



Quinto  
Congreso Nacional  
de Riego y Drenaje  
**COMEII-AURPAES 2019**

Septiembre 2019 | Mazatlán, Sinaloa



**Artículo: COMEII-19025**

Mazatlán, Sin., del 18 al 20  
de septiembre de 2019

## **ANÁLISIS DE TECNOLOGÍAS DE INTERNET DE LAS COSAS PARA LA TRANSMISIÓN DE DATOS DESDE SISTEMAS DE BOMBEO EN UNIDADES DE RIEGO**

**Alberto González Sánchez<sup>1\*</sup>; Jesús de la Cruz Bartolón<sup>1</sup>; Ernesto Olvera Aranzolo<sup>1</sup>;  
Ramiro Vega Névarez<sup>1</sup>; Edson Giovanni Rodríguez Gómez<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Coordinación de Riego y Drenaje. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso, Jiutepec, Morelos, C.P. 62550. México.

alberto\_gonzalez@tlaloc.imta.mx – (777) 3293600 ext. 115 (\*Autor de correspondencia)

<sup>2</sup>Posgrado. Universidad Politécnica del Estado de Morelos. Paseo Cuauhnáhuac 566, Lomas del Texcal, Jiutepec, Morelos, C.P. 62574. México.

### **Resumen**

En las últimas décadas se ha intensificado el uso de agua subterránea para actividades agrícolas, lo que ha contribuido a la sobreexplotación de los acuíferos. Esto ha generado diversas medidas y políticas a nivel nacional, como la realización de estudios sobre la capacidad de recarga, lo que sirve de base para el otorgamiento o limitación de los títulos de concesión. Sin embargo, en la práctica, no hay un mecanismo de monitoreo a nivel de pozo que verifique las concesiones, y los niveles actuales de sobreexplotación están estrechamente relacionadas con esta falta de medición. Dada esta problemática, se requieren de herramientas informáticas que faciliten la consulta o estimación del volumen extraído desde el nivel de pozo, con el fin de obtener información más precisa del volumen real extraído desde los acuíferos. En este contexto, el Internet de las Cosas (*Internet of Things, IoT*) puede ser una herramienta sumamente útil, ya que permite la adquisición remota de datos en entornos distribuidos a costos relativamente bajos, contribuyendo a formar una infraestructura “ciber-física” global. Por lo tanto, es necesario un análisis de tecnologías IoT a fin de realizar una selección adecuada para el problema del envío de datos desde los sistemas de bombeo en las unidades de riego. Se espera que este tipo de herramientas permitan implementar un esquema remoto de consulta de información para la toma de decisiones y el establecimiento de políticas de control en las extracciones, las cuales permitan conformar a largo plazo un régimen de aprovechamiento sustentable de los recursos hídricos subterráneos.

**Palabras claves:** medición, adquisición remota de datos, LoRa, arduino.



## Introducción

La sobreexplotación afecta de forma severa a los mantos acuíferos. Estas reservas naturales, son sumamente importantes para México, pues aportan el 35.9% del volumen total de agua anual utilizado en la agricultura (23,470 millones de m<sup>3</sup>), y el 38.9% del volumen total concesionado (33,311 millones de m<sup>3</sup>) para usos consuntivos (CONAGUA, 2016), por lo que su aprovechamiento óptimo y sustentable resulta de vital importancia. Sin embargo, en las últimas décadas se ha intensificado el uso de agua subterránea para actividades de agricultura, lo que ha contribuido a la sobreexplotación del recurso. Actualmente, existe un déficit en la disponibilidad media anual en más del 30% de los 653 acuíferos, en los cuales se ha detectado que las extracciones superan a la recarga (SEMARNAT, 2018). Esta problemática ha obligado a generar diversas medidas y políticas a nivel nacional para controlar los acuíferos, como la realización de estudios sobre la capacidad de recarga, lo que a su vez sirve para el otorgamiento (o limitación) de los permisos de explotación, que quedan registrados en CONAGUA bajo la forma de “títulos de concesión”. El órgano de la CONAGUA encargado de llevar el control de los títulos de concesión es el denominado Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) (CONAGUA, 2009), el cual controla una base de datos georreferenciada con la totalidad de los títulos de concesión y asignación para el aprovechamiento de aguas nacionales, así como los permisos de descarga de aguas residuales del país, las concesiones de zonas federales y los permisos de extracción de materiales del lecho de los ríos. Lamentablemente, de los 497,807 títulos de aprovechamiento de agua registrados en la REPDA, el 97% no cuenta con medidor (483,373 registros) y el 93% no han sido verificados (463,672 registros) (Cubas et al., 2017). En la práctica, no hay un mecanismo de monitoreo a nivel de pozo que permita verificar que los volúmenes establecidos en las concesiones sean respetados, y los niveles actuales de sobreexplotación y de sobreconcesión se encuentran estrechamente relacionadas con esta falta de medición.

Dada esta problemática, se requiere la creación y aplicación de nuevas herramientas informáticas que faciliten la consulta o estimación del volumen extraído desde el nivel de pozo, esto con el fin de obtener información más precisa del volumen real que se está extrayendo de los mantos acuíferos. No obstante, estas herramientas deberán contar con ciertas características a fin de garantizar confiabilidad y utilidad en la reducción del problema de la sobreexplotación. Primeramente, deben ser de bajo costo, pues el número de aprovechamientos subterráneos es enorme (tan sólo para uso agrícola existen más de 40,000 títulos de concesión a cargo de las llamadas “unidades de riego”); deben contar con esquemas de aplicación en red, esto por compatibilidad con entornos físicos naturalmente distribuidos; su esquema de transmisión de datos debe ser redundante y fiable, y así garantizar que la información llega a su destino. Finalmente, también deben ser compatibles con las herramientas ya instaladas en campo (medidores y sistemas de bombeo), esto con el objetivo de reducir el monto de inversión requerido para su implementación.

