

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA MÓVIL CON GEOLOCALIZACIÓN DE MEDICIÓN DE RADIACIONES NO IONIZANTES UTILIZANDO UNA RED AD-HOC IOT.

Sergio F. Felissia¹, Jorge A. Bossio¹, Gastón C. Peretti¹, Alejo Casas¹, Gastón Pautasso¹

¹Grupo de Investigación y Desarrollo en Electrónica (GIDE), Departamento de Ingeniería Electrónica, Facultad Regional San Francisco, Universidad Tecnológica Nacional, Av. De la Universidad 501 San Francisco (Córdoba).
sfelissia@facultad.sanfrancisco.utn.edu.ar

Resumen

A partir del proyecto homologado (PID) donde se propuso realizar un mapa de la potencia radiada por las transmisiones de radiofrecuencia en el ejido urbano de la ciudad de San Francisco, se planteó el diseño de un sistema de medición automático con geolocalización que permitiera tomar muestras a través de un vehículo que se desplaza por la zona objeto.

Se describe el dispositivo de medición y la red IoT ad-hoc implementada, utilizando la tecnología LoRa, a través de módulos de sistemas embebidos, cuyo concentrador (gateway) se ubicó en la azotea de un edificio del centro de la ciudad a una altura aproximada de 100 metros. El sistema así implementado nos permitió un radio de cobertura de alrededor de 15 km a través del enlace en 915Mhz, lo cual nos aseguró cubrir la totalidad del radio urbano de la ciudad de San Francisco.

El enlace con el móvil se realiza a través de transceptores LoRa, basados en el módulo SX1276, que permiten con una mínima potencia de 20 dbm (100mW), alcanzar el rango de cobertura deseado. Para el enlace de backhaul se utiliza la red 4G. La red Wifi implementada dentro del gabinete del gateway permite conectar el transceptor LoRa y una placa Raspberry Pi 3 con la cual se realiza la programación del módulo LoRa en forma remota.

Un servidor MQTT y una aplicación Node-Red ejecutándose en la nube y registrando en una base de datos, los valores de latitud, longitud y potencia media radiada completan el paquete tecnológico.

Se concluyó que el sistema puede tomar mediciones geolocalizadas y almacenarlas en una base de datos. Se describen en el trabajo las condiciones en que se deben tomar las muestras teniendo en cuenta la normativa vigente y los cuidados necesarios para evitar mediciones erróneas por la emisión del transceptor móvil.

Palabras Clave: Red IoT, Radiaciones RNI, LoRa, Servidor MQTT, Geolocalización.

Introducción

La gran proliferación de las tecnologías de comunicación inalámbrica en las últimas décadas ha devenido en la instalación de todo tipo de antenas transmisoras, como así también, en el control de éstas por parte del estado. El objetivo del monitoreo constante es asegurar tanto la correcta prestación de los servicios como así también los niveles de radiación a los que se expone la población. El Ente Nacional de Comunicaciones establece en la Resolución 3690/04 cómo deben efectuarse las mediciones y los límites máximos permitidos. Sin embargo, el método empleado requiere de mediciones estáticas en lugares puntuales, lo que supone un tiempo prolongado en la adquisición de los datos y la consecuente desventaja de no abarcar la totalidad del ejido urbano. El presente trabajo busca el desarrollo de una plataforma portátil capaz de llevar a cabo mediciones de inmisión y su correspondiente mapeo geográfico, con el objetivo de brindar información rápida, relevante y de alta densidad geográfica a los organismos de control. Su implementación se concibió como un dispositivo compuesto de una antena isotrópica, un medidor de potencia de radiofrecuencia (RF), un receptor del Sistema de Posicionamiento Global

(GPS, por sus siglas en inglés), un módulo embebido con comunicación inalámbrica en frecuencias de 915 MHz y modulación LoRa, encargado del acondicionamiento de los datos enviados por el medidor RNI y el receptor GPS.

El módulo embebido, procesa la información y la envía al concentrador (Gateway) de la red IoT que se encuentra instalado en altura, en una locación céntrica de la ciudad de San Francisco. En la Figura 1, puede observarse el esquema del sistema móvil de medición de potencia de RF, utilizando la infraestructura piloto IoT basada en LoRa instalada por el grupo de investigación.

