

Design and Implementation of a Cost-Effective Object Tracking System Based on LoRa, Firebase, and Mapbox

Juan P. Carvajal - Robert Urbina - Luis C. Baron - Carlos I. Páez and A. Fajardo

Abstract—This paper describes the design and implementation of an object tracking system based on LoRa®, Firebase®, and Mapbox®. This cost-effective system was designed using a simplified architecture, which is composed of a simplified wireless sensor network and a simplified data analytical process. The cost of each tracking node and the gateway were USD\$39.38 and USD\$28.00, respectively. Furthermore, the software tools required in the user interface implementation were free or open-source. Regarding its performance, the energy autonomy of each tracking node was 270.6 hours with maximum coverage of 896 meters under open field conditions, which is hard reduced to 114 meters under indoor conditions.

Index Terms—Web services, Databases, Open source software, Global Positioning System, Wide area networks, Wireless sensor networks

I. INTRODUCCIÓN

Las redes de sensores inalámbricos (Wireless sensor networks - WSN) permiten recopilar información del entorno con el fin de llevar servicios a los usuarios finales o desencadenar una respuesta al respecto [1], [2], dichas redes son ampliamente usadas en una gran variedad de aplicaciones, tales como [3], [4]: monitoreo de variables ambientales, coordinación de recursos en campus inteligentes, rastreo de objetos para evitar su hurto o pérdida. Particularmente, para adoptar el paradigma de internet de las cosas (Internet of Things - IoT), los sistemas de rastreo de objetos deben adicionar acceso a internet y analítica de datos. En este tipo de sistemas se cuenta con una infraestructura de comunicación (i.e., una puerta de enlace con conexión a internet y nodos sensores) y herramientas para el usuario final (e.g. plataformas de supervisión) [5], como se ilustra en la en la Fig. 1. El flujo de la información en estos sistemas empieza con la obtención y transmisión de la información (e.g., geolocalización de los objetos) desde los nodos a internet usando una puerta de enlace. Esta información se almacena en una base de datos para ser analizada automáticamente (e.g., generar una alarma para indicar una zona insegura) y ser presentados al usuario del sistema de rastreo (e.g., visualizar la posición del objeto en un mapa) [6], [7]. Varios sistemas de rastreo se han desarrollado usando la red móvil 2G/3G [8], [9], principalmente porque no requiere el desarrollo de una infraestructura de red dedicada [10]. Sin embargo, esta solución se ve limitada debido a la necesidad de alquilar el acceso al servicio de la red celular [11], costos de operación elevados relacionados con el gran consumo energético de los nodos de rastreo [12], y

la necesidad de contar con cobertura de la red móvil para su despliegue [13].

Recientemente, para superar algunas de las limitaciones impuestas por el uso de la red móvil 2G/3G, se han explorado las tecnologías de red de área amplia de baja potencia (Low-power wide-area network - LPWAN) como infraestructura de red de bajo costo de operación [11]–[13]. En particular, la tecnología LoRa® se vislumbra como una de las mejores alternativas tecnológicas para el despliegue de redes de sensores gracias al rango de cobertura que permite alcanzar (i.e., 1-10 km [13], [14]) manteniendo un costo de operación y despliegue bajo [15], [16], debido entre otros factores al uso de bandas no licenciadas y bajo consumo energético en la transmisión de la información. Por ejemplo, en [17], los autores proponen un sistema de rastreo basado en LoRa® para el préstamo de bicicletas dentro de un campus universitario. Este sistema permite geolocalizar en tiempo real las bicicletas para prevenir su posible hurto. Sin embargo, no se desarrollaron interfaces de usuario para la visualización de estos objetos, lo cual impide efectuar acciones derivadas de la información generada por los nodos de rastreo. En [18], los autores proponen una red de monitoreo de posición de personal militar usando LoRa®. La solución almacena la información en una base de datos, la cual nutre a una interfaz para el usuario. Esta aproximación no está orientada al bajo costo de sus componentes, ya que utiliza dispositivos de red comerciales de alto costo. Adicionalmente, en [19], [20] se han llevado a cabo estudios sobre la viabilidad tecnológica del despliegue de soluciones basadas en LoRa® dentro del contexto IoT en espacios urbanos con cobertura limitada (e.g., campus universitarios) para rastreo de objetos y el censo de factores ambientales (e.g., sensores de calidad de aire). Un común denominador de la literatura analizada es que presentan las soluciones implementadas sin explicar en detalle su desarrollo o costos, limitando los procesos de transferencia tecnológica y adopción de este tipo de soluciones.

En este trabajo se propone una arquitectura simplificada de redes de sensores, que evita el uso de sistemas operativos en los nodos de la WSN y consecuentemente el uso de hardware de bajo costo. Adicionalmente, se propone una arquitectura simplificada de almacenamiento y visualización de datos en la nube usando solicitudes cliente-servidor basadas en el concepto de transferencia de estado representacional, lo cual permite la fácil integración de herramientas libres o de bajo costo. La unión de estas dos arquitecturas permite implementar sistemas de rastreo de objetos de baja comple-

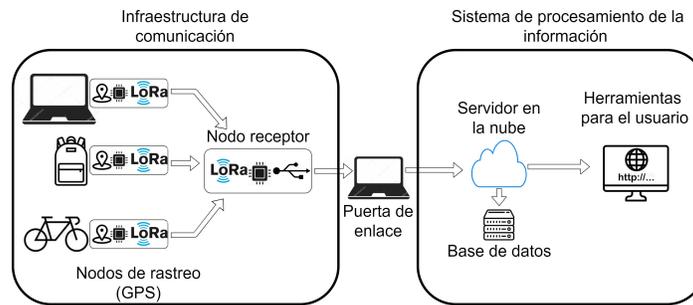


Fig. 1. Sistema de rastreo de objetos propuesto.

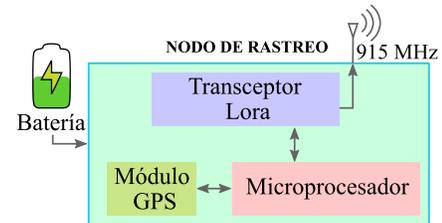
idad con una alta relación costo-beneficio. Adicionalmente, en este artículo se discute detalladamente la implementación, los costos y la evaluación de este sistema, lo cual permite entender y cuantificar algunos de los desafíos relacionados con la implementación (hardware/software) y evaluación de WSN basadas en la tecnología LoRa®. Mas aun, creemos que podría motivar el uso y masificación de las redes LoRa® de bajo costo y complejidad en Latinoamérica. El resto del artículo se ordenó de la siguiente manera. En la Sección II, se presenta la descripción del sistema, se parte de el funcionamiento y la interacción entre sus partes. Posteriormente se explican y describen los bloques que componen los nodos de la red y el sistema de procesamiento de la información. En la Sección III, se presentan los cálculos para la estimación del tiempo de vida del nodo de rastreo, posteriormente en la Sección IV se detalla el despliegue del sistema propuesto junto con las pruebas de funcionalidad de los diferentes subsistemas de la solución. Finalmente, en la Sección V se presentan las conclusiones.

II. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

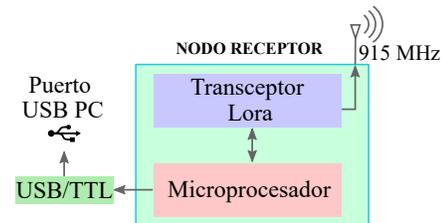
En la Fig. 1 se muestra el diagrama del sistema propuesto. La etapa denominada infraestructura de comunicación, inicia con la recepción de los datos de posición geográfica por el nodo de rastreo. Luego estas coordenadas son enviadas a través de una interfaz de comunicación inalámbrica hacia un nodo receptor, el cual se encuentra conectado por puerto serial a un computador con conexión a internet (i.e., la puerta de enlace de la red). Este computador ejecuta constantemente un código que permite ordenar y reenviar los datos a la plataforma en la nube. La segunda etapa de la solución propuesta es el sistema de procesamiento de la información, la cual inicia con la obtención de las coordenadas almacenadas en la base de datos, las cuales son enviadas a la página web cuando se detecte una nueva entrada del dato, permitiendo que el usuario pueda visualizar en la interfaz de mapas, la posición más reciente obtenida por el nodo de rastreo.

A. Infraestructura de Comunicación

En esta subsección se describe la infraestructura de comunicación, describiendo detalladamente los nodos de rastreo, el nodo receptor y la puerta de enlace. Es importante notar que, tanto el nodo de rastreo como el nodo receptor usan el mismo transceptor, el cual fue programado en cada nodo para cumplir con los parámetros regionales de LoRa® Alliance,



(a) Diagrama de bloques del nodo de rastreo



(b) Diagrama de bloques del nodo receptor

Fig. 2. Diagrama en bloques de los nodos.

LoRa® WAN US902-928 [21]. Dicha configuración se realizó mediante los comandos del transceptor (por interfaz UART) proporcionado por el fabricante [22].

A1. Nodo de rastreo: Este nodo se compone de un microprocesador, un sistema de posicionamiento global (Global Positioning System - GPS) y un transceptor LoRa®, como se ilustra en la Fig. 2a. El microprocesador recibe la ubicación del nodo del módulo GPS usando una interfaz serial. La ubicación del nodo es transmitida a la red LoRa® usando un transceptor (i.e., RN2903), el cual se comunica (para operación y configuración) con el microprocesador usando también una interfaz serial. El nodo es energizado usando una batería (i.e., tipo 18650 con una capacidad de 4200 mAh) que produce un voltaje de 3.7 V, el cual se estabiliza usando un regulador lineal (i.e., LD39150) que produce un voltaje regulado de 3.3 V. Finalmente, en la Tabla I se presenta la lista de componentes utilizados en los nodos implementados, junto con sus costos comerciales.

Para el desarrollo del código del nodo de rastreo se identificaron tres procesos que definen las actividades en las que puede funcionar el nodo, estos procesos de funcionamiento se muestran en la Fig. 3a y las etapas son descritas a continuación. 1) Obtención de Coordenadas: en este proceso se habilita el GPS, se activa el modo de inactividad del transceptor y se espera obtener coordenadas válidas de la

TABLA I
LISTA DE COMPONENTES DE LOS NODOS

Componente	Modelo	Precio Unidad (USD)
Microprocesador	Atmega 328PB	1.83
Transceptor LoRa®	RN2903	15.82
Módulo GPS	NEO-6M	7.57
Regulador de voltaje	LD39150	1.21
Antena	JCG015	2.32
Batería	4200mAh Ultrafire	2.6
Circuito impreso	-	5
Componentes adicionales (Resistencia, condensadores, reloj)	-	3.03

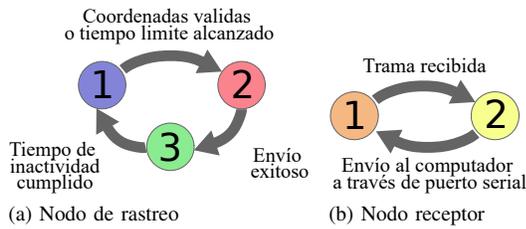


Fig. 3. Diagrama de los procesos de los nodos.

posición del nodo mediante una función, para posteriormente ser almacenadas y ordenadas en variables y construir la trama a enviar. 2) Envío de datos: Se envía un comando para habilitar nuevamente el funcionamiento del transceptor, se activa el modo de inactividad del GPS y se incluye la trama de datos al comando para realizar la transmisión. 3) Modo de inactividad: este proceso es un estado de reposo después de enviar la trama, durante este estado se habilitan las funciones de inactividad de los 3 módulos y se inicia un contador para volver al modo activo.

Para implementar el modo de inactividad del microprocesador se incluyó una librería llamada “avr/sleep”, esta librería permite controlar y configurar la tarjeta en distintos modos de consumo. Adicionalmente, en el código se implementó una función para deshabilitar el “brown-out detector”, el cual es un sistema para el reinicio de la tarjeta y este puede ser desactivado para ahorrar energía (recomendado por el fabricante).

El modo de inactividad del transceptor, es un estado que permite reducir drásticamente el consumo. Para activar este modo se usan comandos seriales proporcionados por el fabricante como se muestra en la Fig.4. Este comando recibe como parámetro el tiempo durante el cual el transceptor estará en modo de inactividad, una vez el tiempo es cumplido vuelve a su estado de operación normal. En la Fig.5 se muestran dos ejemplos de tramas enviadas por un nodo de rastreo. A la trama enviada se le adicionan bytes con el objetivo de: identificar el nodo, el tipo de dato y el signo de la coordenada. Los dos primeros caracteres adicionales permiten identificar el nodo que envía el mensaje, el tercer carácter se usa para diferenciar si la coordenada es de Latitud (E) o Longitud (F), luego viene la coordenada y finalmente, el último carácter indica si el número es positivo (A) o negativo (B).

```
Comando para activar modo sleep
loraSerial.println("sys sleep 60000");
```

Identificador de los puertos conectados al Transceptor Tiempo en milisegundos de reposo

Fig. 4. Función para el modo inactivo del Transceptor.

```
Indicador del Nodo      Indicador de signo Negativo (B)      Indicador de signo Positivo(A)
AAF07452456B      AAE00402456A
Indicador de Longitud (F)      Valor de Longitud      Indicador de Latitud (E)      Valor de Latitud
```

Fig. 5. Identificación de las tramas para envío de datos.



