidad técnica del sistema IoT desarrollado, tanto en la adquisición como en la transmisión de variables ambientales críticas (temperatura, humedad, presión barométrica y gases). La integración de los módulos RAK4631 y RAK1906 permitió un funcionamiento estable en escenarios controlados y en campo abierto.

En cuanto al alcance de la transmisión, se alcanzaron distancias estables llegando hasta un máximo de 10 km en escenarios más favorables. Estas cifras son coherentes con lo reportado en la literatura especializada, que sitúa el rango efectivo de LoRaWAN entre 2 y 15 km dependiendo de las condiciones del entorno (Basford et al., 2020). Esto evidencia que el sistema se adapta adecuadamente a entornos industriales y naturales con condiciones adversas, aunque su desempeño puede verse limitado por factores como la densidad de la vegetación, la topografía y las condiciones meteorológicas. Estudios previos han demostrado la aplicación exitosa de LoRaWAN para el monitoreo de pozos petroleros remotos, validando su capacidad para entornos similares al que se aborda en este trabajo (Georgiou et al., 2017).

Un aspecto particularmente relevante es que la arquitectura propuesta asegura la continuidad en la comunicación entre dispositivos, permitiendo que todos los nodos se integren exitosamente en una misma red LoRaWAN y transmitan datos en tiempo real hacia la plataforma en la nube. Esta característica respalda la escalabilidad de la solución, lo que significa que más nodos pueden añadirse sin comprometer la estabilidad general del sistema.

También es necesario considerar ciertas limitaciones. El consumo energético del nodo y su autonomía en condiciones de operación prolongada aún requieren una evaluación, debido a que factores como el intervalo de muestreo y la confirmación de mensajes influyen directamente en la duración de la batería. Asimismo, aunque el sistema mostró estabilidad en las pruebas realizadas, será necesario validar su desempeño en entornos industriales reales, como instalaciones petroleras, donde las interferencias electromagnéticas y la complejidad del terreno pueden afectar la conectividad.

Finalmente, la combinación de conectividad LoRaWAN y BLE constituye una ventaja competitiva del sistema, ya que ofrece tanto transmisión de largo alcance como un mecanismo de acceso local redundante. El protocolo BLE, al complementar a LoRaWAN, fortalece la seguridad del sistema en las operaciones de corto alcance, proveyendo mecanismos de emparejamiento dinámico y protección contra ataques. Esta dualidad incrementa la resiliencia del sistema frente a posibles fallas de red, al tiempo que facilita la interacción directa en campo por parte de técnicos y operadores, asegurando la continuidad operativa y la disponibilidad de la información crítica en tiempo real (Georgiou et al., 2017).



CONCLUSIONES

El desarrollo e implementación del sistema IoT basado en los módulos RAK4631 y RAK1906 demostró ser una solución viable y eficiente para el monitoreo remoto de variables ambientales en entornos industriales y de difícil acceso. La integración con LoRaWAN permitió establecer enlaces confiables en distancias de 5 km a 10 km, resultados que se alinean con lo reportado en la literatura especializada y confirman el potencial de esta tecnología en escenarios de comunicación de largo alcance y bajo consumo energético.

De forma complementaria, la incorporación de Bluetooth Low Energy (BLE) como canal de respaldo aportó una capa adicional de resiliencia y seguridad, al permitir la interacción local con el nodo mediante autenticación dinámica. Este esquema garantiza la disponibilidad continua de datos, incluso ante interrupciones en la red principal, lo que resulta esencial en aplicaciones industriales críticas.

En conjunto, los resultados validan la robustez, escalabilidad y aplicabilidad práctica de la arquitectura propuesta, confirmando su potencial para ser integrada en infraestructuras del sector petrolero y energético, donde la supervisión en tiempo real constituye un factor estratégico para la eficiencia operativa y la seguridad.

No obstante, se identifican algunas limitaciones que deberán ser atendidas en futuros trabajos, entre ellas la necesidad de evaluar con mayor detalle el consumo energético del nodo bajo diferentes esquemas de muestreo y transmisión, así como el análisis de la autonomía del sistema en operaciones prolongadas. Asimismo, será necesario validar su rendimiento en entornos industriales reales, considerando factores como interferencias electromagnéticas, topografía compleja y variaciones ambientales extremas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Augustin, A., Yi, J., Clausen, T., & Townsley, W. M. (2016). A study of LoRa: Long range & low power networks for the internet of things. *Sensors*, 16(9), 1466. <https://doi.org/10.3390/s16091466>
- Bankov, D., Khorov, E., & Lyakhov, A. (2017). On the limits of LoRaWAN channel access. *2016 International Conference on Engineering and Telecommunication (EnT)*, 10–14. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ENT.2016.011>



