

# Estudio del modelo de capas de IoT para enlaces descendentes en plataforma de interconexión de la red Sifgox

IoT layered model study for downlinks in Sifgox network interconnection platform

Estudo do modelo de camadas de IoT para links descendentes na plataforma de interconexão da rede Sifgox

Jorge Enrique Herrera Rubio<sup>a\*</sup> | Karla Yohana Sánchez Mojica<sup>b</sup> | Edwin Arley López Jaramillo<sup>c</sup>

<sup>a</sup><https://orcid.org/0000-0002-9661-5450> Universidad de Pamplona, Cúcuta, Colombia

<sup>b</sup><https://orcid.org/0000-0003-3164-4725> Fundación de Estudios Superiores Comfanorte FESC, Cúcuta, Colombia

<sup>c</sup><https://orcid.org/0000-0002-9004-129X> Universidad de Pamplona, Cúcuta, Colombia

- Fecha de recepción: 2021-05-11
- Fecha concepto de evaluación: 2021-08-20
- Fecha de aprobación: 2021-09-15  
<https://doi.org/10.22335/rlct.v13i3.1454>

**Para citar este artículo / To reference this article / Para citar este artigo:** Herrera-Rubio, J. E., Sánchez-Mojica, K. Y., & López-Jaramillo, E. A. (2021). Estudio del modelo de capas de IoT para enlaces descendentes en plataforma de interconexión de la red Sifgox. *Revista Logos Ciencia & Tecnología*, 13(3), 46-56. <https://doi.org/10.22335/rlct.v13i3.1454>

## RESUMEN

El propósito de la investigación se basó en el análisis del funcionamiento del modelo de capas de la estructura de internet de las cosas de la red Sigfox con el fin de observar el comportamiento de la transmisión de datos. Se determinó, a través del enfoque cuantitativo, el estudio de la plataforma de hardware con un prototipo de pruebas para medir el rendimiento y alcance de un enlace de radio, para la cobertura de una celda inalámbrica. Mediante la toma de muestras se capturan las variables físicas con un dispositivo móvil para luego procesarlas y observar cómo es la conexión con la base de datos hacia el servidor web en tiempo real. En el análisis en campo se comprobó el funcionamiento del enlace descendente y el proceso de comunicación del *middleware* como intermediador en la plataforma de interconexión, se observaron los niveles de potencia y relación señal a ruido del enlace de prueba. Con base en el modelo de capas se facilitó la comprensión de la funcionalidad de los protocolos de comunicación para mantener el acceso a la heterogeneidad de la red y la interoperabilidad de los servicios y aplicaciones. Con este tipo de tecnologías de banda ultra estrecha es posible una baja tasa de errores por la alta resistencia al ruido.

**Palabras clave:** Modelo, internet de las cosas, interconexión de redes, enlaces, plataforma.

**ABSTRACT**

The purpose of the research was based on the analysis of the operation of the layered model of the internet of things structure of the Sigfox network in order to observe the behavior of data transmission. It was determined, through the quantitative approach, the study of the hardware platform with a test prototype to measure the performance and range of a radio link for the coverage of a wireless cell. By sampling the physical variables, these are captured with a mobile device and then processed to observe how is the connection with the database to the web server in real time. In the field analysis, the operation of the downlink and the communication process of the middleware as an intermediary in the interconnection platform were checked, the power levels and signal to noise ratio of the test link were observed. Based on the layered model it is more feasible to understand the functionality of the communication protocols to maintain access to the heterogeneity of the network and the interoperability of services and applications. With this type of ultra-narrow band technologies a low error rate is possible due to the high resistance to noise.

**Keywords:** Model, internet of things, networking, data links, platform.

**RESUMO**

O objetivo da pesquisa baseou-se na análise do funcionamento do modelo de camadas da estrutura da internet das coisas da rede Sigfox para observar o comportamento da transmissão de dados. Foi determinado, através da abordagem quantitativa, o estudo da plataforma de hardware com um protótipo de teste para medir o desempenho e alcance de um link de rádio, para a cobertura de uma célula wireless. Ao tirar amostras, as variáveis físicas são capturadas com um dispositivo móvel para posteriormente processá-las e observar como que é a conexão com o banco de dados ao servidor web em tempo real. Na análise de campo, foram verificados o funcionamento do link descendente e o processo de comunicação do middleware como intermediário na plataforma de interconexão, foram observados os níveis de potência e a relação sinal-ruído do link de teste. Com base no modelo de camadas, o entendimento da funcionalidade dos protocolos de comunicação foi facilitado para manter o acesso à heterogeneidade da rede e à interoperabilidade de serviços e aplicativos. Com este tipo de tecnologias de banda ultra estreita, uma baixa taxa de erro é possível de se obter devido à alta resistência ao ruído.

**Palavras-chave:** Modelo, internet das coisas, interconexão de redes, links, plataforma.

La internet de las cosas (IoT) es una red mundial de objetos interconectados por medio de direcciones IP que permite la recolección e intercambio de datos, con arquitecturas de recursos limitados, pero que aumentan el rendimiento de la red de acuerdo con las aplicaciones y los requisitos del cliente final; considerando la heterogeneidad de los dispositivos y el tipo de información.

La gran cantidad de dispositivos en el mercado implica la utilización de recursos para: la interconectividad, el rendimiento de las aplicaciones y, especialmente, la seguridad; para tal fin Khan et al. (2012) proponen su desarrollo sobre el cifrado de peso ligero, con algoritmos de encriptación. Por su parte Sigfox garantiza este tipo de recursos, específicamente en lo que respecta a la seguridad de los datos (Lethaby, 2017).

Sigfox usa una tecnología patentada de estaciones bases que se encuentran desplegadas en varios países en las bandas de radio industriales, científicas y médicas (ISM) de sub-GHz sin licencia; los dispositivos finales se conectan a estaciones base, utilizando la modulación BPSK en una banda ultra estrecha de 100Hz, a una velocidad máxima de datos de 100bps, con muy bajos niveles de frecuencia de ruido, consumo de energía bajo, alta sensibilidad del receptor y diseño de antena y hardware de bajo costo (Sigfox, 2020b).