(a) Prototipo del nodo receptor (b) Prototipo del nodo de rastreo

Fig. 6. Prototipo de los nodos en circuito impreso.

A2. *Nodo receptor:* Este nodo recibe las coordenadas enviadas por los nodos de rastreo y posteriormente las reenvía a través del puerto serial a un computador con conexión a internet, el cual se usó como la puerta de enlace de la red de comunicación. Este nodo está compuesto principalmente de un transceptor LoRa®, que permite recibir los datos enviados por los nodos de rastreo, y un microprocesador, que permite controlar y coordinar el funcionamiento del nodo. Adicionalmente, el nodo cuenta con una interface USB/TTL que permite la comunicación serial con el computador. En la Fig. 2b es presentado el diagrama en bloques de este nodo.

Para el desarrollo del código del nodo receptor se identificaron 2 procesos, los cuales son mostrados en la Fig. 3b y son descritos a continuación: 1) Espera de tramas: esta parte del código es la encargada de revisar los datos recibidos por el transceptor (después de ser configurado como receptor), donde al identificar una trama de información valida, el algoritmo almacena en variables los datos recibidos. 2) Separación y envío: en esta parte del código se extrae la información de las coordenadas (i.e., la carga útil de la trama) eliminando del mensaje los encabezados usados por la comunicación de los transceptores. Finalmente, estas coordenadas son enviadas por el algoritmo a la puerta de enlace usando la comunicación serial al computador. En la Fig. 6a y Fig. 6b se ilustran el nodo receptor y de rastreo implementados.

A3. *Puerta de enlace:* La puerta de enlace de la red es un computador que recibe la información del nodo receptor por medio de comunicación serial y la envía a la base de datos en la nube. Este computador ejecuta un código en Phytón para reconstruir las coordenadas de latitud y longitud a su formato original, las cuales son enviadas a la base de datos usando funciones de los desarrolladores de los servicios en la nube.

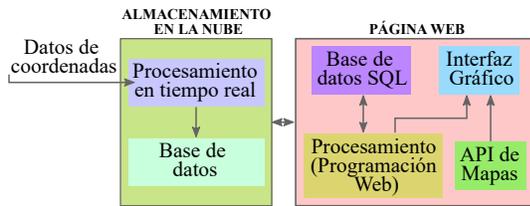


Fig. 7. Diagrama en bloques de el Sistema de procesamiento de la información.

B. Sistema de Procesamiento de la Información

En esta subsección se presenta la descripción de la segunda etapa del sistema, la cual está enfocada al tratamiento y visualización de los datos obtenidos por la red de nodos. A continuación se explica la programación completa de la interfaz web, así como su conexión con la base de datos en la nube. Este esquema se ilustra en la Fig. 7.

B1. Base de datos en la nube: La información que entra a la base de datos es procesada y ordenada en tiempo real por un sub-bloque dedicado. Luego que la información ha sido almacenada, es enviada al bloque de la página web cuando este lo requiera. Para el almacenamiento de la nube se usa Firebox Database, a la cual se accedió como un extremo REST (Representational State Transfer) usando una API (Application Programming Interface). Las solicitudes de información (envío y recepción) desde la puerta de enlace hacia la base de datos en la nube, es implementada usando solicitudes de cliente a través de una API RESTful (la cual transfiere una representación del estado del recurso al solicitante o punto final), esta API contiene la información de identificación, la autorización, el identificador uniforme de recursos (Uniform Resource Identifier - URI), el almacenamiento en caché, etc. Esta información, se entregó a través de HTTPs (Hypertext Transfer Protocol Secure) usando JSON (JavaScript Object Notation).

B2. Interfaz Web: Las características generales de la página web son resumidas en la Tabla II. Su función general es tomar la información de las coordenadas almacenadas en la nube y entregarla al usuario por medio de una interfaz gráfica personalizada. Para lo cual la página web cuenta con la autenticación de usuarios a través de la base de datos de lenguaje de consulta estructurado (Structured Query Language - SQL), permitiendo gestionar el contenido según sea el rol de cada uno de ellos. La información de las coordenadas es procesada por un sub-bloque de análisis y la visualización de los datos se realiza a través de un sub-bloque API de mapas. Este sub-bloque soporta y contiene el servicio de graficar mapas, ubicar coordenadas, generar radios de control y activar alarmas [23]. La Tabla III explica las características específicas de la aplicación para el rastreo de objetos, también las funciones adicionales de la página web, definidas para el sistema.

Con el propósito de generar un sistema de bajo costo, fue necesario la selección de servicios y plataformas de acceso libre, los cuales se listan en la Tabla IV. Debido a que esta etapa del sistema es específica para la aplicación de rastreo de objetos, fue necesario desarrollar el código de la aplicación

TABLA II

TABLA DE CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA PÁGINA WEB

Característica General	Descripción
Página principal	Contiene información general del sistema y permite el acceso a las demás funciones de la página web
Sistema de Registro e inicio de sesión	Controla la información presentada al usuario según su rol en la página web
Aplicación	Sección dedicada a la aplicación final, puede contener gráficas, menús y botones para interacción del usuario, entre otros
Sección de información	Permite al usuario conocer características importantes del sistema, dando además a conocer las posibilidades y parámetros modificables en la sección de aplicación

TABLA III

TABLA DE CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS DE LA PÁGINA WEB

Característica específicas	Descripción
Rango de operación	Circunferencia que muestra sobre el mapa el rango en el que puede estar el nodo
Sistema de Alertas	Advierte al usuario si el nodo se sale del rango de operación establecido
Botón de ocultar/mostrar	Al ser oprimido permite ocultar y mostrar el rango de operación de cada nodo en el mapa
Entrada para modificar centro del rango de operación	Entrada para el usuario que permite arrastra un marcador sobre el mapa para establecer un centro nuevo del rango de operación
Entrada para modificar radio	Entrada para el usuario que permite escribir el valor en kilómetros del radio nuevo del rango de operación del nodo de rastreo, adicionalmente tiene un botón para confirmar el cambio de este parámetro.
Selector del nodo de rastreo	Permite al usuario elegir cuál de los nodos se desea modificar sus parámetros

TABLA IV

TABLA DE SERVICIOS ELEGIDOS PARA EL ALMACENAMIENTO Y VISUALIZACIÓN DE LOS DATOS

Sub-Bloque	Plataforma o servicio	Tipo de plan
Base de datos en la nube	Google Firebase®	Plan gratis (Plan Spark)
API de mapas	Mapbbox	Código abierto
Base de datos SQL	MySQL	Licencia para público general (Gratis)
Programación Web	PHP, JavaScript	Gratis
Interfaz gráfico	CSS,PHP	Gratis
Servicio de alojamiento Web	125mb	Plan gratis

desde su inicio, lo que agregó una serie de retos en el proceso de diseño de la página web, debido a que se debió codificar en su totalidad la interfase de usuario.

