

Extending SMS Service Coverage in Rural Areas by Using LoRa Communication Technology

F. Gimenez, C. Zerbini, and G. Riva

Abstract—Mobile phone services are provided by operators in cities and along the roads in rural areas. In the last case, the coverage can reach a few kilometers far from the roads, depending on the available mobile technology. As a consequence, rural population have limited coverage or lack of message-based communication systems. In this work, we propose a solution based on low-power wide area network (LPWAN) technologies to extend the coverage of SMS service in rural areas in order to provide a message-based communication system for notification and telemetry. The proposal involves two devices called *GSM node* and *remote node* which form the complete system. The whole system uses three wireless communication technologies: *GSM*, *LoRa* and *Bluetooth*.

To guarantee effective packet transmission, several computational strategies are implemented in each embedded communication hardware, such as algorithms that analyze the service availability before message transmission or guarantee delivery of messages. The proposed scheme takes advantage of both communication systems; those which operate on licensed bands in urban areas with good QoS and those which operate on non-licensed bands with high communication ranges.

Several communication tests are implemented to evaluate the performance of the proposed solution. Results show the advantages of using low-consumption and long-range technologies to extend the SMS service coverage in rural areas. To the best of our knowledge, this is one of the first implementations and evaluations of a system that allows extending the SMS service coverage in rural areas based on LoRa technology.

Index Terms—IoT, LPWAN, LoRa, GSM, SMS, BLE.

I. INTRODUCCIÓN

ES común ver habitantes en zonas alejadas de centros urbanos que tienen problemas de acceso a servicios de comunicación de telefonía móvil. Este problema se da a nivel mundial y se estima que existen actualmente 1.200 millones de personas (16% de la población mundial) que viven en zonas rurales o alejadas de centros urbanos que poseen teléfonos móviles, pero que no cuentan con servicios de comunicación de buena calidad. Esto es consecuencia de un desafío económico: comparado con áreas urbanas, desplegar infraestructura en áreas remotas puede costar el doble, mientras que los ingresos son hasta diez veces más bajos debido a la escasa densidad demográfica, una combinación que afecta el modelo de negocio de los operadores [1]. Si se observan los mapas de cobertura de servicio provistos por estas empresas, se garantiza accesibilidad a sistemas de telefonía móvil en centros urbanos y sobre rutas que los vinculan (Fig. 1).

Respecto al espectro radioeléctrico, las comunicaciones móviles pueden agruparse en dos categorías respecto a las

bandas de frecuencia: bandas menores a 1 GHz, y bandas mayores a 1 GHz, en función de las características de atenuación y penetración de las ondas de radio. En este sentido, las comunicaciones infra-1 GHz son más adecuadas para zonas rurales ya que proporcionan cobertura extendida a costos más bajos respecto a las comunicaciones supra-1 GHz, en las que se tiene mayor ancho de banda y un mayor tráfico de datos pero son más adecuadas para zonas urbanas y suburbanas [1]. Una de las soluciones propuestas por los operadores de servicio de telefonía móvil y tendencia global es liberar el espectro digital de 600, 700, y 800 MHz y dividirlo para servicios de comunicaciones móviles. Por otro lado, la estrategia de *compartición activa y pasiva de infraestructura* (torres, sitios, RAN, etc) por parte de los proveedores de servicios a usuarios no se aplica por lo general en muchos de los países de Latinoamérica, lo que limita aún más la cobertura.

Las obligaciones de cobertura en zonas rurales pueden considerarse únicamente para el espectro de baja frecuencia (menos de 1 GHz), que son las bandas de frecuencia adecuadas para brindar una cobertura amplia. Brindar cobertura a las áreas rurales con un espectro de alta frecuencia (más de 1 GHz) resulta demasiado costoso y comercialmente insostenible [1].

En este sentido, los pobladores de zonas rurales poseen conocimiento empírico sobre cuáles son las zonas específicas en las que generalmente hay cobertura de servicio. Sin embargo, esto requiere que las personas se tengan que desplazar hasta esas zonas, que con frecuencia poseen niveles de señal inestables y baja calidad de servicio. Esto trae como consecuencia un procedimiento para conseguir cobertura o señal de modo efectivo en muchos casos pero un tanto extravagante.

En muchos casos, los pobladores de zonas rurales no poseen otro medios de comunicación como teléfono o internet fijos; inclusive es común que no cuenten con red eléctrica o que cuenten con suministro intermitente mediante grupos electrógenos o paneles solares, lo que da gran relevancia al aspecto de eficiencia energética. Uno de los medios de notificación utilizados en zonas rurales es a través de mensajes emitidos por estaciones de broadcasting en FM (Frequency Modulation). Como desventajas importantes, estos sistemas son uni-direccionales y no permiten almacenamiento alguno de la información difundida para su consulta en diferido.

Hoy en día, con los avances tecnológicos existentes tanto de hardware, software y comunicaciones, no resulta lógico que las zonas rurales se encuentren aisladas de los sistemas de comunicación. Si bien existen muchas formas de extender la cobertura, a nuestro entender no hay una opción comercial económica que cumpla con estos requerimientos.

F. Giménez, C. Zerbini and G. Riva are with the Group for Research and Transfer in Advanced Electronics (GInTEA), Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba, Argentina (see <http://www.investigacion.frc.utn.edu.ar/gintea/>).

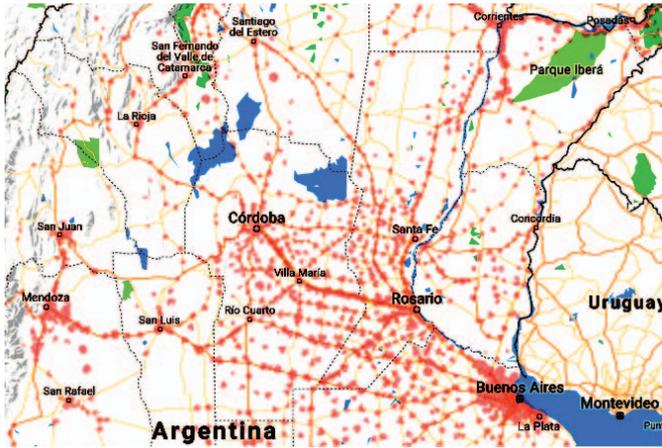


Fig. 1. Cobertura GSM de un proveedor de servicio [2].

Esta es la motivación del trabajo y sobre la cual se basa la propuesta innovadora con gran potencial e impacto social.

En este artículo se hace un análisis del problema de comunicación en zonas aisladas, y se compararán distintas tecnologías actuales que se pueden aplicar. Luego se describen algunos trabajos relacionados que utilizan tecnología LoRa para hacer frente a este problema. Finalmente, se describe detalladamente la solución propuesta, el desarrollo e implementación validada mediante distintas experiencias de campo.

