

# INTERNET DE LAS COSAS (IoT) APLICADA A LA MEDICIÓN DE LAS EXTRACCIONES SUBTERRÁNEAS



**INFORME FINAL**

**RD1903.1**

**Noviembre 2019**

**COORDINACIÓN DE RIEGO Y DRENAJE**  
SUBCOORDINACIÓN DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO  
DE INFRAESTRUCTURA HIDROGRÁFICA

## DIRECTORIO

---

**Dr. Víctor Manuel Toledo Manzur**  
Secretario de Medio Ambiente y  
Recursos Naturales



**MEDIO AMBIENTE**

SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES

**Dr. Adrián Pedrozo Acuña**  
Director General

**Dr. Carlos Fuentes Ruíz**  
Encargado de la Coordinador de Riego y Drenaje



**Dr. Alberto González Sánchez**  
Jefe de Proyecto

## PARTICIPANTES

---

**M.I. Jesús De La Cruz Bartolón**  
Tecnólogo del Agua

**M.C. Ernesto Olvera Aranzolo**  
Tecnólogo del Agua

**M.C. Ramiro Vega Nevárez**  
Tecnólogo del Agua

**M.C. José Eduardo Moreno Bañuelos**  
Tecnólogo del Agua

**Dr. Víctor Manuel Ruíz Carmona**  
Tecnólogo del Agua

**Ing. Juan Bahena Sánchez**  
Apoyo técnico

# Contenido

---

1. INTRODUCCIÓN .....	13
1.1. Antecedentes .....	13
1.2. Objetivos .....	17
1.3. Proyectos relacionados .....	18
1.4. Marco normativo.....	20
2. METODOLOGIA.....	22
2.1. Diseño metodológico .....	22
2.2. Descripción de etapas e instrumentos utilizados .....	22
2.2.1. Análisis de tecnologías IoT para la adquisición remota masiva de datos de sistemas de bombeo.....	22
2.2.2. Programación de dispositivo IoT para monitorear el tiempo de funcionamiento de sistemas de bombeo y adquirir información de extracciones volumétricas. ....	24
2.2.3. Selección de equipos de bombeo para la instalación de los dispositivos IoT. ....	24
2.2.4. Adaptar el Sistema de Información de Extracciones Volumétricas en Acuíferos (SIEVA) para realizar la adquisición y consulta de datos de las extracciones.....	30
2.2.5. Programar e instalar los de dispositivos IoT en los pozos seleccionados .....	30
2.2.6. Verificación en campo del funcionamiento de los equipos IoT instalados .....	31
2.2.7. Recopilación, verificación y análisis de los datos obtenidos .....	31
3. DESARROLLO.....	32
3.1. Análisis de la tecnología IoT para la adquisición remota masiva de datos de sistemas de bombeo. 32	
3.1.1. La arquitectura de Internet de las Cosas.....	32
3.1.2. Aplicaciones.....	35
3.1.3. Modelos de comunicación .....	36
3.1.3.1. Comunicaciones dispositivo a dispositivo .....	36
3.1.3.2. Comunicaciones dispositivo a la nube .....	37
3.1.3.3. Comunicaciones dispositivo a puerta de enlace .....	38
3.1.3.4. Comunicaciones a través del procesamiento posterior (back-end).....	40

3.1.4. Redes de comunicación .....	41
3.1.4.1. Tecnologías WAN .....	43
3.1.4.2. Tecnologías MAN.....	47
3.1.4.3. Tecnologías LAN/PAN.....	49
3.1.5. Dispositivos (Hardware) .....	52
3.1.5.1. Arduino.....	52
3.1.5.2. Waspote .....	54
3.1.5.3. Spark.....	55
3.1.5.4. Raspberry Pi.....	55
3.1.5.5. Clicker 1 y 2 .....	58
3.1.5.6. WiFi Esp32 LoRa 433 Mhz .....	61
3.1.5.7. Intel Galileo .....	62
3.1.5.8. ZigBee (dispositivo físico).....	63
3.1.5.9. Comparativa de dispositivos IoT .....	63
3.1.6. Software .....	64
3.1.6.1. ThingSpeak .....	64
3.1.6.2. Zatar .....	65
3.1.6.3. Samsung Artik Cloud .....	66
3.1.6.4. aRest Framework .....	66
3.1.7. Selección de tecnología IoT para la medición de extracciones subterráneas.....	66
3.2. Programación de dispositivos IoT para monitorear el tiempo de funcionamiento de sistemas de bombeo .....	70
3.2.1. Esquema de comunicación.....	70
3.2.1.1. Funcionamiento de los equipos LoRa cliente.....	71
3.2.1.2. Funcionamiento de los equipos LoRa “puerta de enlace” .....	72
3.2.2. Hardware utilizado .....	73
3.2.2.1. Dispositivo LoRa Esp 32.....	73
3.2.2.2. Configuración cliente .....	75
3.2.2.3. Configuración puerta de enlace .....	75

3.3. Selección y caracterización de sistemas de bombeo utilizados para la validación de los dispositivos IoT.....	75
3.3.1. Sistema de bombeo instalado en IMTA.....	76
3.3.2. Sistemas de bombeo instalados en zonas agrícolas del estado de Morelos.....	76
3.3.2.1. Pozo número 1 “Pastor de los Pinos”.....	78
3.3.2.2. Pozo #22.....	79
3.3.2.3. Pozo #27.....	79
3.4. Sistema de información para la consulta de datos de extracciones.....	80
3.5. Instalación los de dispositivos IoT en los sistemas de bombeo.....	82
3.5.1. Proceso general de instalación de los dispositivos LoRa configuración cliente.....	82
3.5.2. Proceso general de instalación de los dispositivos LoRa configuración puerta de enlace.....	85
3.5.3. Instalación del equipo LoRa en el sistema de bombeo IMTA.....	88
3.5.3.1. Instalación del dispositivos LoRa cliente en el IMTA.....	88
3.5.3.2. Instalación del dispositivo LoRa puerta de enlace en el IMTA.....	93
3.5.4. Instalación del equipo LoRa en tres sistemas de bombeo del acuífero Tepalcingo-Axochiapan.....	95
3.5.5. Instalación del equipo LoRa cliente en el sistema de bombeo Pozo 1.....	96
3.5.6. Instalación del equipo LoRa cliente en el sistema de bombeo Pozo 22.....	101
3.5.6.1. Medidor volumétrico instalado en el sistema de bombeo pozo 22.....	105
3.5.7. Instalación del equipo LoRa en el sistema de bombeo Pozo 27.....	110
3.5.8. Instalación del dispositivo LoRa puerta de enlace en el acuífero Tepalcingo-Axochiapan.....	114
3.6. Verificación en campo del funcionamiento de los equipos IoT instalados.....	117
4. RESULTADOS.....	118
4.1. Registros de mediciones en el sistema de bombeo del pozo IMTA.....	118
4.2. Registros de mediciones en el sistema de bombeo del pozo no. 1 en Tepalcingo-Axochiapan 120	
4.3. Análisis de costos de instalación del dispositivo LoRa.....	123
4.4. Potencial de aplicación de la metodología en unidades de riego de Chihuahua.....	124

5. CONCLUSIONES.....	130
6. Referencias .....	133
7. Glosario.....	136

## ANEXOS

Anexo 1. Artículo .....	137
Anexo 2. Registros de monitoreo en sistemas de bombeo .....	153
Anexo 3. Comportamiento del flujo en tuberías.....	155
Anexo 4. Conversión de señales analógicas a digitales.....	158

## FIGURAS

---

Figura 1.1 Acuíferos sobreexplotados .....	14
Figura 1.2. Disponibilidad de agua en acuíferos.....	14
Figura 1.3. Tendencias de búsqueda de Google desde 2004: Internet de las cosas, redes de sensores inalámbricos, computación ubicua (Gubbi, Buyya, Marusic, & Palaniswami, 2013).....	16
Figura 1.4 Consulta de disponibilidad de volumen a nivel organismo de cuenca en SIEVA. ...	19
Figura 2.1 Marco conceptual de <i>IoT</i> con el cómputo en la nube al centro (Gubbi et al., 2013)23	
Figura 2.2 Formato de captura para caracterización de unidades de riego (primera parte)....	26
Figura 2.3 Formato de captura para caracterización de unidades de riego (segunda parte) ..	27
Figura 2.4 Formato de registro de visitas al pozo (FRVP).....	28
Figura 2.5 Formato de registro producción agrícola (FR-PA) .....	29
Figura 3.1 Arquitectura IoT (Patel & Patel, 2016) .....	35
Figura 3.2 Modelo de comunicación “dispositivo a dispositivo” (Rose et al., 2015) .....	37
Figura 3.3 Modelo de conexión “dispositivo a la nube” (Rose et al., 2015).....	38
Figura 3.4 Modelo de conexión “dispositivo a puerta de enlace” (Rose et al., 2015) .....	39
Figura 3.5 Modelo de intercambio de datos a través del procesamiento posterior (Rose et al., 2015) .....	41
Figura 3.6 Tipos de redes de comunicación y representación de su alcance.....	42
Figura 3.7 Arquitectura LoRaWAN (Panigrahi, 2017).....	46
Figura 3.8 a) Zócalo YUN microSD (izquierda) b) Esquema Microcontrolador – Procesador (derecha) .....	53
Figura 3.9 Distribución Pines Arduino Yun .....	54
Figura 3.10 Tarjeta Raspberry Pi 3.....	57
Figura 3.11 Pines GPIO Raspberry Pi3 .....	58
Figura 3.12 Conexión MAX232 a Raspberry Pi3 .....	58
Figura 3.13 Clicker 1 .....	59
Figura 3.14 Distribución de componentes .....	59
Figura 3.15 Conexión con modem GSM/GPRS.....	60
Figura 3.16 Clicker 2 .....	60

Figura 3.17 Distribución de Pines .....	61
Figura 3.18 Conexión con Modem GSM/GPRS.....	61
Figura 3.19 WiFi LoRa 433 .....	62
Figura 3.20 Distribución de pines .....	62
Figura 3.21 Ubicación de los pozos utilizados para análisis de la distancia .....	67
Figura 3.22 Tecnologías de red en función de la distancia y capacidad de transmisión.....	69
Figura 3.24 Esquema de adquisición y transmisión de datos desde los sistemas.....	70
Figura 3.25 Dispositivo Heltec LoRa .....	74
Figura 3.26 Reunión Usuarios, CONAGUA, IMTA para la selección de los pozos participantes	77
Figura 3.27 Ubicación de los pozos seleccionados en el Estado de Morelos.....	78
Figura 3.28 Pozo #1 “Pastor de los Pinos” .....	79
Figura 3.29 Pozo #22 .....	79
Figura 3.30 Caseta del Pozo #27 (izquierda). Medición del nivel estático (derecha).....	80
Figura 3.31 Pantalla de la versión anterior del SIEVA (consulta de volúmenes extraídos).....	81
Figura 3.32 Pantalla actualizada del SIEVA (consulta de volúmenes extraídos) .....	81
Figura 3.33 Caja de alimentación del dispositivo LoRa .....	83
Figura 3.34 Localización del gabinete con equipo LoRa (izquierda).....	84
Figura 3.35 Esquema de colocación y conexión de antena al equipo LoRa cliente .....	85
Figura 3.36 LoRa y el modem GSM.....	86
Figura 3.37 Localización del gabinete con equipo LoRa y el modem .....	87
Figura 3.38 Esquema de colocación y conexión de antena al equipo LoRa puerta de enlace ..	88
Figura 3.39 Colocación gabinete .....	89
Figura 3.40 Colocación de centro alimentador USB.....	90
Figura 3.41 Colocación LoRa.....	90
Figura 3.42 Conexión arrancador-LoRa .....	91
Figura 3.43 Colocación antena .....	92
Figura 3.44 Equipo en funcionamiento .....	93
Figura 3.45 Colocación LoRa en el gabinete (configuración puerta de enlace) .....	94
Figura 3.46 Colocación antena .....	94

Figura 3.47 Distancias entre sistemas de bombeo del acuífero Tepalcingo-Axochiapan .....	96
Figura 3.48 Inspección de fases.....	97
Figura 3.49 Colocación gabinete .....	98
Figura 3.50 Colocación de centro alimentador USB.....	98
Figura 3.51 Colocación LoRa.....	99
Figura 3.52 Conexión arrancador-LoRa .....	100
Figura 3.53 Equipo en funcionamiento .....	100
Figura 3.54 Inspección de fases.....	101
Figura 3.55 Colocación gabinete .....	102
Figura 3.56 Colocación de centro alimentador USB.....	102
Figura 3.57 Colocación LoRa.....	103
Figura 3.58 Conexión arrancador-LoRa .....	103
Figura 3.59 Colocación de antena .....	104
Figura 3.60 Equipo en funcionamiento .....	104
Figura 3.61 Modelo de medidor SDI pozo no. 22.....	105
Figura 3.62. Especificaciones del medidor SDI pozo no. 22 .....	106
Figura 3.63. Dimensiones del medidor SDI en pozo no.22.....	106
Figura 3.64. Elementos medidor SDI pozo no. 22 .....	107
Figura 3.65. Display digital medidor SDI pozo no. 22.....	107
Figura 3.66. Sensor de flujo medidor SDI pozo no. 22 .....	108
Figura 3.67. Emisor del medidor SDI pozo no. 22 .....	108
Figura 3.68. Matriz de características de equipos SDI operados con baterías.....	109
Figura 3.69. Especificaciones para instalación del medidor SDI.....	110
Figura 3.70. Inspección de fases.....	111
Figura 3.71. Colocación gabinete .....	112
Figura 3.72. Colocación de centro alimentador USB.....	112
Figura 3.73. Colocación LoRa.....	113
Figura 3.74. Conexión arrancador-LoRa .....	113
Figura 3.75. Equipo en funcionamiento .....	114

Figura 3.76. Colocación de centro alimentador USB.....	115
Figura 3.77. Colocación LoRa y modem GSM.....	115
Figura 3.78. Colocación de antena.....	116
Figura 3.79. Equipo en funcionamiento.....	116
Figura 4.1. Comparación del volumen medido contra la estimación usando dispositivo LoRa en el IMTA.....	120
Figura 4.2. Comparación del volumen medido contra la estimación.....	122
Figura 4.3. En el acuífero de Cuauhtémoc, los principales cultivos son manzano y maíz amarillo.....	125
Figura 4.4. En esta figura se presenta el mapa y listado con los acuíferos sobreexplotados en el estado de Chihuahua. Fuente CONAGUA.....	125
Figura 4.5. Los cultivos perennes como la alfalfa y el nogal considerados como de alta demanda, son regados con agua subterránea de pozos agrícolas como en Delicias, Chihuahua y otras regiones semidesérticas como Jiménez y Camargo.....	126
Figura 4.6. Evolución de la sobreexplotación de los acuíferos del estado de Chihuahua reportados hasta el año 2015. Desde 1985 (30 años).....	127
Figura 4.7. Pozo agrícola oficial dentro del Módulo de Riego Número Cuatro del DR 005, Delicias, Chihuahua regando alfalfa y nogal.....	128

## TABLAS

---

Tabla 1.1 Información base para el sistema SIEVA.....	18
Tabla 3.1. Características de las redes 4G/LTE (Bliznakoff, 2014).....	43
Tabla 3.2. Características de las redes 3G (Bliznakoff, 2014).....	44
Tabla 3.3. Características de las redes LPWA (González García, 2017).....	45
Tabla 3.4. Comparativa de las redes LoRa y Sigfox (González García, 2017).....	46
Tabla 3.5. Características de la tecnología Weighless.....	47
Tabla 3.6. Características de la tecnología WiMAX.....	48
Tabla 3.7. Características de la tecnología Dash7.....	48
Tabla 3.8. Características de la tecnología WiFi.....	49
Tabla 3.9. Características de la tecnología ZigBee.....	50
Tabla 3.10. Características de la tecnología Ethernet.....	50
Tabla 3.11. Características de la tecnología Bluetooth.....	51
Tabla 3.12. Características de la tecnología Bluetooth LE.....	51
Tabla 3.13. Características de la tecnología RFID.....	52
Tabla 3.14. Comparativo de placas Arduino.....	52
Tabla 3.15. Comparativo de dispositivos para la implementación de IoT.....	64
Tabla 3.16. Promedio de pozos localizados en cada rango de distancia en la muestra.....	68
Tabla 3.17. Codificación de mensajes en el equipo cliente.....	71
Tabla 3.19. Resumen de componentes del dispositivo Heltex LoRa Esp32 WiFi.....	74
Tabla 3.20. Localización espacial de los pozos y responsables.....	77
Tabla 4.1 Registros de mediciones de consumos volumétricos en el Pozo IMTA.....	119
Tabla 4.2 Determinación del error por medición en el Pozo IMTA.....	119
Tabla 4.3 Registros de mediciones de consumos volumétricos en el Pozo 1 Tepalcingo-Axochiapan.....	121
Tabla 4.4 Determinación del error por medición en el Pozo IMTA.....	122
Tabla 4.5 Componentes para la instalación de un equipo LoRa como cliente (precios de agosto 2019).....	123

Tabla 4.6 Componentes para habilitación de batería en la instalación de un equipo LoRa (precios de agosto 2019)..... 123

Tabla 4.7 Componentes adicionales para la instalación de un equipo LoRa como puerta de enlace (precios de agosto 2019) ..... 124

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Antecedentes

El Plan Nacional Hidráulico (PNH) 2014-2018 identificó una problemática actual en la administración del agua, la cual se concentró en tres aspectos principales: sobreexplotación, la sobre-concesión y contaminación de los recursos hídricos. El PNH indica también establecía que estos factores se convirtieron en una limitante para el aprovechamiento sustentable de los recursos hídricos, inhibiendo el desarrollo social, económico y ambiental en nuestro país.

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, (Gráfica 1) lo que ha ocasionado la sobreexplotación del recurso. Actualmente, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) clasifica como sobreexplotados a 105 de un total de 653 acuíferos (Figura 1.1), en los cuales se ha detectado que las extracciones superan al volumen de la recarga media anual. Esta problemática ha obligado a generar diversas medidas y políticas a nivel nacional para controlar y monitorear los acuíferos, como la realización de estudios sobre la capacidad de recarga de los acuíferos, los cuales son utilizados para establecer una disponibilidad media anual que se actualiza periódicamente (CONAGUA, 2015). Estas cantidades a su vez sirven como base para el otorgamiento (o limitación) de los permisos de explotación de agua subterránea, que quedan registrados en CONAGUA bajo la forma de “títulos de concesión”.

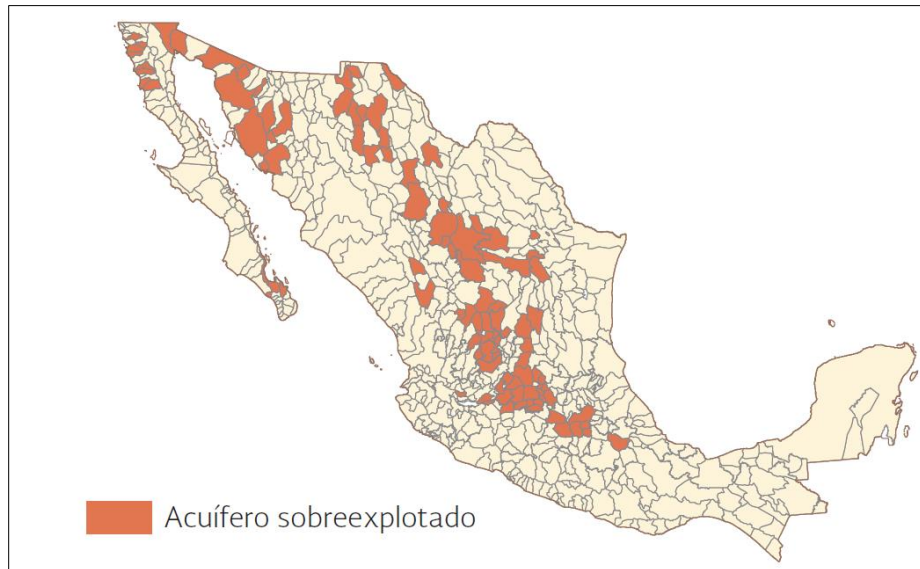


Figura 1.1 Acuíferos sobreexplotados

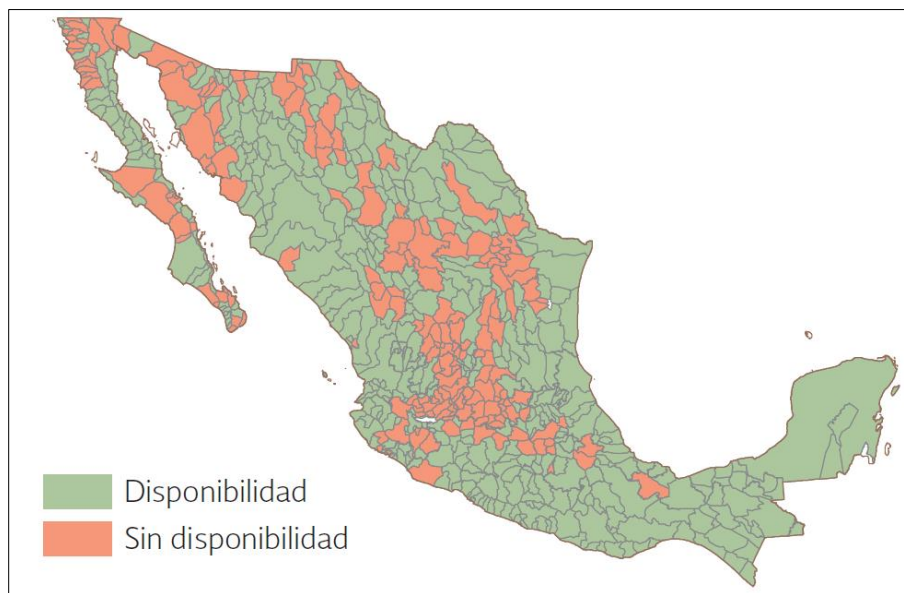


Figura 1.2. Disponibilidad de agua en acuíferos

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 que registra 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, Llano, & de Rosenzweig, 2017). Se observa, por lo tanto, que 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 sobre-concesión se encuentran estrechamente relacionadas con esta falta de medición. La situación es compleja, pues diversos factores interactúan en este problema. Por un lado, los propietarios de los títulos de concesión no están totalmente convencidos de que sus consumos daban ser registrados, por lo que no hay interés de su parte en la instalación y mantenimiento de los medidores volumétricos. Por otro, la cantidad de medidores y de personal de CONAGUA disponible para la captura de las lecturas resultan insuficientes. Estas condiciones llevan a afirmar a algunos autores que las extracciones subterráneas en México no son medidas, y en general se desconocen los verdaderos niveles de sobreexplotación a los que han llegado la mayoría de los acuíferos (Flores & Scott, 2000; Oswald, 2011).

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.

Es en este contexto donde el Internet de las Cosas puede ser una herramienta sumamente útil, pues es un concepto que reúne todas las características anteriormente expuestas. De acuerdo a (Atzori, Iera, & Morabito, 2010), 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, RFID, sensores / actuadores, dispositivos de comunicación máquina a máquina, etc.) y (iii) el conjunto de aplicaciones y servicios que aprovechan dichas tecnologías para abrir nuevos negocios y oportunidades de mercado. 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, Sicari, De Pellegrini, & Chlamtac, 2012).

La investigación propuesta es muy relevante. Internet de las cosas es un concepto que si bien no es completamente nuevo (ha estado presente desde finales de los 90’s), en los últimos años ha

tenido un crecimiento exponencial, tal y como lo muestra la Figura 1.3, donde Google lo reporta como uno de los tópicos con mayor crecimiento en el número de búsquedas desde el año 2004 (junto con otros tópicos relacionados). Diversos informes colocan a esta tecnología como uno de los tópicos computacionales que tendrán mayor aplicación en el futuro cercano. Por sus múltiples ventajas, IoT está ganando popularidad entre la academia, la industria y el gobierno (Khan, Khan, Zaheer, & Khan, 2012).

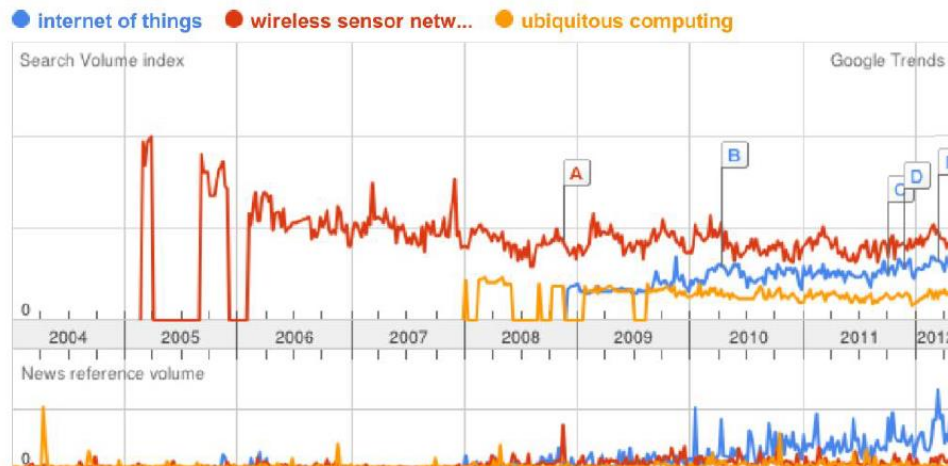


Figura 1.3. Tendencias de búsqueda de Google desde 2004: Internet de las cosas, redes de sensores inalámbricos, computación ubicua (Gubbi, Buyya, Marusic, & Palaniswami, 2013)

Internet de las cosas ya se está aplicando en varios sectores productivos a nivel mundial, y varios autores señalan su aplicabilidad en la agricultura (Gubbi et al., 2013; Khan et al., 2012). También se ha señalado su potencial para el monitoreo de la red de agua y el aseguramiento de la calidad del agua potable (Gubbi et al., 2013). Sin embargo, en México aún no se tienen aplicaciones prácticas de IoT para el monitoreo de las extracciones, por lo que el presente es un estudio pionero en dicha área.

Por lo anterior, el presente documento hace la propuesta de validar mediante un ejemplo de caso el uso de la tecnología IoT para automatizar las lecturas y estimaciones del volumen extraído desde los sistemas de bombeo de las unidades de riego que se abastecen de pozos profundos, esto con el fin de proponer dicha tecnología como una alternativa viable para la adquisición remota y masiva de la información de las extracciones. Se espera que la herramienta desarrollada 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.

Una vez validada y transferida la metodología, ésta puede beneficiar principalmente a los Comités Técnicos de Aguas Subterráneas (COTAS), que son órganos auxiliares del Consejo de Cuenca representantes de los usuarios de aguas nacionales subterráneas de un determinado acuífero. Dado que el objeto de los COTAS es la formulación, promoción y seguimiento de la ejecución de

programas y acciones que contribuyan a la preservación, estabilización o recuperación en la cantidad y calidad de las aguas subterráneas, es de esperar que dichos organismos promuevan el uso sustentable de agua obtenida desde los pozos profundos, manteniendo una supervisión constante de las extracciones.

Sin embargo, es necesario considerar que la metodología y tecnología desarrollada beneficiará directamente a los usuarios titulares de las concesiones, ya que podrán mantener un monitoreo constante de sus extracciones, y detectar cuando el monto de su concesión está por ser rebasado. Esta información es de utilidad incluso para detectar patrones de mal uso del agua, y en su caso, servir de argumento la búsqueda de apoyos para tecnificar su infraestructura hidroagrícola, o bien solicitar asesorías para la optimización de su patrón de cultivos.

Finalmente, debe considerarse que una herramienta como la propuesta facilitaría a la CONAGUA (particularmente a la Gerencia de Aguas Subterráneas) la realización de estudios estadísticos sobre volúmenes extraídos, abatimientos y para usos del agua en la agricultura y en usos como domésticos, industriales y otros.

## 1.2. Objetivos

El objetivo general del presente proyecto fue el siguiente:

“Desarrollar y validar una metodología para la adquisición remota de información de extracciones volumétricas subterráneas en unidades de riego utilizando tecnología de internet de las cosas en 4 pozos localizados en el estado de Morelos.”

Con los siguientes objetivos específicos:

- Determinar la tecnología IoT más adecuada para la adquisición remota masiva de datos de extracciones desde las unidades de riego.
- Seleccionar y programar un dispositivo IoT de bajo costo para monitorear el tiempo de funcionamiento de sistemas de bombeo y adquirir información de extracciones volumétricas.
- Diseñar una metodología que permita la adquisición remota masiva de datos desde las unidades de riego vía internet para su almacenamiento centralizado y consulta.
- Validar el funcionamiento de la metodología en un grupo pequeño de pozos para hacer el monitoreo remoto de sus extracciones.

### 1.3. Proyectos relacionados

#### El Sistema de Información de Extracciones Volumétricas en Acuíferos (SIEVA)

El Sistema de Información de Extracciones Volumétricas en Acuíferos (SIEVA), desarrollado por el IMTA durante el año 2015, integra las bases de datos de los volúmenes disponibles y concesionados de los acuíferos de todo el país, agrupando totales por organismo de cuenca, entidad federativa y municipio, mostrando la información en mapas georreferenciados. SIEVA permite acceder a la información de los volúmenes extraídos, concesionados y recargados de todos los acuíferos de país de manera flexible y organizada, clasificando los totales por grupos de interés. Entre sus funciones, el sistema incluye la posibilidad de realizar una estimación indirecta del volumen extraído usando el índice de consumo energético ( $\text{kWh/m}^3$ ) (CONUEE, 2011), lo cual permite detectar cuando un pozo se acerca o excede su volumen concesionado.

Las bases de datos que integra el SIEVA se muestran en la Tabla 1.31. La Figura 1.4 muestra la interfaz del SIEVA utilizada para la consulta de información.

Tabla 1.31 Información base para el sistema SIEVA

Dato	Origen
<b>Volúmenes disponibles en acuíferos</b>	CONAGUA-Gerencia de Aguas Subterráneas, Subgerencia de evaluación y ordenamiento de acuíferos (2007-2009), DOF 20-Abr-2015. Incluye la información de 653 acuíferos actualizada al año 2015.
<b>Localización de pozos</b>	REPDA actualizado al año 2005 (actualización al año actual en proceso). Información de 472,037 títulos de concesión.
<b>Índices energéticos</b>	Expedientes técnicos de unidades de riego modernizadas en el programa PMTEUR en Zacatecas, años 2013 y 2014. Aproximadamente 1000 registros.
<b>Documentos de disponibilidad</b>	CONAGUA-Gerencia de Aguas Subterráneas, Subgerencia de evaluación y ordenamiento de acuíferos (2008-2009). 653 Documentos.
<b>Mapas de acuíferos y organismos de cuenca</b>	Subgerencia de Información Geográfica del Agua (Siga.conagua.gob.mx, 2015). Aprovechamientos subterráneos por Estado. 656 archivos KML de acuíferos y 13 de Organismos de Cuenca.
<b>Límites Estatales y Municipales</b>	Información de INEGI. 2443 archivos KML para la capa de municipios y 32 para los estados.
<b>Mapas base</b>	Imágenes Google Maps (compañía DigitalGlobe). Resolución variable.

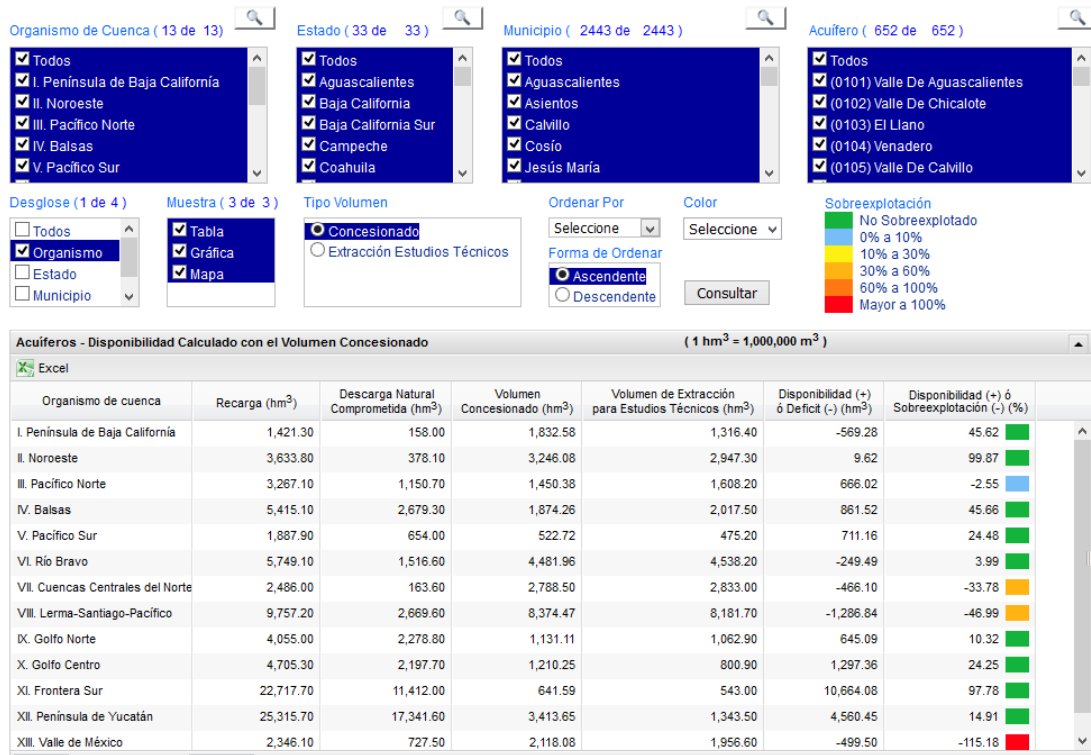


Figura 1.4 Consulta de disponibilidad de volumen a nivel organismo de cuenca en SIEVA.

Como se comentó anteriormente, SIEVA incorpora la estimación indirecta del volumen extraído a nivel de pozo usando el índice energético, con el fin de comparar las extracciones contra el volumen concesionado. Al respecto, diversos autores (López Geta, 1998; Campos, 2002; González et al., 2014) han señalado que el llamado índice de consumo energético puede utilizarse para la estimación de las extracciones. Este indicador representa el volumen de agua extraído por cada unidad de energía que consume la instalación (CONUEE, 2011). En el caso particular de volúmenes subterráneos, la instalación se refiere al sistema de bombeo de pozo profundo sumergible o de turbina de flecha, según sea el caso, cuyo costo energético depende de la profundidad del pozo y el gasto de extracción (Campos, 2002). La forma general del índice se muestra en la ecuación 1.

$$E = \frac{Q}{P_a} \quad ( 1 )$$

Donde:

Q es el caudal expresado en metros cúbicos por hora (m³/h).

P<sub>a</sub> es la potencia activa en kilovatios (kW).

Tanto Q como P<sub>a</sub> en (1) deben ser determinados por medio de una prueba de eficiencia electromecánica (Guillén et al., 2014), la cual se debe aplicar a los pozos involucrados.

## El proyecto SMART-IMTA

El proyecto Smart-IMTA surge de una iniciativa implementar un *smart-campus* mediante el desarrollo de una aplicación para dispositivo móvil, la cual, en su primera etapa, incorporó información asociada con la calidad y gasto del pozo IMTA, horarios de clase del posgrado, calendario de eventos en el auditorio y centro de capacitación, ahorro en energía eléctrica por medio de paneles solares, calidad de las aguas residuales, monitoreo y pronóstico meteorológico, flora y fauna, menú del comedor y horarios de servicio médico, entre otros aspectos.

El proyecto se llevó a cabo por la participación las diferentes áreas del Instituto e incluye información derivada de proyectos relevantes, tal como es el *IMTA Verde*. A la fecha, se tiene desarrollada la primera versión de la aplicación para las plataformas *Android* e *IOS* y se trabaja en una actualización para incorporar nuevas funcionalidades, como son las notificaciones.