En la comunicación bidireccional de la red de Sigfox, la transmisión de enlace descendente se produce solo después de una transmisión de enlace ascendente. El número de mensajes en el enlace ascendente se limita a 140 mensajes por día, y en enlace descendente solo de

cuatro por día; como no existe capacidad de acuse de recibo, se utiliza la diversidad de tiempo/frecuencia y la duplicación de la transmisión de tramas en tres momentos, de forma simultánea, usando tres canales diferentes en el enlace ascendente, que facilitan la transmisión de forma aleatoria, para reducir la complejidad y los costos del dispositivo final (Mekki et al., 2018).

El futuro de la evolución de internet se orienta a la conectividad entre máquinas (M2M) de extremo a extremo (Khalifeh et al., 2019) con la visión de la comunicación todo para todos en tiempo real esto es posible mediante la incorporación de inteligencia en los dispositivos electrónicos que pueden: a) tomar decisiones, b) intercambiar información, c) controlar procesos, d) invocar acciones y e) permitir servicios en tiempo real.

Todo esto es gracias a la interacción de componentes e intercambio de información por medio de la arquitectura de capas (Khan et al., 2012).

De acuerdo a la descripción de la arquitectura de varios tipos capas de Kumar y Mallick (2018), el sistema de red global de Sigfox se puede categorizar en el modelo de siete capas:

- 1) Capa de aplicación: recopila la información sobre las diversas tareas que deben realizarse según los requisitos del cliente.
- 2) Capa de soporte y gestión: permite tener un control de gestión y seguridad (Soma Bandyopadhyay et al., 2011).
- 3) Capa de servicios: realiza las actividades que requiere el cliente.
- 4) Capa de comunicación: proporciona un enlace de comunicación entre la detección y capas de servicio (Mroue et al., 2018).
- 5) Capa de red: permite la transmisión y el procesamiento de la información con los dispositivos.
- 6) Capa de hardware: integra todos los componentes de hardware.
- 7) Capa de entorno: permite detectar los objetos o lugares bajo observación (Ruckebusch et al., 2018).

Una estructura de implementación de una red IoT, de acuerdo a la propuesta de estudio de Villaverde et al. (2012), requiere de: por una parte, un diseño de los sensores según las capacidades de procesamiento y de po-

tencia. En segundo lugar, agrupar los sensores de acuerdo a la cantidad de procesadores integrados, ya que una fracción importante de la potencia total debe permitir la cobertura, considerando factores tales como la distancia, la naturaleza de los obstáculos, la distorsión de la señal y el ruido.

De igual forma, la sección de un *middleware* (Razzaque et al., 2016) debe facilitar la compatibilidad e interoperatividad con todo tipo de protocolos y dispositivos, también buscar opciones para almacenar los flujos de datos de los sensores, los lenguajes de consulta y el soporte para generar alertas dinámicas y, finalmente, tener una capa de aplicación que incluya: a.) La minería de datos, b.) El procesamiento de los datos, y c.) La visualización de las aplicaciones en una interfaz amigable (Sethi & Sarangi, 2017).

Para garantizar la comunicación en la red Sigfox, el emisor se autentica mediante el identificador en la arquitectura interna del sitio *backend*, mientras la autenticación del mensaje se realiza mediante un número de secuencia, lo que garantiza la seguridad del envío de los paquetes; por tanto, en el radioenlace no hay cifrado de los mensajes, esta tarea se asigna a la capa de aplicación TCP/IP, que garantiza que por lo menos una de las tres tramas lleguen a la estación base para una buena recepción de potencia (Rubio-Aparicio et al., 2019).

Sigfox utiliza la técnica del envío de bits de preámbulo, bits de sincronización de trama, bits de identificador de dispositivo, bits de carga útil, códigos de autenticación y también bits de secuencia de comprobación de trama (FCS) para los enlaces de radio; con esta técnica se elimina la necesidad de banderas adicionales y, además, se reduce del tamaño de los paquetes, de forma que las tramas no son encriptadas, por tanto el cifrado lo realiza el propio cliente en la capa de aplicación (Margelis et al., 2015).

En un proceso de implementación de la infraestructura de IoT, la cobertura del nivel de señal recibido de potencia y la relación señal/ruido son dos factores a considerar para obtener el mejor beneficio y rendimiento. Esto sucede cuando se aplican los métodos de planificación para medir la capacidad de la futura red; en este caso particular, Sigfox utiliza el método de recepción cooperativa para su funcionamiento, mediante el uso de tres pasarelas denominadas como técnica de diversidad espacial (Nashiruddin & Yusri, 2020).

## Metodología de análisis

### Identificación del tipo de investigación

El proceso de investigación se establece como una metodología de diseño experimental de campo (Hernández Sampieri et al., 2018), de tipo perceptual, cuyo alcance es de tipo exploratorio. Como el proceso se basa en la recolección de datos en campo, aplicando los instrumentos físicos para recolectar la mayor cantidad de información posible, el enfoque es de tipo cuantitativo.

Considerando los factores externos que pueden afectar el procesamiento de los mismos para precisar el evento de estudio, la investigación tiene un alcance descriptivo para diagnosticar e identificar el funcionamiento de los enlaces de radio en los procesos de transmisión y recepción de los datos (Hurtado, 2012).

#### Muestra utilizada

Para la determinación del tamaño del modelo, se procedió al muestreo aleatorio simple, de tamaño fijo, que se estableció mediante la toma de muestras, cada dos minutos, con distancias de separación de un metro en línea recta con respecto a la estación base Sigfox. El tamaño de la muestra en cada punto se acotó a 100 datos, se consideró una heterogeneidad del 50%, un margen de error del 5% y un nivel de confianza del 95%, para obtener en total 80 muestras de análisis en cada punto de medida (Mendenhall, Beaver & Beaver, 2015).

