

**PILOTO DE MEDICIÓN INTELIGENTE PARA EL SERVICIO
DOMICILIARIO DE AGUA
METREX S.A**



Lina Patricia Velasco Rodríguez

Trabajo de Grado en Automática Industrial
Modalidad: Práctica Profesional

Director: Magister Juan Fernando Flórez Marulanda
Asesor de la empresa: Magister Jaime Ovidio Ordoñez

Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Programa Ingeniería en Automática Industrial
Popayán, diciembre 2020

Lina Patricia Velasco Rodríguez

**PILOTO DE MEDICIÓN INTELIGENTE PARA EL SERVICIO
DOMICILIARIO DE AGUA
METREX S.A**

Informe presentado a la Facultad de Ingeniería Electrónica y
Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca para
la obtención del Título de

Ingeniera en Automática Industrial.

Director:
Msc. Juan Fernando Flórez Marulanda

Popayán, Cauca
2021

NOTA DE ACEPTACIÓN: _____

Firma del director

Firma del jurado

Firma del jurado

Popayán, diciembre de 2021

AGRADECIMIENTOS

A Dios por haberme acompañado y guiado en este camino hasta llegar aquí.

A mi madre, a quien le debo todo por ser mi pilar más fuerte, mi apoyo incondicional y quien ha creído en mí todos estos años.

A mis hermanos por ser parte de cada paso que doy.

A mis demás familiares y amigos por haberme dado aliento cuando creí desfallecer.

Mi gratitud infinita a la universidad del Cauca mi alma mater, mi agradecimiento sincero a mi asesor de tesis, Mg. Juan Fernando florez por su acompañamiento durante este proceso.

Gracias infinitas por haber hecho parte de este sueño.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1	12
INTRODUCCIÓN	12
1.1. Generación y distribución de agua potable	14
1.2. Medidor residencial de agua potable.....	23
1.3. Pérdidas en el servicio domiciliarios de agua potable.....	25
1.3.1 Pérdidas reales o técnicas.....	26
1.3.2 Pérdidas aparentes o comerciales:	28
1.4. Índices de evaluación de pérdidas	29
1.4.1 Índice de agua no contabilizada (IANC)	29
1.4.2 Índice de Pérdidas por Suscriptor Facturado (IPUF).....	32
1.4.3 Balance hídrico	33
1.5. Planteamiento del problema	34
1.6. Objetivos	35
1.6.1 Objetivo General:	35
1.6.2 Objetivos Específicos:	35
CAPÍTULO 2.....	36
Parámetros relevantes de un sistema AMR	36
2.1. Sistema AMR.....	36
2.2. Redes LPWAN.....	37
2.3. LoRa.....	39
2.4. Características técnicas y funcionales de los equipos que conforman el sistema AMR de medición inteligente.....	44
2.5. Alistamiento de equipos para un correcto funcionamiento dentro de la red	53
2.6. Diseño del plan de pruebas.....	58
2.7. Resultados de la ejecución del plan de pruebas	61
CAPÍTULO 3.....	71
Implementación de las fases de ingeniería para la ejecución del piloto.	71
3.1. Ingeniería de Diseño.....	71
3.1.1 Ingeniería conceptual	71
3.1.2 Ingeniería básica	79

3.1.3	Ingeniería de detalle	86
3.2.	Ingeniería de Implementación	91
3.2.1	Procura	91
3.2.2	Construcción	94
3.2.3	Pruebas y seguimiento	97
3.2.4	Análisis de los datos.....	107
Capítulo 4.....		118
Diagnóstico del funcionamiento del sistema AMR		118
4.1.	Retroalimentación	118
4.2.	Matriz DOFA	124
CAPÍTULO 5.....		128
Análisis técnico – económico para la implementación de sistemas AMR en el servicio público de agua		128
5.1.	LoRaWAN	128
5.2.	Análisis técnico	131
5.3.	Análisis financiero.....	134
TRABAJOS FUTUROS		138
CONCLUSIONES		139
BIBLIOGRAFÍA		141
ANEXOS		144
1.	Manual de usuario PDA.....	144
2.	Manual- Alistamiento de medidores de agua AMR	144
3.	Manual de usuario plataforma web.....	144
4.	Propuesta técnico económica- Piloto medición inteligente	144
5.	Informe final pre instalación - Piloto Cali	144
6.	Evidencias fotográficas para pruebas.....	144
7.	Formato de encuesta para retroalimentación	144
8.	Ficha técnica - Módulo LoRaWAN Laager.....	144
9.	Ficha técnica Gateway Kerlink.....	144

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Desarenador convencional.....	17
Figura 2. Desarenador de flujo vertical	17
Figura 3. Desarenador de alta tasa	18
Figura 4. Desarenador tipo vórtice	18
Figura 5. Tanque de distribución y compensación	19
Figura 6. Red de distribución abierta o ramificada	21
Figura 7. Red de distribución cerrada o malla	21
Figura 8. Esquema de acometida	22
Figura 9. Configuración típica de un sistema de abastecimiento en localidades urbanas	23
Figura 10. Medidores de agua marca Metrex instalados en gabinete de medición..	23
Figura 11. (A) Medidor mecánico tipo velocidad. (B) Medidor mecánico tipo.	24
Figura 12. Medidores de agua mecánicos, tipo velocidad chorro único, con un rango dinámico desde R100 a R160. (A) Medidor con cuerpo en bronce. (B) Medidor con cuerpo en plástico o composite.	25
Figura 13. Clasificación de pérdidas reales y su relación entre tasa de fuga y tiempo de fuga ...	27
Figura 14. IANC para los años 2017 y 2018 en Colombia	31
Figura 15. IANC para los años 2017, 2018 y 2019 en Colombia.	31
Figura 16. Red de Smart Metering de medidores que opera bajo un sistema AMR	37
Figura 17. Dispositivos conectados a internet a nivel mundial de 2019 a 2030.....	38
Figura 18. Relación de tecnologías inalámbricas respecto a su velocidad de datos y alcance.	39
Figura 19. Arquitectura de red LoRa	40
Figura 20. Formato de la trama de la capa física de LoRa	41
Figura 21. Variación de frecuencia a lo largo del tiempo de una señal de muestra emitida.....	41
por un transmisor LoRa	41
Figura 22. Relación entre la tasa de datos, y el factor SF	42
Figura 23. Relación entre CR y la tasa de datos efectiva con SF=7	43
Figura 24. Anchos de banda para LoR.....	44
Figura 25. Medidor de agua pre-equipado para medición inteligente.	45
Figura 26. Medidor de agua y módulo de comunicación LoRa ensamblados.	48
Figura 27. Concentrador para sistema de medición inteligente.	49

Figura 28. Repetidor de sistema de medición inteligente para medidores agua.	51
Figura 29. Interfaz de inicio de sesión para ingresar a plataforma de gestión.....	53
Figura 30. Interfaz principal de la plataforma al iniciar sesión	53
Figura 31. Verificación de sincronía entre medidor y módulo de comunicación.	54
Figura 32. Conexiones del Gateway.	56
Figura 33. Configuración de parámetros para el Gateway	57
Figura 34. Ruta para la verificación de conexión del Gateway.	58
Figura 35. Interfaz para la verificación de conexión del Gateway.	58
Figura 36. Lectura de parámetros del módulo de comunicación LoRa a través de la PDA.	62
Figura 37. Lectura del valor registrado en el medidor empleando la PDA.	63
Figura 38. Estado de conexión del Gateway en la plataforma web.	63
Figura 39. Validación de parámetros en medidor para pruebas de campo..	64
Figura 40. Validación de parámetros en medidor para pruebas de campo..	65
Figura 41. Primera ubicación de los medidores AMR para pruebas de campo.....	65
Figura 42. Ubicación inicial de los medidores AMR a los alrededores de la planta física de Metrex S.A.....	66
Figura 43. Prueba de conectividad con medidores AMR a diferentes distancias.	66
Figura 44. Prueba de conectividad con medidores AMR a diferentes distancias.....	67
Figura 45. Sujeción de cable conductor para prueba de cobertura.	67
Figura 46. Sujeción de cable conductor para prueba de cobertura.	68
Figura 47. Lectura realizada con la PDA a mayores distancias de los medidores AMR.	68
Figura 48. Prueba de consumo con medidor de agua AMR	69
Figura 49. Ubicación del edificio "Cali Tower Suites & Lofts"	72
Figura 50. Vista lateral del edificio "Cali Tower Suites & Lofts".....	72
Figura 51. Vista frontal del edificio"Cali Tower Suites & Lofts"ubicado frente a Torre de Cali	73
Figura 52. Medidores instalados en el edificio para el momento de la visita técnica.....	74
Figura 53. Medidores del sótano y piso 1.	75
Figura 54. Medidor del piso 2.....	75
Figura 55. Medidores para el Piso 3	76
Figura 56. Medidores del piso 5.	76
Figura 57. Medidor del piso 6.....	77
Figura 58. Medidores AMR del nuevo lote ubicados para pruebas de conectividad en campo. ..	80
Figura 59. Prueba de conectividad con medidor AMR 19080047 a 1km de distancia.....	81

Figura 60. Prueba de conectividad con medidor AMR 19080050 a 1km de distancia.....	81
Figura 61. Prueba de conectividad con medidor AMR 19080047 a 2km de distancia.....	82
Figura 62. Prueba de conectividad con medidor AMR 19080050 a 2km de distancia.....	82
Figura 63. Lectura de los medidores AMR enviados a la plataforma web a través del Gateway.	83
Figura 64. Concordancia entre el valor de lectura registrado en el medidor con el recibido en la PDA tras pruebas de consumo.	84
Figura 65. Arquitectura propuesta para la instalación del sistema de Lectura de Medición Automática(AMR) por medio de una red LPWAN con tecnología LoRa.....	85
Figura 66. Asignación de información a cada medidor en la plataforma web. Fuente propia.	92
Figura 67. Rotulación de la cada una de las 22 cajas que contienen los medidores.	93
Figura 68. Estructura elaborada para soporte del gateway.	93
Figura 69. Ubicación y conexión del Gateway en el rack de comunicaciones.....	94
Figura 70. Ubicación del gateway en el rack de comunicaciones.	95
Figura 71. Medidores AMR instalados en el sótano.....	95
Figura 72. Medidores AMR instalados en el piso 2.....	96
Figura 73. Medidores AMR instalados en el piso 3.....	96
Figura 74. Conectividad del 100% de los medidores instalados.	97
Figura 75. Monitoreo a través de la plataforma web el 19 de enero de 2021.....	99
Figura 76. Monitoreo a través de la plataforma web el 30 de enero de 2021	100
Figura 77. Monitoreo a través de la plataforma web el 6 de febrero de 2021	102
Figura 78. Monitoreo a través de la plataforma web el 13 de febrero de 2020	103
Figura 79. Monitoreo a través de la plataforma web el 20 de febrero de 2020.	104
Figura 80. Monitoreo a través de la plataforma web el 6 de abril de 2021.	106
Figura 81. Forma de leer el odómetro de un medidor de agua	107
Figura 82. Comportamiento de los datos obtenidos de la plataforma y del medidor.	109
Figura 83. Porcentaje de error entre los datos obtenidos para la primera prueba.....	110
Figura 84. Comportamiento de los datos obtenidos de la plataforma y del medidor.	110
Figura 85. Porcentaje de error entre los datos obtenidos para la segunda prueba.	111
Figura 86. Comportamiento de los datos obtenidos de la plataforma y del medidor.	111
Figura 87. Porcentaje de error entre los datos obtenidos para la segunda prueba.	112
Figura 88. Comportamiento de los datos obtenidos de la plataforma y del medidor.	112
Figura 89. Porcentaje de error entre los datos obtenidos para la segunda prueba	113
Figura 90. Comportamiento de los datos obtenidos de la plataforma y del medidor. Fu	114

Figura 91. Porcentaje de error entre los datos obtenidos para la segunda prueba..	114
Figura 92. Comportamiento de los datos obtenidos de la plataforma y del medidor.	115
Figura 93. Porcentaje de error entre los datos obtenidos para la segunda prueba..	115
Figura 94. Análisis de conectividad para cada caso de prueba.	116
Figura 95. Análisis de conectividad en base a los datos diarios enviados automáticamente.....	117
Figura 96. Arquitectura del protocolo LoRaWAN	128
Figura 97. Arquitectura de red LoRaWAN	129
Figura 98. Comparación clases LoRa en función de la latencia y la duración de la batería.....	130
Figura 99. Proyección de costos de inversión.	136

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Balance hídrico	34
Tabla 2. Relación entre el SF y el tamaño de chirridos o chirps en bytes.	42
Tabla 3. Relación entre CR y bits redundantes.	43
Tabla 4. Especificaciones técnicas del medidor de agua potable..	46
Tabla 5. Especificaciones técnicas del módulo de comunicación.	47
Tabla 6. Funciones que tendrá el sistema al instalar un medidor con módulo de comunicación LoRa dentro de su arquitectura.	49
Tabla 7. Especificaciones técnicas del concentrador o gateway.	51
Tabla 8. Especificaciones técnicas del repetidor.	52
Tabla 9. Plan de pruebas.	61
Tabla 10. Opciones de mejora a partir del resultado de las pruebas.....	70
Tabla 11. Análisis de requerimientos.....	79
Tabla 12. Costos finales del piloto aprobados por las partes.	88
Tabla 13. Asignación parte del cliente de dirección a los medidores a instalar.	89
Tabla 14. Cronograma de actividades.....	90
Tabla 15. Relación entre la dirección y el número serial de cada medidor.	91
Tabla 16. Datos basados en las fotografías de las lecturas registradas el 19 de enero de 2021..	100
Tabla 17. Datos basados en las fotografías de las lecturas registradas por los medidores el 30 de enero de 2021	101
Tabla 18. Datos basados en las fotografías de las lecturas registradas por los medidores el 6 de febrero de 2021.	103
Tabla 19. Datos basados en las fotografías de las lecturas registradas por los medidores el 13 de febrero de 2021	104
Tabla 20. Datos basados en las fotografías de las lecturas registradas por los medidores el 20 de febrero de 2021	105
Tabla 21. Datos basados en las fotografías de las lecturas registradas por los medidores el 6 de abril de 2021	107
Tabla 22. Matriz DOFA para el análisis del funcionamiento del sistema AMR.	127
Tabla 23. Matriz de evaluación técnica de proveedores.	132
Tabla 24. Descripción técnica de elementos suministrados por los proveedores.	134
Tabla 25. Opción de inversión 1.	135
Tabla 26. Opción de inversión 2.	135
Tabla 27. Costos de inversión para caso piloto.....	135

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El mundo actual viene atravesando un continuo desarrollo y evolución, donde las Tecnologías de Información y Comunicación (TIC's) han adquirido gran relevancia, ya que son la base del desarrollo integral de las Ciudades Inteligentes o Smart Cities [1]. Uno de los sub sistemas que debe desarrollar y fortalecer una ciudad que apunta a convertirse en Smart City, es la medición inteligente o Smart Metering. Durante décadas ha bastado con instalar medidores análogos que registran el consumo de los servicios públicos en un hogar, para calcular el diferencial entre periodos mensuales y determinar el valor de la factura. Sin embargo, los avances TIC's vienen transformando la forma como se miden estas variables [2]. Metrex S.A es una empresa colombiana que se especializa en la fabricación y comercialización de equipos de medición de agua, gas y energía. Se ha convertido en un proveedor de equipos de medición de flujos y fluidos para prestadores de servicios públicos, tanto a nivel regional como nacional [3].

Teniendo en cuenta que para Metrex, la comercialización de medidores para la línea de gas representa un porcentaje de ventas del 95%, y el 5% restante corresponde a las líneas de energía y agua, es importante estar a la vanguardia tecnológica y brindar a sus clientes soluciones que solventen problemas comunes y crecientes de este sector. Esto debido a que es evidente el gran impacto que el IoT está causando en la prestación de servicios públicos, encaminado a generar una evolución gradual hacia la medición inteligente. En el caso de Colombia, más específicamente en el servicio público de energía, los entes regulatorios como el Ministerio de Minas y Energía con apoyo técnico de la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), a través de la resolución N° 131 de 2020 [4], establecen las condiciones para la implementación de la Infraestructura de Medición Avanzada (AMI) en el Sistema Interconectado Nacional (SIN). Con esto, se busca que para el año 2030, el 95% de usuarios urbanos (\approx 12 millones) y el 50% de los usuarios rurales (\approx 2 millones) tengan instalado en sus domicilios un sistema de medición inteligente para el consumo de energía eléctrica. Esto se convierte en una gran oportunidad para Metrex, pues al integrar soluciones tecnológicas a sus medidores de energía podrá posicionarse nuevamente en este mercado.

Del mismo modo es un precedente claro del camino a seguir, puesto que es muy probable que reglamentaciones similares tipo AMI se implementen para los servicios de agua potable y gas natural. Este último es el sector hacia el cual Metrex potencia sus operaciones para el suministro de medidores de gas. De este modo, se identificó recientemente una gran problemática de una de las gaseras más grandes del país. Esta cuenta con un poco más de 75.000 clientes comerciales, para quienes las pérdidas por Gas Natural No Contabilizado (GNNC) son superiores a los 42.000 millones de pesos [3]. Gran parte de estas pérdidas corresponden a más de 4.200 diversas tipologías de fraude en los últimos 4 años. De cara a esta situación, Metrex suministró un nuevo modelo de

medidores de gas con indicación digital, más seguros y que permiten visualizar en pantalla diferentes tipos de alarmas por más de un mes, lo cual fue un éxito para la gasera y dejando para Metrex un buen reconocimiento y potenciales oportunidades de nuevos negocios. Ahora, una segunda parte del proyecto consistirá en implementar un primer piloto de medición inteligente para el servicio domiciliario de gas bajo un sistema de Lectura de Medición Automática (AMR), por medio de redes LPWAN con una muestra de los medidores digitales instalados, que serán conectados a módulos de comunicación. Esto permitirá el envío de datos de consumo y alarmas a un centro de gestión para su visualización a través de una plataforma web, lo cual será una gran muestra para otros clientes potenciales.

Teniendo en cuenta el éxito mencionado en el sector de gas domiciliario, se han adelantado también acciones para el servicio domiciliario de agua potable que presenta cierta problemática asociada al Índice de Agua No Contabilizada (IANC). Este se define como el porcentaje del volumen de agua no facturada con relación al volumen entregado por las plantas de tratamiento al sistema de acueducto. Dicho índice contempla las pérdidas totales de agua como la suma de las pérdidas técnicas correspondiente a fugas por fallas en los elementos de la red y pérdidas comerciales que corresponden a consumos ilegales, no medidos, consumos medidos no facturados y a errores de medición y facturación. Todo esto influye en un incremento en el cobro a los usuarios, una disminución en las utilidades de la empresa prestadora y un desperdicio de un recurso vital [1].