II. ANÁLISIS DEL PROBLEMA

Como primer paso de nuestro trabajo, se analizan las condiciones generales de cobertura móvil. Como ejemplo representativo, la Fig. 2 indica la cobertura de 2G (Global System for Mobile Communication, GSM), 3G (Universal Mobile Terrestrial Service, UMTS) y 4G (Long-Term Evolution, LTE) en una zona rural de la República Argentina, donde se puede observar por un lado celdas de 3G y 4G con mayor radio de cobertura que las celdas de 2G. Sin embargo, las celdas 2G se encuentran desplegadas por zonas menos pobladas y más aisladas, retiradas de las grandes ciudades que es un punto de principal interés en nuestro caso.

Se decide usar tecnología de 2G por varias razones. La principal es que es la que está más desplegada en zonas alejadas (ver Fig. 2) tanto en Argentina como en Latinoamérica. En este tipo de regiones, la gente se encuentra habituada al uso de SMSs. Otro factor es que tiene requerimientos de ancho de banda y procesamiento mucho más bajos que los sistemas de 3G y 4G, ya que fue desarrollado originalmente para comunicación de voz mediante modulación GMSK y multiplex TDMA, agregando luego servicios de mensajes de texto (SMS) y GPRS. Si bien su velocidad es mucho menor a sus sucesores, para envío de SMS, es el sistema más adecuado.

Para hacer frente a los problemas de conectividad en zonas rurales, en los últimos años se han propuesto diferentes soluciones de extensión de cobertura de la red GSM, 3G, y LTE [3]. La solución más simple y muchas veces útil es un amplificador (booster) o repetidor de señal combinado con una antena de alta ganancia, aunque presenta varias desventajas, en particular la difícil calibración debido a que

las antenas son directivas y requieren de buen apuntamiento. Otras soluciones comerciales son actualmente las basadas en el despliegue de celdas con tecnologías de Software Defined Radio (SDR) [4], [5], con estrategias como Community Cellular Networks (CCNs) y Cognitive Radio (CR) [6] [7].

Otra opción actual es IoT (Internet of Things), que posee características interesantes. En este sentido, es posible combinar el uso de nuevas tecnologías de largo alcance del tipo LPWAN (Low Power Wide Area Network), tales como LoRa (Long Range), Weightless, Sigfox, etc, con tecnologías de comunicaciones móviles celulares como GSM o LTE, para lograr establecer comunicaciones por SMS en zonas rurales. En muchos casos, sólo es necesario contar con un sistema que permita el uso del servicio SMS para enviar mensajes de alerta o notificaciones ante algún determinado evento.

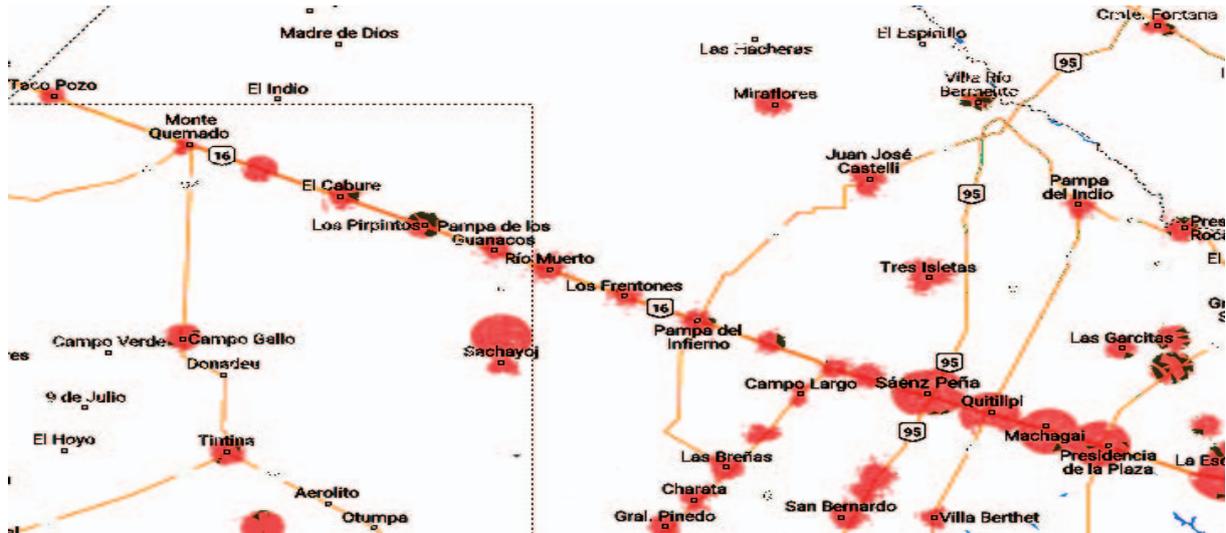
La Tabla I muestra criterios de selección para las opciones mencionadas. La primera opción, Booster+Antena, posee muy buenas características, sin embargo suele presentar problemas de desconexión debido a movimientos de la antena ya que la precisión del apuntamiento es un factor crítico. En la segunda y tercera opciones (WIMAX y la basada en SDR) se puede observar que si bien las características son convenientes, no siempre son viables por su costo de infraestructura. Por lo tanto, nos parece aconsejable optar por una combinación de tecnologías IoT de bajo consumo, bajo costo de infraestructura y largo alcance.

Por otro lado, en la Tabla II se presenta una comparativa de los distintos protocolos mencionados para IoT, donde cada protocolo está pensado para aplicaciones específicas. Los parámetros decisivos a la hora de elegir un protocolo son la velocidad o tasa de datos, el alcance geográfico en distintos entornos, y el costo de instalación y mantenimiento. Considerando estos factores, se plantean distintos compromisos específicos. Por ejemplo, si se requiere velocidad sin importar el alcance, es conveniente utilizar WiFi y Bluetooth, si se requiere un alcance medio y bajo consumo podemos utilizar ZibBee y SigFox, o si se necesitan largo alcance y bajo consumo LoRa puede resultar lo más conveniente.