#### Instrumento

La captura de los datos se realizó con la apertura de un archivo log (en texto plano), en el dispositivo móvil en el cual se reciben los niveles de potencia y relación señal ruido durante los recorridos; la información se almacenó con valores separados por coma (csv), para presentar los datos en forma de tabla y se realizó el filtro de estos para garantizar el valor promedio obtenido en cada punto de medición.

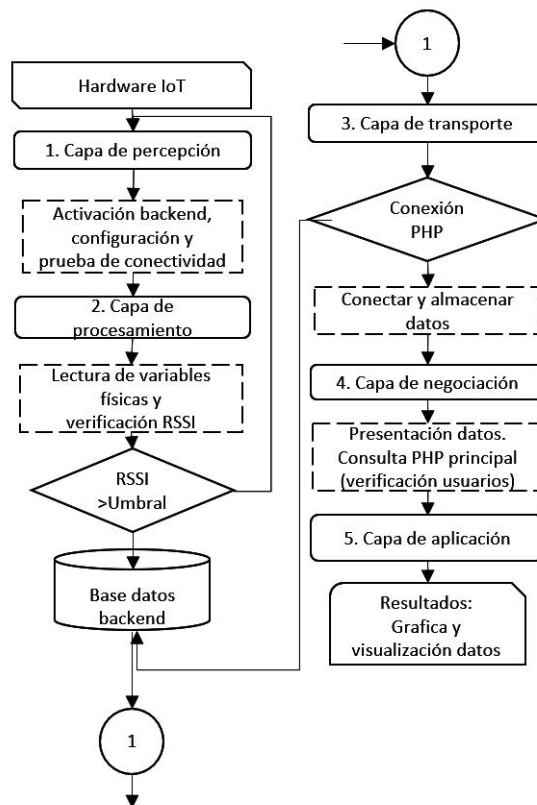
#### Procedimiento utilizando el modelo de capas

Para el desarrollo de la aplicación móvil, se tuvo en cuenta el modelo de capas, con el fin de hacer el seguimiento del almacenamiento de los datos y su procesamiento en tiempo real en un servidor remoto y en el *backend*, simultáneamente, mediante la lectura de las variables físicas se construyó la base de datos para el

análisis y la toma de decisiones sobre los sensores con los cuales se actuó.

Se propone la siguiente metodología de trabajo tal como se observa en el flujograma de la figura 1, en el que se resaltan los pasos más relevantes del proceso.

Figura 1  
Diagrama del proceso metodológico híbrido de cinco capas



Nota. El gráfico representa el proceso metodológico distribuido en las etapas, según el estudio del modelo de cinco capas.

Los componentes de software y hardware trabajan mutuamente para el procesamiento, el almacenamiento, la recuperación y el análisis de los datos; las variables físicas de temperatura, humedad y voltaje son capturadas por los sensores y transformadas en formato binario mediante un convertidor analógico digital, que luego las pasa al transductor y traslada los datos a un formato hexadecimal, con ayuda del microcontrolador Leonardo, que a su vez realiza el envío en tramas por medio de instrucciones de comandos AT sobre la interfaz de aire hacia la estación base.

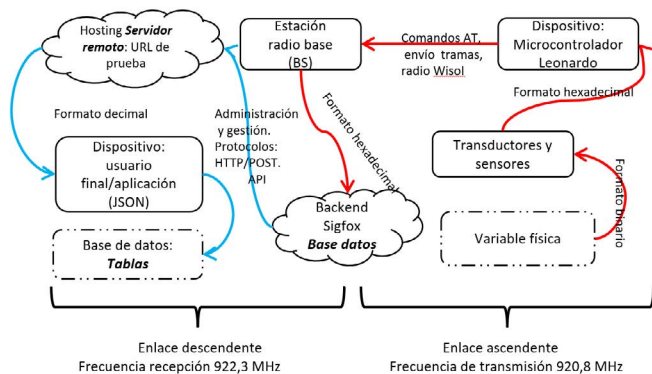
Después se ejecuta el envío de los mensajes de las tramas de forma redundante (se envía tres veces en diferentes tiempos y frecuencias); cada uno de los mensajes son de

600 Hz, esto garantiza una eficiencia de 1Bit/s en un amplio espectro de 192 KHz de la banda de frecuencia de subida entre el rango de 920,704 Mhz a 920,896 MHz, el acceso al canal se realiza de forma aleatoria asincrónica no existe sincronismo entre el transmisor y el receptor debido a que la estación base está todo el tiempo en modo de escucha.

Para entender el funcionamiento de la arquitectura de la red Sigfox, se propone una metodología híbrida con un modelo de cinco capas para describir de forma funcional el nivel de interacción entre las capas, como se detalla a continuación:

**1) Capa de percepción.** La conectividad al *backend* se inicia con la programación del dispositivo terminal de radio Arduino Leonardo (AX-SFUS-1-01 M\_000B\_1BE9\_01) por medio del código de identificación que trae consigo la tarjeta y accede al puerto de comunicación serial UART, que enlaza al módulo de radio comunicación Wisol RF, con un microcontrolador que se encuentra embebido internamente en la misma placa; desde allí se permite la salida de las tramas en formato hexadecimal desde la capa de control de acceso al medio (MAC) (Coman et al., 2019).

Figura 2 Sistema de internet de las cosas sobre el backend Sigfox



Nota. Modelo básico de estructura funcional de la interconexión de red Sigfox.

Después, se realiza la configuración del dispositivo físico en la base de datos del *backend* de Sigfox (figura 3) y allí se asigna: el tipo de dispositivo, el grupo al que pertenece, el identificador de la red y el nombre del dispositivo que va a enviar los datos vía web para que sea reconocido por la estación base. En ese momento se ejecutan pruebas de conectividad por medio de comandos AT mediante el envío de tramas con tamaños de hasta 12 bytes con la aplicación Sigfox Estándar Module Config 1.

