



# SISTEMA DE REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS

Rapallini, José Antonio  
e Mazzeo, Hector Hugo

Redes | Sensores | Inalámbricas | LoRaWAN | IoT





# RESUMEN

Desde el Centro CODAPLI se desarrollan distintas actividades entre las cuales se destaca las referidas a los sistemas de comunicación inalámbricas, que por sus características están presente en muchas desarrollos, investigación e innovaciones que se realizan en el Centro.

Hoy la revolución de comunicaciones inalámbricas nos permite generar soluciones y cubrir desde distancias extremadamente lejanas para la transmisión de datos y/o análisis de sistemas de alcance regional (TV Satelital, interconexión de datos de respaldo a sistemas de fibra óptica, agricultura de precisión, sistemas de alarmas para actuar sobre la problemática climatológica, etc.) a muy pequeñas para el confort y seguridad (domótica, inmotica, comunicación de dispositivos personales, etc.) de los ciudadanos.

El número de aplicaciones que se pueden realizar abarcan disciplinas del tipo industrial, gubernamental hasta sistemas de asistencia a personas en tránsito con dificultades de movilidad o tratamientos específicos.

Se denomina Red de Sensores Inalámbrica al conjunto de dispositivos autónomos, interconectados entre sí y distribuidos espacialmente en un entorno, capaces de tomar datos del medio, procesarlos y transmitirlos al resto de la red. En muchos casos estos dispositivos son capaces tanto de captar información como de actuar sobre el medio, pudiendo incluir además de sensores, actuadores.

From the CODAPLI Center, different activities are developed, among which those related to wireless communication systems stand out, which due to their characteristics are present in many developments, research and innovations that are carried out in the Center.

Today the wireless communications revolution allows us to generate solutions and cover from extremely far distances for data transmission and / or analysis of regional systems (Satellite TV, interconnection of backup data to fiber optic systems, precision agriculture, systems from alarms to act on weather problems, etc.) to very small ones for the comfort and safety (home automation, inmotics, communication of personal devices, etc.) of citizens.

The number of applications that can be carried out range from disciplines such as industrial, governmental, to assistance systems for people in transit with mobility difficulties or specific treatments.

The Wireless Sensor Network is called the set of autonomous devices, interconnected and spatially distributed in an environment, capable of taking data from the environment, processing it and transmitting it to the rest of the network. In many cases, these devices are capable of both capturing information and acting on the environment, and may include, in addition to sensors, actuators.

Keywords: Networks, sensors, wireless, LoRaWAN, IoT.

## Autores

Ing. Rapallini, José Antonio e Ing. Mazzeo, Hector Hugo

## Contacto

rapallini@frlp.utn.edu.ar

## Institución

Universidad Tecnológica Nacional, Centro de Codiseño Aplicado (CODAPLI). Facultad Regional La Plata, Buenos Aires, Argentina

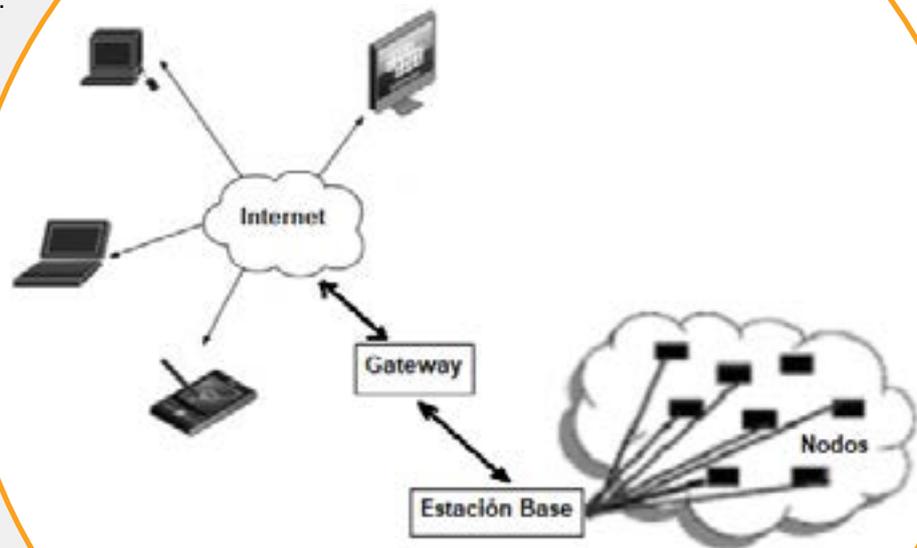


Figura 1.  
Esquema básico de una WSN

## Introducción

Las Redes de Sensores Inalámbricos (Wireless Sensor Networks-WSN) están formadas por dispositivos autónomos distribuidos espacialmente para monitorear condiciones físicas o ambientales, pudiendo incluir además de sensores, actuadores una puerta de enlace (gateway) que provee conectividad inalámbrica con otros nodos distribuidos a una red de datos y, por lo tanto, a Internet (Protocolo de control de transmisión/ Protocolo de Internet - TCP/IP).

El desarrollo de estas redes fue inspirado por aplicaciones militares, especialmente en la vigilancia de las zonas de conflicto. Se componen de pequeños nodos de sensores equipados con interfaces de radio y están distribuidas sobre una región geográfica. La tarea de cada sensor es realizar mediciones y enviar datos a un nodo coordinador. El avance en la tecnología ha impulsado la implementación de redes de sensores compuestas por nodos de bajo costo (llamados comúnmente "nodos"), los cuales están formados por el sensor propiamente dicho, la interfase para realizar las comunicaciones y, generalmente, un microprocesador. Estos nodos están diseñados para adquirir información del entorno, procesarla y transmitir los datos pertinentes a la estación base (de mucho mayor poder computacional que los nodos sensores). El campo de aplicación para esta tecnología es muy amplio. Algunos usos actuales son: control de procesos, alarmas, respuesta a emergencias, redes de transporte, investigación biológica, aplicaciones medicinales y estudios meteorológicos.

Desde el Centro CODAPLI [1] se inició un proyecto de investigación en el año 2018 (enmarcado dentro del PID SIUTNLP0005017), para el estudio y desarrollo de las temáticas relacionadas con las redes de sensores inalámbricos y su aplicación en distintas áreas [2]. Uno de los objetivos principales apunta a la implementación de un sistema completo para el testeado y generación de nuevas alternativas de diseño en las distintas etapas que componen estos sistemas.

Dentro de este gran espectro de posibilidades, presentamos en este artículo algunas actividades desarrolladas en esta temática, generando la experticia que permite desarrollar proyectos de investigación, desarrollo e innovación tecnológica como, por ejemplo, el proyecto EIIFILP0003619TC, "Laboratorios Virtuales y Remotos", que derivó en una plataforma para el desarrollo de prácticas de laboratorio a distancia [3], y la formación de recursos humanos tanto en grado como en posgrado [4].