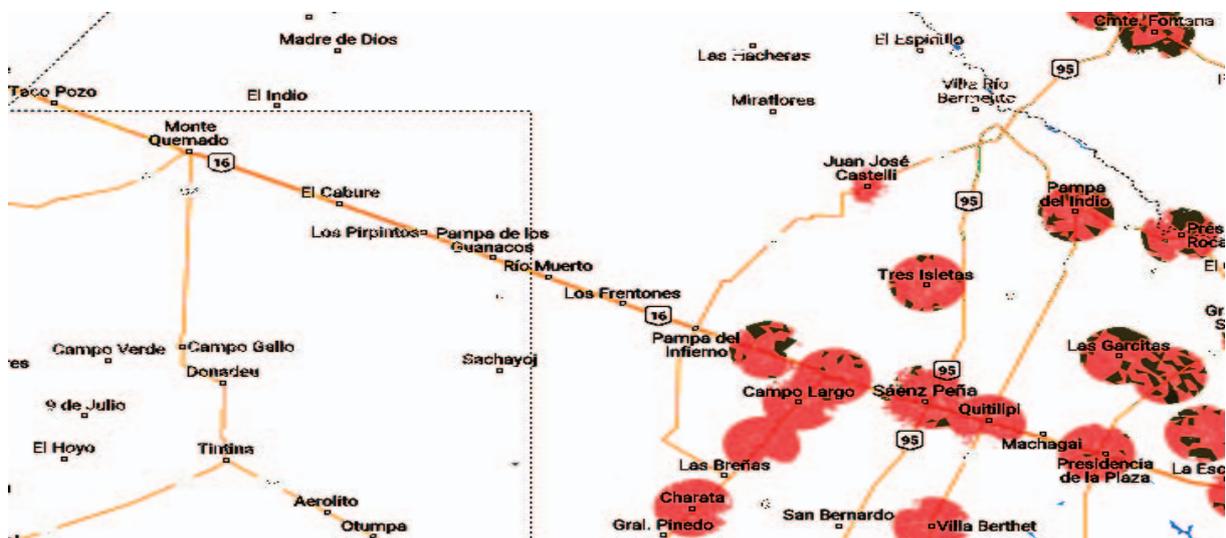
Como vemos en la Tabla II, los protocolos se presentan en distintas versiones, como es el caso del Bluetooth que posee una versión de bajo consumo (BLE). Además, en BLE el tamaño del paquete enviado es menor, como también lo es su alcance respecto a la versión normal. En el caso de LoRa, en tanto, se puede utilizar en una comunicación punto a punto (P2P) o como una red WAN (LoRaWAN) donde los nodos están conectados a un gateway a internet, con la desventaja económica del incremento de costos de infraestructura.

TABLA I
COMPARACIÓN DE SOLUCIONES

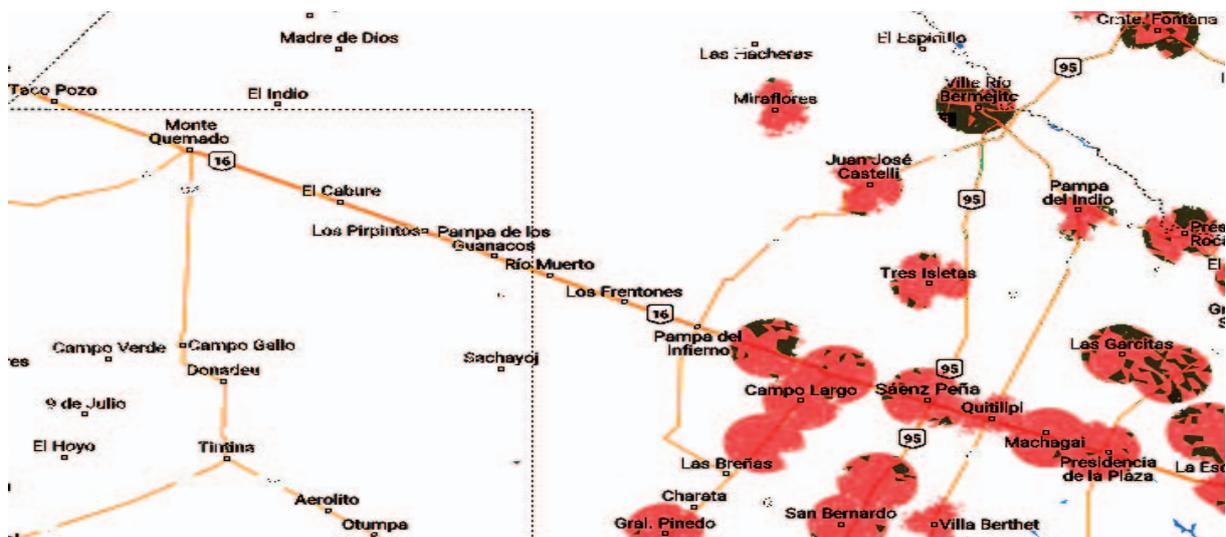
Tecnología	Precio	Instalación	Consumo	Procesamiento
Booster+Antena	Bajo	Media	Bajo	Nulo
WIMAX	Muy Alto	Difícil	Alto	Alto
SDR	Alto	Difícil	Medio	Alto
IoT	Muy Bajo	Fácil	Bajo	Bajo



(a)



(b)



(c)

Fig. 2. Comparación de la cobertura en zona rural. (a) Cobertura 2G, (b) Cobertura 3G y (c) Cobertura 4G.

TABLA II
TECNOLOGÍAS INALÁMBRICAS IOT

Protocolo	Velocidad	Alcance	Consumo	Costo Infraest.
WiFi	6.75 Gbps	50-100 m	220 mA	Alta
Bluetooth	1-3 Mbps	100 m	1W	Baja
Bluetooth LE	1 Mbps	60 m	0.01-0.5W	Baja
ZigBee	250 kbps	500 m	100mW	Media
Sigfox	1 kbps	40 Km	147mW	Media
LoRaWAN	11 kbps	15 Km	100mW	Alto
LoRa	11 kbps	15 Km	100mW	Baja

A. Trabajos Relacionados

Existen algunos trabajos que plantean el concepto de combinar diferentes tecnologías de comunicaciones para extender el área de cobertura y poder brindar servicios a zonas sin servicio [8], [9]. Moreno Cardenas et al. [8] proponen una arquitectura de comunicaciones basada en el concepto de *community networks* para extender la cobertura de diferentes tipos de servicios en zonas aisladas de grandes centros urbanos. Este concepto se basa en que los usuarios construyen su red cuando no hay infraestructura disponible. En este trabajo se hace uso de una red LoRa con puntos de acceso WiFi a través de unos nodos denominados hubs. Por lo tanto el usuario tiene acceso a internet a través de los hubs, y en este caso se plantea el uso de mensajes Telegram. Pietrosemoli et al. [9] proponen brindar una infraestructura de comunicaciones para la telemetría de estaciones meteorológicas, pero no especifican como interconectar los gateways LoRa a una infraestructura de red de datos.