Figura 3 Sistema de internet de las cosas sobre el backend Sigfox



Nota. <https://backend.sigfox.com/group/5c940e95e833d93a9804137b/device-types>

**2) Capa de procesamiento.** Esta capa tiene características especiales como la captura, el almacenamiento de información, análisis y procesamiento de los datos, para ofrecer varios tipos de servicios. Empieza con el proceso de lectura de las variables físicas como temperatura, humedad y voltaje, que son enviadas por ráfagas de forma redundante (de a tres tramas consecutivas) desde el dispositivo IoT en forma simultánea. En esta etapa se comprueba el nivel de intensidad (RSSI) y la relación señal a ruido (SNR), dichos datos son guardados en formato *Java Script Object Notation* (JSON), con una conexión a la base de datos en MySQL en el *backend* (Maitra & Yelamathi, 2019).

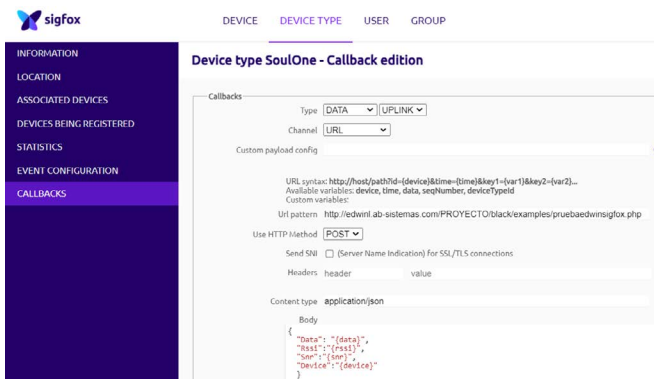
En esta etapa se realiza la captura de los datos mediante la selección de rutas que permitan verificar la existencia de línea de vista entre el nodo terminal IoT y la estación base; el análisis con el modelo de capas determina, en esta fase, los niveles de potencia de cobertura de la celda en el enlace de bajada, para comprobar que la lectura de las variables físicas no presenta dificultad en el momento del envío de la información al *backend*.

**3) Capa de transporte.** Como el *backend* solo admite la subida en datos ascendentes desde el dispositivo IoT, se crea un dominio remoto de prueba <http://pruebasigfox.com/capturesigfox.php>, para almacenar de forma paralela la información que llega bajo la estructura de comunicación *middleware* (Razzaque et al., 2016). En relación a las tareas de gestión de los datos, los servicios de aplicaciones, mensajería, autenticación y gestión de API (Li et al., 2015), permite la conectividad para un gran número de dispositivos entre los sensores y las capas de aplicaciones, de forma que se aseguren las comunicaciones efectivas entre el software desde

el *backend* hacia la aplicación remota en el dispositivo móvil.

Esta capa transfiere la información detectada por el sensor a la capa de procesamiento y viceversa (Kumar & Mallick, 2018). La configuración se inicia en el *backend* mediante la opción '*callback*', donde se selecciona la opción '*new*', para escoger el modo de transmisión del canal URL con el tipo de formato DATA UPLINK, como se muestra en la figura 4.

Figura 4  
Formato de captura de paquetes que envía el backend



Nota. <https://backend.sigfox.com/devicetype/5d0c73fe2564326534418a0a/callbacks/5d8bec612564324860afd8f/edit>

De inmediato, se redirecciona a un dominio de prueba, por ejemplo: <http://pruebasigfox.com/capture-sigfox.php>, donde está alojado el código que recibe y procesa los datos que van a ser enviados desde el *backend* usando el protocolo HTTP (Sigfox, 2020a), a través del método de comunicación POST, hacia la página web en formato JSON que contiene las variables como: {data}, {rssi}, {snr} y {device} entre otras, como se observa en la figura 5.

**4) Capa de negociación.** Gestiona todo el sistema de dispositivos IoT donde se ubican las aplicaciones y registra la negociación y modelos de seguridad. Una vez establecida la configuración y comunicación con el *backend* y el dispositivo IoT, por medio de un *script* en php, se realiza la captura y comprobación (chequeo de seguridad e integridad de los datos) de la información enviada desde el *backend*; los datos se almacenan con las mismas características y los parámetros en el dominio de prueba (Hattab & Cabric, 2018).

Figura 5  
Formato de captura de paquetes e instrucciones que recibe el dominio remoto

```

<?php $json=file_get_contents('php://input');
      $dato2=json_decode($json);

      $Data=$dato2->{"Data"};
      $Rssi=$dato2->{"Rssi"};
      $Snr=$dato2->{"Snr"};
      $Device=$dato2->{"Device"};

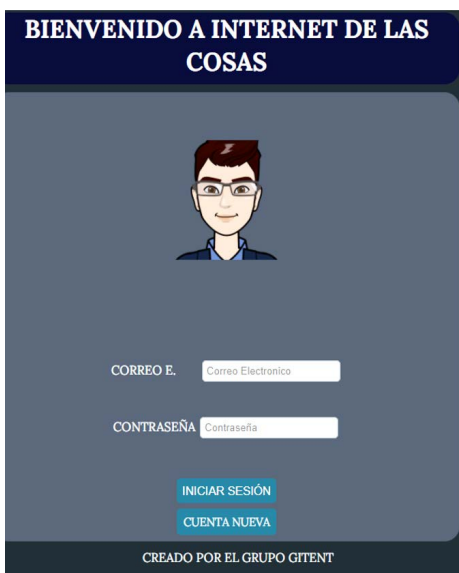
      $myfile = fopen("newfile.txt", "w") or die("Unable
      to open file!");
      $myfile = fopen("newfile.txt", "w") or die("Unable
      to open file!"); $txt = "Verifiy_data\n";
      fwrite($myfile, " Capture data SIGFOX \n");
      fwrite($myfile, "Dato: ".$Data."\n");
      fwrite($myfile, "RSSI: ".$Rssi."\n"); fwrite($myfile,
      "SNR: ".$Snr."\n"); fwrite($myfile, "Device:
      ".$Device."\n"); fclose($myfile);....
      .....?>
    
```

Nota. Proceso del encapsulamiento de las variables por el método POST a través de HTTP.