En la Fig. 8 se presenta el diagrama de las secciones propuestas para la página web definiendo niveles de accesibilidad para cada parte que compone la interfaz. El menú de utilidades y de aplicación es de acceso restringido debido al tipo de información sobre la red y de los nodos que pueden contener. Este control de acceso se implementó mediante un inicio de

sesión y el registro de usuarios en un determinado rol. A continuación, se presentan los tipos de usuario definidos. 1) Administradores: Es el súper usuario de la aplicación web, puede acceder y modificar todas las características descritas para la aplicación de mapas, así como poder agregar nuevos usuarios, administrando los roles y permisos. 2) Encargado: Rol con acceso limitado a la aplicación de mapas orientado a los usuarios encargados de vigilar el comportamiento de los nodos, sólo tiene permisos de cambiar parámetros para mostrar u ocultar los rangos de operación de los nodos.

En este proyecto no se implementó una comunicación directa entre el sitio web y la puerta de enlace. Sin embargo, esta comunicación se logró a través de la base de datos de tiempo real implementada en Firebox. Tanto la comunicación entre la base de datos y la puerta de enlace como la comunicación entre la página web y la base de datos fueron implementadas usando la API REST. Adicionalmente, la página web usa una API para acceder a la interfaz gráfica de los mapas (proporcionado por Mapbox® con sus librerías). En su totalidad la página web fue desarrollada en usando PHP, CSS (Cascading Style Sheets) y JavaScript siguiendo un sistema de menús y secciones que muestran distintas funcionalidades e información del sistema. Por otro lado, para permitir la autenticación de usuarios (i.e., administradores y encargados) se incluyó el manejo de bases de datos SQL (Structured Query Language) usando la plataforma MySQL. Finalmente, se realizó las pruebas iniciales de funcionamiento de la interfaz web usando un servidor Apache local, XAMPP y MySQL, lo cual permitió ejecutar los códigos de la interfaz de forma local. Es importante aclarar que el primer usuario administrador se creó de forma manual, para luego poder crear los demás usuarios desde la sección de registro. Al obtener la correcta visualización de la página web de forma local se procedió a montarla en una página de hosting. Adicionalmente se montó al servidor MySQL en red, proporcionado por la misma página de hosting. Obteniendo así el resultado final de la página web la cual se puede acceder a través de la siguiente dirección: <http://loratracker.125mb.com/>.

III. ESTIMACIÓN DEL TIEMPO DE VIDA DEL NODO

En esta sección se explica las ecuaciones que permiten estimar el tiempo de vida de la batería que alimenta el nodo de rastreo. Este tiempo depende de la corriente promedio consumida en los distintos modos de funcionamiento del nodo. La Ecuación (1) permite estimar el tiempo de vida de la batería (T_b), relacionando la capacidad energética (C), su límite de descarga (D_L) y la corriente promedio consumida por el nodo (I_p).

$$T_b = \frac{C \cdot D_L}{I_p} \quad (1)$$

Para calcular la corriente del nodo de rastreo, se debe tener en cuenta que esta varía de acuerdo con el proceso que está realizando en el sistema de rastreo. Inicialmente debe obtener la ubicación del nodo, por lo que debe encender el GPS y el procesador, posteriormente se envía esta posición usando el transceptor y finalmente permanece en reposo hasta cuando se requiera actualizar su posición. El tiempo de actividad y el consumo de corriente previsto se ilustra en la Fig. 9 y la

ecuación de la corriente promedio del nodo de rastreo esta dado por:

$$I_p = \frac{T_t \cdot I_t + T_s \cdot I_s + T_a \cdot I_a}{T_t + T_s + T_a} \quad (2)$$

donde T_t es el tiempo de transmisión, I_t es la corriente consumida durante la transmisión, T_s es el tiempo de inactividad del transceptor, I_s es la corriente consumida en el modo de inactividad, T_a es el tiempo de actividad de obtención de las coordenadas y I_a es la corriente consumida mientras se obtiene la posición válida.

La modulación LoRa® incluye un esquema de corrección de error variable, derivado de la codificación Hamming (7,4) [17]. Este mecanismo está condicionado por la tasa de codificación (Code Rate - CR), la cual puede ser variada según los requerimientos del sistema. Otros parámetros que afectan directamente la transmisión en LoRa® son el factor de propagación (Spreading Factor - SF), que define la cantidad de modulaciones de frecuencia contenidas en cada símbolo. Un factor de esparcimiento más alto produce más tiempo de transmisión y un mayor consumo [6]. También es posible configurar otros parámetros como el ancho de banda operativo (Bandwidth - BW) y la potencia de transmisión (Power - PWR).

Para calcular el tiempo total de transmisión (T_t) se usa la Ecuación (3), donde P es la cantidad de símbolos que tiene el preámbulo, T_{sy} es el tiempo de transmisión de un símbolo y P_{sy} es la longitud del mensaje o payload en símbolos incluyendo el encabezado.

$$T_t = (P + 4,25) \cdot T_{sy} + P_{sy} \cdot T_{sy} \quad (3)$$

donde,

$$T_{sy} = \left(\frac{2^{SF}}{BW} \right) \quad (4)$$

$$P_{sy} = 8 + \left(\frac{8 \cdot PL - 4 \cdot SF + 8 + CRC + H}{4 \cdot (SF + DE)} \right) \cdot (CR + 4) \quad (5)$$

La Ecuación (5) [24] relaciona la longitud del mensaje en bytes (PL), el Spreading Factor (SF), el encabezado o header (H) de la trama se encuentra habilitado, el cual tiene un valor de 20 en la ecuación, el CRC está activado y es 16, mientras que la tasa de codificación (CR) es configurado como 1. La optimización de baja tasa de datos (DE) es 2 cuando está activada, sin embargo, para esta configuración no se encuentra habilitada, siendo este valor 0.