Sin embargo, estas arquitecturas presentan varias desventajas. En primer lugar, no siempre se tiene acceso a Internet, principalmente en zonas aisladas donde la conectividad es escasa o limitada, al menos en lo que respecta a los países de América Latina. Esto produce inestabilidad y lentitud en el servicio, limitando fuertemente la efectividad del sistema. En segundo lugar, al conectarse a hubs por medio de una comunicación WiFi en el caso de [8], se requiere alto consumo de energía en los teléfonos. Esto lleva a que la batería dure poco tiempo limitando severamente su autonomía, como se observa en la Tabla II. En tercer lugar, un usuario debe registrarse a un hub para poder enviar un mensaje o para ver si hay un mensaje destinado a él. Así, puede producirse la situación en la que le hayan enviado un mensaje y no se entere de ello hasta registrarse en un hub. Por otra parte, respecto a la eficiencia del protocolo de comunicación, el uso de IEEE 802.11 WiFi es elevadamente ineficiente como medio de envío de SMSs. Por ejemplo, el protocolo IEEE 802.11 requiere de 28 octetos o 56 bytes sólo para el overhead (encabezados, control) del paquete de datos. Para una carga útil (payload) que consiste en un SMS de 150 bytes, esto representa un costo de 35% del tamaño del mensaje.

Considerando los puntos analizados vemos, en especial para el caso de América Latina, que el sistema planteado en [8] no se ajusta adecuadamente a las necesidades existentes ya que plantea requerimientos excesivos para nuestros fines. Es seguramente posible que este sistema sea adecuado en otras

regiones, donde se disponga ampliamente de redes de WiFi en lugares aislados y donde el costo de infraestructura ociosa no justifique la búsqueda de optimizaciones.

B. Solución Propuesta

El escenario analizado en este trabajo consiste en un usuario sin servicio de mensajes de la red de telefonía móvil que necesita enviar mensajes de texto de tipo SMS (Short Message Service). Para hacer esto posible, nuestra propuesta es implementar una combinación de tecnología IoT para llegar a un gateway GSM desde el cual se puede enviar el mensaje de texto. Comenzamos desde el usuario que desea mandar un mensaje SMS, que cuenta con un enlace IoT de corto alcance a un nodo IoT que en nuestro caso lo llamamos *nodo remoto*. A su vez este se conecta a través de un enlace IoT de largo alcance a un nodo que lo llamamos *nodo GSM*. Finalmente este se comunica con un gateway GSM con el que se envía el mensaje de texto.

El siguiente paso es establecer que tecnología emplear, tanto para los enlaces de corto como de largo alcance. Analizando la Tabla II, para el enlace IoT de corto alcance elegimos Bluetooth Low Energy (BLE) debido a su bajo consumo, buen velocidad de datos para envío de mensajes, y a su disponibilidad en smart phones. Por otra parte, el enlace IoT de largo alcance que elegimos es LoRa debido principalmente a su largo alcance por su buena sensibilidad de recepción y bajo consumo, sacrificando velocidad de datos, ya que esto último no es un requerimiento para el caso de envío de SMSs. El esquema se puede observar en la Fig. 3.

En resumen, el usuario utiliza una aplicación en el teléfono, la cual actúa como interfaz con el usuario para generar y recibir mensajes. Luego, esta aplicación establece un enlace de corta distancia mediante BLE entre el teléfono y el denominado *nodo remoto*, que puede encontrarse por ejemplo en un vehículo junto al usuario. Este nodo envía el mensaje mediante LoRa a otro nodo distante denominado *nodo GSM*, localizado en una zona con servicio de telefonía móvil. Por lo general, se coloca a este último nodo de manera fija y a una altura elevada, como puede ser sobre una vivienda o montado en una torre, brindando cobertura a varios kilómetros. Finalmente, el *nodo GSM* retransmite el mensaje al destino a través de la red de telefonía de manera totalmente transparente para el usuario.

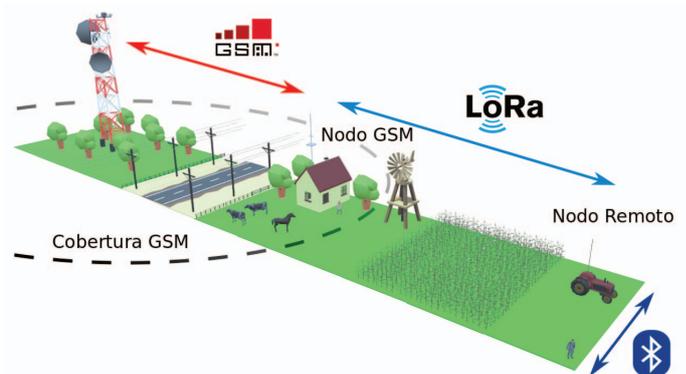


Fig. 3. Esquema general de la solución propuesta.

De este modo, se implementa la estrategia propuesta en este trabajo, que consiste en extender el servicio de mensajes de telefonía móvil en zonas rurales considerando el caso de la limitada cobertura de GSM mediante nuevas tecnologías de comunicación de largo alcance pensadas para telemetría, y adaptadas para envío de mensajes.

1) *Características técnicas de LoRa*: LoRa es una tecnología de comunicación inalámbrica desarrollada por Cycleo y adquirida por Semtech, pensada para aplicaciones de telemetría de bajo consumo y largo alcance del tipo LPWAN.

LoRa define características de la capa física (PHY) del modelo OSI como *modulación, frecuencia de operación, ancho de banda, potencia de transmisión, spreading factor*, etc. En el caso de utilizar LoRaWAN sobre LoRa, el primero define los protocolos de las capas de control de acceso al medio (Media Access Control, MAC) y de aplicación (APP).

LoRa utiliza un esquema de modulación de espectro expandido (spread spectrum, SS basada en chirps), lo que le permite hacer a la comunicación mucho más inmune al ruido. Al incrementar el ancho de banda de la señal se compensa la degradación de la relación señal a ruido producida en el canal de radio. Esto se muestra en Ecuación 1, donde C es la capacidad del canal inalámbrico en bits/seg, B es el ancho de banda en MHz, y S/N es la relación señal a ruido en dB [10].

$$C = B * \log_2\left(1 + \frac{S}{N}\right) \quad (1)$$

LoRa permite configurar el parámetro denominado Spreading Factor (SF) para variar tanto la velocidad de transmisión como la sensibilidad de recepción, los cuales son inversamente proporcionales. Asimismo, la capacidad del receptor LoRa para recuperar una señal débil del ruido o sensibilidad se incrementa a medida que la velocidad de transmisión de datos disminuye por un incremento del SF. Las principales características de LoRa son: ancho de banda configurable, robusto ante interferencias, inmune a desvanecimiento por propagación por multicaminos, resistente a doppler, capacidad de comunicación a larga distancia, entre otros.

LoRa es una implementación de capa física que es agnóstica a las implementaciones de las capas superiores. Esto le permite a LoRa coexistir e interoperar con otras arquitecturas de red existentes. La modulación es muy versátil ya que puede adaptarse a las características del canal en función del tamaño del mensaje, el ancho de banda, velocidad, etc. LoRa está pensado para enlaces punto a punto entre un nodo y un Gateway con acceso a Internet.