Un elemento clave de las redes de sensores inalámbricos son los nodos o "nodos", dispositivos autónomos distribuidos espacialmente que utilizan sensores para monitorear condiciones físicas o ambientales. Un sistema WSN incorpora un gateway que provee conectividad inalámbrica con los nodos distribuidos haciendo de interfaz con una estación base recolectora de datos, normalmente conectada a una red TCP/IP (Fig. 1). La posibilidad de incorporar esos datos del entorno a una red global, accesible para todos, se conoce con el

nombre de Internet de las Cosas, pues se pretende que sea Internet la red que sirva de soporte para toda esa información generada. De esta forma quien lo precise puede acceder a esa información con ciertas limitaciones. El protocolo inalámbrico seleccionado depende de los requerimientos de la aplicación. Algunos de los estándares disponibles incluyen frecuencias de 900 MHz, 2.4 GHz, 5.2 GHz, que corresponden a bandas de radio Industriales, Científicas y Médicas (Industrial, Scientific and Medical - ISM) declaradas como bandas de frecuencias radioeléctricas de uso compartido en el ámbito del Territorio Nacional Argentino y no requieren de autorización para su uso, explicitadas en la RESOL-2019-4653-APN-ENACOM#JGM [5], normalmente están basados en los estándares IEEE 802.11 (a, b, g, n, ac), IEEE 802.15 (.1, .3, .4, .6), IEEE 802.16.

Estos nodos están diseñados para adquirir información del entorno, procesarla y transmitir los datos pertinentes a una estación base (de mucho mayor poder computacional que los nodos sensores). El campo de aplicación para esta tecnología es muy amplio. Algunos usos actuales son: control de procesos, alarmas, respuesta a emergencias, redes de transporte, investigación biológica, aplicaciones medicinales, estudios meteorológicos.

Existen sensores de todas clases; es posible medir aceleración, temperatura, movimientos sísmicos, posición global, intensidad de luz, sonido, campos magnéticos, etc. La interconexión de los sensores se presenta como uno de los mayores problemas a la hora de implementar el sistema. Las limitaciones físicas y económicas imponen restricciones a la forma en la que se llevará a cabo. Anteriormente, las redes de sensores se interconectaban mediante cables (pares trenzados) que agregaban costo, complejidad de implementación y dificultad en la detección de fallas. Con la estandarización de las comunicaciones inalámbricas y la serialización de fabricación de dichos productos, ésta pasó a ser una de las formas preferenciales para interconectar sensores. Actualmente, los sensores inalámbricos son de amplio uso en aplicaciones distribuidas o que implican el seguimiento de objetivos móviles. La administración del consumo de energía de los sensores constituye un factor crítico en el diseño de dichos sistemas debido a que los mismos están generalmente alimentados mediante baterías. Además del problema del consumo, existe la dificultad del reemplazo de las mismas. La energía es utilizada por los nodos sensores en tres funciones principales: sensado, procesamiento y comunicación. Los dispositivos modernos utilizan técnicas avanzadas de ahorro de energía como el apagado de periféricos en espera (stand-by) o reducción de la frecuencia de operación. Se ha demostrado que el proceso que requiere mayor energía es la transferencia de datos, por lo tanto, se apunta a reducir la cantidad de comunicaciones a veces a costa de mayor tiempo de procesamiento [6], [7]. Debido a las limitaciones de la vida de la batería, los

Los nodos se construyen teniendo presente la conservación de la energía, y generalmente pasan mucho tiempo en modo 'durmiente' (sleep) de bajo consumo de potencia. Las WSN tienen capacidad de auto restauración, es decir, si se avería un nodo, la red encontrará nuevas vías para encaminar los paquetes de datos. De esta forma, la red sobrevivirá en su conjunto, aunque haya nodos individuales que pierdan potencia o se destruyan. Las capacidades de auto-diagnóstico, auto configuración, auto organización, auto-restauración y reparación, son propiedades que se han desarrollado para este tipo de redes para solventar problemas que no eran posibles con otras tecnologías. Las redes de sensores se caracterizan por ser redes desatendidas (sin intervención humana), con alta probabilidad de fallo (en los nodos, en la topología), habitualmente construidas ad hoc para resolver un problema muy concreto (es decir, para ejecutar una única aplicación). Las comunicaciones inalámbricas son una solución eficaz y confiable en la automatización del hogar y la oficina, en tal sentido, varios medios de transmisión de señales podrían utilizarse, incluyendo la luz y el ultrasonido, pero haciendo una comparación entre ellos con respecto al posible tráfico de datos, los precios y el área de cobertura, terminan finalmente siendo más atractivos los enlaces de radio frecuencia (RF) [8].

Se han creado aplicaciones WSN para diferentes áreas incluyendo cuidado de la salud, servicios básicos y monitoreo remoto. En el cuidado de la salud, los dispositivos inalámbricos vuelven menos invasivo el monitoreo a pacientes. Para servicios básicos como electricidad, alumbrado público y agua corriente, los sensores inalámbricos ofrecen un método de bajo costo para un sistema de recolección de datos que ayude a reducir el uso de energía y mejor manejo de recursos. El monitoreo remoto cubre un amplio rango de aplicaciones donde los sistemas inalámbricos pueden complementar sistemas cableados reduciendo costos en cables y permitiendo nuevos tipos de aplicaciones de medición.

Muchas normas se han propuesto para satisfacer las exigencias de las aplicaciones en WSN, como lo demuestran los subgrupos IEEE802 que hacen frente a estos temas, pero los más interesantes para estas aplicaciones probablemente sean los que forman parte de la IEEE802.15, los cuales centran su esfuerzo en el desarrollo de Las Redes de Área Personal o de Redes Inalámbricas de Corta Distancia (de aproximadamente 10 metros).

## Materiales y Métodos

En las tendencias actuales como son los ambientes del Internet de las Cosas (IoT), se propone que los dispositivos se conecten y puedan detectar/comunicar datos de su entorno. Se espera que esto genere redes con cantidades de nodos mucho más grandes, por lo tanto, es importante utilizar un método eficiente y escalable para recopilar información de Redes de Sensores Inalámbricos de altas densidades. De igual manera, muchas de estas implementaciones requieren que los datos recopilados por los sensores sean enviados hacia aplicaciones que se encuentran en una infraestructura de red tradicional, por ejemplo: redes en un ámbito pequeño o limitado (Local Area Network – LAN), redes empresariales, Internet, etc. Este motivo implica que la integración de las WSN a redes TCP/IP sea un tema abierto para su desarrollo tomando en cuenta que las Redes de Sensores Inalámbricos cuentan con recursos limitados en hardware y software en sus nodos finales, por lo que la utilización de protocolos TCP/IP a nivel de capa de red en los nodos no es siempre factible. Actualmente los protocolos de comunicación de las redes de sensores inalámbricos se caracterizan por su limitación en la conexión a Internet. Dos de los protocolos más

utilizados como ZigBee y WiFi tienen limitaciones en cuanto a costos de los nodos para el primero y excesivo consumo de potencia para el segundo. Una alternativa superadora en este aspecto es el protocolo LoRa (Long Range - largo alcance). Una serie de líderes de la industria IT crearon "LoRa Alliance" con el objetivo de desarrollar una nueva tecnología para lograr una comunicación de dispositivos IoT de forma más eficiente.

