

# Implementación de una Red LPWAN de Sensores para el Monitoreo de Condiciones Ambientales

**William Alexis Porras Calderón<sup>1\*</sup>**  
**Oscar Yazit Salah García<sup>1</sup>**

1. Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico de Gas.  
Parque Tecnológico UIS Guatiguará. Km 2 vía El Refugio.

Piedecuesta, Santander, Colombia.

\* wporras@cdtdegas.com

## RESUMEN

Con la creciente tendencia de conectar cualquier elemento a internet y tener un control total de cualquier entorno en tiempo real, lo que en la industria se conoce como Industrial Internet of Things (IIOT), la Corporación CDT de Gas busca implementar tecnologías IIoT a sus servicios, ofreciendo a sus clientes soluciones innovadoras y competitivas en el mercado, brindando facilidades de monitoreo, prevención y reacción oportuna en diferentes entornos. Inicialmente se propone la implementación de una red inalámbrica de largo alcance que permita la monitorización de condiciones ambientales a través de sensores de material particulado de 2,5 micras de diámetro (PM 2.5), monóxido de carbono (CO), temperatura y humedad. La monitorización de estas variables se realizará únicamente con la intención de generar un flujo de datos con el fin de probar la efectividad de la conexión y el intercambio de datos de extremo a extremo de la red. A lo largo del artículo se evidenciará el desarrollo de la implementación de la red tras haber realizado previamente una revisión bibliográfica referente a las comunicaciones inalámbricas y medición de condiciones ambientales.

**Palabras clave:** *Internet de las cosas, LoRa, LPWAN, Redes inalámbricas, Calidad del Aire.*

## ABSTRACT

With the growing tendency to connect any element to the Internet and control any environment in real time, which in the industry is known as Industrial Internet of Things (IIOT), The "Corporación CDT de Gas" seeks to implement IIoT technologies in its services, offering its clients innovative and competitive solutions in the market, providing facilities for monitoring, prevention and timely reaction in different environments. Initially, the implementation of a long-range wireless network that allows the monitoring of environmental conditions through sensors of particulate material of 2.5 microns in diameter (PM 2.5), carbon monoxide (CO), temperature and humidity is proposed, the monitoring of these variables will be carried out solely with the intention of generating a data flow in order to test the effectiveness of the connection and the exchange of data from end to end of the network. Throughout the article, the development of the implementation of the network will be evidenced after having previously carried out a bibliographic review regarding wireless communications and measurement of environmental conditions.

**Keywords:** *Internet of Things, LoRa, LPWAN, Wireless Networks, Air Quality.*







## **INTRODUCCIÓN**

El monitoreo y control de magnitudes físicas de un entorno dado son, y han sido, tareas cruciales que han permitido el desarrollo de soluciones integrales a las necesidades que presentan los diferentes sectores económicos. Desde el siglo XIX se han desarrollado sistemas que realizan tareas de adquisición de datos, envío y recepción de información en comunicación con una estación central [7], ubicada a una distancia no muy alejada de los puntos de medición, de aquí nace el concepto de telemetría y ha brindado muchos beneficios, principalmente a la industria, ya que permite centralizar las mediciones de muchas estaciones, y gracias a la automatización, ejecutar una acción en función de las mediciones obtenidas.

Actualmente existe la posibilidad de centralizar todas las mediciones obtenidas en servidores conectados a internet y poder observar dichas mediciones desde cualquier lugar del mundo, por consiguiente, se ha creado una tendencia de conectar todo a internet con el fin de tener control de todo nuestro entorno, y esto es lo que conocemos hoy en día como Internet de las cosas (IoT), este concepto ha tomado gran fuerza, debido a que su fin es precisamente conectar cualquier objeto a Internet, permitiendo obtener en tiempo real mediciones o estados de dichos objetos, llevar un registro histórico de los datos obtenidos y predecir el comportamiento de dichos datos, mediante algoritmos y procesamiento, permitiendo reaccionar oportunamente a condiciones desfavorables por medio de actuadores.

La Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas (CDT de Gas), ha visto en la telemetría y el IoT una gran oportunidad para ofrecer

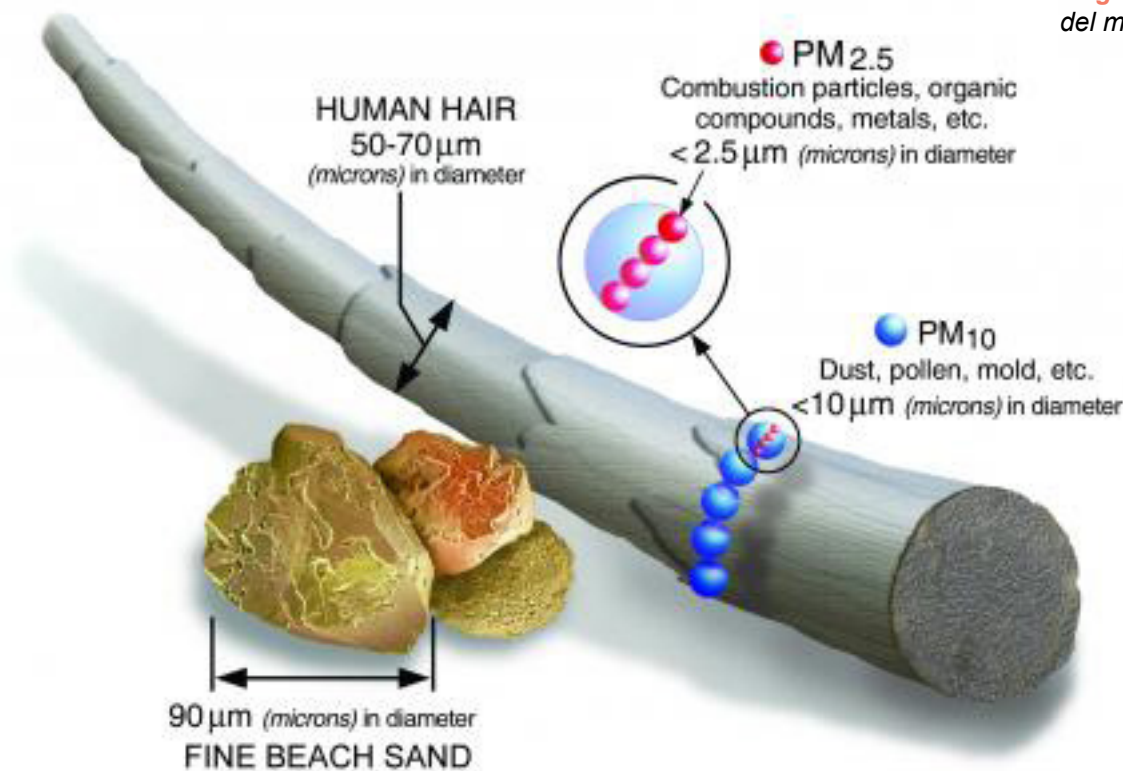
a sus clientes soluciones integrales, con todas las ventajas y prestaciones descritas anteriormente. Es por ello que el CDT de Gas ha decidido incursionar en el mundo del IoT, a través de las redes LPWAN (Low-Power Wide-Area Network), redes que se irán describiendo a lo largo del artículo.

Como primer contacto con esta tecnología se ha propuesto realizar una red de sensores que monitoree condiciones ambientales, realizando mediciones de temperatura, humedad relativa, material particulado menor a 2.5 micras (PM 2.5) y monóxido de carbono (CO), usando el protocolo de comunicación LoRa, uno de los tantos protocolos de comunicación en las redes LPWAN.

El objetivo principal de este proyecto es el de implementar toda la infraestructura de red, realizar pruebas de comunicación de extremo a extremo y lograr la visualización de los datos en una interfaz gráfica web, por ello los datos de calidad del aire serán usados únicamente como flujo de datos para las pruebas de conectividad de la red.