IV. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados del sistema de rastreo de objetos propuesto. Los resultados se subdividen en: las medidas experimentales de la capacidad de cobertura lograda por la red LoRa®, las pruebas de vida útil del nodo de rastreo, error de posición del GPS del nodo de rastreo y la completa funcionalidad del sistema con la interfaz web.

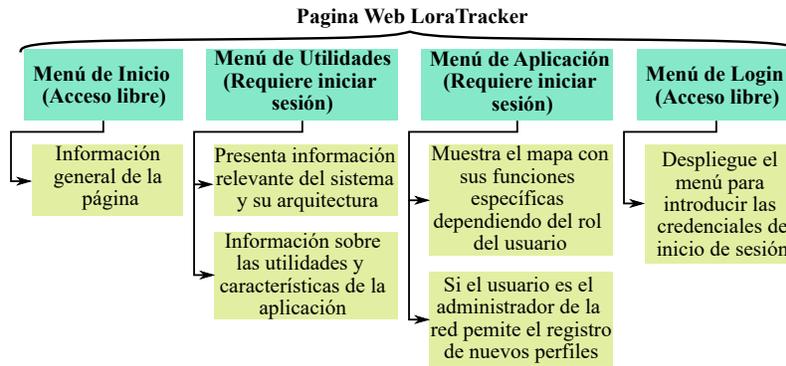


Fig. 8. Diagrama de distribución de la página web.

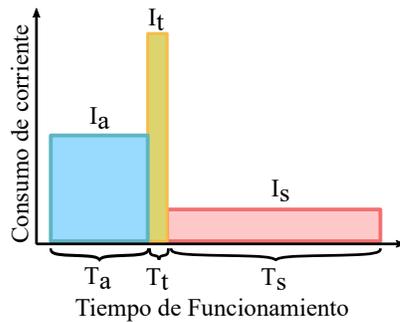


Fig. 9. Diagrama de consumo de corriente y tiempo de actividad de las fases de funcionamiento del nodo de rastreo.

TABLA V

TABLA DE RANGO MÁXIMO DE LA RED LORA®

Tipo de Entorno	Rango mínimo máximo obtenido [m]
Campo Abierto	815.3 - 896
Zona Urbana	463.5 - 516.8
Lugar Cerrado	92.1 - 114.7

A. Cobertura de la red LoRa®

La prueba de cobertura se realizó de forma no convencional, ya que no se contaba con la información del RSSI debido a limitaciones en el transceptor. La cobertura se evaluó cuantitativamente usando el error de paquetes, se definió como una zona de cobertura exitosa aquella zona en la cual este error era menor al 40%. Para la prueba experimental, se usó un enlace punto a punto configurado usando los parámetros LoRa® alliance para Latinoamérica (i.e., SF=9,CR=1,BW=125KHz,PWR=20) con un total de 10 paquetes enviados en cada prueba. Se contemplaron tres escenarios posibles en los que se prueba la cobertura de la red, los cuales son: En zona rural con vista directa entre los nodos, el segundo escenario es en zona urbana posicionado el gateway al aire libre y por último, en Zona Urbana posicionando el gateway dentro de una edificación. Estos casos son denominados Campo Abierto, Zona Urbana y Lugar Cerrado en la Tabla V. Finalmente, en la Fig. 10 se aprecian los resultados en los tres ambientes propuestos.

En las pruebas de cobertura se observó que la red es altamente dependiente de las condiciones geográficas y urbanísticas en las que se encuentra inmerso el enlace. Más aún, cuando hay línea de vista la cobertura aumenta drásticamente.

TABLA VI

TABLA DE CONSUMO DE CORRIENTE PARA CADA MODO DE ACTIVIDAD

Dispositivo	Corriente Consumida
I_t [mA]	$131.7 \pm 2,0804$
I_a [mA]	$56.6 \pm 1,21$
I_s [uA]	$101 \pm 3,01$

Por lo tanto, en un escenario real de despliegue del sistema se debe tener en cuenta la topología del lugar y los posibles obstáculos entre los nodos con el fin de definir el número y posicionamiento de los nodos receptores, ubicando este en un lugar abierto con el fin de obtener la mayor cobertura posible.

B. Pruebas de Vida Útil del Nodo

Las pruebas fueron realizadas midiendo la corriente para cada caso concreto. Para estas pruebas se usó un multímetro digital como amperímetro, conectado en serie con la batería, de modo que se pudiese medir la corriente consumida (i.e., I_t , I_s e I_a) por todo el nodo transmisor en cada uno de sus estados de funcionamiento. Se registraron los resultados para los tres casos de funcionamiento en la Tabla VI.

Una batería de Ion-litio convencional alcanza un voltaje de 2.96 V con el 1% de estado de carga [25]. Este fue el límite de voltaje definido para considerar una descarga completa de la batería del nodo en estas pruebas. Con base en esto, se presentan los estimados de corriente promedio consumida con la Ecuación (2) y los tiempos de vida del nodo usando la Ecuación (1) para las distintas configuraciones propuestas en Tabla VII. Los casos mostrados varían según dos parámetros principales, el tiempo de funcionamiento, que es el tiempo máximo de obtención de coordenadas y el tiempo de reposo, que es el tiempo de inactividad después de enviar las coordenadas a través de LoRa®.

De la Tabla VII se puede concluir que el tiempo de vida de la batería del nodo está fuertemente relacionado con la frecuencia de obtención de nuevas coordenadas para ser enviadas, así como el tiempo de actividad del GPS. Del análisis teórico se definió el caso dos como el modo de operación del nodo de rastreo. Para verificar experimentalmente este estimado se estableció un enlace punto a punto con la configuración del transceptor SF=9,CR=1,BW=125KHz,PWR=20. En este

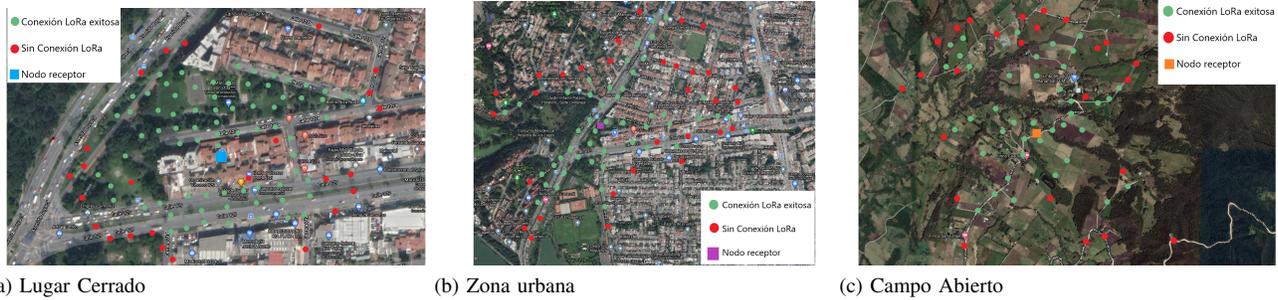


Fig. 10. Vista satelital de los entornos considerados para las pruebas de cobertura.