C. Comparación

Si bien los gateways LoRa comerciales permiten el envío de datos de una red LoRa de telemetría a un servidor Web a través de distintos sistemas de comunicación (Ethernet, LTE, etc), el sistema planteado en este trabajo se diferencia en que provee de una interfaz completa y transparente al usuario, optimizada para enviar mensajes de texto a un destinatario sin intervención adicional del usuario, y con ventajas como bajo costo, bajo consumo y largo alcance. Podemos afirmar, según nuestro conocimiento, que este trabajo es la primera

implementación y evaluación de un sistema optimizado que permite extender el servicio SMS a zonas alejadas a bajo costo, utilizando tecnologías de comunicaciones en bandas de frecuencias no licenciadas, y reduciendo radicalmente recursos ociosos que encarecen y complican el sistema.

La propuesta se diferencia del concepto de red LoRa tradicional en el sentido de que LoRa hace uso de la topología de red en estrella. En cambio, el sistema propuesto utiliza el acceso a redes de telefonía móvil, extendiéndolas de forma transparente al usuario con cobertura de largo alcance LoRa, para posibilitar el uso del servicio de SMS en zonas sin servicio GSM.

III. DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN

La solución propuesta para extender la cobertura del servicio SMS en zonas rurales combina hardware, software, y tres sistemas de comunicación diferentes: GSM, LoRa y BLE, como se muestra en la Fig. 4. Como premisa, se busca abstraer al usuario de la complejidad del sistema, mostrando una interfaz similar a la utilizada en el envío de un SMS convencional. La secuencia de envío de un mensaje desde un usuario remoto es realizada a través de un smartphone conectado mediante BLE al *nodo remoto*, el cual actúa como puente entre Bluetooth y LoRa para enviar los mensajes a grandes distancias, y el *nodo GSM* que actúa como un Gateway entre el enlace LoRa y la red GSM. Finalmente, el nodo GSM es el encargado de enviar los mensajes al usuario final destinatario del SMS.

El proceso de desarrollo de la programación sobre los sistemas embebidos y la adaptación para vincular diferentes sistemas de comunicación no es una tarea sencilla. A continuación se describen las partes que conforman el sistema y las características de las partes desarrolladas, desde el usuario remoto ubicado en zona rural sin cobertura hasta un usuario final con cobertura GSM por ejemplo en una ciudad. Dado que la conversión de protocolos de comunicaciones (BLE \rightarrow LoRa \rightarrow GSM) no es sencilla, en este trabajo se describe solamente el procesamiento para la adaptación del tamaño de los mensajes entre los protocolos, para cumplir con el objetivo de extender el servicio SMS.

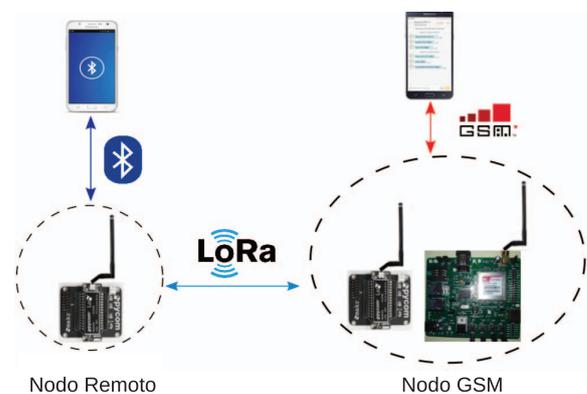


Fig. 4. Sistema propuesto con 3 protocolos de comunicación.

A. Interfaz de Usuario Remoto

Un *usuario remoto* interactúa con el sistema a través de una interfaz gráfica en el smartphone, en el que define el número de teléfono de destino y el contenido del mensaje (ver Fig. 5). Mediante la aplicación *BLE Scanner* de Android, se establece el enlace entre el teléfono y el nodo remoto. La estructura del mensaje de BLE está compuesta por 10 caracteres que representan el número de teléfono de destino, y por 150 caracteres disponibles para escribir el mensaje como se establece en el estándar GSM [11]. El mensaje no supera los 160 caracteres de 7 bits a fin de evitar el uso de mensajes concatenados considerados en el estándar GSM [12]. Para evitar errores garantizando la transferencia exitosa del mensaje, se utiliza un control de sintaxis de dicha estructura de entrada. A la vez, se evita en el próximo enlace la presencia de múltiples mensajes de LoRa, ya que este protocolo posee capacidad máxima de 255 Kbytes por paquete.

B. Nodo Remoto

El *nodo remoto* está compuesto por un módulo *PyCom LoPy* [13] con su placa de expansión y antena. Este módulo se programa en MicroPython, una implementación simplificada del lenguaje Python 3, optimizada para ejecutarse en micro-controladores [14]. Este nodo actúa como una interfaz, por un lado, con el teléfono del usuario a través de BLE, y por otro lado con el *nodo GSM* a través de LoRa.

Para la implementación de BLE, se tuvo en cuenta que el tamaño máximo del mensaje y del buffer es de 20 bytes o caracteres [15], por lo tanto, el módulo LoPy recibe paquetes de datos de 20 bytes por su interfaz BLE. Los paquetes BLE son recibidos en el nodo y analizados para determinar cuándo se ha obtenido el mensaje SMS completo, momento en que se lo conforma para el próximo paso de transmisión por su interfaz LoRa, como se muestra en el diagrama de flujo de la Fig. 6.

Para la comunicación LoRa, en tanto, se utilizó el modo *LoRa-MAC*, trabajando en banda no licenciada de 915 MHz, con spreading factor (SF) de 11, y ancho de banda (bandwidth, BW) de 125 kHz, con lo cual se obtiene sensibilidad máxima de recepción de -135 dBm a velocidad de 440 bps y tiempo de transmisión en aire de 414 mseg. No se realizaron pruebas con un valor SF=12 debido a que el tiempo de transmisión es elevado generando problemas en la recepción, y que en ciertas

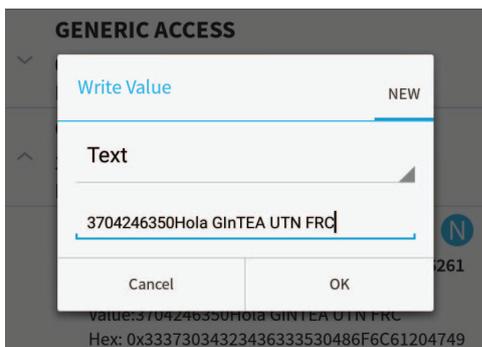


Fig. 5. Ejemplo de mensaje de un usuario remoto.

regiones no está regulada su utilización [16]. En el caso de requerir mayor cobertura de LoRa, se puede incrementar la altura y la ganancia de la antena, o se puede implementar un esquema de múltiples saltos empleando nodos LoRa repetidores.