### 1.4. Marco normativo

La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos establece en el artículo 27 que las aguas son propiedad de la Nación. Sin embargo, como cualquier otro recurso, el agua debe ser administrada, razón por la cual se creó la Ley de Aguas Nacionales (LAN), la cual regula el aprovechamiento de las aguas nacionales, su distribución y control, así como la preservación de su cantidad y calidad para lograr su desarrollo integral sustentable. La citada ley en su artículo 22 señala que para el otorgamiento de una concesión o asignación, debe tomarse en cuenta la disponibilidad media anual del agua del acuífero y que la misma deberá revisarse al menos cada tres años. El artículo 19bis señala que es la CONAGUA la institución con la atribución de realizar periódica y prioritariamente los estudios para ampliar el conocimiento de la ocurrencia del agua en el ciclo hidrológico. Para tal efecto, la CONAGUA emitió el 5 de diciembre del 2001 el “Acuerdo por el que se establece y da a conocer al público la denominación única de los acuíferos reconocidos en el territorio de los Estados Unidos Mexicanos” (DOF, Dic. 2001), lo cual permitió identificar y utilizar a los acuíferos en la emisión de títulos de concesión, asignación o permisos de explotación de agua. El método de estimación para la disponibilidad media anual, por otro lado, se estableció en la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000 (publicada el 17 de abril del 2002), con el fin de determinar la disponibilidad de las aguas nacionales superficiales y subterráneas, para su explotación, uso o aprovechamiento. En base a lo indicado en esta norma, la CONAGUA ha efectuado varios estudios para estimar y actualizar la disponibilidad en los acuíferos desde el año 2007, realizando La última actualización en abril de 2015 (DOF, 2015).

Por otro lado, la Ley Federal de Derechos 2014, en sus artículos 223 y 231 establece que el cobro por explotación, uso o aprovechamiento de aguas nacionales, en base a la zona de disponibilidad. Las zonas de disponibilidad son publicadas cada año, siendo la vigente este año la publicada el 2 de abril del 2015. La misma Ley establece en sus artículos 192-E y 230-A que la

CONAGUA cuenta con atribuciones en materia de administración, determinación, liquidación, cobro, recaudación y fiscalización en materia del derecho por el uso, explotación o aprovechamiento de aguas nacionales.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1. Diseño metodológico

La metodología de este proyecto fue organizada en 7 etapas:

1. Analizar el conjunto de tecnologías englobadas en el concepto internet de las cosas para determinar la más adecuada para la adquisición remota masiva de datos de sistemas de bombeo. Entre las tecnologías de dispositivos evaluados se consideran Cloudino (<http://cloudino.io/>), Arduino (<https://www.arduino.cc/>) y Raspberry Pi (<https://www.raspberrypi.org/>).
2. Programar un dispositivo IoT de bajo costo para monitorear el tiempo de funcionamiento de sistemas de bombeo y adquirir información de extracciones volumétricas.
3. Analizar y seleccionar los de equipos de bombeo para la instalación de los dispositivos IoT. Esto incluye el levantamiento de información en campo y en gabinete de los pozos a evaluar en el estado de Morelos. Realizar las primeras pruebas de recepción de datos.
4. Adaptar el Sistema de Información de Extracciones Volumétricas en Acuífero (SIEVA) para realizar la adquisición y consulta de datos de las extracciones desde los dispositivos IoT programados.
5. Programar e instalar los de dispositivos IoT en los pozos seleccionados. Realizar pruebas de recepción y transmisión de datos
6. Verificar en campo mediante visitas técnicas y supervisión el funcionamiento de los equipos IoT instalados. Validar la adquisición remota masiva de datos desde las unidades de riego y el seguimiento de sus extracciones vía internet.
7. Recopilar, verificar y analizar los datos obtenidos. Esto incluye reuniones de trabajo entre técnicos participantes para el análisis de resultados finales, validar el funcionamiento de la metodología propuesta y la generación del informe final.

En las siguientes secciones se describen de manera detallada como se llevan a cabo cada una de las etapas de la metodología.

### 2.2. Descripción de etapas e instrumentos utilizados

#### 2.2.1. Análisis de tecnologías IoT para la adquisición remota masiva de datos de sistemas de bombeo.

El internet de las cosas es resultado de una convergencia de diversas tecnologías. Sistemas micro-electromecánicos, comunicaciones inalámbricas y la electrónica digital han dado como resultado el desarrollo de dispositivos en miniatura que tienen 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, Su, Sankarasubramaniam, & Cayirci, 2002). Estas redes de sensores ubicuos se complementan con tecnologías de almacenamiento distribuido, como el cómputo en la nube (Cloud Computing) (Buyya et al., 2009), la cual proporciona servicios confiables de información entregados a través de centros de datos de próxima generación basados en tecnologías de almacenamiento virtual (Figura 1.4.1). A través de esquemas de direccionamiento únicos, los dispositivos en estas redes pueden interactuar entre sí y cooperar con sus vecinos para alcanzar objetivos comunes (Giusto, Iera, Morabito, & Atzori, 2010).

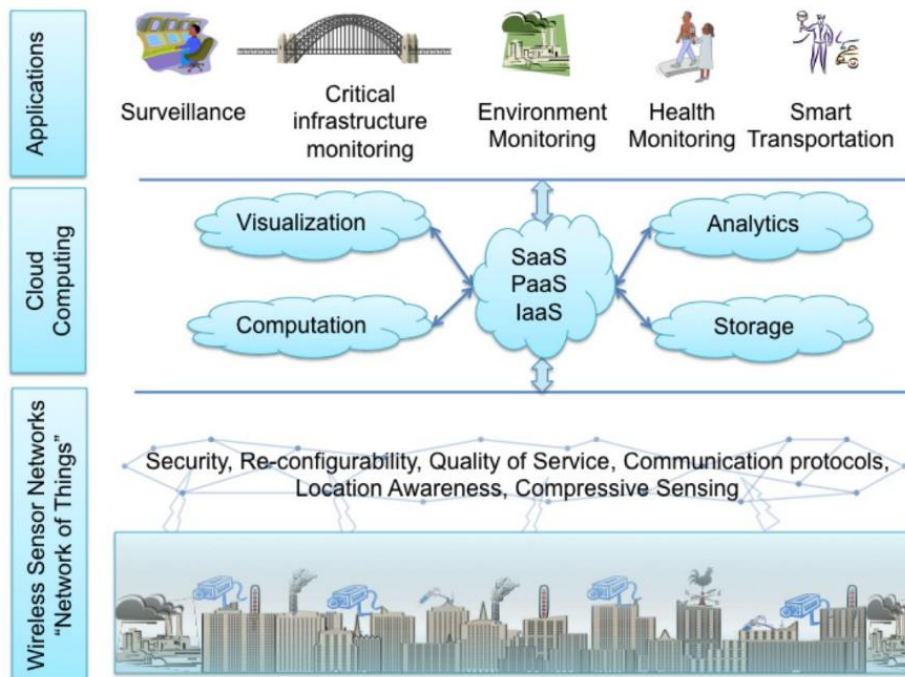


Figura 1.4.1 Marco conceptual de *IoT* con el cómputo en la nube al centro (Gubbi et al., 2013)

Dada la existencia de estas múltiples tecnologías, se hace necesario un análisis a fin de clasificar arquitecturas, tecnologías de comunicación y tipos de dispositivos para IoT, con el fin de seleccionar la configuración más adecuada para la adquisición remota masiva de datos de sistemas de bombeo. En este sentido, el presente trabajo realizó análisis de las arquitecturas IoT, así como también una investigación de las principales tecnologías disponibles para el desarrollo de aplicaciones IoT, incluyendo al menos las siguientes familias de dispositivos en la comparativa:

- a) Arduino (<https://www.arduino.cc/>)
- b) Familia Raspberry (<https://www.raspberrypi.org/>)
- c) Cloudino (<http://cloudino.io/>)

Por otro lado, también se hizo necesario considerar a las tecnologías de redes de comunicación, con el fin de seleccionar una configuración adecuada para el problema en cuestión a nivel de transmisión de datos. Entre las tecnologías de comunicaciones analizadas, se contemplaron las siguientes:

- a) GSM/GPRS
- b) LoRa
- c) WiFi
- d) NB IoT
- e) SigFox

Para realizar la comparación, se consideraron las características más importantes de cada arquitectura, familia de dispositivos y tecnología de comunicación, revisando su compatibilidad con las metas del proyecto. La salida de esta etapa es una descripción detallada del análisis y la comparativa que justifica la selección de la tecnología empleada para el desarrollo del dispositivo IoT, así como un análisis que justifica la selección de una configuración de redes de comunicaciones empleada para la transmisión de datos desde dispositivos IoT para el problema de adquisición de datos de sistemas de bombeo en unidades de riego.

### **2.2.2. Programación de dispositivo IoT para monitorear el tiempo de funcionamiento de sistemas de bombeo y adquirir información de extracciones volumétricas.**

Esta etapa se escribe el código del dispositivo IoT que permita el registro del tiempo de funcionamiento del sistema de bombeo y la adquisición del dato del gasto instantáneo en el medidor volumétrico. El programa también debe realizar la transmisión del dato a un servidor en la nube, para ambos datos.

Esta etapa implica la selección del lenguaje de programación acorde al dispositivo *IoT* seleccionado, la selección de un entorno de programación (IDE) y la escritura del código.

### **2.2.3. Selección de equipos de bombeo para la instalación de los dispositivos IoT.**

En esta etapa se realiza la selección de la zona de estudio y de los pozos que serán monitoreados en sus extracciones. La zona es seleccionada dada su representatividad como área de producción agrícola y su cercanía al IMTA. Una vez seleccionada la zona, se procede con un levantamiento de información preliminar de las unidades de riego candidatas para determinar características de operación del sistema de bombeo, parámetros eléctricos, parámetros hidráulicos, información del gasto y producción agrícola con el fin de evaluar su participación en el monitoreo de extracciones con tecnología IoT. Las unidades son seleccionadas en función de la profundidad del pozo, su nivel de equipamiento, y la disponibilidad del usuario responsable, quien debe dar acceso al personal técnico para realizar la adquisición de datos y la instalación de los dispositivos IoT en los pozos.

Posterior a la selección, se realizan visitas periódicas a las unidades de riego para obtener información de la operación del sistema de bombeo, la cual es desglosada por:

- Parámetros eléctricos
- Parámetros hidráulicos
- Gasto hidráulico
- Producción agrícola
- Evidencia fotográfica

La captura de información es realizada en los formatos de captura que se muestran en las figuras 2.2 a 2.5.


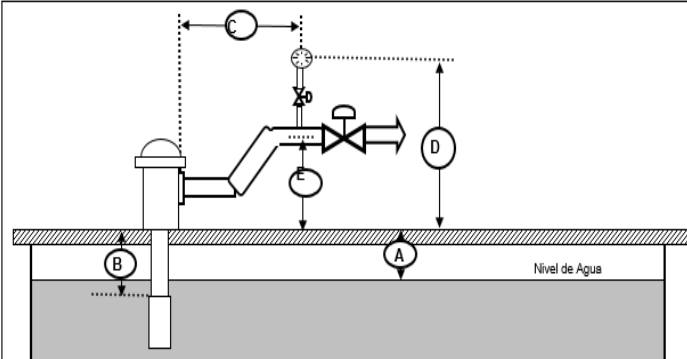
 <b>Internet de las cosas (IoT) aplicada a la medición de las extracciones subterráneas</b> FORMATO DE REGISTRO UNIDADES DE RIEGO (FRU)	
<b>IDENTIFICACIÓN</b>	
Fecha (dd/mm/aaaa):	Folio:
Unidad de Riego:	Municipio:
Título de concesión: Anexo:	Acuífero:
Volumen concesionado (Mm3):	Latitud (grados):
Titular:	Longitud (grados):
Domicilio:	
Telefono:	
<b>TRANSFORMADOR</b>	
Marca:	Capacidad (KVA): Tensión (V):
<b>MOTOR</b>	
Marca:	Potencia (HP):
<b>BOMBA</b>	
Marca:	Tipo:
<b>MEDIDOR VOLUMÉTRICO</b>	
Marca:	Tipo: Volumen acumulado (Miles de m3):
Número de serie:	
<b>ARRANCADOR</b>	
Marca:	Capacidad (Amp):
<b>SUMINISTRO ELÉCTRICO</b>	
Para llenar esta sección, se requiere que el usuario proporcione una copia de su recibo CFE, EL CUAL DEBERÁ SER ENTREGADO CON ESTE FORMATO	
No. de registro público de usuario (RPU):	Amperaje de operación promedio (A):
Número de medidor CFE:	Voltaje de operación promedio (V):
Demanda contratada (kW):	Factor de potencia promedio (adim):
Tarifa contratada (clave):	Potencia calculada (KW): 0.00
Costo de tarifa contratada (\$/kWh):	Potencia medida (KW):
Consumo promedio mensual de energía eléctrica (\$): 0.00	
Consumo promedio mensual de energía eléctrica (kWh):	
<b>MEDICIONES DE PARÁMETROS HIDRÁULICOS</b>	
Nivel Estático(A):	Longitud de tubería en succión (B):
Longitud tubería en descarga (C):	Altura manómetro de descarga (D):
Altura tubería en descarga (E):	
	
Succión:	
Diámetro (m):	
Material:	FoFo
Descarga:	
Diámetro (m):	
Material:	FoFo
Profundidad del pozo (m):	
Carga adicional:	N/A

Figura 1.4.2 Formato de captura para caracterización de unidades de riego (primera parte)

**ANEXO FOTOGRÁFICO**  
*Nota importante: Se han dejado fotografías de ejemplo, cambiar por las verdaderas.*



(1) Usuario



(2) Transformador



(3) Medidor eléctrico



(4) Arrancador



(4bis) Esquema arrancador




(5) Medidor volumétrico



(6) Vista general

PROPORCIONA LA INFORMACIÓN	RESPONSABLE DE CAPTURA Y REVISIÓN
USUARIO	

Figura 1.4.3 Formato de captura para caracterización de unidades de riego (segunda parte)



**FORMATO DE REGISTRO DE VISITAS AL POZO (FRVP)**

Título de concesión:

---

**INFORMACIÓN PERIÓDICA**

Número de VISITA	Fecha	Presión indicada en medidor (kg/cm <sup>2</sup> )	Nivel dinámico (m)	Consumo (kWh)
1				
2				
3				
4				
5				

---

**CUANTIFICACIÓN DEL GASTO**

Nota importante: El método volumétrico y de escuadra aplican solo si hay descarga libre.

Número de VISITA	Volumen acumulado en el medidor instalado			Anotar según el método empleado para medir el volumen						
	Hora	Gasto (l/s)	Volumen acumulado (m <sup>3</sup> )	Método volumétrico		Método ultrasónico		Método escuadra		
				Hora	Gasto (l/s)	Hora	Gasto (l/s)	Hora	Gasto (l/s)	
1										
2										
3										
4										
5										

---

**CONSUMO ENERGÉTICO MENSUAL**

Consumos en los últimos 12 meses (acorde al recibo CFE)

Recibo CFE		
Año	Mes	Consumo mensual (kWh)
2018	Junio	
	Julio	
	Agosto	
	Septiembre	
	Octubre	
	Noviembre	
2019	Diciembre	
	Enero	
	Febrero	
	Marzo	
	Abril	
	Mayo	
	Junio	
	Julio	
	Agosto	
	Septiembre	
	Octubre	
	Noviembre	
Diciembre		

En caso de cobro bimestral, registrarlo en el segundo mes del bimestre.

Figura 1.4.4 Formato de registro de visitas al pozo (FRVP)

**Internet de las cosas (IoT) aplicada a la medición de las extracciones subterráneas**  
**FORMATO DE REGISTRO PRODUCCIÓN AGRÍCOLA (FR-PA)**

**DESGLOSE DE PRODUCCIÓN AGRÍCOLA**

**Ciclo: Primavera-Verano (Pasado, 2018-2019)**

Cultivo	Superficie (ha)	Lámina de riego (cm)	Rendimiento (ton/ha)	Producción (ton)	Volumen (m3)	Precio medio rural (\$/ton)	Costo de producción (\$/ha)
1				0.00	0.00		
2				0.00	0.00		
3				0.00	0.00		
4				0.00	0.00		
5				0.00	0.00		
6				0.00	0.00		
7				0.00	0.00		
8				0.00	0.00		
9				0.00	0.00		
10				0.00	0.00		
<b>Total</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>		<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>#¡DIV/0!</b>	<b>#¡DIV/0!</b>

**Ciclo: Otoño-Invierno (Actual, 2019-2020)**

Cultivo	Superficie (ha)	Lámina de riego (cm)	Rendimiento (ton/ha)	Producción (ton)	Volumen (m3)	Precio medio rural (\$/ton)	Costo de producción (\$/ha)
1				0.00	0.00		
2				0.00	0.00		
3				0.00	0.00		
4				0.00	0.00		
5				0.00	0.00		
6				0.00	0.00		
7				0.00	0.00		
8				0.00	0.00		
9				0.00	0.00		
10				0.00	0.00		
<b>Total</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>		<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>#¡DIV/0!</b>	<b>#¡DIV/0!</b>

**Ciclo: Perennes (Actual, 2018-2019)**

Cultivo	Superficie (ha)	Lámina de riego (cm)	Rendimiento (ton/ha)	Producción (ton)	Volumen (m3)	Precio medio rural (\$/ton)	Costo de producción (\$/ha)
1				0.00	0.00		
2				0.00	0.00		
3				0.00	0.00		
4				0.00	0.00		
5				0.00	0.00		
6				0.00	0.00		
7				0.00	0.00		
8				0.00	0.00		
9				0.00	0.00		
10				0.00	0.00		
<b>Total</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>		<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>#¡DIV/0!</b>	<b>#¡DIV/0!</b>

Figura 1.4.5 Formato de registro producción agrícola (FR-PA)

Es necesario señalar, que uno de los pozos contemplados de antemano a monitorear en el presente proyecto es el pozo del IMTA, al cual se le hace medición de tiempo de funcionamiento y extracciones, pero no de seguimiento a la producción agrícola.

La información obtenida en esta etapa de las unidades de riego permite:

- a) Determinar las características de operación del sistema de bombeo.
- b) Registrar la superficie y la evolución de la producción a la cual le da servicio el pozo.

- c) Determinar el volumen extraído en un periodo de tiempo.

#### **2.2.4. Adaptar el Sistema de Información de Extracciones Volumétricas en Acuíferos (SIEVA) para realizar la adquisición y consulta de datos de las extracciones**

La información obtenida desde las unidades de riego por los dispositivos IoT debe ser presentada al usuario, por lo que se requiere una interfaz que muestre los datos de una manera útil e intuitiva. Para tal fin, en el presente proyecto se utiliza el Sistema de Información de Extracciones Volumétricas en Acuíferos (SIEVA) (ver sección 1.3, proyectos relacionados), por lo dicho sistema debe ser actualizado. Esto implica modificar el código fuente de la siguiente manera:

- a) Incorporar un apartado de comunicación para el enlace de la aplicación con el servicio en la nube que recibe la información de los dispositivos IoT instalados en campo.
- b) Incorporar un apartado de consulta que permite al usuario acceder a la información que el sistema está adquiriendo desde el servicio en la nube, que debe traducirse en tiempos de funcionamiento de los sistemas de bombeo y extracciones de las unidades de riego seleccionadas. Esta pantalla será la misma que el sistema ya incorpora para mostrar las extracciones usando el índice energético (ver SIEVA, informe final de proyecto interno año 2016).

Los cambios mencionados también requieren modificaciones a la base de datos, pues ahora se deben de incorporar nuevas tablas para almacenar la configuración de acceso al servicio en la nube lleva al registro de información de los dispositivos IoT y las tablas para almacenar los datos obtenidos del tiempo de funcionamiento del pozo, gasto instantáneo y volumen extraído en los pozos monitoreados.

El sistema SIEVA está desarrollado en PHP y trabaja con una base de datos MySQL. La aplicación está almacenada en un servidor del IMTA con sistema operativo Linux CentOS y se accede a través de la dirección <http://sieva.imta.mx>.

#### **2.2.5. Programar e instalar los de dispositivos IoT en los pozos seleccionados**

Los dispositivos IoT deben ser programados, esto implica descargar el código desarrollado en la etapa 2 de la metodología. Cada dispositivo debe ser probado antes de su instalación en campo, por lo que se deben realizar pruebas de recepción y transmisión de datos. Una vez verificado, el equipo puede instalarse en el sistema de bombeo a monitorear.

Cada dispositivo debe protegerse, por lo que este paso también implica la instalación del equipo en su gabinete, y la preparación del material requerido para su instalación en campo. Este material implica, por ejemplo, el cableado, batería, tarjetas de memoria y de comunicación necesarios para su correcto funcionamiento.

Una vez verificados, los dispositivos son instalados en cada uno de los equipos de bombeo seleccionados.

### **2.2.6. Verificación en campo del funcionamiento de los equipos IoT instalados**

Los dispositivos IoT instalados en los pozos son monitoreados principalmente con consultas diarias a la información obtenida, lo que permite detectar algún problema con su funcionamiento en el sitio remoto donde se encuentra instalados. Sin embargo, su estado también se verifica mediante las visitas técnicas que forman parte del seguimiento requerido para complementar los formatos descritos en el paso 4 de la metodología. Se planean tres visitas a cada pozo seleccionado, a lo largo de la ejecución del proyecto después de la visita de inspección inicial.

### **2.2.7. Recopilación, verificación y análisis de los datos obtenidos**

En esta etapa se realizan reuniones de trabajo entre técnicos participantes para el análisis de resultados finales. Se valida el funcionamiento de la metodología propuesta, se recopilan los datos generados, se contrastan los resultados y se termina la escritura del informe.

## 3. DESARROLLO

### 3.1. Análisis de la tecnología IoT para la adquisición remota masiva de datos de sistemas de bombeo.

Para utilizar tecnología IoT se debe comprender primero la forma en como los elementos tecnológicos involucrados se organizan para proporcionar alguna aplicación. Por tal razón, en esta sección se describen primero estos elementos, secciones 3.1.1 y 3.1.2. No obstante, una implementación práctica requerida para resolver un problema con tecnología *IoT* requiere de la definición específica de los elementos tecnológicos involucrados. De esta forma, es necesario especificar:

- Un modelo de comunicación
- Una red de comunicaciones
- Una familia de dispositivos (hardware)
- Una plataforma de software

Estos elementos son descritos de manera genérica de la sección 3.1.3 a 3.1.6. La configuración específica de estos elementos seleccionada para el problema de medición de las extracciones en el presente proyecto se describe en la sección 3.1.7.

#### 3.1.1. La arquitectura de Internet de las Cosas

Hoy en día, Internet utiliza la pila de protocolos TCP/IP para comunicación entre *hosts* de red que se propuso hace ya varias décadas atrás. Sin embargo, *IoT* en el futuro tendrá que conectar a miles de millones de objetos que crearán un tráfico mucho mayor, demandando también más capacidad de almacenamiento de datos (Tan & Wang, 2010). Por lo tanto, una arquitectura robusta para *IoT* necesita abordar factores como escalabilidad, interoperabilidad, confiabilidad, *QoS*, etc. Así, una arquitectura de *IoT* consiste de las diferentes capas de tecnologías sobre las cuales *IoT* se soporta, indicando también cómo se relacionan las distintas tecnologías entre sí para lograr la escalabilidad, la modularidad y la configuración de las implementaciones de *IoT* en diferentes escenarios (Patel & Patel, 2016).

Como muchos otros conceptos IT, no existe un consenso único de la arquitectura, o modelo de referencia *IoT*. De esta forma, existen distintas propuestas, como arquitecturas centradas en los objetos (*things*) que *IoT* interconecta (Sánchez López, Ranasinghe, Harrison, & McFarlane, 2012), arquitecturas centradas en el medio de comunicación (*internet* y *cloud computing*) (Gubbi et al., 2013), arquitecturas con enfoque jerárquico (*Top-Down approach*) (Ganchev, Ji, & O'Droma, 2014) y arquitecturas multicapa (Desai, Parmar, & Chaudhary, 2012; Hakim, 2018; Khan et al., 2012; Patel & Patel, 2016). Siendo este último el más popular, en este trabajo se adopta este enfoque, señalando algunas variaciones dadas las fuentes consultas.

En general, la arquitectura IoT multicapa se divide en cinco capas, como se muestra en la Figura 3.1. Estas capas se describen brevemente a continuación, aclarando que han sido compiladas de distintas referencias, mismas que serán citadas en la descripción correspondiente:

1) **Capa de percepción:** también conocida como "capa de sensores" o "controladores" (Hakim, 2018; Khan et al., 2012) o capa de "dispositivo inteligente" (Patel & Patel, 2016). Se compone de los dispositivos equipados con sensores, que permiten la interconexión del mundo físico con el digital permitiendo el flujo de información en tiempo real para ser recolectada o procesada (Patel & 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 et al., 2012). Dependiendo del tipo de sensores, la información puede ser sobre localización, temperatura, orientación, movimiento, vibración, aceleración, humedad, cambios químicos en el aire, etc. 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, etc (Patel & 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*):** la capa de red también se puede llamar "Capa de transmisión". Esta capa 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 & 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.

Los sensores que utilizan una conectividad de baja potencia y baja velocidad de datos, generalmente forman redes comúnmente conocidas como redes de sensores inalámbricos (WSN). Las WSN están ganando popularidad ya que pueden alojar muchos más nodos de sensores al tiempo que conservan la vida útil adecuada de la batería cubriendo grandes áreas (Patel & Patel, 2016).

El medio de transmisión puede ser cableado o inalámbrico y la tecnología puede ser 3G, UMTS, Wifi, Bluetooth, infrarrojo, ZigBee, etc., dependiendo de los dispositivos sensores. Por lo tanto, la capa de red transfiere la información de la capa de percepción a la capa de middleware. La siguiente sección de este documento hace una comparativa entre las

distintas redes de comunicación para el problema de medición de extracciones de agua subterránea.

- 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 et al., 2012).

Una de las características importantes de la capa de servicios de administración son los motores de reglas de procesos y negocios. IoT reúne la conexión y la interacción de objetos y sistemas, proporcionando información en forma de eventos o datos contextuales, como la temperatura de las mercancías, la ubicación actual y los datos de tráfico (Patel & Patel, 2016).

En el área de análisis, se utilizan varias herramientas para extraer información relevante de una gran cantidad de datos sin procesar y para ser procesados a un ritmo mucho más rápido. La gestión de datos es la capacidad de gestionar el flujo de información de datos. Con la administración de datos en la capa de servicios de administración, se puede acceder, integrar y controlar la información. Las aplicaciones de capas superiores pueden protegerse de la necesidad de procesar datos innecesarios y reducir el riesgo de divulgación de la privacidad de la fuente de datos. Las técnicas de filtrado de datos, como la anonimización de datos, la integración de datos y la sincronización de datos, se utilizan para ocultar los detalles de la información y, al mismo tiempo, proporcionan solo información esencial que es utilizable para las aplicaciones relevantes. Con el uso de la abstracción de datos, se puede extraer información para proporcionar una visión empresarial común de los datos para obtener una mayor agilidad y reutilización en todos los dominios (Patel & Patel, 2016).

- 4) **Capa de la 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, la denominada capa empresarial (Khan et al., 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.

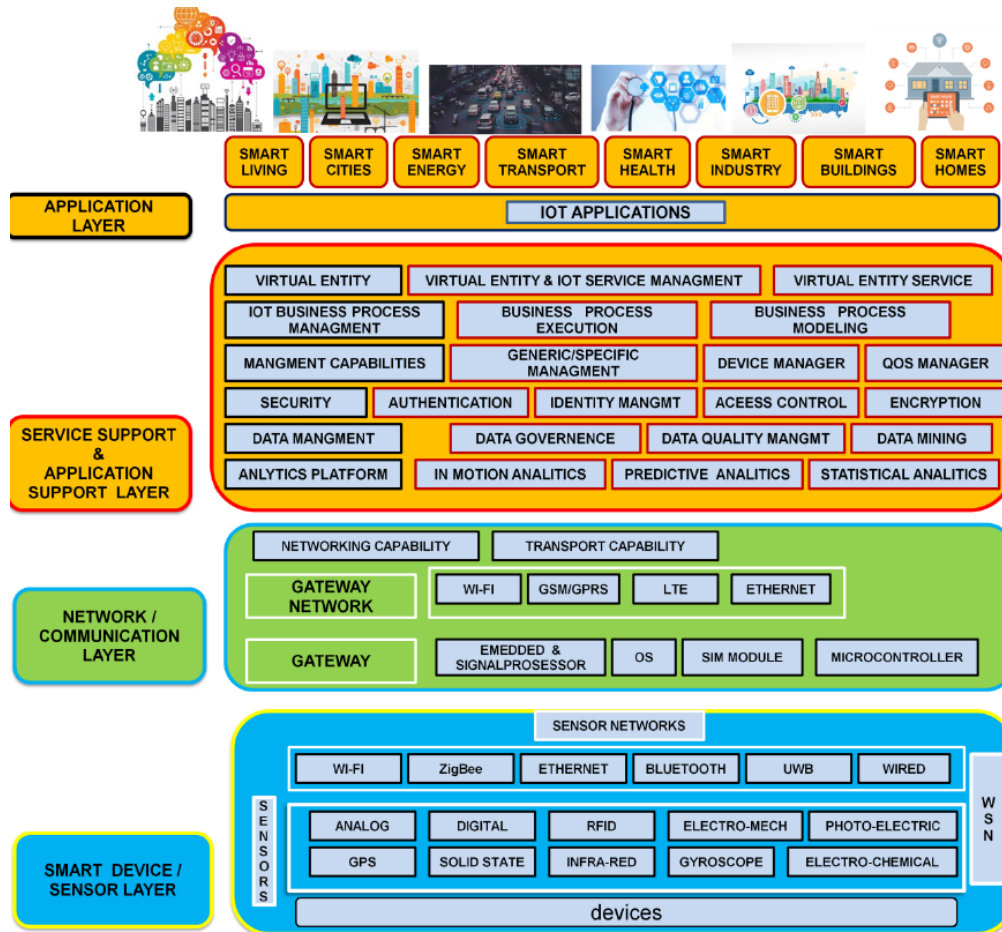


Figura 3.1 Arquitectura IoT (Patel & Patel, 2016)

### 3.1.2. Aplicaciones

Las aplicaciones potenciales de la *IoT* son numerosas y diversas, y se extienden en prácticamente todas las áreas de la vida cotidiana de las personas, empresas y la sociedad en general; IoT cubre entornos/espacios "inteligentes" en dominios tales como: transporte, construcción, ciudad, estilo de vida, venta minorista, agricultura, fábrica, cadena de suministro, emergencias, atención médica, interacción con el usuario, cultura y turismo (Patel & Patel, 2016). A continuación se describen varias áreas de aplicación para IoT, enfocándose en las áreas agrícolas y relacionadas con el agua.

- Ciudades inteligentes. Los sensores de IoT pueden monitorear vibraciones y cambios estructurales en materiales en edificios, puentes y monumentos históricos (Patel & Patel, 2016).
- Casas inteligentes. IoT puede ayudar en el diseño de hogares inteligentes, por ejemplo, la gestión del consumo de energía, la interacción con los electrodomésticos, la detección de emergencias, la seguridad en el hogar, entre otros (Khan et al., 2012).

- c) Aplicaciones médicas. IoT también puede encontrar aplicaciones en el sector médico para salvar vidas o mejorar la calidad de vida, por ejemplo, monitorear parámetros de salud, apoyo para soporte de vida, monitoreo de la ingesta de medicamentos, etc. (Khan et al., 2012).
- d) Educación: Vinculación de aulas virtuales y físicas para el aprendizaje, *elearning* más eficiente y accesible. Servicios de acceso a bibliotecas virtuales y portales educativos. Intercambio de informes y resultados en tiempo real. El aprendizaje permanente. Aprendizaje de idiomas extranjeros. Gestión de la asistencia (Salazar & Silvestre, 2014).
- e) Aplicaciones agrícolas: una red de sensores diferentes puede detectar necesidades hídricas en los cultivos, realizar el procesamiento de datos climáticos e informar al agricultor a través de la infraestructura de comunicación, por ejemplo, mensajes de texto a teléfonos móviles sobre la porción de tierra que necesita alguna atención particular. También se puede realizar el empaquetado inteligente de semillas, fertilizantes y mecanismos de control de plagas que responden a condiciones locales específicas. El sistema de agricultura inteligente ayudará a los agrónomos a comprender mejor los modelos de crecimiento de las plantas y a tener prácticas agrícolas eficientes al tener conocimiento de las condiciones de la tierra y la variabilidad climática. Esto aumentará significativamente la productividad agrícola al evitar las condiciones de cultivo inadecuadas (Khan et al., 2012).
- f) Monitoreo de la escasez de agua: el IoT puede ayudar a detectar la escasez de agua en diferentes lugares. Las redes de sensores, unidas a las actividades de simulación relevantes, no solo pueden monitorear las intervenciones a largo plazo en el agua, como la gestión del área de captación, sino que incluso pueden usarse para alertar a los usuarios de un arroyo, por ejemplo, si se produce un evento aguas arriba, como un accidente.

### 3.1.3. 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. En las siguientes secciones se presenta este marco y se explican las principales características de cada modelo. El material está principalmente basado en lo explicado por (Rose, Eldridge, & Lyman, 2015), con algunas referencias adicionales.

#### 3.1.3.1. Comunicaciones dispositivo a dispositivo

El modelo de comunicación dispositivo a dispositivo representa dos o más dispositivos que se conectan y se comunican directamente entre sí, y no a través de un servidor de aplicaciones intermediario (REF). Estos dispositivos se comunican sobre muchos tipos de redes, entre ellas las redes IP o la Internet. Sin embargo, para establecer comunicaciones directas de dispositivo a dispositivo, muchas veces se utilizan protocolos como Bluetooth, Z-Wave o ZigBee. Para comunicarse e intercambiar mensajes, estas redes permiten que los dispositivos se adhieren a un determinado protocolo de comunicación. Por lo general, este modelo de comunicación se utiliza en

aplicaciones como sistemas de automatización del hogar, que habitualmente utilizan pequeños paquetes de datos para la comunicación entre dispositivos, con requisitos relativamente bajos en términos de la tasa de transmisión. Los dispositivos para la IoT residenciales —bombillas de luz, interruptores, termostatos y cerraduras— normalmente se envían pequeñas cantidades de información (por ejemplo, un mensaje del estado de bloqueo de una puerta o un comando para encender una luz) en un escenario de automatización del hogar (Rose et al., 2015).



Figura 3.2 Modelo de comunicación “dispositivo a dispositivo” (Rose et al., 2015)

Muchas veces estos dispositivos se relacionan en forma directa, en general tienen [mecanismos de] seguridad y confianza integrados; además, utilizan modelos de datos específicos para cada dispositivo que requieren esfuerzos de desarrollo redundantes [por parte los fabricantes de dispositivos]”. Esto significa que los fabricantes deben invertir en desarrollar la forma de implementar formatos de datos específicos de diferentes dispositivos antes que métodos abiertos que permitan el uso de formatos de datos estándares (IETF Journal). Desde el punto de vista de los usuarios, esto significa que los protocolos de comunicación dispositivo a dispositivo subyacentes no son compatibles, lo que los obliga a seleccionar una familia de dispositivos que emplean un protocolo común. Por ejemplo, la familia de dispositivos que utilizan el protocolo Z-Wave no es compatible de forma nativa con la familia de dispositivos ZigBee. Si bien estas incompatibilidades limitan la capacidad de elección de los usuarios a los dispositivos de una determinada familia de protocolos, los usuarios también saben que los productos de una familia determinada tienden a comunicarse bien.

### 3.1.3.2. Comunicaciones dispositivo a la nube

En un modelo de comunicación de dispositivo a la nube, el dispositivo de la IoT se conecta directamente a un servicio en la nube, como por ejemplo un proveedor de servicios de aplicaciones para intercambiar datos y controlar el tráfico de mensajes. Este enfoque suele aprovechar los mecanismos de comunicación existentes (por ejemplo, las conexiones Wi-Fi o Ethernet cableadas tradicionales) para establecer una conexión entre el dispositivo y la red IP, que luego se conecta con el servicio en la nube. Esto se ilustra en la Figura 3.3.

Esta conexión a la nube permite que el usuario acceda a su dispositivo en forma remota, a través de un teléfono inteligente o una interfaz web, y también soporta las actualizaciones del software del dispositivo. En estos casos, el modelo *dispositivo a la nube* agrega valor para el usuario final, ya que amplía las capacidades del dispositivo más allá de sus características nativas.

No obstante, al intentar integrar dispositivos de diferentes fabricantes pueden surgir problemas de interoperabilidad. Muchas veces el dispositivo y el servicio en la nube son del mismo proveedor de tecnología. Si entre el dispositivo y el servicio en la nube se utilizan protocolos de datos propietarios, el dueño del dispositivo o el usuario podrían quedar atados a un servicio en la nube específico, lo que limitaría o impediría el uso de proveedores de servicios alternativos. Esto generalmente se conoce como “dependencia de un proveedor” (*vendor lock-in*), un término que abarca otras facetas de la relación con el proveedor, como por ejemplo la propiedad y el acceso a los datos. A la vez, los usuarios generalmente pueden confiar en que los dispositivos diseñados para su plataforma específica se podrán integrar.