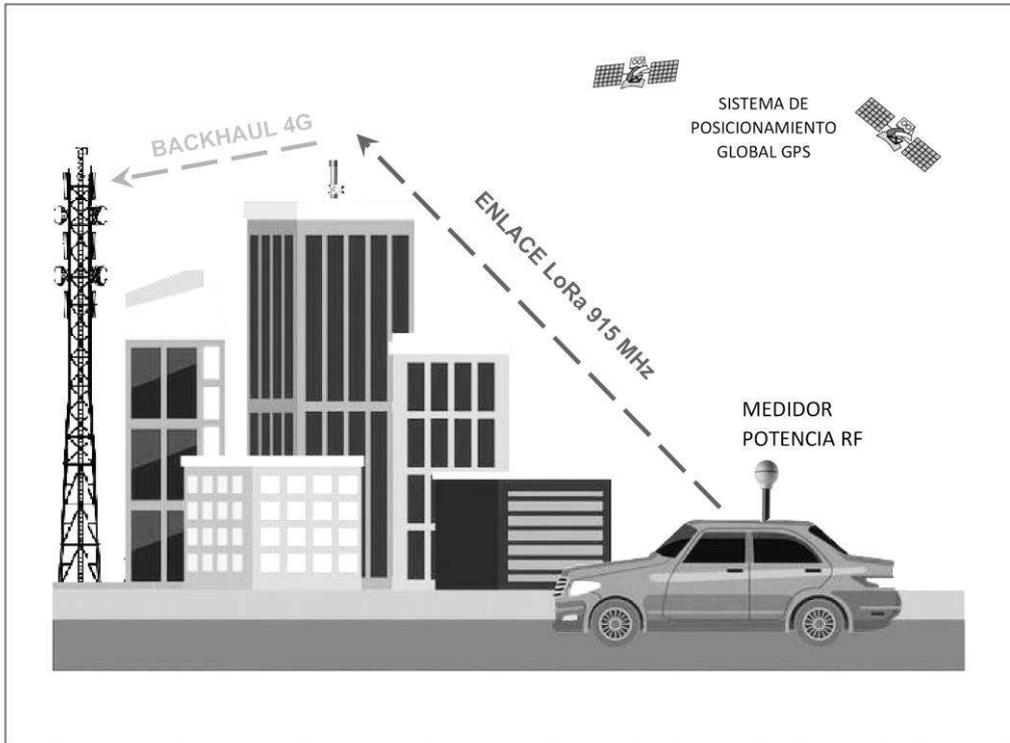


Figura 1: Esquema del sistema de medición móvil.

En la Figura 2, se observa el diagrama en bloques del sistema completo, donde se pueden identificar las dos partes que componen el sistema, el módulo concentrador y el dispositivo de medición móvil.

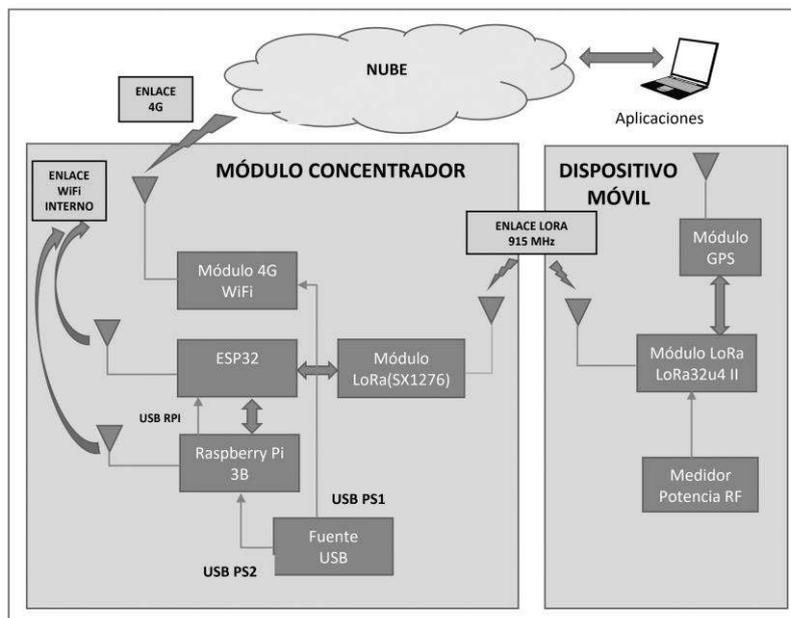


Figura 2: Diagrama en bloques del sistema completo

Materiales y métodos:

Módulo concentrador:

Este módulo hace las funciones de Gateway entre los dispositivos de medición móviles o fijos distribuidos sobre la superficie del ejido urbano de la ciudad y alrededores, con un radio de cobertura de aproximadamente 15 km. Consta de un módulo de radio LoRa, con su correspondiente antena, conectado a una placa embebida de la firma Espressif, ESP32 que incluye conectividad WiFi estándar. Por otro lado, un modem 4G-WiFi permite la conexión a Internet del módulo ESP32, a través de la red de telefonía celular. Se incluye dentro del módulo una placa Raspberry Pi 3B, para realizar monitoreo remoto del sistema y además realizar cambios en la programación del módulo embebido ESP32 que controla la radio LoRa, basada en el integrado SX1276 de Semtech.