En este contexto, el Internet de las Cosas (*Internet of Things, IoT*) puede ser una herramienta sumamente útil, pues es una tecnología que reúne muchas de las



características anteriormente mencionadas. De manera amplia, *IoT* es utilizado para referirse tanto a: (i) la red global resultante que interconecta objetos inteligentes por medio de tecnologías basadas en Internet, (ii) el conjunto de tecnologías de soporte necesarias para realizar dicha interconexión (incluidos, por ejemplo, identificadores de radiofrecuencia (*RFID*), sensores / actuadores, dispositivos de comunicación máquina a máquina, etc.) y (iii) el conjunto de aplicaciones y servicios que aprovechan dichas tecnologías (Atzori et al., 2010). Así, *IoT* implica la incorporación de componentes electrónicos en los objetos físicos cotidianos, haciéndolos "inteligentes" y permitiendo que se integren sin problemas dando como resultado una infraestructura "ciber-física" global, dando nuevas oportunidades para el sector de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TICs) abriendo el camino a nuevos servicios y aplicaciones capaces de aprovechar la interconexión de entornos físicos y virtuales (Miorandi et al., 2012).

La implementación de un sistema *IoT* es resultado de la selección de diversas tecnologías. Sistemas micro-electromecánicos, comunicaciones inalámbricas y la electrónica digital se combinan para dar como resultado la capacidad de detectar, computar y comunicarse de forma inalámbrica, formando redes inalámbricas de sensores que tienen una amplia aplicación en el monitoreo ambiental, monitoreo de infraestructura, monitoreo de tráfico y comercio, entre otros (Akyildiz et al., 2002). Por lo tanto, siempre que se busque su aplicación, se requiere un análisis a fin de realizar selección adecuada de tecnología para el problema del envío de datos desde los sistemas de bombeo en las unidades de riego. El presente artículo realiza un análisis de tecnologías *IoT*, con el fin de proponer una configuración que se adapte al problema de la adquisición remota y masiva de la información de las extracciones volumétricas de las unidades de riego. Se espera que la herramienta seleccionada contribuya a implementar un esquema remoto de medición que facilite la toma de decisiones y el establecimiento de políticas de control en las extracciones, las cuales permitan conformar a largo plazo un régimen de aprovechamiento rígido y sustentable de los recursos hídricos subterráneos.

## **Materiales y Métodos**

### **La arquitectura *IoT***

Una arquitectura *IoT* consiste de las diferentes capas de tecnologías que la soportan, indicando también cómo se relacionan entre sí dichas tecnologías para lograr escalabilidad, modularidad y una configuración para la implementación en diferentes escenarios (Patel & Patel, 2016). Existen distintas propuestas, como arquitecturas centradas en los objetos (los *things*) que *IoT* interconecta (Sánchez López et al., 2012), arquitecturas centradas en el medio de comunicación (*internet/cloud computing*) (Gubbi et al., 2013), arquitecturas con enfoque jerárquico (Top-Down approach) (Ganchev et al., 2014) y arquitecturas multicapa (Desai et al., 2012; Hakim, 2018; Khan et al., 2012; Patel, 2016). Siendo este último el más popular, en este trabajo se adopta este enfoque, señalando algunas variaciones según las fuentes consultas.

En general, la arquitectura *IoT* multicapa se divide en cinco capas, como se muestra en la Figura 1:



- 1) **Capa de percepción.** También conocida como "capa de sensores" (Hakim, 2018; Khan, 2012), o capa de "dispositivo inteligente" (Patel, 2016). Se compone de los dispositivos equipados con sensores, que permiten la interconexión del mundo físico con el digital facilitando el flujo de información en tiempo real para ser recolectada o procesada (Patel, 2016). Se compone de los objetos físicos y dispositivos sensores que pueden ser, por ejemplo, de radiofrecuencia (RFID), códigos de barras 2D o sensores infrarrojos, según el método de identificación de los objetos (Khan, 2012). La información recopilada se pasa a la capa de red para su transmisión segura al procesamiento de la información, pero en muchos casos, estos dispositivos cuentan con capacidad de memoria, que le permite almacenar cierta cantidad de eventos sensoriales. Los sensores están agrupados de acuerdo a su propósito, como sensores ambientales, sensores corporales, sensores de telemática vehicular, entre otros (Patel, 2016). Estos objetos son las denominadas "cosas" en el concepto "Internet de las Cosas" (Hakim, 2018).
- 2) **Capa de red y puerta de enlace (gateway).** También llamada "capa de transmisión", transfiere de forma segura la información desde los dispositivos sensores al sistema de procesamiento de información. La mayoría de los sensores requieren conectividad a las denominadas puertas de enlace de sensores (gateways) para concentrar y transmitir datos de ida y vuelta a través de la red de datos (Hakim, 2018; Patel, 2016). Esto puede ser en la forma de una red de área local (LAN), con conexiones de Ethernet y Wi-Fi, redes de área personal (PANs) como ZigBee, Bluetooth y Ultra Wideband (UWB). Para los sensores que no requieren conectividad con los agregadores de sensores, su conectividad con los servidores / aplicaciones back-end se puede proporcionar utilizando una red de área amplia (WAN) como GSM, GPRS y LTE.
- 3) **Capa del servicio de administración:** hace posible el procesamiento de la información a través de análisis, controles de seguridad, modelado de procesos y gestión de dispositivos. Los dispositivos sobre *IoT* implementan diferentes tipos de servicios. Cada dispositivo se conecta y se comunica solo con aquellos otros dispositivos que implementan el mismo tipo de servicio. Esta capa es responsable de la gestión del servicio y tiene un enlace a la base de datos. Recibe la información de la capa de red y la almacena en la base de datos. Realiza el procesamiento de la información y el cálculo ubicuo y toma decisiones automáticas basadas en los resultados. Esta capa también es llamada capa de middleware por algunos autores (Khan, 2012).
- 4) **Capa de aplicación:** esta capa proporciona una administración global de la aplicación basada en la información de los objetos procesada en la capa del servicio de administración. Las aplicaciones implementadas por *IoT* pueden ser

salud inteligente, agricultura inteligente, casa inteligente, ciudad inteligente, transporte inteligente, etc.

Algunos autores señalan la existencia de una quinta capa, denominada capa empresarial (Khan, 2012), responsable de la administración del sistema general de *IoT*, incluidas las aplicaciones y los servicios. Esta capa define modelos de negocio, gráficos, diagramas de flujo, etc. basándose en los datos recibidos desde la capa de aplicación. Basado en el análisis de los resultados, esta capa ayudará a determinar las acciones futuras y las estrategias comerciales.