Las fallas de medidores de agua dejan pérdidas por más de dos billones de pesos anuales para el país, razón por que la Superintendencia de Industria y Comercio quiere regular la calidad de este servicio[2]. Esto según los resultados de un Análisis de Impacto Normativo en medidores de agua potable (AIN)[3]. De esta forma se evidencia el camino que tomará progresivamente la medición inteligente en el país. Para Metrex esto ya es una realidad por lo cual ha iniciado el proceso de comercialización de medidores de agua pre equipados con emisión de pulsos, que permitan instalar a futuro sensores que habiliten la comunicación de esos medidores con sistemas de lectura remota.

Para implementar sistemas de lectura remota es necesario hacer uso de redes de área amplia y baja potencia (LPWAN), las cuales son ideales para aplicaciones en las que ciertos dispositivos deben enviar datos a grandes distancias, con restricciones en el consumo de energía y capacidad de procesamiento [4]. Dentro de las redes LPWAN se encuentra la tecnología de comunicación inalámbrica LoRa, cuya implementación presenta grandes ventajas para proyectos de IoT como alta tolerancia a las interferencias, alta sensibilidad para recibir datos, bajo consumo que garantiza hasta 10 años de duración de la batería y largo alcance en línea de vista (10 a 20km). Sin embargo, con una transferencia limitada de datos de hasta 243 bytes, no obstante es ideal para el tipo de información concisa que se desea transmitir en aplicaciones de medición inteligente para servicios públicos como datos de consumo y estado de alarmas de los medidores [5].

Mencionado lo anterior, es importante para Metrex realizar innovación y desarrollo en sistemas de lectura remota, pensando en este nuevo mercado que tiene grandes proyecciones en un futuro cada

vez más cercano. Por esta razón, este proyecto de práctica profesional plantea la instalación y ejecución de las etapas de validación y puesta en marcha de un primer piloto de medición inteligente dedicado al servicio público de agua potable. Esto a través de la instalación de un sistema de Lectura de Medición Automática (AMR) a un cliente de Metrex S.A, por medio de una red LPWAN con comunicación LoRa, que permitirá una conexión y envío de datos unidireccional desde los medidores hacia un sistema de gestión y supervisión.

1.1. Generación y distribución de agua potable

El agua como recurso para la subsistencia y preservación de ecosistemas y biodiversidad cobra un valor esencial y vital. A través de un tratamiento específico de la misma, con el fin de garantizar la protección de la salud, es apta para el uso y consumo humano, es decir, potable. Por tal motivo, durante miles de años la humanidad se ha ocupado del almacenamiento, distribución y de soluciones para mejorar la calidad y seguridad de este líquido.

Desde la antigüedad se han utilizado diferentes mecanismos para el transporte del agua. Las civilizaciones solían asentarse junto a los ríos para poder llevar el agua hasta las viviendas de forma más sencilla. Se utilizaban canales abiertos para transportar agua de un lugar a otro utilizando herramientas manuales y la gravedad. Se excavaban pozos para el almacenamiento y abastecimiento de agua. Sin embargo, con el creciente aumento demográfico, se hizo necesario encontrar la forma de llevar el líquido vital a cada lugar donde fuese necesario para la población, ubicados lejos de fuentes hídricas. Con el paso del tiempo y a medida que se adquiría mayor conocimiento, aparecen nuevas herramientas, nuevos materiales y el avance en tecnología va haciendo más fácil el llevar el agua de un lugar a otro superando problemas de las grandes distancias, y llevando el agua de un punto más bajo a otro más alto por medio del bombeo, además aprovechando también las aguas subterráneas. De esta forma surgieron los acueductos. Estos son sistemas destinados a derivar, conducir, acondicionar y distribuir el agua hacia una población a partir de una fuente de abastecimiento, con continuidad total de 24 horas/día [6]. Se debe garantizar que el agua entregada a cada usuario sea potable. Para llevar a cabo este proceso se emplean las plantas de tratamiento de agua, donde el agua cruda es sometida a diversos procesos con el objetivo de eliminar los microorganismos y los contaminantes físicos y químicos hasta los límites aceptables estipulados[7]. De este modo, el suministro de este preciado líquido es catalogado como el servicio público básico más importante para la subsistencia del ser humano.

En Colombia los servicios de acueducto y alcantarillado fueron definidos en la Ley 142 de 1994, *por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones* [8]. De acuerdo a ello, se define el servicio público domiciliario de acueducto como la distribución municipal de agua apta para el consumo humano, incluida su conexión y medición,

tiene actividades complementarias como captación de agua y su procesamiento, tratamiento, almacenamiento, conducción y transporte.

A continuación, se especifican y describen cada uno de los componentes de un acueducto.

- **Fuente de abastecimiento:** Es un elemento indispensable para un sistema de agua potable. Son espacios naturales de donde se derivan grandes caudales para la obtención del agua que va a ser distribuida. Estas fuentes de agua son de gran importancia, pues se convierten en el suministro del sistema, por tanto, deben evaluarse aspectos importantes como la capacidad y las condiciones de sanidad, para así cumplir la demanda total del sistema y definir las acciones necesarias para la potabilización.

De acuerdo a la ubicación y origen de la fuente de abastecimiento, se distinguen dos tipos de sistema de suministro, por gravedad o por bombeo. Al ser por gravedad, la fuente debe estar ubicada en la parte más alta del lugar donde se hará la instalación del sistema de acueducto, para que el agua fluya a través de las tuberías gracias a la fuerza de gravedad. Mientras en los sistemas de bombeo, la fuente de suministro está ubicada en partes bajas por lo cual se requiere el uso de motobombas que impulsen el agua hasta los puntos de captación y almacenamiento.

Las fuentes de abastecimiento se pueden clasificar según el lugar donde se origine el agua, como se indica a continuación:

- **Aguas subterráneas:** Constituye toda el agua almacenada bajo la superficie terrestre, proveniente de aguas lluvias y del fondo de fuentes de agua como ríos, lagos, algunas, entre otros, que se filtran a través de grietas, poros de las rocas y sedimentos hasta que se encuentran con rocas impermeables que impiden su paso. De esta forma el agua se empieza a acumular, llenando espacios libres y creando depósitos subterráneos llamados acuíferos. Estos depósitos constituyen una de las fuentes principales de agua dulce, la cual requiere un menor grado de tratamiento previo al uso y consumo humano.
 - **Agua superficial:** Se encuentran a lo largo de la superficie terrestre. Son producidas por escorrentía a partir de las precipitaciones que no se filtran a través de la tierra, sino que se siguen su curso, presentándose así de forma correntosa como ríos y arroyos o en reposo como lagos, lagunas o pantanos o embalses, humedales, etc [9].
- **Captación:** Conjunto de estructuras necesarias para obtener y reunir el agua requerida, derivando determinado caudal de una fuente de abastecimiento con el fin de almacenarla y que esté disponible para el suministro a las comunidades. Estas obras deben ser estables y de

dimensiones adecuadas, para que de forma ininterrumpida puedan suministrar el caudal estipulado en el diseño.

El tipo de obra adecuado a emplear, depende del tipo de fuente de abastecimiento, su magnitud, calidad y localización. Existen las captaciones destinadas a tomar el agua de las fuentes hídricas superficiales, a través de las llamadas bocatomas. Entre los tipos de bocatomas que se emplean dependiendo de la topografía del lugar y de la naturaleza del cauce, encontramos la bocatoma lateral con muro transversal, lateral con bombeo, lateral por gravedad, bocatoma mediante estabilización del lecho, bocatoma de fondo, bocatoma estación de bombeo flotante o deslizante, bocatoma en embalses o lagos, entre otras [15]. Otro tipo de captación es la realizada de fuentes de aguas subterráneas, la cual se lleva a cabo a través de pozos profundos, pozos excavados, manantiales o galerías de filtración [11].

- **Aducción:** Es el conducto a través del cual se transporta el agua cruda desde la captación hasta el desarenador, ya sea a flujo libre o a presión. Es transportada a través de tubería o canales abiertos. Este último es posible debido a que no se le ha realizado aun ningún tipo de tratamiento al agua.
- **Desarenadores:** Es el primer elemento de la planta de tratamiento. Está destinado a la remoción de la arena y demás material de gran tamaño suspendido en el agua captada. Esto se hace mediante un proceso de sedimentación mecánica. El desarenador debe estar lo más cerca posible a la captación, de esta forma se evita que las partículas interfieran en la operación de las líneas de conducción, bombas y en los siguientes procesos.

Entre los desarenadores más comunes se encuentran los siguientes:

- **De flujo horizontal:** Es el más convencional. Su principio de funcionamiento consiste en reducir la velocidad de flujo del agua, para que así las partículas o granos se sedimentan o se separen debido al efecto de la gravedad. La forma de estos desarenadores depende principalmente del espacio y de las características geográficas del lugar. Generalmente son de forma rectangular y alargada. La característica esencial de estos es el volumen útil para llevar a cabo el proceso mencionado. Ver figura 1.

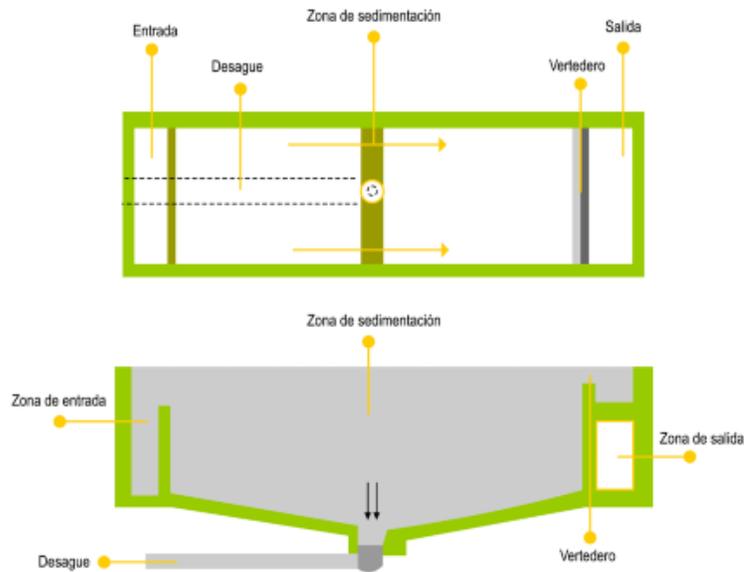


Figura 1. Desarenador convencional [10]

- De flujo vertical: En este tipo de desarenadores, el proceso de sedimentación ocurre mientras el agua fluye desde el fondo hasta la parte superior. Su forma varía, pues pueden ser circulares, cuadrados o rectangulares y son empleados en casos donde el espacio para su construcción es reducido. Ver figura 2.

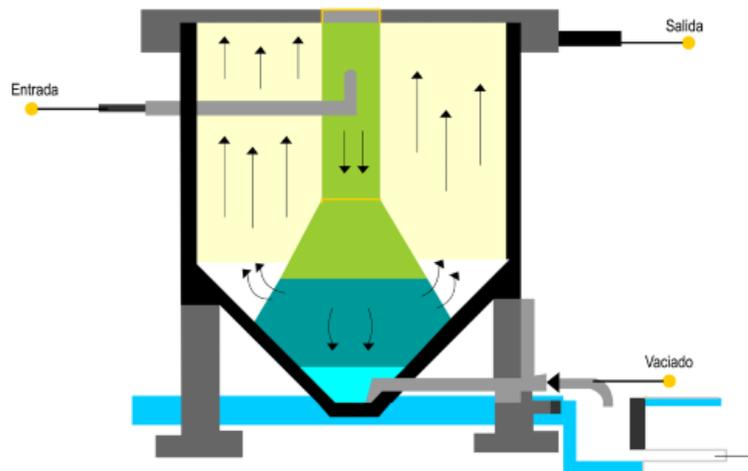


Figura 2. Desarenador de flujo vertical [10].

- De alta tasa: Están conformados básicamente por un conjunto de tubos circulares, cuadrados, hexagonales o también láminas planas paralelas que se disponen con determinado ángulo de inclinación con el fin de que el agua ascienda con flujo laminar y de que esta inclinación de las placas permita que los sólidos puedan asentarse y resbalsarse hacia abajo por ellas, en contra del flujo de agua sedimentada que sube. Este

tipo de desarenador permite cargas superficiales mayores a las empleadas por desarenadores convencionales y por tanto éste presenta ventajas al ser más funcional, ocupar menos espacio, ser más eficiente y económico. Ver figura 3.

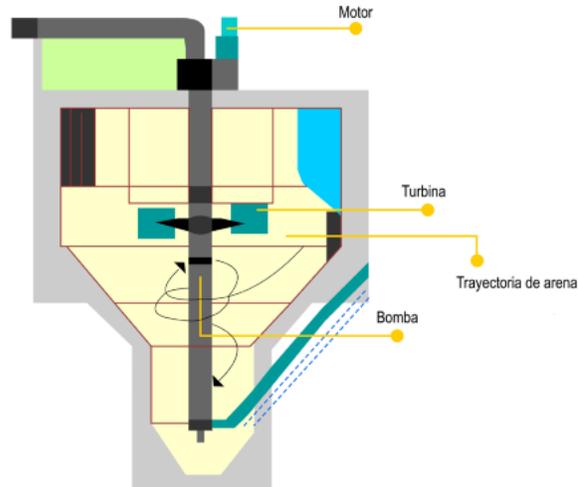


Figura 3. Desarenador de alta tasa [10]

- Tipo vórtice: Su principio de funcionamiento consiste en la formación de un remolino inducido mecánicamente, el cual captura las partículas sólidas en la zona central de un tanque circular. A medida que el vórtice o remolino dirige las partículas hacia el centro, unas paletas rotativas aumentan la velocidad lo suficiente para elevar el material orgánico más liviano, y así retornarlo al flujo que pasa a través de la cámara de arena. Ver figura 4.

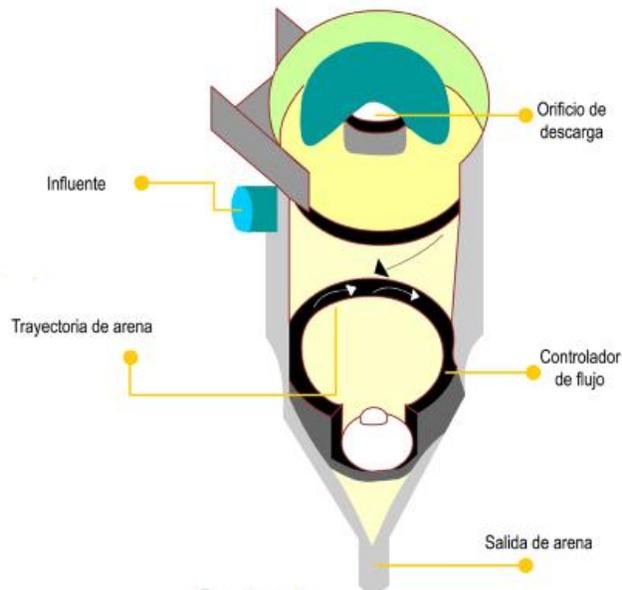


Figura 4. Desarenador tipo vórtice [10]

- **Conducción:** Es la infraestructura de tuberías del sistema de abastecimiento a través de la cual se transporta el agua del desarenador a la planta de tratamiento o de esta última hacia el tanque de almacenamiento, ya sea a flujo libre o a presión.
- **Planta de potabilización:** Instalaciones donde el agua cruda que viene desde fuente de abastecimiento es sometida a diversos procesos unitarios con el fin de purificarla hasta los límites establecidos por la ley[11] ya que esta será el agua de abastecimiento para una población y debe ser apta para su consumo. La complejidad de una planta de potabilización depende directamente del grado y tipo de contaminación del agua que a esta llega.
- **Tanque de almacenamiento:** O también llamado tanque de distribución, es una estructura que permite el almacenamiento suficiente de agua tratada antes de ser suministrada a la población, con el fin de cumplir con la demanda que esta requiere y regular la presión en la red de distribución. Las ventajas de contar con estos tanques es que permitirán almacenar agua en periodos de tiempo en los que la demanda de suministro es baja. De esta forma es posible garantizar un flujo normal y continuo en las horas del día donde se presenta una mayor variación en la demanda de agua por parte de la población. Además, el almacenamiento de agua en estos tanques también es útil para atender casos de emergencia, como por ejemplo incendios y disponer de un volumen considerable que amortigüe el suministro interrumpido durante obras de mantenimiento, accidentes en la planta de tratamiento o cortes de energía en caso de que se emplee un sistema por bombeo [12].

Difícilmente un sistema de acueducto contará con un solo tanque de almacenamiento debido a la topografía de la localidad, por lo cual también se emplean los llamados tanques de compensación, que se ubican en el extremo opuesto a la entrada de agua a la red de distribución. Ver figura 5.

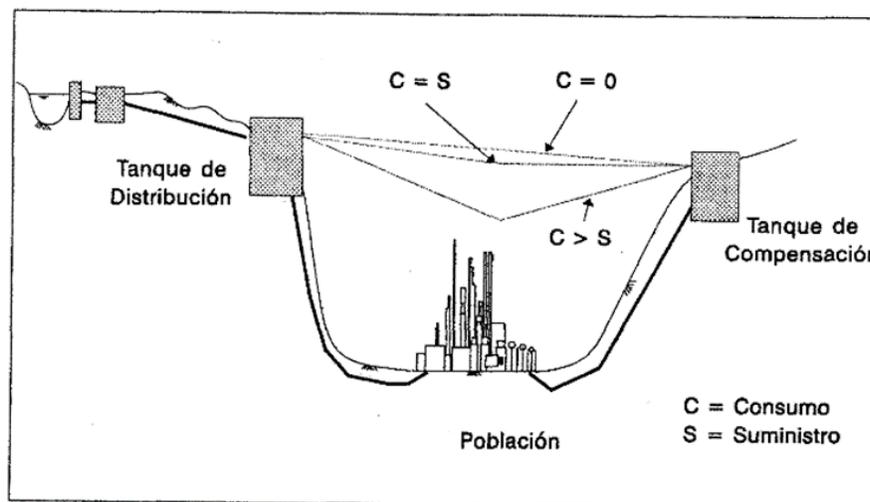


Figura 5. Tanque de distribución y compensación [12]

De acuerdo a la figura anterior, cuando no hay consumo, el agua llega al tanque de compensación a través de la red de distribución. Cuando el consumo es igual al suministro, no llega agua al tanque de compensación y éste tampoco suministra, y finalmente en caso de que el consumo sea mayor al suministro, el tanque de compensación ayudará a solventar esta demanda y la población será suministrada tanto por el tanque de distribución como por el de compensación. Dependiendo de la topografía del lugar donde se va a ubicar el tanque y de las condiciones del terreno, estos se pueden clasificar en tanques superficiales, enterrados y elevados.