## **MARCO TEÓRICO**

Este artículo presenta el diseño e implementación de una infraestructura de red de sensores LPWAN usando comunicación inalámbrica LoRa, que monitoree concentraciones de contaminantes del aire. Inicialmente se realiza una revisión bibliográfica de toda la terminología y temática relacionada con la red a implementar, la cual se describe a continuación.



**Figura 1. >> Diámetro del material particulado.**  
Fuente: EPA [9].

## 1. CALIDAD DEL AIRE

La calidad del aire está asociada a la concentración de contaminantes presentes en el aire que a diario respiramos, contaminantes altamente perjudiciales para la salud, que pueden generar afectaciones en el sistema respiratorio e incluso pueden generar problemas cardiacos si las concentraciones de los contaminantes son muy altas.

Los contaminantes más perjudiciales encontrados en el aire son [9]:

- **Material particulado (PM):** Son partículas finas inhalables, con diámetros inferiores o iguales a 10 micrómetros, lo suficientemente pequeñas para poder filtrarse fácilmente en los pulmones. Son producidas principalmente por vehículos pesados que utilizan diésel como combustible, que al momento de combustión generan partículas muy finas compuestas por metales pesados. El contaminante con mayor potencial de afectación, es el material particulado menor a 2,5 micras (PM 2.5).
- **Monóxido de carbono (CO):** Es un gas incoloro e inodoro que puede ser dañino si se inhala en grandes cantidades. El CO se libera cuando algo se quema. Las mayores fuentes de CO para el aire exterior son automóviles, camiones y otros vehículos o maquinarias que usan combustibles fósiles. Respirar aire con una alta concentración de CO reduce la cantidad de oxígeno que puede transportarse en el torrente sanguíneo a órganos críticos como el corazón y el cerebro.
- **Dióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>):** Son gases altamente reactivos conocidos como óxidos de nitrógeno (NOx). El NO<sub>2</sub> se genera principal-

mente en el aire por la quema de combustible, a partir de las emisiones de los automóviles, camiones, autobuses y plantas de energía. Las exposiciones prolongadas a concentraciones elevadas de NO<sub>2</sub> pueden contribuir al desarrollo del asma y potencialmente aumentar la susceptibilidad a las infecciones respiratorias.

Un estudio de la Organización Mundial de la Salud, revela que, una de cada ocho muertes ocurridas a nivel mundial, es ocasionada por la contaminación del aire. En Colombia, el Departamento Nacional de Planeación estimó que, durante el año 2015, la contaminación del aire estuvo asociada a 10 527 muertes y 67,8 millones de síntomas y enfermedades [4].

Es por ello que se han generado alertas para controlar, evaluar y monitorear las concentraciones de estos componentes.

## 2. RED INFORMÁTICA

Una red informática está comprendida por dos o más dispositivos conectados entre sí, que comparten recursos de hardware (impresoras, sistemas de almacenamiento, sistemas de audio, etc.) y software (archivos, aplicaciones, programas, etc.).

### 2.1. TIPOS DE REDES

#### 2.1.1. SEGÚN SU UTILIZACIÓN:

**Redes compartidas:** Son aquellas redes en las que un gran número de usuarios pueden ingresar a ellas.

**Redes exclusivas:** Son aquellas redes que conectan dos o más puntos de manera exclusiva.

Principalmente por motivos de seguridad, velocidad o limitaciones de red.

#### 2.1.2. SEGÚN SU PROPIEDAD:

**Redes privadas:** Son redes con acceso limitado a dispositivos específicos los cuales previamente fueron autorizados para acceder a la red.

**Redes públicas:** Son redes abiertas a cualquier dispositivo que lo solicite.

#### 2.1.3. SEGÚN SU UBICACIÓN Y COBERTURA DE SERVICIO:

**Redes de área local (LAN):** Son redes de dispositivos conectados a cortas distancias, por ejemplo, una oficina.

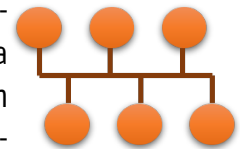
**Redes de área metropolitana (MAN):** Son redes más extensas que las anteriores, están formadas por varias LAN conectadas entre sí.

**Redes de área amplia (WAN):** cubren una zona extensa, a menudo incluso todo un país o continente.

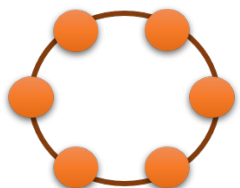
### 2.2. TOPOLOGÍAS DE RED

La topología de red hace referencia a forma geométrica en que los dispositivos de la red están conectados entre sí.

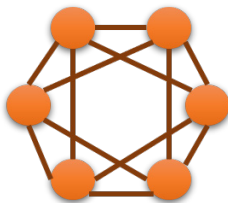
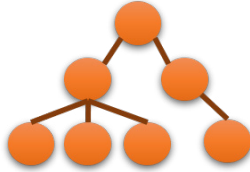
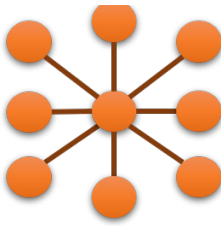
- **Configuración en bus:** todos los ordenadores de la red están conectados a un único canal de comunicaciones.



- **Configuración en anillo:** los ordenadores se comunican en forma circular, de manera que cada uno está conectado al siguiente y al anterior.



- **Configuración en estrella:** todos los ordenadores están conectados a un mismo servidor central y las comunicaciones se realizan a través de él.
- **Configuración en árbol:** similar a una serie de estrellas interconectadas entre sí.
- **Configuración en malla:** en este tipo de red, todos los ordenadores están conectados entre sí punto a punto, lo que permite que cada equipo pueda comunicarse en paralelo con otro en caso necesario.



tipo de ondas para transmitir datos análogos o digitales a través del espectro electromagnético, más específicamente en el rango de las radiofrecuencias (8 kHz – 300 GHz).

Una característica importante de las ondas electromagnéticas dentro del rango de las radiofrecuencias es que son radiaciones no ionizantes, adicionalmente los entes gubernamentales regulan la potencia de propagación de este tipo de ondas, con el fin de evitar un impacto negativo en la salud de los seres vivos. La distancia de comunicación que permite un enlace inalámbrico es limitada debido a las pérdidas por espacio libre, línea de vista, potencia de transmisión y sensibilidad del receptor.

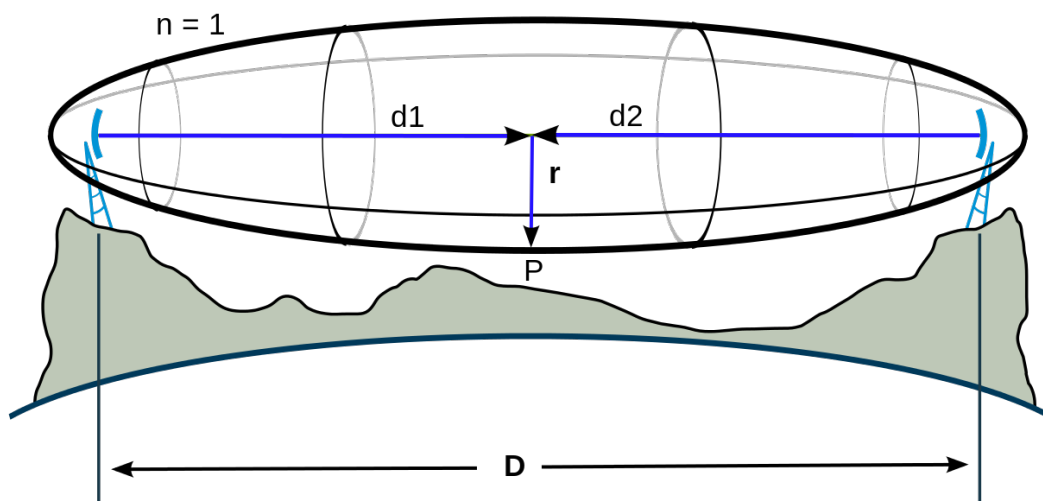
### 3.1. ZONA DE FRESNEL

Es una zona de forma elíptica generada alrededor de la línea de vista directa entre un enlace de comunicación inalámbrica punto a punto. Cualquier objeto dentro de la zona de Fresnel de un enlace puede degradar la señal por reflexión.