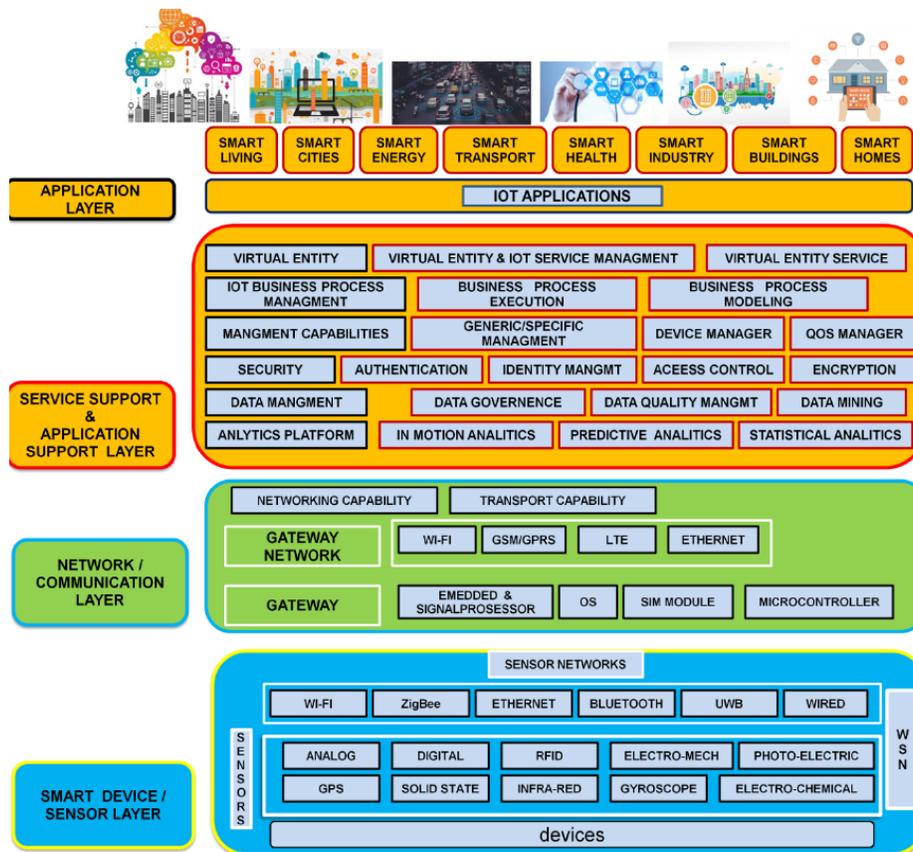


Figura 1. Arquitectura *IoT* (Patel, 2016)

### Modelos de comunicación

En marzo de 2015, el Comité de Arquitectura de Internet (IAB) dio a conocer un documento para guiar la creación de redes de objetos inteligentes (RFC 7452), que describe un marco de cuatro modelos de comunicación comunes que utilizan los dispositivos de la *IoT*, que son comunicaciones dispositivo a dispositivo, dispositivo a la nube, dispositivo a puerta de enlace y comunicación a través del procesamiento posterior (back-end). Por cuestiones de espacio, en este artículo se describirá el modelo que presenta la configuración más apta para la obtención de datos masivos de sistemas de bombeo en unidades de riego, que es la comunicación de dispositivo a puerta de enlace.

Para obtener más información del resto de configuraciones, una buena referencia es Rose et al., 2015.

En el modelo dispositivo a puerta de enlace (*Application Layer Gateway, ALG*), el dispositivo *IoT* se conecta a través de un servicio *ALG* como una forma de llegar a un servicio en la nube. Esto implica un software de aplicación ejecutándose en un dispositivo de puerta de enlace local, que actúa como intermediario entre el dispositivo y el servicio en la nube y que proporciona seguridad y otras funcionalidades tales como traducción de protocolos o datos (Figura 2). Un ejemplo de este tipo dispositivos es la aparición de dispositivos concentradores (*hub*) en las aplicaciones de automatización del hogar. Se trata de dispositivos que sirven de puerta de enlace local entre los dispositivos individuales de la *IoT* y un servicio en la nube, pero que también pueden reducir los problemas de interoperabilidad entre los propios dispositivos. Por ejemplo, el *hub SmartThings* (Samsung, s/f) es un dispositivo de puerta de enlace independiente que tiene instalados transceptores *Z-Wave* (*Z-Wave*, s/f) y *Zigbee* (*ZigBee*, s/f) para comunicarse con ambas familias de dispositivos; luego se conecta al servicio en la nube *SmartThings* y permite que el usuario acceda a los dispositivos usando una aplicación para teléfono inteligente y una conexión a Internet.

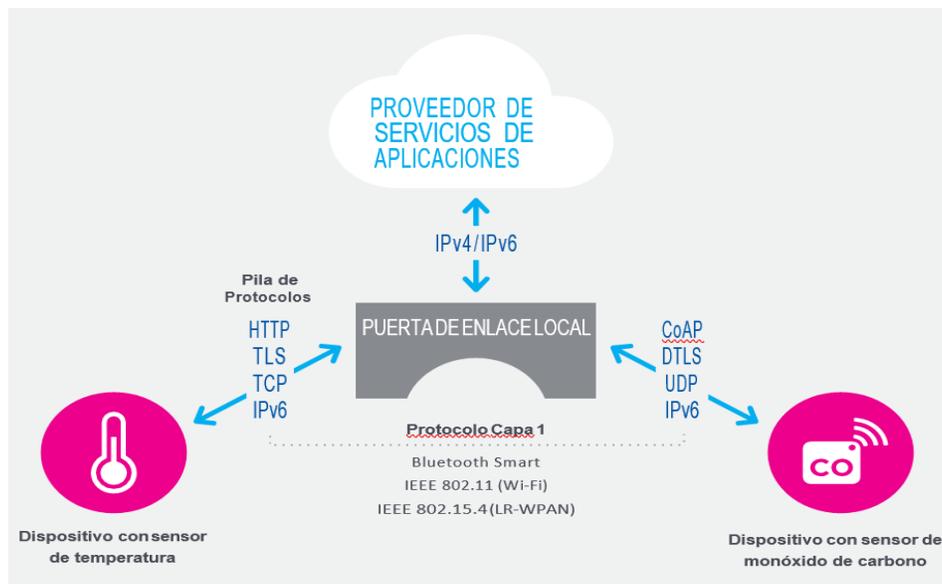


Figura 2. Modelo de conexión "dispositivo a puerta de enlace" (Rose, 2015)

Este modelo de comunicación se suele utilizar para integrar nuevos dispositivos inteligentes en un sistema heredado con dispositivos que no son interoperables de manera nativa. Una desventaja de este enfoque es el costo y la complejidad que implican el desarrollo del software y el sistema para la puerta de enlace de capa de aplicación.