Los tanques superficiales y enterrados son construidos en lugares donde se dispone de un desnivel topográfico que permita el adecuado funcionamiento de la red de distribución bajo condiciones óptimas de presión. En caso de no tener dicho tipo de topología y necesitar mayor altura para suministrar la cantidad de agua adecuada, se emplean los tanques elevados.

Es muy importante que los tanques se mantengan impermeables a la filtración de agua, para evitar la contaminación del agua tratada y las fugas que pongan en riesgo la estructura que los soporta.

- **Red de distribución:** Es el conjunto de conductos cerrados, accesorios y estructuras que conducen el agua a presión desde el tanque de almacenamiento hasta las viviendas y demás puntos de consumo requeridos por la población.

La red de distribución se conforma por una tubería principal o red matriz, encargada de llevar el agua hacia las diferentes zonas de la población. A esta se conectan tuberías secundarias o de relleno a través de las cuales se harán las conexiones domiciliarias.

De acuerdo a las características topográficas del lugar y del tamaño de la población, existen dos tipos de diseño para forma del circuito, existen dos tipos de redes de distribución:

- **Red abierta o ramificada:** Esta se caracteriza por contar con la tubería principal que es la de mayor diámetro a partir de la cual se desprenden las tuberías secundarias que no tendrán ningún tipo de conexión con otras a lo largo de la red. El uso de este tipo de redes trae consigo algunos inconvenientes como lo es la posibilidad de que se presente alguna falla o rotura en alguna de las tuberías para lo cual se tendría que proceder al corte del servicio mientras se realiza la reparación. Esto afectaría a los usuarios conectados a las tuberías aguas debajo de la zona afectada. Ver figura 6.

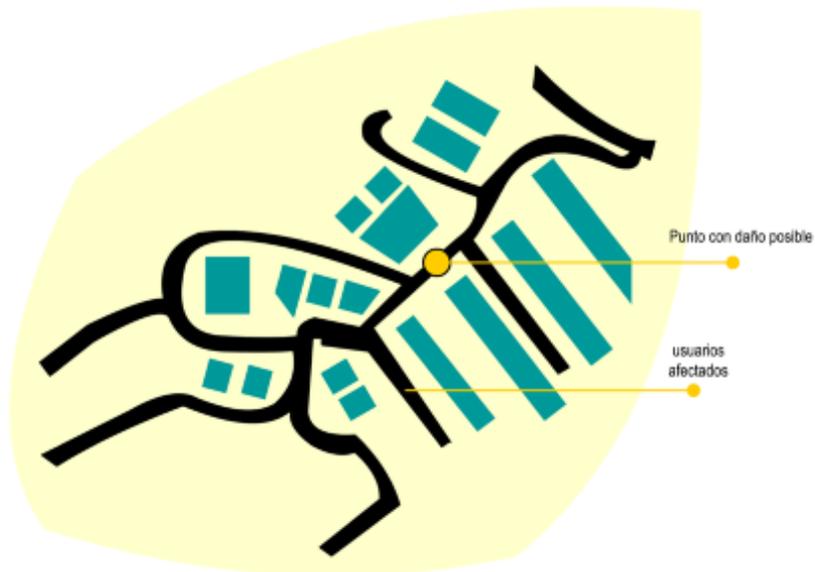


Figura 6. Red de distribución abierta o ramificada [10]

- **Red cerrada o malla:** En este tipo de redes, las tuberías secundarias que la componen, se pueden interconectar entre sí, formando circuitos a través de los cuales transportan el agua entre ellos o desde ellos. Estas tuberías están conectadas a los lados opuestos del marco de la malla lo cual permite un abastecimiento de agua por ambos extremos, evitando puntos muertos. Al emplear esta red tipo malla, se solventa el problema presentado por las redes abiertas, puesto que en caso de tener que hacer un corte en el servicio por fallas o mantenimiento, es posible aislar solo el tramo de la tubería afectada para no afectar suministro de toda la red. Ver figura 7.



Figura 7. Red de distribución cerrada o malla [10].

- **Macromedición:** Sistema de medición de grandes caudales, destinados a totalizar la cantidad de agua que ha sido tratada en una planta de potabilización y la que está siendo transportada por la red de distribución en diferentes sectores.
- **Acometida:** Es la derivación proveniente de la red de distribución que llega hasta el registro de corte de un usuario y se conecta a la instalación interna general. En edificios de propiedad horizontal o condominios, la acometida llega hasta el registro de corte general. Ver figura 8.

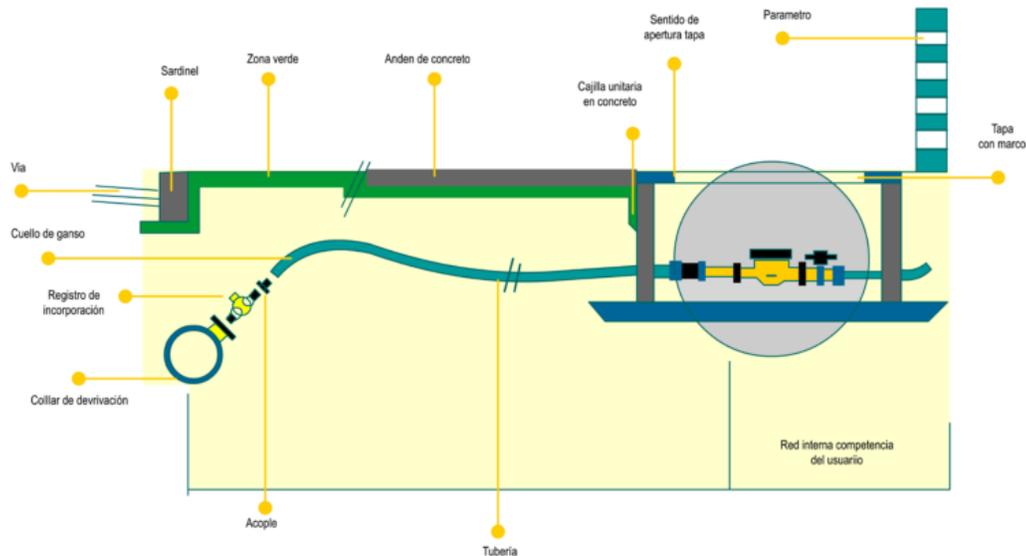


Figura 8. Esquema de acometida [10].

- **Micromedición:** Es el sistema de medición de volumen de agua, destinado a conocer la cantidad de agua consumida en un determinado periodo de tiempo por cada suscriptor de un sistema de acueducto. A través de la micromedición es posible establecer un perfil de consumo de usuario con el fin de caracterizar la población y sacar conclusiones respecto al consumo de agua potable por usuario para poder hacer un cobro adecuado por el servicio. Además, permite detectar situaciones anormales como fugas o consumo inusual.

Cada una de las partes mencionadas anteriormente trabajan en conjunto para conformar un sistema de abastecimiento de agua potable. Ver figura 9.

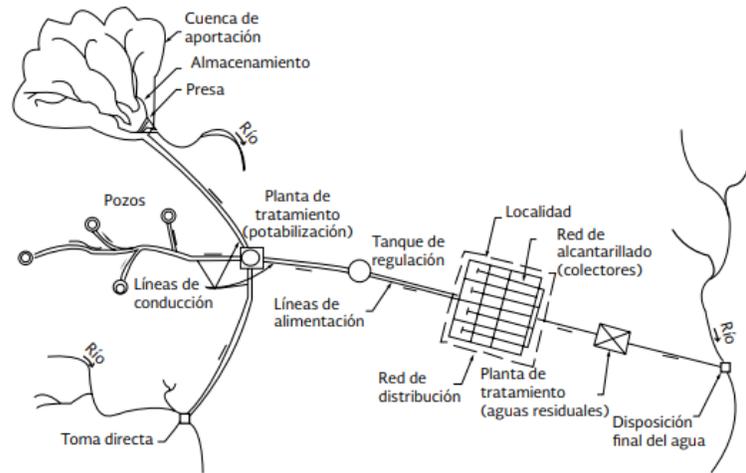


Figura 9. Configuración típica de un sistema de abastecimiento de agua en localidades urbanas [13].

1.2. Medidor residencial de agua potable

Es también llamado contador de agua. Se encarga de medir el volumen de agua que pasa a través de ellos y permite determinar la cantidad de metros cúbicos y litros que se ha consumido. Los medidores de agua son utilizados tanto para micro como para macro medición. La micro medición abarca el sector residencial, comercial y público, mientras que la macro medición aplica para sectores donde se deban medir caudales muy elevados, por ejemplo, en sectores industriales, cuencas hidrográficas o en las plantas de tratamiento de agua potable con las que cuentan los acueductos. Estos medidores son instalados por la empresa prestadora del servicio en un nicho, gabinete o pozo, ver Figura10.



Figura 10. Medidores de agua marca Metrex instalados en gabinete de medición. Fuente propia.

Los medidores utilizados para el suministro de agua potable pueden clasificarse según su accionamiento, en dos tipos: medidores mecánicos y medidores electrónicos. Los medidores mecánicos son por lo general los más utilizados y según su mecanismo de medición, se clasifican a su vez en medidores de velocidad y medidores volumétricos o de desplazamiento positivo. Los medidores tipo velocidad cuentan con una turbina interna que gira dependiendo de la velocidad del agua y cada cierto número de revoluciones por minuto, corresponde a un valor determinado de caudal y volumen. Ver Figura 11 (A). Dentro de los medidores de velocidad, se encuentran los medidores chorro único, chorro múltiple, woltman, combinados, tangenciales y proporcionales. Por su parte, los medidores tipo volumétricos realizan la medición a través del conteo del número de llenados y vaciados de una o dos cámaras de paredes móviles y de volumen conocido. Ver Figura 11 (B). Dentro de esta clasificación se encuentra el medidor volumétrico de pistón rotativo y el de disco oscilante.



Figura 11. (A) Medidor mecánico tipo velocidad. (B) Medidor mecánico tipo. Fuente propia.

En cuanto a los medidores electrónicos no utilizan internamente piezas móviles para el proceso de medición, sino que emplean equipos electrónicos que convierten una señal eléctrica en un valor de caudal. Entre este tipo de medidores, se encuentran los medidores electromagnéticos.

Los medidores de agua potable también pueden ser clasificados según su calidad metrológica, tal como lo establece la norma NTC 1063 [14] cuyo nombre es “Medición de agua en conductos cerrados. Medidores para agua potable fría” que en sus tres partes de forma general define las características metrológicas, constructivas, de instalación y ensayo de los medidores de agua potable fría, utilizados en la mayoría de los sistemas de abastecimiento y distribución del país. Esta norma establece en su primera parte cuatro clases metrológicas para los medidores, A, B, C y D, siendo la clase A la de rango de medida más estrecho, o lo que la hace menos precisa a caudales bajos y la D la de mayor amplitud de rango. Sin embargo, esta clasificación cambió en la actualización de la norma anterior a la NTC ISO 4064: 2016 [15] en la cual, el cambio en los

requisitos metrológicos y sus características es de los aspectos más importantes. De acuerdo a ello, se define el Rango Dinámico (R) como la relación entre el Caudal Permanente (Q_3) y el Caudal Mínimo (Q_1). Para valores más altos de R (Q_3/Q_1) se establece un rango de medida más amplio. Además, al haber más valores admisibles para este rango, existe multitud de clases metrológicas que permiten diferenciar las calidades de los instrumentos siendo estas desde R100 hasta R800. Adicional a lo anterior, de acuerdo al material de fabricación del cuerpo del medidor, se pueden encontrar medidores en bronce, ver figura 12 (A), y medidores en plástico o composite, ver figura 12 (B).



Figura 12. Medidores de agua mecánicos, tipo velocidad chorro único, con un rango dinámico desde R100 a R160. (A) Medidor con cuerpo en bronce. (B) Medidor con cuerpo en plástico o composite.

1.3. Pérdidas en el servicio domiciliarios de agua potable

Las pérdidas comúnmente se asocian con términos como ineficiencia o desperdicio. Es así, que en la medida en que una empresa presente pérdidas del bien que provee, se debe estudiar e indagar en qué otros aspectos se ve manifestada esta pérdida. Es el caso de las empresas prestadoras del servicio de acueducto donde las pérdidas de agua representan una gran problemática para la sociedad en general. Teniendo en cuenta que el agua es un recurso renovable pero limitado, necesario para la conservación del planeta y la vida que en éste se genera, debe ser cuidado y conservado por todas las personas usuarias de este [11].

Uno de los aspectos que afecta en gran medida a las empresas distribuidoras de agua potable a nivel mundial es la considerable cantidad de pérdidas debido al agua no contabilizada. Estas se pueden estar presentes a lo largo de una red de distribución de diversas formas, lo cual trae consigo efectos negativos tanto para los consumidores y para dichas empresas.

Las pérdidas de agua son inherentes a los sistemas de distribución de agua potable. Están siempre presentes en estos y solo se diferencian entre sí por su volumen, el cual depende de las características de las tuberías de la red de distribución o también asociadas a las prácticas operacionales de las empresas prestadoras de este servicio público[17].

En ese sentido, en todos los sistemas de suministro se presentan pérdidas, sin embargo, las empresas cuentan con medidas de rendimiento que les permiten identificar el cumplimiento de las metas propuestas y los niveles de pérdidas presentados. La reducción de las pérdidas de agua debe ser el objetivo de cualquier empresa prestadora del servicio público de agua potable, ya que lleva a una mayor eficiencia económica y ecológica y a un mejor servicio para los clientes [12].

Las pérdidas que enfrentan las empresas prestadoras del servicio público de agua, se clasifican en dos grandes grupos, pérdidas reales o técnicas y en pérdidas aparentes o comerciales.

1.3.1 Pérdidas reales o técnicas

Hacen referencia a los volúmenes de agua que se pierden como consecuencia de fallas en la infraestructura física instalada o malas condiciones operacionales. De modo que la cantidad prevista de agua para ser suministrada a la población, no llega a esta en la misma proporción debido a filtraciones en los tanques de almacenamiento, a las fugas, reboses, explosiones a lo largo de la red de conducción o distribución o por el mal funcionamiento de válvulas e hidrantes. Este tipo de pérdidas puede producirse debido a factores sobre los cuales se puede ejercer acción, como lo son las presiones máximas, la calidad de los materiales, proceso de construcción, y elementos estructurales de la red de abastecimiento; y por factores externos no controlables como acciones delincuenciales de terceros, características del agua y las condiciones del suelo, presiones externas, entre otros [18].

Estas pérdidas se pueden clasificar de acuerdo a su ubicación, tamaño y tiempo dentro del sistema [24]. Ver figura 13.

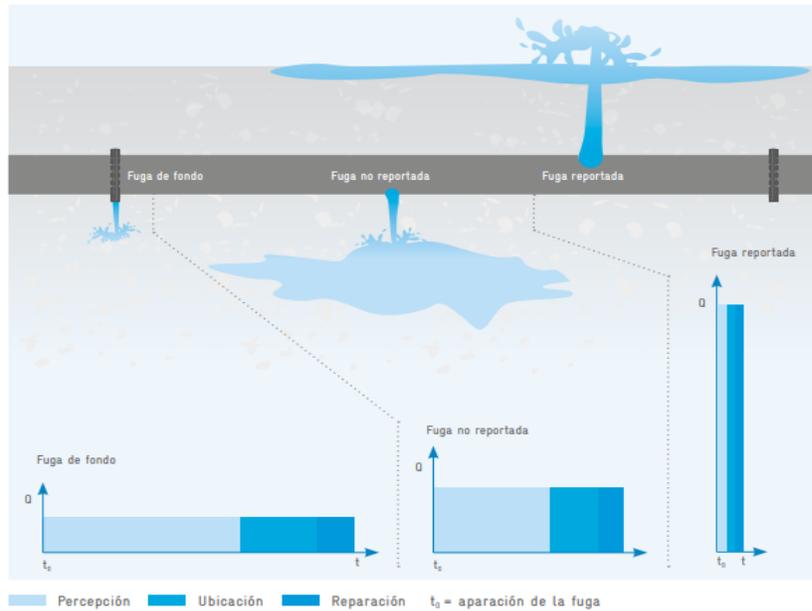


Figura 13. Clasificación de pérdidas reales y su relación entre tasa de fuga y tiempo de fuga [19].

- **Ubicación dentro del sistema**

- Fugas que se presentan en las redes de transmisión y distribución. Estas son causa de estallidos en tuberías debido a factores externos o a corrosión. También se presentan en uniones por desconexión o empaquetaduras dañadas y a causa de fallas operativas o de mantenimiento en las válvulas. Por lo general este tipo de fugas tienen tasas de flujo medianas a altas y tiempos de fuga de cortos a medianos.
- Fugas desde conexiones de servicio hasta el punto del medidor del cliente. Estas suelen ser uno de los puntos débiles de las redes de suministro de agua porque sus uniones y accesorios exhiben tasas de falla altas. Las fugas en las conexiones de servicio son difíciles de detectar debido a que generalmente no aparecen en la superficie y por lo tanto tienen tiempos de fuga largos.
- Fuga y reboses de tanques de almacenamiento. Estas están causadas por controles del nivel que son deficientes o están dañados. Además, puede ocurrir filtración de las paredes de concreto o de la construcción que no son herméticas. A menudo se subestiman las pérdidas de agua desde tanques y aunque son fáciles de detectar, la reparación a menudo es complicada y cara.