- Basford, P. J., Bulot, F. M. J., Apetroaie-Cristea, M., Cox, S. J., & Ossont, S. J. (2020). LoRaWAN for smart city IoT deployments: A long term evaluation. *Sensors*, 20(3), 648. <https://doi.org/10.3390/s20030648>
- Bluetooth SIG. (2020). *Bluetooth core specification 5.2 feature overview*. <https://www.bluetooth.com/bluetooth-resources/bluetooth-core-5-2-feature-overview/>
- Citoni, B., Fioranelli, F., Imran, M. A., & Abbasi, Q. H. (2019). Internet of Things and LoRaWAN-Enabled Future Smart Farming. *IEEE Internet of Things Magazine*, 2(4), 14–19. <https://doi.org/10.1109/IOTM.0001.1900043>
- Digi International. (2021, June 24). IoT in oil and gas: Use cases and applications. *Digi Blog*. <https://www.digi.com/blog/post/iot-in-oil-and-gas>
- DRPress. (2023). Multi-parameter monitoring system for oil wellheads using LoRaWAN. *International Journal of Engineering*, 12(4), 233–241. <https://drpress.org/ojs/index.php/ije/article/view/4558>
- Gao Tek. (2023, March 6). Comprehensive guide for LoRaWAN-enabled oil and gas IoT. *GAO Tek*. <https://gaotek.com/comprehensive-guide-for-lorawan-enabled-oil-and-gas-iot/>
- Georgiou, O., & Raza, U. (2017). Low Power Wide Area Network Analysis: Can LoRa Scale?. *IEEE Wireless Communications Letters*, 6(2), 162–165. <https://doi.org/10.1109/LWC.2016.2647247>
- Haxhibeqiri, J., De Poorter, E., Moerman, I., & Hoebeke, J. (2018). *A Survey of LoRaWAN for IoT: From Technology to Application*. *Sensors*, 18(11), 3995. <https://doi.org/10.3390/s18113995>
- HiveMQ. (2023). IoT in oil and gas industry. *HiveMQ*. <https://www.hivemq.com/solutions/oil-and-gas-industry/>
- Kwiatkowski, A., Drozdowska, K., & Smulko, J. (2021). *Embedded gas sensing setup for air samples analysis*. *Review of Scientific Instruments*, 92(7), 074102. <https://doi.org/10.1063/5.0050445>
- LoRa Alliance. (2020). *LoRaWAN® 1.1 Specification*. LoRa Alliance. https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/lorawantm_specification_-v1.1.pdf
- Loukil, S., Chaari Fourati, L., Nayyar, A., & Chee, K.-W.-A. (2022). Analysis of LoRaWAN 1.0 and 1.1 Protocols Security Mechanisms. *Sensors*, 22(10), 3717. <https://doi.org/10.3390/s22103717>
- Manzano, L. G., Boukabache, H., Danzeca, S., Heracleous, N., Murtas, F., Perrin, D., Pirc, V., Ribagorda Alfaro, A., Zimmaro, A., & Silari, M. (2021). *An IoT LoRaWAN Network for*

- Environmental Radiation Monitoring*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 70, 1-12. <https://doi.org/10.1109/TIM.2021.3089776>
- Mataloto, B., Ferreira, J. C., & Cruz, N. (2019). *LoBEMS — IoT for Building and Energy Management Systems. Electronics*, 8(7), 763. <https://doi.org/10.3390/electronics8070763> MDPI
- RAKwireless. (2022a). *WisBlock RAK1906 sensor module datasheet*. RAKwireless Documentation Center. <https://docs.rakwireless.com/product-categories/wisblock/rak1906/datasheet/>
- RAKwireless. (2022b). *WisBlock RAK4631 quick start guide*. RAKwireless Documentation Center. <https://docs.rakwireless.com/product-categories/wisblock/rak4631/quickstart/>
- RAKwireless. (2022c). *WisBlock RAK5005-O base board quick start guide*. RAKwireless Documentation Center. <https://docs.rakwireless.com/product-categories/wisblock/rak5005-o/quickstart/>
- Reuters. (2025, March 14). AI leading faster, cheaper oil production, executives say. *Reuters*. <https://www.reuters.com/business/energy/official-cerawee-ai-leading-faster-cheaper-oil-production-executives-say-2025-03-14/>
- ResearchGate. (2024). Real-time monitoring and data acquisition using LoRa for a remote solar powered oil well. https://www.researchgate.net/publication/378640054_Real-time_monitoring_and_data_acquisition_using_LoRa_for_a_remote_solar_powered_oil_well
- Reyna, A., Martín, C., Chen, J., Soler, E., & Díaz, M. (2018). On blockchain and its integration with IoT: Challenges and opportunities. *Future Generation Computer Systems*, 88, 173–190. <https://doi.org/10.1016/j.future.2018.05.046>
- Tektelic. (2022). IoT in oil and gas industry. *Tektelic Communications*. https://tektelic.com/wp-content/uploads/TEKTELIC_OilGas.pdf
- Timbergrove. (2023). Internet of Things (IoT) in the oil and gas industry: 4 specific use cases. *Timbergrove*. <https://timbergrove.com/blog/internet-of-things-iot-in-the-oil-and-gas-industry-4-specific-use-cases/>