## Redes de comunicación

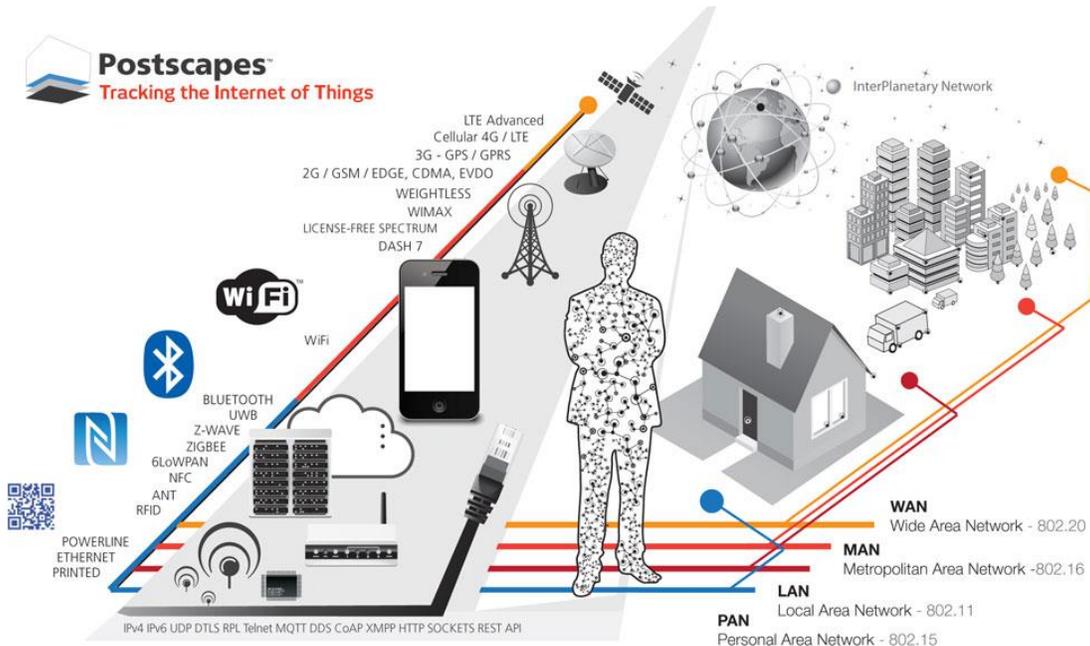
Las tecnologías existentes en los inicios del *IoT* no eran las óptimas para muchas de sus aplicaciones, y el mercado ha debido de ir adaptándose e innovando (Cendón, 2017), por



lo que hoy en día existen múltiples opciones de comunicación. Una manera de clasificarlas es por el alcance de la comunicación entre dispositivos, que puede ir desde nivel personal (centímetros o metros) hasta áreas extensas (cientos o miles de kilómetros). De esta forma, existen cuatro grupos principales de redes de comunicación (Bliznakoff, 2014):

- 1) WAN, *Wide Area Network*. Se considera como WAN a todas aquellas redes de telecomunicación que unen grandes distancias, ya sea entre ciudades, regiones o países. Una WAN es una colección de LANs dispersadas geográficamente cientos de kilómetros una de otra. Un dispositivo de red llamado enrutador es capaz de conectar LANs a una WAN. Unir dos puntos lejanos mediante una red WAN suele implicar tener que atravesar porciones de la red pertenecientes a varias compañías o estados, por lo que podríamos hablar de un tipo de red pública. Este es por tanto el rango superior llegando a comunicarse los dispositivos de uno a otro lado del mundo, de alcance de cientos a miles de kilómetros. Las WAN utilizan comúnmente tecnologías ATM (*Asynchronous Transfer Mode*), Frame Relay, X.25, E1/T1, GSM, 4G/LTE, 3G, TDMA, CDMA, xDSL, PPP, entre otras, para conectividad a través de medios de comunicación tales como fibra óptica, microondas, celular y vía satélite.
- 2) MAN, *Metropolitan Area Network*. El rango de este estándar está comprendido entre una red local y varias manzanas de una ciudad (o algunas ciudades juntas como máximo). Al contrario que las WAN estas redes pueden pertenecer a una sola organización, aunque es normal que se comparta entre varias, para soportar mejor los gastos. El alcance es kilométrico, pero por debajo de los 50 km. Algunos ejemplos de estas redes son *WiMax*, *Dash7* y la tecnología *Weightless*.
- 3) LAN, *Local Area Network*. Las principales diferencias entre LAN y WAN son mucha menor área de cobertura para la LAN y la ausencia de líneas de telecomunicación comunes (son privadas). Se considera una LAN desde la red empresarial hasta la de un hogar, y por lo tanto es una red que puede ser compartida. Es una red de área de corta distancia (típicamente decenas de metros), delimitadas únicamente por la distancia de propagación del medio de transmisión (coaxial, hasta 500 metros; par trenzado, hasta 90 metros; fibra óptica, decenas de metros; espectro disperso o infrarrojo, decenas de metros). Redes de este tipo pueden ser enlaces *Ethernet* y *WiFi* de largo alcance.
- 4) PAN, *Personal Area Network*. Estas redes de corto alcance cubren de varios centímetros a algunos metros, por lo tanto cubre la menor proporción de espacio de todas las tecnologías mencionadas. Otra gran diferencia es que estas redes son privadas y personales no pudiendo ser compartida (se podrían considerar redes punto a punto de corto alcance). Su alcance va de 0 a 15 metros. Como ejemplos se tienen a las redes *WiFi*, *Bluetooth*, *Zigbee* y *RFID*.