El radio máximo de la zona de Fresnel de un enlace de comunicación está dado por:

## 3. COMUNICACIÓN INALÁMBRICA

Las comunicaciones inalámbricas son posibles gracias a las ondas electromagnéticas, ondas que se propagan a través del espacio libre transportando energía a la velocidad de la luz [3]. Se aprovecha el principio de propagación de este



**Figura 2. >> Zona de Fresnel. Fuente: Josiah McClurg.**

$$r = 8,657 \sqrt{\frac{D}{F}}$$

Donde,

- r = radio, en metros (m).
- D = distancia, en kilómetros (km) (d1=d2, D=d1+d2).
- F = frecuencia de transmisión, en Giga hercios (GHz).

Una obstaculización inferior al 40% del área de la zona de Fresnel no genera afecciones significantes a la señal, mayor al 40% las pérdidas son considerables.

#### 4. RED LPWAN

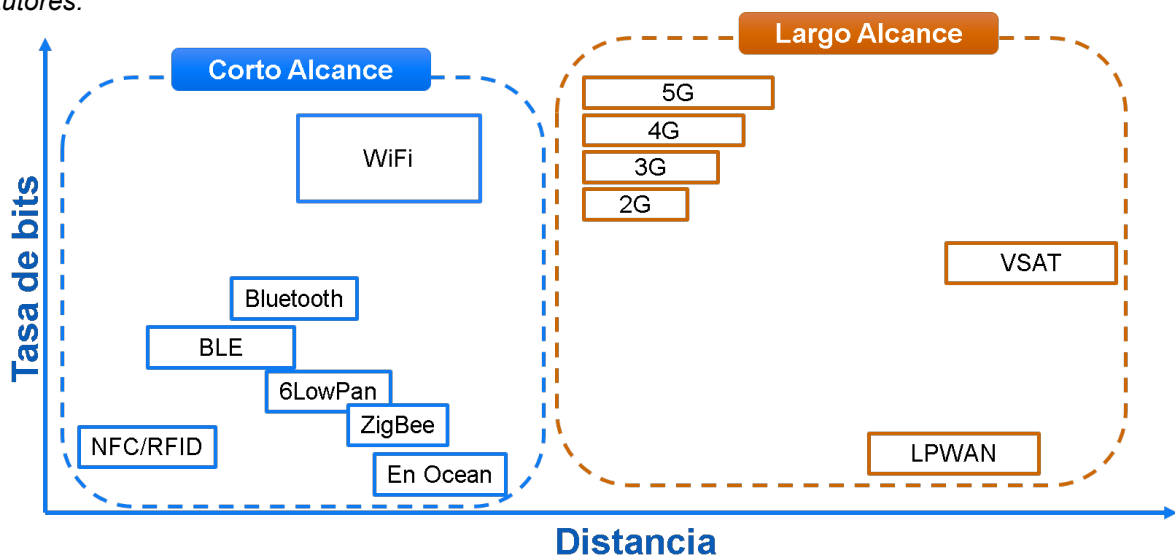
Del inglés Low-Power Wide-Area Network, es un tipo de red de telecomunicaciones inalámbricas, diseñada para permitir comunicaciones de hasta más de 10 kilómetros de distancia con lí-

nea de vista y con una tasa de transferencia de datos baja, entre los 100 bps y los 200 kbps [8].

##### 4.1. CARACTERÍSTICAS

- **Largo alcance.** La distancia de comunicación entre dispositivos varía desde unos pocos kilómetros en áreas urbanas hasta más de 10 km en entornos rurales.
- **Bajo consumo de energía.** Redes optimizadas para un bajo consumo de energía, los módulos de comunicación (transceptores) LPWAN pueden funcionar con baterías pequeñas y económicas durante años.
- **Bajo costo.** Los protocolos de bajo consumo de recursos y su largo alcance combinado con una topología en estrella o malla, reducen la complejidad en el diseño de hardware e infraestructura de red y reducen los costos de implementación.
- **Tasa de bits y ciclo de trabajo.** El ambiente o entorno en donde se implementan las redes LPWAN se caracterizan por que la variación de las mediciones obtenidas fluctúa gradualmente en el transcurso del tiempo,

**Figura 3. >> Comparativa de tecnologías inalámbricas.**  
Fuente: Autores.



gracias a ello es posible reducir la tasa de bits de la red y el ciclo de trabajo de los nodos sensores a alrededor del 1%.

- **Escalabilidad.** Una red LPWAN debe ser escalable, ya que este tipo de redes, usualmente, presentan un crecimiento considerable en un lapso de tiempo corto, por ende, todos sus dispositivos de red, principalmente el gateway y el servidor, deben ser capaces de soportar el incremento de flujo de información o brindar la facilidad de acoplar nuevos dispositivos que permitan escalar la red.

Estas características diferencian a las redes LPWAN de otras tecnologías inalámbricas como Wi-Fi, Bluetooth, redes celular (GSM-3G-4G) y Zigbee [5].

#### 4.2. ARQUITECTURA DE RED LPWAN

La arquitectura de una red LPWAN se basa en topología tipo estrella, es decir, muchos dispositivos finales, también llamados nodos, se comunican directamente con un dispositivo central, el cual tiene funciones de enrutamiento para direccionar toda la información suministrada por los nodos, a una estación base o servidor, esta estación le brinda al administrador de red la capacidad de instrumentar, monitorear y ejecutar acciones ante eventos y fenómenos en un entorno especificado.

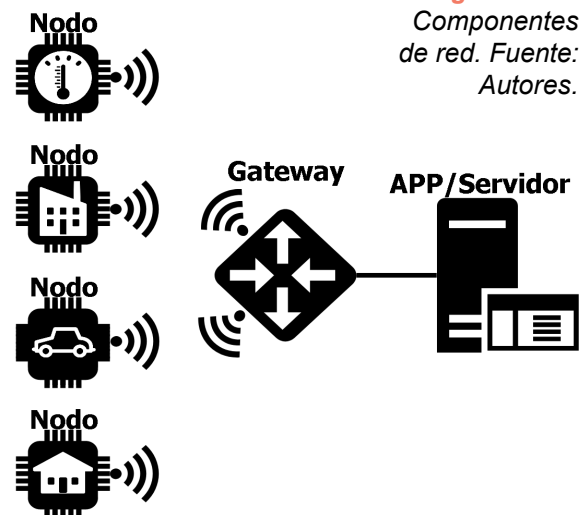
##### 4.2.1. COMPONENTES DE LA RED

Hay tres componentes básicos en una red de sensores:

- Un conjunto de dispositivos, llamados **nodos**, equipados con sensores, módulos de procesamiento y módulos de comunicación, normalmente inalámbrica, distribuidos en un área específica.
- Uno o más puntos centrales de agrupamien-

to de información, normalmente conocido como **gateway**.

- Una **estación base** compuesta por un conjunto de recursos informáticos en el punto central, o más allá, para controlar estados de los dispositivos, manejar correlación de datos, tendencias de eventos, consulta de estados, minería de datos, etc.



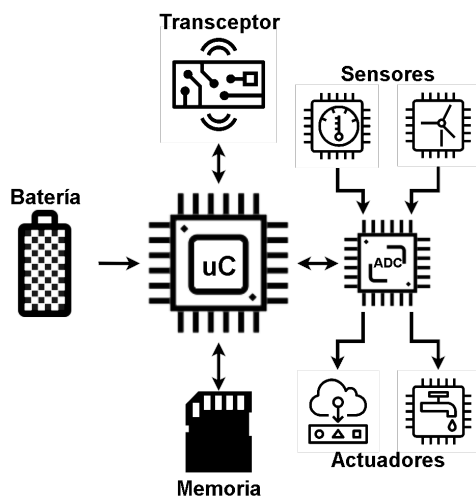
**Figura 2. >>**  
Componentes de red. Fuente: Autores.