Respecto al espectro de RF utilizado para LoRa, en el mundo están definidas diferentes porciones del espectro de frecuencias, denominadas bandas de uso industrial, científico y médico (Industrial, Scientific and Medical, ISM), que son comúnmente destinadas a experimentación. Estas bandas son reguladas por la International Telecommunication Union (ITU). En general, se utiliza la banda de 868 MHz en los países europeos, y la banda de 915 MHz en los países americanos [16]. Existen tres tipos de usos de la banda de 915 MHz, que se aplican de diferente manera según las leyes de cada país y no son fijos. Éstos son los siguientes:

- Banda ISM 915 completamente disponible.
- Banda ISM 915 reducida, ejemplo: Argentina.
- Banda ISM 915 asignada a otros servicios, ejemplo: Paraguay.

En base a estas consideraciones, utilizamos en nuestra aplicación la porción disponible en Argentina, que consiste en el rango de 915 a 928 MHz.

C. Nodo GSM

El *nodo GSM* es instalado en zonas con cobertura GSM, por ejemplo cerca de rutas en las cuales hay disponibilidad de servicio de telefonía móvil. Es un nodo que se instala en un lugar fijo, y lo mas elevado posible, para garantizar buena cobertura LoRa. Este nodo está compuesto por dos módulos: un LoPy de Pycom, y un modem GSM modelo MCE Wireless Kit GSM con módulo Simcom 900D [17], conectados entre sí

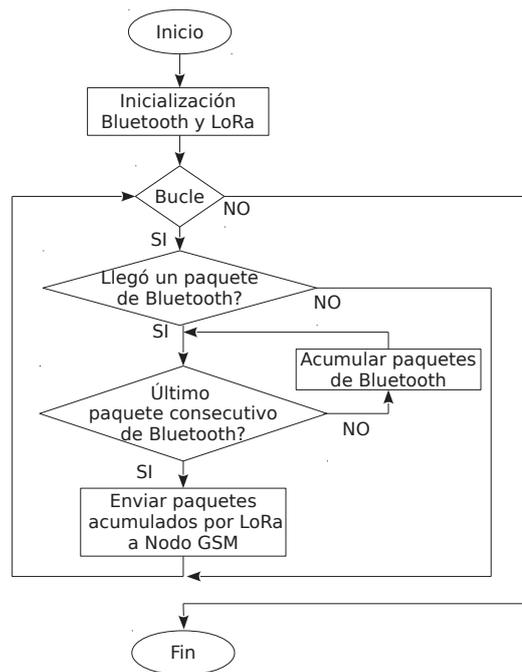


Fig. 6. Diagrama del procesamiento en el nodo remoto.

a través de una interfaz serial SPI (Serial Peripheral Interface) bidireccional, actuando el módulo LoPy como maestro y el modem GSM como esclavo. La función de este nodo es la de recibir los datos de mensaje del nodo remoto a través de LoRa, procesarlos y transmitirlos a través del modem GSM a la red móvil.

Cada uno de los módulos dentro de este nodo GSM implementa un software embebido en sus respectivos microcontroladores, ejecutando operaciones determinadas para cumplir con su función de gateway LoRa-GSM optimizado para SMSs.

La Fig. 7 muestra el diagrama de flujo del software ejecutado en el módulo Lopy del nodo GSM. Sus funciones son, por un lado, el manejo de los mensajes LoRa que incluye verificar y adaptar los protocolos, y por otro la gestión de la interfaz SPI para comunicación con el modem GSM. La Fig. 8, en tanto, muestra el diagrama de flujo del software ejecutado en el módulo GSM para la transmisión de los SMSs al destinatario mediante GSM utilizando los comandos AT.

A fin de garantizar la transferencia del mensaje, el módulo LoPy utiliza un algoritmo de aprendizaje en el que se comu-

nica con el modem GSM y analiza aspectos como el estado de la red GSM (nivel de señal del enlace con la celda GSM) y estado del modem (disponibilidad, estado de la tarjeta SIM, estado de la antena del modem, etc) antes de intentar la transmisión del SMS en la red de telefonía móvil. Si estas condiciones son óptimas, el nodo GSM realiza la transmisión, caso contrario se guardan los SMS en un buffer hasta que las condiciones de transmisión sean adecuadas. En resumen, la parte a donde se toman las decisiones mas importantes en el sistema es en el módulo LoPy del nodo GSM.

D. Usuario Final

El usuario final en zona con cobertura de servicio SMS recibe el mensaje enviado desde el teléfono remoto, a través del nodo remoto y del nodo GSM, como se muestra en la Fig. 9. En el mensaje recibido se puede observar que además del mensaje propiamente dicho, se recibe información sobre el nivel de señal con la que recibió el nodo GSM desde el nodo remoto a través de la interfaz LoRa. Esta información es útil para realizar las mediciones de la la Sección IV, y puede ser deshabilitada para uso normal.

IV. MEDICIONES DE CAMPO

A fin de validar el esquema propuesto, se realizaron diferentes ensayos de funcionamiento y cobertura en el campus de la Universidad Tecnológica Nacional (UTN), Facultad Regional Córdoba. Se realizaron pruebas del sistema completo, del radioenlace LoRa, y del enlace BLE entre el teléfono del

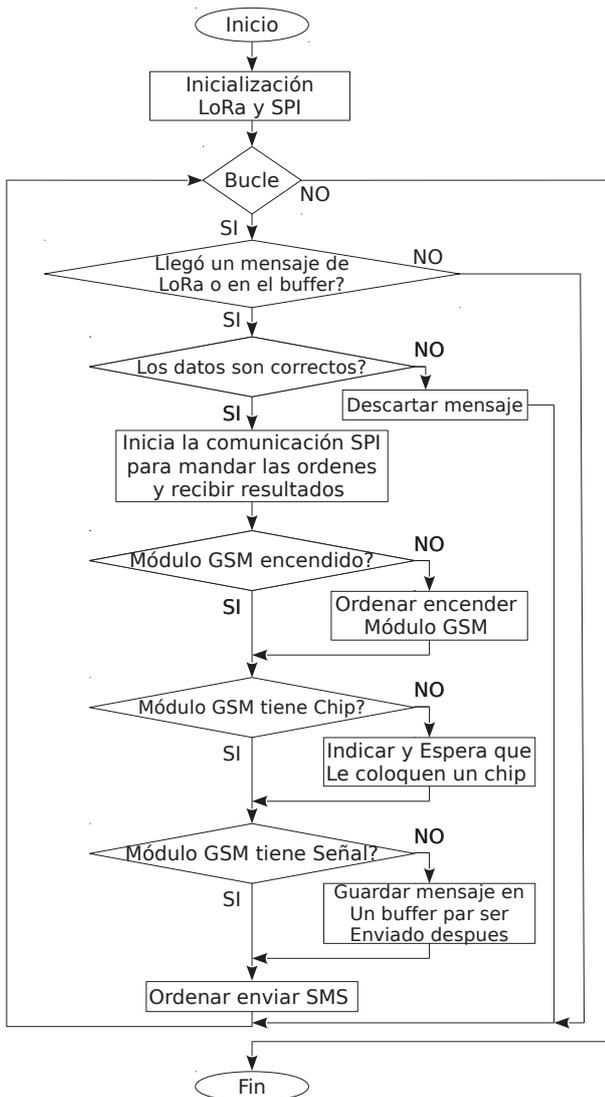


Fig. 7. Diagrama de flujo del módulo LoRa en el nodo GSM.