La Figura 3 muestra a los cuatro grupos de redes de comunicación, incluyendo varios ejemplos de las redes que las representan.



**Figura 3.** Tipos de redes de comunicación y representación de su alcance (Postscapes, 2019)

Un tipo reciente de tecnología de redes es la llamada área amplia de bajo consumo, o *Low Power Wide Area (LPWA)*, que se caracteriza por conectar dispositivos de bajo consumo energético, bajos requerimientos de ancho de banda y operación a grandes distancias (González García, 2017), principalmente por enlaces de radio. Esta tecnología permite montar desde redes de alcance personal (PAN) hasta metropolitanas (MAN), dependiendo de la frecuencia y el hardware utilizados. Algunas redes representativas de esta tecnología son:

- **LoRa y LoRaWAN:** LoRa es un tipo de modulación en radiofrecuencia patentado por Semtech con amplias ventajas, como una alta tolerancia a las interferencias, bajo consumo, largo alcance (10 a 20km), y baja transferencia de datos (hasta 255 bytes por mensaje). LoRaWAN es un estándar abierto de *LoRa Alliance*, por lo que se considera un protocolo de red que usa la tecnología LoRa para comunicar y administrar dispositivos LoRa. LoRaWAN se compone de dos partes principalmente: gateways y nodos, los primeros son los encargados de recibir y enviar información a los nodos y los segundos, son los dispositivos finales que envían y reciben información hacia el gateway.
- **SigFox:** Con una gran implantación en Europa, utiliza modulaciones lentas para conseguir grandes distancias. No es un protocolo abierto.

- NWave: Similar a SigFox en términos de funcionalidad, pero con una implementación mejor del nivel MAC (según NWave). Utiliza técnicas avanzadas de modulación para poder coexistir con otras tecnologías de radio.

Como se indicará más adelante, este tipo de redes resultan prometedoras para el problema bajo análisis.

### Dispositivos para IoT

A continuación se analizan las plataformas de hardware más populares para el desarrollo de proyectos IoT.

#### Arduino.

Esta placa se caracteriza por el uso de un microcontrolador reprogramable Atmel AVR, siendo el Atmel 328 uno de los más utilizados. Posee con entradas y salidas analógicas y digitales, y un entorno de desarrollo propio. Las entradas y salidas permiten establecer conexiones entre el microcontrolador y los sensores y actuadores de una manera muy sencilla (principalmente con cables dupont). Arduino es multiplataforma, admitiendo los sistemas operativos más populares, como Windows, Mac Os X y Linux. Otras características son su bajo costo y rapidez de implementación. El Cuadro 1 muestra un cuadro comparativo con las placas Arduino oficiales más populares del mercado. La Figura 4 muestra una placa Arduino modelo YUN.

**Cuadro 1.** Comparativo de placas Arduino

Modelo	I/O digitales	Entradas analógicas	Salidas	Memoria
Uno r3	16	6	6	32 kb
Mini 05	14	6	8	32 kb
Leonardo	20	12	7	32 kb
Mega r3	14	6	7	256 kb
YUN	20	12	7	32 kb



**Figura 4.** Placa de Arduino YUN

#### Raspberry Pi

Raspberry Pi (es un ordenador de placa reducida o placa única de bajo costo, desarrollado en Reino Unido por la Fundación Raspberry Pi, con el propósito original de

estimular la enseñanza de ciencias de la computación en el sector académico. El diseño incluye un chip Broadcom BCM2835, que contiene un procesador central (CPU) ARM1176JZF-S a 700 MHz (el firmware permite hacer un overclock de hasta 1 GHz), un procesador gráfico (GPU) Video Core IV, y 512 MB de memoria RAM, que originalmente fueron 256 MB). El diseño no incluye un disco duro ni unidad de estado sólido, ya que usa una tarjeta SD para el almacenamiento permanente. En cuanto al sistema operativo, el Raspberry Pi usa mayoritariamente sistemas basados en el núcleo Linux. Raspbian, una distribución derivada de Debian que está optimizada para el hardware de Raspberry Pi, se lanzó durante julio de 2012 y es la distribución recomendada por la fundación. Existen dos “familias” en este tipo de dispositivos, que se podrían clasificar como “la línea principal” y la línea zero. La línea «principal» de este dispositivo ha tenido 3 versiones, siendo el modelo actual el Raspberry Pi 3 B (Figura 5). El primer Raspberry Pi, modelo 1, tuvo varias versiones, A, B y B+, siendo el más habitual el B. Las versiones 2 y 3 solo tuvieron versión «B». No obstante, la línea Raspberry PI Zero presenta también una serie de modelos interesantes para IoT, de muy pequeño tamaño y bajo costo.

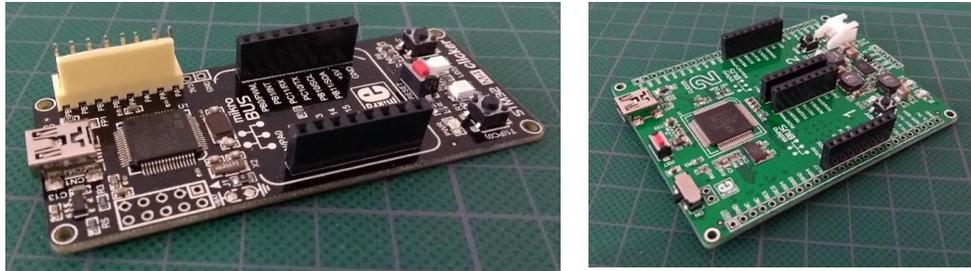


**Figura 5.** Raspberry PI 3B

### **Clicker 1 y 2**

El Clicker 1 funciona a base de un microcontrolador ARM de 32 bits STM32F415RG a 168MHz, es muy compacto, cuenta con 1 puerto que el fabricante le denomina mikroBus, en el cual están distribuidas las conexiones a los puertos de comunicaciones como un RS-232, un SPI y un I2C, además cuenta con 8 pines para conexiones de entrada o salida digitales. En cuanto a la programación de esta tarjeta está disponible el software MikoC, Mikro Pascal y Mikro Basic, los cuales tienen costo, cuenta con una buena variedad de dispositivos compatibles y librerías y ejemplos para el uso de los mismos (Figura 6, izquierda).