TABLA VII

TABLA DE TIEMPO DE VIDA DE LA BATERÍA PARA DISTINTOS PERIODOS DE FUNCIONAMIENTO

Configuración de funcionamiento	T_a [s] / T_s [s]	I_p [mA]	T_b [h]
Caso 1	10/60	8.6	483.018
Caso 2	10/30	14.9	278.13
Caso 3	20/60	14.6	285.01
Caso 4	20/30	23.2	178.93

*Todos lo casos contemplados se calcularon para una batería de 4200 mAh

escenario la batería se cargó completamente y se verificó un voltaje inicial de 4.12 V, después de 270.6 horas el voltaje disminuyó a 2.96. El error de esta prueba con el valor estimado fue de 2.67 %.

C. Error de Posición del Nodo

Para calcular el error de posición se realizó un experimento con 10 ubicaciones diferentes, cada una de estas posiciones se geolocalizó usando “Street View” de Google, las coordenadas obtenidas son consideradas libres de error. Posteriormente, en cada una de estas ubicaciones fueron colocados el nodo de rastreo y el celular para obtener las coordenadas generadas por sus GPS. Este procedimiento se repitió 10 veces en cada ubicación. Para cada uno de los resultados (en cada ubicación) se calculó el error promedio de las coordenadas como la distancia en metros con respecto a las coordenadas libres de error. Los valores medios obtenidos para cada ubicación se reportaron en la Tabla VIII. Finalmente, estos errores medios fueron promediados por dispositivo para estimar el error de posición de sus GPS. Las medidas de coordenadas para ambos casos fueron tomadas iniciando ambos GPS apagados, para posteriormente ser encendidos y esperar a que ambos GPS obtengan una posición válida.

El error del nodo medido es mucho mayor al esperado (i.e., 2.5 m reportado en la hoja de datos del NEO-6M [26]). Se aprecia una clara diferencia entre estas medidas, la cual es debida a que el fabricante especifica el caso de obtención de los datos posicionando el módulo en un lugar estático durante un periodo de 24 horas, mientras que las condiciones planteadas en este trabajo fueron desplazando el módulo GPS a un punto distinto cada vez que se obtiene la primera coordenada válida.

Se midió el índice de adquisición de coordenadas definido como el porcentaje entre las tramas enviadas sobre la cantidad

TABLA VIII

TABLA DE ERROR DE POSICIÓN OBTENIDO PARA LOS GPS EVALUADOS.

Medida tomada	Error Nodo [m]	Error Celular [m]
1	9.7	14.1
2	11.3	12.3
3	5.7	11.8
4	6.9	12.6
5	6.0	11.1
6	6.7	11.3
7	7.1	14.0
8	6.7	8.7
9	9.5	12.3
10	7.4	12.6
Error Promedio	7.7	12.1

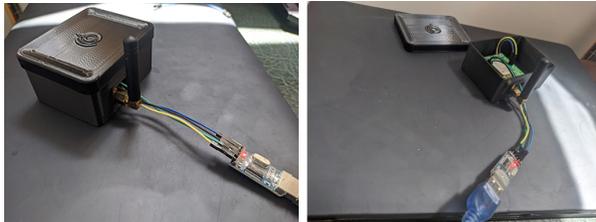
de estados activos del nodo, este índice permite medir el error sobre el cual el GPS no logra obtener una coordenada correcta dado un número de veces de activación, esto con el fin estimar la fiabilidad de actualización de las coordenadas de posición del nodo. Se realizaron tres pruebas por nodo en días diferentes. Para cada prueba se toma este índice sobre 60 posibles envíos de coordenadas, donde se obtuvo que el índice de adquisición de coordenadas con un mínimo de 82 % y un máximo de 90 %.

D. Resultados de Funcionalidad del Sistema

Se realizaron las pruebas funcionales de todo el sistema incluyendo las herramientas para el usuario y la infraestructura de red detallada en las secciones anteriores. La descripción detallada de dichas herramientas para el usuario fueron descritas en [27]. Sin embargo, para facilidad del lector algunos resultados son reportados en esta sección para validar la funcionalidad del sistema de rastreo propuesto.

Para las pruebas de funcionalidad, se ubicaron los dos nodos transmisores en distintos puntos dentro del rango de la red LoRa® con el fin comprobar la correcta actualización de ambos nodos en movimiento, teniendo en cuenta las limitaciones y rangos máximos de cobertura. La Fig. 11 muestra el nodo de recepción con su conexión USB, mientras que en la Fig. 12b se muestra el nodo de rastreo con conexión GPS y su batería conectada. En la Fig. 12a se muestra el nodo de rastreo cubierto y asegurado mediante una carcasa con cerradura Kensington al objeto de rastreo (e.g., un computador).

Se modificaron los rangos de operación para los nodos con el fin de evidenciar las funcionalidades desarrolladas en la



(a) Vista 1 del nodo receptor (b) Vista 2 del nodo receptor

Fig. 11. Nodo receptor con carcasa.



(a) Vista 1 del nodo de rastreo (b) Vista 2 del nodo de rastreo

Fig. 12. Nodo de rastreo con carcasa.

página web. En la Fig. 13a se muestran los nodos siendo rastreados en la interfaz de mapas desarrollada, así como sus rangos de operación definidos para cada uno. En la Fig. 13b se muestra cuando el nodo de rastreo sale de su área de operación definida. Por último en la Fig. 13c se muestra el cambio de los parámetros del rango de operación para el nodo de rastreo activando también su alerta visual y registrando el suceso en la base de datos.