##### 4.2.1.1. NODO SENSOR

Los nodos sensores se encargan de medir variables físicas en un entorno determinado con gran detalle, además, realizan procesamiento de datos, ejecutan alguna acción mediante actuadores y se comunican, normalmente de manera inalámbrica, con el Gateway a través de un transceptor. En su arquitectura más básica, se componen de un microcontrolador, una fuente de alimentación, una memoria interna o externa, un módulo de comunicación o transceptor y una variedad de sensores y actuadores.



**Figura 5. >> Estructura de nodo sensor.** Fuente: Autores.



El gateway periódicamente realizará consultas para comprobar el estado de la red y recogerá la información recolectada por los sensores, para posteriormente enviarlas hacia un servidor a través de protocolos como TCP/IP.

#### 4.3. TECNOLOGÍAS DE COMUNICACIÓN LPWAN

Las tecnologías de comunicación más usadas en las redes LPWAN son LoRa, Sigfox y NB-IoT. Éstas fueron diseñadas para permitir desplegar una red de sensores con las características anteriormente descritas en las redes LPWAN, todas ellas difieren una de la otra en cuanto a su funcionamiento y método de implementación.

##### 4.2.1.2. GATEWAY

Para poder visualizar los datos obtenidos por los nodos sensores a través de un aplicativo, primero se debe centralizar toda la información y establecer un medio de comunicación entre los nodos sensores y el aplicativo. Para esto sirve el gateway o nodo central.

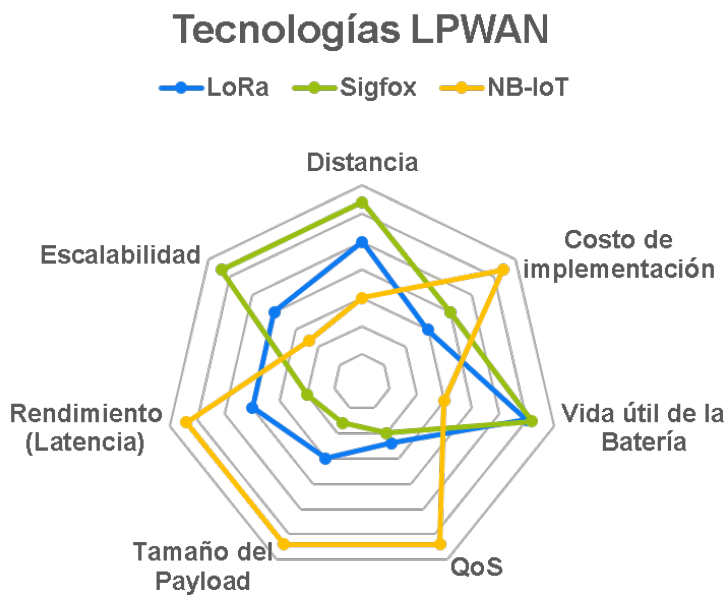
Las principales diferencias entre estas tecnologías se presentan en la Tabla 1 y la Figura 4.

##### 4.3.1. LORA (LONG RANGE)

LoRa es una de las tecnologías de comunicación inalámbrica usadas en las redes LPWAN,

**Tabla 1. >> Comparación de tecnologías de comunicación LPWAN.** Adaptado de [8].

	Sigfox	LoRa	NB-IoT
Modulación	BPSK	CSS	QPSK
Frecuencia	433, 868, 915 MHz	433, 868, 915 MHz	LTE Frecuencia licenciada
Ancho de banda	200 Hz	125-250-500 kHz	200 kHz
Tasa de bits	100 bps	50 kbps	200 kbps
Mensajes/día (máx)	140 (UL), 4 (DL)	Ilimitado	Ilimitado
Tamaño máximo del <i>payload</i>	12 bytes (UL), 8 bytes (DL)	243 bytes	1600 bytes
Distancia	10 km (urbano), 40 km (rural)	5 km (urbano), 20 km (rural)	1 km (urbano), 10 km (rural)
Inmunidad a la interferencia	Muy alto	Muy alto	Baja
Tasa de bits adaptable	No	Sí	No
Redes privadas	No	Sí	No



**Figura 6. >> Tecnologías de comunicación de redes LPWAN. Adaptado de [8].**

para dispositivos de bajo consumo energético y comunicaciones a largas distancias (mayor a 5 km).

Dentro de la terminología del protocolo de comunicación LoRa encontramos dos términos principales en los cuales se establecen los procedimientos, protocolos y estándares para permitir una comunicación con las características de una red LPWAN, ellos son: LoRa y LoRaWAN. Siendo LoRa la capa física del protocolo de comunicación y LoRaWAN el stack de protocolos a nivel de enlace de datos.

#### 4.3.1.3. LORA (CAPA FÍSICA)

LoRa es la capa física de la tecnología de comunicación, lo que hace referencia a todo método de conversión de señales digitales o análogas a señales físicas que puedan ser transmitidas por un medio de comunicación físico, en este caso en específico, datos binarios transmitidos como ondas electromagnéticas no ionizantes a través del espacio libre (medio), viajando a la velocidad de la luz [1].

LoRa también comprende todo método de modulación, demodulación y encriptación de los datos para establecer una comunicación segura de transmisor a receptor. La modulación LoRa está basada en la modulación Chirp Spread Spectrum (CSS).

CSS es una técnica de modulación de espectro ensanchado que utiliza pulsos llamados chirridos o chirps para codificar la información. Un chirp es un tono en donde la frecuencia aumenta (up-chirp) o disminuye (down-chirp) en el tiempo.

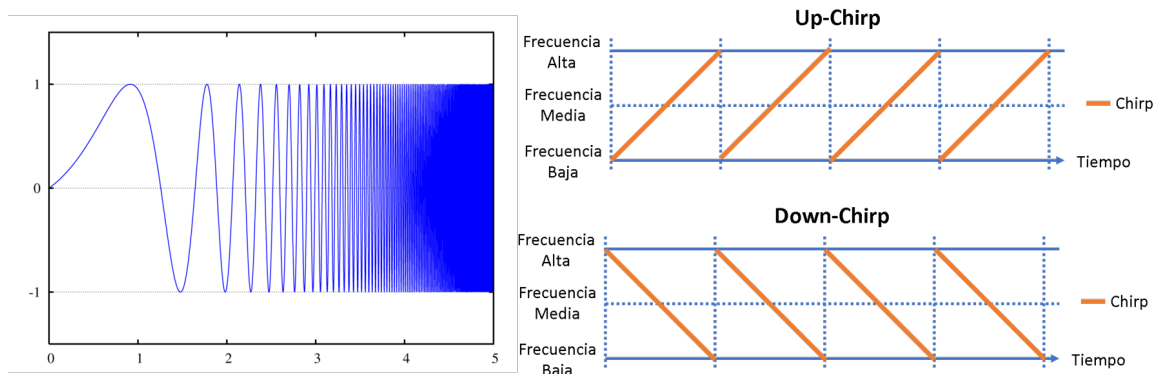
##### 4.3.1.3.1. ANCHO DE BANDA

Como se muestra en la Tabla 1, LoRa usa tres anchos de banda, 125 kHz, 250 kHz y 500 kHz. Cada chirp generado durante la comunicación usa la totalidad del ancho de banda.

##### 4.3.1.3.2. FACTOR DE PROPAGACIÓN (SF - SPREADING FACTOR)

El factor de propagación es la duración del chirp en el aire. LoRa opera con factores de propaga-

Figura 7. >> Chirp. Fuente: Autores.



ción del 7 al 12, donde, SF7 es el tiempo más corto en el aire y SF12 el más largo.

Cuanto mayor sea el factor de propagación, mayor será la distancia posible de comunicación, pero la cantidad de datos a transmitir serán limitados, tal y como se aprecia en la Tabla 2.