- **Tamaño y tiempo de la fuga**

- Las fugas reportadas o visibles se presentan principalmente en uniones de grandes troncales o en las tuberías de distribución debido a estallidos súbitos o rupturas. Este tipo de fugas son fáciles de identificar sin recurrir a equipos especiales, debido a que dependiendo de la presión del agua y de las características del suelo, estarán visibles rápidamente en la superficie y pueden ser observadas en los andenes, calzadas, presentarse como infiltración en los sótanos o presentarse en formas de manchas de humedad en muros de contención.
- Fugas no reportadas u ocultas. Estas debido a las condiciones no favorables no son visibles fácilmente en la superficie por lo cual para identificarlas se hace un análisis de tendencias en el comportamiento del consumo de agua dentro de una zona definida de suministro. Este tipo de análisis pueden realizarse en base a la macromedición que hace referencia a la medición de volumen de agua que entra a una zona específica de la ciudad y la micromedición que se relaciona con el volumen facturado en el medidor de cada vivienda o edificio. Con esto se comparan las mediciones y se determina si hay sectores en los cuales definitivamente hay alguna anomalía. Otra forma de detección es a través de una amplia gama de instrumentos acústicos y no acústicos empleados para detectar las fugas no reportadas.
- Fugas de fondo. Son fugas muy pequeñas producidas por filtración o goteo de uniones, válvulas o accesorios no herméticos. Estas se pueden detectar utilizando métodos de detección acústicos de fugas. Por lo tanto, es probable que muchas fugas de fondo nunca se detectan ni reparan, sino que se mantienen hasta que se reemplaza eventualmente la parte defectuosa. Las fugas de fondo a menudo causan una buena parte de las pérdidas reales de agua debido a su gran número y el largo tiempo durante el que ocurren.

1.3.2 Pérdidas aparentes o comerciales:

Estas corresponden a todo el volumen de agua que se entrega exitosamente al cliente pero que no se mide o registra con exactitud. Esto causa errores en el registro que tiene la empresa del volumen de agua que consumen los clientes, por lo tanto, esto genera pérdidas de cantidades significativas de agua y crean costos de producción sin generar ingreso para la empresa prestadora del servicio.

Las pérdidas aparentes tienen diversas causas como las mencionadas a continuación [20]:

- Inexactitudes del medidor. Son causadas por insensibilidad de los micromedidores debido a una descalibración natural provocada por un largo periodo de tiempo en uso, lo que genera

una subestimación del valor registrado por el contador. Por tal motivo un pequeño porcentaje de agua no se mide o se mide de manera incorrecta.

- Errores en el manejo de los datos. Corresponde a una diferencia entre los volúmenes que son realmente consumidos por el usuario y aquellos estimados por la empresa para efectos de facturación. El personal encargado de la recolección de las lecturas de cada medidor puede cometer errores, que pueden convertirse en sistemáticos. Esto tiene una implicación directa en el procesamiento de datos y en los procedimientos de facturación. Las tarifas planas pueden causar un consumo de agua doméstico excesivo que excede de lejos la cantidad presupuestada.
- Consumo ilegal o no autorizado. Corresponde a los consumos de agua que se generan a través de conexiones clandestinas por lo tanto no son medidos o estimados por la empresa. Entre los casos más frecuentes se encuentran los medidores manipulados de los clientes (invertidos, frenados), en los medidores que los clientes evitan registrar, en la extracción ilegal del agua de las tuberías contra incendios, entre otros.
- Consumo de utilidad pública. Estas se presentan cuando la empresa prestadora del servicio de agua potable, permite la extracción gratuita de agua desde los grifos comunes, para necesidades propias. También debido al abastecimiento gratuito para los bomberos en la extinción de incendios, en el riego de áreas verdes, lavado de calles y entretenimiento.

1.4. Índices de evaluación de pérdidas

1.4.1 Índice de agua no contabilizada (IANC)

Según la Constitución Política de Colombia, los servicios públicos son inherentes a la finalidad del Estado y es indispensable su intervención por medio de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (SSPD), la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico (CRA) y demás entidades competentes en la prestación de los servicios públicos para optimizarlos bajo parámetros de eficiencia [14]. Uno de esos parámetros desde una visión técnico-operativa es el Índice de agua no contabilizada (IANC) . El IANC es uno de los principales parámetros de eficiencia de los prestadores de servicio de agua potable. Se define como el porcentaje del volumen de agua no facturada con relación al volumen entregado por las plantas de tratamiento al sistema de acueducto. De esta forma dentro de este índice se incluyen las pérdidas técnicas y comerciales [21].

El cálculo de dicho índice está definido a partir de la expedición de la Resolución CRA 17 de 1995, incorporada en la Resolución CRA 151 de 2001, y se mantiene su aplicación a partir de

las disposiciones contenidas en la Resolución CRA 287 de 2004 [22], como se muestra a continuación:

$$IANC_i(\%) = \frac{AP - AF}{AP} \times 100$$

Donde:

AP: Volumen de agua producida o suministrada al sistema, medida en m^3 .

AF: Volumen de agua facturada o registrada por la empresa, medida en m^3 .

i: Periodo de análisis.

La estimación de este índice permitirá desarrollar programas más eficientes para la prevención, reducción y control de pérdidas, disminuyendo así los costos de distribución del agua.

El IANC se contemplan las pérdidas totales de agua como la suma de las pérdidas reales y pérdidas aparentes descritas anteriormente. Todo esto influye en un incremento en el cobro a los usuarios, una disminución en las utilidades de la empresa prestadora y un desperdicio de un recurso vital. El nivel máximo de pérdidas de agua aceptable para el cálculo de los costos de prestación del servicio de acueducto es del 30% y ha permanecido estable a lo largo de dos periodos regulatorios, a partir de la expedición de la resolución 08 de 1995 emitida por la Comisión Reguladora de Agua Potable y Saneamiento Básico (CRA). De acuerdo a ello, las pérdidas mayores a este porcentaje no pueden ser reconocidas en la tarifa y por tanto no son trasladadas al usuario[1].

Basado a la información consignada en el estudio sectorial de los servicios públicos domiciliarios de Acueducto y Alcantarillado del año 2018, publicado en diciembre de 2019 [23], el indicador IANC promedio a nivel nacional ponderado por población urbana DANE, se encuentra por el orden del 41,4% para el año 2018, un 2.2% menor con relación al año 2017. Ver figura 14. La información que se encuentra disponible para este año, corresponde al 44,3% de los prestadores, sin embargo, comprende el 73,3% de la población urbana a nivel nacional.

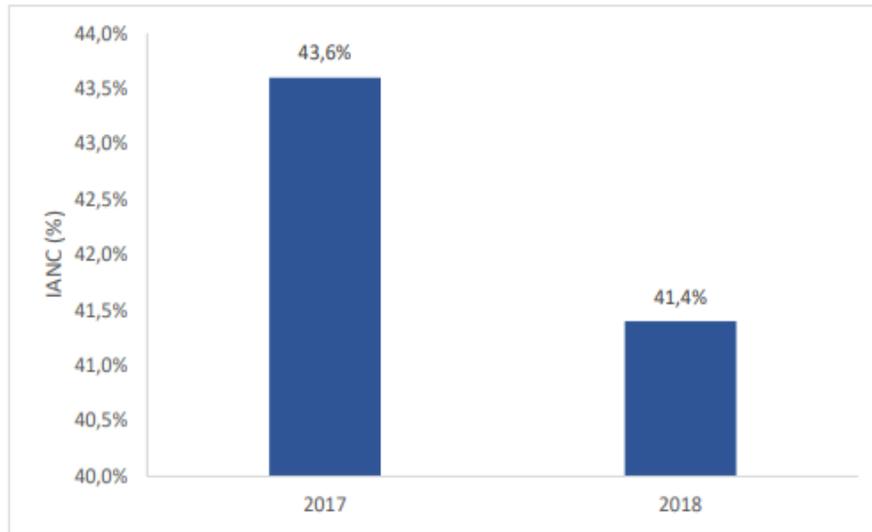


Figura 14. IANC para los años 2017 y 2018 en Colombia [23].

Comparando la información de la figura 13 con el estudio sectorial de los servicios públicos domiciliarios de Acueducto y Alcantarillado del año 2019, publicado en diciembre de 2020 [24], para el 2019 se estimó un valor promedio nacional del IANC del 40,2%. Este valor muestra una ligera tendencia a la disminución con respecto al año 2018 y al 2017. Ver figura 15. Este reporte se realizó en base a los datos correspondientes a prestadores que cubren el 71% de la población urbana del país abastecida, según proyección de población DANE 2019.

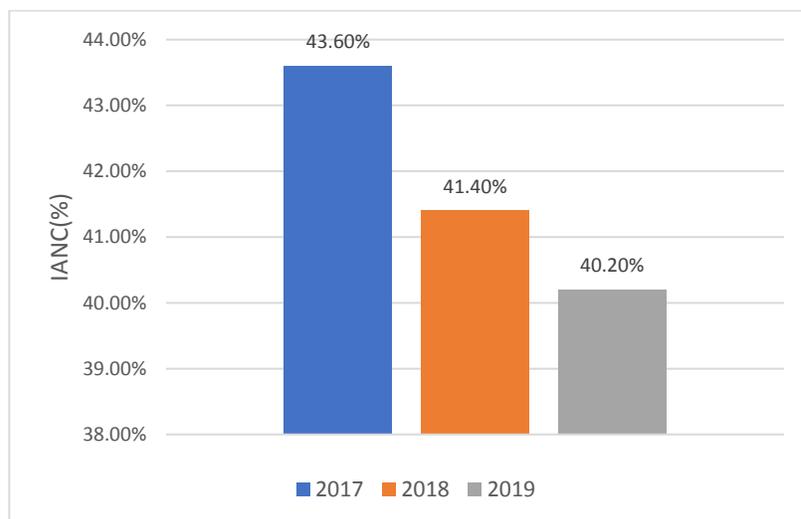


Figura 15. IANC para los años 2017, 2018 y 2019 en Colombia. Fuente propia.

A pesar de la disminución, este índice continúa estando por encima del permitido. Debido a esto, se hace necesario que las empresas prestadoras del servicio implementen programas de control y reducción de pérdidas. D Esto permitirá disminuir el impacto ambiental que genera el hecho de aumentar la explotación de agua para su potabilización y el impacto económico para las empresas debido a los altos costos operacionales y administrativos asociados a la inversión en tareas de recuperación, rehabilitación y mantenimiento para solventar las causas de las pérdidas identificadas [24].

El IANC es un indicador que se toma como referente para estimar la eficiencia y rendimiento operativo de un sistema de acueducto, sin embargo, este no resulta ser el indicador más apropiado para comparar el desempeño real de las empresas en la gestión de las pérdidas reales y comerciales o aparentes. Una de las razones principales en la cual se basa dicha afirmación, es la poca precisión del índice IANC para medir pérdidas en condiciones de reducción de consumos, por efecto de la elasticidad precio-demanda y en condiciones de discontinuidad del servicio. Por consiguiente, es conveniente tener en cuenta otros indicadores como alternativa para medir la gestión de una empresa prestadora de servicio de abastecimiento, que tenga una ventaja sobre el IANC y supere sus deficiencias, como por ejemplo el Índice de Pérdidas por Suscriptor Facturado (IPUF), según lo establecido en la Resolución CRA 688 de 2014 [22].

1.4.2 Índice de Pérdidas por Suscriptor Facturado (IPUF)

Por varios años, el IANC rigió el esquema regulatorio para las empresas prestadoras del servicio público de agua potable, sin embargo, posteriormente se identificó que este no era lo suficientemente estricto para que dichas empresas tomaran consciencia y se reflejara una mejora continua en la reducción de pérdidas. Por tal motivo, la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico (CRA) expidió en la resolución 688 de 2014 *“Por la cual se establece la metodología tarifaria para las personas prestadoras de los servicios públicos domiciliarios de acueducto y alcantarillado con más de 5.000 suscriptores en el área urbana”* [25]. En esta se incorpora el concepto de Índice de Pérdidas por Suscriptor Facturado (IPUF), el cual representa el volumen de agua perdida por m^3 /suscriptor/mes [23][26].

EL IPUF estipula un estándar de eficiencia de $6 m^3$ /suscriptor/mes que debe lograrse en el año 5 siguiente a partir de la entrada en vigencia la resolución con la reducción del 50% de las pérdidas y 75% para el año 10. El no cumplimiento de las metas traerá consigo castigos hasta en un 50% de la tarifa aplicada por el prestador. Este índice se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$IPUF_0 = \frac{AS_0 - AF_0}{N_0 * 12}$$

Donde:

AS_0 = Agua potable suministrada, en m^3 , en el sistema de acueducto (medida a la(s) salida(s) de la(s) planta(s)).

AF_0 : Consumo de agua facturada para el servicio público domiciliario de acueducto (m^3 /año).

N_0 : Número de suscriptores facturados promedio en el año base para el servicio público domiciliario de acueducto. En el caso de facturación mensual corresponde al promedio de los doce meses del año base. En el caso de facturación bimestral, corresponde al promedio de los seis bimestres del año base.

De acuerdo con la ecuación del IPUF, este considera de forma agregada las pérdidas, sin importar su distribución entre técnicas y comerciales, a partir de un volumen por suscriptor por mes. Además, considera también el volumen correspondiente a los consumos autorizados no facturados por parte de los prestadores [22].

1.4.3 Balance hídrico

En Colombia, la resolución CRA 688 (2014), aporta una guía para la implementación de planes para la reducción de pérdidas de agua; donde se define la construcción del balance hídrico, metas anuales, gradualidad y definición de costos y seguimiento a los planes[27].

El balance hídrico fue propuesto por la Asociación Internacional del Agua (IWA - Internacional Water Association), con el fin de tener un mayor conocimiento de las pérdidas técnicas comerciales que se presentan en los sistemas de suministro de agua potable. De esta forma es posible priorizar las acciones asociadas a la reducción de las mismas para mejorar los indicadores de desempeño [21].

Debido a la importancia del balance hídrico para diagnosticar la magnitud y los diferentes tipos de pérdidas, es necesario que las empresas prestadoras del servicio de agua potable realicen este balance periódicamente. Para su correcto cálculo y exactitud, es primordial tener total claridad, control y medición sobre los datos correspondientes a las diferentes entradas y salidas del sistema a evaluar.

Los componentes del balance hídrico estándar se ilustran a continuación en la tabla 1. El balance hídrico es la base de la metodología para la conservación de agua [27].

Volumen de entrada al sistema	Consumo autorizado	Consumo autorizado facturado	Consumo facturado medido	Agua Facturada	
			Consumo facturado no medido		
	Pérdidas de Agua	Consumo autorizado no facturado		Consumo no facturado medido	Agua No Facturada
				Consumo no facturado no medido	
		Pérdidas aparentes (Comerciales)		Consumo no autorizado	
				Inexactitud de la medición y errores en el manejo de los datos de lectura de medidores	
		Pérdidas reales (Físicas)		Fugas en tuberías de conducción y en redes principales de distribución	
				Fugas y desbordamiento en tanques de almacenamiento	
	Fugas en acometidas				

Tabla 1. Balance hídrico [27].

El procedimiento para la determinación del Agua No Facturada en el Balance Hídrico se puede realizar en base a los siguientes pasos [27]:

- Definir el volumen de entrada al sistema.
- Definir el consumo autorizado facturado.
- Definir el consumo autorizado no facturado.
- Calcular el consumo autorizado.
- Estimar las pérdidas aparentes (comerciales).
- Estimar las pérdidas reales (técnicas).

1.5. Planteamiento del problema

Es importante para Metrex realizar innovación y desarrollo en sistemas de lectura remota, pensando en este nuevo mercado que tiene grandes proyecciones en un futuro cada vez más cercano. Por esta razón, este proyecto de práctica profesional plantea la instalación y ejecución de las etapas posteriores de validación de un primer piloto de medición inteligente dedicado al servicio público de agua potable. Esto a través de la instalación de un sistema de Lectura de Medición Automática (AMR) a un cliente de Metrex S.A, por medio de una red LPWAN con comunicación LoRa, que permitirá una conexión y envío de datos unidireccional desde los medidores hacia un sistema de gestión y supervisión.

1.6. Objetivos

1.6.1 Objetivo General:

Implementar un piloto de medición inteligente para el servicio domiciliario de agua a través de la instalación de un sistema de Lectura de Medición Automática (AMR) a un cliente residencial por medio de una red LPWAN con tecnología LoRa.

1.6.2 Objetivos Específicos:

- Especificar los parámetros relevantes de los dispositivos que conforman el sistema AMR de tal forma que se pueda garantizar un adecuado funcionamiento previo a la instalación piloto.
- Determinar la calidad de transmisión de los datos y de la conectividad de la red monitoreando los datos de lectura y consumo generados por el medidor de agua y comunicados a través del sistema AMR.
- Identificar fortalezas y debilidades del sistema AMR respecto a los resultados obtenidos de su funcionamiento durante el piloto.
- Analizar la viabilidad técnico – económica de la implementación de sistemas AMR en el servicio público de agua.

CAPÍTULO 2

Parámetros relevantes de un sistema AMR

2.1. Sistema AMR

Son las siglas de Automatic Meter Reading, lectura Automática de Medidores es su significado en español. Corresponde a un sistema que permite de forma automática la recopilación y envío remoto de datos asociados al consumo, diagnóstico y estado de los medidores de servicios públicos, a un sistema de gestión centralizado para posteriormente llevar a cabo procesos de facturación, registro y análisis de la información.

Un sistema AMR consta principalmente de tres partes. La primera, una interfaz AMR compuesta por un dispositivo hardware conectado al medidor, el cual se encarga de recopilar los datos de este último. La segunda, un centro de gestión, que puede estar compuesto por un computador, red de computadores o dispositivos móviles a través de los cuales se realiza la visualización y análisis de datos. Finalmente, la tercera es un medio de comunicación que permite la interacción entre la interfaz AMR y el centro de gestión para el envío de datos, para ello se pueden emplear diferentes tecnologías como radiofrecuencia, transmisión por línea eléctrica, redes móviles GPRS, redes LPWAN, entre otros [28].

Gracias a los sistemas AMR es posible realizar de forma automática algunas tareas o la totalidad del proceso de medición convencional de servicios públicos [29]. De este modo, la implementación de estos sistemas trae importantes ventajas tanto para el usuario final como para las empresas de servicios públicos, como lo son mayor velocidad en el proceso de recolección de información, creación de perfiles de consumo, facturación automática, registro de alarmas por detección de robo, fraude u otras anomalías [28]. Este flujo de datos dentro de la red se realiza únicamente de forma unidireccional, es decir que los medidores envían datos hacia el servidor web para ser visualizados en plataformas, pero no se envían ordenes de ejecución en sentido contrario. Esta es la principal característica de los sistemas AMR. Ver figura 16.