**Las líneas de investigación se orientan principalmente en la búsqueda de alternativas más económicas y simples tanto en la comunicación inalámbrica entre los nodos como en su diseño y desarrollo.** Una opción es el uso de la tecnología Arduino con sus placas de bajo costo y las posibilidades de interconexión vía WiFi a través de placas de interfaz (shields) o módulos inalámbricos frente a las más costosas placas XBee que utilizan el standard Zigbee para la comunicación inalámbrica (Fig. 2). En aquellos sistemas que no requieran una gran cantidad de nodos ni el mayor consumo de energía sea un problema, puede resultar en una solución aceptable y de bajo costo [9], [10].



Figura 2. Prototipo de sistema transmisor-receptor con módulos XBee desarrollado en CODAPLI.

## Desarrollo

En CODAPLI hemos investigado gran parte de esta temática, desarrollado varios proyectos e informes técnicos los cuales, si bien no han desembocado en un sistema integral basado en el control por redes de sensores inalámbricos, incluyen elementos o partes de estos sistemas: sensores, sistemas embebidos, comunicaciones inalámbricas entre placas microcontroladas, sensado remoto y automatización de dispositivos.

Se ha experimentado y realizado prototipos de adquirentes de datos y comunicaciones inalámbricas utilizando diferentes tecnologías y plataformas: Arduino, Intel-Galileo (Fig. 3), EDU-CIAA (Fig. 4). Esto nos permite tener una cierta experiencia a la hora de evaluar diferentes implementaciones, especialmente en el tema de la comunicación inalámbrica sobre la red de sensores.

A modo de ejemplo mencionamos algunos de los principales trabajos realizados, varios de los cuales fueron presentados y expuestos en diversas jornadas y congresos afines a la temática:

- Plataforma remota para prácticas de laboratorio (WICC 2017).

- Sistema de Monitoreo Meteorológico utilizando la metodología de Codiseño Hardware/Software (44 JAIIO 2015).

- Estación de medición para análisis y control de parámetros ambientales (46 JAIIO-CAI9 2017).

- Prototipo de Estación Meteorológica Automática utilizando EDU-CIAA-NXP como plataforma (CNEISI 2016).

- Comunicación por protocolo Zigbee, prestaciones, aplicación al mundo de domótica (Informe Técnico IT03 -CODAPLI/18).

Basándonos en la experiencia obtenida en estos años de investigación, **se espera desarrollar aplicaciones orientadas a la utilización de sistemas ciberfísicos** (mecanismos controlados o monitoreados por algoritmos basados en computadoras y estrechamente integrados con Internet y sus usuarios) mediante el control y la adquisición de datos basados en la comunicación a través de redes inalámbricas de sensores. Se pretende que estas aplicaciones puedan interactuar con los sistemas físicos que lo rodean pudiendo ser monitorizadas en forma local y remota a través de los medios tradicionales como Internet, utilizando computadoras, tablets, PDA, etc. Los campos de aplicación son variados y extensos, siendo la idea principal poder orientarlo principalmente al ámbito industrial, pero no descartando otros como la salud, educación, agricultura, meteorología, Internet de las cosas, etc.



Figura 3. Aplicación móvil para toma de datos y control de dispositivos físicos mediante combinación de placas Arduino-Intel Galileo.





La propuesta es avanzar en distintos ejes de investigación, aprovechando la experiencia y los conocimientos adquiridos por los integrantes del grupo. Por ello se deberá encarar el proyecto a través de distintos frentes, abordados por uno o más integrantes, quienes se enfocarán en un tema particular, pero a su vez integrados en un todo con el resto (características fundamentales en los procesos de Codiseño). Podemos entonces identificar los principales temas o ramas sobre las cuales enfocar la investigación:

- Estudio de distintos sensores;
- Conexión y comunicación mediante las interfaces y protocolos más utilizados;
- Estudio de las comunicaciones inalámbricas entre motes de la red.

## Detalles de desarrollos realizados en CODAPLI

Presentamos aquí algunos detalles de desarrollos de trabajos referidos a la temática de redes de sensores y actuadores. A modo de ejemplo, se dan detalles de una aplicación para medición de potencias activas y reactivas y otra referida a la sincronización de semáforos utilizando el protocolo LoRaWAN, una aplicación actual y resuelta en el Centro.

### Sistema de Medición de Potencia Inalámbrico para carga trifásica.

Este trabajo comprende el desarrollo e implementación de un sistema de medición y control de potencias activas y reactivas en cargas eléctricas trifásicas. El objetivo es medir y controlar el estado de consumo de determinada carga en tiempo real en forma económica, rápida y sencilla, contribuyendo además a controlar el consumo de potencia contratado por un gran consumidor para no exceder los límites y ser multado.

Ajeno a las características específicas de medición, la selección de sensores, control, etc., nos centramos a comentar los detalles de su interfaz inalámbrica, wifi, la cual se eligió por su popularidad, estabilidad de conexión, adaptabilidad a diferentes requerimientos de utilización y su bajo costo.

Para realizar esta comunicación se utilizó el dispositivo ESP8266, que se conecta a un kit de Arduino, dándole la posibilidad de tener acceso a una red local (Intranet) tanto para transmitir como para recibir datos.

Se utilizó un enrutador (router) inalámbrico para generar la red Wifi y para que nuestro dispositivo se conecte a la misma tal como se muestra en la Fig. 5, permitiendo a través de programación específica, adquirir y almacenar la información generada para su análisis en Tiempo Real.