Después se inicia el acceso remoto, mediante una aplicación desde el dispositivo móvil que captura y grafica en tiempo real los paquetes que viajan en la capa tres del protocolo TCP/IP, con el fin de realizar el monitoreo del estado del enlace de bajada, en lo que respecta al nivel de potencia recibido y la relación señal a ruido, como se muestra en la figura 6 (Mroue et al., 2018).

**5) Capa de aplicación.** Es la parte del programa (ver figura 6) que se encarga de interactuar con el usuario llamado *frontend*, por medio del cual se accede con todas las tecnologías de diseño y desarrollo web que se ejecutan en el navegador; después de haber verificado la conexión en la web (Li et al., 2015), se ejecuta la decodificación de los valores de hexadecimal a decimal de los datos que envía el *backend* (ver figura 7), se almacenan en una base datos llamada Sigfox, en el dominio remoto de prueba que contiene una tabla llamada 'sensores' con los valores obtenidos desde las variable físicas, y desde allí se envía la información a la aplicación móvil, en formato de texto plano, que debe ser procesada y filtrada para comprobar los valores de las variables y los niveles de potencia del enlace de baja.

Figura 6  
Aplicación que conecta con el backend Sigfox



Nota. Detalle de los datos niveles de potencia SNR y cantidad de tramas recibidas en la estación base.

Figura 7  
Codificación de datos del backend

Time	Delay (s)	Data/Decoding	Base station	RSSI (dBm)	SNR (dB)	Freq (MHz)	Frames
2019-10-17 10:06:25	3.3	43f73b6f43f73b6f43f73b6f	6740	-65.00	30.00	920.7620	3/3
2019-10-17 10:05:58	2.7	43f73b6f43f73b6f43f73b6f	6740	-67.00	29.60	920.7894	3/3
2019-10-17 09:59:14	2.8	43f73b6f43f73b6f43f73b6f	6740	-116.00	14.58	920.7060	1/3
2019-10-17 09:58:18	3.4	43f73b6f43f73b6f43f73b6f	6740	-59.00	30.00	920.8114	3/3

Nota. <https://backend.sigfox.com/devicetype/>

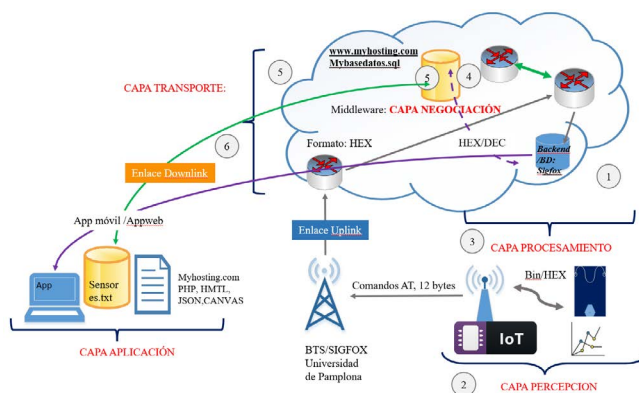
Una síntesis del proceso de funcionamiento del modelo de cinco capas se ve reflejado en la figura 8, con el fin de entender de forma sistémica el proceso dinámico del proyecto.

La secuencia dinámica se resume así:

1. Se crea el dispositivo en la plataforma Cliente Servidor.
2. Se ejecutan pruebas de conectividad local, comandos AT.
3. Se configura el dispositivo IoT y se captura la información (lectura de variables, almacenamiento, análisis y procesamiento).

4. Se envía simultáneamente la información del backend al dominio remoto
5. El middleware gestiona datos, autentica el servicio de aplicaciones, mensajería y gestión de la app y también permite conexión con la capa de aplicación.
6. Se visualiza la información en la aplicación móvil

Figura 8  
Diagrama de despliegue y síntesis del proceso



## Resultados y discusiones

Por medio del análisis de modelo de capas, es más fácil entender el funcionamiento de la plataforma, gracias a la comprensión del proceso de comunicación entre capas y la flexibilidad para trabajar con los protocolos a nivel de middleware.

En la figura 9 se observa el ejemplo de una muestra aleatoria con los resultados para una ruta de mediciones de las variables de temperatura, humedad y voltaje, obtenidas en exteriores, para evitar, en lo posible, obstrucciones en la línea de vista. La toma de datos se realiza en cada metro hasta llegar a 80 metros (Miller, 2017).

En la figura 10, desde el dispositivo IoT se observa que el nivel de intensidad de potencia recibido (RSSI) no varía más allá de los -80 dBm, mientras la relación señal ruido (SNR) tiene un promedio de 30 dB, debido a que la sensibilidad del radio es buena y tiene un valor óptimo de -128 dBm (Lavric et al., 2019).

En rangos de distancia de 5 a 11 m, 42 a 45 m y 72 a 76 m no existen variaciones significativas del RSSI y el SNR, a pesar de los obstáculos presentes en el momento de realizar las mediciones, es decir, no se afectaron los resultados de los datos obtenidos desde los sensores.