Uno de los sectores donde más se ha propagado la implementación de sistemas AMR es en el servicio público de energía eléctrica mediante el intercambio de medidores mecánicos por los de tipo digital. Esto ha hecho que las empresas prestadoras de servicios públicos se interesen cada vez más por la implementación de estos sistemas, lo cual ha revolucionado la forma en que dichas empresas y sus clientes en general gestionan y controlan la data de los servicios que prestan [30].

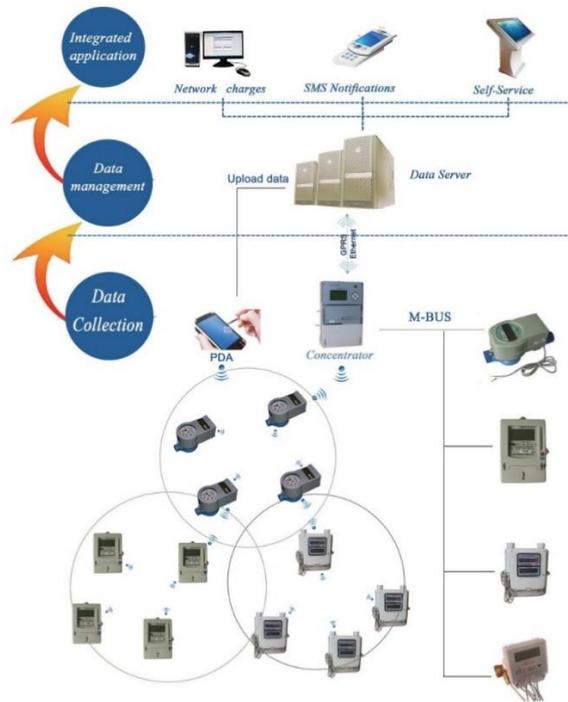


Figura 16. Red de Smart Metering de medidores que opera bajo un sistema AMR [27].

2.2. Redes LPWAN

El aumento de los dispositivos conectados a internet ha sido significativo, se prevé que el número de dispositivos conectados casi se triplique a nivel mundial durante los próximos años, según los De esta forma, se pasaría de aproximadamente 8.740 millones en 2020 a más de 25.400 millones en 2030. Ver figura 17.

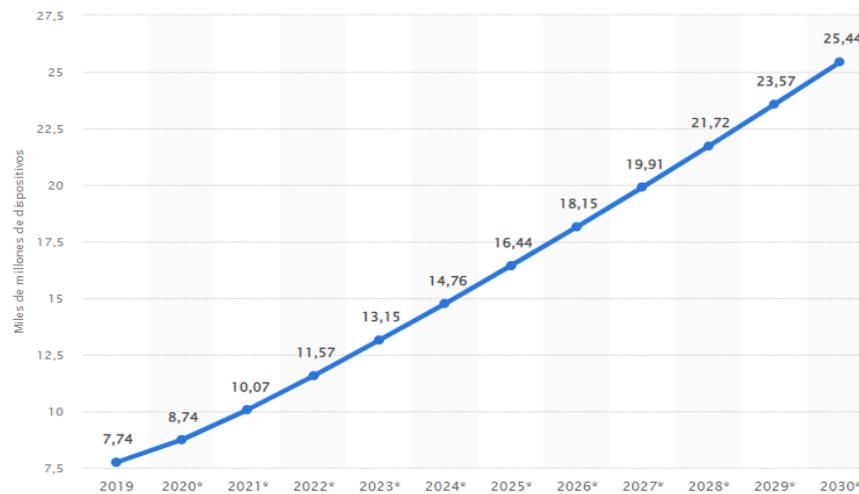


Figura 17. Dispositivos conectados a internet a nivel mundial de 2019 a 2030

Las redes LPWAN, Low Power Wide Area Network, cuyo significado en español es redes inalámbricas de área amplia y baja potencia, surgen a partir del gran aumento dispositivos conectados a internet y de aplicaciones IoT, como se evidencia en la figura 16. En este tipo de aplicaciones generalmente es necesaria la comunicación de gran cantidad de dispositivos y envío de pequeños paquetes de datos con poca frecuencia y de forma segura a través distancias del orden de los kilómetros, a un bajo costo y con un bajo consumo de energía. Requisitos que las redes inalámbricas más comunes de hoy en día como lo son Bluetooth, usado normalmente en redes de área personal, Wi-Fi, para redes de área local, y redes celulares como 2G, 3G, 4G-LTE para redes de área amplia, no pueden cumplir. Por tal motivo, las redes LPWAN están en la capacidad de cumplir requisitos como: largo alcance, bajo consumo de energía, capacidad de señal RF para superar las barreras físicas con el nivel más bajo de atenuación, omnipresencia y, finalmente, bajo costo [4]. Bajo las características mencionadas, cabe resaltar que el largo alcance cubre entre 10 a 40km en zonas rurales y 1 a 5 km en zonas urbanas. Además, el bajo consumo energético, permite prolongar por varios años la vida útil de las baterías con las que operan los módulos de comunicación instalados en los dispositivos para la recolección, envío y recepción de información[31].

Muchas de las tecnologías emergentes que permiten el funcionamiento de las redes LPWAN han surgido en el ancho de banda de frecuencia con y sin licencia. Entre ellas, Sigfox, LoRa y NB-IoT son las tecnologías líderes en la actualidad que involucran muchas diferencias técnicas.

Las redes LPWAN, en comparación con otras tecnologías cumplen con los requisitos mencionados anteriormente, gracias a su relación entre poca velocidad de datos, menor potencia y gran alcance físico. Ver figura 18.

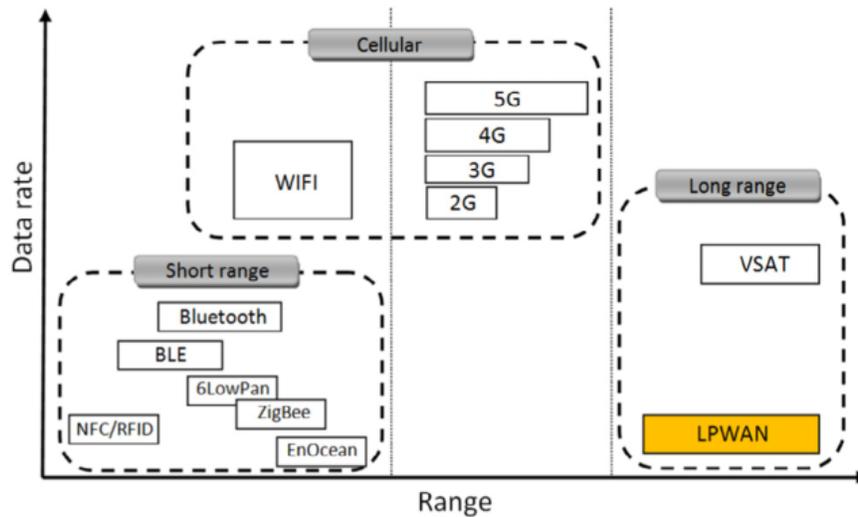


Figura 18. Relación de tecnologías inalámbricas respecto a su velocidad de datos y alcance[31].

2.3. LoRa

LoRa, es el acrónimo de “Long Range” y es una tecnología exclusiva patentada por Semtech, una importante empresa y único productor de circuitos integrados LoRa . Es una tecnología de la capa física que permite comunicación inalámbrica de largo alcance, baja velocidad y bajo consumo de energía. Esto hace que LoRa sea una tecnología empleada en redes LPWAN para el desarrollo de proyectos IoT [32]. Al Semtech dedicarse solo a la producción y comercialización de dispositivos LoRa, permite que cualquier empresa interesada en el desarrollo de soluciones IoT, pueda utilizar esta tecnología para poner en marcha su propia red LPWAN y así poder ofrecer servicios e infraestructura de red a sus clientes.

Entre las características de esta tecnología se encuentra: el alcance de red que oscila entre los 10 a 20km en línea de vista, bajo consumo de energía para los dispositivos que operan con baterías lo cual prolonga su vida útil hasta por 10 años, tasa de transmisión de datos entre 300 bps y 50 Kbps, y alta tolerancia a las interferencias.

La arquitectura de red LoRa está formada por tres elementos:

- Dispositivos finales: Son los dispositivos que se emplearán para conectar los objetos a la red LoRa, y de esta forma recolectar la información generada por los mismos y enviarla hacia las pasarelas.
- Pasarelas: Estaciones base LoRa o gateways encargados de recibir la información emitida por múltiples dispositivos finales para posteriormente reenviarla a los servidores.

- Servidores de red: Ordenadores u equipos encargados de la recepción y el procesamiento de la información enviada a través de las pasarelas y proveniente de los dispositivos finales. Se encarga también de la gestión y configuración de la red y los dispositivos finales.

La arquitectura de red LoRa trabaja bajo una topología de red en estrella de un solo salto, en la que los dispositivos finales se conectan a una o más pasarelas por medio de un enlace LoRa, y estos últimos se conectan al servidor web a través de internet. En esta topología, al estar los dispositivos directamente conectados entre sí, no se requieren enrutadores Ver figura 19.

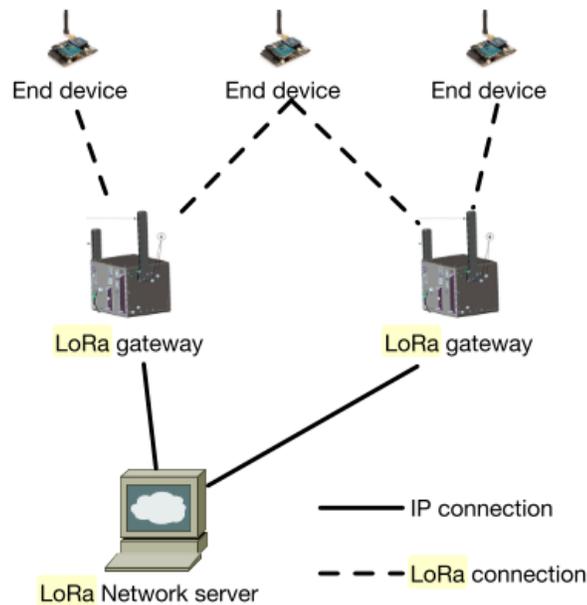


Figura 19. Arquitectura de red LoRa [32].

LoRa hace uso de la técnica de modulación de espectro ensanchado denominada CSS (Chirp Spread Spectrum). Este tipo de modulación utiliza como portadora una señal sinusoidal que aumenta su frecuencia a medida que pasa el tiempo, lo cual permite tolerar ruido, caminos múltiples de señal y el efecto Doppler, mientras mantiene muy bajo el consumo de energía. Esto a cambio de un reducido ancho de banda comparado con otras tecnologías inalámbricas. Esta técnica de modulación opera en la banda sin licencia ISM (Industrial, Scientific and Medical), en las frecuencias 868 MHz en Europa, 915-928 Mhz en Latinoamérica, y 433 MHz en Asia, por tanto, no se generan costos por su uso [33].

Respecto a la trama de la capa física de LoRa, consta básicamente de cuatro secciones, preámbulo, Header, PHY CRC y carga útil, aunque puede venir con una última sección también CRC. Ver figura 20.

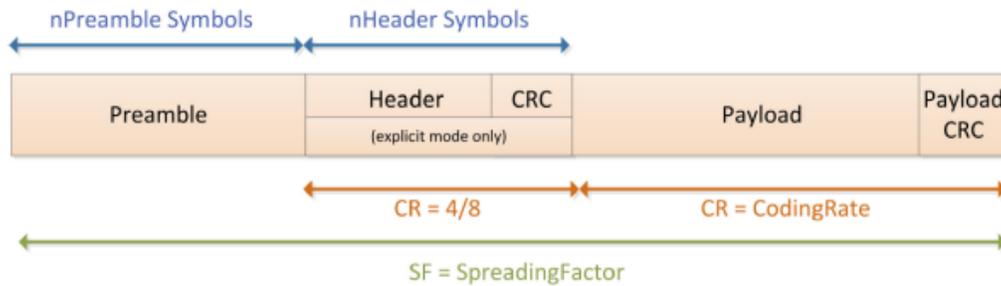


Figura 20. Formato de la trama de la capa física de LoRa[32].

La trama comienza con un preámbulo donde se sincronizan tanto el transmisor como el receptor y puede tener una longitud desde 10 hasta 65.536 símbolos en total. Este comienza con una secuencia de chirridos ascendentes o upchirps constantes que cubren toda la banda de frecuencia, los cuales pueden variar en cantidad dependiendo de la programación dada. Los dos últimos chirps codifican la palabra de sincronización. Esta última se utiliza para diferenciar las redes LoRa que utilizan las mismas bandas de frecuencia, permitiendo de esta forma la concurrencia de distintas redes LoRa en un mismo espacio. Un dispositivo configurado con una palabra de sincronización determinada dejará de escuchar una transmisión si la palabra de sincronización decodificada no coincide con su configuración. Ver figura 21.

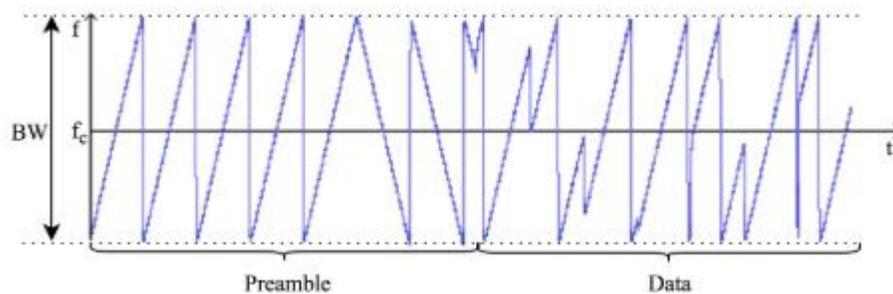


Figura 21. Variación de frecuencia a lo largo del tiempo de una señal de muestra emitida por un transmisor LoRa[32].

Una vez finalizado el preámbulo, la trama continúa con una cabecera opcional y un código de redundancia cíclica para tratar de evitar tramas malformadas que ocupan 20 bits. Cuando este encabezado se presenta, se transmite con una tasa de código de $4/8$. Esto indica el tamaño de la carga útil (en bytes), la tasa de código utilizada para el final de la transmisión y si hay o no un CRC de 16 bits para la carga útil al final de la trama. Posteriormente se encuentra el payload que contiene la información que debe ser enviada, contenida dentro de una trama de acceso al medio LoRaWAN. El tamaño máximo de esta debe ser 255 bytes ya que el tamaño del payload queda definido en un único byte en la cabecera de la trama. Finalmente se encuentra un código de

redundancia cíclica (CRC) para asegurar que la trama es correcta y puede ser procesada por los componentes de la red LoRa [32] [34].

La técnica de modulación CSS empleada por LoRa posee tres parámetros de configuración importantes:

- **Spreading Factor (SF):** El factor de ensanchamiento SF es el encargado de configurar el alcance que puede existir en un enlace entre transmisor y receptor. Este factor se puede establecer en un rango de 7 a 12, y entre mayor sea este, mayor será la sensibilidad en el receptor lo que aumenta el alcance, pero a la vez necesita de un mayor número de upchirp para asegurar el enlace, lo que aumenta el tamaño del preámbulo y disminuye el tamaño de carga útil a transportar.

Factor de ensanchamiento SF	Longitud de chirps en Bytes
7	128
8	256
9	512
10	1024
11	2048
12	4096

Tabla 2. Relación entre el SF y el tamaño de chirridos o chirps en bytes. Fuente propia.

De acuerdo a lo establecido en la tabla 2, la relación directa entre el aumento de SF y el tamaño del preámbulo se puede describir como una relación inversamente proporcional entre potencia y tasa de datos o carga útil, dependiendo del ancho de banda sobre el que se trabaje, que puede ser de 125 kHz, 250 kHz o 500 kHz. Ver figura 22.

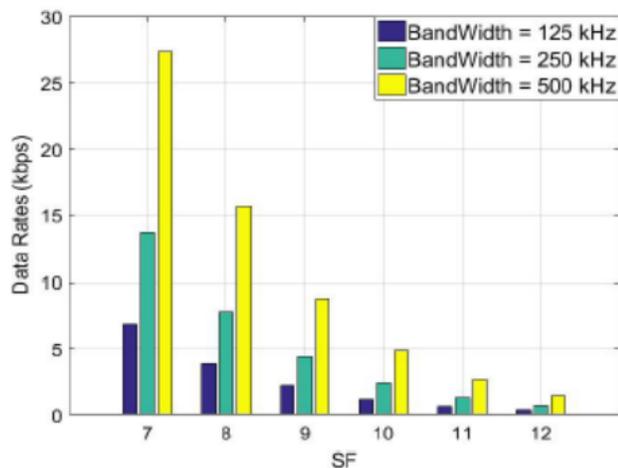


Figura 22. Relación entre la tasa de datos, y el factor SF [35].

- Tasa de código CR (code rate):** Al emplear la tecnología LoRa en el despliegue y conexión de redes, se debe tener un algoritmo de corrección de errores; para el caso de LoRa, se denomina FEC (Forward error correction) o corrección de errores hacia adelante, el cual se puede configurar a través del parámetro CR. LoRa ofrece valores de CR entre 0 y 4, donde CR = 0 significa que no hay FEC. LoRa usa tasas de código de 4/5, 2/3, 4/7 y 1/2. Lo que significa, si CR se denota como $k = n$, donde k representa información útil, y el codificador genera n número de bits de salida, luego $n - k$ serán los bits redundantes. La redundancia permite al receptor detectar y, a menudo, corregir errores en el mensaje, pero también disminuye la tasa de datos efectiva. Ver tabla 3.

Valor de CR	1	2	3	4
Número de bits redundantes	1	2	3	4
Tasas de código	4/5	2/3	4/7	1/2

Tabla 3. Relación entre CR y bits redundantes. Elaboración propia.

En la figura 23 se puede apreciar como a medida que aumenta CR, la tasa de datos disminuye, estas pruebas se realizaron con SF=7 y con 3 diferentes anchos de banda.