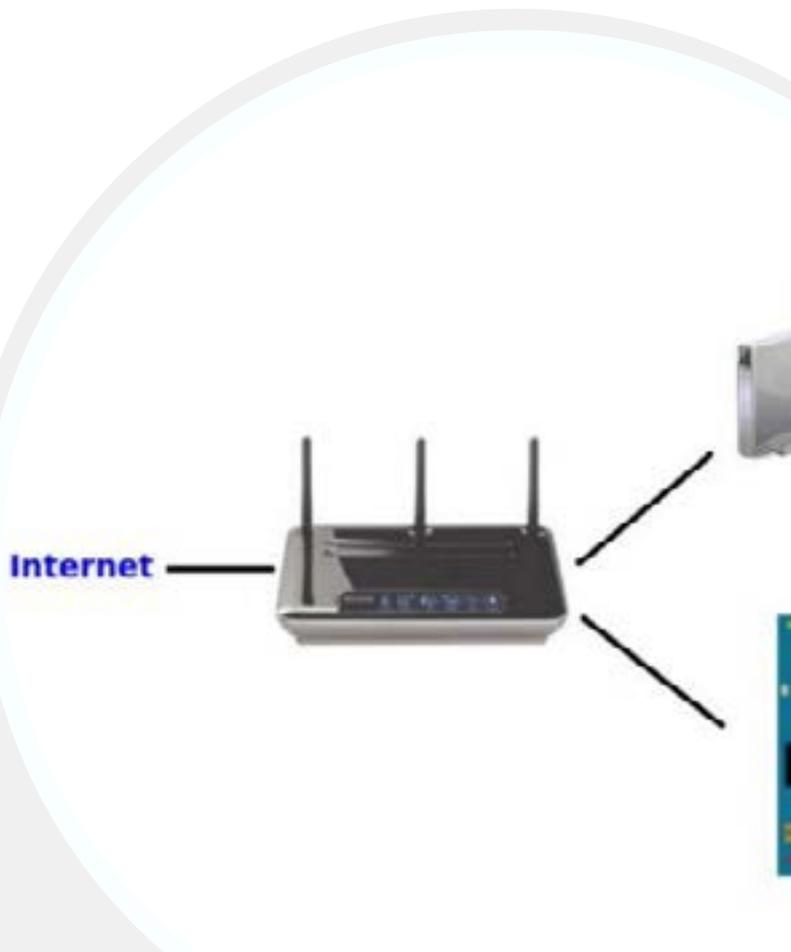


Figura 5.  
Red Wifi generada con el router inalámbrico

## Sincronización de semáforos mediante red de sensores con protocolo LoRaWAN.

Una aplicación en donde las WSN pueden resultar de extrema utilidad es en el control de los llamados "semáforos inteligentes". En muchas ciudades del mundo se apunta al paradigma de "Smart City", que plantea que a través de la automatización y el control se pueden optimizar objetos o servicios para tornarlos más eficientes y funcionales. En este trabajo se buscó utilizar recursos hardware para simplificar la sincronización de los semáforos en avenidas, implementando el concepto de IoT (Internet de las cosas) y apuntando hacia el nuevo paradigma de las ciudades inteligentes.

El tránsito de las grandes urbes es un factor creciente que genera caos, accidentes y retrasos temporales. Muchas personas suelen sufrir este enorme desorden a diario, siendo perjudicados por variables que no pueden controlar. Para evitar estos embotellamientos y sobre todo accidentes [11], se adoptó la medida de regular el paso con semáforos. Estos son muy útiles para evitar colisiones y embotellamientos. Pero suponen una gran pérdida de tiempo si no están sincronizados entre ellos. Si bien, más de una vez, se coordinan los semáforos para que se genere un flujo de tránsito deseable a determinadas horas del día, estos acaban por desconfigurarse al cabo de un tiempo. Esto sucede porque el enlace se basa en el funcionamiento de relojes ubicados en cada controlador. Estos relojes deben mantenerse todos en igual hora, lo cual es prácticamente imposible por las condiciones climáticas y técnicas que afectan al controlador, debiéndose por lo tanto ajustar periódicamente para evitar que se modifique la coordinación.

Se observa que en muchos casos existe un conflicto con la sincronización de los semáforos dado que no deberían entorpecer el flujo de tránsito sino simplificarlo. Esto podría lograrse con la coordinación de los semáforos en las avenidas para lograr el dinamismo necesario para un caudal constante de vehí-

culos, evitando entorpecer con grandes tiempos de espera en cada esquina.

Algunas soluciones para mejorar esta situación son:

Poner en hora los relojes que llevan dentro los controladores de los semáforos.

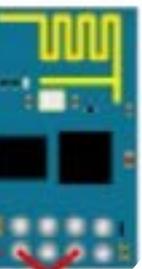
Sugerir una velocidad crucero por la avenida.

Generar una "onda verde" que facilite el tránsito, sincronizando los relojes.

Una vez planteada la solución surge otra dificultad que radica en que los relojes de los semáforos no modifiquen sus horarios y permanezcan todos con la hora correcta y uniforme a pesar de la humedad y las variaciones climáticas que suelen afectar de forma directa su funcionamiento.

Para evitar la contingencia de los relojes de los semáforos a deshora, se plantea una solución tendiente a perfeccionar su sincronización. Para lograrlo se propone el uso de una WSN para la interconexión de los nodos (semáforos). A través de esta red se busca generar una comunicación entre los nodos que facilite la puesta en hora de los relojes evitando cambios abruptos en las regulaciones del tránsito. Con esto se pretende constituir un avance hacia el campo de las Ciudades Inteligentes (Smart Cities), consiguiendo la interoperabilidad de estos "semáforos inteligentes", apuntando a una circulación vehicular más ordenada y segura. Cada tecnología inalámbrica tiene puntos fuertes y débiles. El estándar WiFi, por ejemplo, puede transmitir grandes cantidades de datos a alta velocidad, pero tiene un alcance limitado. Una red celular (GSM) combina alta velocidad y larga distancia, pero se queda corta en cuanto a lograr bajos niveles de consumo de energía.

Las aplicaciones IoT tales como la adquisición de datos remotos, el control de iluminación urbana, la vigilancia meteorológica y la agricultura, tienen cada una un conjunto diferente de prioridades. Las cantidades que se miden o controlan en estas aplicaciones tales como las condiciones climáticas, los niveles de humedad en el suelo o la instalación de luminarias cambian muy lentamente durante un período de tiempo prolongado. Además, los nodos de sensores están a menudo a kilómetros de distancia y están operados a batería, por lo que el protocolo inalámbrico óptimo debe ser capaz de enviar pequeños paquetes de datos de forma eficiente a través de largas distancias con el mínimo consumo de energía. El protocolo LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) fue diseñado exactamente para estos requerimientos.





### Características del protocolo LoRaWAN.

Es un protocolo de red de capa de enlace que usa la tecnología de radio LoRa para comunicar y administrar dispositivos de IoT [12]. LoRa es una tecnología inalámbrica de radiofrecuencia introducida por una compañía llamada Semtech [13]. Esta tecnología se puede utilizar para transmitir información bidireccional a larga distancia sin consumir mucha energía. Esta propiedad puede ser utilizada por sensores remotos que tienen que transmitir sus datos simplemente operando con una batería pequeña. Por lo general, LoRa puede alcanzar una distancia de 15-20 km y funcionar con batería durante años.