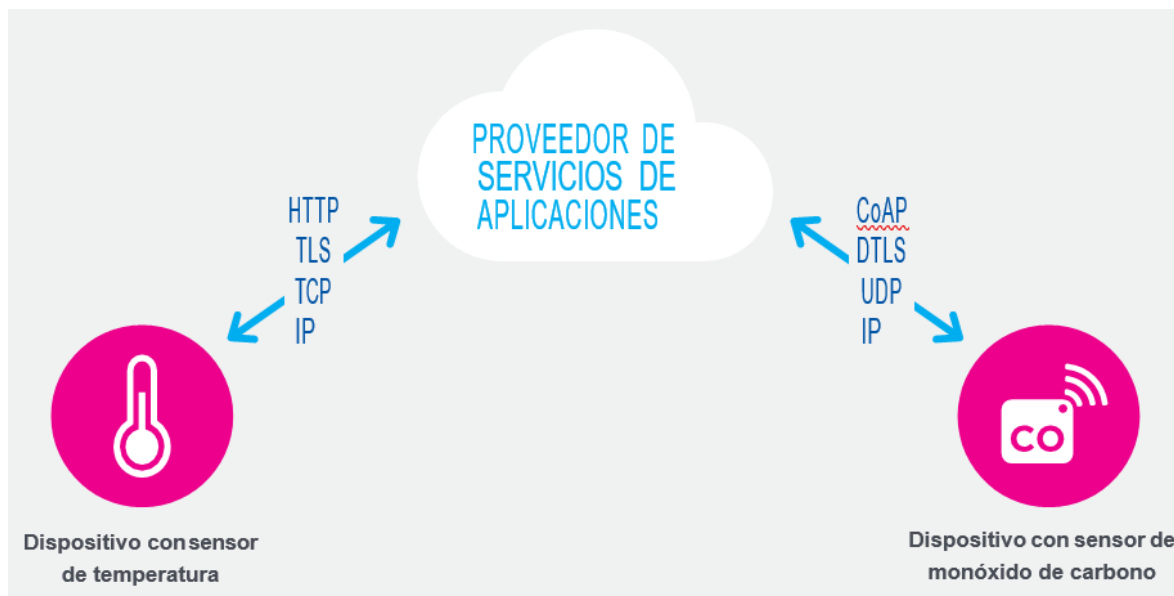


Figura 3.3 Modelo de conexión “dispositivo a la nube” (Rose et al., 2015)

### 3.1.3.3. Comunicaciones dispositivo a puerta de enlace

En el modelo dispositivo a puerta de enlace, o más generalmente el modelo dispositivo a puerta de enlace de capa de aplicación (*Application Layer Gateway, ALG*), el dispositivo de la IoT se conecta a través de un servicio *ALG* como una forma de llegar a un servicio en la nube. Dicho de otra manera, esto significa que hay un software de aplicación corriendo en un dispositivo de puerta de enlace local, que actúa como intermediario entre el dispositivo y el servicio en la nube y provee seguridad y otras funcionalidades tales como traducción de protocolos o datos. Este modelo se ilustra en la Figura 3.4.

En los dispositivos de consumo se utilizan diferentes formas de este modelo. En muchos casos, el dispositivo de puerta de enlace local es un teléfono inteligente con una aplicación para comunicarse con un dispositivo y transmitir datos a un servicio en la nube. Esto suele ser el modelo empleado con los artículos de consumo populares como los dispositivos utilizados para llevar registro de la actividad física. Estos dispositivos no tienen capacidad nativa para conectarse directamente a un servicio en la nube, por lo que muchas veces utilizan una aplicación para teléfono inteligente como puerta de enlace intermedia (Rose et al., 2015).

Otra forma de este modelo tipo dispositivo a puerta de enlace es la aparición de dispositivos “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 es un dispositivo de puerta de enlace independiente que tiene instalados transceptores Z-Wave y Zigbee 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.

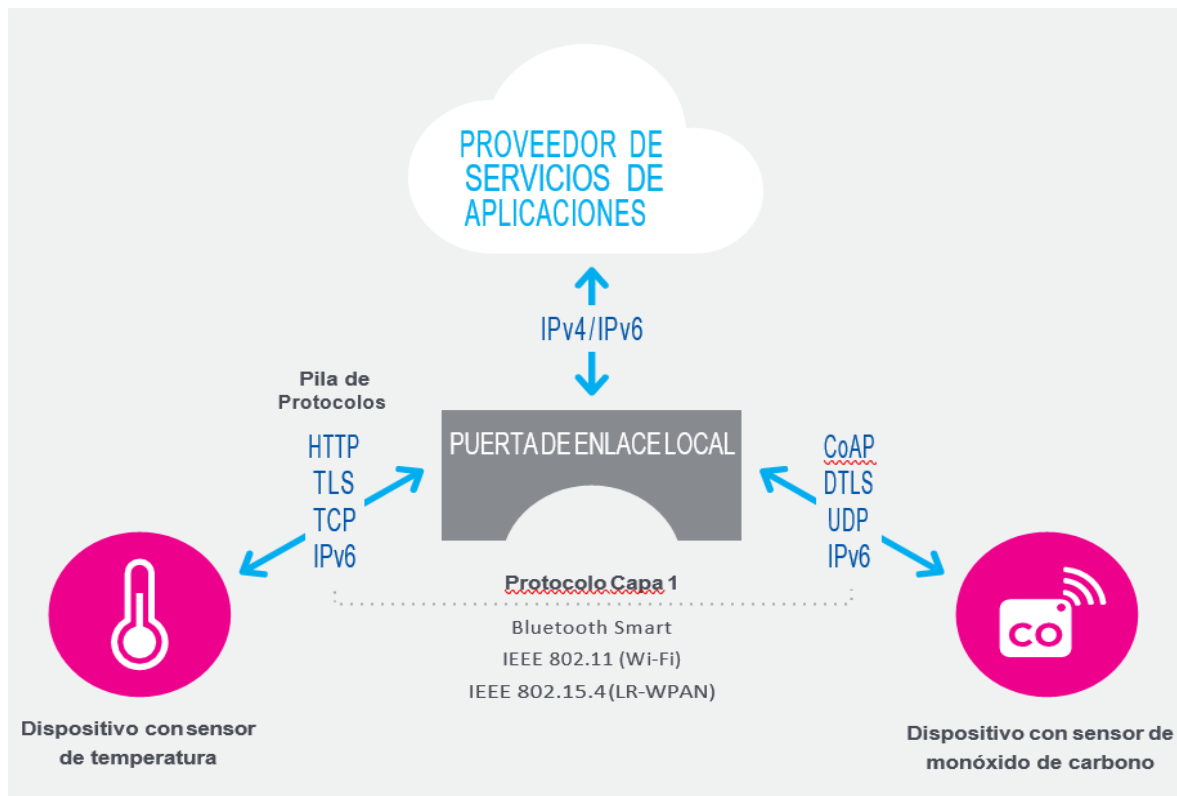


Figura 3.4 Modelo de conexión “dispositivo a puerta de enlace” (Rose et al., 2015)

Este modelo de comunicación se suele utilizar para integrar nuevos dispositivos inteligentes en un sistema heredado con dispositivos que no son interoperables de forma 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.

#### 3.1.3.4. Comunicaciones a través del procesamiento posterior (back-end)

El modelo de intercambio de datos a través del procesamiento posterior (*back-end*) se refiere a una arquitectura de comunicación que permite que los usuarios exporten y analicen datos de objetos inteligentes de un servicio en la nube en combinación con datos de otras fuentes. Esta arquitectura soporta “el deseo del usuario de permitir que terceros accedan a los datos subidos por sus sensores”. Este enfoque es una extensión del modelo de comunicación tipo ‘dispositivo único a la nube’, que puede llevar a la existencia de silos de datos donde “los dispositivos de la IoT suben datos a un único proveedor de servicios de aplicaciones’. Una arquitectura de intercambio de datos a través del back-end permite agregar y analizar los datos recogidos de flujos obtenidos de un solo dispositivo de la IoT.

Por ejemplo, a un usuario corporativo a cargo de un complejo de oficinas le interesaría consolidar y analizar los datos de consumo de energía y otros servicios que producen todos los sensores de la IoT y los correspondientes sistemas habilitados para Internet disponibles en las instalaciones. En el modelo ‘dispositivo único a la nube’, muchas veces los datos que produce cada sensor o sistema de la IoT queda en un silo de datos independiente. Una arquitectura eficaz de intercambio de datos a través del back-end permitiría que la empresa acceda y analice fácilmente, en la nube, los datos producidos por toda la gama de dispositivos instalados en el edificio. Además, este tipo de arquitectura facilita la portabilidad de los datos. Las arquitecturas eficaces de intercambio de datos a través del back-end permiten que los usuarios muevan sus datos al cambiar de servicio de IoT, rompiendo así las barreras tradicionales de los silos de datos.

El modelo de intercambio de datos a través del back-end sugiere que, para lograr la interoperabilidad de los datos de dispositivos inteligentes alojados en la nube, se requiere un enfoque de servicios federados o interfaces de programación de aplicaciones (APIs) en la nube. La Figura 3.5 muestra una representación de este diseño.

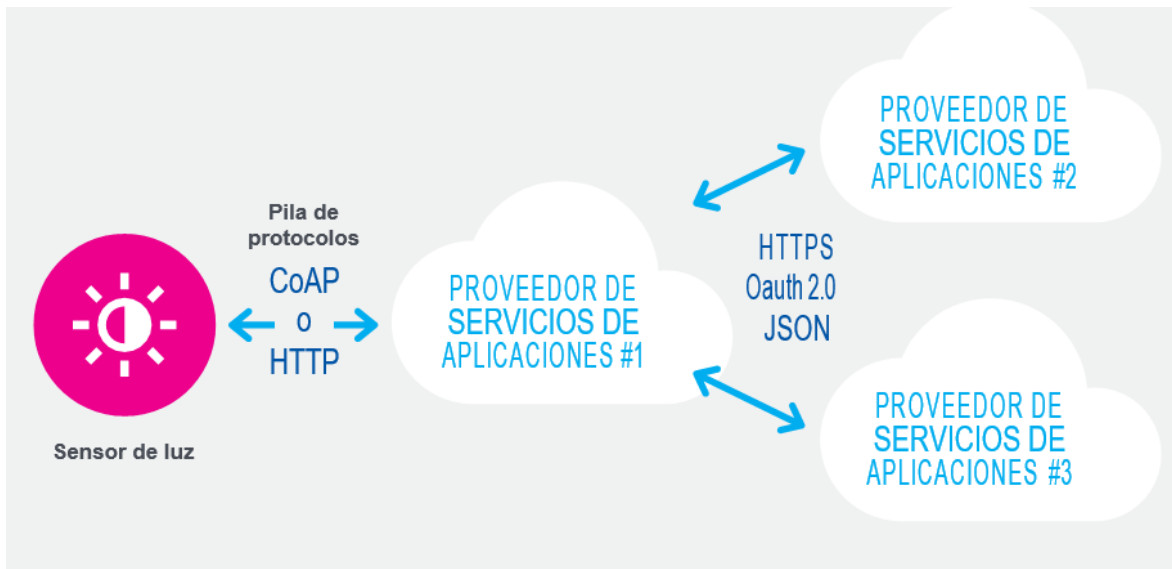


Figura 3.5 Modelo de intercambio de datos a través del procesamiento posterior (Rose et al., 2015)

### 3.1.4. Redes de comunicación

Las tecnologías de comunicación IoT se definen sobre múltiples estándares de comunicación y modelos, estando cada uno de ellos adaptado a una necesidad distinta. Partiendo de que las tecnologías existentes en el momento en el que comenzó el auge del *IoT* no eran las más óptimas para muchas de sus aplicaciones, el mercado ha debido ir adaptándose e innovando (Cendón, 2017), por lo que 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, TDMA, CDMA, xDSL, PPP, etc. 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.

- 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).
- 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). Si alcance va de 0 a 15 metros de alcance.

La Figura 3.6 muestra a los cuatro grupos de redes de comunicación, incluyendo varios ejemplos de las redes que las representan.

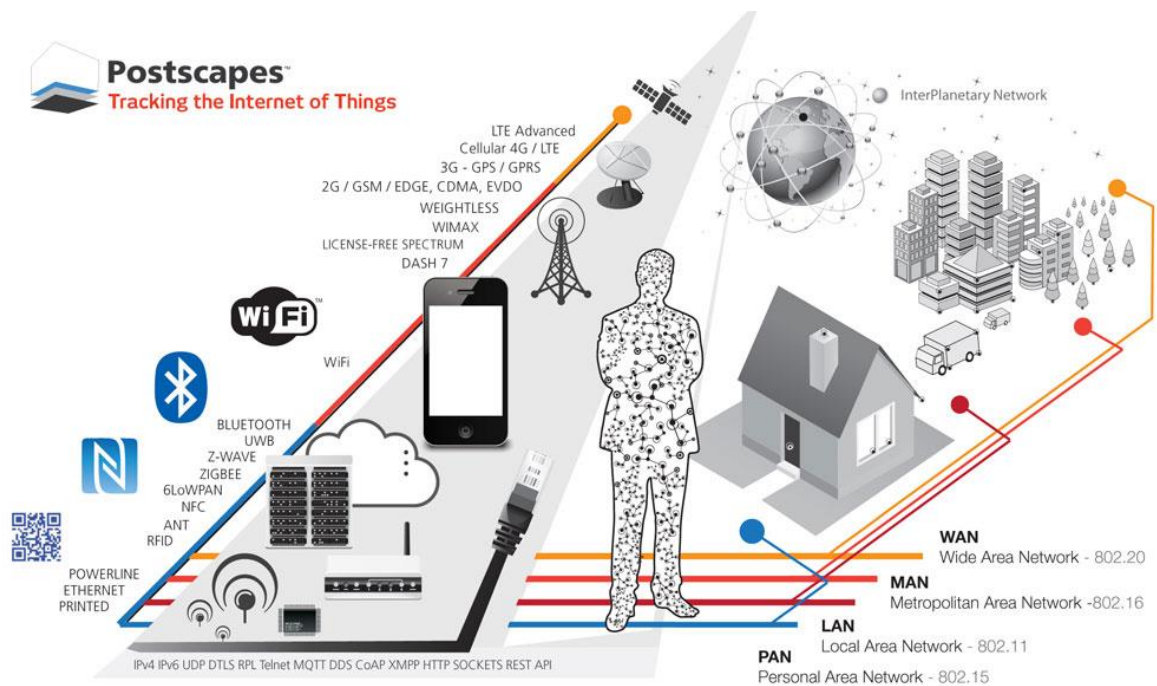


Figura 3.6 Tipos de redes de comunicación y representación de su alcance

A continuación se describen las tecnologías de comunicación más representativas de cada grupo.

### 3.1.4.1. Tecnologías WAN

#### 4G/LTE

4G LTE (Long Term Evolution) es un estándar de comunicaciones inalámbrico de alta velocidad de transmisión para dispositivos en uso desde el año 2008. Está basado en la tecnología de red GSM y HSPA, siendo esta la cuarta generación. La arquitectura principal es común a las anteriores versiones en cuanto a requerir una tarjeta SIM con un contrato y una torreta que dé cobertura al terminal, sin embargo la gran diferencia de LTE frente a sus predecesoras radica en que las antenas de comunicaciones de las torretas están basadas en redes IP tanto para datos como para voz, permitiendo simplificar los costes de operación y aumentar considerablemente el rendimiento (Bliznakoff, 2014). Esta modificación de arquitectura ha hecho que las antenas sean incompatibles con 3G y 2G, por lo tanto todos los dispositivos *IoT* que pretendan usar LTE deberán tener capacidad multibanda para poder ser utilizados en todo el mundo (Gessner, Roessler, & Kottkamp, 2008). Esta tecnología requiere (al igual que en todas aquellas que hagan uso de sistemas de telefonía) de un contrato con un operador para poder usar las torretas, por lo tanto, existen dos factores limitantes para el uso de esta tecnología de comunicación, el coste por uso y la necesidad de disponer de cobertura LTE en la localización de los dispositivos *IoT*. La Tabla 3.1 resumen las características de la red 4G/LTE.

Tabla 3.1. Características de las redes 4G/LTE (Bliznakoff, 2014)

Frecuencia	Alcance (distancia)	Velocidad de transferencia	Aplicaciones
<b>En Europa:</b> <b>bandas 800,900,</b> <b>1800 y 2600</b> <b>MHz.</b> <b>América: entre</b> <b>las bandas 700 y</b> <b>850; 1700 y</b> <b>2600</b>	Puede alcanzar los 50 Km dependiendo de la potencia de los equipos, las antenas y el nivel de obstrucción de la señal.	Dependiendo del número de canales usados la velocidad varía desde 10 Mbps hasta 303 Mbps	Telefonía, enlaces M2M, contadores inteligentes, control de activos

#### 3G

3G es un estándar de comunicaciones inalámbrico de tercera generación para dispositivos basado en la tecnología de red GSM y HSPA y ha sufrido varias revisiones que han visto aumentando sus prestaciones sensiblemente, fue lanzado de manera comercial en 1998 y sigue en funcionamiento (aunque con revisiones y mejoras). La arquitectura de funcionamiento es similar a la tecnología 4G sin embargo, esta red mantiene la voz mediante una red celular clásica y los datos los transmite mediante una red *Ip*, por lo tanto son necesarias dos frecuencias de funcionamiento (y dos antenas).

Tabla 3.2. Características de las redes 3G (Bliznakoff, 2014)

Frecuencia	Alcance (distancia)	Velocidad de transferencia	Aplicaciones
<b>Bandas más comunes: 850, 900 1900 y 2100</b>	Puede alcanzar los 50 Km dependiendo de la potencia de los equipos, las antenas y el nivel de obstrucción de la señal.	Las últimas revisiones (HSPA+) ofrecen hasta 28 Mbits/s de descarga y 22 Mbits de subida. Las primeras revisiones alcanzaban 200 Kbits de subida	Telefonía, enlaces M2M, contadores inteligentes, control de activos

### LPWA

LPWA es el acrónimo de *Low Power Wide Area*, que designa una tecnología de red caracterizada por (González García, 2017):

- Conectar dispositivos de bajo consumo, equipados con baterías con duración de varios años.
- Conectar dispositivos con bajos requerimientos de ancho de banda.
- Operar a grandes distancias.

Diseñadas para entornos dispositivo a dispositivo (*Machine-to-machine, M2M*), las LPWA permiten una gama más amplia de aplicaciones M2M y de IoT que las redes celulares. Las tasas de transferencia son muy bajas, por lo que el consumo de energía de los dispositivos conectados es también muy bajo. Permite la conexión de dispositivos que necesitan menor ancho de banda del que requieren dispositivos utilizados normalmente en el hogar, además estas redes pueden operar a menor coste, con mayor eficiencia energética y admitir un mayor número de dispositivos, de los que lo hacen las tecnologías móviles.

Los dispositivos capaces de conectarse a estas redes son de bajo coste y de muy bajo consumo, dejando la complejidad de las comunicaciones en las estaciones base, ya que actualmente estas no tienen limitación de consumo energético.

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. La Tabla 3.3 resume las características básicas de las redes LPWA.

Tabla 3.3. Características de las redes LPWA (González García, 2017)

Características de las redes LPWA		
Característica	Orden de magnitud	Valor
<b>Espectro</b>	No licenciado	<1GHz/2.4GHz
<b>Rango</b>	Largo	10-50+km(rural)/0-5km(urbano)
<b>Objetos</b>	Muchos	Muchos miles

Existen gran cantidad de protocolos LPWA, a continuación mostramos algunos y una breve descripción (González García, 2017):

**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 (Figura 3.7) 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.

**OnRamp:** RPMA (*Random Phase Multiple Access*) es una combinación de tecnologías diseñadas específica y exclusivamente para comunicaciones M2M. Es una solución propietaria que permite mayores tasas de rendimiento que LoRa o SigFox.

Siendo LoRa y Sigfox las tecnologías LPWAN más representativas, se muestran aquí una tabla comparativa de ambas tecnologías.

Tabla 3.4. Comparativa de las redes LoRa y Sigfox (González García, 2017)

Característica	LoRa	Sigfox
Banda de operación	SUB-GHZ ISM:EU (433MHz-868MHz), América (915MHz), Asia(430MHz)	SUB-GHZ ISM:EU (868MHz), América (902MHz)
Tasa de datos	0.3-37.5 kbps (LoRa), 50 kbps (FSK)	100 bps( EA), 600 bps(ED)
Alcance	5 km(URBANO), 15 km (RURAL)	10 km (URBANO), 50 km (RURAL)
Enlace simétrico	Si	No
MAC	ALOHA	ALOHA
Topología	Estrella de estrellas	Estrella
Enlace Ascendente	Datos	Datos
Enlace Descendente	Datos + ACK	ACK
Carga útil	19-250 bytes	12 bytes
Carga de protocolo	12 bytes	26 bytes
Potencia de TX	13dBm	14dBm
Consumo en TX	28mA	10mA
Consumo en RX	10,5mA	10mA
Modulación	CSS/FSK/OOK/GMSK	GFSK/BPSK
Sensibilidad (dBm)	-137	-129

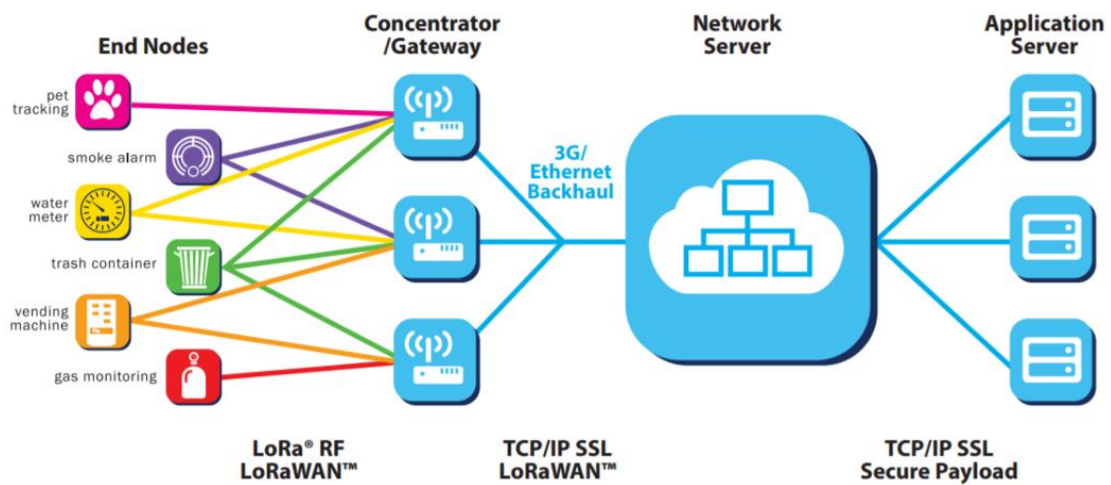


Figura 3.7 Arquitectura LoRaWAN (Panigrahi, 2017)

### 3.1.4.2. Tecnologías MAN

#### Weightless

Weightless es una tecnología de comunicación inalámbrica de última generación orientada a M2M y con tres premisas fundamentales, muy bajo coste, muy bajo consumo y buena propagación de onda para aumentar su rango de trabajo. Actualmente existen dos versiones de esta tecnología, Weightless-W diseñada para el uso de las frecuencias de ruido blando en la señal de televisión y la versión N (en diseño) que hace uso de la banda de frecuencia ISM. El gran atractivo de esta tecnología reside en que los dispositivos tienen un alcance de hasta 5 km, un coste muy bajo y además una duración estimada de batería de hasta 10 años.

*Tabla 3.5. Características de la tecnología Weightless*

Frecuencia	Alcance (distancia)	Velocidad de transferencia	Aplicaciones
Por debajo de 1 GHz para ambas versiones, siendo más baja la frecuencia de operación de ruido blanco (entre 400 y 800 MHz).	Hasta 5 Km	Desde 1 Mbps en Weightless-W hasta 100 kbps en Weightless-N	Dada su alta penetración en edificios, su bajo consumo y bajo coste es ideal para cualquier aplicación IoT en Smart city.

Nota: Weightless es considerada también tecnología LPWAN por algunos autores (Adelantado et al., 2017; González García, 2017).

#### WiMAX

WiMAX es una tecnología de comunicación inalámbrica basada en estándar IEEE 802.16 y está diseñado específicamente para enlaces sin línea de visión directa (NLoS) entre el subscritor y la estación base, por lo tanto la hace especialmente útil para entornos urbanos densamente poblados donde es utilizada para el despliegue de última milla de líneas de acceso a internet. Debido al alto coste de las estaciones y terminales este tipo de tecnología ve reducida su utilidad a aquellas aplicaciones de IoT en las que el número de dispositivos sea bajo y el coste no sea un factor determinante. Sin embargo, el uso del WiMAX si tiene especial interés actuando como nexo de unión entre redes (uniendo por ejemplo un nodo Zigbee con internet).

Tabla 3.6. Características de la tecnología WiMAX

Frecuencia	Alcance (distancia)	Velocidad de transferencia	Aplicaciones
De 2 a 11 GHz y de 10 a 66 GHz	Es posible alcanzar más de 50 Km sin embargo esto es a costa de reducir su velocidad de transferencia, siendo capaz de proveer una velocidad de 100 Mb/s a corto alcance (menos de 1 Km) y de tan solo 4 Mb/s.	Hasta 70 Mbps en condiciones ideales	Routers, acceso de internet de última milla, aplicaciones en zonas NLoS.

## Dash7

Dash7 es un estándar abierto de comunicación de baja potencia y rango medio diseñado en base al modelo *BLAST (Bursty Light data Asynchronous Stealth Transient)*, cuyas características hacen que las transmisiones sean caracterizadas por:

- Transmisión en ráfagas (*Bursty*):** La transmisión de datos es abrupta y no contiene audio ni video.
- Ligera (*Light*):** Los paquetes suelen estar limitados a 256 bits.
- Asincrónica (*Asynchronous*):** Por diseño la comunicación no requiere primer contacto ni sincronización de dispositivos.
- Sigiloso (*Stealth*):** Los nodos de conexión pueden escoger comunicarse solo con algunos dispositivos.
- Transicional (*Transitional*):** Al contrario que otras tecnologías Wireless, Dash7 está orientado a la subida de datos por lo que es más sencillo hacer que respondan a ciertos dispositivos.

Gracias a su diseño y a la duración de la batería (en algunos casos de años) esta tecnología está especialmente adaptada para ser utilizada en redes sensoriales, donde su rendimiento está demostrando que es muy superior al WiFi, ZigBee y tecnologías RFID activas por hacer que respondan a ciertos dispositivos (Bliznakoff, 2014).

Tabla 3.7. Características de la tecnología Dash7

Frecuencia	Alcance (distancia)	Velocidad de transferencia	Aplicaciones
Diseñado para operar en la banda inferior a 1 GHz por la resiliencia característica de ese espectro y la banda de los 433 MHz.	El rango puede variar entre varios metros y varios kilómetros siendo capaz de dar su posición en interiores con 1 metro de precisión.	167 kbit/s	Información de plazas libres en parkings, dispositivos que presentan información en base a la posición (útil para museos, por ejemplo), o la implementación de un sistema de monitorización de mercancías dentro de almacenes en minutos sin necesidad de cableados ni antenas

### 3.1.4.3. Tecnologías LAN/PAN

#### WiFi

Es posible considerar como WiFi a todos aquellos dispositivos inalámbricos que utilizan los estándares IEEE 802.11, o lo que es lo mismo, es una tecnología de intercambio de datos inalámbrica que sigue los estándares del IEEE. Si bien es cierto que inicialmente los protocolos basados en IEEE 802.15.4 han sido los dominantes poco a poco los desarrolladores están reduciendo el consumo de los dispositivos WiFi de manera que puedan competir con tecnologías como Zigbee o 6LoPAN.

Una de las grandes ventajas que dispone WiFi frente a sus competidores con menos consumo es que disponen de compatibilidad nativa para redes IP, lo cual es muy importante para las redes IoT. Otra de las grandes ventajas es lo ampliamente extendido que está esta tecnología en redes LAN lo cual permite disponer de herramientas más avanzadas y una integración mucho más sencilla. (Serbulent Tozlu, 2012)

En el lado negativo es fácil entrever que el ser compatible de manera nativa con IP tiene un efecto nocivo en cuanto a la duración de la batería, ya que al contrario que con otras tecnologías es necesario realizar conexiones periódicas (con el consiguiente *wake-up*).

Tabla 3.8. Características de la tecnología WiFi

Frecuencia	Alcance (distancia)	Velocidad de transferencia	Aplicaciones
Funciona en las bandas de 2.4 GHz y la de 5GHz.	Usando medios convencionales hasta 100 metros en espacio abierto, 20 en edificios	60 Mbps (2.4 Ghz) y 867 Mbps (5 Ghz)	Routers, Tablet, laptops.

#### ZigBee

Se trata de una especificación de alto nivel para redes tipo IEEE 802.15.4. Especifica todas las capas de protocolo capa de red (para enrutado), capa de aplicación, especificación de dispositivos (ZDO o ZigBee device objects) y objetos de aplicación, partiendo de las capas física y de acceso al medio (MAC) de IEEE 802.15.4. ZigBee ha sido diseñado para satisfacer la necesidad de crear redes de baja potencia que cubran grandes áreas. La gran mayoría de los dispositivos ZigBee están alimentados por baterías, por lo que el consumo de energía es un factor crítico. Los dispositivos ZigBee permiten la construcción de redes de nodos malladas.

La distancia entre dispositivos adyacentes puede llegar a 10 metros en aplicaciones de mínimo consumo de energía, opera en la banda de 2,4 GHz y en la de 915 MHz o la de 868 MHz, con una tasa de transferencia de 255 kbps en 2,4 GHz y a tasas menores y bandas inferiores al GHz. Permite el encriptado AES-128 y una gran variedad de métodos de distribución de claves. La redes ZigBee pueden estar compuestas por miles de nodos, los mensajes se pasan de un nodo a otro a través de

la red y no hay necesidad de que ningún nodo individual esté dentro del alcance de transmisión de todos los miembros de la red, pudiendo los nodos formar redes de con topología en estrella o mallada. Así la pérdida de un nodo no interrumpirá el funcionamiento de la red.

*Tabla 3.9. Características de la tecnología ZigBee*

Frecuencia	Alcance (distancia)	Velocidad de transferencia	Aplicaciones
<b>Dependiendo de la velocidad de transferencia, para la velocidad alta usa la banda de 2.4GHz mientras que para la velocidad baja usa la banda 868 MHz</b>	10 metros	250 Kbits/s en la banda de 2.4GHz 20 Kbits/s en la banda 868 MHz	Especializado en redes intra-edificaciones, por lo tanto en aplicaciones de domótica e industriales de corto alcance.

### Ethernet

Ethernet es una familia de tecnologías de red de transmisión por cable, ya sean de cobre, coaxial o fibra óptica. A día de hoy se considera la tecnología dominante en transmisión de datos a nivel mundial, aunque poco a poco comienza a desplazarla las tecnologías WiFi. Las principales ventajas son las altísimas velocidades de transmisión y largas distancias que es capaz de cubrir, todo ello siendo muy resistente a las interferencias (gracias al blindaje de los cableados o las propias características de la transmisión de ondas lumínicas). Sin embargo, los principales puntos débiles de esta tecnología tales como la falta de movilidad y dificultad de instalación (necesario tendido de cableado) hacen que su aplicación en IoT quede limitado a aquellas aplicaciones que requieran un muy alto ancho de banda o la seguridad que proporciona el cableado físico (Bliznakoff, 2014).

*Tabla 3.10. Características de la tecnología Ethernet*

Frecuencia	Alcance (distancia)	Velocidad de transferencia	Aplicaciones
<b>De 16 a 100 Mhz (depende de la categoría)</b>	Varía desde redes LAN de pocos metros hasta cientos de kilómetros mediante enlaces de fibra óptica (incluso miles mediante el uso de amplificadores)	10 Mbps y 100 Mbps (depende del cableado y la categoría)	Fundamentalmente como enlace entre nodos y con internet en localizaciones estáticas.

### Bluetooth

Bluetooth es una especificación de la industria para la conectividad basada en radio frecuencia (RF) de corto alcance para dispositivos personales portátiles, originalmente diseñado como una alternativa inalámbrica a la comunicación RS-232. Inicialmente, se diseñó para un corto alcance y tasas de transferencia medias (hasta 1Mbps) en la frecuencia de 2.4 GHz (González García, 2017) (Tabla 3.11).

Tabla 3.11. Características de la tecnología Bluetooth

Frecuencia	Alcance (distancia)	Velocidad de transferencia	Aplicaciones
2.4 GHz	1mW para 10 metros, 100mW para 100 metros	Canales máximos de voz: 3 por piconet Canales máximos de datos: 7 por piconet Velocidad de datos: 721 Kbps por Piconet	Fundamentalmente dejar de utilizar cables para conectar dispositivos entre sí, siendo una configuración más sencilla, transferencias de datos con mayor seguridad.

En 2011 aparece Bluetooth Low Energy (BLE o LE), que como indica su nombre reduce el consumo de energía. Con BLE, los dispositivos pueden utilizar baterías que pueden durar años, aspecto vital para aplicaciones que solo necesitan intercambiar pequeñas cantidades de datos periódicamente.

Al igual que Bluetooth, BLE opera en la banda libre de 2.4 GHz, pero a diferencia de este, permanece en espera hasta que se necesita transmitir datos. Este nuevo estándar denominado ha cambiado la situación hasta el punto que algunos especialistas consideran que la creación de IoT tiene mucho que ver con esta tecnología (Athrow, 2014).

Tabla 3.12. Características de la tecnología Bluetooth LE

Frecuencia	Alcance (distancia)	Velocidad de transferencia	Aplicaciones
2.4 GHz	1mW para 10 metros, 100mW para 100 metros	Canales máximos de voz: 3 por piconet Canales máximos de datos: 7 por piconet Velocidad de datos: 721 Kbps por Piconet	Fundamentalmente al ser de baja energía. Permite el conectar los equipos a menos que estos reciban/envíen los datos, de lo contrario solo estará en reposo.

## RFID

Los sistemas de identificación por radiofrecuencia o RFID (Radio Frequency Identification) son una tecnología para la identificación de objetos a distancia sin necesidad de contacto. Es necesario una etiqueta o tag RFID, esta consiste en un microchip que va adjunto a una antena de radio y que va a permitir la identificación unívoca del elemento portador de la etiqueta.

Tabla 3.13. Características de la tecnología RFID

Frecuencia	Alcance (distancia)	Velocidad de transferencia	Aplicaciones
120–150 kHz (LF), 13.56 MHz (HF), 433 MHz (UHF), 865-868 MHz (Europa) 902-928, 2450-5800 MHz ,3.1–10 GHz	10 cm hasta 200 m	LF (135 kHz) entre 200 bps y 1 kbps HF (13.56 MHz) 25 Kbps UHF (860-960 MHz) 38.4 Kbps	Inventario, control de acceso, peajes, identificación de objetos

### 3.1.5. Dispositivos (Hardware)

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

#### 3.1.5.1. Arduino

La placa de Arduino 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, además de un entorno de desarrollo propio, con el fin de facilitar el desarrollo de proyectos. Las entradas y salidas se localizan en una serie de pines hembra, los que permiten establecer conexiones entre el microcontrolador y los diferentes sensores y actuadores de una manera muy sencilla (principalmente con cables *dupont*).

Arduino es multiplataforma, admitiendo los sistemas operativos más populares, tales como Windows, Mac Os X y Linux. Otras características son su bajo costo y rapidez de implementación.