La conectividad LoRa.

LoRa es un tipo de modulación SS-Spread Spectrum, y la novedad de esta técnica consiste en el uso de una señal chirp que varía constantemente con la frecuencia (A. Lavric, 2017). La ventaja de utilizar este método es que el desplazamiento en tiempo y frecuencia para el emisor y el receptor es el mismo, lo que reduce considerablemente la complejidad del receptor [5] .

Las ventajas de la tecnología LoRa son:

- Utilice la banda de frecuencia ISM sin licencia.
- Es una solución flexible que se puede adaptar fácilmente.
- Es escalable.
- Es compatible con la comunicación bidireccional.
- Proporciona un alto nivel de seguridad debido a los algoritmos de encriptación.
- Proporciona eficiencia energética.

La técnica de modulación LoRa es del tipo Chirp Spread Spectrum (CSS). Utiliza diferentes factores de dispersión de modulación (SF) que van desde SF7 a SF12. Este mecanismo proporciona resistencia a la interferencia y al desvanecimiento por trayectos múltiples. Así, es posible ajustar individualmente por nodo la tasa de modulación y la potencia de transmisión. Si se aumenta el SF, el tamaño del paquete se reducirá, lo que dará como resultado una mayor potencia sobre el canal y una mayor distancia de comunicación. La Tabla 1 presenta los factores de dispersión de LoRa para un ancho de banda de 125 kHz. Como se puede observar, si se aumenta el factor de propagación, se reduce la tasa de bits, se aumenta el parámetro de tiempo en el aire, pero se mejora significativamente el límite de SNR.

Tabla 1. Factores de dispersión LORA para ancho de banda de 125 Khz. (A. Lavric, 2017)

Spreading Factor	Symbols/second	SNR limit	Time-on air for 10 bytes packet [ms]	Bitrate [bits/sec]
7	976	-7.5	56	5469
8	488	-10	103	3125
9	244	-12.5	205	1758
10	122	-15	371	977
11	61	-17.5	741	537
12	30	-20	1483	293

Componentes del dispositivo móvil (Figura 3).

Placa LoRa32u4 II

Es una placa ligera y de bajo consumo basada en el Atmega32u4 con módulo LoRa 868MHz/915Mhz.

- Módulo base:
 - ATmega32u4 a 8 MHz con lógica/alimentación de 3,3 V
 - Soporte nativo USB, viene con cargador de arranque USB y depuración de puerto serie.
 - Conversor A/D de 10 bits.
 - Cargador integrado de baterías de 100 mA
- Módulo LoRa:
 - Basado en el módulo SX1276 de Semtech.
 - Tipo de interfaz: SPI
 - Función RSSI digital
 - Corrección automática de frecuencia
 - Control de ganancia automática
 - Función Sleep.
 - Detección de bajo voltaje y sensor de temperatura

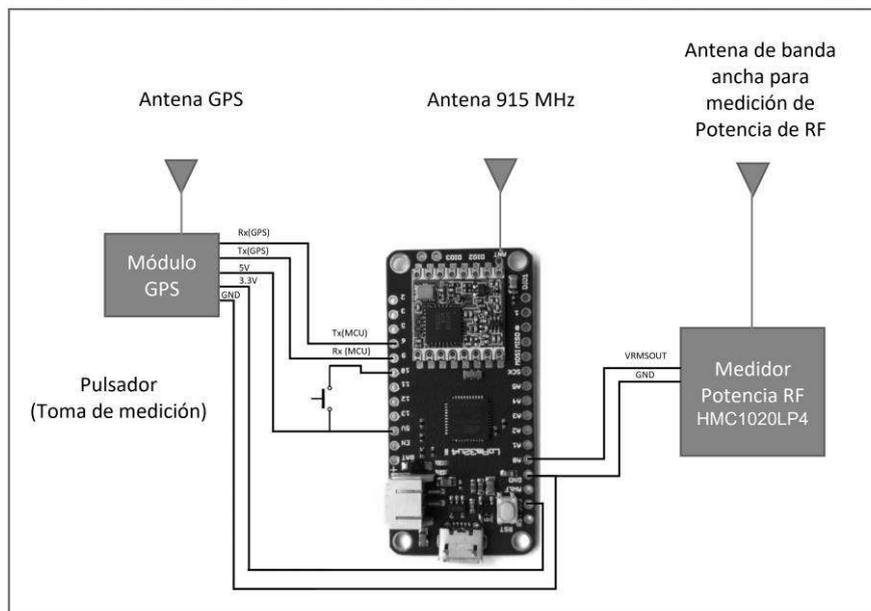


Figura 3: Diagrama en bloques del dispositivo móvil de medición.