**4.3.1.3.3. VELOCIDAD DE DATOS (DR - DATA RATE)**

LoRa usa diferentes rangos de frecuencias, factores de propagación y anchos de banda según la ubicación en donde se implementen, cada

país establece los parámetros de transmisión para esta tecnología de comunicación. Específicamente para Colombia, las comunicaciones con tecnología LoRa se deben encontrar en el rango de frecuencias de los 915 MHz. Para la mayoría de países del continente americano como Estados Unidos y Colombia se usan las siguientes configuraciones:

**4.3.1.4. LORAWAN**

LoRaWAN es un conjunto de protocolos de red de baja potencia y área amplia diseñado para conectar “cosas” operadas por batería a inter-

Tabla 2. >> Configuraciones de comunicación LoRa. Adaptado de [2].

Velocidad de los datos (DR)	Configuración	bits/s	Tamaño máximo (bits)
DR0	SF10/125 kHz	980	19
DR1	SF9/125 kHz	1 760	61
DR2	SF8/125 kHz	3 125	133
DR3	SF7/125 kHz	5 470	250
DR4	SF8/500 kHz	12 500	250
DR8	SF12/500 kHz	980	41
DR9	SF11/500 kHz	1 760	117
DR10	SF10/500 kHz	3 900	230
DR11	SF9/500 kHz	7 000	230
DR12	SF8/500 kHz	12 500	230
DR13	SF7/500 kHz	21 900	230



net, cumpliendo con los requisitos clave de internet de las cosas (IoT), como comunicación bidireccional, servicios de comunicación, seguridad punto a punto, movilidad y localización.

LoRaWAN define el protocolo de comunicación y la arquitectura del sistema para la red, principalmente usando arquitectura de red tipo estrella.

El protocolo y la arquitectura de la red tienen la mayor influencia en la determinación de la vida útil de la batería de un nodo, la capacidad de la red, la calidad del servicio, la seguridad y la variedad de aplicaciones a las que da servicio la red [6].

Todo el stack de protocolos que comprende LoRaWAN es estandarizado por la entidad sin ánimo de lucro "LoRa Alliance".

#### 4.3.1.5. CLASES DE DISPOSITIVOS LORA

##### 4.3.1.5.1. CLASE A

Todo dispositivo LoRa debe soportar la configuración clase A, la cual consiste en comunicación bidireccional a través de tres ventanas de enlace, la primera ventana (ventana de transmisión) se utiliza para enviar datos desde el nodo hacia el servidor o APP (uplink), la segunda y tercera ventanas (ventana de recepción) se utilizan para recibir datos provenientes desde el servidor o APP (downlink), solo una de estas dos ventanas de recepción será la que reciba la información proveniente desde el servidor o la APP, si se obtuvo alguna información en la primera ventana de recepción, no habrá una segunda ventana de recepción.

La clase A es la configuración óptima para el máximo ahorro de consumo energético ya que

el nodo se encontrará la mayor parte del tiempo de funcionamiento en modo "sleep", en este modo el dispositivo no realiza ninguna comunicación a la red y sus periféricos se encontrarán desactivados. Cada cierto intervalo de tiempo el dispositivo saldrá del estado "sleep" y realizará la comunicación de las tres ventanas comentadas anteriormente.

##### 4.3.1.5.2. CLASE B

El funcionamiento de los dispositivos clase B es igual a los dispositivos clase A, con la diferencia de que estos dispositivos generan ventanas de recepción adicionales cada cierto intervalo de tiempo para recibir datos provenientes del servidor o APP con mayor frecuencia.

##### 4.3.1.5.3. CLASE C

Los dispositivos clase C están pensados para aplicaciones en donde el nodo se encontrará alimentado directamente a la red eléctrica local, debido a que las ventanas de transmisión y recepción estarán siempre activas y no existirá el estado "sleep", por lo cual, el consumo eléctrico será mucho mayor.

## METODOLOGÍA

Para realizar la implementación de la infraestructura de red LPWAN usando comunicación LoRa se llevaron a cabo las siguientes actividades:

### 1. **Revisión bibliográfica y adquisición de conocimientos**

En esta etapa se revisó la documentación disponible en cuanto a calidad del aire, telecomunicaciones, redes de sensores, telemetría, redes LPWAN, comunicaciones inalámbricas y demás temas relacionados para

garantizar una correcta implementación de la red. El resumen de esta revisión bibliográfica se describe en la sección de Marco Teórico de este artículo.

**2. Diseño de red, hardware y software**

Partiendo de la topología básica de una red LPWAN, en la cual se usa la configuración en estrella, donde los nodos finales se comunican con un nodo centralizador y a través de un conjunto de servicios informáticos ubicados en un servidor, se realiza la visualización de la información recolectada y adicionalmente todo tipo de procesamiento de datos, se realiza el siguiente esquema de infraestructura de red.

El flujo de la información inicia en los nodos, los cuales obtendrán información de la calidad del aire, monitoreando concentraciones de PM 2.5, monóxido de carbono, temperatura y humedad. Estos datos se enviarán a través de comunicación LoRa hacia un gateway LoRa, el cual centralizará la información de todos los nodos y los enviará por TCP/IP usando el protocolo de comunicación MQTT hacia una máquina virtual en la nube. Esta máquina virtual o servidor ser-

virá como “broker MQTT” para que, mediante el sistema de publicaciones y suscripciones de este protocolo, pueda recibir la información de manera organizada, diferenciando los datos de cada uno de los nodos, adicionalmente se configuraron los servicios que permitirán la visualización y el procesamiento de los datos recolectados.

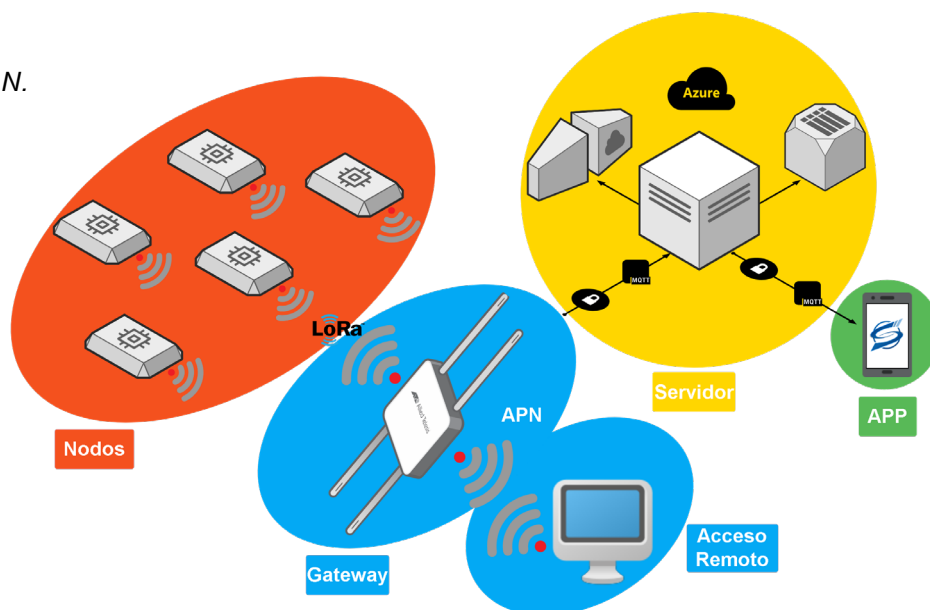
**2.1. NODO**

El nodo tendrá la función de servir como recolector de información, para este caso en específico, será un dispositivo capaz de medir concentraciones y niveles de material particulado de 2.5 micras, monóxido de carbono, temperatura y humedad, adicionalmente tendrá la capacidad de establecer un enlace a través de comunicación inalámbrica LoRa con un gateway para enviar toda la información obtenida.