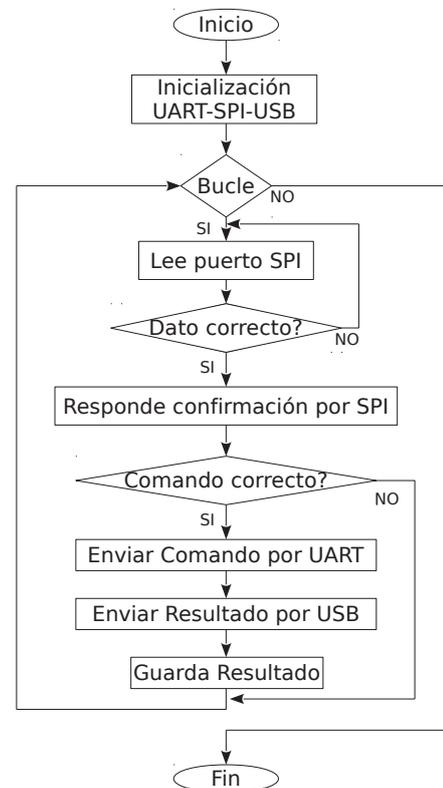


Fig. 8. Diagrama de flujo del modem GSM.

usuario remoto y el nodo remoto. A continuación se resumen los resultados obtenidos.

Durante las experiencias realizadas, el nodo GSM fue colocado a una altura de 5 metros, y el nodo remoto fue posicionado a diferentes distancias, a dos diferentes alturas, a fin de evaluar el efecto del despeje en la comunicación. En la Fig. 10 se ilustran las posiciones geográficas relevadas.

Las mediciones del enlace LoRa obtenidas durante los ensayos de la Fig. 10) se muestran en la Tabla III. Se puede observar la medida en que la señal es atenuada cuando la distancia entre ambos nodos aumenta, y que las distancias de comunicación pueden ser extendidas más allá de los ensayos realizados, ya que se cuenta con niveles de señal recibidas elevados respecto a los márgenes de sensibilidad con los que cuenta LoRa. Es decir, a casi 2500 metros de distancia con el nodo remoto a 2 metros del suelo se tienen niveles de señal del orden de -115 dBm, cuando la sensibilidad en la configuración de radio utilizada es de -136 dBm, por lo que se cuenta con un margen de enlace de 21 dB. Esto significa que el rango de comunicación puede ser incrementado sin pérdida de enlace.

Asimismo, se pudo observar la fuerte dependencia de la cobertura del sistema de comunicaciones con respecto a la configuración del protocolo LoRa, las condiciones del entorno, y las alturas de las antenas. Respecto a este último punto, como se observa en la Fig. 11, se obtiene un incremento de la señal recibida de entre 10 y 15 dB al elevar el nodo a 2 metros de altura del suelo.

Finalmente, a fin de evaluar el desempeño del enlace BLE entre el teléfono del usuario y el nodo remoto, se realizaron múltiples mediciones de rango máximo de alcance. La antena del nodo remoto se dispuso a 6 metros de altura, y se realizaron mediciones del nivel de señal recibida a medida que el usuario se aleja del nodo. En este caso, se pudo verificar que se tienen enlaces de datos con distancias de aproximadamente 80

metros como máximo, lo cual es suficiente para la aplicación considerada.

V. CONCLUSIONES

Luego de plantear el problema de falta de cobertura que se tiene en comunidades aisladas o alejadas de las grandes urbes, repasar y comparar las distintas tecnologías actuales, se demuestra en este trabajo que las tecnologías IoT son las opciones más adecuadas, y dentro de estas, el sistema de comunicación LoRa se destaca para la resolución del problema particular. Sobre esta base, se propone un sistema para extender el servicio SMS de GSM a través de comunicación LoRa, mostrando su desarrollo e implementación práctica. Mediante este sistema, se demuestra el beneficio de contar con estaciones que mediante la incorporación de tecnologías LPWAN como LoRa permiten extender en gran medida el área de cobertura del servicio de mensajes en zonas sin infraestructura de comunicaciones, con sistemas embebidos disponibles en el mercado local y con el uso de algoritmos de aprendizaje que permiten analizar el estado del sistema para optimizar la entrega de mensajes. Se realiza la combinación de sistemas de telefonía móvil que operan en bandas licenciadas, adecuados para garantizar calidad de servicio (QoS) en zonas con densidad de usuarios, con sistemas de largo alcance y bajo consumo para extender el servicio de SMS usando comunicaciones en bandas no licenciadas. Mediante evaluaciones real-

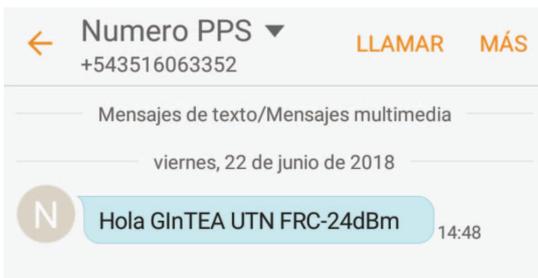


Fig. 9. Mensaje recibido en el teléfono del usuario final.

TABLA III
MEDICIONES DE NIVEL DE SEÑAL

Posición	Señal a h_{r1} [dBm]	Señal a h_{r2} [dBm]	Distancia [m]
1	-81	-64	108
2	-88	-65	211
3	-122	-111	1720
4	sin señal	-115	2492

h_{r1} a nivel del suelo
 h_{r2} a 2 metros de altura



Fig. 10. Mapa con los puntos de medición.