La Tabla 3.14 muestra un cuadro comparativo con las placas Arduino oficiales más populares del mercado:

Tabla 3.14. Comparativo de placas Arduino

Modelo	I/O digitales	Entradas analógicas	Salidas PWR	UART	Memoria	Precio
Uno r3	16	6	6	1	32 kb	20€
Mini 05	14	6	8	1	32 kb	17€
Leonardo	20	12	7	1	32 kb	23€
Mega r3	14	6	7	1	256 kb	18€
YUN	20	12	7	1	32 kb	70€

La placa YUN tiene una gran diferencia respecto a las demás placas en la Tabla 3.14 ya que esta placa trae integrada conexión Wifi y Ethernet, por lo que no es necesario adquirir módulos adicionales para incorporar esta funcionalidad. Otra de las características de esta tarjeta es que cuenta con un puerto micro USB para su programación, un host USB, un microcontrolador

ATmega32U4 de 8 bits a 16MHz, y un procesador Atheros AR9331 corriendo a 400 MHz y 64MB de RAM, lo que le permite utilizar Linux, en una versión especial llamada Linino. Tiene un zócalo para una tarjeta micro SD, la cual está conectada físicamente al procesador Atheros y no al ATmega, sin embargo es posible que el microcontrolador tenga acceso a este recurso a través de la librería *Bridge*. La Figura 3.8

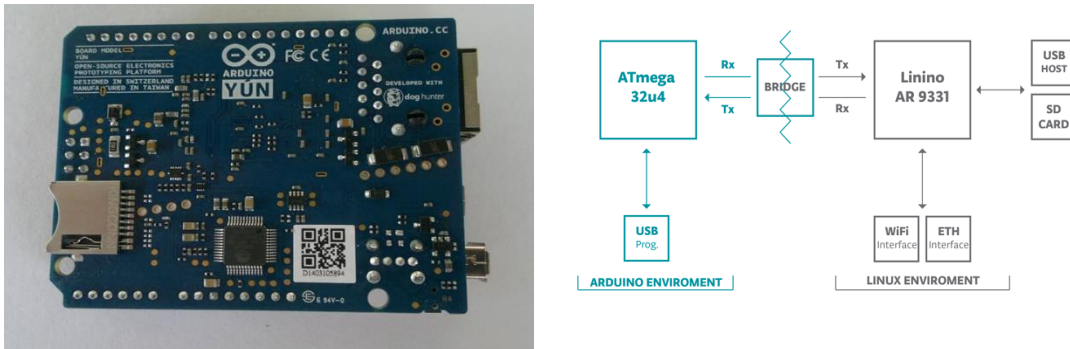


Figura 3.8 a) Zócalo YUN microSD (izquierda) b) Esquema Microcontrolador – Procesador (derecha)

La siguiente Figura 3.9 muestra la distribución de los pines y puertos con los que cuenta la tarjeta, de los cuales son dos puertos I2C, un puerto RS-232, un puerto SPI el cual ya está ocupado con la conexión del zócalo para la tarjeta microSD, 6 entradas analógicas y 12 entradas o salidas digitales.

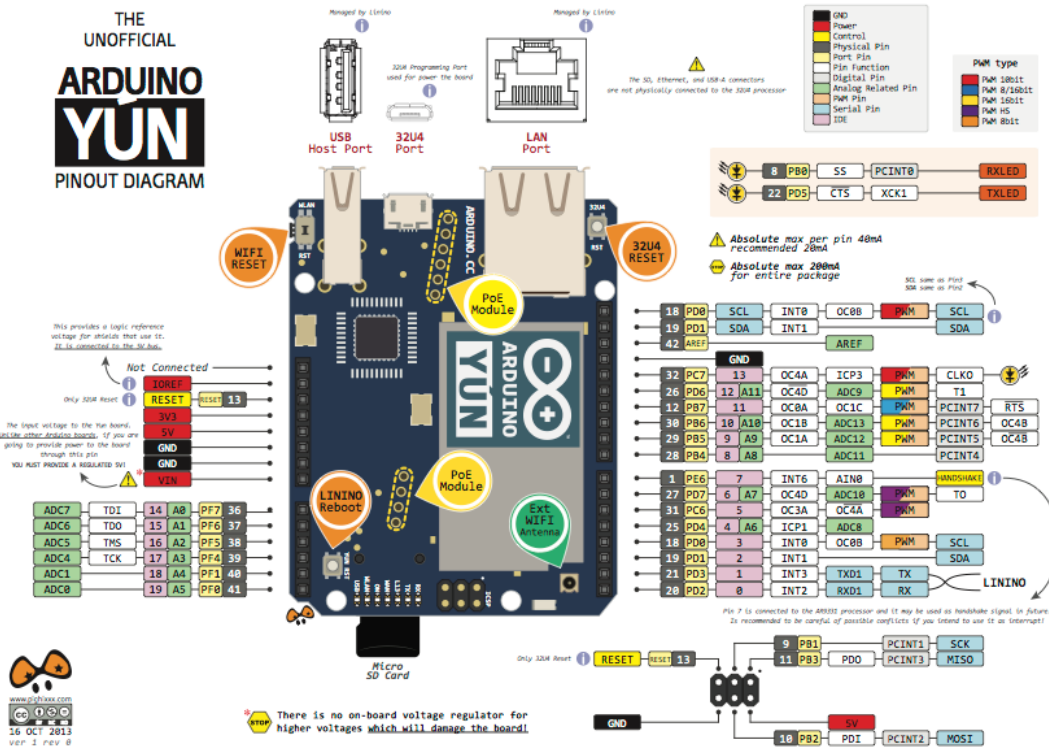


Figura 3.9 Distribución Pines Arduino Yun

### 3.1.5.2. Waspnote

Creada por la empresa española Libelium, waspmote es una plataforma modular de código abierto, cuya finalidad es la de construir redes inalámbricas de bajo consumo. Prácticamente, la plataforma se compone de la placa Waspnote con un microcontrolador de la familia Atmel, memoria, batería, acelerómetro y sockets para conectar módulos.

A nivel software API y compilador *open source*, usa el protocolo de comunicación Zigbee con alcances de hasta 40 Km, dispone de diferentes módulos para dotarles de diferentes medios de comunicación, tales como, Bluetooth, GPS, y GPRS.

Waspnote usa el mismo IDE que Arduino para desarrollo, por lo que el mismo código es compatible entre ambas plataformas (pudiendo variar algunas líneas de código). Libelium fabrica sus módulos basándose en estándares de hardware abierto, proporcionando un poco de mayor robustez, la facilidad para incorporar diferentes sensores y la posibilidad de operar a largas distancias (REF).

A diferencia de Arduino, cuya plataforma está más orientada a la creación de prototipos, Waspnote es un dispositivo especialmente orientado a la creación de redes sensoriales inalámbricas que necesitan de una larga duración, cuya finalidad es funcionamiento a largo plazo en escenarios reales.

Los ámbitos de aplicación de estos módulos son para las ciudades inteligentes. Por ejemplo, se han aplicado ya en proyectos de *Smart Parking*, monitorizar una red de alcantarillado en Valencia, para medir la calidad del aire en Santander. También se aplica en el mundo agrícola para medir la irrigación, el crecimiento de las cosechas, además detectar sucesos meteorológicos adversos (REF).

### 3.1.5.3. Spark

Spark es un placa de un tamaño reducido que se compone de un módulo WiFi, cuya finalidad es la de dotar de conexión a Internet prácticamente a cualquier cosa. Se caracteriza por ser un dispositivo fácil de instalar y que se puede programar sin cables, gracias a su conexión WiFi. Combina la simplicidad de un Arduino con todo el poder del chip ARM cortex M3, considerado uno de los mejores módulos disponibles en la actualidad.

Dado que Spark Core es un dispositivo que se caracteriza por estar siempre conectado a Internet, lo que permite que una vez adquirido el producto se pueda utilizar la nube de la compañía Spark, desde la cual se pueden hacer desarrollos, actualizar y otras ventajas a nivel de software.

Spark es una plataforma totalmente de código abierto, lo que permite una integración libre en diversos proyectos. Hay que destacar que el núcleo de desarrollo Spark Core usa estándares abiertos como HTTP, TCP o TLS/SSL.

### 3.1.5.4. 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 las escuelas.

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.

Las placas certificadas por la *Raspberry Pi Foundation* son (García Muelas, s/f) :

- Raspberry Pi Model A: apareció con un precio de unos 25 dólares de coste en fábrica, con un SoC Broadcom BCM2835 que integra una CPU, GPU, DSP, RAM y controlador USB. Este

chip es común a todos los modelos, tanto B como B+. La CPU es una ARM1176JZF-S de la familia ARM11 y con un set de instrucciones ARMv6. Trabaja a 700Mhz, pero no está sola dentro del SoC, también incluye una GPU Video Core IV a 250Mhz encargada de los gráficos y el inicio. Esta GPU soporta OpenGL ES como API gráfica. Además, se complementa con una memoria SDRAM de 256MB que comparten CPU y GPU. Por otro lado, dispone de una conexión HDMI para una pantalla externa y un Jack RCA, Jack para audio, ranura para SD y MMC, pines GPIO, conexión de alimentación por micro USB de 5v o por los cabezales GPIO. El peso y dimensiones son parecidos en las tres placas oficiales.

- Raspberry Pi A+: sus características son similares a la nueva B+, excepto que su tamaño es más pequeño (solo mide 65 x 56 mm) y que su memoria RAM se ha reducido a 256 MB. También ha cambiado su conectividad, que ahora rescinde de su conexión Ethernet. Igual que ocurría con la Raspberry Pi A y Raspberry Pi B iniciales, la A+ es más barata. Al igual que ocurría con la B+, esta placa es más eficiente energéticamente que las anteriores.
- Raspberry Pi Model B: con un precio de unos 35 dólares de coste en fábrica, las únicas diferencias con el modelo A son los 512MB SDRAM incluidos en el SoC, dos puertos USB y la integración de un adaptador Ethernet para conexión a red. El consumo, al tener más elementos sube de los 300mA (1.5w) hasta los 700mA (3,5w). El resto de características son comunes. Es el modelo más vendido (más de 3 millones de ventas).
- Raspberry Pi Model B+: es la actualización del modelo B, cuyas ventajas son la integración de más pines GPIO (pasando de los 26 de los modelos anteriores a los 40, respetando el esquema de patillaje anterior), un consumo inferior (600mA, 3w), inclusión de 4 puertos USB on-board y una mejora en la fuente de alimentación para reducir el ruido y mejorar el sistema de sonido. Por el resto de características es idéntica a la B. Lo más práctico es lo de los puertos USB, que se echan mucho en falta en los modelos anteriores, aunque puede ser solucionado con un hub. Todo esto manteniendo el mismo precio del Model B, debido a que la tecnología ha madurado y permite su manufactura a un menor coste.

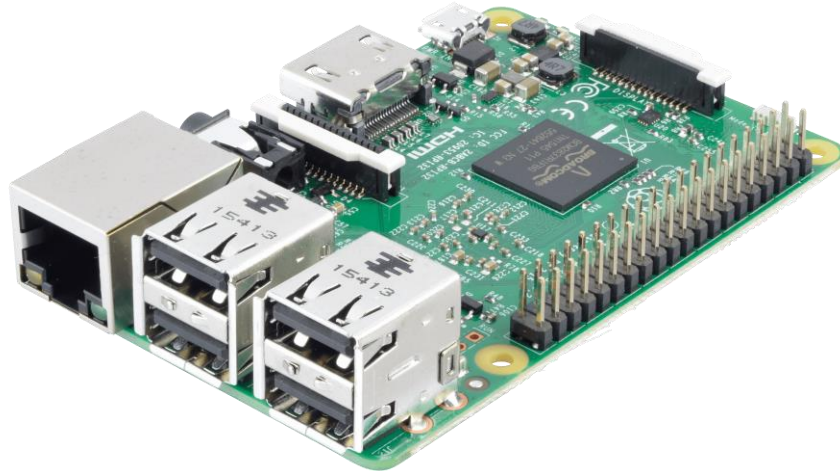


Figura 3.10 Tarjeta Raspberry Pi 3

### Raspberry Pi 3

La Raspberry Pi 3, última versión a la fecha de esta plataforma (Figura 3.11), es una computadora embebida que tiene la capacidad de correr un sistema operativo en su hardware, como por ejemplo Raspbian, una versión ligera de Windows 10 y otras versiones de Linux. La tarjeta tiene todas las características de una pc de escritorio, puertos usb para la conexión de periféricos como: teclado, ratón, memorias usb; un puerto Ethernet RJ45 y WiFi para la conexión a la red y a internet, HDMI como salida para la conexión de un monitor, Bluetooth, un Jack de 3.5 para salida de audio, en fin es igual de funcional que una pc de escritorio.

Cuenta con un procesador Broadcom BCM2837B0, Cortex-A53 (ARMv8) 64-bit corriendo a 1.2GHz, 1 GB de memoria RAM, Bluetooth 4.1, Fast Ethernet 10/100 Gbps como principales características, la parte importante para el desarrollo de este trabajo está en la capacidad de poder interactuar con otros equipos a través de sus puertos de entradas y salidas digitales GPIOs, los cuales son cuarenta pines con diferentes funciones, por ejemplo pines de alimentación de 5 y 3.3V, de comunicación un puerto con el bus I2C, un puerto UART o serial, y dos puertos SPI y trece pines de propósito general, sin contar los pines destinados a las comunicaciones.

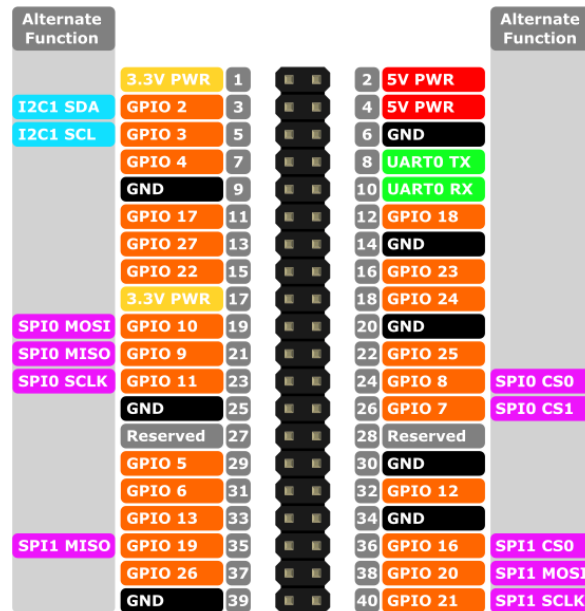


Figura 3.11 Pines GPIO Raspberry Pi3

En la compatibilidad con los modem GSM/GPRS con los que se cuenta, los niveles de voltaje a la salida de sus pines Rx y Tx, no son compatibles, por lo que hay que contar con un circuito adaptador a base del circuito integrado MAX232 y un arreglo de capacitores conectados como se muestra en la ilustración siguiente.

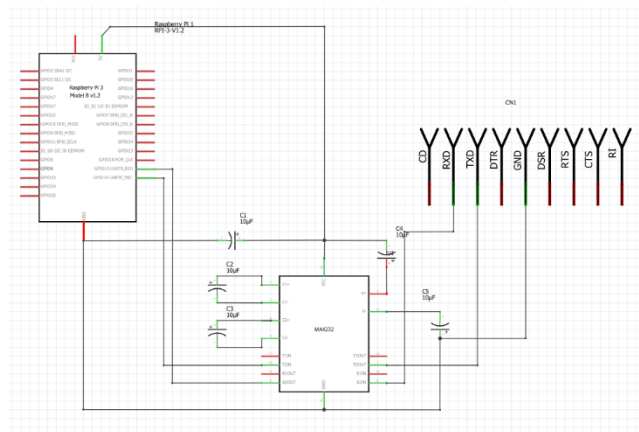


Figura 3.12 Conexión MAX232 a Raspberry Pi3

### 3.1.5.5. Clicker 1 y 2

#### Clicker 1

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 estan distribuidas la conexiones a los puertos de comunicaciones como un RS-232, un SPI y un I2C, además

cuenta con 8 pads o pines para conexiones de entrada o salida digitales, el puerto micro USB con el que cuenta además de ser por el cual se programa sirve como host.

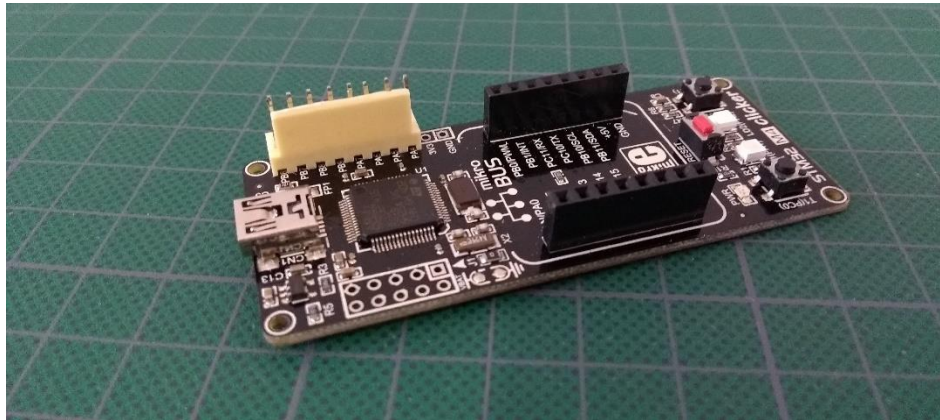


Figura 3.13 Clicker 1

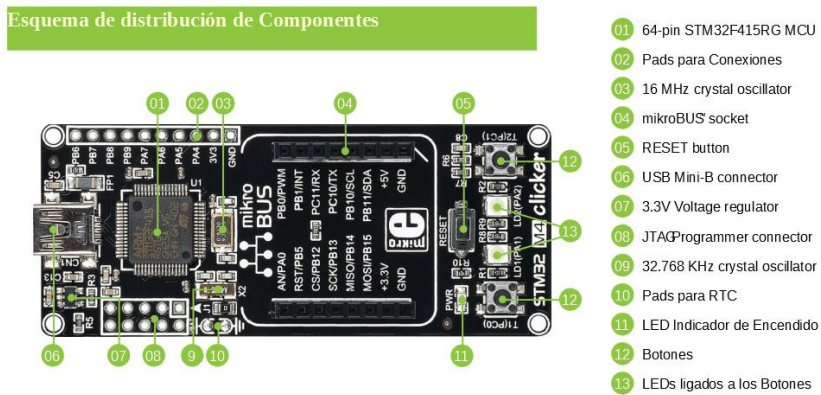


Figura 3.14 Distribución de componentes

En cuanto a la compatibilidad con algún modem GSM/GPRS con los que se cuenta para esta prueba, son compatibles y manejan los mismos niveles de voltaje por lo que no es necesario ningún componente adicional.



Figura 3.15 Conexión con modem GSM/GPRS

En cuanto a la programación de esta tarjeta está disponible el software MikroC, 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.

### Clicker 2

El Clicker 2 funciona a base de un microcontrolador ARM de 32 bits STM32F407VGT6 a 168MHz, cuenta con 2 puertos que el fabricante le denomina mikroBus, en el cual están distribuidas las conexiones a los puertos de comunicaciones como dos RS-232, dos SPI y dos I2C, además cuenta con 8 pads o pines para conexiones de entrada o salida digitales, el puerto micro USB con el que cuenta además de ser por el cual se programa sirve como host



Figura 3.16 Clicker 2

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

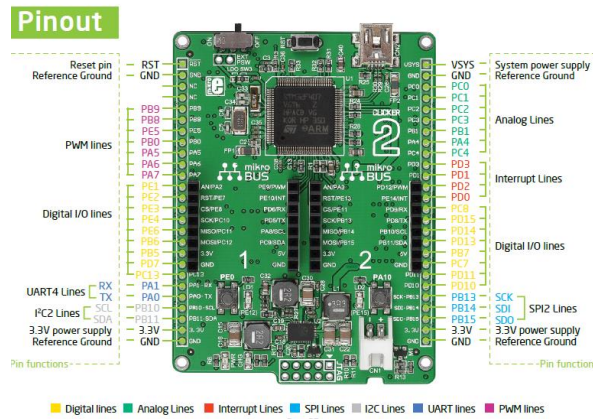


Figura 3.17 Distribución de Pines

La compatibilidad con algún modem GSM/GPRS con los que se cuenta para esta prueba, son compatibles y manejan los mismos niveles de voltaje por lo que no es necesario ningún componente adicional

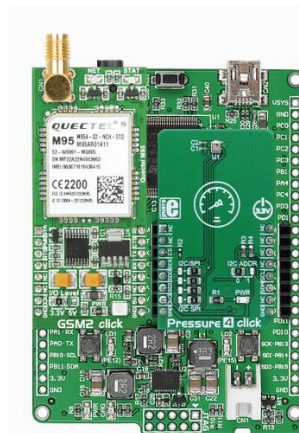


Figura 3.18 Conexión con Modem GSM/GPRS

En cuanto a la programación de esta tarjeta está disponible el software MikoC, Mikro Pascal y Mikro Basic, al igual que su predecesor.

### 3.1.5.6. WiFi Esp32 LoRa 433 Mhz

El Wifi LoRa 433 tiene como base el procesador 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.

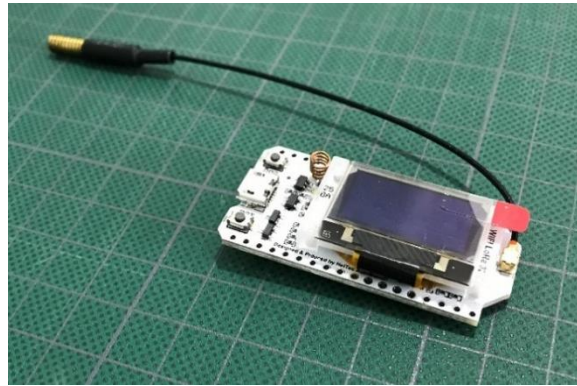


Figura 3.19 WiFi LoRa 433

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 2.6km 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, etc.

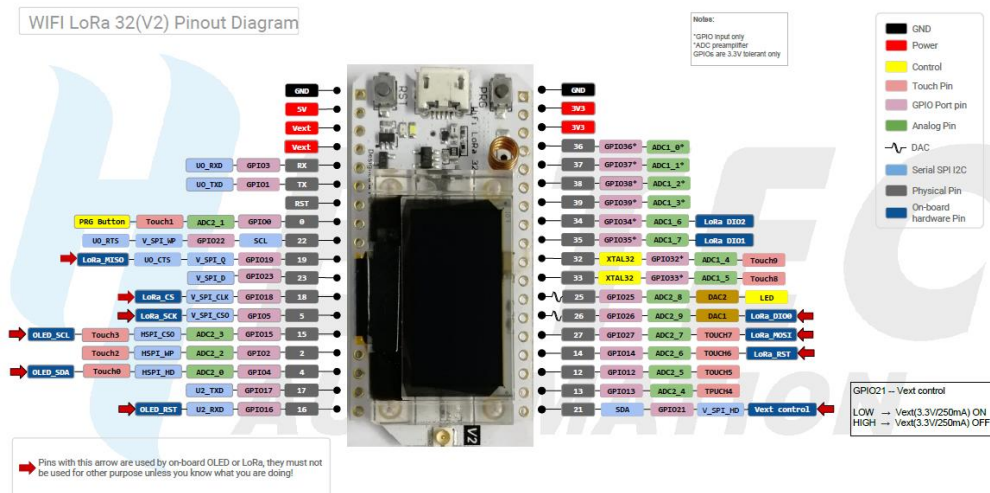


Figura 3.20 Distribución de pines

### 3.1.5.7. Intel Galileo

Se trata de una nueva familia de placas compatibles con Arduino que trabajan bajo la arquitectura Intel. ES uno de los primeros productos de Intel para introducirse en el mercado del IoT, trae funciones muy similares a Raspberry Pi o Arduino.

Galileo es un microcontrolador basado en el procesador IQuark SoC X1000 que funciona a 400MHZ, es realmente una CPU de 32 bits tiene una arquitectura similar a la de los antiguos Pentium. Es la primera placa basada en arquitectura Intel y cuyo diseño está pensado para que sea

compatible con Arduino. Trae compatibilidad con los Shield que usa Arduino UNO rev3 y se puede usar el IDE de Arduino. Es multiplataforma por lo que se puede usar tanto en Linux, Mac y Windows.

Esta placa ejecuta un sistema operativo Linux libre, que contiene las librerías de software de Arduino, permitiendo una mayor escalabilidad y reutilizar el software ya existente. Además de esta compatibilidad con Arduino, Galileo tiene una serie de puertos y características que son estándares en la industria del PC por lo que va un paso más allá de los Shields de Arduino. Destacan, por ejemplo, puerto Ethernet a 100Mb, espacio Micro SD, memoria flash a 8Mb, un puerto RS-232 serial.

Destacar que, gracias a su gran conectividad, potencia de proceso y el uso de SDK sencillos permite desarrollar software capaz de conectar cualquier dispositivo a Internet, muy interesante es su uso para domótica proyectos que necesiten de un PC de bajo consumo y costo.

#### **3.1.5.8. ZigBee (dispositivo físico)**

Según las capacidades de procesamiento de datos, se proporcionan dos tipos de dispositivos físicos en ZigBee (IEEE 802.15.4): Dispositivos de función completa (FFD) y Dispositivos de función reducida (RFD). Los dispositivos de función completa pueden realizar todas las operaciones disponibles dentro del estándar, incluido el mecanismo de enrutamiento, las tareas de coordinación y la tarea de detección. El FFD desempeña el papel de coordinador o enrutador o dispositivos finales (puede ser FFD o RFD dependiendo de su aplicación prevista). Un FFD típico en una red ZigBee se alimentará de una fuente de alimentación alimentada por CA, ya que siempre debe estar activo y escuchando la red. Los Dispositivos de Función Reducida, por otro lado, implementan una versión limitada del protocolo IEEE 802.15.4. Los RFD no enrutan paquetes y deben estar asociados con un FFD. Estos son dispositivos finales, como los sensores, que solo realizan tareas limitadas, como registrar datos de temperatura, monitorear las condiciones de iluminación o controlar dispositivos externos. El estándar actual de ZigBee requiere que los FFD estén siempre encendidos, lo que en la práctica significa que los FFD deben estar alimentados constantemente. Los FFD a batería tienen una vida útil del orden de unos pocos días (Ramya, Shanmugaraj, & Prbakaran, 2011).

#### **3.1.5.9. Comparativa de dispositivos IoT**

La siguiente tabla muestra una comparativa entre los distintos dispositivos de hardware IoT.

Tabla 3.15. Comparativo de dispositivos para la implementación de IoT

Plataforma	Ámbito de aplicación	Ventajas	Desventajas	Micro	Memoria	Alimentación
<b>Arduino</b>	Prototipo, educación	Comunidad. Extensa Documentación Precio. Variedad dispositivos. Ideal para iniciarse.	En proyectos más profesionales quizás no sea la plataforma adecuada. Requiere módulos adicionales	Familia ATmel: ATmega32 8	Modelos de 32Kb y otros como Mega de 256Kb.	5V-9V Consumo según modelo
<b>Waspote</b>	Smart City, Smart agricultura	Amplia variedad de sensores. Bajo consumo. Compatibilidad con IDE Arduino.	Diseñado para unos requerimientos específicos. No apta para gente que se está iniciando.	ATMega 1281	128 KB	3,3V -4,2V ON: 15mA Sleep: 55uA Hiberna: 0,7ua
<b>Spark</b>	Smart Home, Educación, Prototipos	Comunidad al alza. Facilidad de configuración. Precio. Ideal para iniciarse.	Poca variedad de dispositivos propios aunque permite compatibilidad con otros fabricantes.	ARM-32- Cortex	128 KB	3V-6V Max: 300mA Min: 50mA
<b>Raspberry PI</b>	Servidores de archivos, Educación, Prototipos	Comunidad. Extensa documentación	Precio alto. Alto consumo energético. Sobrado para la mayoría de aplicaciones IoT	ARM1176JZF-S a 700 MHz	512MB SDRAM	5V 300 mA (1.5 w) hasta los 700 mA (3.5 w)
<b>Esp32 WiFi Lora</b>	Prototipos IoT Domótica Educación	Compatibilidad con IDE Arduino. Amplia variedad de sensores. Bajo consumo. Bajo precio. Pantalla OLED integrada. Enlace de Radio Integrado	Es considerado aún experimental	Esp32 doble núcleo LX6 a 240 Mhz	520Kb SRAM	3.3 V a 7 V
<b>Intel Galileo ZigBee</b>	Prototipos, Educación Smart Home	Arquitectura Intel. Compatible con Arduino. Potencia de cómputo. Buena opción para iniciarse. Protocolo de comunicación. Bajo consumo. Variedad de sensores y dispositivos. Enlace de radio integrado.	Precio. Documentación escasa. Su ámbito de aplicación y su competencia hacen que otros fabricantes tomen ventaja. No recomendable para iniciarse.	Intel Quark.SO Cx1000 Según fabricante	512KB Según fabricante	7V-15V MAX: 800mA Según fabricante

### 3.1.6. Software

Esta comparativa está basada en (Loureiro, s/f).

#### 3.1.6.1. ThingSpeak

ThingSpeak es una plataforma abierta de aplicaciones, diseñada para permitir conectar personas con objetos. Se caracteriza por ser una plataforma Open Source con una API para

almacenar y recuperar datos de los objetos usando el protocolo HTTP sobre Internet o vía LAN (Local Area Network).

Se trata de una plataforma basada en Ruby on Rails 3.0 (RoR), este es un framework de aplicaciones web de código abierto basado en Ruby, cuya arquitectura está basada en el Modelo Vista Controlador (MVC). Se caracteriza por su simplicidad a la hora de programar aplicaciones del mundo real, escribiendo menos código y con una configuración mucho más sencilla que otros frameworks. Otra de las características que hacen de RoR un framework perfecto para el desarrollo de aplicaciones es que permite el uso de meta programación, haciendo que su sintaxis sea más legible y llegue a un gran número de usuarios.

Uno de los puntos fuertes en cualquier plataforma IoT, es que permita una amplia integración con diversos dispositivos Hardware y software. En este caso ThingSpeak permite la integración de su plataforma con:

- Arduino
- Raspberry Pi
- IoBridge / RealTime.io
- Electric Imp
- Móviles / Aplicaciones web
- Redes Sociales
- Análisis de datos con MATLAB

### 3.1.6.2. Zatar

Zatar es una plataforma IoT orientada para construir aplicaciones empresariales, basado en cloud computing. Esta solución incluye componentes básicos de IoT como son los sensores, RFID y código de barras para que cualquier empresa pueda tener la información que necesite y gestionarla a través de la web. Como viene siendo habitual en este tipo de plataformas, usa una API basada en REST para acceder a todas las propiedades y métodos de los dispositivos.

**Compatibilidad:** Los dispositivos y sensores, aportan diferentes datos que pueden ser de gran utilidad para las empresas, incluso estos sensores y dispositivos pueden compartir datos entre ellos lo que aumentan las opciones de mejoras de las empresas. Zatar se caracteriza por el uso de RFID readers(Radio Frequency IDentification), provee soporte para un gran número de impresoras Zebra y también da soporte para Raspberry Pi.

Hace uso del Zatar Gateway para conectarse a internet. Este actúa como si fuera un modem del IoT. A través de este Gateway se puede conectar a internet via WIFI, Ehternet o 3G.

### 3.1.6.3. Samsung Artik Cloud

Proviene de la antigua plataforma que se llamaba SAMlio y posteriormente SmartThings. El concepto original era dar soporte a dispositivos médicos y de salud. Pero rápidamente se adoptó para dar soporte a proyectos del IoT. De aquí surgió Artik Cloud, donde se ha unificado tanto hardware y software. No obstante, no se requiere un módulo Artik para comunicar con la nube, pues se puede hacer con cualquier dispositivo compatible. Por ejemplo, es sencillo configurar un sistema con un sensor y un Arduino MKR1000.

Es compatible con Amazon Echo (interfaz de voz), Fitbit (monitor de actividad), Nest (termostato de Google) y, por supuesto, con Samsung.

### 3.1.6.4. aRest Framework

aRest Framework está centrado en dar soporte a placas como Arduino, ESP8266 y Raspberry Pi. Es una solución completa para crear aplicaciones con servicios RESTful. Soporta comunicaciones WiFi, Ethernet, Bluetooth y Serial. Incluye librerías para Arduino y también del lado del servidor, para controlar las comunicaciones.

Este framework es de código abierto y de uso gratuito. Se puede encontrar en GitHub y, por lo tanto, montar en un servidor local. Lo que realmente se paga es el uso de los servidores. La documentación es bastante escasa y solo admite el protocolo REST, por lo tanto, se está restringido a utilizar la API REST que ofrece.

Se le considera una plataforma muy sencilla de utilizar. Dentro del propio entorno oficial de Arduino, se puede descargar la librería de su repositorio y empezar a trabajar. Una de las características menos atractiva es que la documentación es bastante escasa.

### 3.1.7. Selección de tecnología IoT para la medición de extracciones subterráneas

Esta sección proporciona un análisis llevado a cabo para la selección de los distintos elementos involucrados en la implementación del IoT para el problema de la medición masiva de las extracciones en pozos profundos.

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:

- Distancia entre el emisor y el receptor.
- Naturaleza de los obstáculos.
- Distorsión del ruido.
- 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 80 sistemas de bombeo localizados en estado de Zacatecas, que fue obtenida de un proyecto IMTA realizado en el año 2015 (ver informe del proyecto SIEVA, 2015). Esta muestra, tomada de manera aleatoria, incluye las coordenadas de 90 pozos distribuidos principalmente en los acuíferos de Calera, Chupaderos y Loreto (ver Figura 3.21).

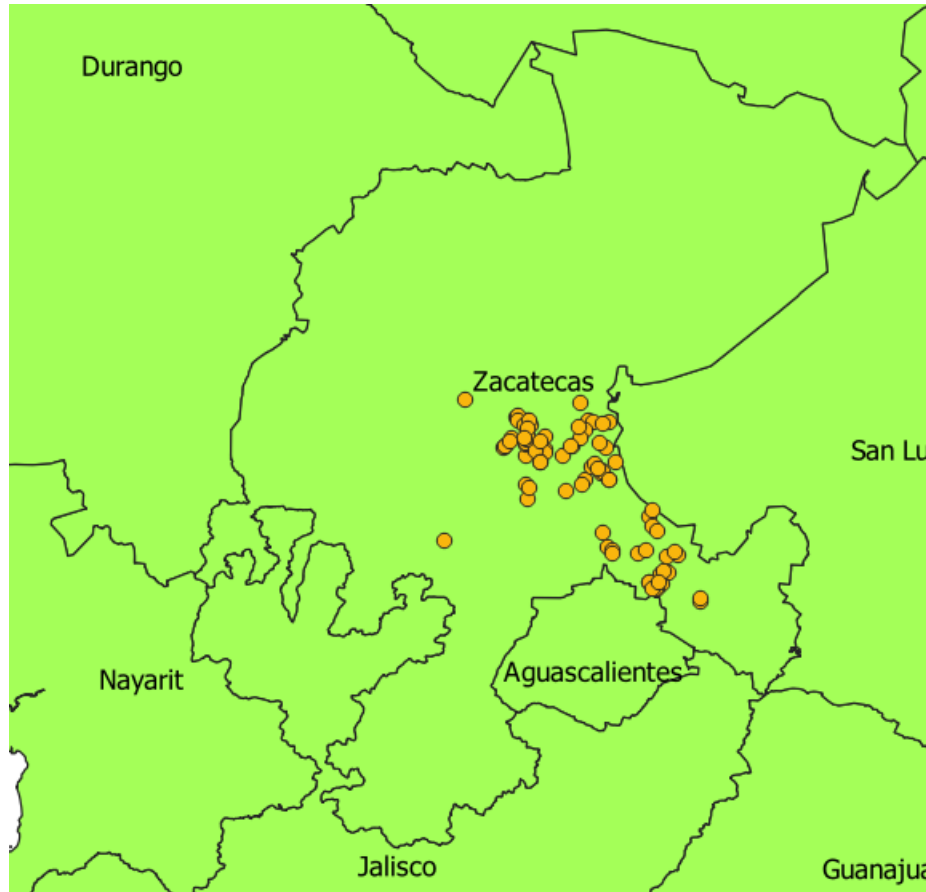


Figura 3.21 Ubicación de los pozos utilizados para análisis de la distancia

Para el análisis, las coordenadas de los pozos, que originalmente eran grados GMS indicando longitud y latitud, fueron convertidas a coordenadas x,y en formato Universal Transversa Mercator (UTM). Esto se hizo con el fin de medir la distancia euclidiana en metros 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 región 14, por lo que fueron eliminados del análisis. En total, se dejaron 84 pozos, todos pertenecientes a una misma zona UTM. 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 promedio 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 promedio entre los pozos fue de 47.24 km.

Para analizar los pozos dentro de los radios de 0.2 km a 50 km, se contabilizaron los pozos que estaban debajo de cada rango para cada pozo, y estos totales fueron promediados. Los resultados muestran en la Tabla 3.16, 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 la Tabla 3.16 se observa que, por ejemplo, cada pozo en promedio tiene por debajo de los 50 km a 51 pozos, en 20 km a 18, con dos que quedan ya sin alcanzar a ningún otro pozo.