En cualquier solución de IoT típica habrá cientos de nodos sensores implementados en el campo que supervisarán los parámetros vitales y los enviarán a la red para su procesamiento. Pero estos sensores deben ser inalámbricos y deben funcionar con una batería pequeña para que sea portátil. Las soluciones inalámbricas como RF pueden enviar datos a larga distancia, pero requieren más potencia para hacerlo, por lo que no pueden funcionar con batería, mientras que BLE (Bluetooth Low Energy), por otro lado, puede funcionar con muy poca potencia, pero no puede enviar datos a larga distancia (Fig. 6).

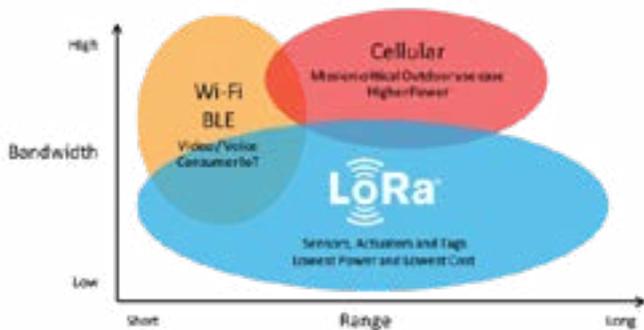


Figura 6. Comparación de LoRa con otras tecnologías inalámbricas

Teniendo en cuenta el análisis previo, la tecnología LoRaWAN nos da una buena opción para la solución, dado que su cobertura abarca grandes extensiones, puede tener muchos nodos coordinados, sirve para manejar pequeñas porciones de información y es una tecnología económica respecto de otras existentes [14].

Este protocolo está enmarcado en el paradigma IoT, concepto que se refiere a la interconexión digi-

tal de objetos cotidianos con Internet. El concepto fue propuesto en 1999 en el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), donde se investigaba la identificación por radiofrecuencia en red (RFID) que permite a los objetos conectarse e intercambiar datos y tecnologías de detección por sensores. La adopción de la IoT se está acelerando en el mundo debido principalmente al crecimiento exponencial de la red, lo que ha generado el interés para el desarrollo de aplicaciones en todos los campos, la reducción de tamaños y precios de procesadores y sensores y la reducción de costos en almacenaje y procesamiento de grandes volúmenes de información (Big Data).

Una serie de líderes de la industria IT crearon "LoRa Alliance" con el objetivo de desarrollar una nueva tecnología para lograr una comunicación de dispositivos IoT de forma más eficiente. LoRa Alliance es una organización abierta y sin ánimo de lucro cuyo objetivo es estandarizar una tecnología de comunicación de red que cumpla con una serie de características necesarias para IoT.

LoRaWAN es un protocolo de comunicación de radio de baja potencia para el IoT. Su propósito es conseguir establecer conexiones de largo alcance. Estas comunicaciones están enfocadas en pequeños dispositivos IoT o M2M que desean transmitir poca información y por lo tanto sin necesidad de grandes velocidades, pero con la intención de emplear el menor consumo de energía para así poder tener un mayor tiempo de vida con pequeñas baterías.

Su intención es formar una red de dispositivos conectados (nodos), los cuales establecerán un enlace inalámbrico con un elemento más potente capaz de comunicarse con todos estos elementos de manera gestionada. Este elemento Gateway, quien a su vez será capaz de comunicarse por otro protocolo de red -con mayor ancho de banda- transmitiendo toda la información de estos dispositivos a aquellos que la soliciten.

Desde el punto de vista tecnológico LoRa proporciona receptores con una alta sensibilidad, lo que hace que no sea necesario transmitir con potencias altas (<20dBm).

La tecnología LoRa tiene un enorme atractivo tanto a nivel de desarrollo tecnológico como de inmediata aplicación industrial. Sin embargo, una de las limitaciones de dicha tecnología es que se orienta a aplicaciones en las que la tasa de transmisión es baja, es decir, se utiliza típicamente para controlar una alarma anti-incendios, posibles malfuncionamientos de electrodomésticos, etc. En este tipo de aplicaciones, el dispositivo se encuentra normal-

mente en un estado de bajo consumo, sin actividad ni acceso a red.

Todo esto hace a la tecnología ideal para conexiones a grandes distancias y para redes de IoT que se pueden utilizar en ciudades inteligentes, lugares con poca cobertura celular o redes privadas de sensores o actuadores.

La arquitectura de red LoRaWAN [15] utiliza una topología de estrella en la que cada nodo final se comunica con varias puertas de enlace que a su vez se comunican con el servidor de red.

LoRaWAN tiene cuatro elementos de red (Fig. 7):

Los nodos finales: recopilan datos del sensor, lo transmiten "upstream" y "downstream" y reciben la comunicación desde el servidor de aplicaciones. Los dispositivos de "endpoint" usan comunicación inalámbrica "single hop" con una o varias compuertas.

El concentrador/coordinador/Gateway: actúa como un puente transparente y retransmite los datos en forma bidireccional entre los nodos finales y los servidores "upstream".

El servidor de red: se conecta a varias puertas de enlace a través de una conexión TCP/IP segura, ya sea por cable o inalámbrica, elimina los mensajes duplicados, decide qué compuerta debe responder a un mensaje de nodo final y gestiona el nodo final, las velocidades de transmisión de datos con una velocidad de datos adaptable (ADR), destinadas a maximizar la capacidad de la red y extender la vida útil de la batería del nodo final.

El servidor de la aplicación: recopila y analiza los datos de los nodos finales y determina las acciones del nodo final.

La comunicación de extremos normalmente es bidireccional, pero LoRa también admite el funcionamiento de multidifusión para funciones tales como actualizaciones de software. Muchos de los protocolos existentes, tales como ZigBee, emplean una topología de malla en la que cada uno de los nodos finales recibe y retransmite información desde otros nodos finales. Este enfoque aumenta el rango y el tamaño de la celda de la red, pero la sobrecarga de comunicación adicional añade complejidad, reduce la capacidad de la red y aumenta el consumo de energía de cada uno de los nodos.

LoRa está pensado para aplicaciones de baja potencia de red de área amplia (LPWAN). Tiene un rango de más de 15 kilómetros y una capacidad de hasta 1 millón de nodos. La combinación de baja potencia y largo alcance limita la velocidad de datos máxima a 50 kilobits por segundo.