Receptor GPS

Se utiliza un módulo receptor GPS estándar de la empresa SIMCOM (SIM808), el cual se comunica a la placa LoRa32u4 II a través de un puerto serie, que permite configurar, monitorear y leer la información de localización GPS por medio de comandos AT. La salida de los datos de posicionamiento se configura para un formato específico del protocolo NMEA. Los datos son transmitidos a través de tramas con caracteres ASCII, separados por comas. Cada sentencia es totalmente

independiente de otras. Comienza con el signo “\$” y termina con una secuencia de <CR><LF> (retorno de carro, salto de línea).

Los primeros dos caracteres después del signo “\$”, identifican al equipo. Para los receptores GPS, el prefijo es GP. Este va seguido de una secuencia de tres letras que definen el tipo de información que se está enviando, como puede apreciarse en la Figura 4.

La información suministrada por la salida en este formato es latitud, longitud, altitud, fecha y hora.

```
AT+CGPSOUT=32
OK
$GPRMC,153832.000,A,3125.5649,S,06205.5254,W,0.21,123.80,030922,,A*62
```

Figura 4: Comandos AT para activar la transmisión de información y su correspondiente salida.

Medidor de potencias de RNI

La porción del espectro radioeléctrico a mensurar comprende desde 9 kHz a 3 GHz. Dentro de este rango se encuentran servicios inalámbricos de diferente índole, algunos de modulación analógica, tales como las radiodifusoras comerciales, mientras que otros de modulación digital, como los servicios de telefonía móvil y enlaces punto a punto. Esta situación obliga la implementación de un medidor cuya salida sea independiente de la forma de onda a su entrada, es decir, que sólo responda al valor eficaz de la señal cuantificada (E. Del Valle, 2014). Por otro lado, dado el gran rango de potencia manejada por los transmisores, desde microWatts hasta kiloWatts, se torna necesario la aplicación de un dispositivo capaz de manejar dicho rango dinámico manteniendo invariable su función de transferencia. En el mercado electrónico existen circuitos integrados capaces de realizar la acción requerida, denominados detectores de radiofrecuencia (M. Kouwenhoven, 2019). Se clasifican en tres grupos: detectores RMS, amplificadores logarítmicos demoduladores y detectores Schottky. Si bien todos tienen en común la capacidad de transformar una señal de RF presente en su entrada a una señal de tensión continua proporcional a la potencia de aquella, se diferencian por el rango dinámico y la sensibilidad de su entrada, y por la exactitud de la conversión, entre otros. La Tabla 2 compara las tres categorías.

Tabla 2. Comparación de los distintos detectores de RF (M. Kouwenhoven, 2019).

Tipo de detector	Detector RMS Detector Schottky	Detector logarítmico	Detector Schottky
Función de transferencia	Lineal en dB, lineal en Volts	Lineal en dB, lineal en Volts	Diodo, lineal en Volt
Sensibilidad de entrada	-65 dBm	-78 dBm	-25 dBm
Rango dinámico	70 dB	100 dB	45 dB
Sensibilidad a la modulación	Muy insensible	Muy sensible	Moderadamente sensible
Tiempo de respuesta	> 1 µS	10 nS ~ 100nS	< 10 nS

Si bien los detectores basados en amplificadores logarítmicos son los que poseen mayor rango dinámico y mejor sensibilidad en su entrada, la dependencia de su función de transferencia respecto del tipo de modulación los descalifica para nuestra aplicación. En cambio, los detectores de valor eficaz resultan la solución de compromiso adecuada, amén de la pérdida de sensibilidad y la reducción de su rango dinámico (E. Del Valle, 2014).

La búsqueda del dispositivo concluyó con el circuito integrado HMC1020LP4E de la firma Hittite Microwave Corporation (S. Felissia, 2019). Diseñado para medición de potencia de RF y aplicaciones de control de transmisores, posee un ancho de banda de 3,9 GHz, puerto de entrada de terminación en modo común (single-ended input) y un rango dinámico de 72 dB (de -65 dBm a +7 dBm), entre sus características más notables.