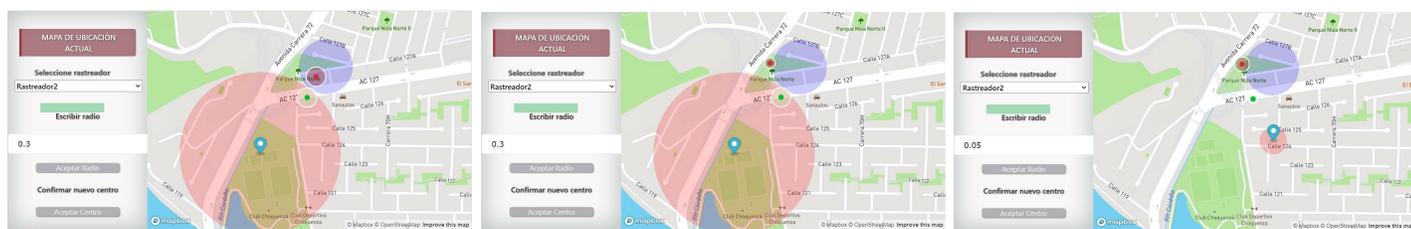
De los resultados mostrados se puede apreciar el correcto funcionamiento de las etapas que conforman el sistema, obteniendo unos resultados satisfactorios con respecto al sistema de procesamiento de la información desarrollada, asimismo se obtuvo un funcionamiento correcto de las herramientas integradas de Google Firebase® para la base de datos y Mapbox® para el interfaz de mapas. Se pudo apreciar el uso de distintos lenguajes de programación para el desarrollo de la página web, lo que permitió un mayor manejo de las distintas partes que conforman la página frente a otras alternativas de integración, dando más opciones y manejo de la incorporación de herramientas externas, como lo es el uso de base de datos en la nube, tablas para el manejo de usuarios y el desarrollo de una aplicación de rastreo específica.

V. CONCLUSIONES

El sistema de rastreo propuesto, presenta total funcionalidad de las etapas desarrolladas, abordando el uso de un interfaz para el usuario soportada en Google Firebase® y Mapbox®, la cual permite visualizar en tiempo real los nodos y brindar herramientas adicionales para el rastreo, proporcionando un valor agregado a la solución presentada.

A partir de las pruebas y cálculos realizados se evidencia que los parámetros que más afectan el rendimiento y la autonomía energética del nodo para el transceptor son el factor de propagación (Spreading Factor - SF) y el ancho de banda

(Bandwidth - BW), que condicionan directamente el tiempo en el aire del mensaje y con esto, la autonomía energética del nodo. Ajustando estos parámetros y tiempos de actividad se logró una autonomía energética mayor a 11 días (270.6 h). De la etapa del procesamiento de la información se pudo apreciar el desarrollo de un interfaz web usando distintos lenguajes de programación, lo que permitió un mayor manejo de las distintas partes que conforman la página frente a otras alternativas de integración. El costo del nodo de rastreo y el nodo receptor son US\$39.38 y US\$28.00 respectivamente. En cuanto a su cobertura, se logra un valor máximo de 896 metros en condiciones de campo abierto, que se reduce a 114 metros en condiciones de lugar cerrado. Como trabajo futuro a corto plazo, se realizará el despliegue del sistema en la Pontificia Universidad Javeriana. Este sistema rastreará los computadores de préstamo en el interior del campus. Como trabajo futuro a largo plazo, se pretende estudiar el impacto costo-beneficio de arquitecturas orientada totalmente al internet de las cosas. A nivel del sistema de procesamiento de la información, se pretende analizar soluciones basadas en el uso de bases de datos relacionales y servicio de mensajería con patrón publicador/suscriptor (e.g., MQTT). A nivel de red de comunicaciones, se pretende analizar los compromisos inherentes a la construcción de las tramas, topología de red dinámica y el consumo energético de los nodos.



(a) Nodos dentro de sus rangos de operación (b) Movimiento del nodo fuera del rango de operación (c) Cambio de los parámetros del rango de operación

Fig. 13. Pruebas sobre la aplicación de rastreo.

VI. AGRADECIMIENTOS

Los autores les agradecen al Departamento de Electrónica y al Laboratorio de la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana por proveer los recursos requeridos para la realización de este estudio.