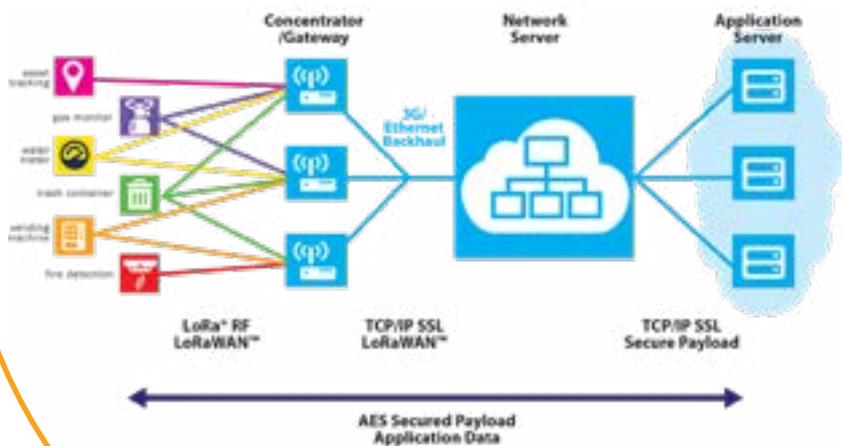


Figura 7.  
Elementos de una red LoRaWAN

LoRa es una tecnología exclusiva y patentada de propiedad de Semtech Corporation que funciona en la banda ISM. La asignación de frecuencias y los requisitos reglamentarios para ISM varían por región. Dos de las más populares son las frecuencias de 868 megahercios (MHz) utilizada en Europa y 915 MHz. utilizada en América del Norte. Otras regiones, especialmente Asia, tienen diferentes requisitos.

La capa física LoRa utiliza modulación de espectro ensanchado (SSM), codificando la señal base con una secuencia de alta frecuencia que deliberadamente propaga la señal base a través de un mayor ancho de banda, reduce el consumo de energía y aumenta la resistencia a las interferencias electromagnéticas.

En este tipo de redes la seguridad forma un papel fundamental, sobre todo cuando hablamos de despliegue en Smart Cities, donde puede existir información sensible que debe ser protegida. Por esta razón LoRaWAN proporciona varias capas de cifrado que hacen uso del algoritmo AES-128 para proteger las comunicaciones de datos.

### Propuesta y Diseño del Prototipo

Luego del estudio del protocolo seleccionado para el desarrollo de una solución aplicable en la sincronización de las vías semaforizadas, es importante precisar que por cuestiones económicas se decidió realizar una implementación sencilla del protocolo LoRaWAN, sustituyendo la conexión convencional en estrella a través de un Gateway, por una más simple como es la conexión punto a punto. Con esta conexión se pretende simular la comunicación de dos semáforos entre sí. De esta forma se



reducen los costos de implementación y se alcanza una solución factible, ejemplificando de esta forma la utilidad del uso de una red de sensores para controlar la sincronización. Para la construcción del prototipo se utilizaron dos conjuntos de placas similares a fin de implementar la comunicación entre un nodo transmisor y un receptor. Cada conjunto está compuesto por una Arduino Nano [16] y una placa LoRa SX1278 de 433 MHz y cobertura de hasta 4 km (Fig. 8).



Figura 8. Diagrama del prototipo implementado para la sincronización de dos nodos de la red LoRaWAN.

La conexión de las placas Arduino con las placas LoRa se realiza a través del bus SPI. Este bus tiene una arquitectura de tipo “maestro-esclavo”. El dispositivo maestro (master) puede iniciar la comunicación con uno o varios dispositivos esclavos (slave) y enviar o recibir datos de ellos. Los dispositivos esclavos no pueden iniciar la comunicación, ni intercambiar datos entre ellos directamente. En el bus SPI la comunicación de datos entre maestro y esclavo se realiza en dos líneas independientes, una del maestro a los esclavos y otra de los esclavos al maestro. Por lo tanto, la comunicación es Full Duplex, es decir, el maestro puede enviar y recibir datos simultáneamente.

Según la documentación del standard LoRa se deben establecer las siguientes asignaciones de pines para establecer una conexión correcta entre el Arduino Nano y la placa Sx1278 (Fig. 9).

Pines en component Lora Ra-02	Pines-component on arduino board
Vin / voltage regulators	3.3 Volt
GND	GND
MISO	D12 / Digital 12
MOSI	D11 / Digital 11
SCK	D13 / Digital 13
SS	D10 / Digital 10

Figura 9. Pines del bus SPI a usar para la conexión entre las placas



Figura 10. Líneas necesarias para establecer una conexión SPI full-duplex

Otra característica de SPI es que es bus síncrono. El dispositivo maestro proporciona una señal de reloj que mantiene a todos los dispositivos sincronizados. Esto reduce la complejidad del sistema frente a los sistemas asíncronos. Por tanto, el bus SPI requiere un mínimo de 3 líneas (Fig. 10).

En este caso se usa el bus SPI de Arduino Nano que está establecido del puerto 10 al 13. El conector final entre las dos placas del prototipo utilizado, incluyendo las conexiones a los leds del semáforo, se muestra en la Fig. 11. Para el control de cada semáforo se requerirá una implementación similar conformando un nodo de la red inalámbrica.

Se construyó un prototipo con el cual se realizó una simulación del funcionamiento del protocolo LoRaWAN aplicado a la sincronización de dos semáforos (Fig. 12).

Los semáforos se simbolizaron mediante 3 leds con los colores correspondientes.

A manera de ejemplo se agrega el código de comunicación (Figs. 13 y 14), para observar lo simple que es la utilización del protocolo para realizar aplicaciones más complejas y sus posibilidades de ampliación a una red de sensores inalámbricos. El código correspondiente a la comunicación entre transmisor y receptor está escrito en lenguaje C y es relativamente fácil de comprender inclusive para quien no esté interiorizado en el tema.

Vale mencionar que para el desarrollo se utilizaron dos librerías: LoRa.h (para enviar y recibir datos) y SPI.h (librería de Arduino SPI).