*Tabla 3.16. Promedio de pozos localizados en cada rango de distancia en la muestra*

<b>Rango</b>	<b>Pozos promedio en el radio</b>	<b>Cantidad de pozos fuera de alcance</b>	<b>Pozos fuera de alcance (%)</b>
<b>&lt;50km</b>	50.98	0	0
<b>&lt;20 km</b>	18.40	2	2.38
<b>&lt;10 km</b>	7.83	3	3.57
<b>&lt;5 km</b>	2.74	8	9.52
<b>&lt;3 km</b>	1.62	21	25.00
<b>&lt;2 km</b>	0.93	36	42.86
<b>&lt;1 km</b>	0.31	59	70.24
<b>&lt;0.5 km</b>	0.12	74	88.10
<b>&lt;0.3 km</b>	0.05	80	95.24
<b>&lt;0.2 km</b>	0.02	82	97.62

No obstante, es necesario aclarar que estos resultados únicamente atañen a la muestra aleatoria utilizada, donde se puede ver, por ejemplo, que hay al menos tres pozos que se encuentran alejados de la mayor concentración, pero que en los cuales sí puede haber pozos intermedios que no fueron seleccionados.

Por lo anterior, se requiere seleccionar una tecnología que permita distancias de conexión de arriba de los 20 km para garantizar que alcanza a todos los otros pozos, o saber que con alcances de

3 km se puede cubrir a la mayoría de los pozos (75 %). El resto de los casos, podrían ser dedicados a equipos más especializados, logrando un equilibrio en los costos requeridos para el equipamiento.

Observando la gráfica de la Figura 3.22 una tecnología muy adecuada para el último caso mencionado son las tecnologías LPWAN, ya que pueden alcanzar distancias de hasta 10 km, lo que permitiría satisfacer la mayoría de los requerimientos de distancia. Las tecnologías LPWAN, como se describió en la sección 3.1.4.3, son de alto rendimiento energético, por lo que alcanzan grandes distancias con bajo consumo de energía.

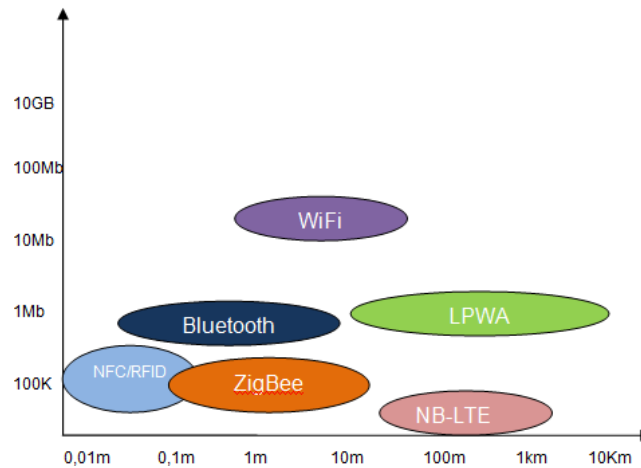


Figura 3.22 Tecnologías de red en función de la distancia y capacidad de transmisión

Otro factor muy importante es el costo, pues como se comentó en los objetivos, es imperativo que sea de bajo costo para que el uso de los dispositivos 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 la plataforma 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 aún más los costos.

La programación y operación de los dispositivos LoRa aplicados al problema de obtención de información de extracciones subterráneas se describe en la siguiente sección.

## 3.2. Programación de dispositivos IoT para monitorear el tiempo de funcionamiento de sistemas de bombeo

### 3.2.1. Esquema de comunicación

La Figura 3.23 muestra el esquema de comunicación de los equipos que participan en la adquisición y envío de datos desde los arrancadores de los sistemas de bombeo hasta el servidor web que presenta la información a los usuarios. Existen dos tipos de equipos en esta configuración, los equipos identificados como Cliente y los equipos identificados como “puerta de enlace” (gateways). Como se puede observar, los datos crudos son adquiridos desde el arrancador y el medidor volumétrico por los equipos LoRa identificados como clientes, y son enviados a través de un mensaje de radio al equipo LoRa identificado como puerta de enlace. El equipo puerta de enlace tiene un módem GSM que se enlaza a Internet, medio por el cual se hace un llamado http a una aplicación web que recibe y procesa los datos. Finalmente, los datos son presentados al usuario final por medio de otra aplicación web.

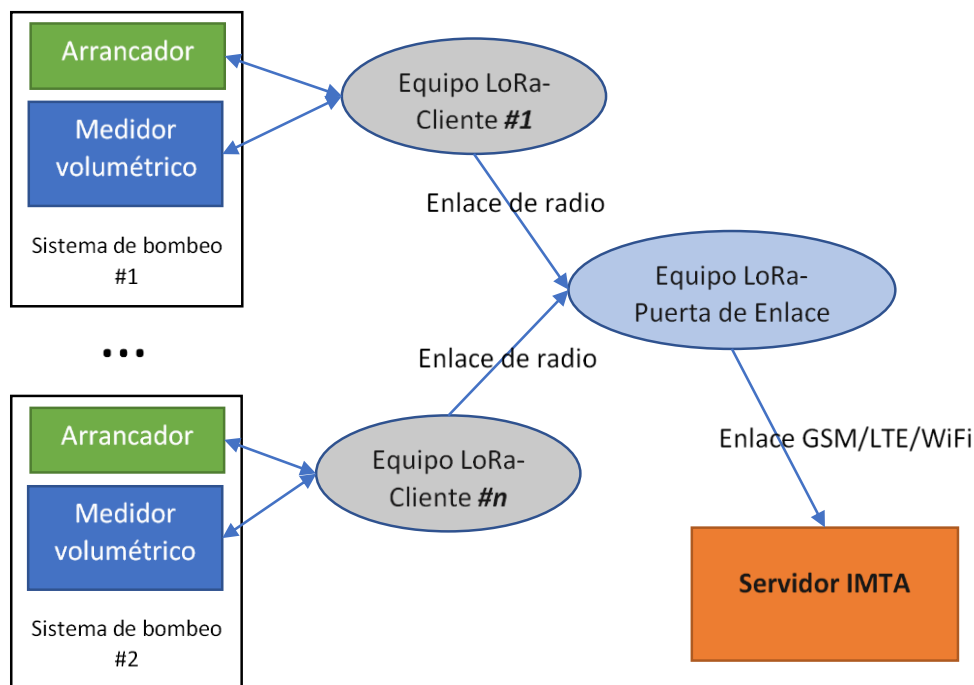


Figura 3.23 Esquema de adquisición y transmisión de datos desde los sistemas de bombeo hasta el servidor IMTA

A continuación se describe el funcionamiento de los equipos LoRa en la configuración presentada en la Figura 3.23.

### 3.2.1.1. Funcionamiento de los equipos LoRa cliente

Los terminales de I/O de estos equipos son utilizados para detectar el arranque/paro y tiempo de funcionamiento de los sistemas de bombeo, así como cuantificar los “ticks” recibidos desde medidores volumétricos digitales instalados en campo. Los datos recolectados por los equipos son codificados en un mensaje y enviados de manera periódica a los equipos identificados como “puerta de enlace”. La frecuencia de envío de los mensajes de los clientes a las puertas de enlace es configurable, siendo el estándar fijado en cinco minutos.

#### Codificación de los mensajes

Los mensajes constan de una secuencia de pares atributo/valor, donde cada atributo tiene el siguiente significado:

Tabla 3.17. Codificación de mensajes en el equipo cliente.

Atributo	Descripción
<b>CONSEC</b>	Número consecutivo que identifica al mensaje.
<b>ID</b>	Número entero que identifica al equipo cliente. En el servidor se tiene una tabla con la información de los equipos cliente, sus identificadores (ID) y su ubicación.
<b>TMJE</b>	Tipo de Mensaje. Una cadena que identifica el tipo de mensaje enviado, que puede ser uno de los siguientes: <b>ENC:</b> Encendido registrado. El equipo cliente ha detectado la puesta en marcha del arrancador del sistema de bombeo. <b>ENC_NR:</b> Encendido no registrado. el equipo cliente ha sido encendido, pero el sistema de bombeo ya estaba operando, por lo que la hora real de encendido del sistema no ha sido registrada. <b>APA:</b> Apagado registrado. El equipo cliente ha detectado el apagado del sistema de bombeo. <b>APA_NR:</b> Apagado registrado. El equipo cliente ha detectado un apagado del sistema de bombeo, pero para el cual no tenía registro del encendido. <b>MON:</b> Mensaje normal de monitoreo por tiempo. Indica un mensaje no generado ni por encendido o apagado del sistema de bombeo, ni por encendido del cliente y detección de encendido del sistema de bombeo, ni por apagado del sistema o detección de apagado sin encendido registrado.
<b>Fechalni</b>	Fecha de inicio de operación registrado (dd/mm/aaaa)
<b>Horalni</b>	Hora de inicio de operación registrado (hh:mm:ss)
<b>Tfun</b>	Tiempo total de funcionamiento registrado (en minutos, con punto decimal, flotante)
<b>Qmed</b>	Gasto promedio medido (litros por segundo, flotante)
<b>Vini</b>	Volumen inicial registrado (litros, flotante)
<b>Vfin</b>	Volumen final acumulado (litros, flotante)
<b>pulsos</b>	Cantidad de pulsos cuantificada durante un período de monitoreo
<b>TPulsos</b>	Cantidad de tiempo (en segundos) transcurrida durante un período de monitoreo

El modo de codificar estos mensajes puede ser clave=valor, separado por “&”, a fin de tomar esta cadena mensaje y enviarla en un mensaje http sin realizar ningún tratamiento.

### Operación

1. Cuando el equipo LoRa cliente es encendido, envía de inmediato un mensaje a la puerta de enlace, que puede ser uno de los siguientes:
  - **ENC\_NR**: Encendido no registrado. el equipo cliente ha sido encendido, pero el sistema de bombeo ya estaba operando, por lo que la hora real de encendido del sistema no ha sido registrada.
  - **APA\_NR**: Apagado no registrado. El equipo cliente ha detectado un apagado del sistema de bombeo, pero para el cual no tenía registro del encendido.

Se inicializa la variable para el conteo del tiempo (*tseg*), el tiempo de funcionamiento *tfunc*, y las variables *Qmed*, *Vini* y *Vfin*.

2. El equipo entra en modo cíclico de operación por tiempo (cada segundo), obteniendo los datos de estado de encendido del sistema y los ticks por medio de las entradas/salidas del dispositivo. Se actualizan las variables *tseg*, *tfunc*, *Qmed* y *Vfin*, y se verifica la posible ocurrencia de alguno de los siguientes eventos:

**Apagado del sistema.** El equipo envía un mensaje **APA** a la puerta de enlace (Tabla 3.17). Se suspende el modo cíclico de operación, hasta detectar un estado de “encendido”.

**Encendido del sistema.** En caso de un mensaje previo APA o APA\_NR, el equipo envía un mensaje **ENC** a la puerta de enlace (Tabla 3.17). Se vuelve a iniciar el modo cíclico de operación.

**Tiempo cumplido para envío de mensaje.** En caso de que no se cumplan ninguno de los eventos anteriores, y en caso de un estado ENC o ENC\_NR previo, se revisa si se ha cumplido un tiempo especificado en una configuración interna (60 en caso de un minuto, 3600 para una hora, etc.), y en este caso envía un mensaje de tipo **MON** a la puerta de enlace.

#### 3.2.1.2. Funcionamiento de los equipos LoRa “puerta de enlace”

Estos equipos están comunicados con los clientes por medio de un enlace de radio, que puede ser de 433, 868 y 915 Mhz (este último el recomendado para México). Los “puerta de enlace” reciben los mensajes provenientes de los equipos LoRa cliente, y colocan dicho mensaje en una cola de espera. Los mensajes en la cola son despachados cada segundo, haciendo un llamado http a un servicio codificado en php colocado en el servidor IMTA, cuya dirección URL es almacenada en la memoria interna del equipo. El llamado http se forma con la dirección URL, el nombre de la página php (servicio) y la concatenación del mensaje enviado por el cliente.

Una vez hecho el llamado http, la puerta de enlace espera por una confirmación de que el mensaje pudo ser procesado de manera correcta, la cual se identifica con el texto “Ok”. En caso de error, la página php devuelve la palabra “ERROR”, con un guion seguido de un texto descriptivo del error. Este mensaje se almacena en una cola, para aparecer en el monitor del equipo de manera intermitente por cierta cantidad de tiempo (con el ID del equipo). Después de cierta cantidad de ciclos de aparición, el mensaje de error es eliminado de la cola.

### 3.2.2. Hardware utilizado

A continuación se describe el hardware utilizado para la implementación del esquema de comunicación entre los dispositivos cliente y puerta de enlace. Dado que el componente principal en este esquema es el dispositivo LoRa, utilizado tanto para el montaje del cliente como de la puerta de enlace, este componente será descrito en la primera sección. Los componentes secundarios utilizados para cada configuración (cliente o puerta de enlace) se describen en las secciones posteriores.

#### 3.2.2.1. Dispositivo LoRa Esp 32

El equipo LoRa utilizado (Figura 3.24) es fabricado por la compañía Heltec (Heltec Automation, s/f). Cuenta con un microprocesador ESP32 (MCU dual-core de 32 bits + núcleo ULP), interfaz micro USB con regulador de voltaje completo, protección ESD, protección contra cortocircuitos, blindaje de RF y otras medidas de protección. Cuenta también con una Interfaz de batería integrada SH1.25-2, sistema integrado de gestión de batería de litio (carga y descarga, sobrecarga, detección de alimentación de batería, conmutación automática de alimentación de USB / batería).

En cuanto a la conectividad, el dispositivo incluye un chip LoRa SX1276/SX1278 para comunicación por radiofrecuencia, WiFi integrado, conexión de red Bluetooth (antena dedicada de 2.4GHz), e interfaz de conexión IPEX (U.FL) para uso de LoRa. Cuenta también el chip integrado CP2102 USB a puerto serie, conveniente para descargar programas, y depurar la impresión de información.

Para la visualización de información, el dispositivo Incluye una pantalla OLED de matriz de puntos de 0,96 pulgadas 128 \* 64, que se puede utilizar para mostrar información de depuración, energía de la batería y otra información;

En cuanto a herramientas de desarrollo, el fabricante ofrece la biblioteca Arduino® ESP32 + LoRaWAN. El protocolo LoRaWAN es un estándar que permite comunicar cualquier puerta de enlace LoRa que ejecute este protocolo.

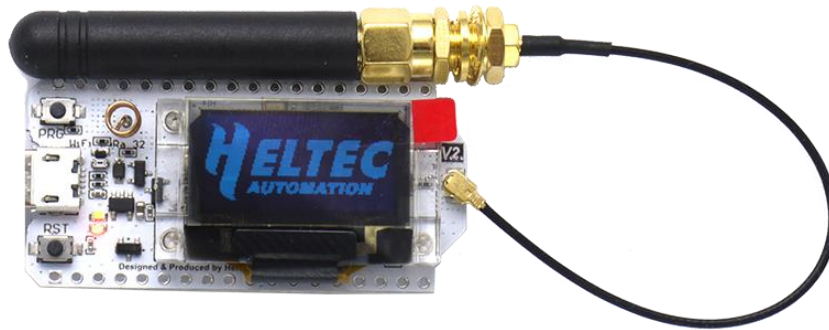


Figura 3.24 Dispositivo Heltec LoRa

Dado su circuito robusto RF y su diseño básico de baja potencia (con una corriente en reposo menor a 800uA), se le considera bastante recomendado para el desarrollo y verificación rápida de aplicaciones IoT. El dispositivo cuenta con el certificado CE<sup>1</sup>,

La Tabla 3.18 muestra un resumen de las características del equipo Heltec LoRa utilizado.

Tabla 3.18. Resumen de componentes del dispositivo Heltec LoRa Esp32 WiFi.

Componente	Descripción
<b>Microcontrolador</b>	ESP32( 240MHz Tensilica LX6 doble núcleo + 1 ULP, 600 DMIPS, 520KB SRAM, Wi-Fi, Bluetooth de modo dual)
<b>Circuito LoRa</b>	SX1276 (versión 868 y 915); SX1278 (versión 433 and 470)
<b>Bandas LoRa</b>	EU_433, CN_470_510, EU_863_870, US_902_928 (cuatro bandas opcionales)
<b>Salida máxima de energía LoRa</b>	18dB ± 2dB
<b>Conexiones de hardware</b>	UART x 3; SPI x 2; I2C x 2; I2S x 1 12 – bits ADC; 8 – bits DAC 29 entradas/salidas de propósito general (GPIO)
<b>Pantalla</b>	Pantalla de 0.96 pulg, resolución de 128*64 OLED
<b>Memoria Flash</b>	8MB (64M-bits) SPI FLASH
<b>Interfaz</b>	Micro USB x 1; LoRa antenna interface(IPEX) x 1
<b>Tamaño</b>	50.2 x 25.5 x 9.74 mm
<b>Puente USB a UART</b>	CP2102
<b>Tipo de batería (si está equipado)</b>	3.7V Lithium (SH1.25 x 2)
<b>Circuito de detección de batería</b>	Sí
<b>Control de energía de dispositivo externo (Vext)</b>	Sí
<b>Diseño de bajo consumo</b>	Sueño profundo 800uA

<sup>1</sup> CE es una marca de certificación que indica la conformidad con las normas de salud, seguridad y protección del medio ambiente para productos vendidos dentro del Área Económica Europea.

En las siguientes secciones se describen los componentes empleados en cada configuración del esquema de comunicación propuesto.

### 3.2.2.2. Configuración cliente

Este dispositivo se encuentra integrado por un equipo Heltec Lora 32 programado como cliente, un reloj digital, un relevador compatible con la corriente presente en cada fase del arrancador (110 V, 220 V, etc.), y una antena de radio-frecuencia. La conexión de la antena al dispositivo LoRa requiere un cableado de tipo coaxial. Para su protección, el dispositivo es montado sobre un gabinete de plástico, el cual debe ser considerado parte del conjunto de ensamble.

### 3.2.2.3. Configuración puerta de enlace

Este dispositivo se encuentra integrado por un equipo Heltec Lora 32 programado como puerta de enlace, un modem GSM, y dos antenas, una para realizar el enlace de radio-frecuencia entre el equipo LoRa tipo puerta de enlace y los equipos LoRa cliente presentes en los sistemas de bombeo a monitorear, y otra para el modem GSM. Para su protección, el dispositivo LoRa y el modem son colocados en un gabinete de plástico, el cual debe ser considerado parte del conjunto de ensamble.

## 3.3. Selección y caracterización de sistemas de bombeo utilizados para la validación de los dispositivos IoT

Para la validación del funcionamiento de la tecnología IoT se seleccionaron cuatro sistemas de bombeo. El primero se encuentra localizado en las instalaciones del IMTA, y pese a que no es de uso exclusivamente agrícola, sí presenta facilidades para su utilización e instalación de los dispositivos. Por la cercanía, facilita la realización de pruebas y ajustes en los dispositivos de monitoreo.

Los otros sistemas de bombeo pertenecen a zonas agrícolas localizadas en el estado de Morelos. El estado de Morelos, según datos del INEGI, es el tercer estado más pequeño del país con el 0.25% de la superficie nacional, una densidad poblacional de 318 habitantes por km<sup>2</sup> y 14% de población rural ubicada en 93.6% de localidades. La importancia del estado en la actividad agrícola se refleja en su participación nacional, ocupando el lugar treceavo al aportar poco más del 3 % del valor total de la producción agropecuaria del país (SIAP). Una estimación de la superficie del estado susceptible a los fines agrícolas rebasa las 188 mil hectáreas (66% de temporal y 34% de riego). La superficie cultivada representa poco más de 140,000 hectáreas, de las cuales 48,000l son de riego y el resto de temporal. Los principales cultivos de acuerdo a su superficie son: sorgo, maíz grano, caña de azúcar, maíz elote, ejote, jitomate, cebolla, frijol, nopal y aguacate y por su valor de producción caña de azúcar, tomate rojo, cebolla, sorgo grano, maíz, nopal, aguacate, durazno, ejote y tomate verde.

Hidrologicamente, el estado de Morelos se ubica en la cuenca del Alto Río Balsas con las subcuencas de los ríos Amacuzac, Atoyac y el alto Mezcala, y también se ve favorecida con siete ríos que la recorren de norte a sur gracias a la formación montañosa con que cuenta: Amacuzac, Tembembe, Tetlama, Apatlaco, Yautepec, Cuautla y Amatzinac; los cuerpos de agua que se tienen son tres: el Lago de Tequesquitengo, la Laguna de Coatetelco y la Laguna El Rodeo. Casi la totalidad del agua del Estado proviene de las aguas subterráneas de 234 pozos profundos, el resto es originario de 20 manantiales y ríos, según datos de SEMARNAT (2009). La zona oriente destina más del 80% de su superficie territorial a la actividad agrícola haciendo un uso del 70 % del agua subterránea. He allí la importancia del lugar para el desarrollo de este proyecto.

A continuación se describen las características de los sistemas de bombeo utilizados para la validación de la tecnología propuesta.

### **3.3.1. Sistema de bombeo instalado en IMTA**

Este sistema de bombeo está localizado en las coordenadas de latitud 18°53'3.14979", longitud 99°9'34.16744", al interior de las instalaciones del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. El diámetro de la tubería de succión es de 4 pulgadas, con una profundidad total de 50 metros.

El arrancador (marca SIEMENS) está preparado para una tensión de 440V, 30 KVA y 68A, proporcionando una potencia de 60 HP. La bomba es de tipo sumergible. El gasto estimado de extracción, determinado con un caudalímetro de mano ultrasónico, es de 18.82 litros por segundo. El equipo cuenta con un medidor volumétrico digital de marca Elster.

### **3.3.2. Sistemas de bombeo instalados en zonas agrícolas del estado de Morelos**

A fin de validar el funcionamiento de los dispositivos IoT, se seleccionaron tres equipos de bombeo pertenecientes a tres unidades de riego localizadas en el municipio de Tepalcingo, al sureste del estado de Morelos (zona de estudio). En el proceso de selección, se contó con personal de la CONAGUA del Organismo de Cuencas Balsas, quien asesoró para la selección de los equipos, recomendando sistemas que no tuvieran más de 3 años de haber sido modernizados o tecnificados. A fin de seleccionar las unidades de riego más adecuadas para el estudio, se realizó una reunión con usuarios de pozos localizados en la zona, junto con el Ing. Arturo Molina de la CONAGUA y Tecnólogos del Agua del IMTA (Figura 3.27). En esta reunión se les explicó a los usuarios participantes los alcances del proyecto, solicitando su participación voluntaria en el proyecto. Tres unidades fueron confirmadas en esta reunión, mismas que se muestran en la Tabla 3.19. Localización espacial de los pozos y responsables.. En esta misma se ha incluido la ubicación del pozo IMTA, que fue considerado de facto en este trabajo. Una imagen con la ubicación de los pozos seleccionados respecto al estado de Morelos se muestra en la Figura 3.26.



Figura 3.25 Reunión Usuarios, CONAGUA, IMTA para la selección de los pozos participantes

*Tabla 3.19. Localización espacial de los pozos y responsables.*

Nombre del pozo	Coordenadas		Responsable o representante
	Latitud	Longitud	
<b>Pozo #1</b>	18°37'49.98"N	98°49'56.00"O	Javier Bolaños Vázquez
<b>Pozo #22</b>	18°36'50.23"N	98°49'20.87"O	Rodolfo Citlalapa Martínez
<b>Pozo #27</b>	18°36'57.62"N	98°49'41.88"O	Adrián Alejo Coyote Belona
<b>Pozo IMTA</b>	(Pendiente)	(Pendiente)	Oscar Martínez Gómez

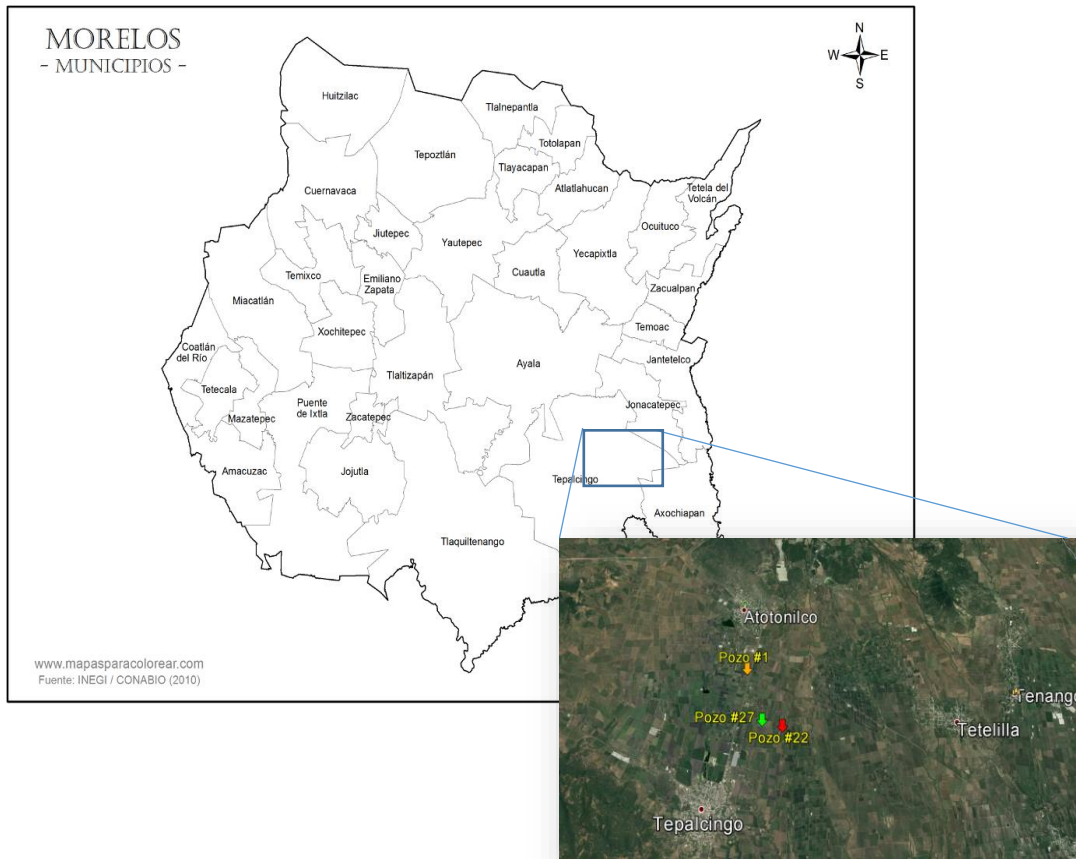


Figura 3.26 Ubicación de los pozos seleccionados en el Estado de Morelos

A continuación se describen las características de cada una de las unidades de riego participantes en el proyecto.

### 3.3.2.1. Pozo número 1 “Pastor de los Pinos”

El pozo #1 con nombre local “Pastor de los Pinos” tiene una bomba de 75 HP alimentada a 440 volts, con una potencia total de 55.95 kW. El diámetro de la tubería de succión es de 6 pulgadas, con una profundidad total de 80 metros. El pozo da servicio a un total a 49 usuarios, cubriendo superficies de 0.5 ha a 2.5 ha. El pozo pasó por una rehabilitación reciente en junio de 2018, en la cual fue relocalizado a pocos metros de su ubicación original.



Figura 3.27 Pozo #1 “Pastor de los Pinos”.

### 3.3.2.2. Pozo #22

El pozo #22 tiene una bomba de 60 HP alimentada a 440 Volts, con una potencia total de 44.80 kW. El diámetro de la tubería de succión es de 4 pulgadas, con una profundidad total de 76 metros. El pozo da servicio a un total a 40 usuarios, cubriendo superficies de 1 ha a 2 ha. El pozo cuenta con un medidor volumétrico de tipo propela marca MS Riceland. La Figura 3.28 muestra fotografías de la visita realizada al pozo.



Figura 3.28 Pozo #22

### 3.3.2.3. Pozo #27

El pozo #27 tiene una bomba de 50 HP alimentada a 440 Volts, con una potencia total de 37.30 kW. Arrancador de 75 HP. Transformador de 75 KVA. El diámetro de la tubería de succión es de 4 pulgadas, con una profundidad total de 80 metros. El pozo da servicio a un total a 33 usuarios, cubriendo superficies de 1 ha a 2 ha. El pozo cuenta con un medidor volumétrico de tipo propela marca MS Riceland. La Figura 3.29 muestra fotografías de la visita realizada al pozo.



Figura 3.29 Caseta del Pozo #27 (izquierda). Medición del nivel estático (derecha)

### 3.4. Sistema de información para la consulta de datos de extracciones

El Sistema de Información de Extracciones Volumétricas en Acuíferos fue desarrollado en el año 2015 y su última actualización fue en el año 2017. Dado el tiempo transcurrido, la imagen en general del sistema estaba fuera de tiempo, por lo que el primer paso para actualizar el sistema fue cambiar la imagen institucional al nuevo esquema que entró en vigor en el año 2019. Como ejemplo del cambio, en la Figura 3.30 se muestra una consulta al volumen extraído de un usuario en la interfaz anterior, mientras que la Figura 3.31 se muestra la misma consulta en la versión actual del sistema.

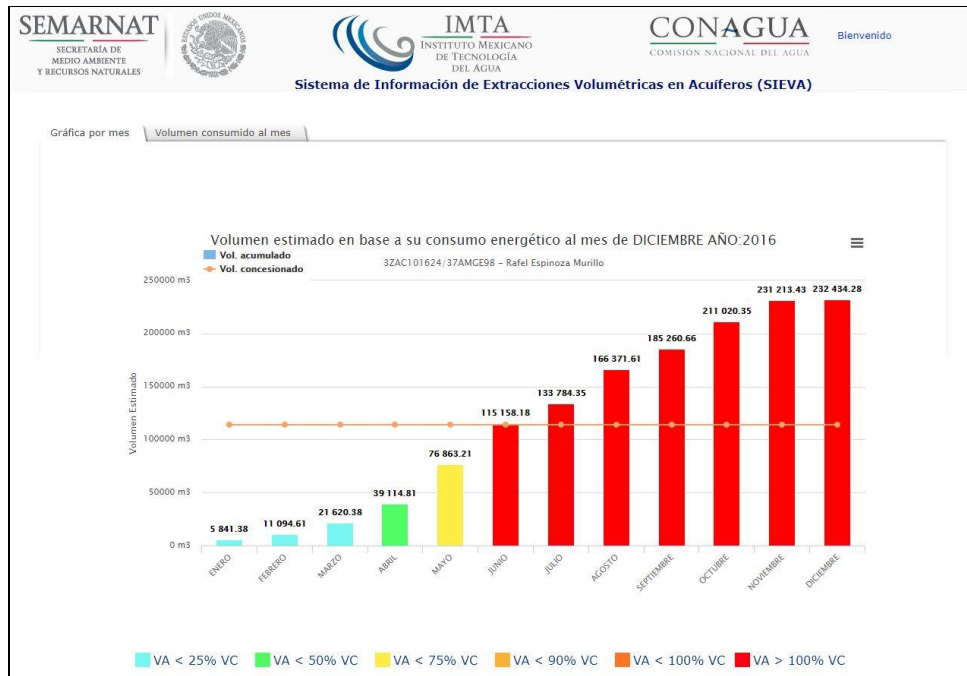


Figura 3.30 Pantalla de la versión anterior del SIEVA (consulta de volúmenes extraídos)

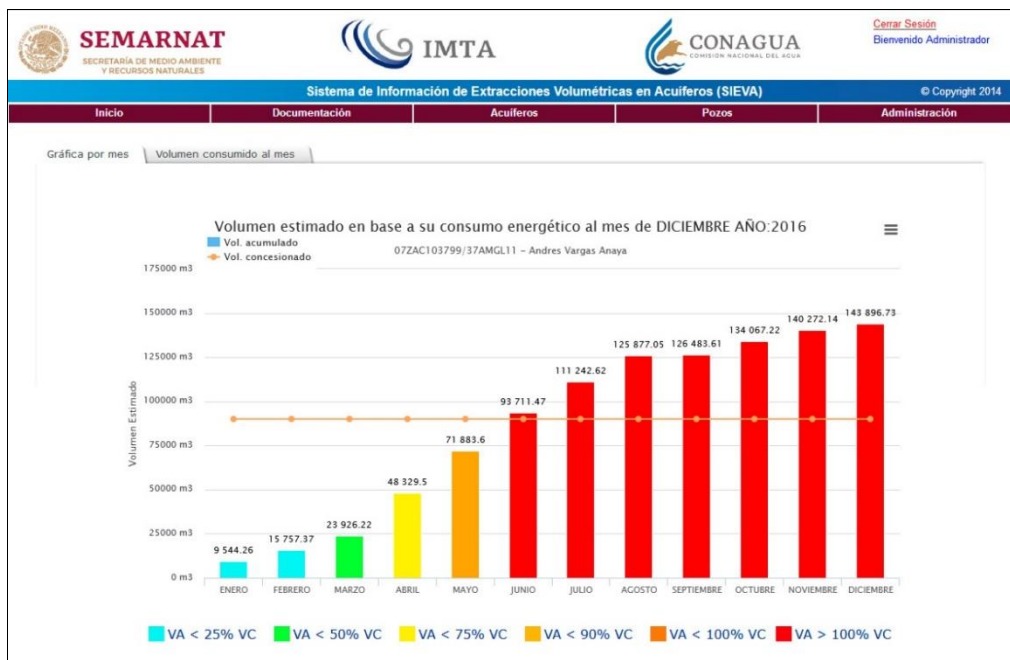


Figura 3.31 Pantalla actualizada del SIEVA (consulta de volúmenes extraídos)

Por otro lado, fue necesario incorporar un módulo de programación en PHP para la comunicación de la aplicación con el servicio en la nube que recibe la información de los dispositivos IoT instalados en campo, la cual se extrae por medio del título de concesión ligado al pozo que reporta el dato del volumen extraído.

También se actualizó el apartado de consulta que permite al usuario acceder a la información que el sistema está adquiriendo desde el servicio en la nube, que se traduce en tiempos de funcionamiento de los sistemas de bombeo y extracciones de las unidades de riego seleccionadas. Esta pantalla es la misma que el sistema ya incorpora para mostrar las extracciones usando el índice energético (Figura 3.31).

Los cambios mencionados también requirieron modificaciones a la base de datos, pues se incorporaron nuevas tablas para almacenar la configuración de acceso al servicio en la nube que lleva el registro de información de los dispositivos IoT y dos tablas adicionales para almacenar los datos obtenidos del tiempo de funcionamiento del pozo, gasto instantáneo y volumen extraído en los pozos monitoreados.

### **3.5. Instalación los de dispositivos IoT en los sistemas de bombeo**

Como se mencionó en la sección 3.1.5.6, los dispositivos LoRa fueron instalados para monitorear el tiempo de funcionamiento y el volumen extraído (en donde fuera posible) en el sistema de bombeo del pozo que da servicio al IMTA, así como en 3 sistemas de bombeo localizados en el acuífero Tepalcingo-Axochiapan. Esta sección documenta el proceso de instalación de los dispositivos en los sistemas de bombeo seleccionados. Para facilitar la explicación del proceso de instalación, en las primeras dos secciones se incluye una descripción general del procedimiento de instalación del dispositivo LoRa, tanto en su modalidad cliente (sección 3.2.1.1) como puerta de enlace (sección 3.2.1.2).

#### **3.5.1. Proceso general de instalación de los dispositivos LoRa configuración cliente**

En general, el proceso de instalación de los dispositivos LoRa cliente se realiza típicamente en tres etapas:

##### **1. Inspección preliminar (ubicación de gabinete y centro de carga)**

Esta etapa requiere realizar las siguientes actividades:

- Detección de las fases energizadas al encender la bomba. Esto se realiza utilizando un multímetro digital, localizando con precaución las fases energizadas al momento de realizar el encendido de la bomba. El punto está típicamente localizado entre las dos últimas fases.
- Ubicación y colocación del dispositivo LoRa. Se selecciona la mejor ubicación para el gabinete de plástico que contiene al dispositivo. Esto implica un área despejada en una pared, de preferencia bajo la protección de un techo, y también de una distancia que no exceda los 2 metros del arrancador.
- Ubicación para centro de carga del dispositivo LoRa. Se localiza una ubicación para la caja con conexión USB que permite la alimentación del dispositivo (Figura 3.32 Caja de alimentación del dispositivo LoRa). La alimentación se toma del cableado presente en la caseta o el lugar de la instalación (en caso de ser de 220, se usa una sola fase).