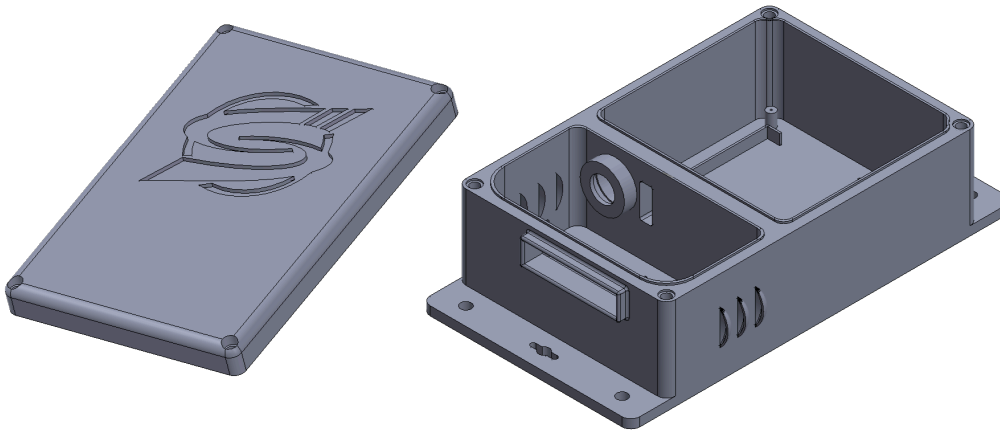
El nodo desarrollado funcionará con configuración en clase A, con intervalos de operación cada 15 minutos, factor de propagación 8 con un ancho de banda de 125 kHz.

El nodo contará con los siguientes componen-

**Figura 8. >>**  
 Diseño de red LPWAN.  
 Fuente: Autores.



**Figura 9. >>** Carcasa del nodo.  
Fuente: Autores.



tes:

- **Procesador:** SAM D21 – 48 MHz.
- **Memoria Flash:** 256 kb.
- **Comunicación:** UART, SPI, I2C.
- **Transceptor LoRa:** SX1276 a 915 MHz.
- **Sensores:** PM 2.5 (DN7C3CA007 Sharp), CO (ME2-CO Winsen), temperatura y humedad (SI7021 Silicon Labs).
- **Actuadores:** 2 LEDs de señalización y una pantalla OLED de 0,96 pulgadas.
- **Carcasa:** impermeable impresa en material ABS, diseñada en Solidworks.
- **Batería:** LiPo 3,7 VDC y panel solar de 6 VDC.

## 2.2. GATEWAY

El gateway centralizará toda la información de los nodos y la enviará hacia un servidor en Internet, este gateway tendrá las siguientes características:

- **Procesador:** ARM9 – 400 MHz.
- **Sistema Operativo:** Linux 3.12.
- **Transceptor:** SX1301 – 8 Canales – 915 MHz.
- **Alimentación eléctrica:** PoE 48 VDC 25 W.
- **Comunicación WAN:** ethernet y celular.
- **Carcasa:** IP67 Outdoor.

El gateway cuenta con servicios FTP, SSH, No-

de-Red, WEB y MQTT, los cuales permitirán el enrutamiento de los datos recibidos a través de comunicación LoRa hacia el servidor en internet por medio del protocolo TCP/IP.

## 2.3. SERVIDOR

Para el servidor se usa una máquina virtual en la nube con sistema operativo Ubuntu Server. En este servidor se configuran los mismos servicios que en el gateway para así establecer una comunicación bidireccional usando los mismos protocolos de comunicación.

## 3. ACOPLAMIENTO DE LOS COMPONENTES DE LA RED

Los nodos se comunicarán con el gateway usando el protocolo LoRa. En este protocolo se generan dos llaves encriptadas, una para la red y otra para la aplicación, además cada transceptor tiene un código único, similar a una MAC, llamado EUI. El EUI del nodo y las llaves de encriptación son registradas en el gateway de manera automática o manual dentro de la base de datos del gateway antes de realizar la comunicación. Dentro del nodo también se configura el EUI del transceptor del gateway junto con las llaves de



red y de aplicación. Al encender el nodo, este intentará establecer comunicación con el gateway enviando su EUI y las llaves registradas, con estas credenciales el gateway verifica si puede permitir la comunicación con el nodo, de esta manera se mantiene la red privada, permitiendo la comunicación de datos únicamente con dispositivos autorizados. Posteriormente a la autenticación de los nodos en la red se logran observar todos los datos recolectados por los sensores en el gateway, por lo cual se procede a establecer el enrutamiento de los datos centralizados hacia el servidor a través del protocolo TCP/IP por medio del sistema de publicaciones y suscripciones de MQTT. Finalmente, en el servidor se configura un panel de control a través de una página web para permitir la visualización en tiempo real de los datos obtenidos por el nodo. En el panel de control adicionalmente se configuran dos interruptores ON/OFF que permitirán probar la comunicación downlink encendiendo o apagando los LEDs integrados en el nodo.

## RESULTADOS

Para verificar el correcto funcionamiento de la red y sus dispositivos, se realizaron pruebas de cobertura, integridad de los datos, seguridad y resistencia de los materiales en condiciones reales.

### 1. Prueba de cobertura

Para la prueba de cobertura de comunicación LoRa punto a punto, se ubicó el gateway en la terraza de la sede administrativa del CDT de Gas, ubicada en el barrio Provenza de la ciudad de Bucaramanga, más específicamente en las coordenadas 7.084653, -73.113639, a una altura de 10 metros res-

**Figura 10.** >> Gateway LoRa CDT. Fuente: Autores.



pecto al nivel del suelo. Se estableció una ruta de un radio de aproximadamente 5 kilómetros de distancia respecto a la posición del gateway.

Durante el test drive se intentaba establecer comunicación con el gateway usando diferentes configuraciones de factor de propagación y niveles de potencia de la señal, como resultado se obtuvo el mapa de calor que se puede apreciar en la Figura 10, donde se grafica la fuerza de la señal en dBm en cada punto de medición.

Las mediciones de fuerza de la señal se realizaban a dos metros del nivel del suelo a excepción de un punto a una altura de 35 metros respecto el suelo, con línea de vista directa, una obstaculización inferior al 40% y a una distancia de 1,88 Km entre el gateway y el nodo, en la cual se obtuvieron como re-

sultado potencias de señal superiores a los -80 dBm. Las mediciones cercanas a este punto a una altura de unos 2 metros y una mayor obstaculización de la zona de Fresnel debida a las edificaciones, reportaron enlaces de comunicación con potencias inferiores a los -95 dBm, por lo cual, se evidencia el gran impacto de las obstaculizaciones dentro de la zona de Fresnel en el enlace de comunicación punto a punto.

El punto más lejano en donde se logró establecer comunicación fue en el viaducto provincial, más conocido como "Puente de la novena" ubicado a 3,16 Km del gateway.

2. **Prueba de permeabilidad, duración de la batería y resistencia del material del nodo**

La carcasa del nodo se diseñó en el software SolidWorks y se imprimió en una impresora 3D con material ABS, dentro del diseño se implementó un sistema de empaques con O-rings para evitar el ingreso de agua o humedad al interior del nodo, los cuales pueden provocar degradación del circuito electrónico o corto circuito en las conexio-

nes internas.

La prueba consistió en ubicar el nodo en un lugar exterior a la intemperie durante un lapso de una semana (26/02/2019 – 05/03/2019) enviando datos de calidad del aire cada 15 minutos.