Es importante destacar que la sincronización aquí

## Transmisor/Receptor

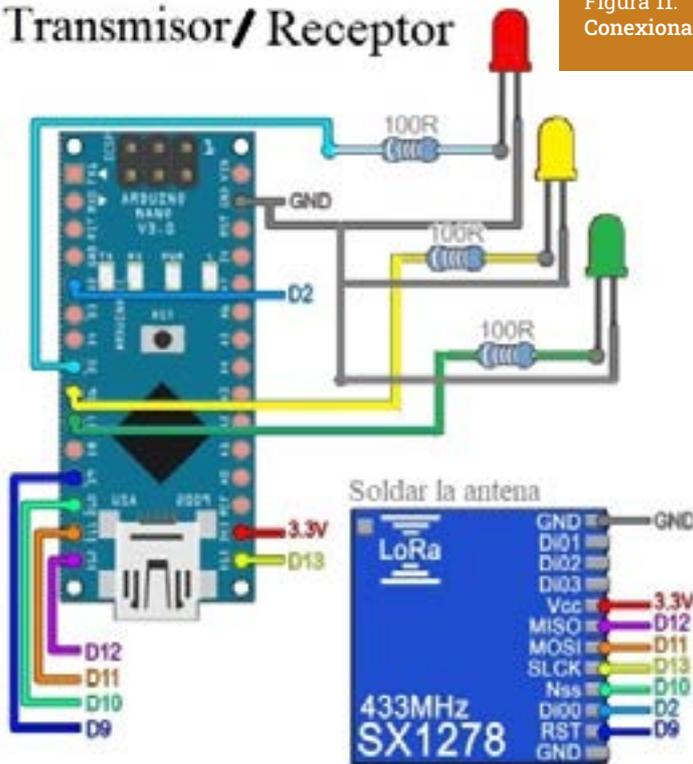


Figura 11.  
Conexión de placas Arduino Nano y LoRa para cada semáforo

su puesta en práctica. Se propone así una posible mejora a aplicar en las ciudades actuales donde el tránsito es abundante y los accidentes son habituales. El beneficio consiste en una solución inteligente y eficiente para el ordenamiento del tránsito. También existe provecho en reducir la emanación de gases contaminantes para el ambiente. Está comprobado que el parque automotor incluye un numeroso y activo conjunto de vehículos

planteada es ideal, pues lo relevante del proyecto es resolver la comunicación entre los semáforos, el modelo de sincronismo es un aditamento que podría variar sin modificar la solución al problema. En este caso, se plantea el ciclo de semáforos como el tiempo mínimo que puede tardar un vehículo en atravesar una avenida, este lapso está pautado en 6 segundos a una velocidad cruce de 60 km/h (máximo establecido por la ley para circular por avenidas). El ciclo comienza con el vehículo en la esquina, tarda 6 segundos en recorrer la cuadra, al llegar pasa y empieza a transitar los siguientes 100 metros (Fig. 15).

Una vez que transcurre el intervalo de tiempo, se avisa al otro semáforo que cambie su estado a verde y el anterior cambiará a rojo. Así el rojo y el verde durarán 6 segundos cada uno, permitiendo el paso del auto a velocidad cruce.

### Objetivos futuros del trabajo

Se ha desarrollado una posible solución para la sincronización de semáforos vehiculares utilizando el protocolo que mejor satisfaría la problemática planteada e implementando un prototipo para

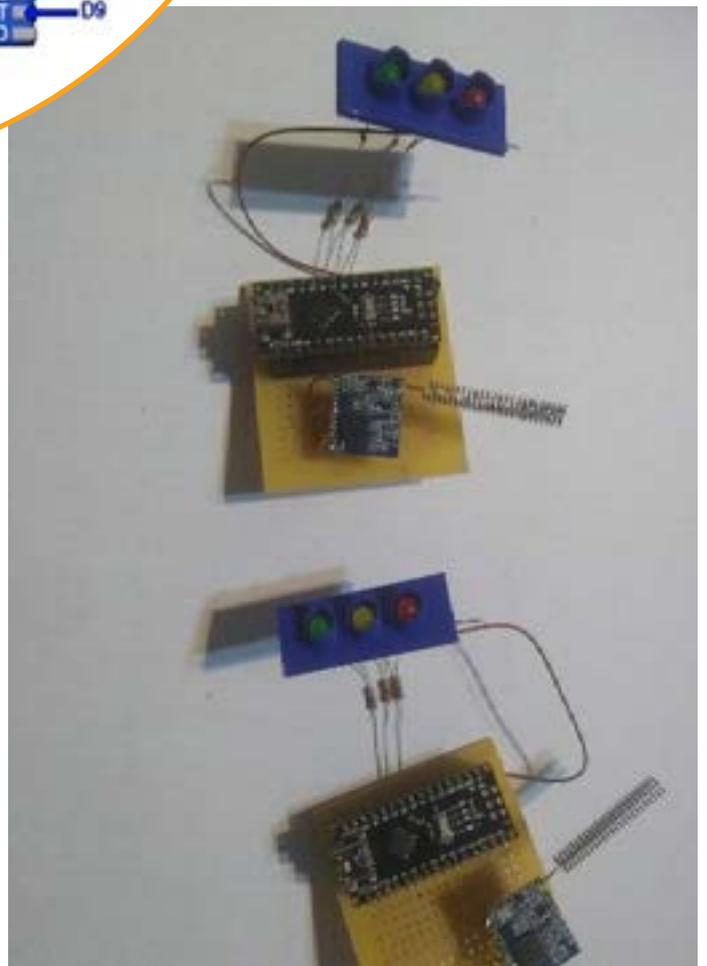


Figura 12.  
Prototipo final para la sincronización de semáforos





### Código del transmisor

```
#include <SPI.h> // arduino SPI library
#include <LoRa.h> // arduino libraries for LoRa
int verde = 7; // puerto al que se le asigna el led verde =7
int amarillo = 4; // puerto al que se le asigna el led amarillo =4
int rojo = 5; // puerto al que se le asigna el led rojo =5

void sendMessage() //establece comunicación entre dos dispositivos Tx y Rx
{
  LoRa.beginPacket();
  LoRa.print("q"); //envía una "q"
  LoRa.endPacket(); //finaliza
}

void semaforar()
{
  digitalWrite(verde,HIGH); // se enciende el led verde, HIGH envía un pulso de 5 -
  delay(1000); // espera 1 segundos
  digitalWrite(verde,LOW); //se apaga el led verde, low envía un pulso de 0 volts
  delay(10); // espera 0.01 segundos
  digitalWrite(amarillo,HIGH); //capta el proceso anterior, con los pines leds
  delay(2000);
  digitalWrite(amarillo,LOW);
  delay(10);
  digitalWrite(rojo,HIGH);
  delay(4000);
  digitalWrite(rojo,LOW);
  delay(10);
}

void setup() {
  pinMode(verde,OUTPUT); //Se define la función del puerto a OUTPUT
  pinMode(amarillo,OUTPUT); //Se define la función del puerto a OUTPUT
  pinMode(rojo,OUTPUT); //Se define la función del puerto a OUTPUT
  Serial.begin(9600); //Se inicializa el serial en ese valor

  while (!Serial); //Si existe Serial

  Serial.println("Lora Receiver");
  //puede ser 915E6
  if (!LoRa.begin(433E6)) { //datos de frecuencias, transmitidos basura, se desc

    Serial.println("Starting LoRa failed ");
    while (1);
  }

  LoRa.setSpreadingFactor(10); // se le asigna al SF un valor de 10
  LoRa.setSignalBandwidth(62.5KB); // Se le asigna el ancho de banda
  LoRa.crc(); //puede eliminarse propio de la librería de LoRa
  semaforar(); // Se llama al procedimiento que transmite y apaga las luces
  sendMessage(); // se envía un mensaje al otro dispositivo
}

void loop() {
  char mensaje= " "; //se crea una variable mensaje, vacía.
  int packetSize = LoRa.parsePacket(); //guarda el tamaño del paquete, es en que está
  if (packetSize) // leer paquete
  while (LoRa.available()) {
    Serial.print((char)LoRa.read()); //convierte la salida en un char
    mensaje+=(char)LoRa.read(); // le asigna a mensaje, la salida
    if (mensaje=="q") //Si mensaje es igual a "q", se le dio el aviso de iniciar
    semaforar(); //se prende el led verde y comienza la secuencia
    sendMessage(); //función de semaforar, Tx le envía una "q" a Rx que final
  }
  else
  { Serial.println("no llegó nada"); // no existe la comunicación
  }
}
```

Figura 13.  
Código utilizado para el transmisor.