REFERENCIAS

- [1] R. Priyadarshi, B. Gupta, and A. Anurag, "Deployment techniques in wireless sensor networks: a survey, classification, challenges, and future research issues," *The Journal of Supercomputing*, vol. 76, no. 9, pp. 7333–7373, 2020.
- [2] F. Giménez, C. Zerbin, and G. Riva, "Extending sms service coverage in rural areas by using lora communication technology," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 18, no. 02, pp. 214–222, 2019.
- [3] P.-C. Lai, H.-Z. Huang, M.-H. Sheu, C.-M. Wu, J.-T. Le, and T.-H. Chen, "Bike sensor system design for safety and healthy riding," in *2018 IEEE International Conference on Consumer Electronics-Taiwan (ICCE-TW)*. IEEE, 2018, pp. 1–2.
- [4] D. H. Kim, J. B. Park, J. H. Shin, and J. D. Kim, "Design and implementation of object tracking system based on lora," in *2017 International conference on information networking (ICOIN)*. IEEE, 2017, pp. 463–467.
- [5] R. O. Comparan, D. Vasquez, I. L. Juarez, M. Pena, J. Savage, and G. Lefranc, "System administration and monitoring moving objects using mobile devices," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 13, no. 6, pp. 1934–1939, 2015.
- [6] S.-Y. Wang, Y.-R. Chen, T.-Y. Chen, C.-H. Chang, Y.-H. Cheng, C.-C. Hsu, and Y.-B. Lin, "Performance of lora-based iot applications on campus," in *2017 IEEE 86th vehicular technology conference (VTC-Fall)*. IEEE, 2017, pp. 1–6.
- [7] G. Lian and F. Yu, "A data platform based on web service for wireless sensor network," in *2014 4th IEEE International Conference on Information Science and Technology*. IEEE, 2014, pp. 670–673.
- [8] T. Arai, T. Yoshizawa, T. Aoki, K. Zempo, and Y. Okada, "Evaluation of indoor positioning system based on attachable infrared beacons in metal shelf environment," in *2019 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*. IEEE, 2019, pp. 1–4.
- [9] M. Ochiai, M. Fujii, A. Ito, Y. Watanabe, and H. Hatano, "A study on indoor position estimation based on fingerprinting using gps signals," in *2014 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, 2014, pp. 727–728.
- [10] R. I. S. Pereira, S. C. S. Jucá, P. C. M. Carvalho, and C. P. Souza, "Iot network and sensor signal conditioning for meteorological data and photovoltaic module temperature monitoring," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 17, no. 06, pp. 937–944, 2019.
- [11] D. Croce, D. Garlisi, F. Giuliano, A. L. Valvo, S. Mangione, and I. Tinnirello, "Performance of lora for bike-sharing systems," in *2019 AET International Conference of Electrical and Electronic Technologies for Automotive (AET AUTOMOTIVE)*, 2019, pp. 1–6.
- [12] A. Zourmand, A. L. Kun Hing, C. Wai Hung, and M. AbdulRehman, "Internet of things (iot) using lora technology," in *2019 IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS)*, 2019, pp. 324–330.
- [13] F. Samie, L. Bauer, and J. Henkel, "Iot technologies for embedded computing: A survey," in *2016 International Conference on Hardware/Software Codesign and System Synthesis (CODES+ISSS)*, 2016, pp. 1–10.
- [14] J. Haxhibeqiri, A. Karaagac, F. Van den Abeele, W. Joseph, I. Moerman, and J. Hoebeke, "Lora indoor coverage and performance in an industrial environment: Case study," in *2017 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, 2017, pp. 1–8.
- [15] "Ieee standard for local and metropolitan area networks—part 15.4: Low-rate wireless personal area networks (lr-wpans)," *IEEE Std 802.15.4-2011 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2006)*, pp. 1–314, 2011.
- [16] L. R. Prado, E. R. de Lima, L. S. de Moraes, M. Biehl Hamerschmidt, and G. Fraidenraich, "Experimental performance comparison of emerging low power wide area networking (lpwan) technologies for iot," in *2019 IEEE 5th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, 2019, pp. 905–908.
- [17] Y. Yao, Z. Ma, and Z. Cao, "Losee: Long-range shared bike communication system based on lorawan protocol," in *EWSN*, 2019, pp. 407–412.
- [18] W. San-Um, P. Lekbunyasim, M. Kodyoo, W. Wongsuwan, J. Makfak, and J. Kerdri, "A long-range low-power wireless sensor network based on u-lora technology for tactical troops tracking systems," in *2017 Third Asian Conference on Defence Technology (ACDT)*, 2017, pp. 32–35.
- [19] P. Fraga-Lamas, M. Celaya-Echarri, P. Lopez-Iturri, L. Castedo, L. Azpilicueta, E. Aguirre, M. Suárez-Albela, F. Falcone, and T. M. Fernández-Caramés, "Design and experimental validation of a lorawan fog computing based architecture for iot enabled smart campus applications," *Sensors*, vol. 19, no. 15, 2019. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/15/3287>
- [20] S.-Y. Wang, J.-J. Zou, Y.-R. Chen, C.-C. Hsu, Y.-H. Cheng, and C.-H. Chang, "Long-term performance studies of a lorawan-based pm2.5 application on campus," in *2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 2018, pp. 1–5.
- [21] L. Alliance@. (2022) The leading open global standard for secure, carrier-grade iot lpwan connectivity. [Online]. Available: https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/lorawan/_regional/_parameters/_v1.0.3reva/_0.pdf
- [22] M. T. Inc. (2015) Rn2903 lora™ technology module command reference user's guide. [Online]. Available: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/40001811A.pdf>
- [23] G. Lian and F. Yu, "A data platform based on web service for wireless sensor network," in *2014 4th IEEE International Conference on Information Science and Technology*, 2014, pp. 670–673.
- [24] domenix (<https://electronics.stackexchange.com/users/98714/domenix>), "Understanding the relationship between lora chips, chirps, symbols and bits," Electrical Engineering Stack Exchange, uRL:<https://electronics.stackexchange.com/q/278371> (version: 2020-06-11). [Online]. Available: <https://electronics.stackexchange.com/q/278371>
- [25] M. Chen and G. Rincon-Mora, "Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and i-v performance," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 21, no. 2, pp. 504–511, 2006.
- [26] u blox. (2011) Neo-6 u-blox 6 gps modules data sheet. [Online]. Available: [https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6_DataSheet_\(GPS.G6-HW-09005\).pdf](https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6_DataSheet_(GPS.G6-HW-09005).pdf)
- [27] J. Carvajal, A. Fajardo, and C. Páez, *A Low-Cost Web Interface for Object Tracking Based on a Wireless Sensor Network*. Advanced Computing and Intelligent Technologies, Proceedings of ICACIT, 07 2021, pp. 401–416.



Juan Pablo Carvajal Acosta nació en Bogotá, Colombia, el 21 de Septiembre de 1998. Obtuvo el grado de Ingeniero Electrónico en la Pontificia Universidad Javeriana de Bogotá. Actualmente es Desollador Junior en el área de las transacciones por antenas en RF. Sus intereses se enfocan en los sistemas digitales enfocado al internet de las cosas (Iot) y el diseño en FPGA.



Robert Alexis Urbina Mojica nació en Cúcuta, Colombia, el 6 de Octubre de 1998. Obtuvo el grado de Ingeniero Electrónico en la Pontificia Universidad Javeriana de Bogotá. Actualmente es ingeniero junior en investigación en el área de electrónica de potencia. Sus intereses se enfocan al desarrollo de energías renovables, recolección de energía de fuentes no convencionales y sistemas embebidos digitales.



Luis Carlos David Baron Mosquera nació en Bogotá, Colombia, el 20 de agosto de 1999. Obtuvo el grado de Ingeniero Electrónico en la Pontificia Universidad Javeriana. Actualmente, él es un ingeniero dedicado al mantenimiento e instalación de equipos médicos para imágenes diagnósticas. Sus intereses de investigación están enfocados en las áreas de cosechadores de energía eléctrica y bioingeniería.



Carlos Ivan Paez-Rueda (S'00–M'03–SM'08) was born on March 9, 1973, in Cúcuta - Colombia. He received the B.S. degree in Electronics Engineering from Pontificia Universidad Javeriana, Colombia, in 1997. He received M.S. degree from Universidad de los Andes, Colombia, in 2002. He graduated as a Specialist in Research and Education from Universidad Sergio Arboleda, Colombia, in 2004. Finally, he obtained his doctoral degree in engineering at the Universidad de los Andes, Colombia, in 2017. His employment experience included several

Telecommunication companies in Colombia. Since 2006, he is professor in the Electronics Department with Pontificia Universidad Javeriana. His working field includes simulation models and optimization algorithms for telecommunications, computational electromagnetics (CEM) and design of passive radio frequency devices.



Arturo Fajardo (S'04–M'11–SM'19) Se le otorgo el título de Ingeniero Electrónico y de Maestro en Ingeniería Electrónica por la Pontificia Universidad Javeriana, Colombia, en 2002 y 2008, respectivamente. En 2018 obtuvo el título de Doctor en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Federal de Santa Catarina. Desde el 2006, ha sido profesor en el Departamento de Electrónica de la Pontificia Universidad Javeriana. Su interés en la investigación actual, incluye circuitos de RF de alta eficiencia para comunicaciones inalámbricas, redes de área del

corporal, transferencia de energía inalámbrica y electrónica de instrumentación inalámbrica.