Figura 9  
Ejemplo de medidas aleatorias de temperatura, humedad y voltaje

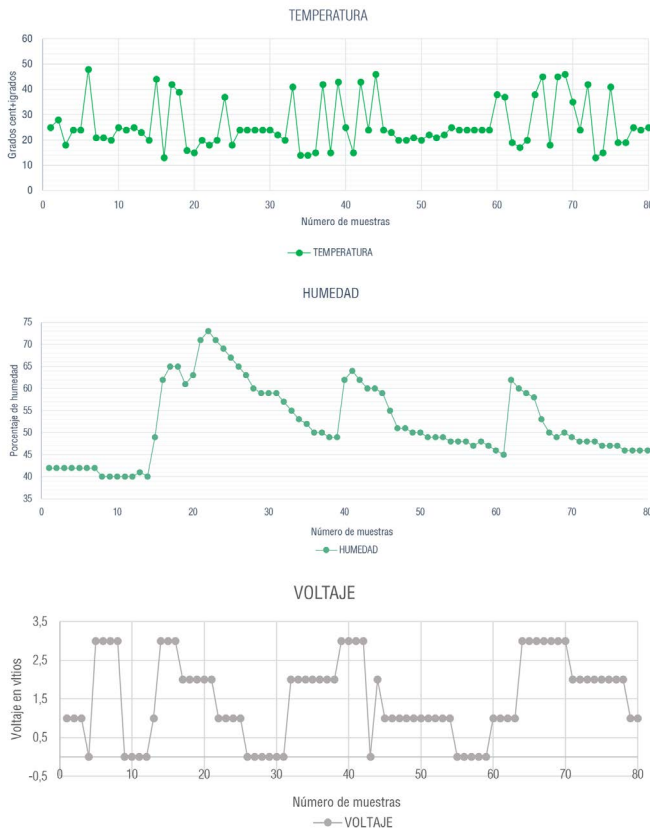
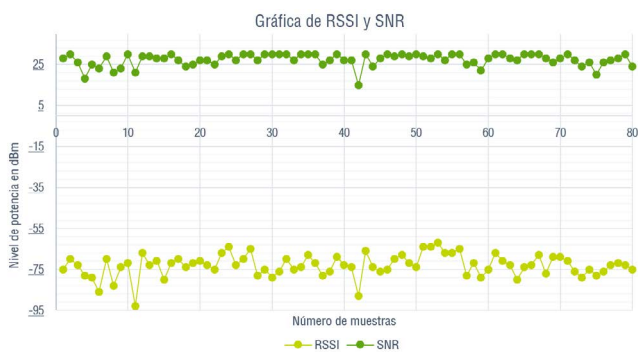


Figura 10  
Ejemplo de medidas de niveles de potencia y relación señal a ruido



Nota. Muestreo de las variables físicas tomado desde los sensores y niveles de potencia de recepción en equipo terminal.

Es evidente que existe una estabilidad de -100 dBm como nivel mínimo y de -128 dBm para un nivel máximo en los enlaces de comunicaciones, pues se garantiza el umbral del nivel de potencia para el envío de los grupos de tres tramas simultáneamente, sin que se pierda la información, es decir, existe una entrega segura manteniendo los niveles de potencia para este tipo de dispositivos, que están diseñados para redes de área amplia para baja potencia (LPWAN) (Ruckebusch et al., 2018).

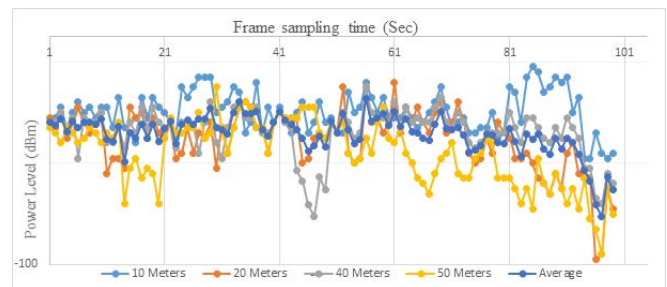
Existe la posibilidad de desarrollar aplicaciones de forma amigable, que permiten una configuración con código binario independiente del hardware para simplificar el funcionamiento de la arquitectura IoT y la programación modular en bloques funcionales, utilizando protocolos de comunicación IoT en la capa de aplicación, como es el caso del protocolo http (Di Gennaro et al., 2019).

De acuerdo a la estructura de funcionamiento de la MAC, como no existe ninguna técnica de señalización entre la estación base y el dispositivo para controlar el flujo de mensajes, las tramas reciben una carga útil desde la capa de aplicación, que segmenta las de transmisión a la interfaz de radio en donde se añade un número de secuencia a cada una para guiar la recepción y facilitar la captura por la estación base; todo esto es posible debido a que la potencia de transmisión de la señal sigfox se concentra en un ancho de banda estrecho, evitando las interferencias.

En el proceso de la codificación, se pudo verificar que las tramas que se generan en los dispositivos y se encapsulan en formato HEX, facilitando la convivencia con diferentes plataformas de desarrollo, en lo que respecta a la manipulación del formato de datos.

Los niveles de potencia de recepción en los dispositivos IoT son buenos en ambientes *indoor* con obstáculos, pues se mantiene un margen de potencia cerca al nivel de umbral de sensibilidad (Aernouts et al., 2018), como se observa en la figura 11.

Figura 11  
Medidas de potencia sin línea de vista de acuerdo a la distancia



Nota. Ejemplo de captura de muestras durante cinco minutos para diferentes distancias.

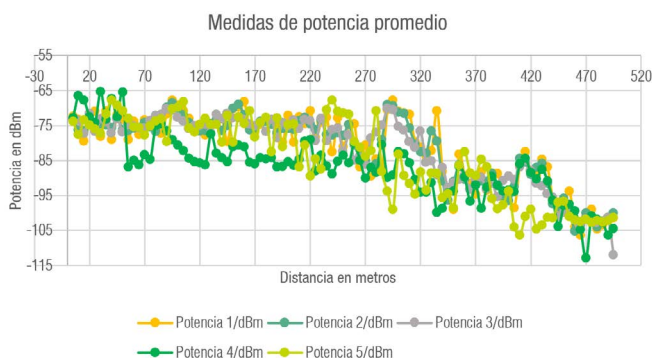
Como los dispositivos terminales trabajan con baja potencia y las antenas son de baja ganancia, a partir de los 50m, la señal decae por efecto del logaritmo de la distancia bajo condiciones sin línea de vista; sin embargo, los niveles críticos de potencia del sistema de radio recomendados por el fabricante, en lo que respecta a la



sensibilidad, es de  $-128$  dBm, asegurando una velocidad de 600bps. Por medio de las técnicas de modulación de GFSK es posible mantener la conectividad (Lauridsen et al., 2017) de los enlaces descendentes desde la estación base hacia los dispositivos terminales a través del modelo de cinco capas.