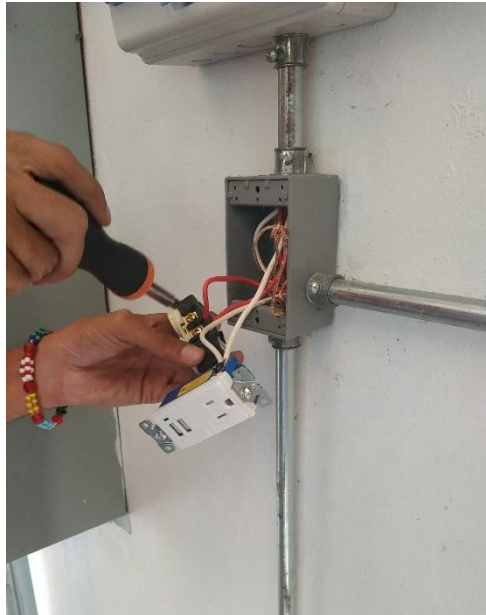


Figura 3.32 Caja de alimentación del dispositivo LoRa

## 2. Montaje y conexión del dispositivo

Esta etapa requiere realizar las siguientes actividades:

- Colocación del gabinete con el dispositivo LoRa. Esto se realiza normalmente en la caseta donde se encuentra localizado el arrancador (ver Figura 3.33 Localización del gabinete con equipo LoRa (izquierda), izquierda), en el lugar determinado durante la inspección preliminar. Se realizan dos perforaciones y montaje con pijas de una pulgada.
- Conexión al centro de carga. Se conecta un cable USB para alimentar al equipo LoRa.
- Conexión al arrancador. Se conecta un cable calibre 12 al arrancador, entre las fases detectadas en la inspección preliminar (ver Figura 3.33 Localización del gabinete con equipo LoRa (izquierda), derecha). El cable llega a un relevador colocado en el gabinete, el cual está conectado a la entrada/salida número 36 en el equipo LoRa, que es monitoreada por el firmware del dispositivo.



Figura 3.33 Localización del gabinete con equipo LoRa (izquierda) y conexión al arrancador (derecha)

### 3. Montaje y conexión de la antena

Esta etapa consiste en los siguientes pasos:

- El equipo necesita ser equipado con una antena al exterior, para la cual se coloca sobre el muro o caseta, conectada por medio de cable coaxial al equipo LoRa (ver Figura 3.34 Esquema de colocación y conexión de antena al equipo LoRa cliente).
- La antena se fija en un soporte, que típicamente es un tubo de PVC rígido, de altura aproximada de 1.5 mts. El cable se coloca por dentro del tubo desde la antena, hasta llegar a su conexión en el equipo LoRa.
- El cable y el soporte se fijan con grapas o abrazaderas, de acuerdo con el diámetro de cada uno.

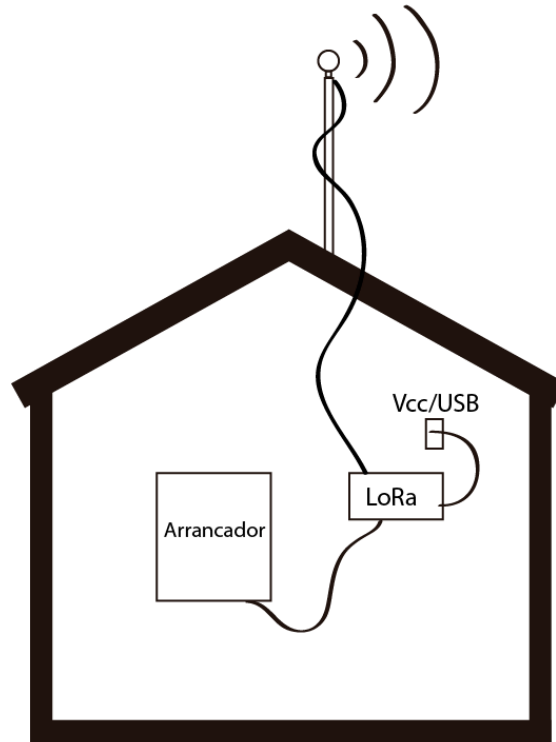


Figura 3.34 Esquema de colocación y conexión de antena al equipo LoRa cliente

### 3.5.2. Proceso general de instalación de los dispositivos LoRa configuración puerta de enlace

El proceso de instalación de los dispositivos LoRa tipo puerta de enlace se realiza en tres etapas:

#### 1. Inspección preliminar (ubicación de gabinete y centro de carga)

Esta etapa requiere realizar las siguientes actividades:

- Determinación de la ubicación física de la puerta de enlace. La localización de la puerta de enlace estará en función del tipo de conexión a utilizar para transmitir los datos al servidor http que realizará la recepción de datos del tiempo de funcionamiento de los equipos. El tipo de conexión será la que favorezca la transmisión de datos, siendo típicamente en campo por medio de modem GSM y en donde haya alcance, un enlace WiFi. Así, en el primer caso el equipo se ubica dentro de la caseta donde está el arrancador, con una antena que garantiza el enlace GSM, y en el segundo en una oficina al alcance de una señal WiFi.
- Ubicación y colocación del dispositivo LoRa. Se selecciona la mejor ubicación para el gabinete de plástico que contiene al dispositivo. Esto implica un área despejada en una pared, de preferencia bajo la protección de un techo.
- Ubicación para centro de carga del dispositivo LoRa. Se ubica un lugar para la caja con conexión USB que permite la alimentación del dispositivo (Figura 3.32). La alimentación

se toma del cableado presente en la caseta o el lugar de la instalación (en caso de ser de 220, se usa una sola fase).

## 2. Montaje y conexión del dispositivo

Esta etapa requiere realizar las siguientes actividades:

- Colocación del gabinete con el dispositivo LoRa y el modem GSM (Figura 3.35). Esto se realiza normalmente en la caseta donde se encuentra localizado el arrancador (Figura 3.36), en el lugar determinado durante la inspección preliminar. Se realizan dos perforaciones y montaje con pijas de una pulgada.
- Conexión al centro de carga. Se conecta un cable USB para alimentar al equipo LoRa.

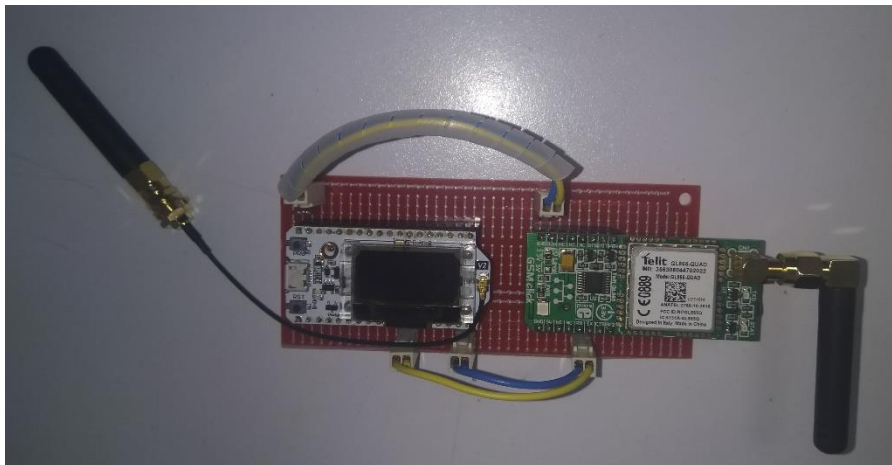


Figura 3.35 LoRa y el modem GSM



Figura 3.36 Localización del gabinete con equipo LoRa y el modem

### 3. Montaje y conexión de la antena

Esta etapa consiste en los siguientes pasos:

- El equipo necesita ser equipado con una antena al exterior, para la cual se coloca sobre el muro o caseta, conectada por medio de cable coaxial al equipo modem GSM conectado al equipo LoRa (ver Figura 3.37). En caso de que el mismo equipo funcione como cliente, se requiere la antena adicional para el equipo LoRa.
- La antena al modemo GSM se fija en un soporte, que típicamente es un tubo de PVC rígido, de altura aproximada de 1.5 mts. El cable se coloca por dentro del tubo desde la antena, hasta llegar a su conexión al módem. La otra antena puede ir en el interior.
- El cable y el soporte se fijan con grapas o abrazaderas, de acuerdo con el diámetro de cada uno.

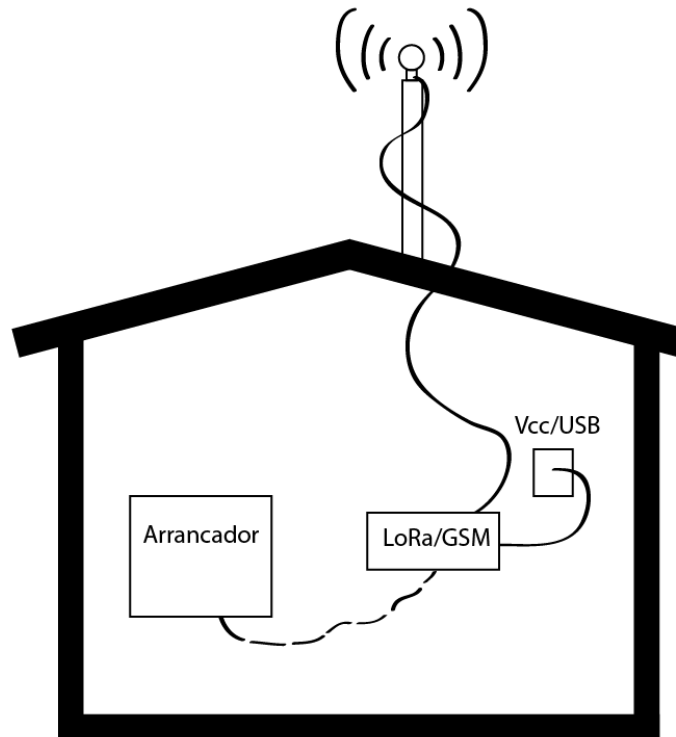


Figura 3.37 Esquema de colocación y conexión de antena al equipo LoRa puerta de enlace

Cabe señalar, que dependiendo de su configuración (como cliente, puerta de enlace o ambas), el dispositivo LoRa puede requerir dos antenas, pues una es utilizada para el servicio de radiofrecuencia, y otra es para el servicio de comunicación satelital GSM, que permite el envío de datos hacia el servidor http que pondrá a disposición la información por su aplicación en Internet.

### 3.5.3. Instalación del equipo LoRa en el sistema de bombeo IMTA

Las características de este sistema de bombeo se describieron en la sección 3.3.1 de este documento. Dada la existencia de un medidor volumétrico digital previamente instalado en este sistema, al equipo LoRa le fue conectado también como entrada los pulsos que permiten la conversión a litros por segundo bombeados, por lo que el dispositivo reporta tres datos, el tiempo de funcionamiento de la bomba, los pulsos monitoreados y el tiempo transcurrido asociado a los pulsos monitoreados. A continuación se describe la instalación del equipo LoRa como cliente y puerta de enlace en el IMTA.

#### 3.5.3.1. Instalación del dispositivos LoRa cliente en el IMTA

En el pozo IMTA, se inició la instalación revisando las fases correspondientes de voltaje, esto con la finalidad de ubicar la correcta para el equipo de monitoreo (Figura 3.41). Una vez definido, se procedió a la colocación del gabinete perforando la pared con un taladro para dejarlo fijo (Figura 3.38). Para la colocación del centro de alimentación USB, se dispuso de una chalupa con tapa fijada a la pared, por lo cual se hicieron las perforaciones correspondientes y su colocación posterior cerca

del gabinete (Figura 3.39). El dispositivo LoRa se colocó dentro del gabinete, y de él se conectan cuatro cables: uno del relevador hacia al arrancador, otro hacia la conexión a tierra en el gabinete (Figura 3.40), otro hacia la alimentación USB y finalmente otro hacia la antena. La antena fue instalada sobre la caseta (Figura 3.42) buscando el mejor ángulo de vista abierta. Teniendo toda la parte eléctrica conectada con el hardware, se procedió a la programación del LoRa con el código correspondiente desde el compilador de Arduino, dejándolo finalmente en funcionamiento (Figura 3.43).



Figura 3.38 Colocación gabinete



Figura 3.39 Colocación de centro alimentador USB

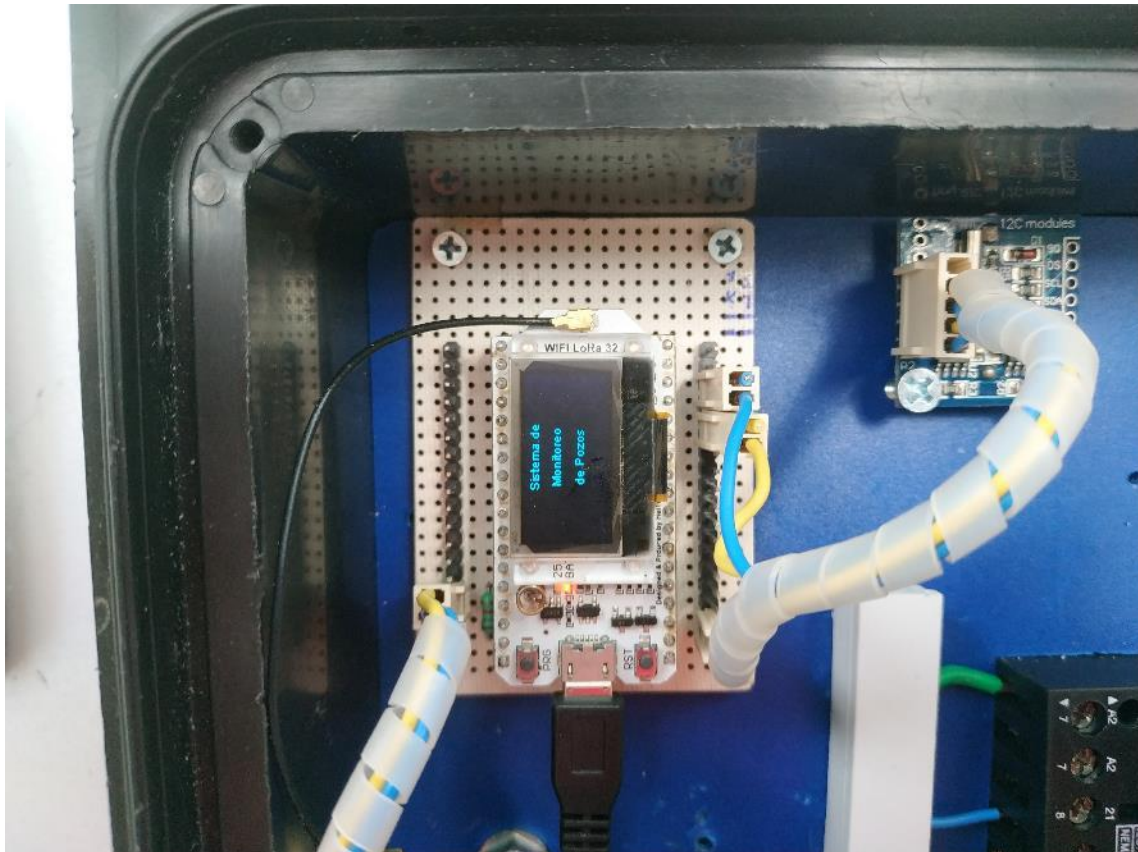


Figura 3.40 Colocación LoRa



Figura 3.41 Conexión arrancador-LoRa



Figura 3.42 Colocación antena



Figura 3.43 Equipo en funcionamiento

### 3.5.3.2. Instalación del dispositivo LoRa puerta de enlace en el IMTA

La instalación de la puerta de enlace quedó ubicada en la oficina del tecnólogo responsable para el monitoreo del mismo, dentro de una caja acondicionada para su cuidado del LoRa (Figura 3.44). La antena correspondiente quedó afuera de la oficina (Figura 3.45) para una mejor recepción de datos desde el pozo IMTA. Su alimentación se deja con un cargador tipo cubo usb conectado directo a corriente alterna de 120 v.

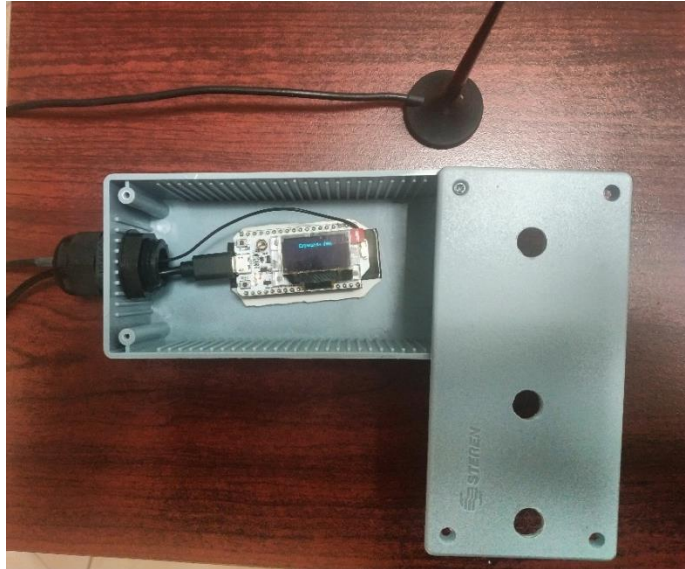


Figura 3.44 Colocación LoRa en el gabinete (configuración puerta de enlace)



Figura 3.45 Colocación antena

### **3.5.4. Instalación del equipo LoRa en tres sistemas de bombeo del acuífero Tepalcingo-Axochiapan**

Para la instalación de los dispositivos LoRa en los tres sistemas de bombeo seleccionados, se midieron las distancias en línea recta tomando como referencia la ubicación de la caseta donde serían instalados los dispositivos. Esto se realizó usando la herramienta Google Earth Pro (ver Figura 3.46). De las medidas obtenidas, se detectó que el pozo 1 está localizado a 1.7 km del pozo 27, y a 2.12 km del pozo 22, mientras que entre el pozo 27 y el 22 hay 640 metros. Dadas las pruebas realizadas en el IMTA, se había detectado que el dispositivo LoRa ya presentaba problemas de comunicación a los 500 mts (con muros y árboles de por medio), por lo que se optó por montar un cliente y puerta de enlace en el pozo #1, una cliente y una puerta de enlace en el pozo #22, y un cliente que se comunica con el pozo #22 en el pozo #27. En total, se requirieron 5 dispositivos LoRa para comunicar los tres sistemas de bombeo.



Figura 3.46 Distancias entre sistemas de bombeo del acuífero Tepalcingo-Axochiapan

Los dispositivos LoRa fueron instalados en los pozos identificados como 1, 22 y 27, cuya localización y caracterización se realizó en la sección 3.5.5, 3.5.6 y 3.5.7.

### 3.5.5. Instalación del equipo LoRa cliente en el sistema de bombeo Pozo 1

En el pozo 1, se inició la instalación revisando las fases correspondientes de voltaje esto con la finalidad de ubicar la correcta para el equipo de monitoreo (Figura 3.47). Una vez definido, se procedió a la colocación del gabinete perforando la pared con un taladro para dejarlo fijo (Figura 3.48). Para la colocación del centro de alimentación USB, se dispuso de una chalupa con tapa fijada a la pared, por lo cual se hicieron las perforaciones correspondientes y su colocación posterior cerca

del gabinete (Figura 3.49). El dispositivo LoRa se colocó dentro del gabinete, y de él se conectan cuatro cables: uno del relevador hacia al arrancador, otro hacia la conexión a tierra en el gabinete (Figura 3.51), otro hacia la alimentación USB y finalmente otro hacia la antena. La antena fue instalada sobre la caseta buscando el mejor ángulo de vista abierta. Teniendo toda la parte eléctrica conectada con el hardware, se procedió a la programación del LoRa con el código correspondiente desde el compilador de Arduino, dejándolo finalmente en funcionamiento (Figura 3.52).

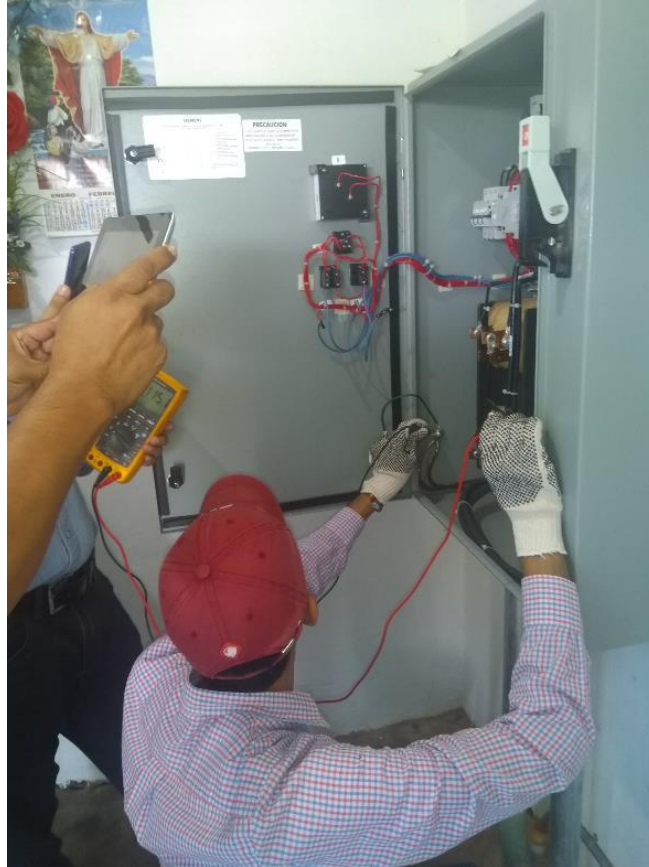


Figura 3.47 Inspección de fases



Figura 3.48 Colocación gabinete



Figura 3.49 Colocación de centro alimentador USB



Figura 3.50 Colocación LoRa



Figura 3.51 Conexión arrancador-LoRa



Figura 3.52 Equipo en funcionamiento

### 3.5.6. Instalación del equipo LoRa cliente en el sistema de bombeo Pozo 22

En el pozo 22, se inició la instalación revisando las fases correspondientes de voltaje esto con la finalidad de ubicar la correcta para el equipo de monitoreo (Figura 3.53). Una vez definido, se procedió a la colocación del gabinete perforando la pared con un taladro para dejarlo fijo (Figura 3.54). Para la colocación del centro de alimentación USB, se dispuso de una chalupa con tapa fijada a la pared, por lo cual se hicieron las perforaciones correspondientes y su colocación posterior cerca del gabinete (Figura 3.55). El dispositivo LoRa se colocó dentro del gabinete, y de él se conectan cuatro cables: uno del relevador hacia al arrancador, otro hacia la conexión a tierra en el gabinete (Figura 3.57), otro hacia la alimentación USB y finalmente otro hacia la antena. La antena fue instalada sobre la caseta buscando el mejor ángulo de vista abierta. Teniendo toda la parte eléctrica conectada con el hardware, se procedió a la programación del LoRA con el código correspondiente desde el compilador de Arduino, dejándolo finalmente en funcionamiento (Figura 3.59).



Figura 3.53 Inspección de fases



Figura 3.54 Colocación gabinete



Figura 3.55 Colocación de centro alimentador USB



Figura 3.56 Colocación LoRa



Figura 3.57 Conexión arrancador-LoRa



Figura 3.58 Colocación de antena



Figura 3.59 Equipo en funcionamiento

### 3.5.6.1. Medidor volumétrico instalado en el sistema de bombeo pozo 22

Durante la visita a campo, se detectó la instalación de equipos de medición en el tren de descarga que no estaban en operación, indagando las causas se comentó por parte de los usuarios que las empresas que realizaban el mantenimiento tuvieron problemas con la adquisición de las baterías para los equipos por lo que optaron por instalar otros medidores de gasto.

Para revisar el equipo en cuestión, se desinstaló y se trasladó al IMTA.

El equipo instalado es del modelo SDI1D1B21-0200, Serie SDI-B21-001266 (Figura 3.61).



Figura 3.60 Modelo de medidor SDI pozo no. 22

La imagen de un modelo más reciente corresponde a la siguiente:

Extraído de su hoja de especificaciones, este modelo tiene solo 1 año de garantía (Figura 3.61).

<b>SPECIFICATIONS</b>	
<b>Recommended Design Flow Range</b>	0.3 to 20 ft./sec
<b>Pressure Rating</b>	1000 psi @ 21°C (70°F)
<b>Maximum Temp Rating</b>	135°C (300°F)
<b>Operating Temperature</b>	Electronics: 20° to 65°C (14° to 150°F)
<b>Pressure Drop</b>	0.5 psi or less @ 10 ft/sec for all pipe sizes 1.5" dia and up
<b>Accuracy</b>	±1% of rate over optimum flow range*
<b>Repeatability</b>	±0.5%

\*  $\geq 10$  upstream and  $\geq 5$  downstream straight pipe diameters, uninterrupted flow.



Figura 3.61. Especificaciones del medidor SDI pozo no. 22

Las dimensiones del medidor corresponden al indicado en el siguiente diagrama (Figura 3.62):

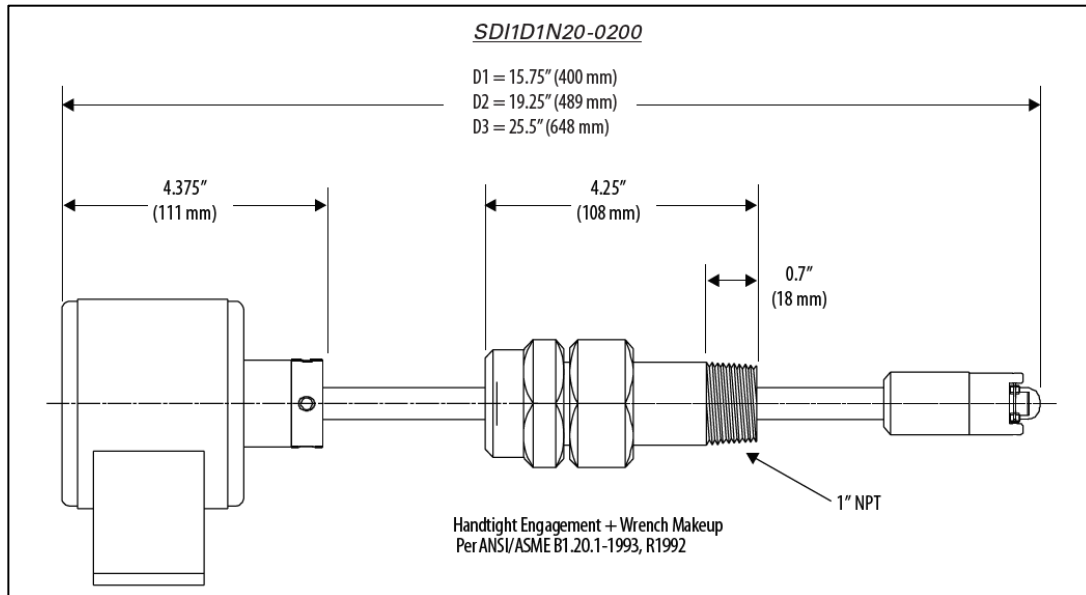


Figura 3.62. Dimensiones del medidor SDI en pozo no.22

**Funcionamiento**

El medidor consta de varios elementos: el alojamiento (Housing), el eje, la fijación y el sensor de flujo (Figura 3.63):

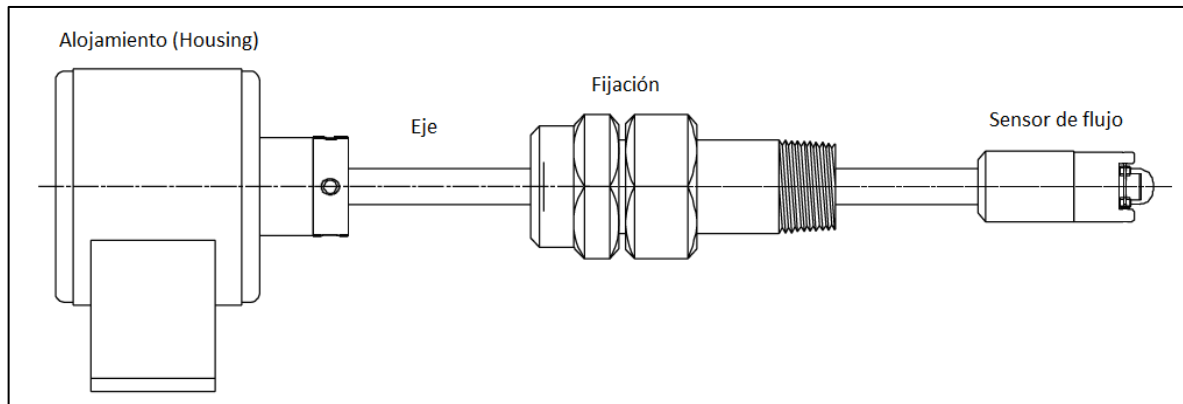


Figura 3.63. Elementos medidor SDI pozo no. 22

- El alojamiento permite contiene el display y la electrónica del equipo.



Figura 3.64. Display digital medidor SDI pozo no. 22

Como se puede observar, permite visualizar el gasto instantáneo y el volumen acumulado, además de mostrar un led de advertencia por bajo voltaje de la batería.

El equipo debe de estar alineado al tubo para una correcta medición.

- El elemento de fijación permite colocar el equipo en el tren de descarga del pozo, la tuerca y contratuerca fijan a la distancia requerida al sensor de flujo.

- Sensor de flujo, incluye un elemento que al ser empujado por el agua gira libremente sobre su eje, el cual se detecta enviando una señal eléctrica y al cuantificarlas permite determinar el flujo en el conducto en el que se encuentra instalado. Este equipo debe de instalarse con este sensor justo a la mitad del tubo, permitiendo medir la velocidad máxima.



Figura 3.65. Sensor de flujo medidor SDI pozo no. 22

- El modelo B1 contiene además un emisor para enviar la información almacenada en el sensor.



Figura 3.66. Emisor del medidor SDI pozo no. 22

- El eje, contiene los cables que conectan del sensor de flujo al Housing además que le da rigidez al equipo.

La Figura 3.67 presenta un resumen de características del medidor SDI encontrado en el pozo no. 22

Matriz de características de equipos SDI operados con baterías											
	SDI	0	D1	B	N	1	-	0	2	0	0
<b>Material</b>											
Acero inoxidable		0									
Latón		1									
Acero inoxidable		2									
<b>Tipo</b>											
Insertado directo al tubo de 1-1/2" hasta 10"			D1								
Insertado directo al tubo de 12" hasta 36"									D2		
Insertado directo al tubo mayor a 36"										D3	
<b>Carcasa electrónica</b>											
Alimentación por batería (2 AA)				B							
<b>Salida</b>											
Sin salida					N						
Escala de pulsos						2					
<b>Pantalla</b>											
Opción LCD						1					
Pantalla remota/NEMA 4X							2				
<b>Junta</b>											
Viton®										0	
<b>Eje</b>											
Carbuo de tungsteno											2
Hastelloy®											1
Cerámica de zirconia											0
<b>Impulsor</b>											
Acero inoxidable											0
<b>Rodamiento</b>											
Torlon®											0

Figura 3.67. Matriz de características de equipos SDI operados con baterías

## **Instalación**

La instalación de este tipo de sensores debe realizarse bajo condiciones de presión = 0, es decir, sin que el equipo de bombeo se encuentre funcionando. La exactitud de la medición para todos los dispositivos de medición de este tipo depende de la ubicación correcta del sensor en el sistema de tubería. La presencia de válvulas, accesorios, curvas, etc., generarán un flujo irregular turbulento que originará mediciones inexactas aunque precisas de la velocidad del flujo. El sensor no debe verse afectado por burbujas de aire, es decir debe de trabajar a tubo lleno, la presencia de escombros o sedimentos podría dañarlo y dar resultados incorrectos.

Los sensores de flujo Badger® Data Industrial® están diseñados para funcionar de manera confiable en condiciones adversas, pero se deben seguir las siguientes recomendaciones de instalación para garantizar la máxima precisión del sistema:

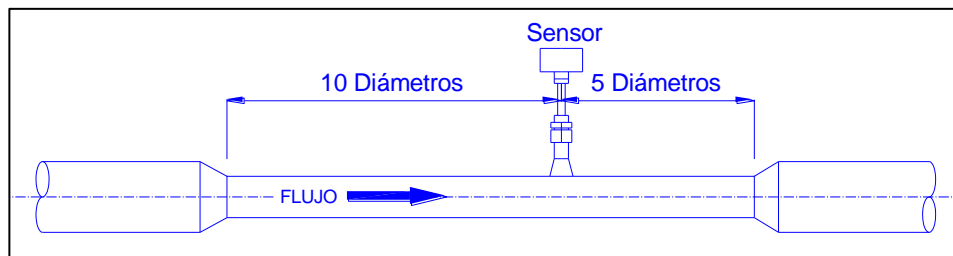


Figura 3.68. Especificaciones para instalación del medidor SDI

- 10 veces el diámetro interior aguas abajo de cualquier dispositivo, contracción o curva que causen alguna perturbación en el flujo.
- 5 veces el diámetro interior aguas arriba de cualquier dispositivo, contracción o curva que modifiquen el flujo en el ducto.
- La localización del impulsor o sensor de flujo debe de quedar precisamente en el mismo en que fue calibrado el dispositivo de fábrica, para que de la precisión y exactitud adecuadas.

### **3.5.7. Instalación del equipo LoRa en el sistema de bombeo Pozo 27**

En el pozo 27, se inició la instalación revisando las fases correspondientes de voltaje esto con la finalidad de ubicar la correcta para el equipo de monitoreo (Figura 3.69). Una vez definido, se procedió a la colocación del gabinete perforando la pared con un taladro para dejarlo fijo (Figura 3.70). Para la colocación del centro de alimentación USB, se dispuso de una chalupa con tapa fijada a la pared, por lo cual se hicieron las perforaciones correspondientes y su colocación posterior cerca

del gabinete (Figura 3.71). El dispositivo LoRa se colocó dentro del gabinete, y de él se conectan cuatro cables: uno del relevador hacia al arrancador, otro hacia la conexión a tierra en el gabinete (Figura 3.73), otro hacia la alimentación USB y finalmente otro hacia la antena. La antena fue instalada sobre la caseta buscando el mejor ángulo de vista abierta. Teniendo toda la parte eléctrica conectada con el hardware, se procedió a la programación del LoRa con el código correspondiente desde el compilador de Arduino, dejándolo finalmente en funcionamiento (Figura 3.74).

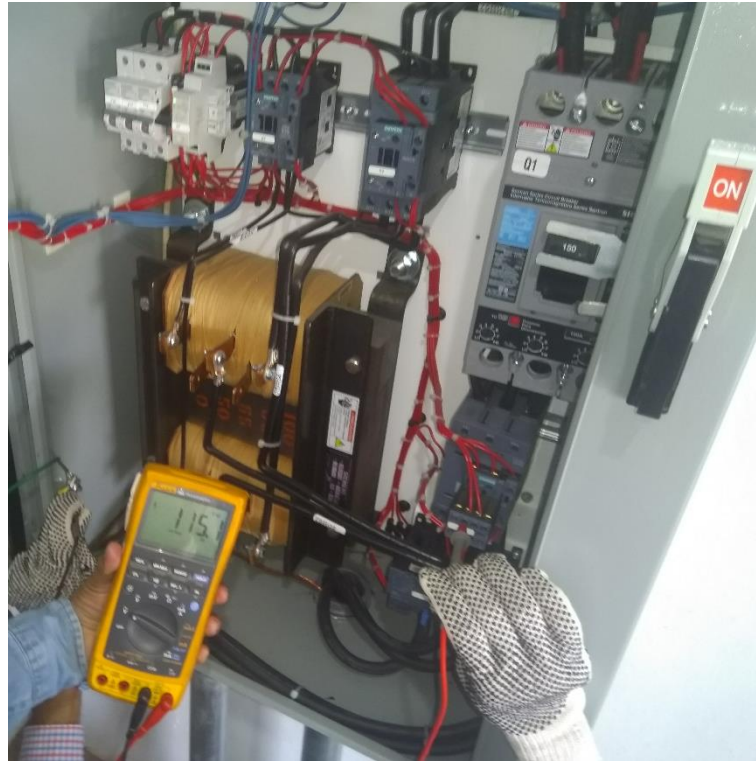


Figura 3.69. Inspección de fases



Figura 3.70. Colocación gabinete



Figura 3.71. Colocación de centro alimentador USB



Figura 3.72. Colocación LoRa



Figura 3.73. Conexión arrancador-LoRa



Figura 3.74. Equipo en funcionamiento

### 3.5.8. Instalación del dispositivo LoRa puerta de enlace en el acuífero Tepalcingo-Axochiapan

En el pozo 1, se inició la instalación revisando las fases correspondientes de voltaje esto con la finalidad de ubicar la correcta para nuestro equipo de monitoreo. Una vez definido, se procedió a la colocación del gabinete perforando la pared con un taladro para dejarlo fijo (Figura 3.75). Para la colocación del centro de alimentación USB, se dispuso de una chalupa con tapa fijada a la pared, por lo cual se hicieron las perforaciones correspondientes y su colocación posterior cerca del gabinete. El dispositivo LoRa se colocó dentro del gabinete, y de él se conectan cuatro cables: uno del relevador hacia al arrancador, otro hacia la conexión a tierra en el gabinete (Figura 3.76) otro hacia la alimentación USB y finalmente otro hacia la antena, también está el modem GSM. La antena fue instalada sobre la caseta buscando el mejor ángulo de vista abierta. Teniendo toda la parte eléctrica conectada con el hardware, se procedió a la programación del LoRa con el código correspondiente desde el compilador de Arduino, dejándolo finalmente en funcionamiento (Figura 3.77).