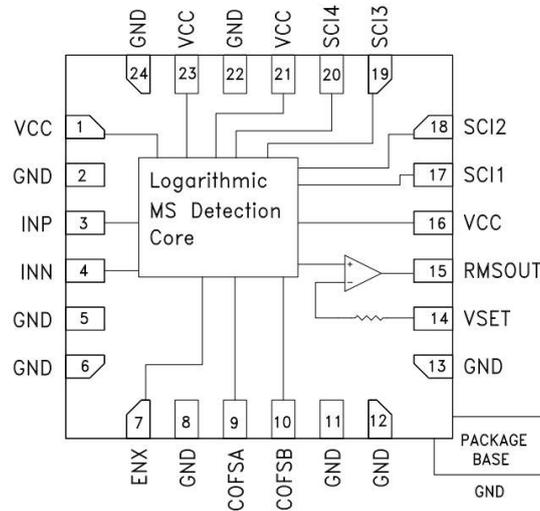


Figura 5: Diagrama funcional del Hittite HMC1020LP4E

El HMC1020LP4E logra su cometido gracias a su núcleo de detección logarítmica (Figura 5). En simples palabras, consiste en un rectificador de onda completa, un circuito logarítmico/antilogarítmico y un integrador. La relación entrada-salida se describe en (1).

$$V_{OUT(RMS)} = \frac{1}{k} \ln(\beta k G^2 \int V_{IN}^2 dt) \quad (1)$$

Donde $V_{OUT(RMS)}$ es la tensión de salida proporcional a la potencia RMS de la señal de RF a la entrada; V_{IN} , la caída de tensión provocada por la señal de RF sobre una carga de 50Ω ; β , k y G , constantes propias del detector HMC1020LP4E. Sin embargo, es de nuestro interés conocer la potencia de la señal analizada, por lo que la ecuación que la vincula con la $V_{OUT(RMS)}$ es (2):

$$P_{IN} = \frac{V_{OUT(RMS)}}{\log_slope} + \log_intercept \quad (2)$$

donde \log_slope es la pendiente logarítmica del detector (35,2 mV/dB @ 900 MHz), y $\log_intercept$ (-67,9 dBm @ 900 MHz), su ordenada a cero.

Por último, cabe mencionar que el HMC1020LP4E tiene capacidad de ajuste del intervalo de integración, permitiendo establecer la respuesta de la salida a los transitorios presentes en toda señal modulada. Mediante cuatro pines específicos denominados SCI, el usuario tiene la posibilidad de aumentar el tiempo de integración, resultando en un ancho de banda del integrador más acotado. Esto otorga una señal de salida más filtrada y un valor medido de potencia más exacto, a cambio de una respuesta a transitorios más lenta. Un ejemplo de esto puede apreciarse en la Fig. 3, donde para una señal WiMAX de modulación digital a 900 MHz se configura el intervalo de integración al mínimo (SCI = 0000) y, luego, a uno mayor (SCI = 0110).

Se resolvió la utilización del circuito integrado Hittite HMC1020LP4E que cumple con los requerimientos establecidos oportunamente, y ofrece ventajas sobre sus competidores al contar con un intervalo de integración ajustable, dejando al usuario la determinación de la relación entre exactitud y velocidad de respuesta. Se utiliza una placa de evaluación del HMC1020LP4E.

La salida $V_{OUT(RMS)}$ se conecta a una entrada analógica de la placa LoRa32u4 II. La relación de la salida $V_{OUT(RMS)}$ versus la potencia se muestra en la Figura 6. La placa de evaluación del circuito integrado HMC1020LP4E se montó en una caja de aluminio separada de la caja donde se encuentra la placa LoRa32u4 II para evitar interferencias en la medición. De todos modos, la radio LoRa se inhabilita durante la medición de potencia.

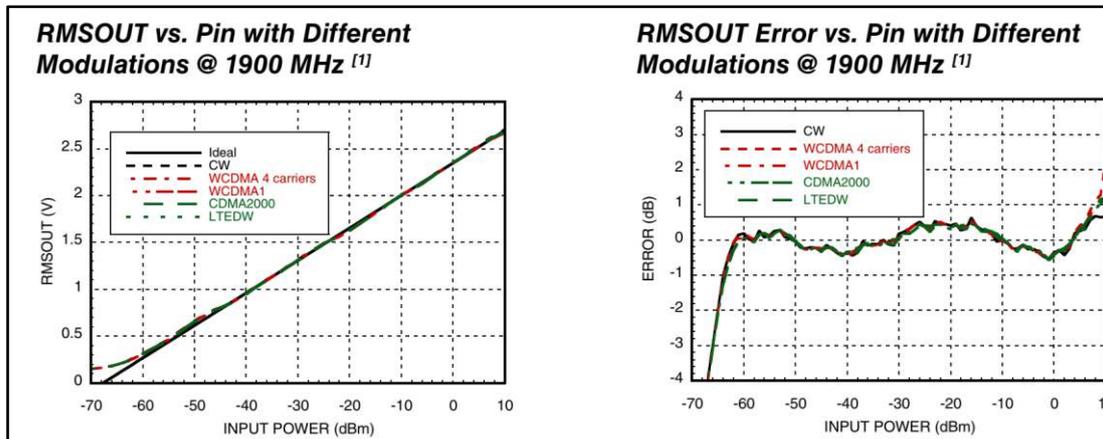


Figura 6: Relación del voltaje de salida (RMSOUT) en función de la potencia de entrada (INPUT POWER) para diferentes modulaciones para la frecuencia de 1900 MHz.