En la figura 12 se comprueban las mediciones de la potencia promedio desde diferentes ubicaciones, realizando la toma de datos cada dos minutos y evitando, en lo posible, los obstáculos para determinar los requisitos de conectividad desde la capa de procesamiento, y garantizado que por lo menos una de las tres tramas llegue a la estación base sin sobrepasar los niveles de recepción de potencia (Ribeiro et al., 2018). En esta negociación con la red, no es necesaria la autenticación de mensajes del dispositivo que los transmite en la estación base, sin esperar una respuesta de seguridad. La capa física y de enlace son las encargadas de evitar la interferencia con el dispositivo receptor y mantener la estabilidad del enlace de radio en la comunicación.

Figura 12  
Medidas de potencia promedio cada 5 minutos versus distancia



Nota. Potencias promedio obtenidas para cinco rutas a diferentes distancias.

## Conclusiones

En el análisis de interoperatividad del modelo de cinco capas de Sigfox, en la implementación y configuración de la plataforma para consultar, acceder, gestionar y administrar los datos desde y hacia los dispositivos, se observa que en la capa de transporte es donde funciona la tecnología *middleware* como un entorno ubicuo que facilita la comunicación para diferentes tipos de plataformas y protocolos al momento de gestionar aplicaciones robustas.

La capa de negociación simplifica el funcionamiento de las redes IP con sistemas heterogéneos, cuando se implementa la supervisión y control. Para el caso de estudio se

implementó un sistema de *hosting* temporal remoto para las pruebas, debido a que la plataforma Sigfox no garantiza el envío de datos en enlaces descendentes de forma continua y masiva para realizar control en tiempo real; los mensajes se reenvían mediante el *callback* a servicios externos, cuando sucede un evento concreto, con el fin de generar estadísticas, control o síntomas de alarmas en tiempo real, lo cual hace innecesario el uso de una pasarela o *Gateway*.

El trabajo permitió hacer una descripción detallada de las características del modelo de capas de funcionamiento de la infraestructura funcional de IoT de la red de Sigfox, para comprender la metodología y funcionamiento del etiquetado de la información a través de las tramas que se envían desde un dispositivo terminal IoT a una estación radio base de prueba, mediante la adaptación de la transmisión de mensajes cortos en una banda ultra estrecha que no supera 1 KHz; esto asegura una muy buena relación de potencia y ruido de recepción con tecnología de filtros de recepción estrechos.

Se realizó la evaluación de la capa de enlace del modelo TCP/IP por medio del análisis de las ráfagas de las tramas redundantes, en términos de las medidas de potencia y relación de señal ruido, y que estas presentan en el proceso de almacenamiento y procesamiento de los datos desde diferentes distancias, con y sin líneas de vista entre el dispositivo IoT y la estación base transmisora, comprobando que los enlaces se mantienen estables hasta la sensibilidad máxima del piso de ruido que soporta el dispositivo.

Una ventaja importante de la tecnología Sigfox es el uso del mecanismo de control en el enlace descendente que minimiza el consumo de energía y mantiene una ventana de recepción de 50seg., para poder recibir el mensaje gracias a la técnica de diversidad temporal, enviando el mensaje 3 veces de forma simultánea bajo condiciones de interferencias en el medio.

Por otra parte, la tecnología Sigfox tiene un rendimiento bueno, debido a que no requiere de la gran transferencia de datos para la transmisión de mensajes cortos en los enlaces ascendentes, situación que no ocurre con los enlaces descendentes, para los cuales se realizó el estudio.

Una desventaja es el acceso al medio sin ningún tipo de control, lo cual lleva a que se produzcan pérdidas de paquetes por las colisiones entre los nodos, cuando el tamaño de la red vaya creciendo, porque no tiene un

método de detección previa del canal libre; esto hace que todos los dispositivos intenten competir por encontrar un canal libre, pero los dispositivos pueden acceder de forma estocástica para tomar el canal en el enlace ascendente o quedar en espera hasta que encuentre disponibilidad de este.

Debido a que la tecnología de banda ultra estrecha es muy resistente al ruido, permite una baja tasa de errores de comunicación y evita la pérdida de paquetes, porque no se superan los niveles de potencia de ruido de sensibilidad de los equipos de radio comunicación, haciendo que los enlaces sean estables como se comprobó en las figuras 9 y 10. Esto garantiza un rendimiento en RF en los modos de transmisión y recepción.

A futuro, se requiere realizar más pruebas con más dispositivos para analizar el comportamiento del canal y determinar la cobertura real de una celda de prueba con varias campañas de medida; también es necesario probar con otros protocolos a nivel de software destinados a la gestión de aplicaciones máquina a máquina (M2M) como son MQTT y CoAP; en el caso de la seguridad, se deben verificar las vulnerabilidades en cuanto a la seguridad de los protocolos para la tecnología Sigfox, debido a que es una tecnología simple que no usa códigos ni claves complejas y que deja a disposición de los usuarios finales la utilización de la encriptación en las tramas, para garantizar la seguridad en la capa de aplicación; sin embargo, en la capa de enlace se pueden presentar problemas de interferencia de RF ilegal cuando existan emisiones de equipos que generen alta potencia de interferencia y bloqueen las comunicaciones inalámbricas y se pierda la conectividad.