El Clicker 2 (Figura 6, derecha) funciona a base de un microcontrolador ARM de 32 bits STM32F407VGT6 a 168MHz, cuenta con 2 puertos mikroBus, con dos puertos RS-232, dos SPI y dos I2C, contando también con 8 pines para conexiones de entrada o salida digitales. Además de los dos puertos mikroBus cuenta con 42 pads o pines de para conectar periféricos adicionales, en estos 42 pines hay entradas y salidas digitales, entradas analógicas, conexiones PWM, un puerto RS-232 adicional, un puerto I2C adicional. Para la programación de esta tarjeta está disponible el mismo software de su predecesor.



**Figura 6.** Clicker 1 (izquierda) y Clicker 2 (derecha)

### WiFi Esp32 LoRa 433 Mhz

El Wifi LoRa 433 (Figura 7) tiene como base el microcontrolador Espressif de 32 bits LX6 de doble núcleo 240MHz, 540 Kb SRAM, tres puertos UART, dos puertos SPI, dos puertos I2C y un puerto I2S, 36 pines con entradas y salidas analógicas y digitales. Como principales características se destaca que dentro de las tarjetas que se están comparando es el único que cuenta con una pantalla OLED, esta es de 0.96 pulgadas, también es el único que incorpora conexión WiFi y la tecnología Lora, que es para establecer conexiones inalámbricas a larga distancia en este modelo 3 km aproximadamente, lo que lo hace una excelente opción sobre los demás, ya que el resto de las opciones la parte de las comunicaciones necesita de algún periférico, llámese GSM/GPRS, 3G, Ethernet, Bluetooth, entre otros.

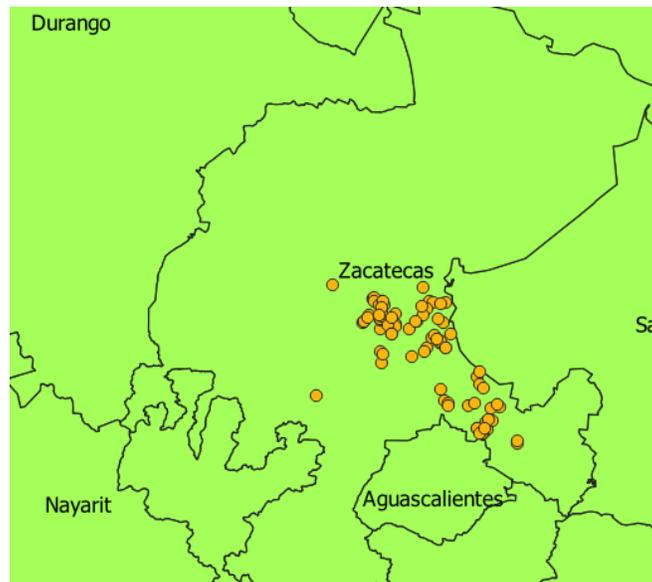


**Figura 7.** WiFi LoRa 433

### Selección de tecnologías IoT para sistemas de bombeo en Unidades de Riego

Como lo indica (González García, 2017), existen ciertos factores a tomar en cuenta en el diseño de un sistema IoT, particularmente a lo que se refiere la red de comunicación, que son: la distancia entre el emisor y el receptor, la naturaleza de los obstáculos, la distorsión del ruido y las regulaciones gubernamentales. Ligados con los primeros dos está el consumo de energía, ya que el enlace de comunicaciones representa el mayor consumo de la energía total requerida en el dispositivo.

A fin de determinar el factor distancia, en este trabajo se realizó un análisis a una muestra de 90 sistemas de bombeo localizados en estado de Zacatecas, que fue obtenida de un proyecto IMTA realizado en el año 2015 (Gonzalez Sanchez & Gonzalez Casillas, 2017). Esta muestra, tomada de manera aleatoria, incluye las coordenadas de la misma cantidad de pozos distribuidos principalmente en los acuíferos de Calera, Chupaderos y Loreto (ver Figura 8).



**Figura 8.** Ubicación de los pozos utilizados para análisis de la distancia

Para el análisis, las coordenadas X, Y de los pozos fueron convertidas de geográficas a *Universal Transversa Mercator* (UTM). Esto se hizo con el fin de medir la distancia euclidiana para cada par de pozos (uno contra el resto, para cada uno). La mayoría de los pozos están ubicados en la zona 13 de la proyección UTM, pero algunos estaban en la zona 14, por lo que fueron eliminados del análisis. En total, se dejaron 84 pozos. Una vez obtenida la distancia en línea recta entre cada par de pozos, se obtuvieron las siguientes métricas:

- El mínimo y el máximo de distancia de cada pozo contra el resto
- El mínimo y máximo global (entre todos los pozos)
- El promedio de las distancias mínimas
- El promedio de las distancias máximas
- La cantidad de pozos localizados en un radio de 50 km, 20 km, 10 km, 5 km, 3 km, 2 km, 1 km para cada pozo, y este dato se promedió para todos los pozos.

Del análisis, se obtuvo que la distancia mínima entre un par de pozos es de 248 metros, mientras que los más distantes (sin pozos intermedios) se encontraron a 27 km. El promedio de las distancias más cortas entre cada par de pozos fue de 3.16 km, mientras que el promedio de las máximas fue de 107.09 km (con pozos intermedios). El promedio de las distancias entre los pozos fue de 47.24 km. Es importante señalar, que las distancias se podrían reducir si los pozos son agrupados por acuífero, pero de momento se ha realizado el análisis sin considerar esta característica, con la finalidad de simular casos extremos (*outliers*) en la muestra que podrían ocurrir en acuíferos con grandes extensiones de superficie.

Para analizar los pozos dentro de los radios de 0.2 km a 50 km, se contabilizaron aquellos que estaban debajo de cada rango, y estos totales fueron promediados. Los resultados se muestran en el Cuadro 2, donde se indica la cantidad de pozos dentro de cada radio, la cantidad de pozos que quedan fuera de alcance, y lo que representa esta cantidad en porcentaje respecto a la muestra. En el Cuadro 2 se observa también que, por ejemplo, cada pozo en promedio tiene por debajo de los 50 km a 51 pozos en su alcance radial, en 20 km a otros 18, pero con dos que quedan fuera de cualquier alcance.