Software

Debemos identificar distintos componentes del software del sistema completo. A saber: Firmware de la radio LoRa controlada por el ESP32, el firmware del dispositivo de medición móvil, los software instalados en el servidor virtual, servidor MQTT y flujos NodeRED de manejo de la base de datos y paneles de visualización (Figura 7).

Se dispone de una máquina virtual instalada en la nube a través de un proveedor (ISP) donde se encuentra instalado un servidor (Broker) de protocolo MQTT. El protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) es un protocolo PubSub de Message Service que actúa sobre TCP. Destaca por ser ligero, sencillo de implementar. Resulta apropiado para dispositivos de baja potencia como los que frecuentemente tenemos en IoT. Está optimizado para el routing activo de un gran número de clientes conectados de forma simultánea. MQTT es un servicio de mensajería con patrón publicador/suscriptor (pub-sub). En este tipo de infraestructuras los clientes se conectan con un servidor central denominado broker.

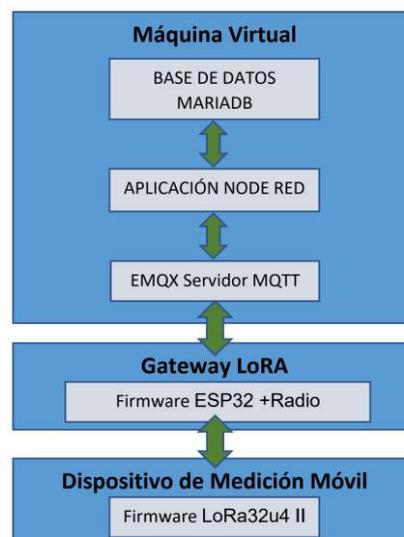


Figura 7: Esquema de los componentes de software.

Firmware del dispositivo de medición móvil.

El objetivo del sistema es registrar los valores de la localización, latitud y longitud; tiempo, fecha y hora; id del móvil y la medición de potencia de RF obtenida cada vez que el operador del equipo y conductor del móvil presiona el pulsador de toma de medición. Para realizar la medición es necesario detener el vehículo y esperar que el medidor integre durante un período de 6 minutos (T_Med) las mediciones y se obtenga un valor. Siendo esta la forma que indica la norma para la toma de mediciones de radiación de antenas. Durante el período de medición, el módulo de radio inhabilita la salida de RF en 915 MHz, para evitar interferencias y errores en la medición. Por otro lado, el operador debe apagar su terminal celular. Una vez transcurrido el tiempo de medición, el valor, junto con los datos de localización y horarios son transmitidos al concentrador (Gateway).