## Referencias

- Aernouts, M., Bellekens, B., Berkvens, R., & Weyn, M. (2018). *A comparison of signal strength localization methods with sigfox*. [Proceedings]. 15th Workshop on Positioning, Navigation and Communications, 1–6. <https://doi.org/10.1109/WPNC.2018.8555743>
- Coman, F. L., Malarski, K. M., Petersen, M. N., & Ruepp, S. (2019). *Security issues in internet of things: Vulnerability analysis of LoRaWAN*, s.17. <https://doi.org/10.1109/giots.2019.8766430>
- Lauridsen, M., Vejlgard, B., Kovacs, I. Z., Nguyen, H., & Mogensen, P. (2017). *Interference measurements in the European 868 MHz ISM band with focus on LoRa and SigFox*. IEEE Wireless Communications and Networking Conference, WCNC. <https://doi.org/10.1109/WCNC.2017.7925650>
- Lavric, A., Petrariu, A. I., & Popa, V. (2019). Long Range SigFox Communication Protocol Scalability Analysis under Large-Scale, High-Density Conditions. *IEEE Access*, 7, 35816–35825. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2903157>
- Lethaby, N. (2017). Wireless connectivity for the Internet of Things, one size does not fit all. *Texas Instruments*, 16. <http://www.ti.com/lit/wp/swry010a/swry010a.pdf>
- Li, S., Zhang, Y., Raychaudhuri, D., Ravindran, R., Zheng, Q., Dong, L., & Wang, G. (2015). *IoT middleware architecture over information-centric network*. [Proceedings] IEEE Globecom Workshops, GC Wkshps. <https://doi.org/10.1109/GLOCOMW.2015.7414119>
- Maitra, S., & Yelamarthi, K. (2019). Rapidly deployable IoT architecture with data security: Implementation and experimental evaluation. *Sensors*, 19(11). <https://doi.org/10.3390/s19112484>
- Margelis, G., Piechocki, R., Kalessi, D., & Thomas, P. (2015). Low Throughput Networks for the IoT: Lessons learned from industrial implementations. [Proceedings]. IEEE World Forum on Internet of Things, WF-IoT. 181–186. <https://doi.org/10.1109/WF-IoT.2015.7389049>
- Mekki, K., Bajic, E., Chaxel, F., & Meyer, F. (2018). *Overview of Cellular LPWAN Technologies for IoT Deployment: Sigfox, LoRaWAN, and NB-IoT*. [Workshop] IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops, PerCom Workshops. 197–202. <https://doi.org/10.1109/PERCOMW.2018.8480255>
- Mendenhall, W.; Beaver, R., & Beaver, B. (2015). *Introducción a la estadística* (C. Learning (ed.); Decima cuarta edición, 364-400.
- Miller, L. (2017). *Internet of things*, J. W. & Sons, Qorvo Special Edition, 1-26.
- Mroue, H., Nasser, A., Hamrioui, S., Parrein, B., Motta-Cruz, E., & Rouyer, G. (2018). *MAC layer-based evaluation of IoT technologies: LoRa, SigFox and NB-IoT*. IEEE Middle East and North Africa Communications Conference, MENACOMM. 1–5. <https://doi.org/10.1109/MENACOMM.2018.8371016>
- Mwakwata, C. B., Malik, H., Alam, M. M., Moullec, Y. Le, Parand, S., & Mumtaz, S. (2019). Narrowband inter-

- net of things (NB-IoT): From physical (PHY) and media access control (MAC) layers perspectives. *Sensors*, 19(11), 1–34. <https://doi.org/10.3390/s19112613>
- Nashiruddin, M. I., & Yusri, A. (2020). *SigFox Network Planning for Smart Metering Based on Internet of Things for Dense Urban Scenario*. 8th International Conference on Information and Communication Technology, ICoICT. <https://doi.org/10.1109/ICoICT49345.2020.9166398>
- Razaque, M. A., Milojevic-Jevric, M., Palade, A., & Cla, S. (2016). Middleware for internet of things: A survey. *IEEE Internet of Things Journal*, 3(1), 70–95. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2015.2498900>
- Ribeiro, G. G. L., De Lima, L. F., Oliveira, L., Rodrigues, J. J. P. C., Marins, C. N. M., & Marcondes, G. A. B. (2018). *An outdoor localization system based on SigFox*. IEEE Vehicular Technology Conference. 1–5. <https://doi.org/10.1109/VTCSpring.2018.8417853>
- Rubio-Aparicio, J., Cerdan-Cartagena, F., Suardiaz-Muro, J., & Ybarra-Moreno, J. (2019). Design and implementation of a mixed IoT LPWAN network architecture. *Sensors*, 19(3). <https://doi.org/10.3390/s19030675>
- Ruckebusch, P., Giannoulis, S., Moerman, I., Hoebeke, J., & De Poorter, E. (2018). Modelling the energy consumption for over-the-air software updates in LPWAN networks: SigFox, LoRa and IEEE 802.15.4g. *Internet of Things*, 3–4, 104–119. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2018.09.010>
- Sethi, P., & Sarangi, S. R. (2017). Internet of Things: Architectures, Protocols, and Applications. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/9324035>
- Sigfox. (2020a). *Welcome to sigfox portal*. <https://backend.sigfox.com/welcome/news>
- Sigfox. (2020b). *what-sigfox*. <https://www.sigfox.com/en/what-sigfox/technology>
- Soma Bandyopadhyay, Munmun Sengupta, Souvik Maiti, & Subhjit Dutta. (2011). Role Of Middleware For Internet Of Things: A Study. *International Journal of Computer Science & Engineering Survey*, 2(3), 94–105. <https://doi.org/10.5121/ijcses.2011.2307>
- Villaverde, B. C., Pesch, D., De Paz Alberola, R., Fedor, S., & Boubekour, M. (2012). *Constrained application protocol for low power embedded networks: A survey*. [Proceedings]. 6th International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing, IMIS. 702–707. <https://doi.org/10.1109/IMIS.2012.93>