### Código del Receptor

```
#include <SPI.h> // arduino spi library
#include <LoRa.h> // arduino libraries for LoRa
int verde = 7;
int amarillo = 4;
int rojo = 5;

void sendMessage()
{
  LoRa.beginPacket();
  LoRa.print("q");
  LoRa.endPacket();
}

void semaforar()
{
  digitalWrite(verde,HIGH);
  delay(5000);
  digitalWrite(verde,LOW);
  delay(10);
  digitalWrite(amarillo,HIGH);
  delay(2000);
  digitalWrite(amarillo,LOW);
  delay(10);
  digitalWrite(rojo,HIGH);
  delay(4000);
  digitalWrite(rojo,LOW);
  delay(10);
}

void setup() {
  pinMode(verde,OUTPUT);
  pinMode(amarillo,OUTPUT);
  pinMode(rojo,OUTPUT);
  Serial.begin(9600);

  while (!Serial);
  Serial.println("Lora Receiver");
  //puede ser 915E6
  if (!LoRa.begin(433E6)) {
    Serial.println("Starting LoRa failed ");
    while (1);
  }

  LoRa.setSpreadingFactor(10);
  LoRa.setSignalBandwidth(62.5KB);
  LoRa.crc();
}

void loop() {
  char mensaje= " ";
  int packetSize = LoRa.parsePacket();
  if (packetSize) {
    // read packet
    while (LoRa.available()) {
      Serial.print((char)LoRa.read());
      mensaje+=(char)LoRa.read();
    }
    if (mensaje=="q")
  }
}
```

Figura 13.  
Código utilizado para el receptor.

propulsados por la combustión de hidrocarburos (ciclomotores, automóviles y camiones). Las emisiones procedentes de los escapes de estos vehículos contienen monóxido de carbono, hidrocarburos y óxidos de nitrógeno que son liberados a la atmósfera en importantes cantidades; son los componentes del "smog oxidante fotoquímico". Por esta razón, las zonas urbanas más pobladas son las que sufren la mayor contaminación de este tipo. Cada vez que se arranca un auto, la emanación de gases es mayor, pues la combustión necesaria para el primer impulso, también lo es. Entonces, al evitar las acciones de frenar y volver a arrancar en cada esquina, fruto de la sincronización de semáforos planteada, se reduce la contaminación ambiental.

Es importante destacar que el prototipo operacional montado para las pruebas funcionó de forma correcta. Se puede inferir que, al aplicar el modelo a una escala mayor, también debería operar de manera adecuada. Esto supone un enorme beneficio y una solución innovadora, con la aplicación del nuevo concepto de Internet de las cosas, a la altura de las grandes urbes del mundo que día a día están migrando hacia un nuevo paradigma con eje en las nuevas tecnologías.

## Discusión y resultados

Cabe destacar que estos trabajos de investigación y desarrollos prácticos presentados forman parte de un proyecto más ambicioso que lleva a cabo el Centro CODAPLI a partir del PID mencionado al principio del artículo, orientado a la implementación de sistemas de comunicación en las redes inalámbricas de sensores y actuadores. La disponibilidad concreta de un prototipo de red de sensores completa y operativa, posibilitará la realización de un escenario de pruebas real para experimentación con la interacción de software en tiempo real. Permitirá, por ejemplo -haciendo alusión al proyecto de control de semáforos inteligentes- implementar simulaciones con sistemas complejos de tránsito urbano, previendo la circulación de vehículos en caso de emergencias, evitando aglomeraciones de tránsito y teniendo el control sobre la circulación de los móviles en toda la ciudad. Asimismo, será posible ensayar con sistemas para el mejoramiento de características ambientales, ahorro de energía eléctrica, etc.

# CONCLUSIÓN

Para la continuidad de este proyecto de Investigación y desarrollo, disponemos de profesionales y becarios trabajando en las líneas de investigación, como: profundizar el tema de utilización de las redes inalámbricas en el mejoramiento de los sistemas de control inteligente del tránsito en las ciudades, estudio y desarrollos de gateways para la interconexión de la red inalámbrica a Internet, proveyendo la posibilidad de construir aplicaciones de IoT y otro en la formulación de la programación para sistemas complejos.



# AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a todos los profesionales y alumnos que colaboran día a día en todas las áreas del Centro CODAPLI, que de forma directa o indirecta intervinieron en estos desarrollos.

En particular a los Ingenieros, Omar E. Rodriguez, Marcelo Zabaljauregui, Julieta Sanchez, David Runque, Carlos Bustos, coautores de trabajos referenciados en este artículo.

# REFERENCIAS

(1) Centro CODAPLI: <http://codapli.frlp.utn.edu.ar>  
Sistema de comunicación para la implementación de redes inalámbricas de sensores, WICC 2018, pág. 982. Archivo digital: descarga y online ISBN 978-987-3619-27-4.

(2) "Diseño de una plataforma remota para desarrollo de prácticas de laboratorio", [https://repositoriosdigitales.mincyt.gob.ar/vufind/Record/SEDI-CI\\_cd7dc0f0030dc7acfb30ed1db47847ff](https://repositoriosdigitales.mincyt.gob.ar/vufind/Record/SEDI-CI_cd7dc0f0030dc7acfb30ed1db47847ff)

(3) Cátedras: Aplicaciones de Tiempo Real <https://sites.google.com/site/atrutnfrlp/>; Comunicaciones y Redes <https://sites.google.com/site/cyru tnfrlp/>; Sistemas de Transmisión Inalámbricos <https://sites.google.com/site/styriutnfrlp/>

(4) William Stalling. Comunicaciones y Redes de Computadoras, Pearson 7ª edición, 2016.

(5) Chaudhari, Dharavath. "Study of Smart Sensors and their Applications". Proceedings on International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering (IJARCCE), Vol. 3, Issue 1, January 2014, ISSN (Online): 2278-1021.

(6) IEC, 2014 "Internet of Things: Wireless Sensor Networks" Proceedings on International Electrotechnical Commission (IEC), ISBN 978-2-8322-1834-1.

(7) Lutokhin. "Applications of Wireless Sensor Networks in Next Generation Networks". Proceedings of International Telecommunication Union (ITU), 28 February 2014.