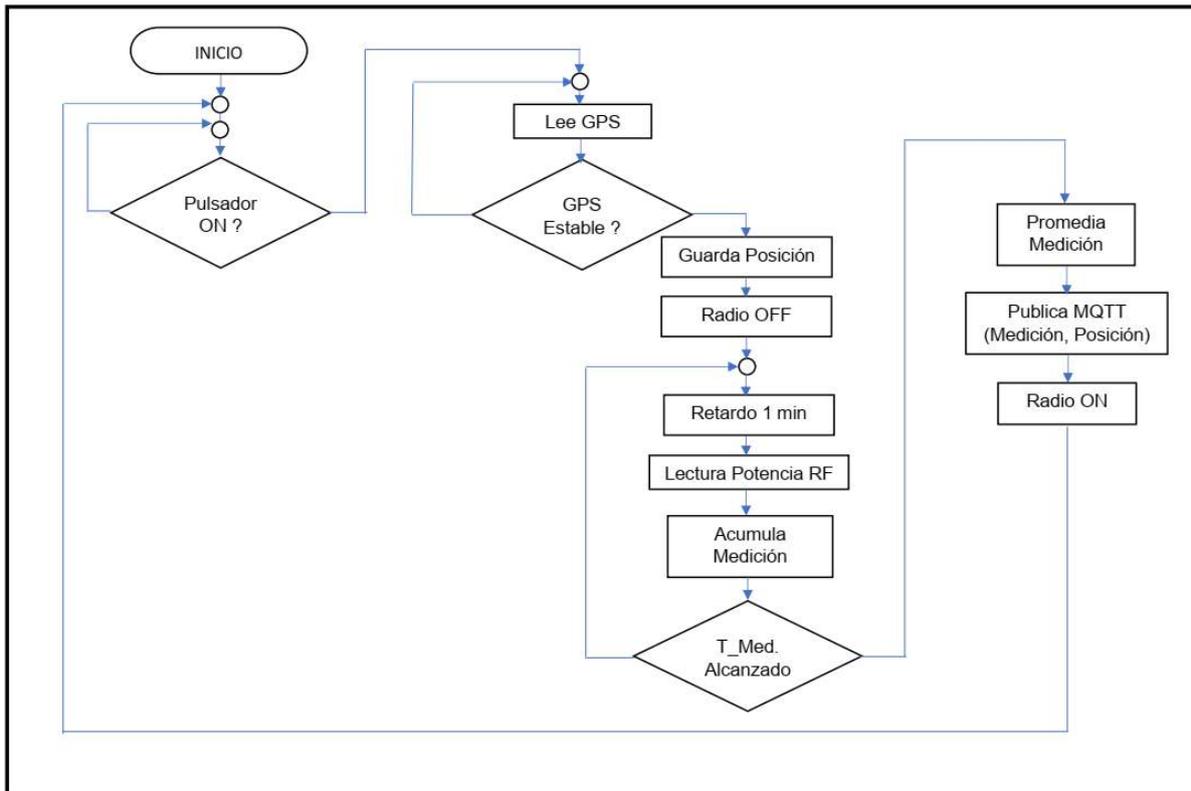


Figura 8: Diagrama de flujo del firmware del dispositivo de medición.

Los datos relevados son publicados en un tópico definido en el firmware del dispositivo de medición. El formato de publicación es JSON. En la Figura 9 se observa la estructura del objeto JSON diseñado.

```
1  {
2    "Lat": "31.255649",
3    "SN": "S",
4    "Long": "62.055254",
5    "WE": "W",
6    "Alt": "153.832",
7    "Pot_RF": "31.255649",
8    "Movil": "10"
9  }
```

Figura 9: Estructura del objeto JSON.

Software del Concentrador LoRa-4G.

Los paquetes de software instalados en la máquina virtual que actúa como servidor son:

- EMQX: Servidor de MQTT.
- Node-Red: Entorno de programación basado en el framework de Node.JS para realizar aplicaciones que se ejecutan en servidor tanto como servicios, como interfaz de usuario ejecutable en navegador (paneles de monitoreo).
- XAMPP: paquete del servidor web Apache que incluye servidor de base de datos SQL(MariaDB) y phpMyAdmin.

Se configura Node-Red para que se ejecute como servicio, en segundo plano, de modo que permanentemente realice las tareas de conexión al servidor MQTT, obtenga el paquete de datos enviado por el dispositivo, separe los valores de las variables leídas, guarde en una base de datos esos valores y presente los datos en una pantalla de monitoreo (dashboard).

Resultados y discusiones

Se realizaron pruebas de cobertura para determinar el alcance de la transmisión de los dispositivos utilizando distintos factores de expansión SF. Los experimentos se realizaron sobre una línea recta desde el dispositivo a la antena del concentrador. En la Tabla 3 se detallan los rangos alcanzados comparativamente para cada SF.

Tabla 3: Comparación de rangos de cobertura obtenidos para diferentes SF. Ancho de banda B=125 KHz.

Factor de expansión SF	Bit rate [bit/s] (Tabla 1)	Rango [m] (experimental)
7	5469	5600
10	977	9100
12	293	12550

Se realizó una prueba del sistema, realizando la medición en 7 puntos en los alrededores de una antena de telefonía celular, utilizando una antena colineal vertical, omnidireccional en la banda de 1900 MHz conectada al medidor. Los datos obtenidos, tomados de la tabla almacenada en la base de datos en el servidor virtual, se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4: Medidas experimentales tomadas con el sistema móvil en las cercanías de una antena de telefonía celular.

Nombre	Fecha	Valor medido[V]	Equivalente [dBm] (Figura 3)	Latitud	Longitud	Altura (m)
Medida 1	03/08/2022 16:46:49	1.015	-35.98	31.427833° S	62.104462° W	114,8
Medida 2	03/08/2022 16:34:45	1.154	-32.09	31.429228° S	62.104768° W	114,4
Medida 3	03/08/2022 16:18:49	0.790	-42.28	31.430542° S	62.105060° W	114,1
Medida 4	03/08/2022 15:58:08	0.831	-41.13	31.430844° S	62.103048° W	114,7
Medida 5	03/08/2022 15:36:22	0.955	-37.66	31.431207° S	62.100943° W	113,4
Medida 6	03/08/2022 15:24:05	0.755	-43.26	31.429796° S	62.100599° W	114,8
Medida 7	03/08/2022 15:02:18	1.172	-31.58	31.428222° S	62.100254° W	114,5

Los valores medidos representan, las potencias medidas en la banda que cubre la antena, 1710 MHz a 2170 MHz, no siendo representativos de las radiaciones totales, considerando todas las emisiones en todas las frecuencias. Los valores de la posición GPS fueron tomadas de la base de

datos. Corresponden a la captura realizada al momento que el operador, detiene el vehículo y presiona el pulsador de toma de medición.