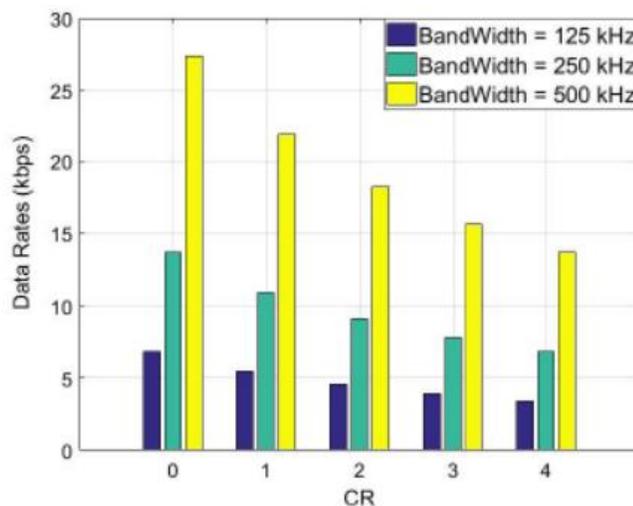


Figura 23. Relación entre CR y la tasa de datos efectiva con SF=7 [35].

- Ancho de banda BW (bandwidth):** El ancho de banda es otro factor importante con el cual se puede aumentar o disminuir la tasa de datos efectiva. LoRa proporciona tres configuraciones de BW escalables de 125 kHz, 250 kHz y 500 kHz también se muestran en la Figura 12. El

transmisor envía los datos ensanchados a una tasa de chips igual al ancho de banda del sistema en chips por segundo por Hertz (hz). Entonces un ancho de banda de 125 kHz corresponde a una tasa de chip de 125 kcps. Ver figura 24.

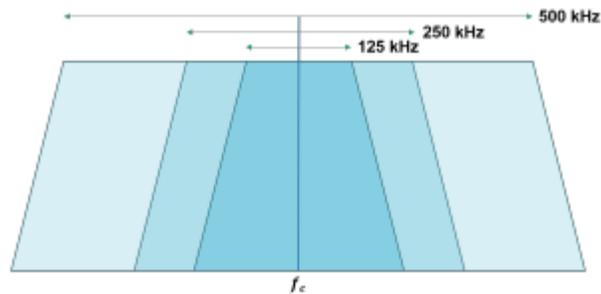


Figura 24. Anchos de banda para LoRa[35]

2.4. Características técnicas y funcionales de los equipos que conforman el sistema AMR de medición inteligente.

En esta sección se describen y especifican las características técnicas y funcionales de los dispositivos hardware y software que conformarán la arquitectura de red para la puesta en marcha del sistema AMR.

- **Medidor de agua potable**

Los nodos finales estarán conformados por el medidor de agua tipo velocidad, cuerpo en bronce, clase metrológica R160, el cual viene pre-equipado para medición inteligente, es decir que está en la capacidad de emitir pulsos que serán captados y transmitidos por el módulo LoRa que se conectará a este medidor. Ver figura 25.



Figura 25. Medidor de agua pre-equipado para medición inteligente. Fuente propia.

A continuación, se presentan las especificaciones técnicas de este medidor. Ver tabla 4.

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN	
Tipo	Velocidad	
Mecanismo de medición	Turbina chorro único / Tipo esfera seca	
Fluido de operación	Agua potable	
Condiciones de operación nominales	Temperatura: T50	TtmA 0,1 °C TtMA 50°C
	Presión: MPA 16	PtMA 16 bar
	Pérdida de presión: ΔP36	36 kpa
Designación	Caudal permanente:	Q_3 2.5 m ³ /h
	Rango de medición:	Q_3/Q_1 : R160
	Caudal máximo:	Q_4 3.125 m ³ /h
Capacidad del indicador	99999,9999 m ³	
Escala mínima del indicador	0,00002 m ³	
Posición de operación	Horizontal	
Error máximo permitido	Zona inferior de caudal: $Q_1 \leq Q \leq Q_2$	± 5,0%
	Zona superior de caudal: $Q_2 \leq Q \leq Q_4$	± 2,0% agua a T ≤ 30°C ± 3,0% agua a T > 30°C

PARÁMETRO		DESCRIPCIÓN
	Clase de precisión:	2
Dimensión (AlxLaxAn) y Peso	84.5mm x 115mm x x81.5mm / 0,285 kg aprox.	
Mecanismo indicador	Tipo análogo compuesto por 5 tambores para números enteros, 5 tambores para decimales e intervalo de verificación de escala en el primer elemento	
Tipo de lectura	Metros cúbicos m^3	
Materiales	Cuerpo	Composite o bronce
	Tapa del visor	Plástico
	Marco del visor	Plástico
	Visor	Policarbonato de alta resistencia al impacto con protección UV
Dispositivos de control (opcional)	Sello de seguridad en policarbonato	
	Filtro a la entrada del cuerpo del medidor	
Clase de sensibilidad	Clase U0/D0	
Garantía	3 años por defectos de fabricación	

Tabla 4. Especificaciones técnicas del medidor de agua potable. Fuente propia.

• Módulo Para Lectura Remota Con Tecnología LoRa

Este módulo está basado en la tecnología de comunicación LoRa y está diseñado para acoplarse adecuadamente al medidor de agua potable presentado en la figura 25. El módulo de comunicación se encarga de recopilar los datos del medidor de agua a través de la emisión de pulsos de este último. Esto se hace por medio de un sensor de tipo inductivo que trae embebido el módulo de comunicación y al fijarlo sobre el visor del medidor, detecta la presencia de una lámina metálica ubicada sobre uno de los relojes de precisión del medidor de agua potable. Esta cuenta con dos puntos plásticos en sus extremos, de modo que esto le permite al sensor identificar el sentido de giro del medidor de acuerdo al flujo y así detectar flujo inverso. Además, está diseñado para recibir un pulso cada 10 litros. Una vez el módulo realiza la recolección de datos, estos son enviados de forma inalámbrica al concentrador o gateway a través de conexión LoRa.

El módulo cuenta con las siguientes características:

- El módulo de transmisión y el medidor son independientes y pueden ensamblados de forma manual. En caso de requerirse, la batería es fácilmente reemplazable. La conexión física entre el medidor y el módulo de comunicación cuenta con sistemas mecánicos de seguridad que permiten evidenciar manipulaciones indebidas.

- El módulo de comunicación cuenta con amplia cobertura de red, señal estable y confiable con tecnología de transmisión de datos LoRa.
- La resolución de lectura del módulo es 1 pulso cada 10 litros.
- El módulo electrónico no interfiere en la lectura manual del medidor, por lo que es posible tomarla con el dispositivo de lectura remota instalado.
- Es posible tener lectura en litros a diferencia de la lectura manual convencional donde solo se tiene en metros cúbicos.

El módulo de comunicación se puede instalar de forma fácil y rápida sobre el medidor. La articulación entre estos cuenta con un pin de seguridad, por lo que no pueden ser retirados sin dejar evidencia de fraude. Ver figura 26.

A continuación, se presentan las especificaciones técnicas del módulo de comunicación. Ver tabla 5.

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
Voltaje de trabajo	3.6 V
Fuente de alimentación	26500 + SPC1520
Almacenamiento de datos	Los datos son almacenados por 10 años
Tecnología de comunicación	LoRa
Frecuencia de transmisión de datos	Una vez cada 12 horas configurable según la necesidad del cliente
Distancia de comunicación	Hasta 2km en línea de vista
Corriente en reposo	<35 μ A
Temperatura ambiente	0.1~50°C
Temperatura media	Medidor de agua fría 0.1~30°C
Consumo en transmisión	50mW
Seguridad: nivel de protección	IP68
Ambiente de instalación	Clase B, se prohíbe en entornos con fuertes campos magnéticos
Vida útil de batería	7 años
Alarma por batería baja	<2.8V

Tabla 5. Especificaciones técnicas del módulo de comunicación. Fuente propia.



Figura 26. Medidor de agua y módulo de comunicación LoRa ensamblados. Fuente propia.

A continuación, se presentan las funciones con las que contará el sistema tras la instalación del módulo de comunicación LoRa dentro de la arquitectura. Ver tabla 6.

FUNCIÓN	DESCRIPCIÓN
Información reportada	Consumo diario en volumen.
Frecuencia de entrega de reporte	Envío de datos de lectura de los medidores de forma automática una vez por día.
Fijación de medición base	El valor inicial del odómetro del medidor se sincroniza con el módulo de comunicación a través de una PDA con software de configuración para el sistema de medición inteligente.
Ajuste de fecha y hora	La hora y fecha de los módulos electrónicos se sincronizan con los reportes periódicos
Alarma por flujo inverso	El sistema emitirá una alarma el módulo detecta un paso de flujo en sentido inverso.
Visualización del voltaje de la batería	La plataforma emite una alarma por batería baja si el voltaje es inferior a 2.8V.

FUNCIÓN	DESCRIPCIÓN
Alarma por ataque magnético.	El módulo detecta la presencia de grandes campos magnéticos que quieran alterar la lectura del medidor.
Alarma por desconexión del módulo.	Se generará una alarma en caso de que no se registre por más de 24 horas la lectura diaria en la plataforma.
Precauciones con la batería	Mantener alejada de fuentes de calor y fuego. No perforar. Evitar cortocircuito al instalar y reemplazar.

Tabla 6. Funciones que tendrá el sistema al instalar un medidor con módulo de comunicación LoRa dentro de su arquitectura. Fuente propia.

- **Gateway - Concentrador**

NWM-950 es una puerta de enlace de grado industrial para interiores y exteriores LoRa diseñada para la recepción de datos los módulos de comunicación y enviarlos hacia el servidor. Proporciona acceso 2G / 4G a Internet. Alimentado por suministro eléctrico a través de un adaptador de 15VDC. Ver figura 27.

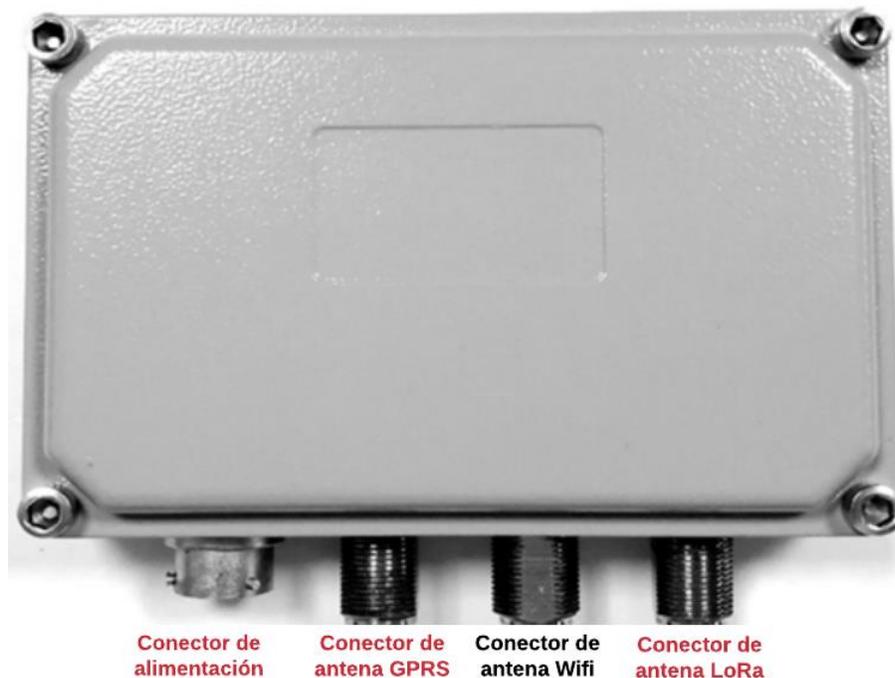


Figura 27. Concentrador para sistema de medición inteligente. Fuente propia.

A continuación, se presentan las especificaciones técnicas del Gateway. Ver tabla 7.

ESPECIFICACIONES BÁSICAS		
Voltaje de alimentación	Adaptador AC 220V	
Capacidad de medidores conectados	≤2560 unidades	
Capacidad de recepción en paralelo	≤127 unidades	
Capa de enrutamiento	≤ 8 capas	
Consumo de energía estática	0.18W	
Consumo de energía al leer el medidor	0.3 W	
Capacidad de almacenamiento	32MB	
Precisión de tiempo	< ± 1 segundo / 1 día	
Interface de comunicación	WAN	GSM/GPRS módulo, soportes TCP/IP
	LAN	Módulo de comunicación RF LORA 920Mhz incorporado
	Local	<ul style="list-style-type: none"> • USB 2.0 • WIFI
Características mecánicas	Material	Acero inoxidable
	Nivel de protección	IP65
Ambiente de trabajo	Temperatura de funcionamiento: -30 °C ~ + 55 °C Temperatura de almacenamiento: -40 °C ~ + 85 °C Humedad relativa: 10% ~ 90%	
Dimensión (mm)	148x98x43	
Peso (gramos)	555g	
Método de instalación	Para colgar en pared o poste	
ESPECIFICACIONES 2G		
Rango de frecuencia	GSM850, EGSM900; DCS1800, PCS1900	
Poder de transmisión	Clase4(2W)	GSM 850, EGSM900
	Clase1(1W)	DCS1800, PCS1900
Sensibilidad de recepción	-180dBm(±2dBm) @ conducción	
Tarjeta SIM	Método de instalación	Inserción interna
	Tipo	tarjeta mediana
Antena	Antena de Ventosa	
ESPECIFICACIONES 4G		
Estándar	GSM/WCDMA/TD-SCDMA/EVDO/LTE	

ESPECIFICACIONES BÁSICAS		
Potencia de emisión LTE	0.25W	
Sensibilidad de recepción LTE	97 DBM @ conducción	
Tarjeta SIM	Método de instalación	Inserción interna
	Tipo	tarjeta mediana
Antena	Antena ventosa	
ESPECIFICACIÓN INALÁMBRICA DE RF		
Tipo de red	Estructura MESH (MESH)	
Velocidad de red	1000 nodos, típicamente 30 minutos	
Frecuencia de trabajo	915Mhz – 920Mhz	
Método de modulación	LoRa	
Intervalo de frecuencia	$\geq 300\text{KHz}$	
Transmisión	$\leq 50\text{mw}$	
Sensibilidad de recepción	128dBm @ 5Kbps	

Tabla 7. Especificaciones técnicas del concentrador o gateway. Elaboración propia.

- **Repetidor**

El uso de este dispositivo en la red es opcional, dependerá de las necesidades del cliente y de acuerdo a la distribución de la red, ya que el repetidor puede amplificar la señal de comunicación para mantener la calidad y aumentar la distancia de transmisión en la red. Ver figura 28.



Figura 28. Repetidor de sistema de medición inteligente para medidores agua. Vista frontal y lateral. Fuente propia.

A continuación, se presentan las especificaciones técnicas del repetidor. Ver tabla 8.

PARÁMETRO	ESPECIFICACIÓN
Frecuencia de trabajo	915MHz
Modo de modulación	Modulación de espectro extendido LoRa
Potencia de emisión	50Mw 2.1-3.6V
Sensibilidad de recepción	-132dBm 5Kbps
Velocidad de transmisión en el aire	5 Kbps
Velocidad de interfaz	1200–57600bps
Humedad de trabajo	10% ~ 90% (sin condensación)
Temperatura de trabajo	-20 ° C - 70 ° C
Potencia	2.1 - 3.6V
Corriente de transmisión (valor típico)	90 mA 50 mW
Corriente de recepción (valor típico)	13 mA 5 Kbps
Corriente inactiva	2.5uA 2.1-3.6V
Periodicidad recibiendo corriente	18uA (promedio)
Tiempo de activación	5 ms - 5 Kbps (promedio)
Distancia de transmisión	1500 metros a 5 Kbps (dependiendo del entorno en el sitio)
Duración de la batería	6 años (Batería reemplazable)
Relación repetidor cantidad de medidores instalados	50 ~ 100: 1 (recomendado), 200: 1 (Máx.)

Tabla 8. Especificaciones técnicas del repetidor. Fuente propia

- **Plataforma web**

El equipo de trabajo de la empresa Metrex S.A como proveedor, hará uso de una plataforma web conectada al servidor central del proveedor externo, a través de un perfil de usuario asignado. De esta forma será posible monitorear los parámetros que se desean evaluar tras la instalación de este piloto, con el fin de analizar y documentar el desempeño y funcionamiento del mismo. De la misma forma se le asignará un perfil de usuario al cliente para que pueda ingresar a la plataforma y tener el control de la información generada por el sistema AMR. A través de las herramientas con las que cuenta la plataforma web, es posible analizar y realizar lecturas estadísticas de los medidores lo cual ayuda a construir una solución integradora que permita aumentar la eficiencia de la gestión

de la información. A esta plataforma se puede acceder a través de internet con la dirección <http://121.40.138.150:8095/>. Ver figura 29 y 30.