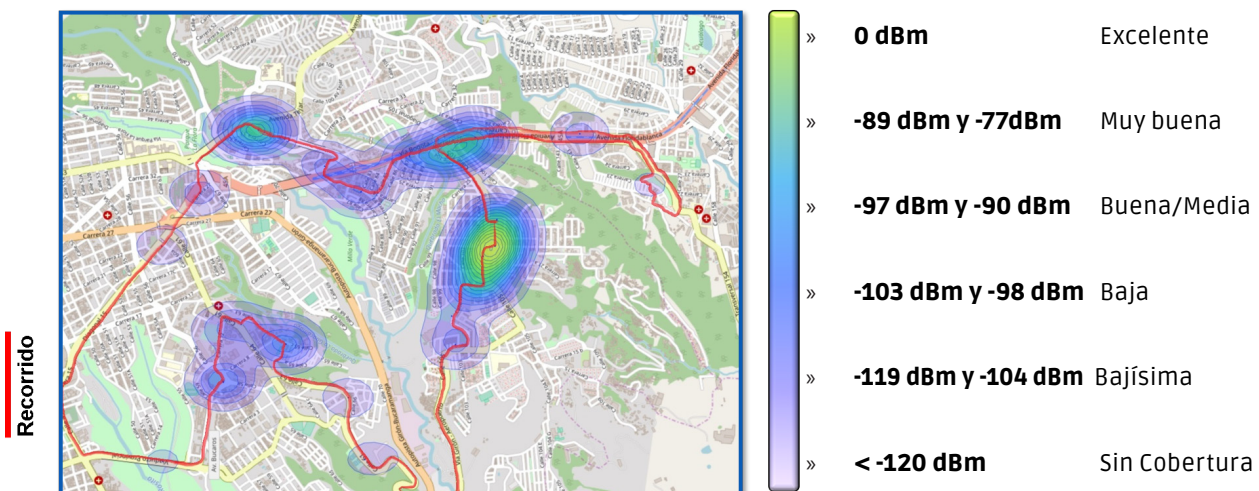
Durante esta semana el nodo transmitió y funcionó sin problema alguno, a pesar que hubo días de lluvia con fuertes vientos, no se presentó ninguna filtración de agua u otro agente exterior que pudiera ocasionar algún malfuncionamiento en el nodo.

A continuación, se presentan los datos obtenidos por el nodo:

Como se puede observar en las gráficas, hubo una comunicación constante sin interrupciones durante todo el periodo de prueba, a pesar de los días nublados y las lluvias que se presentaron en estas fechas.

Partiendo de la Figura 18, se observa cómo el nodo se mantuvo dentro del rango de voltaje

**Figura 11. >> Mapa de calor de cobertura. Fuente: Autores.**



Recorrido

**Figura 12. >>**

**Máxima distancia de comunicación alcanzada. Fuente: Autores.**



necesario para su operación siendo 4 V el voltaje máximo de carga y 3 V el voltaje mínimo de operación.

De la Figura 15 se puede apreciar que durante las horas pico de tránsito vehicular (de 6 A.M. a 8 A.M. y de 5 P.M. a 8 P.M.) las concentraciones de monóxido de carbono fueron más elevadas, por lo cual se infiere que las emisiones de contaminación generada por los vehículos ayudan al desarrollo de afecciones respiratorias y cardiacas en los seres humanos.

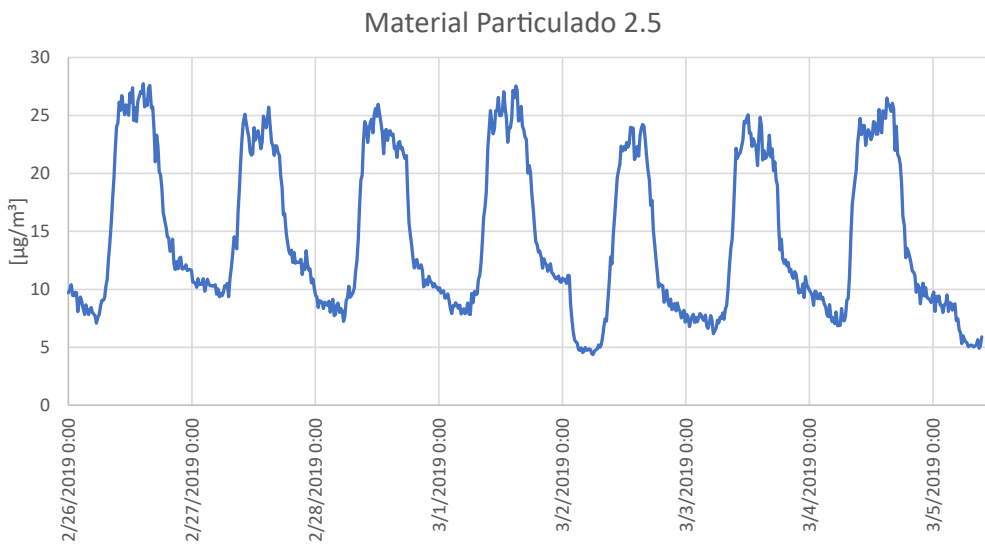
Las mediciones del sensor de PM 2.5 usado parecen ir muy ligadas a la humedad y temperatura del ambiente, pero según la revisión bibliográfica las mediciones del sensor usado no son muy veraces, la tecnología de estos sensores de bajo costo aún está en desarrollo, por ello no pueden ser usados aún como medidores de referencia.