**Cuadro 2.** Promedio de pozos localizados en cada rango de distancia en la muestra

Rango	Pozos promedio en el radio	Cantidad de pozos fuera de alcance	Pozos fuera de alcance (%)
<50km	50.98	0	0
<20 km	18.40	2	2.38
<10 km	7.83	3	3.57
<5 km	2.74	8	9.52
<3 km	1.62	21	25.00
<2 km	0.93	36	42.86
<1 km	0.31	59	70.24

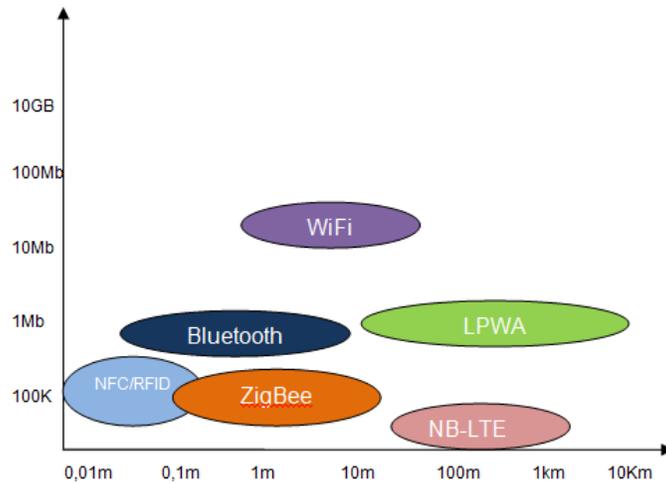
No obstante, es necesario aclarar que estas mediciones atañen únicamente a la muestra utilizada, donde se puede ver que hay al menos tres pozos que se encuentran alejados de la mayor concentración (Figura 8), pero que entre los cuales sí puede haber pozos intermedios que no fueron seleccionados.

## Resultados y Discusión

De acuerdo al análisis anterior se requiere seleccionar una tecnología que permita distancias de conexión superiores a 20 km para garantizar que se alcance a todos los pozos de la muestra de manera directa. El tipo de red requerido para este tipo de enlace se basaría principalmente en redes WAN, con tecnologías tipo LTE, 3G, o GSM. Equipar a cada equipo con este tipo de enlace dedicado resultaría demasiado costoso, pues aparte del dispositivo y su periférico de comunicación (modem), se requiere pagar el servicio de telefonía, usualmente una renta mensual, lo cual se vuelve inviable para una aplicación masiva. No obstante, se observa que con un alcance de 3 km se puede cubrir a la mayoría de los pozos (75 %), lo que permite optar por otro tipo de tecnología de red apta para la mayoría de los casos. De esta manera, el menor porcentaje puede ser resuelto con equipos más especializados, logrando un equilibrio en los costos requeridos para el equipamiento de adquisición remota de datos.

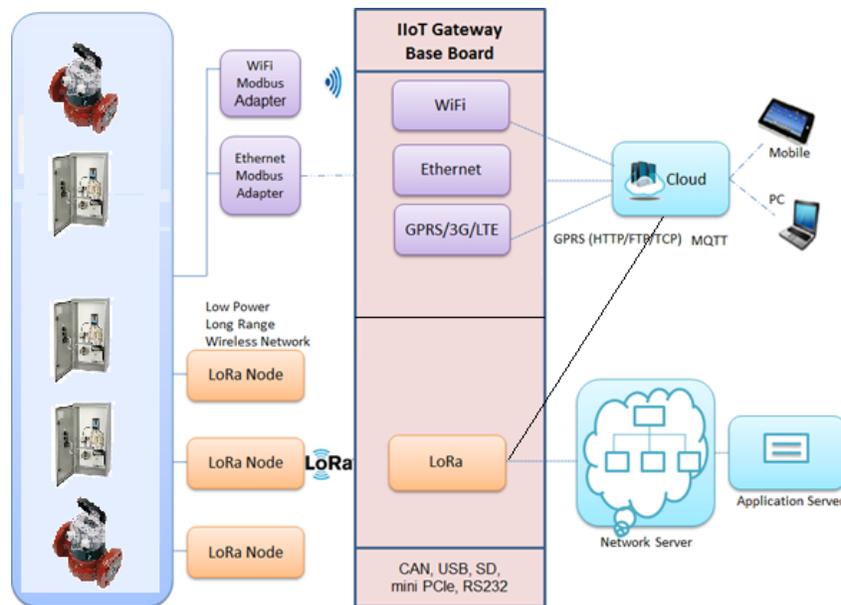
Observando la Figura 9, una tecnología muy adecuada para el último caso mencionado son las redes LPWA, ya que pueden alcanzar distancias de hasta 10 km, lo que permitiría satisfacer la mayoría de los requerimientos de distancia. Las tecnologías LPWA representan la respuesta de la industria a la creciente necesidad del mercado de una conectividad económica y de bajo ancho de banda para aplicaciones IoT que no son adecuadas para opciones inalámbricas de corto alcance como Bluetooth o ZigBee. Más allá de la cobertura, las aplicaciones de IoT también requieren un mecanismo de

despliegue más simple que el de las tradicionales tecnologías de corto alcance, ya que dependen de redes locales más complejas, lo que implica la gestión de credenciales de seguridad, las conexiones entre varios fabricantes y la calidad de la conexión.



**Figura 9.** Tecnologías de red en función de distancia y capacidad de transmisión (González García, 2017)

Como se comentó previamente, es imperativo la tecnología utilizada sea de bajo costo para que se pueda aplicar de manera masiva, ya que en el país se cuenta con más de 40,000 unidades de riego que se abastecen de pozos profundos. En este sentido, una tecnología adecuada a estas características es la tecnología LoRa, pues su compatibilidad con Arduino por medio de los procesadores Esp32 permiten acceder a todos los beneficios de dicha plataforma, incluyendo los entornos de desarrollo y plataforma de código abierto de software en la nube, lo que reduce ampliamente los costos.