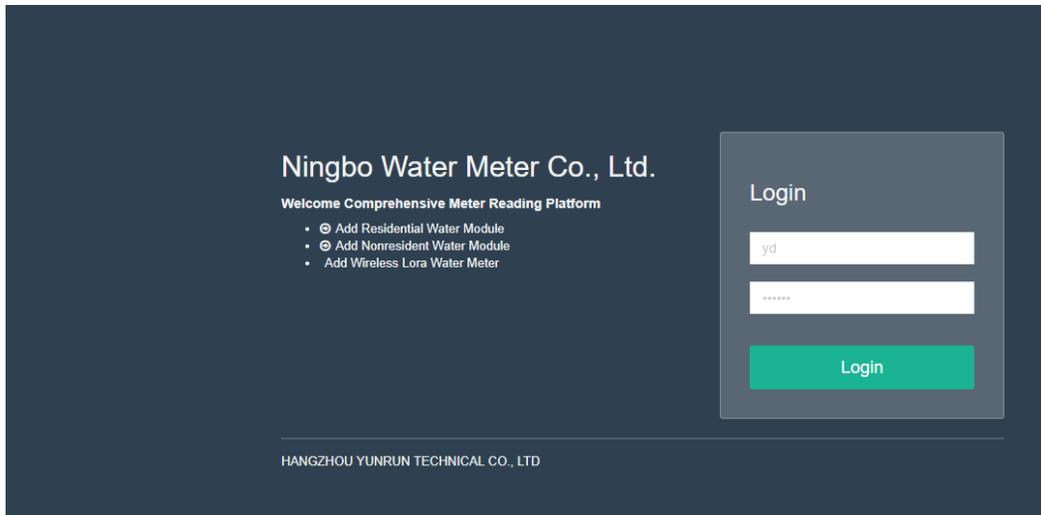


Figura 29. Interfaz de inicio de sesión para ingresar a plataforma de gestión. Fuente propia

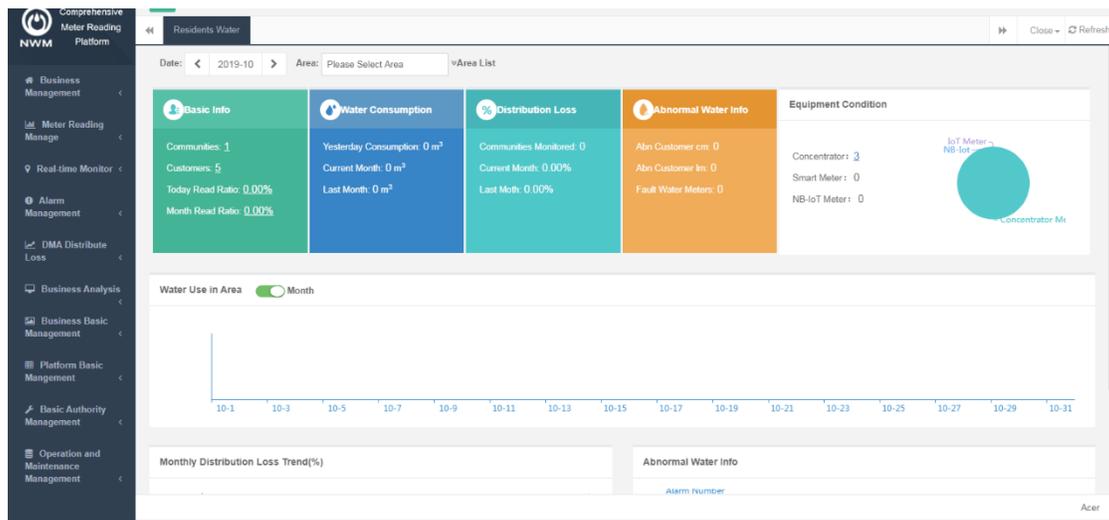


Figura 30. Interfaz principal de la plataforma al iniciar sesión. Fuente propia

2.5. Alistamiento de equipos para un correcto funcionamiento dentro de la red

Para garantizar un adecuado funcionamiento del sistema AMR, es necesario realizar siempre un alistamiento de cada uno de los equipos que conforman la red, tal como se especifica a continuación:

- **Alistamiento de medidores:**

Para un correcto funcionamiento de los nodos finales, es decir, los medidores que estarán conectados a los módulos de comunicación, se debe seguir el procedimiento mencionado a continuación:

- 1) Antes de unir los módulos de comunicación a los medidores, estos últimos deben ser calibrados en el laboratorio de agua y contar con su respectivo certificado, para su correcto funcionamiento.
- 2) Instalar y asegurar los módulos de comunicación a los medidores de tal forma que los números seriales correspondan.
- 3) Se debe verificar la sincronía entre el valor de lectura registrado en el odómetro del medidor y el captado por el módulo de comunicación, para ello se debe hacer uso de una hand-held, PDA o computadora de mano, suministrada por el proveedor. Esta tiene una aplicación de escritorio propietaria, desarrollada exclusivamente para realizar tareas de lectura y configuración de los parámetros relacionados con los módulos de comunicación. El funcionamiento de esta PDA se especifica más a detalle en el anexo 1 “Manual de usuario PDA”. De acuerdo a lo consignado en dicho manual, para obtener la lectura registrada en el medidor, se ingresa a la opción “READ” de tal forma que, si el medidor se encuentra sincronizado correctamente con el módulo, el valor que aparece en el campo “VALUE” debe ser el mismo que se observa en el odómetro del medidor. Ver figura 31.



Figura 31. Verificación de sincronía entre medidor y módulo de comunicación. Fuente propia.

En caso de que estos valores no correspondan o el valor del medidor no pueda ser leído a través de la PDA, se debe proceder a la modificación de parámetros, siguiendo el procedimiento indicado en el Anexo 2 “2. Manual- Alistamiento de medidores de agua AMR”, de modo que, al hacer nuevamente la verificación, el valor de lectura registrado en el medidor y el número serial, coincidan con los enviados por el módulo a la PDA. Además, para que dicha comunicación entre el módulo y la PDA sea exitosa, se debe garantizar que en el proceso de modificación de parámetros, los datos correspondientes a ID y frecuencia de la red estén fijados en 920kHz y 1234 respectivamente. Dicho proceso se especifica en el anexo 2.

- **Alistamiento del Gateway**

Para garantizar que los datos emitidos por los módulos sean recibidos por el Gateway y posteriormente enviados al servidor web, se debe tener en cuenta una serie de pasos previos que se deben llevar a cabo para un correcto funcionamiento de este equipo.

- 1) Como se mencionó en el apartado 2.4 en lo que respecta al Gateway, se debe garantizar un suministro eléctrico permanente a través de un adaptador de 15VDC.
- 2) Se debe instalar una Sim Card 4G preferiblemente, teniendo en cuenta sus ventajas en cuanto a velocidad y cobertura. Tener especial cuidado con la dirección de ingreso de la Sim en el slot. Ver figura 32.
- 3) Conectar las antenas correspondientes a la señal GPRS y LoRa, de acuerdo a la distribución de puertos correspondiente. Ver Figura 27.
- 4) Al ser una red LoRa privada, creada para conectar nodos únicamente desarrollados por el proveedor, el Gateway también tiene su propia configuración ya establecida, sin embargo, el cliente debe configurar algunos parámetros generales de acuerdo a la red y a la zona geográfica donde se va a instalar este dispositivo. Para ello, se debe conectar el Gateway al computador por medio de un cable USB tipo A/B. Ver Figura 32.

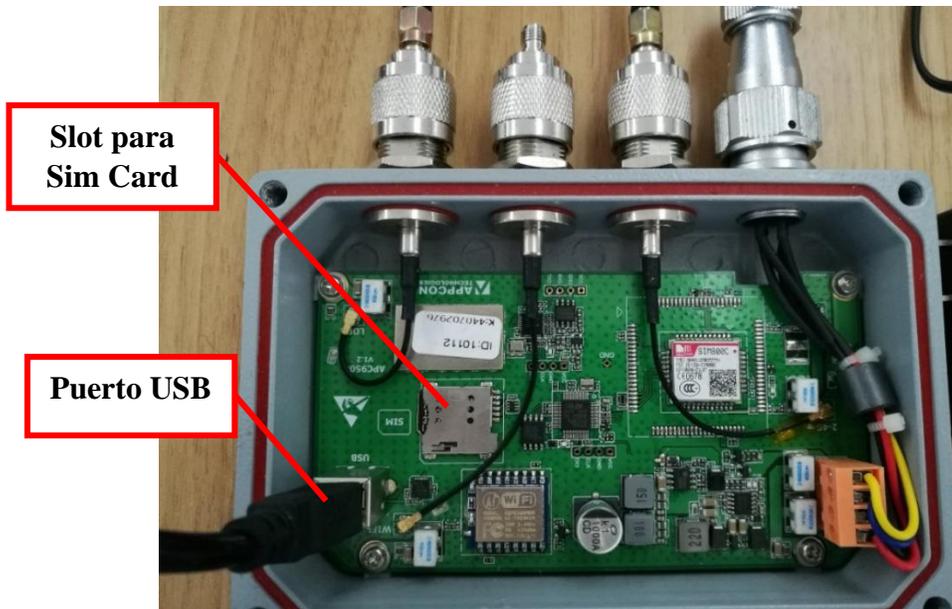


Figura 32. Conexiones del Gateway. Fuente propia.

5) Una vez encendido el Gateway y conectado al computador, se ejecuta una aplicación de escritorio desarrollada y suministrada por el proveedor externo, llamada “Wireless Meter Management Tools v1_4”. Ver figura 33. En esta se debe seleccionar el puerto serial al que se conectó el Gateway y posteriormente fijar los parámetros de la siguiente forma:

- Frecuencia: 920000 (en KHz)
- Net ID: 1234
- ID del concentrador: 1908001
- GPRS Heartbeat: dentro del rango 5000 ms – 59999 ms
- Server IP: 121.40.138.150
- Server Port: 23006
- APN: Este valor varía de acuerdo a la región y al operador móvil al que esté registrado la Sim Card. En este caso, para movistar en Colombia es: internet.movistar.com.co

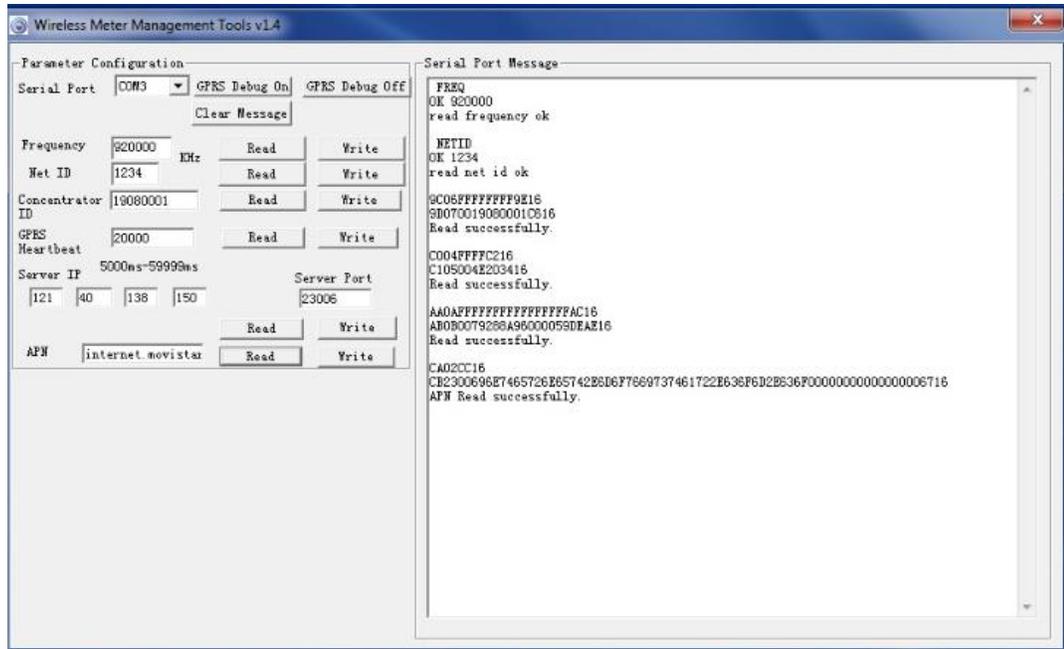


Figura 33. Configuración de parámetros para el Gateway. Fuente propia.

- 6) Una vez culminado el proceso anterior, se desconecta el cable USB del Gateway, se pone la tapa, se atornilla y se instala en un punto donde tenga una buena línea de vista, con pocos obstáculos y se ubican las antenas en un punto más alto para mayor cobertura. De esta forma el Gateway está listo para usar y se debe proceder a comprobar su conectividad en la plataforma web.

- **Alistamiento de plataforma web.**

- 1) Para ingresar a la plataforma, se hace a través de la dirección <http://121.40.138.150:8095/> y se inicia sesión al perfil de pruebas asignado para el personal de Metrex, con los siguientes datos:
 - Usuario: piloto
 - Contraseña: 1
- 2) Una vez iniciada la sesión, se procede a comprobar la conexión exitosa del Gateway en la plataforma, siguiendo la ruta en el menú de la parte lateral izquierda “Meter Reading Manage” – “Concentrator meter Reading”. Ver figura 34.

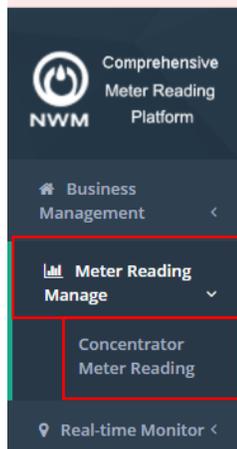


Figura 34. Ruta para la verificación de conexión del Gateway. Fuente propia.

- 3) En esta interfaz, se debe desplazar hasta la sección llamada “Console” donde se podrá verificar en la columna “Status” el estado de conexión del Gateway. Ver Figura 35. Tener en cuenta que el tiempo mínimo que el Gateway debe estar conectado antes de que aparezca en estado “Connected” es de 30 minutos.

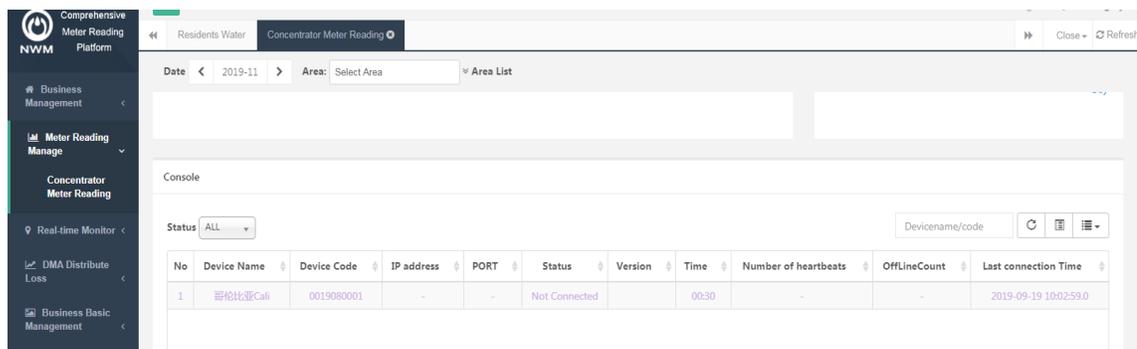


Figura 35. Interfaz para la verificación de conexión del Gateway. Fuente propia.

- 4) Una vez el estado de conexión esté en “Connected” el Gateway estará listo para recibir y transmitir información a la plataforma web. El procedimiento para la lectura de datos y envío de comandos a los medidores desde la plataforma, se explica más a detalle en el Anexo 3 “Manual de usuario plataforma web”.

2.6. Diseño del plan de pruebas

Una vez configurados cada uno de los equipos que conformarán la red, se procede a elaborar un plan de pruebas que se llevará a cabo previamente al proceso de instalación, con el fin de identificar fallas en el funcionamiento de los equipos que impidan el correcto funcionamiento global del sistema AMR y de esta forma poder tomar acciones sobre ello. Las pruebas se realizarán en base a la evaluación de dos criterios relevantes y que van de la mano en la medición inteligente para el

servicio de agua potable, que son, la conectividad y la correspondencia entre los datos de lectura generados por los medidores y los registrados en la plataforma web o en PDA en caso de no tener conexión a la plataforma. Esto se propuso en dos escenarios diferentes, en laboratorio y en campo para así variar las condiciones y tener certeza de evaluar todas las posibilidades. Ver tabla 9.

<i>PLAN DE PRUEBAS</i>			
Elaborado por:	<ul style="list-style-type: none"> Lina Velasco Rodríguez 	Aprobado por:	Luisa Fernanda Pineda
Tema:	<i>Plan de pruebas previo a instalación de piloto de medición inteligente para el servicio domiciliario de agua a través de la instalación de un sistema de Lectura de Medición Automática (AMR)</i>		
Objetivo:	Identificar las fallas y opciones de mejora para un óptimo funcionamiento del sistema AMR.		
Tiempo estimado:	2 semanas (1 semana para pruebas en laboratorio y 1 semana para pruebas en campo)		
Implementos:	<ul style="list-style-type: none"> 3 medidores de agua tipo velocidad- bronce R160. 3 módulos de comunicación con tecnología LoRa 1 PDA 1 Gateway 1 imán 1 Sim Card 4G 		
DISEÑO			
ESCENARIO	1. Conectividad	2. Correspondencia entre datos de lectura.	
Laboratorio	(1) Comprobar la concordancia del número serial asignado al medidor con el almacenado en el módulo de comunicación y que esté trabajando en los parámetros correctos de frecuencia e ID de red para asegurar la transmisión de datos. (2) Comprobar la concordancia del valor de la lectura registrada	(1) Simular el paso de un bajo caudal de agua por el medidor a través de un compresor de aire. (2) Comprobar si el valor del volumen que va cambiando en el registro del medidor es captado y transmitido por el módulo de comunicación correctamente.	

	<p>en los medidores, con la almacenada en el módulo de comunicación y así evaluar la transmisión de datos a la PDA.</p> <p>(3) Evaluar la conectividad del Gateway y la transmisión de datos a la plataforma web.</p> <p>(4) Comprobar la calidad de transmisión a diferentes distancias dentro del laboratorio para comprobar el alcance de señal para cada módulo empleando la PDA.</p>	<p>(3) Simular el paso de un alto caudal de agua por el medidor a través de un compresor de aire.</p> <p>(4) Comprobar si el valor del volumen que va cambiando en el registro del medidor es captado y transmitido por el módulo de comunicación correctamente.</p> <p>(5) Simular el paso de un caudal estándar de agua por el medidor a través de un compresor de aire de forma continua por un día.</p> <p>(6) Cortar el suministro de aire finalizado el día y comprobar si el valor del volumen en el registro del medidor es captado y transmitido por el módulo de comunicación correctamente.</p>
<p>Campo</p>	<p>(1) Comprobar la concordancia del número serial asignado al medidor con el almacenado en el módulo de comunicación y que esté trabajando en los parámetros correctos de frecuencia e ID de red para asegurar la transmisión de datos.</p> <p>(2) Comprobar la concordancia del valor de la lectura registrada en los medidores, con la almacenada en el módulo de comunicación y así evaluar la transmisión de datos a la PDA.</p>	

	<p>(3) Evaluar la conectividad del Gateway y la transmisión de datos a la plataforma web.</p> <p>(4) Comprobar la calidad de transmisión a diferentes distancias dentro del laboratorio para comprobar el alcance de señal para cada módulo.</p> <p>(5) Comprobar la calidad de transmisión de datos para cada módulo ante la presencia de obstáculos.</p>	
Criterios de aceptación		
<ul style="list-style-type: none"> • Teniendo en cuenta la relación entre la cantidad de medidores que transmiten datos con respecto al total de medidores tomados para prueba, el porcentaje de éxito en las pruebas de conectividad debe ser superior al 95%. • La diferencia máxima permisible entre los datos reales y los registrado en la plataforma web o en la PDA será de $2m^3$ para cada medidor, siendo este un error del 100%. 		