Figura 3.75. Colocación de centro alimentador USB

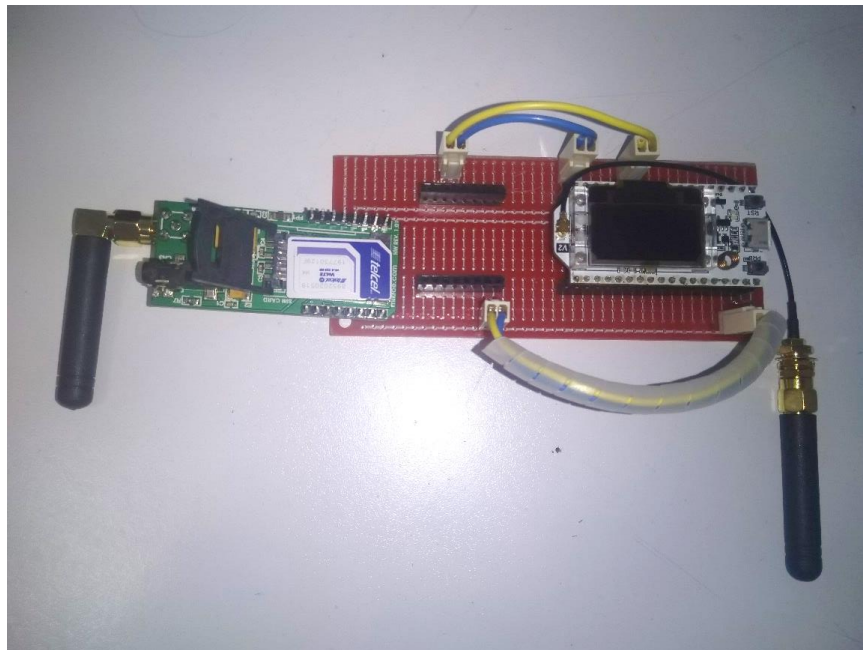


Figura 3.76. Colocación LoRa y modem GSM



Figura 3.77. Colocación de antena



Figura 3.78. Equipo en funcionamiento

### 3.6. Verificación en campo del funcionamiento de los equipos IoT instalados

Durante el desarrollo del proyecto, se realizaron varias salidas a campo para verificar el funcionamiento de los dispositivos instalados. En estas visitas se hicieron mediciones de niveles, captura de datos y recopilación de información de las unidades de riego donde se instalaron los dispositivos. Para validar el funcionamiento de los dispositivos LoRa, se hicieron pruebas de encendido y apagado de los sistemas de bombeo, cotejando que se detectaran dichos movimientos. En estas pruebas, los equipos trabajaron de manera satisfactoria, reportando los encendidos y apagados en la pantalla LCD de los dispositivos. La verificación se hizo durante el mes de octubre.

Los dispositivos se terminaron de instalar y de probar a principios de octubre, con la intención de iniciar el monitoreo con los riegos que inician en este mes, esto de acuerdo con el ciclo de siembra otoño-invierno. No obstante, la temporada de lluvias se extendió, por lo que dicho monitoreo fue desfazado, y no alcanzó a ser incluido en este informe. De momento, se cuenta únicamente con las lecturas reportadas desde el pozo #1, que es lo que se muestra en la sección de resultados.

## 4. RESULTADOS

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos utilizando el dispositivo IoT para la medición de extracciones subterráneas. Se reportan en primer lugar, las mediciones obtenidas en el sistema de bombeo del pozo localizado en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Respecto a los sistemas de bombeo localizados en el acuífero Tepalcingo-Axochiapan, se hace la observación que, debido a que la temporada de lluvias se prolongó, los sistemas de bombeo de los pozos no. 22, y no. 27 iniciaron sus riegos de forma tardía, por lo que en el momento de escritura de este informe se contó únicamente con los registros obtenidos en el pozo no. 1 (ver sección 3.5.5). Finalmente, se realiza un análisis del potencial de la aplicación de la metodología desarrollada en las unidades de riego del estado de Chihuahua.

### 4.1. Registros de mediciones en el sistema de bombeo del pozo IMTA

La Tabla 4.1 Registros de mediciones de consumos volumétricos en el Pozo IMTA muestra un resumen de registros de mediciones obtenidas con el dispositivo LoRa, su conversión a litros y su comparación con el dato registrado en el medidor volumétrico instalado en el sistema de bombeo del IMTA. La columna 2 muestra la fecha y hora de inicio del bombeo, y la columna 3 el tiempo de funcionamiento, ambas registradas por el dispositivo LoRa. Las columnas 4 y 5 muestran la lectura obtenida en el medidor volumétrico instalado de forma permanente en el sistema de bombeo, al inicio y al final del ciclo de bombeo. La columna 6 muestra el dato del volumen cuantificado por el medidor volumétrico, una vez que se ha realizado su conversión a litros. La columna 7 presenta la estimación dada la medición del tiempo de funcionamiento realizada por el dispositivo LoRa, usando para esto la estimación el dato del caudal obtenido con medidor ultrasónico, que fue de 18.26 l/s.

Para obtener un indicador de la eficiencia de la estimación usando el tiempo de funcionamiento, en este trabajo se utilizó el resultado del cociente del valor estimado entre el valor real (ecuación 2), multiplicando dicho resultado por 100 para expresarlo como porcentaje. En la medida que este valor se acerca a 100, indica una estimación más precisa. Si el valor es superior, el valor está sobreestimado, y si es inferior, entonces se trata de una subestimación. La diferencia del valor respecto a 100 en términos absolutos arroja una magnitud del error. Este indicador es mostrado en la última columna de la Tabla 4.1; su conversión a error absoluto se muestra en la Tabla 4.2.

$$Eficiencia = \frac{Volumen\ estimado\ LoRa}{Volumen\ medido} \times 100 \quad ( 2 )$$

Los resultados de la eficiencia de estimación (Tabla 4.1), indican que, en el peor de los casos, la multiplicación directa del gasto por el tiempo de funcionamiento subestima el volumen extraído en

un 24.22 %, y lo sobreestima en un 27.01%. En el mejor de los casos, la subestimación fue del 10.53%, y la sobreestimación del 1.68%. Sumando el volumen total extraído en todos los períodos (medido in situ), se observa que el error respecto a la estimación es de 2.76%. Se observa que, en este caso, el valor tiende a ser subestimado.

Tabla 4.1 Registros de mediciones de consumos volumétricos en el Pozo IMTA

(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	
No.	Fecha-Hora Inicio	Tiempo de funcionamiento (minutos)	Medición Inicial en medidor (m <sup>3</sup> )	Medición Inicial en medidor (m <sup>3</sup> )	Consumo medidor (litros)	Consumo estimado LoRa (litros)	Eficiencia de estimación (estimado/real x 100) (%)
1	26/11/2019 11:12	198.85	192982	193226	244,000.00	218,102.34	89.39
2	27/11/2019 10:08	241.45	193226	193522	296,000.00	264,826.02	89.47
3	28/11/2019 14:36	212.30	193522	193751	229,000.00	232,850.64	101.68
4	03/12/2019 10:31	273.29	194680	194916	236,000.00	299,740.82	127.01
5	04/12/2019 17:50	242.50	194916	195267	351,000.00	265,977.66	75.78
6	05/12/2019 15:11	207.77	195267	195488	221,000.00	227,878.48	103.11
7	09/12/2019 11:07	233.65	196268	196490	222,000.00	256,270.98	115.44
8	10/12/2019 10:17	250.49	196490	196734	244,000.00	274,733.78	112.60
9	11/12/2019 14:50	234.16	196734	197022	288,000.00	256,830.34	89.18
10	13/12/2019 10:56	293.07	197475	197837	362,000.00	321,439.18	88.80
<b>Total</b>					2,693,000	2,618,650.22	97.24

Tabla 4.2 Determinación del error por medición en el Pozo IMTA

Fecha	Eficiencia estimación (volumen estimado/volumen real x 100) (%)	Error absoluto (%)
26/11/2019	89.39	10.61
27/11/2019	89.47	10.53
28/11/2019	101.68	*1.68
03/12/2019	127.01	*27.01
04/12/2019	75.78	24.22
05/12/2019	103.11	*3.11
09/12/2019	115.44	*15.44
10/12/2019	112.60	*12.6
11/12/2019	89.18	10.82
13/12/2019	88.80	11.20
<b>Total</b>	97.24	2.76

La Figura 4.1 muestra la estimación comparada de manera gráfica contra el volumen real medido in situ. La línea gris resalta la eficiencia de la estimación, mostrando que dicho indicador es muy variable, siendo su promedio de 99.24, y su desviación estándar de 15.59.

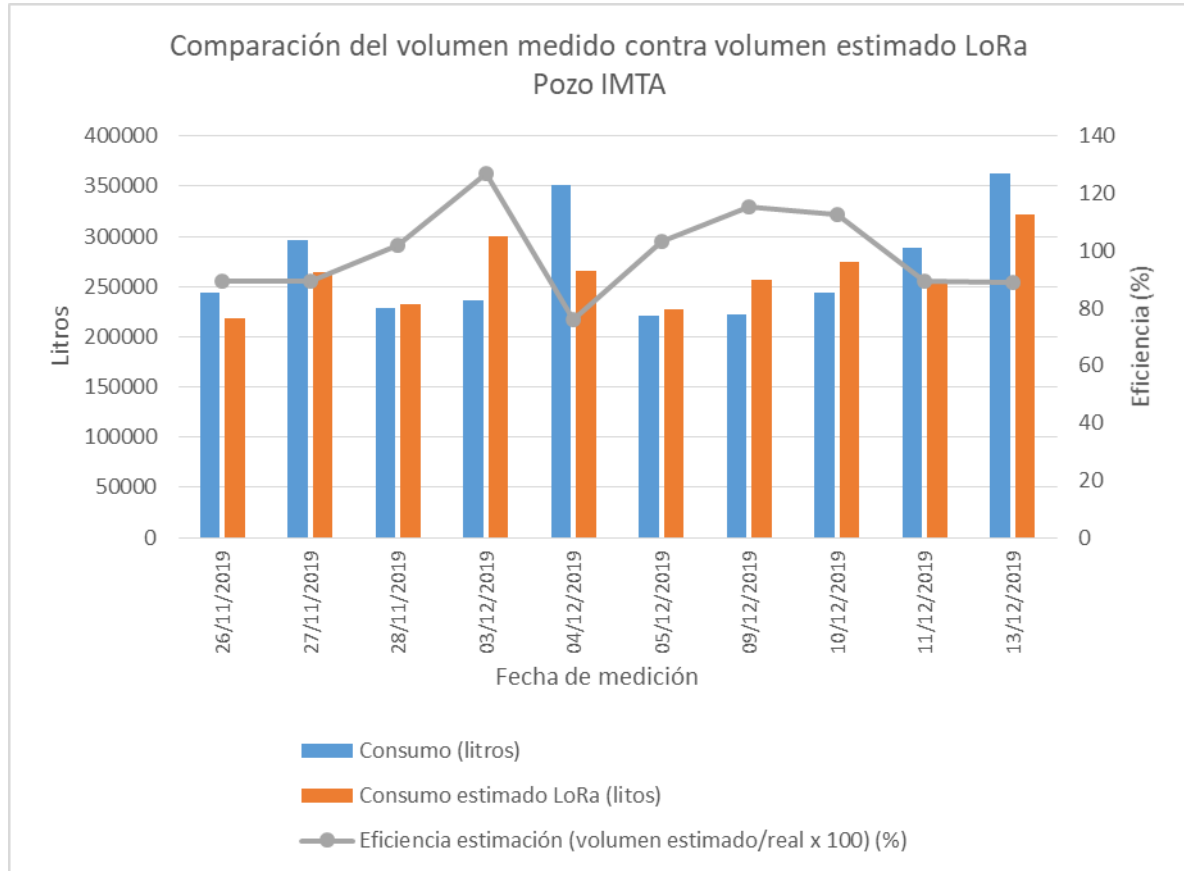


Figura 4.1. Comparación del volumen medido contra la estimación usando dispositivo LoRa en el IMTA

## 4.2. Registros de mediciones en el sistema de bombeo del pozo no. 1 en Tepalcingo-Axochiapan

Las mediciones obtenidas con el dispositivo LoRa fueron comparadas contra el dato registrado en el medidor volumétrico instalado en el sistema de bombeo del pozo 1, localizado entre los municipios de Tepalcingo y Axochiapan. Para hacer la comparación, se le solicitó al productor que llevara una bitácora detallada de las horas de encendido y apagado de la bomba, esto durante el tiempo de ejecución del proyecto. No obstante, no todos los registros manuales resultaron confiables, pues en algunos casos los números fueron ilegibles o inconsistentes. Del mes de octubre que estuvo en funcionamiento el pozo, se obtuvieron 14 observaciones, las cuales son mostradas en la Tabla 4.3. De esta tabla, la columna 2 muestra la fecha y hora de inicio del bombeo, y la columna 3 el tiempo de funcionamiento, ambas registradas por el dispositivo LoRa. Las columnas 4 y 5 muestran la lectura obtenida en el medidor volumétrico instalado de forma permanente en el

sistema de bombeo, al inicio y al final del ciclo. La columna 6 muestra el dato del volumen cuantificado por el medidor volumétrico, una vez que se ha realizado su conversión a litros. La columna 7 presenta la estimación dada la medición del tiempo de funcionamiento realizada por el dispositivo LoRa, usando para esto la estimación el dato del caudal obtenido con medidor ultrasónico, que fue de 54 l/s.

Tabla 4.3 Registros de mediciones de consumos volumétricos en el Pozo 1 Tepalcingo-Axochiapan

	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
No.	Fecha-Hora Inicio	Tiempo de funcionamiento (minutos)	Medición Inicial en medidor (m <sup>3</sup> )	Medición Inicial en medidor (m <sup>3</sup> )	Consumo medidor (litros)	Consumo estimado LoRa (litros)	Eficiencia de estimación (estimado/real x 100) (%)
1	01/10/2019 07:12	270.03	85,487.00	86,367	880,000	874,908.00	99.42
2	05/10/2019 07:19	20.52	85,802.00	85,862	60,000	66,474.00	110.79
3	06/10/2019 08:04	20.85	85,808.00	85,878	70,000	67,554.00	96.51
4	07/10/2019 08:44	15.77	85,815.00	85,875	60,000	51,084.00	85.14
5	10/10/2019 07:52	710.03	86,336.00	88,436	2,100,000	2,300,508.00	109.55
6	11/10/2019 08:14	660.68	86,546.00	88,636	2,090,000	2,140,614.00	102.42
7	12/10/2019 06:55	770.65	86,755.00	89,095	2,340,000	2,496,906.00	106.71
8	13/10/2019 07:27	765.53	86,989.00	89,579	2,590,000	2,480,328.00	95.77
9	15/10/2019 07:04	750.38	87,457.00	89,907	2,450,000	2,431,242.00	99.23
10	16/10/2019 07:09	595.17	87,702.00	89,522	1,820,000	1,928,340.00	105.95
12	17/10/2019 08:06	15.52	88,026.00	88,076	50,000	50,274.00	100.55
13	20/10/2019 08:14	405.95	88,031.00	89,361	1,330,000	1,315,278.00	98.89
14	21/10/2019 07:19	320.57	88,164.00	88,964	800,000	1,038,636.00	129.83
<b>Tota</b>						17,242,146	103.62

Los resultados de la eficiencia de estimación (Tabla 4.4), indican que, en el peor de los casos, la multiplicación directa del gasto por el tiempo de funcionamiento subestima el volumen extraído en un 14.863 %, y lo sobreestima en un 29.8%. En el mejor del caos, la subestimación fue del 0.77%, y la sobreestimación del %0.55. Sumando el volumen total extraído en todos los períodos (medido in

situ), se observa que el error respecto a la estimación es de 3.62%. Se observa que, en este caso, el valor tiende a ser sobreestimado.

Tabla 4.4 Determinación del error por medición en el Pozo IMTA

Fecha	Eficiencia estimación (volumen estimado/volumen real x 100) (%)	Error absoluto (%)
01/10/2019	99.42	0.58
05/10/2019	110.79	*10.79
06/10/2019	96.51	3.49
07/10/2019	85.14	14.86
10/10/2019	109.55	*9.55
11/10/2019	102.42	*2.42
12/10/2019	106.71	*6.71
13/10/2019	95.77	4.23
15/10/2019	99.23	0.77
16/10/2019	105.95	*5.95
17/10/2019	100.55	*0.55
20/10/2019	98.89	1.11
21/10/2019	129.83	*29.83
<b>Total</b>	<b>103.62</b>	<b>*3.62</b>

La Figura 4.2 muestra la estimación comparada de manera gráfica contra el volumen real medido in situ. La línea gris resalta la eficiencia de la estimación, mostrando que dicho indicador es muy variable, siendo su promedio de 103.62, y su desviación estándar de 10.44.

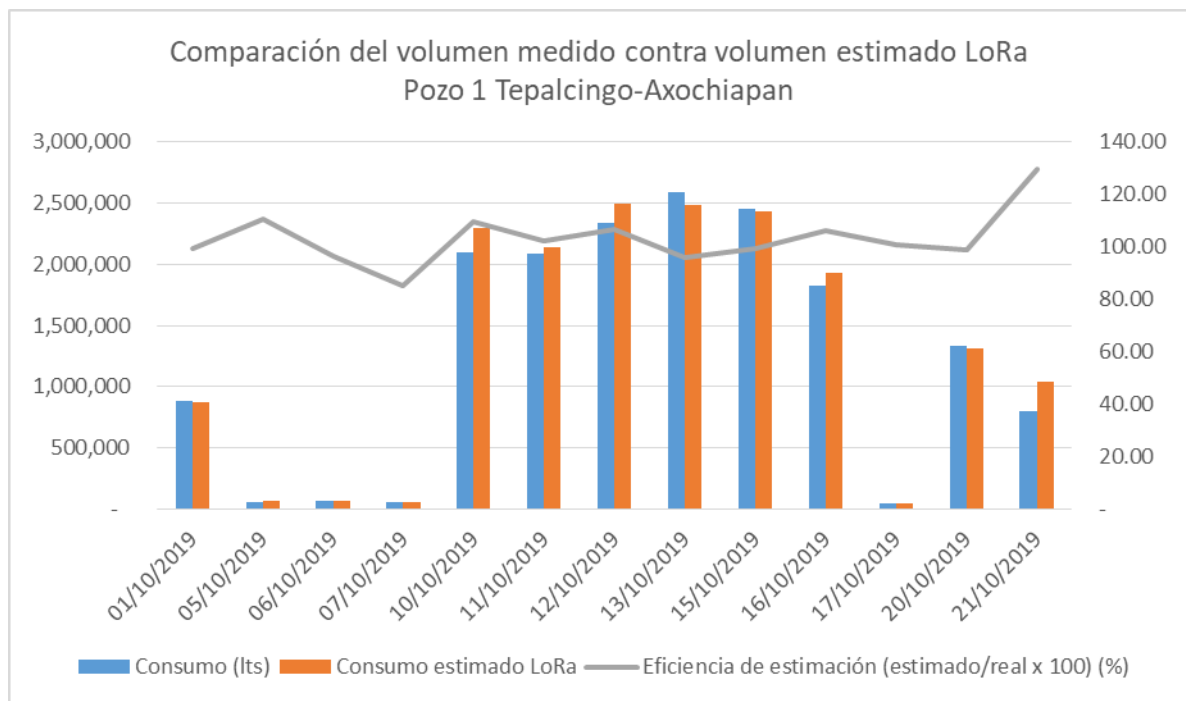


Figura 4.2. Comparación del volumen medido contra la estimación usando dispositivo LoRa en el IMTA

### 4.3. Análisis de costos de instalación del dispositivo LoRa

La Tabla 4.5 muestra los componentes requeridos para el armado de un equipo LoRa como cliente. Los precios corresponden al mes de agosto de 2019. El costo de un equipo LoRa programado como cliente es de \$ 3,536.36. No obstante, es necesario señalar que en esta instalación se asume que ya hay una reducción de voltaje en el lugar de la instalación para alimentar al equipo, y que no se utilizará una batería de resguardo para el caso donde existan fallas en el suministro de energía. En caso contrario será necesario agregar el costo de los componentes adicionales, que son el controlador de carga y la batería, incrementando el costo en \$1,964, resultando en estas condiciones en un costo total de \$5,500.36.

Tabla 4.5 Componentes para la instalación de un equipo LoRa como cliente (precios de agosto 2019)

Cantidad	Descripción	Precio	Subtotal (\$)
1	Heltec Lora Esp32	582.00	582.00
1	Gabinete de plástico	531.90	531.90
1	Eliminador / cargador batería	395.00	395.00
1	Base para Lora	413.70	413.70
3	PVC sintra	45.00	135.00
2	Conector glandula	9.00	18.00
2	Tuerca conector glandula	9.00	18.00
3	Relevador plug-In 8 pines encapsulado 10A 230 VCA	150.90	452.70
3	Base para relevador	170.00	510.00
1	RTC (reloj)	112.00	112.00
1	Header 40 pines ásp 2.54mm	10.00	10.00
12	Cable coaxial (RG58)	22.00	264.00
1	Conector plug SMA RG-58	27.58	27.58
1	Conector Jack SMA RG-58	34.48	34.48
2	Cable cobre calibre 16	16.00	32.00
<b>Total</b>		2,528.56	3,536.36

Tabla 4.6 Componentes para habilitación de batería en la instalación de un equipo LoRa (precios de agosto 2019)

Cantidad	Descripción	Precio	Subtotal (\$)
1	Batería 3.7 v 850 mAh	430.00	430.00
1	Controlador de Carga	1,534.00	1,534.00
<b>Total</b>			1,964.00

En el caso de que el equipo esté configurado como puerta de enlace, será necesario incluir al costo del cliente el costo del modem GSM por el cual dicha puerta de enlace se comunicará con el servidor HTTP que procesa los mensajes (o al servicio en la nube habilitado para la misma

operación). En esta configuración, no se requiere un reloj en tiempo real (RTC), por lo que este costo debe descontarse del total. De esta forma, el costo queda como \$ 4,128.82 (\$ 3,536.36 + \$592.46). En caso de ser requerida la batería y la protección del controlador de carga, se requiere de un costo adicional de 1,962.00 (Tabla 4.7), por lo que el costo total queda como \$6,090.82.

Tabla 4.7 Componentes adicionales para la instalación de un equipo LoRa como puerta de enlace (precios de agosto 2019)

Cantidad	Descripción	Precio	Subtotal (\$)
1	Módem GSM/GPRS 4-BAND	378.4	378.40
12	Cable coaxial (RG58)	22.00	264.00
1	Conector plug SMA RG-58	27.58	27.58
1	Conector Jack SMA RG-58	34.48	34.48
-1	RTC (reloj)	112.00	- 112.00
Total			592.46

A los costos de los equipos, se hará necesario añadir el costo de soldado y ensamble de los componentes, así como la instalación y conexión in situ de los mismos. Estos costos se estiman entre \$2,500 y \$3,500 por equipo, dependiendo de las condiciones encontradas en el lugar de la instalación. Esto no incluye costo de transportación o viáticos. De este modo, el costo del cliente quedaría en \$ 7,036.36 y de la puerta de enlace \$ 7,678.82, esto sin protección de batería. Para el caso de protección con batería, en ambos casos subiría en \$1,964.00, quedando en \$9,000.36 para el cliente y en \$9,642.82 para la puerta de enlace.

Cerrando en un costo aproximado a los \$9,000 por cliente, y de \$9,642 por una puerta de enlace (que puede dar servicio a múltiples clientes), se debe considerar que este costo es menor al de equipar a un sistema de bombeo con un medidor volumétrico y un equipo adquisidor de datos (*data-logger*), ya que el primero varía entre \$ 10,000 a \$40,000 (dependiendo de la tecnología de medición empleada, propela o electromagnetismo), y el segundo, puede costar entre \$6,000 y \$ 30,000 (dependiendo de la marca y otros parámetros), esto sin incluir costos de instalación.

#### 4.4. Potencial de aplicación de la metodología en unidades de riego de Chihuahua

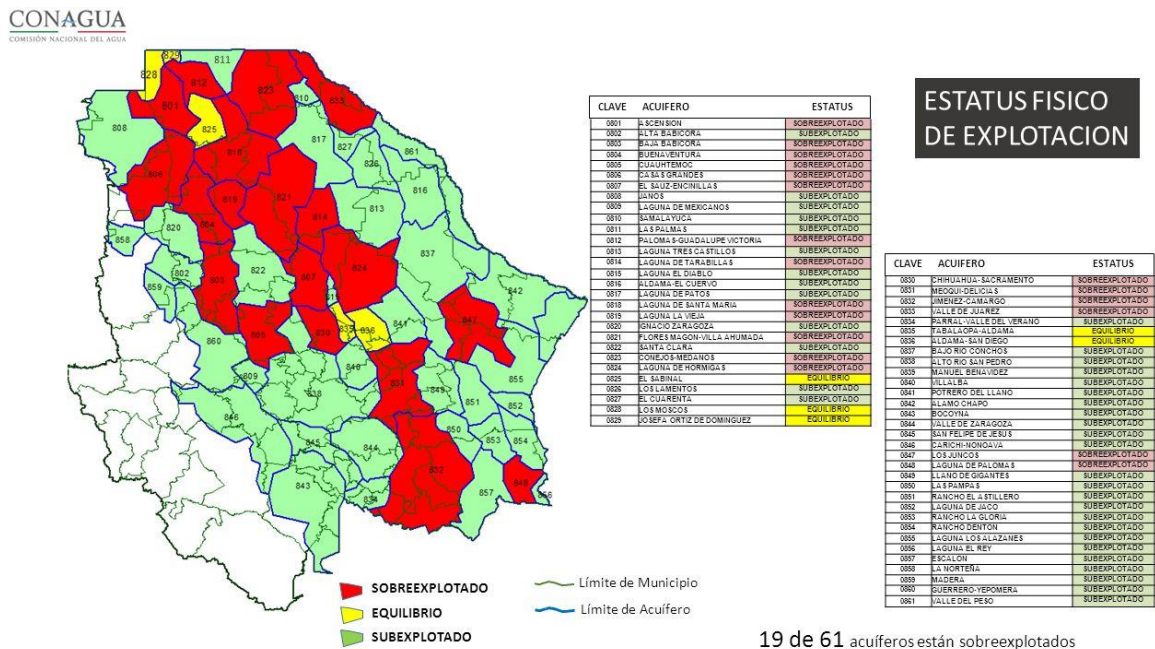
El estado Chihuahua es el estado más grande de la república mexicana, no escapa a la problemática que presentan otras UR de riego del país, por el contrario, por localizarse en una de las regiones más secas del territorio nacional, este problema se multiplica, a grado tal que acuíferos que en el pasado cercano (hace 30 años) eran unos verdaderos vergeles dedicados a la producción de cultivos altamente rentables como el algodón, la alfalfa, frutales como manzana y nogal pecanero y hortalizas, han dejado de serlo y con tristeza observamos que han sido abandonadas porque la fuente de agua de sus acuíferos se han

agotado tal es el caso del acuífero de Juncos y muchos pozos de otros acuíferos como los de Cuauhtémoc y Jiménez-Camargo que no tardarán mucho en secarse.



Figura 4.3. En el acuífero de Cuauhtémoc, los principales cultivos son manzano y maíz amarillo

De los 61 acuíferos que cuenta el estado 19 de ellos se encuentran sobreexplotados desde el año 2015, y con datos y estudios de la CONAGUA y el propio IMTA en la actualidad varios ya alcanzan una categoría crítica y de éstos el acuífero de Laguna de hormigas está en proceso de terminarse.



19 de 61 acuíferos están sobreexplotados

Figura 4.4. En esta figura se presenta el mapa y listado con los acuíferos sobreexplotados en el estado de Chihuahua. Fuente CONAGUA.



Figura 4.5. Los cultivos perennes como la alfalfa y el nogal considerados como de alta demanda, son regados con agua subterránea de pozos agrícolas como en Delicias, Chihuahua y otras regiones semidesérticas como Jiménez y Camargo.

### **Potencial de establecer un sistema alternativo de bajo costo para estimar las extracciones de los acuíferos en Chihuahua.**

Para determinar el potencial de la metodología se obtuvo información de dos de los acuíferos de los 61 existentes en el estado de Chihuahua, Se visitó la Junta Central de Agua Potable de la ciudad de Chihuahua, la Junta municipal de agua potable y alcantarillado de Ciudad Cuauhtémoc, Chihuahua, el Distrito de Riego 005 Delicias Chihuahua. En todas las visitas se expuso la problemática del abatimiento de los acuíferos para riego y agua potable, generada entre otras cosas por el sobre concesionamiento, la competencia desleal de los pozos sin concesión (ilegales) en el mismo acuífero, el tipo de cultivo de alto consumo de agua y las extracciones mayores a la recarga. Se visitaron algunos pozos y el principal problema es que no cuentan con medidores y los que cuentan ya están obsoletos o simplemente descompuestos. Es posible estimar las extracciones de los pozos con la aplicación de la metodología de Internet de las cosas, conociendo el tiempo de funcionamiento del pozo, las características de los equipos de bombeo y el consumo energético.

El potencial general se traduce en los 19 acuíferos sobreexplotados en el estado más los 5 que se encuentran en equilibrio, que dan un total de 23.

Existen muchas posibilidades de poder negociar un proyecto con autoridades del COTAS, la Junta municipal de agua potable y alcantarillado de Ciudad Cuauhtémoc Junta y la junta central de Aguas de Chihuahua para implantarse la tecnología en el acuífero 805 Cuauhtémoc, Chihuahua de la región hidrológica administrativa del Río Bravo y su estatus de recarga según el DOF el 04 de enero de 2018, era cero (SEMARNAT, 2018).

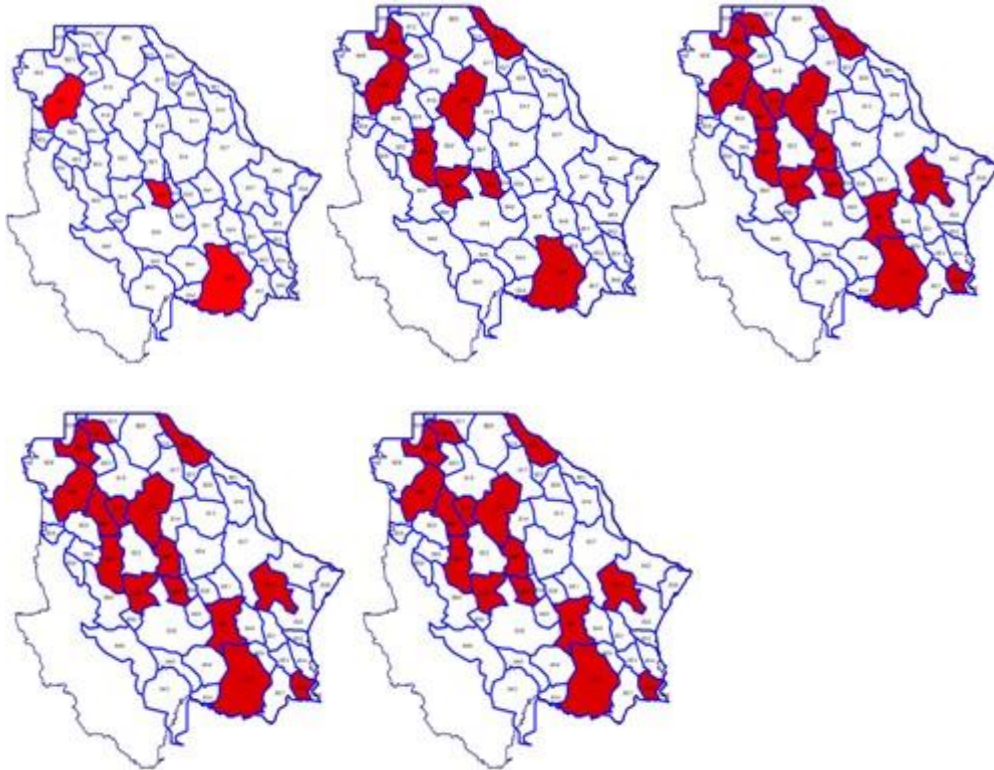


Figura 4.6. Evolución de la sobreexplotación de los acuíferos del estado de Chihuahua reportados hasta el año 2015. Desde 1985 (30 años).

También es posible considerar aplicar la misma metodología en el acuífero 824. Laguna de Hormigas de la Cuenca del Río Bravo y su estatus de recarga según el DOF el 04 de enero de 2018, era cero.

Desde 2003, año en que se publicó en el DOF la primera versión de disponibilidad de los acuíferos de Chihuahua, 15 años a la fecha, todas las concesiones que se han otorgado han sido sin rebasar el volumen disponible para nuevas concesiones. En coordinación con los representantes de los usuarios y otras instituciones gubernamentales, ya se elaboraron 2 planes de manejo de los acuíferos de Cuauhtémoc y de Jiménez-Camargo. Ya no se permite redistribuir el volumen para

reposición en más de un pozo con una sola concesión en aquellos acuíferos que están en estado crítico de sobreexplotación, o en riesgo de deterioro de la calidad del agua.

Se respeta el derecho al agua para consumo humano, para lo cual en todas las ciudades, grandes y medianas, comunidades ejidales y de colonos, así como las rancherías, tendrán garantizado el abastecimiento de agua potable para todos sus habitantes.

Esta situación se está agravando en los acuíferos de: Jiménez-Camargo, Valle de Juárez, Flores Magón-Villa Ahumada, Los Juncos, Meoqui-Delicias, El Sauz-Encinillas, entre otros. Se ha duplicado la superficie de cultivos perennes como el nogal y la alfalfa (Fuente: Portal de CONAGUA 2019).



Figura 4.7. Pozo agrícola oficial dentro del Módulo de Riego Número Cuatro del DR 005, Delicias, Chihuahua regando alfalfa y nogal.

### Otros usuarios Potenciales de pozos para agua Potable

Se considera que todos aquellos pozos que extraen agua para consumo doméstico que no cuenten con medidor, de los que sobresalen los centros de población como Ciudad Juárez. Sobre los acuíferos 823 Conejos-Médanos, 810 Samalayuca y el 833 Valle de Juárez

La ciudad capital del estado Chihuahua. Sobre los acuíferos 830 Sacramento, 835 Tabalaopa-Aldama y 838 Alto río San Pedro.

Ciudades como Parral, y Ciudad Jiménez que no solo tienen gran abatimiento del acuífero, sino que también presentan problemas de alta concentración de metales pesados y tóxicos como el arsénico, hierro y manganeso.

Otros usuarios potenciales son la población urbana localizada en los acuíferos abandonados como Los Juncos y los que están en proceso de abandono como Laguna de hormigas, Santa Clara y zonas de Jiménez

En el caso del Valle de Juárez los pozos agrícolas y de uso urbano tienen grandes concentraciones de sales que en algunos casos superan la concentración del agua de mar y para ser utilizados para riego tienen que ser mezclados con agua negra proveniente de las descargas del área conurbada de Ciudad Juárez.

## 5. CONCLUSIONES

Lograr la seguridad hídrica y alimentaria en México dependen en gran medida de impulsar el mejoramiento de la infraestructura hidroagrícola, cuyo reto principal es satisfacer la demanda de agua de los cultivos, así como asegurar la disponibilidad de esta para el crecimiento futuro. No es posible alcanzar la seguridad hídrica ni la alimentaria si no corregimos los principales problemas que aquejan del sector como son: la falta de gobernanza y políticas públicas para la planeación y manejo de los recursos hídricos, la falta de la aplicación de la leyes y normas para la protección del ambiente y el recurso agua y el uso ineficiente del agua y la sobreexplotación de los mantos acuíferos del país, entre otros. Para ser más eficientes en la utilización y aplicación del agua, se requiere rehabilitar y modernizar la infraestructura, mejorar la operación y la administración. No se puede administrar, planear y operar un recurso tan preciado como el agua, si no se cuantifica o no se realiza la medición. La medición del agua en los distritos y unidades de riego que son los principales usuarios del agua en México en general no se realiza.

En este sentido, este documento describe una metodología empleada para la medición remota de extracciones subterráneas, la cual está basada en el uso de tecnología de Internet de las Cosas. Internet de las cosas es un tema emergente de importancia técnica, social y económica, que ofrece grandes ventajas para la comunicación y transmisión de datos en ambientes distribuidos.