**Figura 13. >> Ubicación del nodo sensor. Fuente: Autores.**



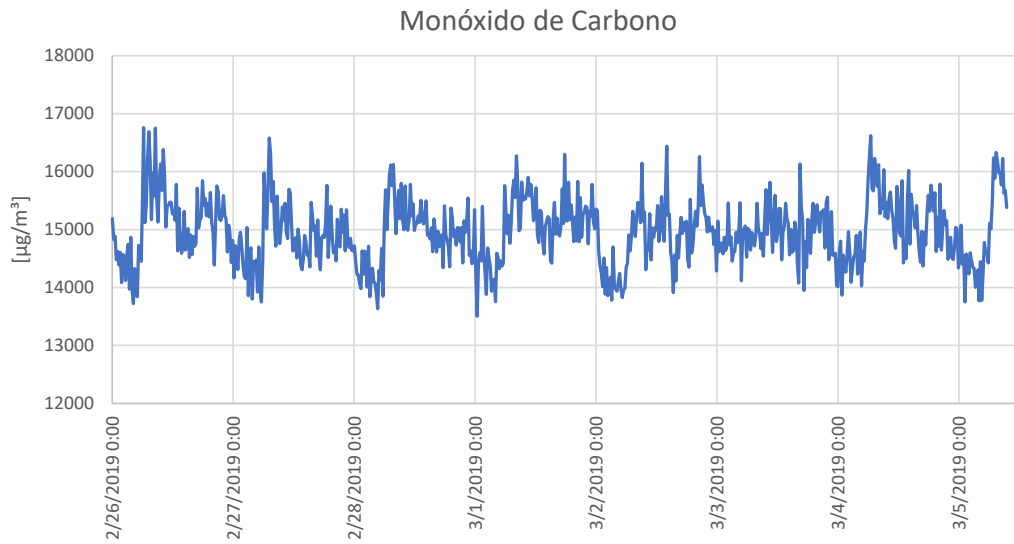
## CONCLUSIONES



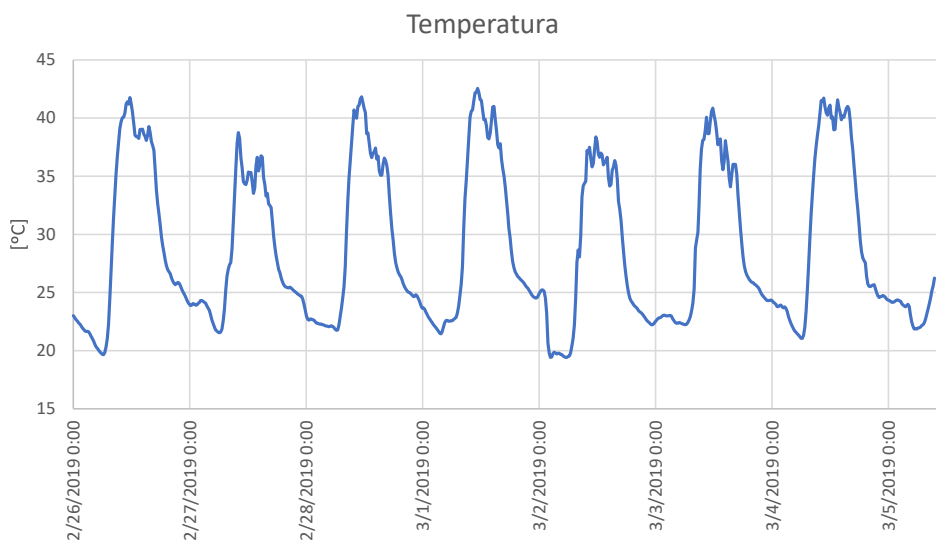


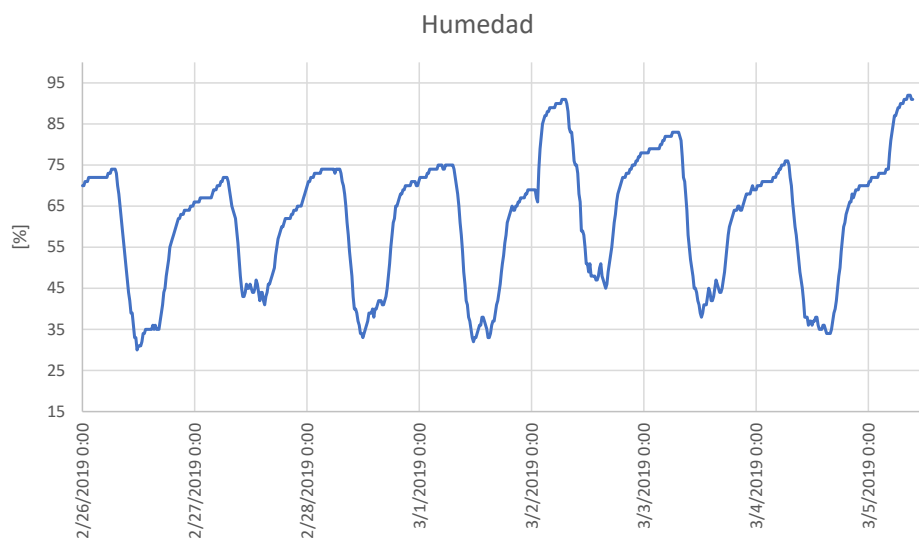
**Figura 14. >>**  
Gráfico de PM 2.5.  
Fuente: Autores.

**Figura 15. >>**  
Gráfico de CO.  
Fuente: Autores.



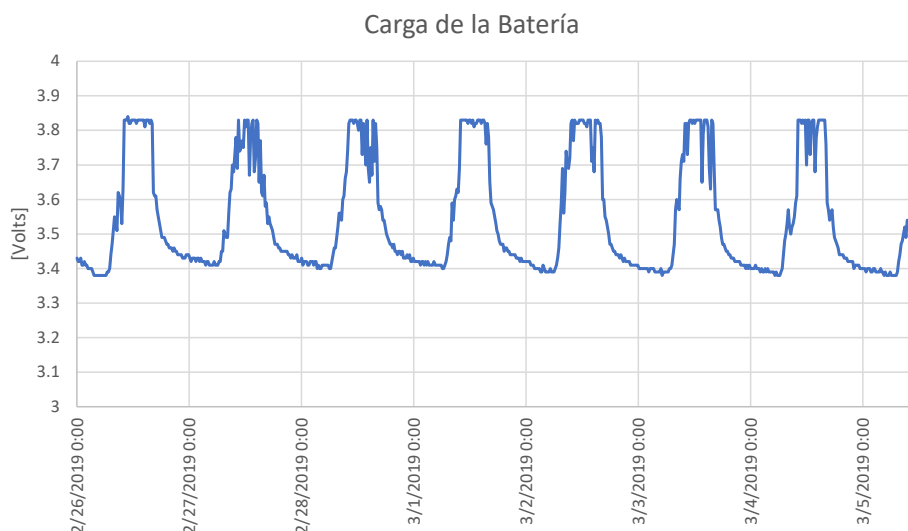
**Figura 16. >>**  
Gráfico de  
Temperatura.  
Fuente: Autores.





**Figura 17. >>**  
**Gráfico de**  
**Humedad.**  
**Fuente: Autores.**

**Figura 18. >>**  
**Gráfico de**  
**Carga de la**  
**Batería. Fuente:**  
**Autores.**



La Corporación CDT de Gas incursiona en las redes IoT, para brindar a sus clientes soluciones integrales de telemetría, control y automatización de procesos en tiempo real.

Las redes LPWAN se encuentran en un estado de desarrollo bastante maduro, ideal para implementar en procesos industriales de telemetría, además con las nuevas herramientas de Big Data e inteligencia artificial que se están desarrollando actualmente, ir más allá de solo obtener los datos y lograr procesar estos datos para lograr beneficios adicionales, cosa que se

espera implementar en trabajos futuros.

En el momento de implementación de las redes, es importante tener en cuenta la altura de las antenas y la obstaculización del enlace, para así lograr comunicaciones con mayor cobertura.

El protocolo de comunicación LoRa permite tener un mayor control de toda la infraestructura de red, además la adaptación de la velocidad de transferencia de los datos (ADR), permite crear diferentes configuraciones de comunicación para poder incrementar aún más la cobertura

de comunicación.

Dependiendo de la solución a proponer se pueden implementar otros protocolos de comunicación que cumplan con las necesidades requeridas y superen con facilidad las limitantes del entorno donde se implementará.

Algunos de los sensores de bajo costo en el mercado actual aún no llegan a cumplir con los estándares establecidos por los entes regulatorios para validar oficialmente sus mediciones, pero con el avance tecnológico y la creciente demanda de este tipo de sensores para aplicaciones de bajo costo, las prestaciones y calidad de estos sensores está mejorando rápidamente, por lo cual, dentro de no mucho se espera que existan sensores que puedan suministrar mediciones válidas y fiables que cumplan con todos los requerimientos establecidos por los entes regulatorios.

Gracias al bajo consumo de los módulos de comunicación LPWAN y los modos Sleep y Deep Sleep de los microcontroladores usados, se logró mantener el nodo en funcionamiento con una alimentación eléctrica óptima conformada por un panel solar de 6 W y una batería LiPo de 3,7 VDC. Se podría usar un panel y una batería de menores características y menor tamaño ajustando la frecuencia de transmisión de los datos y usando sensores de menor consumo.

La impresión 3D usando material ABS para la carcasa, resistió a la prueba del nodo ubicándolo a la intemperie durante el periodo de prueba, pero es posible que durante un periodo mucho más prolongado el material se logre degradar, por ello es recomendable usar materiales más resistentes para aplicaciones en donde los dispositivos se encuentren en exteriores.

## REFERENCIAS

- [1] Altgelt C. The world's Largest "Radio" Station. Octubre 20, 2005. Disponible en: <https://www.hep.wisc.edu/~prepost/ELF.pdf>. Accedido marzo 18, 2019.
- [2] Exploratory Engineering. Data Rate and Spreading Factor. 2008. Disponible en: [https://docs.exploratory.engineering/lora/dr\\_sf/](https://docs.exploratory.engineering/lora/dr_sf/). Accedido marzo 20, 2019.
- [3] Gandía S, Melía J. 1991. La teledetección en el seguimiento de los fenómenos naturales. Universidad de Valencia.
- [4] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM. 2014. Calidad del Aire. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/web/contaminacion-y-calidad-ambiental/calidad-del-aire>. Accedido marzo 21, 2019.
- [5] La Rosa A. LPWAN como base de comunicaciones para IoT. septiembre 20, 2018. Disponible en: <https://blog.pandorafms.org/es/que-es-lpwan/>. Accedido febrero 20, 2019.
- [6] LoRa Alliance. LoRaWAN what is it? A technical overview of LoRa and LoRaWAN. Noviembre, 2015. Disponible en: <https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-04/what-is-lorawan.pdf>. Accedido marzo 18, 2019.
- [7] Mayo-Wells. 1963. "The Origins of Space Telemetry", Technology and Culture.
- [8] Mekkia K, Bajica E, Chaxela F, Meyer F. 2017. A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. ICT Express 5(1): 1-7
- [9] United States Environmental Protection Agency. 2018. Particulate Matter (PM) Basics. Disponible en: <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics#PM>. Accedido febrero 18, 2019.