**Figura 10.** Configuración a utilizar con LoRa

Dado lo anterior, la Figura 10 muestra una arquitectura propuesta para la obtención de datos desde los sistemas de bombeo en las unidades de riego. En este esquema, se aprecia que la información es extraída desde los sensores de flujo o arrancadores en las UR por medio de los dispositivos LoRa, los cuales hacen fluir los datos hacia las puertas de enlace. Los datos pueden ser, por ejemplo, el gasto instantáneo, el volumen acumulado o el tiempo que lleva en funcionamiento el sistema, por mencionar algunos. Las puertas de enlace, equipados con conexión a Internet, realizan la recopilación de datos y hacen el envío masivo hacia la nube, o bien, a un servidor de red dedicado, usando un servicio web o mensaje http. Esto requerirá, desde luego, una hábil programación en las tres capas, a fin de manejar la redundancia de mensajes y garantizar la robustez del sistema.

## Conclusiones

El análisis realizado permitió seleccionar una tecnología que permite cubrir los requerimientos para el envío masivo de datos desde los sistemas de bombeo de las unidades de riego, esto en función de las distancias determinadas de una muestra aleatoria de 90 unidades de riego. En ese sentido, se observa que las redes de bajo consumo de área extensa (LPWA), y en concreto la tecnología LoRa, ofrecen grandes ventajas en cuanto a costo, cobertura y rendimiento energético sobre las otras tecnologías analizadas. Esta selección deberá ser validada con una implementación práctica, en la cual se verifiquen las características de los dispositivos y la red de comunicación seleccionados. El esquema de implementación debe ser diseñando un esquema de malla que facilite su crecimiento, y con una programación robusta en el manejo de redundancia y comunicación confiable.

## Referencias Bibliográficas

- Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., & Cayirci, E. (2002). Wireless sensor networks: a survey. *Computer Networks*, 38(4), 393–422. [https://doi.org/10.1016/S1389-1286\(01\)00302-4](https://doi.org/10.1016/S1389-1286(01)00302-4)
- Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2010). The Internet of Things: A survey. *Computer Networks*, 54(15), 2787–2805. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>
- Bliznakoff, D. (2014). *IoT: TECNOLOGÍAS, usos, tendencias y desarrollo futuro*. repositorio UOC. Universitat Oberta de Catalunya.
- Cendón, B. (2017). Las redes más usadas en el IoT. Recuperado el 28 de abril de 2019, a partir de <http://www.bcendon.com/las-redes-mas-usadas-en-el-iot/>
- CONAGUA. (2009, diciembre 23). ACUERDO por el que se dan a conocer los trámites y formatos que aplica la Comisión Nacional del Agua. *Diario Oficial de la Federación*. México, D. F. Recuperado a partir de [http://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5126145&fecha=23/12/2009](http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5126145&fecha=23/12/2009)
- CONAGUA. (2016). *Estadísticas del Agua en México*. Ciudad de México: SEMARNAT. Recuperado a partir de [http://201.116.60.25/publicaciones/EAM\\_2016.pdf](http://201.116.60.25/publicaciones/EAM_2016.pdf)
- Cubas, F., Llano, M., & de Rosenzweig, L. J. (2017, agosto). El misterio del agua subterránea en México. *agua.org.mx*. Recuperado a partir de <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2017/08/El-misterio-del-agua-subterranea->



en-Mexico.pdf

- Desai, A., Parmar, J. K., & Chaudhary, S. (2012). Internet of Things: Architecture and Research Challenges. *CSI Communications*, (June), 1–52. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2073.2247>
- Ganchev, I., Ji, Z., & O'Droma, M. (2014). A Generic IoT Architecture for Smart Cities. <https://doi.org/10.1049/cp.2014.0684>
- González García, A. J. (2017). *IoT: Dispositivos, tecnologías de transporte y aplicaciones*. Universitat Obertade Catalunya. Recuperado a partir de <http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/handle/10609/64286>
- Gonzalez Sanchez, A., & Gonzalez Casillas, A. (2017). Application of the volumetric extraction information system for aquifers (sieva) in the state of Zacatecas, Mexico. En *23rd International Congress on Irrigation and Drainage*. Mexico City, Mexico: International Commission on Irrigation & Drainage (ICID).
- Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, 29(7), 1645–1660. <https://doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010>
- Hakim, A. El. (2018). Internet of Things (IoT) System Architecture and Technologies, (March), 0–5. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.17046.19521>
- Khan, R., Khan, S. U., Zaheer, R., & Khan, S. (2012). Future internet: The internet of things architecture, possible applications and key challenges. En *Proceedings - 10th International Conference on Frontiers of Information Technology, FIT 2012* (pp. 257–260). <https://doi.org/10.1109/FIT.2012.53>
- Miorandi, D., Sicari, S., De Pellegrini, F., & Chlamtac, I. (2012). Internet of things: Vision, applications and research challenges. *Ad Hoc Networks*. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2012.02.016>
- Patel, K. K., & Patel, S. M. (2016). Internet of Things-IOT Definition, Characteristics, Architecture, Enabling Technologies, Application & Future Challenges. *Ijesc*. <https://doi.org/10.4010/2016.1482>
- Postscapes. (2019). IoT Technology Guidebook.
- Rose, K., Eldridge, S., & Lyman, C. (2015). The internet of things: an overview. *Internet Society*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Samsung. (s/f). SmartThings.
- Sánchez López, T., Ranasinghe, D. C., Harrison, M., & McFarlane, D. (2012). Adding sense to the Internet of Things: An architecture framework for Smart Object systems. *Personal and Ubiquitous Computing*. <https://doi.org/10.1007/s00779-011-0399-8>
- SEMARNAT. (2018, enero 4). ACUERDO por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las Regiones Hidrológico-Administrativas que se indican. *Diario Oficial de la Federación (DOF)*. Ciudad de México. Recuperado a partir de [https://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5510042&fecha=04/01/2018](https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5510042&fecha=04/01/2018)
- Z-Wave. (s/f). Z-Wave. Recuperado el 6 de junio de 2019, a partir de <https://www.z-wave.com/>
- ZigBee. (s/f). ZigBee. Recuperado el 7 de julio de 2019, a partir de <https://zigbee.org/>