Esta tecnología está aún en desarrollo, y para implementarla es necesario realizar primero una selección adecuada del tipo de dispositivos a implementar. Durante este proyecto, se realizó dicha investigación, considerando como criterio de selección las características del tipo de aplicación a desarrollar. Este análisis fue plasmado en un artículo enviado a un congreso nacional, y se incluye en el Anexo 1 de este documento.

El proyecto desarrollado, permitió montar un dispositivo IoT en cuatro sistemas de bombeo, tres en unidades de riego localizadas entre los municipios de Tepalcingo y Axochiapan, en Morelos, y uno más localizado en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). Los pozos instrumentados en Tepalcingo-Axochiapan son identificados como pozo 1, 22 y 27. El dispositivo LoRa del fabricante Heltec se utilizó como mecanismo adquisidor y transmisor de datos local, como una estación cliente, y también se utilizó como mecanismo concentrador y transmisor global de datos, en lo denominado estación puerta de enlace. En los sistemas de bombeo de las unidades de riego, se implementaron dos puertas de enlace, uno para servir al sistema de bombeo del pozo 1, y otro para los pozos 22 y 27. En el IMTA se instrumentó una puerta de enlace y un cliente. Los datos fueron reportados a la base de datos de la aplicación web SIEVA instalada en un servidor en el IMTA, la cual fue adaptada para recibir y mostrar los datos desde las puertas de enlace remotas.

Los datos obtenidos permitieron medir la eficiencia en la estimación de las extracciones usando el gasto promedio y el tiempo de funcionamiento medido en dos sistemas de bombeo, el pozo 1 y el pozo IMTA. El periodo de tiempo fue octubre para el pozo 1, y octubre-noviembre para el pozo

IMTA. Las lecturas obtenidas, adquiridas y enviadas por el dispositivo LoRa, fueron comparadas contra registros manuales de los medidores volumétricos instalados in situ, a fin de determinar la eficiencia del método. Por las fechas en las que fueron instalados los equipos, y dada también la prolongación de la temporada de lluvias, a la fecha de la escritura de este informe no pudo accederse a la información del pozo 22 y 27.

De los resultados obtenidos, se observó que, usando el tiempo de funcionamiento y un gasto promedio en 10 ciclos de funcionamiento considerados en las pruebas, se obtuvo una estimación en porcentaje del 97.24%, esto en el cálculo del volumen extraído en el pozo IMTA. Sin embargo, el dispositivo de comunicación presentó algunos problemas de pérdida de datos, recuperando la información por un mecanismo de redundancia implementado en los mensajes. En el pozo 1, se obtuvo una estimación del 103.62% considerando el tiempo total de 14 ciclos de funcionamiento, con un pequeño porcentaje de sobreestimación. En ambos casos, la eficiencia de predicción fue similar, ya que, en el IMTA, se tuvo un error del 2.76%, y en el pozo 1, del 3.62%. En ambos casos fueron estimaciones muy precisas, y se observa que el método, puede realizar una sobreestimación, o una subestimación, esto dependiendo del valor utilizado como gasto promedio.

Sin embargo, el error puede ser mayor si se considera únicamente un ciclo de funcionamiento. En este caso, para el sistema de bombeo del pozo IMTA se tuvieron desviaciones absolutas hasta de un 27.01%, y en el pozo 1 de 29.8%. Para el caso positivo, las estimaciones más cercanas al valor real, se obtuvieron estimaciones con errores absolutos del 1.68% para el pozo IMTA, y del 0.55% en el pozo 1.

En el presente trabajo también se realizó una cuantificación del costo de implementación de la tecnología seleccionada, determinando un costo aproximado por estación cliente de \$9,000, y de \$9,642 por una estación puerta de enlace (que puede dar servicio a múltiples clientes), lo que presenta grandes ventajas cuando se le compara contra el costo de equipar a un sistema de bombeo con un medidor volumétrico y un equipo adquirente de datos (*data-logger*).

En el caso del primero, el costo de un medidor volumétrico varía entre \$ 10,000 a \$40,000 (dependiendo de la tecnología de medición empleada, propela o electromagnetismo), y el segundo, el adquirente de datos, puede costar entre \$6,000 y \$ 30,000 (dependiendo de la marca y otros parámetros), esto sin incluir costos de instalación. Por lo anterior, y dada la eficiencia ya reportada, resultaría más factible en las unidades de riego la implementación de un esquema masivo de adquisición remoto basado en LoRa (o alguna tecnología similar), que instrumentar un esquema de medición y adquisición de datos con medidores volumétricos y adquirentes de datos remotos.

Existe un gran potencial para la aplicación de la metodología propuesta. Durante el proyecto, se realizaron visitas al Estado de Chihuahua, a fin de exponer el proyecto, como una alternativa al problema de la sobreexplotación. Se detectó que el principal problema es que no cuentan con medidores y los que cuentan ya están obsoletos o simplemente descompuestos. Es posible

estimar las extracciones de los pozos con la aplicación de la metodología de Internet de las cosas, conociendo el tiempo de funcionamiento del pozo, las características de los equipos de bombeo y el consumo energético. El potencial general se traduce en los 19 acuíferos sobreexplotados en el estado más los 5 que se encuentran en equilibrio, que dan un total de 23.

Finalmente, se debe señalar que la tecnología IoT plantea importantes desafíos a fin de realizar sus potenciales beneficios. Durante la implementación, se tuvieron algunos contratiempos que afectaron el desarrollo del proyecto, la mayoría ligadas a las características del dispositivo LoRa seleccionado. Algunos de estos problemas fueron limitaciones de conectividad (equipos no eran compatibles), cobertura de comunicación inalámbrica, e intermitencia (pérdida de mensajes), entre otros. Por lo tanto, será necesario realizar más pruebas en el futuro, probando con otro tipo de dispositivos o versiones presentes en el mercado, a fin de conformar un catálogo de dispositivos confiables para la medición remota de las extracciones.

## 6. Referencias

- Adelantado, F., Vilajosana, X., Tuset-Peiro, P., Martinez, B., Melia-Segui, J., & Watteyne, T. (2017). Understanding the Limits of LoRaWAN. *IEEE Communications Magazine*. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600613>
- 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.
- Buyya, R., Buyya, R., Yeo, C. S., Yeo, C. S., Venugopal, S., Venugopal, S., ... Brandic, I. (2009). Cloud computing and emerging IT platforms: Vision, hype, and reality for delivering computing as the 5th utility. *Future Generation Computer Systems*, 25(June 2009), 17. <https://doi.org/10.1016/j.future.2008.12.001>
- Cendón, B. (2017). Las redes más usadas en el IoT. Recuperado el 28 de abril de 2019, 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*. Recuperado 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. (2015, abril 20). 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*. Recuperado de [http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5389380&fecha=20/04/2015](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5389380&fecha=20/04/2015)
- CONAGUA. (2016). *Estadísticas del Agua en México*. Ciudad de México: SEMARNAT. Recuperado 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 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>
- García Muelas, C. (s/f). *Integración de Redes Telemáticas IoT con Raspberry pi*. Universitat Oberta de Catalunya. Recuperado de

<http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/bitstream/10609/40187/6/cgmuelasTFC0115memoria.pdf>

- Gessner, C., Roessler, A., & Kottkamp, M. (2008). UMTS Long Term Evolution (LTE) Technology Introduction: Rohde & Schwarz Products, 2008. Recuperado el 25 de abril de 2019, de [https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl\\_downloads/dl\\_application/application\\_notes/1ma111/1MA111\\_4E\\_LTE\\_technology\\_introduction.pdf](https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_application/application_notes/1ma111/1MA111_4E_LTE_technology_introduction.pdf)
- Giusto, D., Iera, A., Morabito, G., & Atzori, L. (2010). *The Internet of Things. The Internet of Things - 20th Tyrrhenian Workshop on Digital Communications*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1674-7>
- González García, A. J. (2017). *IoT: Dispositivos, tecnologías de transporte y aplicaciones*. Universitat Obertade Catalunya. Recuperado de <http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/handle/10609/64286>
- 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>
- Heltec Automation. (s/f). WiFi LoRa 32 (v2). Recuperado de <https://heltec.org/project/wifi-lora-32/>
- 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>
- Panigrahi, P. (2017). LoRa Architecture. *3GLTEInfo*.
- 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>
- Ramya, C. M., Shanmugaraj, M., & Prabakaran, R. (2011). Study on ZigBee technology. En *ICECT 2011 - 2011 3rd International Conference on Electronics Computer Technology*. <https://doi.org/10.1109/ICECTECH.2011.5942102>
- Rose, K., Eldridge, S., & Lyman, C. (2015). The internet of things: an overview. *Internet Society*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Salazar, J., & Silvestre, S. (2014). Internet de las cosas. *Universidad Católica*.

- 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)*. Recuperado 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)
- Tan, L., & Wang, N. (2010). Future Internet: The Internet of Things. En *ICACTE 2010 - 2010 3rd International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering, Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/ICACTE.2010.5579543>

## 7. Glosario

**Aforo.** Medición del caudal o gasto.

**Agua potable.** Líquido incoloro, insípido e inodoro que se puede encontrar en estado natural o ser producido a través de un proceso de purificación. Sirve para el consumo humano y animal.

**Bomba.** Máquina hidráulica que convierte la energía mecánica en energía de presión, transferida al agua.

**Carga total de bombeo.** La suma algebraica de la carga de presión en la descarga, más el nivel de succión, más el nivel al centro del manómetro, más las pérdidas de fricción y singulares en la conducción, más la carga de velocidad.

**Carga de velocidad.** Es la energía cinética por unidad de peso del líquido en movimiento.

**Corriente eléctrica.** Es la intensidad de corriente que pasa a través de un conductor con resistencia  $R$  y cuya tensión eléctrica es  $V$ .

**Factor de potencia.** Es la relación entre la potencia activa y la potencia aparente, y describe la relación entre la potencia convertida en trabajo útil y real y la potencia total consumida.

**Fuente de abastecimiento.** Sitio del cual se toma el agua para suministro en el sistema de distribución.

**Fuga.** Escape físico de agua en una red de tuberías de agua.

**Gasto.** Volumen de agua que pasa por una sección de un conducto, medido en una unidad de tiempo; se expresa generalmente en litros por segundo.

**Nivel de referencia.** Es el nivel seleccionado como referencia para todas las mediciones hidráulicas, normalmente el plano inferior de la placa base de montaje del equipo de bombeo.

**Nivel de succión.** Es la distancia vertical desde el nivel de referencia hasta la superficie del agua cuando se encuentra en operación el equipo de bombeo.

**Potencia activa.** Es la potencia consumida por un motor eléctrico que se convierte en trabajo útil.

**Potencia eléctrica.** Es la potencia de entrada en watts (o vatios) que requiere el motor eléctrico acoplado a la bomba y en operación normal.

**Tensión eléctrica.** Trabajo eléctrico medido entre dos puntos de un circuito eléctrico.

## Anexo 1. Artículo



**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.



Quinto Congreso Nacional COMEII 2019, Mazatlán, Sin., del 18 al 20 de Septiembre de 2019

## 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 (REPD) (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 REPD, 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



Quinto Congreso Nacional COMEII 2019, Mazatlán, Sin., del 18 al 20 de Septiembre de 2019

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:



Quinto Congreso Nacional COMEII 2019, Mazatlán, Sin., del 18 al 20 de Septiembre de 2019

- 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



Quinto Congreso Nacional COMEII 2019, Mazatlán, Sin., del 18 al 20 de Septiembre de 2019

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.

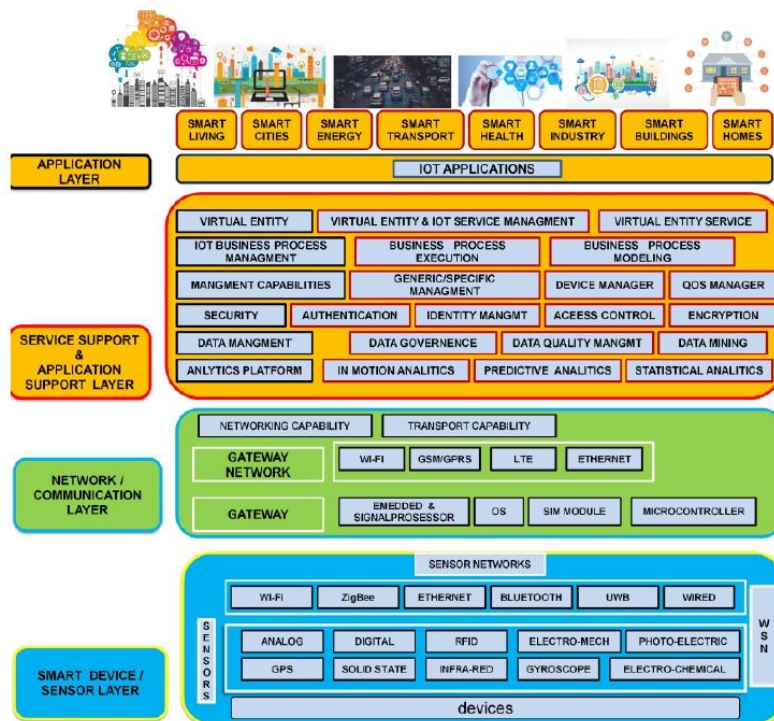


Figura 1. Arquitectura IoT (Patel, 2016)

**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.



Quinto Congreso Nacional COMEII 2019, Mazatlán, Sin., del 18 al 20 de Septiembre de 2019

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.

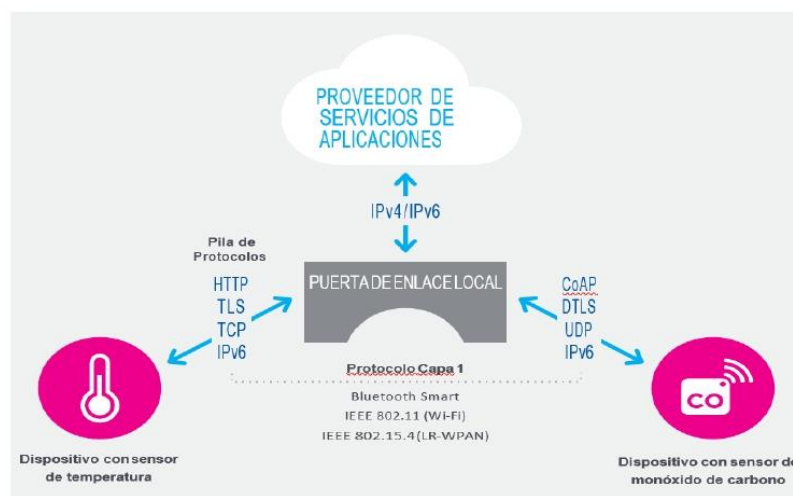


Figura 2. Modelo de conexión "dispositivo a puerta de enlace" (Rose, 2015)

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



Quinto Congreso Nacional COMEII 2019, Mazatlán, Sin., del 18 al 20 de Septiembre de 2019

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.



Quinto Congreso Nacional COMEII 2019, Mazatlán, Sin., del 18 al 20 de Septiembre de 2019

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

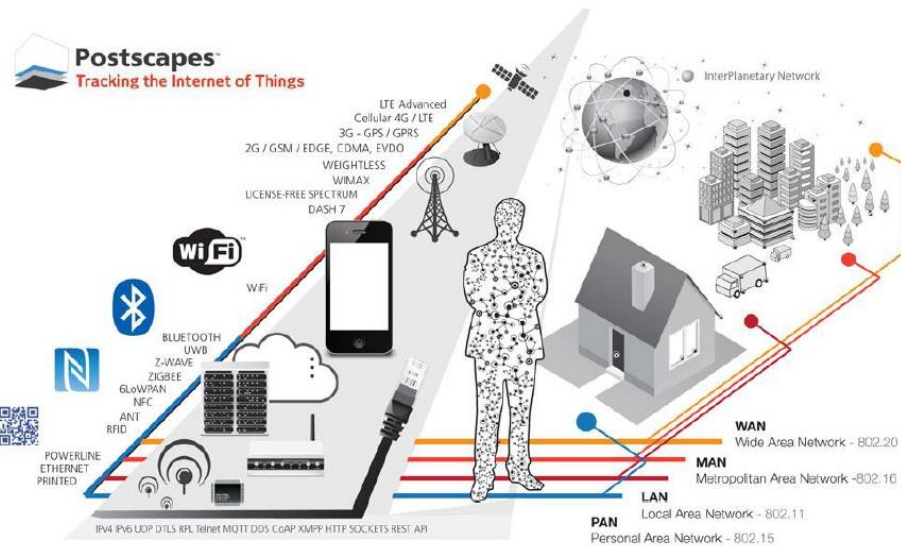


Figura 3. Tipos de redes de comunicación y representación de su alcance (Postscapes, 2019)

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.



Quinto Congreso Nacional COMEII 2019, Mazatlán, Sin., del 18 al 20 de Septiembre de 2019

- **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



Quinto Congreso Nacional COMEII 2019, Mazatlán, Sin., del 18 al 20 de Septiembre de 2019

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.



Quinto Congreso Nacional COMEII 2019, Mazatlán, Sin., del 18 al 20 de Septiembre de 2019

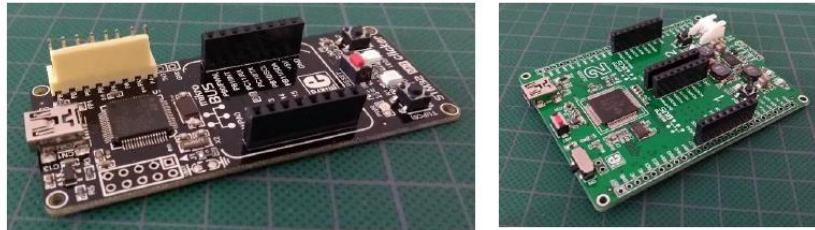


Figura 6. Clicker 1 (izquierda) y Clicker 2 (derecha)

### 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.

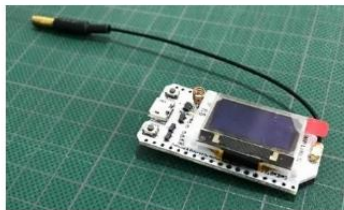


Figura 7. WiFi LoRa 433

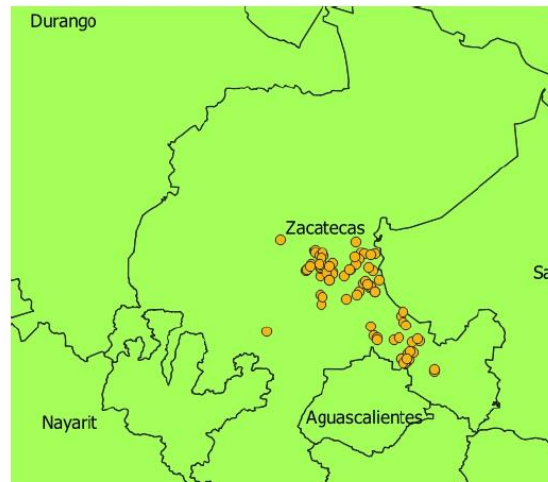
### Selección de tecnologías IoT para sistemas de bombeo en Unidades de Riego

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).



Quinto Congreso Nacional COMEII 2019, Mazatlán, Sin., del 18 al 20 de Septiembre de 2019



**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.



Quinto Congreso Nacional COMEII 2019, Mazatlán, Sin., del 18 al 20 de Septiembre de 2019

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



Quinto Congreso Nacional COMEII 2019, Mazatlán, Sin., del 18 al 20 de Septiembre de 2019

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.

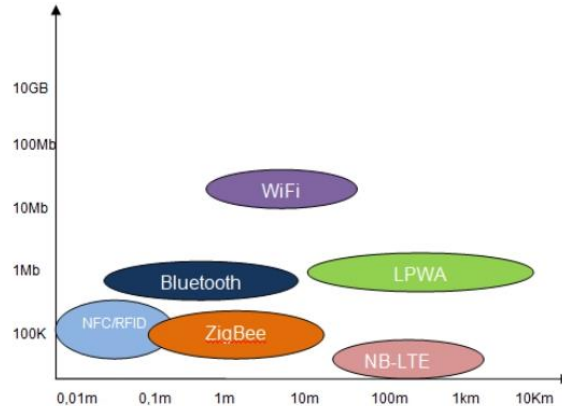


Figura 9. Tecnologías de red en función de distancia y capacidad de transmisión (González García, 2017)

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.

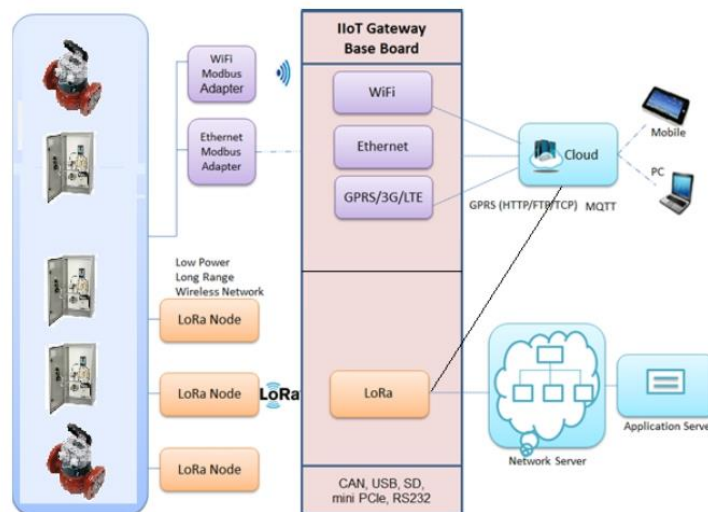


Figura 10. Configuración a utilizar con LoRa



Quinto Congreso Nacional COMEII 2019, Mazatlán, Sin., del 18 al 20 de Septiembre de 2019

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->



Quinto Congreso Nacional COMEII 2019, Mazatlán, Sin., del 18 al 20 de Septiembre de 2019

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/>

## Anexo 2. Registros de monitoreo en sistemas de bombeo

Tabla A2.1. Registros de mediciones de consumos volumétricos en el Pozo IMTA. El consumo estimado fue obtenido de multiplicar el gasto medido en el pozo IMTA con un medidor de gasto ultrasónico.

No	Fecha-Hora Inicio	Fecha-Hora final	Minutos en funcionamiento	Medición Inicial en medidor (m <sup>3</sup> )	Medición final en medidor (m <sup>3</sup> )	Consumo (m <sup>3</sup> )	Consumo (lts)	Consumo estimado LoRa	Eficiencia de estimación (estimado/real x 100) (%)
1	26/11/2019 11:12	26/11/2019 14:31	198.85	192982	193226	244	244,000.00	218,102.34	89.39
2	27/11/2019 10:08	27/11/2019 14:10	241.45	193226	193522	296	296,000.00	264,826.02	89.47
3	28/11/2019 14:36	28/11/2019 18:08	212.30	193522	193751	229	229,000.00	232,850.64	101.68
4	03/12/2019 10:31	03/12/2019 15:04	273.29	194680	194916	236	236,000.00	299,740.82	127.01
5	04/12/2019 17:50	04/12/2019 21:53	242.50	194916	195267	351	351,000.00	265,977.66	75.78
6	05/12/2019 15:11	05/12/2019 18:38	207.77	195267	195488	221	221,000.00	227,878.48	103.11
7	09/12/2019 11:07	09/12/2019 15:01	233.65	196268	196490	222	222,000.00	256,270.98	115.44
8	10/12/2019 10:17	10/12/2019 14:28	250.49	196490	196734	244	244,000.00	274,733.78	112.60
9	11/12/2019 14:50	11/12/2019 18:44	234.16	196734	197022	288	288,000.00	256,830.34	89.18
10	13/12/2019 10:56	13/12/2019 15:49	293.07	197475	197837	362	362,000.00	321,439.18	88.80
<b>Total</b>							2,693,000.00	2,618,650.22	97.24

Tabla A2.2. Registros de mediciones de consumos volumétricos en el Pozo IMTA. El consumo estimado fue obtenido de multiplicar el gasto medido en el pozo 1 con un medidor de gasto ultrasónico.

No	Fecha-Hora Inicio	Fecha-Hora final	Minutos en funcionamiento	Medición Inicial en medidor (m <sup>3</sup> )	Medición final en medidor (m <sup>3</sup> )	Consumo (m <sup>3</sup> )	Consumo (lts)	Consumo estimado LoRa	Eficiencia de estimación (estimado/real x 100) (%)
1	01/10/2019 07:12	01/10/2019 11:42	270.03	85,487.00	86,367	880	880,000	874,908.00	99.42
2	05/10/2019 07:19	05/10/2019 07:40	20.52	85,802.00	85,862	60	60,000	66,474.00	110.79
3	06/10/2019 08:04	06/10/2019 08:25	20.85	85,808.00	85,878	70	70,000	67,554.00	96.51
4	07/10/2019 08:44	07/10/2019 09:00	15.77	85,815.00	85,875	60	60,000	51,084.00	85.14
5	10/10/2019 07:52	10/10/2019 19:42	710.03	86,336.00	88,436	2,100	2,100,000	2,300,508.00	109.55
6	11/10/2019 08:14	11/10/2019 19:14	660.68	86,546.00	88,636	2,090	2,090,000	2,140,614.00	102.42
7	12/10/2019 06:55	12/10/2019 19:46	770.65	86,755.00	89,095	2,340	2,340,000	2,496,906.00	106.71
8	13/10/2019 07:27	13/10/2019 20:13	765.53	86,989.00	89,579	2,590	2,590,000	2,480,328.00	95.77
9	15/10/2019 07:04	15/10/2019 19:34	750.38	87,457.00	89,907	2,450	2,450,000	2,431,242.00	99.23
10	16/10/2019 07:09	16/10/2019 17:04	595.17	87,702.00	89,522	1,820	1,820,000	1,928,340.00	105.95
12	17/10/2019 08:06	17/10/2019 08:21	15.52	88,026.00	88,076	50	50,000	50,274.00	100.55
13	20/10/2019 08:14	20/10/2019 15:00	405.95	88,031.00	89,361	1,330	1,330,000	1,315,278.00	98.89
14	21/10/2019 07:19	21/10/2019 12:39	320.57	88,164.00	88,964	800	800,000	1,038,636.00	129.83
						<b>Total</b>	16,640,000	17,242,146	103.62

### Anexo 3. Comportamiento del flujo en tuberías

#### FLUJO EN TUBERÍAS

Los flujos internos son aquellos flujos que quedan completamente limitados por superficies sólidas, como por ejemplo el flujo interno en tuberías y en ductos.

Considerando un flujo incompresible a través de un tubo de sección transversal circular, el flujo es uniforme a la entrada del tubo y su velocidad es igual a  $U_0$ . En las paredes la velocidad vale cero debido al rozamiento y se desarrolla una capa límite sobre las paredes del tubo.

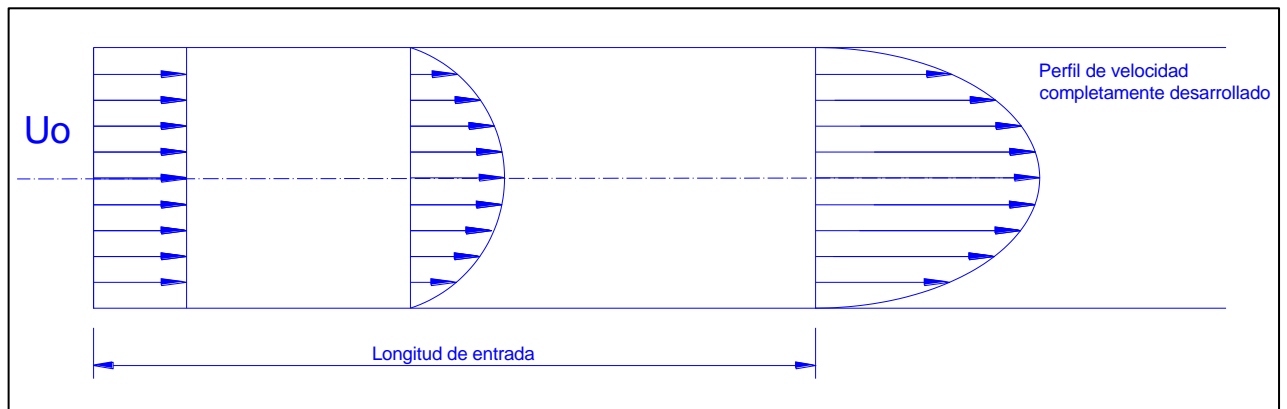


Figura A3.1. Flujo en una tubería

La velocidad promedio en cualquier sección transversal viene expresada por

$$\bar{V} = \frac{1}{A} \int_{Area} u dA$$

$$\bar{V} = U_0 = constante$$

#### FLUJO LAMINAR EN TUBERÍAS

La naturaleza del flujo a través de un tubo está determinada por el valor que tome el número de Reynolds siendo este un número adimensional que depende de la densidad, viscosidad y velocidad del flujo y el diámetro del tubo. Se define como

$$Re = \frac{\rho \bar{V} D}{\mu}$$

Clasificación del flujo en función del valor del número de Reynolds

Laminar	$Re < 2300$
Turbulento	$Re > 2300$

**FLUJO LAMINAR COMPLETAMENTE DESARROLLADO**

Para un flujo laminar completamente desarrollado en un tubo la velocidad viene dada por

$$u = -\frac{R^2}{4\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial x}\right) \left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2\right] \quad (1)$$

Donde  $\frac{\partial P}{\partial x}$  es el gradiente de presión.

Gasto volumétrico

$$Q = \int_A \bar{V} d\bar{A} = \int_0^R u 2\pi r dr$$

Sustituyendo

$$Q = \int_0^R \frac{1}{4\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial x}\right) [r^2 - R^2] 2\pi r dr$$

Resolviendo y simplificando se obtiene

$$Q = \int_0^R \frac{1}{2\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial x}\right) [r^3 - R^2 r] dr$$

$$Q = \frac{\pi}{2\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial x}\right) \left[\frac{r^4}{4} - \frac{R^2 r^2}{2}\right]_0^R$$

$$Q = -\frac{\pi R^4}{8\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial x}\right)$$

En un flujo completamente desarrollado el gradiente de presión es constante

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{P_2 - P_1}{L} = -\frac{\Delta P}{L}$$

Sustituyendo

$$Q = -\frac{\pi R^4 \Delta P}{8\mu L}$$

Velocidad promedio

$$\bar{V} = \frac{Q}{A}$$

sustituyendo

$$\bar{V} = -\frac{\pi R^4}{8\mu \pi R^2} \left(\frac{\partial P}{\partial x}\right)$$

$$\bar{V} = -\frac{R^2}{8\mu} \left( \frac{\partial P}{\partial x} \right)$$

Punto de velocidad máxima

Derivando  $u$  con respecto a  $r$  e igualando a cero

$$\frac{du}{dr} = \frac{1}{2\mu} \left( \frac{\partial P}{\partial x} \right) r = 0$$

Lo anterior se cumple bajo la existencia de flujo es decir que exista un diferencial de presión  $\frac{\partial P}{\partial x} \neq 0$ , lo que obliga a que  $r = 0$

$$\frac{du}{dr} = 0 \text{ para } r = 0$$

Por lo que para  $r = 0$  se tiene de (1)

$$u_{max} = -\frac{R^2}{4\mu} \left( \frac{\partial P}{\partial x} \right) = 2\bar{V}$$

## Anexo 4. Conversión de señales analógicas a digitales

En el siguiente diagrama de bloques se muestra la secuencia desde que la variable física entra al sistema hasta que es transformada a señal digital. Para dicha señal ingrese al convertidor análogo - digital, ésta debe ser muestreada, es decir, se toman valores discretos en instantes de tiempo de la señal análoga, lo que recibe el nombre de *sampling* o muestreo. Matemáticamente es el equivalente a multiplicar la señal análoga por una secuencia de impulsos de periodo constante. Como resultado se obtiene un tren de impulsos con amplitudes limitadas por la envolvente de la señal analógica.

La frecuencia del muestreo o *sampling* debe ser como mínimo dos veces el ancho de banda de la señal muestreada para evitar el fenómeno conocido como *aliasing*

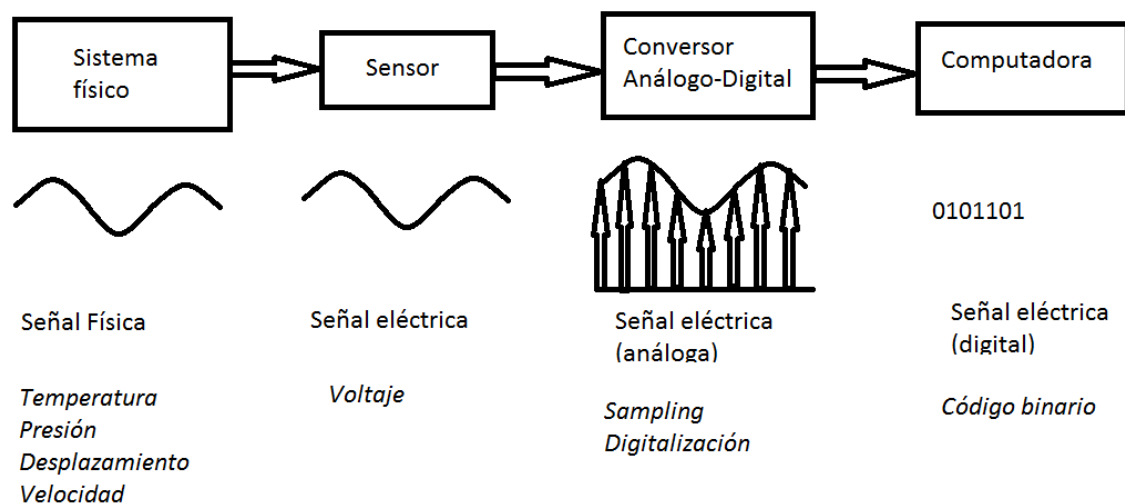


Figura A4.1. Conversión de señales análogo-digital

Cada conversor tiene características estáticas tales como:

- Resolución
- Linealidad integral y linealidad diferencial
- Monotonicidad
- Velocidad

Y características dinámicas:

- Tiempos de conversión
- Tiempos de adquisición
- Tiempos de asentamiento

- Velocidad de subida

Los dispositivos ADC convierten un nivel de tensión analógico en una palabra digital correspondiente. Si  $n$  es el número de bit obtenidos de la palabra, esto significa que habrá  $2n$  niveles de tensión diferentes. Todo convertidor ADC debe procurar que el conjunto de bit obtenidos a la salida sea un reflejo lo más exacto posible del valor analógico correspondiente. Se usan un gran número de métodos para convertir señales analógicas a la forma digital, los que más usados son: Rampa de escalera, aproximaciones sucesivas, paralelo (flash), doble rampa, voltaje a frecuencia, tipo serie.

Los sistemas ADC (Convertidor Analógico-Digital) y DAC (Convertidor Digital-Analógico) son necesarios cuando se realiza procesamiento digital de señales, permiten el nexo entre ambos espacios, del mundo real y el digital. Son muy utilizados en sistemas de instrumentación y adquisición de datos. Cada convertidor posee sus propias características y parámetros que lo definen. Estos parámetros y medidas se toman con respecto a curvas ideales de transferencia, o sea, cuando más se ajuste un determinado modelo en su funcionamiento a estas curvas, más preciso será para obtener un buen funcionamiento de cada convertidor, es importante destacar los parámetros que aporta el fabricante de cada dispositivo y las condiciones de trabajo en que fueron medidas. En todo ADC el conjunto de bits obtenidos a la salida sea un reflejo lo más exacto posible del valor analógico correspondiente. Si el ADC, está situado a la salida de un es esencial que en la etapa de conversión no se genere un nivel de ruido que impida la conversión real de la señal de entrada. La arquitectura más extendida entre los ADC es la basada en el método de las aproximaciones sucesivas. Su éxito se fundamenta en conseguir tanto una resolución como una velocidad aceptable para una gran variedad de aplicaciones. Normalmente se trata de redes resistivas conectadas a los bits de entrada, con cada valor de resistencia ajustado al valor del bit de entrada, como estructura básica. Los conversores se han enfrentado siempre a la dualidad velocidad y resolución, las diversas estructuras desarrolladas y disponibles comercialmente permiten adaptar un modelo para cada aplicación. Las configuraciones más frecuentes, atendiendo a criterios de velocidad, son: conversores lentos (de 1 a 100ms), que incluyen dispositivos de rampa y de escalera; los conversores medios (de  $1\mu\text{s}$  a 1ms) abarcan los denominados aproximaciones sucesivas; y los rápidos (entre 25 Mhz), *flash*.