Figura 10: Geolocalización de los puntos de medición.

Conclusiones

Se concluyó que el sistema es operativamente eficiente para tomar mediciones geolocalizadas y almacenarlas en una base de datos alojada en un servidor externo (nube). En este trabajo se describen los componentes que se pusieron en juego para implementar una red ad-hoc para tomar mediciones de cualquier variable susceptible de ser medida a través de sensores en un área de cobertura de aproximadamente 15 km.

En el ejemplo propuesto y dado que el grupo de investigación tiene dentro de sus líneas de investigación, la medición de radiaciones de antenas de telefonía celular se procedió al testeado de un módulo específico para la medición de potencia de RF. Se propuso realizar un mapeo de las emisiones en el ejido urbano de la ciudad por lo cual se aprovechó el desarrollo que se realiza en otras de las líneas de investigación que tiene como tema Internet de las Cosas, para integrar el primer concentrador (Gateway) de la red piloto desplegado en la ciudad para recibir los datos de los dispositivos de medición y registrarlos de forma que, en tiempo real o en cualquier momento, puedan ser accedidos por las aplicaciones.

Respecto al sistema de medición de potencia de RF, debemos decir, que resta realizar una contrastación completa del medidor, previo a realizar un mapeo completo de un área, que permita determinar la verdadera aproximación al valor exacto de la medición, ya que se ha probado con antenas no isotrópicas, de bandas específicas, particularmente de frecuencias de los servicios de telefonía celular y de WiFi, solamente en polarización vertical. De todos modos, en primera instancia, los valores tomados en las cercanías de las antenas de los servicios de telefonía móvil se acercan bastante a los registrados por un instrumento de medición de inmisión de tipo profesional. El medidor móvil puede resultar muy útil para la medición, en una banda específica, con antenas de banda angosta, para la obtención de lóbulos de radiación de antenas.

En la descripción del software del dispositivo de medición, se explicaron a partir del código implementado, la secuencia de pasos que requiere la medición en cada punto determinada por las condiciones en que se deben tomar las muestras teniendo en cuenta la normativa vigente y los cuidados necesarios para evitar mediciones erróneas por la emisión del transceptor móvil. Esto

determina necesariamente una metodología semiautomática de operación para cumplir con las normas.

Referencias

M. Kouwenhoven and H. Bruce. “*RF Detectors help solve System Design Challenges.*” Analog Devices” (2019). Recuperado de <https://www.analog.com/en/education/education-library/webcasts/rf-detectors-help-solve-system-design-challenges.html>

A. Lavric, V. Popa. “Internet of Things and LoRa Low-Power Wide Area Networks Challenges”, 2017. ECAI 2017 - International Conference – 9th Edition Electronics, Computers and Artificial Intelligence 29 June -01 July, 2017, Targoviste, Rumania.

S. Felissia, J. Bossio, E. DAVIS, S. Mercante. “Selección de detector de radiofrecuencia para monitoreo de radiaciones no ionizantes”, 2019, Libro de las Jornadas de Ciencia y Tecnología 2019, UTN Facultad Regional San Francisco, pp. 32-33. ISBN: 978-950-42-0193-9 oai:ria.utn.edu.ar:20.500.12272/4072.

E. Del Valle, A. Valdez, C. A. Miranda, P. Schlesinger, J. Chiozza, C. V. Miranda, M. Fernández Cvitkovic, “Control de radiaciones no ionizantes: detectores de potencia RMS en radiofrecuencias”, 2014. III Jornadas de Investigación en Ingeniería del NEA y países limítrofes. 9 y 10 de junio de 2014. Resistencia, Chaco, Argentina.

Semtech, AN1200.22 “LoRa Modulation Basics, Application Note” Accedido: 05/09/2022 Recuperado de AN1200.22.pdf. <https://semtech.my.salesforce.com/>.

Analog Devices. Hittite Microwave Corporation “HMC1020LP4ELP4E datasheet”. Accedido: 05/09/2022. Recuperado de: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/datasheets/hmc1020.pdf>

Node-RED, Página web: “Node-Red Cookbook”, Accedido: 05/09/2022. Recuperado de: <https://cookbook.nodered.org/#mqtt> .

JSON.ORG, Página web: “Introducing JSON”, Accedido 12/09/2022. Recuperado de: <https://www.json.org/json-en.html>