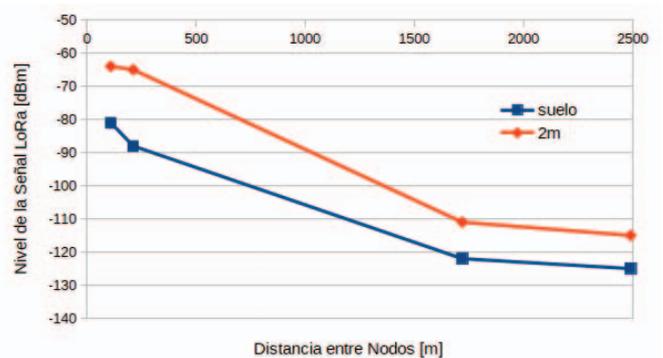


Fig. 11. Niveles de señal recibidos en el enlace LoRa.

izadas se demuestra la factibilidad y los beneficios de contar con este tipo de solución para ser aplicado en zonas rurales. Asimismo, se pudo verificar experimentalmente que el rango de comunicación inalámbrica es altamente dependiente de la altura de las antenas. En resumen, las ventajas fundamentales que se lograron con el sistema propuesto son: bajo consumo de los nodos móviles, prolongando su autonomía con baterías, bajo costo de los dispositivos requeridos, y bajo costo de la infraestructura necesaria debido a que se utiliza el sistema 2G existente y no se requiere de gateways LoRa comerciales. Finalmente, se aprovecha en forma óptima el compromiso baja tasa de datos vs. bajo consumo y largo alcance que ofrece el protocolo LoRa, todas ellas características ideales para un servicio de comunicaciones como lo es el sistema SMS.

Como trabajo futuro, se prevé el desarrollo del mecanismo de comunicación inversa para recibir mensajes en el teléfono remoto logrando una comunicación bidireccional, y también la transferencia del sistema a usuarios rurales. Además, se realizan mejoras en la interfaz gráfica, es decir la aplicación Android para el manejo de los mensajes y contactos en forma eficiente. Asimismo, es posible ampliar nuestra solución incorporando al nodo GSM un módem adicional 4G LTE con su correspondiente firmware, haciendo más versátil el sistema para distintas regiones. Finalmente, se plantea introducir optimizaciones específicas para el uso del SMS para el envío de datos de telemetría, aprovechando el mismo sistema base tanto para comunicaciones humanas como para comunicaciones del tipo Machine-to-Machine (M2M) para telemetría.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue realizado bajo el Proyecto PID UTN CCUTN-CO0004974 *Instrumentación Basada en Tecnología SDR para Medición en Sistemas de Comunicaciones*.

REFERENCIAS

- [1] G. Cruz, G. Touchard, "Enabling rural coverage regulatory and policy recommendations to foster mobile broadband coverage in developing countries," GSMA, 2018.
- [2] LTE coverage map provided by Claro, Online: <https://www.claro.com.ar/empresas/institucional/cobertura/>
- [3] F. Gimenez, C. Zerbini, G. Riva, "Extendiendo la Cobertura del Servicio SMS GSM en Areas Rurales mediante Tecnología LPWAN," Congreso Argentino de Sistemas Embebidos (CASE 2019), July 2019.
- [4] A. Anand, V. Pejovic, D. L. Johnson, E. M. Belding, "VillageCell: Cost Effective Cellular Connectivity in Rural Areas," In Proc. of the Fifth International Conference on Information and Communication Technologies and Development - ICTD 12, 2012.
- [5] K. Aggrawal, K. Vachhani, "Reconfigurable cellular GSM network using USRP B200 and OpenBTS for disaster-hit regions," 2017 IEEE 13th Malaysia International Conference on Communications (MICC), Johor Bahru, 2017, pp. 141-146, 2017.
- [6] K. Heimerl, K. Ali, J. Blumenstock, "Expanding Rural Cellular Networks with Virtual Coverage," 10th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI '13), pp. 283-296, 2013.
- [7] S Hasan, K. Heimerl, K. Harrison, K. Ali, S. Roberts, A. Sahai, E. Brewer, "GSM Whitespaces: An Opportunity for Rural Cellular Service," 2013.
- [8] A. Moreno Cardenas, M. Kiyoshy Nakamura Pinto, E. Pietrosemoli, M. Zennaro, M. Rainone, P. Manzoni, "A LoRa enabled sustainable messaging system for isolated communities," Goodtechs '18, 2018.
- [9] E. Pietrosemoli, M. Rainone, and M. Zennaro, "On Extending the Wireless Communications Range of Weather Stations using LoRaWAN," In Proceedings of the 5th EAI International Conference on Smart Objects and Technologies for Social Good, GoodTechs '19, pp. 78-83, 2019.
- [10] "AN1200.22 LoRa Modulation Basics," Technical Note, Semtech, 2015.
- [11] "Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Alphabets and language-specific information (GSM 03.38)," Tech. note, ETSI, 3GPP TS 23.038 version 10.0.0 Release 10, 2011.
- [12] "Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Technical realization of the Short Message Service (SMS)," Tech. note, ETSI, 3GPP TS 23.040 version 9.3.0 Release 9, 2010.
- [13] Fred de Haro, Bettina Rubek Slater, "LoPy Specsheat." Pycom, www.pycom.io/wp-content/uploads/2018/08/lopy-specsheet.pdf, 2019.
- [14] D. George, "The MicroPython language." MicroPython, <http://docs.micropython.org/en/latest/reference/index.html>, 2019.
- [15] J. Tosi, F. Taffoni, M. Santacatterina, R. Sannino, D. Formica, "Performance Evaluation of Bluetooth Low Energy: A Systematic Review," MDPI Sensors Journal, 2017.
- [16] "LoRaWAN 1.1 Regional Parameters," LoRa Alliance, 2018.
- [17] <http://mcelectronics.com.ar/site/producto/mce-wireless-gsm/>



Francisco Gimenez obtuvo el título de Ingeniero en Electrónica en la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba (UTN-FRC) en el año 2019. Trabajó en los últimos años en proyectos de investigación en GiNTEA UTN. Entre sus intereses de investigación se destacan: las comunicaciones móviles, tecnología de radio definida por software (SDR) y la programación de bajo nivel en sistemas embebidos y orientada a objetos.



Carlos Zerbini obtuvo el grado de Ingeniero en Electrónica de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba (UTN-FRC) en 2007, y de Doctor en Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Nacional de Córdoba en 2015. Desde 2009 es Docente Investigador en la UTN-FRC. Entre sus intereses de investigación se encuentran la optimización de redes de datos, diseño en lógica reconfigurable (FPGAs), instrumental y técnicas de medición en electrónica, y sistemas basados en SDR.



Guillermo Riva obtuvo el grado de Ingeniero en Electrónica en la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Córdoba (UTN-FRC) en 2007, y de Doctor en Ciencias de la Ingeniería en la Universidad Nacional de Córdoba en 2014. Desde 2007 es Docente Investigador en la UTN-FRC. Sus intereses de investigación son: comunicaciones inalámbricas, redes de sensores, IoT, SDR, y aprendizaje automático en sistemas embebidos.