Tabla 9. Plan de pruebas. Fuente propia

2.7. Resultados de la ejecución del plan de pruebas

El plan de pruebas detallado en la tabla 9 se ejecutó por primera vez con los equipos de prueba con los que contaba Metrex en el momento, los cuales fueron suministrados por el proveedor. De esta forma fue posible conocer si el funcionamiento de los equipos era el correcto y así poder evaluar la tecnología y conocer si efectivamente sería posible realizar la oferta al cliente y posterior instalación del piloto bajo las características técnicas y funcionales de dichos equipos. Este proceso fue importante porque permitió identificar las fallas y deficiencias en el funcionamiento de los equipos y de esta forma generar un reporte y unas solicitudes de mejora y soporte técnico para el proveedor. Con ello se garantizó que el nuevo lote de equipos que iba a suministrar, contara con las mejoras solicitadas.

Resultados pruebas de conectividad en laboratorio:

- 1) Inicialmente, se verificó que al leer el número serial del medidor, el cual es exclusivo para cada uno, el valor frecuencia de trabajo y el ID de la red, fuesen los correctos para cada módulo de comunicación. Este proceso se realiza de acuerdo a lo planteado en la sección 2.5 en la parte correspondiente al alistamiento de medidores.

Los datos coincidieron de forma satisfactoria. Ver figura 36. En caso de que hubiese un error, se procede a la modificación de los mismos siguiendo el proceso especificado en el Anexo 2 “Manual- Alistamiento de medidores de agua AMR”, como se mencionó en la sección 2.5.



Figura 36. Lectura de parámetros del módulo de comunicación LoRa a través de la PDA.

Fuente propia

- 2) Una vez configurados los parámetros, es posible realizar la petición desde la PDA a través de la aplicación instalada en ella, para verificar que la lectura que se visualiza en el registro del medidor y la que se lee en la PDA sean las mismas, teniendo en cuenta que si existe alguna diferencia entre los valores, este debe ser menor al $2m^3$. Ver figura 37.

Aunque el envío de datos fue exitoso, los valores no coinciden, por tanto, la información que está enviando el módulo de comunicación no es la correcta. El valor del desfase supera los $2m^3$, de modo que este caso debe reportarse.



Figura 37. Lectura del valor registrado en el medidor empleando la PDA. Fuente propia.

- 3) Para evaluar la conectividad del Gateway, se sigue el procedimiento especificado en la sección 2.5 en la parte correspondiente al alistamiento del Gateway. Una vez realizado este proceso, la única forma de comprobar la conectividad es a través de la plataforma web, por tanto, se ingresa al perfil asignado para Metrex, donde están previamente registrados los medidores y el Gateway, pero al entrar a verificar la conectividad, su estado era “Not connected” Ver figura 38.

No	Device Name	Device Code	IP address	PORT	Status	Version	Time	Number of heartbeats	OffLineCount	Last connection Time
1	器伦比派Call	0019080001	-	-	Not Connected		00:30	-	-	2019-12-06 09:59:42.0

Figura 38. Estado de conexión del Gateway en la plataforma web. Fuente propia.

Ante esto, para descartar que el error de conectividad fuese causado por la conexión a internet, se hizo un cambio de Sim Card con paquete de datos disponible del mismo operador, pero tampoco fue posible que el Gateway se conectara. Ante varios intentos fallidos, se decide reportar también este error puesto que, al no haber conexión entre el Gateway y el servidor, no es posible la visualización de los datos en plataforma.

- 4) Para comprobar la calidad de transmisión de los datos dentro del laboratorio, se empleó la PDA y a través de ella se envió la petición para obtener la lectura registrada en los medidores de pruebas a diferentes distancias. En este caso todos los intentos fueron exitosos ya que dentro del laboratorio no hay una las distancias no superan los 20 metros lineales. Por tanto, el envío de datos desde los medidores a la PDA es óptimo en este tipo de escenarios donde las distancias no son muy grandes. De este modo se puede concluir que hay un 100% de conectividad de los medidores, cumpliendo así con el criterio de aceptación.
- 5) Al no tener conectividad del gateway con la plataforma, no es posible verificar si el valor de lectura diaria que deben enviar los módulos de comunicación, se registró correctamente.

Resultado pruebas de conectividad en campo:

- 1) Estas pruebas de campo se harán en un espacio mucho más amplio para poder evaluar la conectividad y calidad en la transferencia de los datos a distancias mayores y con presencia de obstáculos. Se realizarán entonces a las afueras de la planta física de la empresa Metrex S.A. Para ello se utilizan dos medidores de agua conectados respectivamente a los módulos de comunicación LoRa. Inicialmente se comprueba la concordancia del número serial asignado al medidor con el almacenado en el módulo de comunicación y que esté los parámetros de frecuencia e ID de red estén fijados en 920kHz y 1234 respectivamente. Ver figura 39 y 40.



Figura 39. Validación de parámetros en medidor para pruebas de campo. Fuente propia.



Figura 40. Validación de parámetros en medidor para pruebas de campo. Fuente propia.

- 2) Una vez verificado que los parámetros estaban correctamente establecidos, se procede a enviar la petición de lectura a cada uno de los medidores desde la PDA. De esta forma se confirma una conectividad del 100% entre módulo de comunicación y PDA antes de comenzar a variar la distancia entre la PDA y el medidor.
- 3) Para estas pruebas de campo tampoco fue posible evaluar la conectividad del gateway y la transmisión de datos a la plataforma, debido a que el problema de conexión del gateway persiste, tal como se explicó en los resultados de las pruebas de laboratorio.
- 4) Para llevar a cabo las pruebas de conectividad y transmisión de datos, se empleó la PDA y a través de ella se envió la petición para obtener la lectura registrada en los medidores de pruebas a diferentes distancias. Inicialmente se ubicaron los dos medidores AMR juntos, en la parte lateral derecha a las afueras de la planta. Ver figura 41. Los dos medidores AMR con números seriales 20603 y 206001 se identificarán con el color amarillo y rojo respectivamente. Ver figura 42.



Figura 41. Primera ubicación de los medidores AMR para pruebas de campo. Fuente propia.



Figura 42. Ubicación inicial de los medidores AMR a los alrededores de la planta física de Metrex S.A

A partir de la distribución inicial que se muestra en la figura 42, se realizó la primera prueba de conectividad en la que se evaluaron las máximas distancias y las direcciones en las que se obtenía la lectura de los medidores en la PDA. Ver figura 43.



Figura 43. Prueba de conectividad con medidores AMR a diferentes distancias. Fuente propia.

Posteriormente, se separaron los medidores y se ubicaron en partes opuestas. Nuevamente se recorrieron distancias hasta encontrar la máxima donde aún se obtuviera la lectura de los medidores en la PDA. Ver figura 45.



Figura 44. Prueba de conectividad con medidores AMR a diferentes distancias. Fuente propia.

Como se puede observar en las figuras 43 y 44, ninguna de las distancias máximas a las que aún es posible obtener la lectura del medidor, supera los 2 km. Por ello, se consideró la opción de sujetar un cable conductor desde el medidor a la malla metálica, para comprobar si esto mejoraba un poco la capacidad de cobertura de la antena. Ver figura 45.

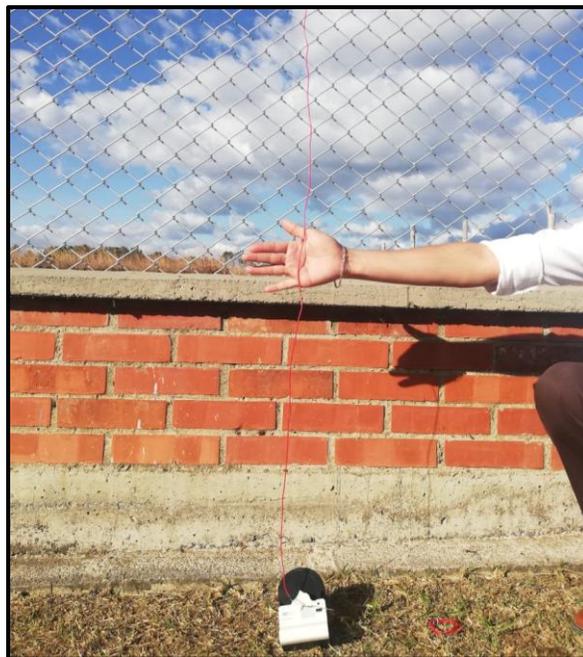


Figura 45. Sujeción de cable conductor para prueba de cobertura. Fuente propia.

- **Resultados de pruebas de consumo**

En este tipo de pruebas se busca comprobar que al simular a través de aire comprimido el paso de flujo por el medidor, los datos de lectura que se registra en el odómetro, coincida con el que se lea en la PDA o en la plataforma web una vez el Gateway esté en funcionamiento. Estos valores no deben tener un desfase mayor a $2m^3$ Para ello, se realizaron los casos de pruebas de consumo especificados en la tabla 9. En todos esos casos, ocurrió algo similar, y es que el odómetro del medidor gira correctamente ante el paso de flujo, sin embargo, al leer este valor a través de la PDA hay un gran desfase entre esos valores, por tanto, ese problema debe ser reportado. Ver figura 48.



Figura 48. Prueba de consumo con medidor de agua AMR. Fuente propia.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos tras esta primera ejecución del plan de pruebas con los primeros equipos de muestra enviados por el proveedor, se reportan las fallas más significativas y que afectan el correcto funcionamiento del sistema AMR. A partir de ello se crean una lista de solicitudes para el proveedor en donde es importante su intervención para la mejora de las características técnicas y funcionales de los equipos y de esta forma pueda tenerlas en cuenta para el próximo lote que enviará. Ver tala 10.

<i>Opciones de mejora a partir de los resultados de las pruebas</i>			
Elaborado por:	• Lina Velasco Rodríguez	Aprobado por:	Luisa Fernanda Pineda
Tema:	Solicitudes de mejora dirigidas al proveedor, a partir de los resultados obtenidos de las pruebas de conectividad y consumo en laboratorio y en campo		
Objetivo:	Mejorar las condiciones de operación de cada uno de los equipos del sistema AMR.		
Solicitudes			
<ul style="list-style-type: none"> • Los módulos de comunicación LoRa tienen una cobertura de 2 km en línea de vista según su ficha técnica, sin embargo, en las pruebas de campo se evidenció que ni siquiera se alcanza una distancia de 1km al enviar la petición de lectura desde la PDA. Sin embargo, esto mejoró un poco al unir un cable conductor al medidor AMR, concluyendo así que la antena interna del módulo no está cumpliendo con los requerimientos de cobertura adecuados. Por ende, se solicita una mejora en este aspecto y además revisar el ajuste de los parámetros SF, CR Y BW de modo que la velocidad del envío de datos sea optimizado en equilibrio con la carga útil que se desea enviar y al ancho de banda. • No se ha podido establecer conexión con el Gateway ya que al parecer éste no está operando en la red 4G de los operadores móviles en Colombia. • Se evidenció un desfase significativo entre el valor de consumo que se visualiza en el odómetro del medidor y el enviado a la PDA, este desfase supera los 2m³ por lo cual no es aceptable. Al parecer el módulo está programado para leer un pulso cada 10 litros pero el sensor está ubicado sobre la manecilla que mide 1 litro cada vuelta, lo cual puede estar generando el desfase. <p><i>De acuerdo a lo expuesto, se solicita sean revisados cada uno de los aspectos anteriores y sean realizadas las mejoras necesarias.</i></p>			

Tabla 10. Opciones de mejora a partir del resultado de las pruebas. Fuente propia

CAPÍTULO 3

Implementación de las fases de ingeniería para la ejecución del piloto.

3.1. Ingeniería de Diseño

3.1.1 Ingeniería conceptual

3.1.1.1 Contexto

La empresa Metrex S.A es proveedor de medidores para varios de los acueductos a nivel nacional, entre ellos, el operador, administrador y prestador del servicio público domiciliario de acueducto y alcantarillado CENTROAGUAS S.A. ESP en la ciudad de Tuluá. Gracias a esto a través de la sugerencia realizada por un empleado de dicho acueducto al señor Roberto Ramírez, dueño y representante legal del edificio de aparta suites “CALI TOWER SUITES & LOFT” ubicado en la ciudad de Cali, él pudo conocer de los productos y servicios ofrecidos por Metrex S.A. De acuerdo a ello, a comienzos del año 2019 se puso en contacto con la empresa a través de la página web de la misma. Remitió una solicitud en la cual manifestaba la necesidad de hacer una nueva instalación para el servicio de agua potable de su edificio que se encontraba en obras de remodelación. Además de instalar los medidores de agua, deseaba saber si la empresa contaba con un sistema de medición remota para ésta línea, de modo que él pudiera automatizar este proceso de lectura para el medidor de cada apartasuite y los totalizadores, similar a un sistema de medición inteligente que ya tenía implementado para la línea de energía. Todo esto con el fin de encaminar sus obras para consolidar su edificio como un “Smart Building”. Esta solicitud fue atendida por el Director Técnico de la empresa Jaime Ordoñez y remitida posteriormente por él al área de Investigación y Desarrollo (I+D) para que fuese estudiada más a detalle.

3.1.1.2 Análisis de requerimientos

Una vez analizada la viabilidad de la solicitud enviada por el cliente, el coordinador de I+D, el Ingeniero Luis Fernando Pedraza quién en ese tiempo era el encargado de los proyectos orientados a medición inteligente, se contactó con el señor Roberto Ramírez para acordar una visita técnica las instalaciones del edificio y poder así evaluar más a detalle los requerimientos. Esta visita se realizó el 20 de junio del 2019 y por parte de Metrex S.A se trasladaron a la ciudad de Cali el Ingeniero Luis Fernando Pedraza y el auxiliar de Metrología Eliecer Garcés.

En la ciudad de Cali, se encuentra ubicado el edificio de aparta suites “CALI TOWER SUITES & LOFT”, más específicamente en la avenida 3 Norte # 19N-14, a de 4.5 km de distancia del centro de la ciudad. Ver figura 49.

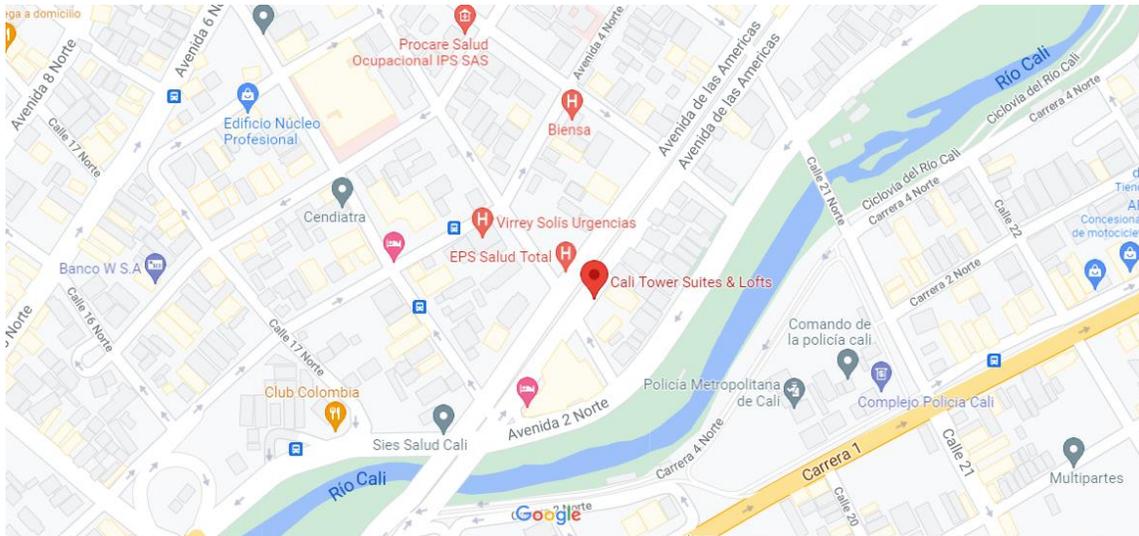


Figura 49. Ubicación del edificio "Cali Tower Suites & Lofts" Fuente: Google Maps.

El edificio presta el servicio de hospedaje al público en aparta-suites amobladas, y toma como referencia de ubicación el reconocido edificio “Torre de Cali”, ya que está ubicado justo al frente. Ver figura 50 y 51.



Figura 50. Vista lateral del edificio "Cali Tower Suites & Lofts". Fuente: Google Maps.

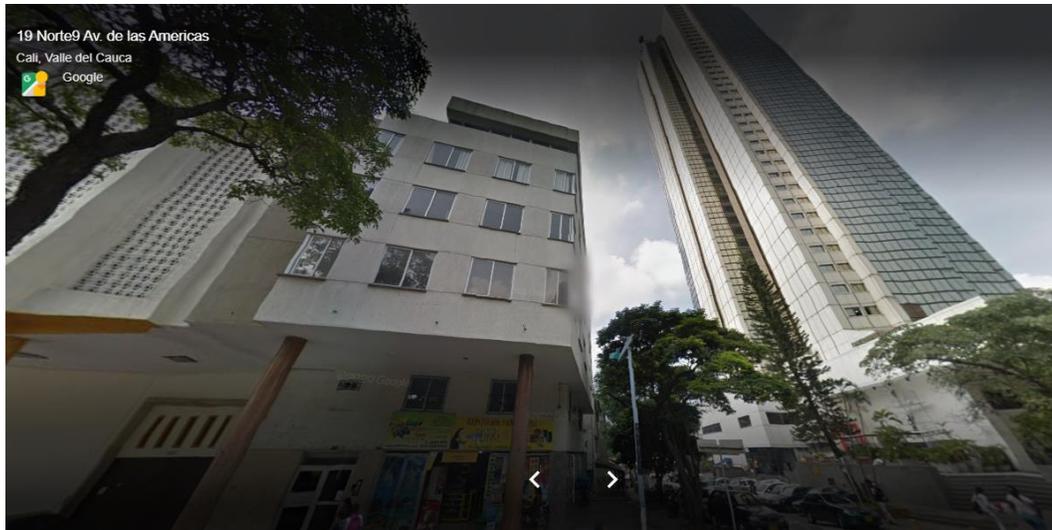


Figura 51. Vista frontal del edificio "Cali Tower Suites & Lofts" ubicado frente a Torre de Cali. Fuente: Google Maps.

Una vez el personal de Metrex se reúne en el edificio con el señor Roberto Ramírez, él procede a dirigir el recorrido por las instalaciones y a contextualizarlos sobre lo que desea hacer. Manifiesta que su proyecto es incorporar a las remodelaciones de la planta física del edificio algunos sistemas que le permitan convertirlo progresivamente en un “Smart Building”. Para ello, planea incorporar un sistema inteligente para acceso al edificio y a cada habitación, el cual se realiza a través de una tarjeta y un código que se le asignará a cada huésped en el momento de hacer su reserva. Además, ya adelantó acciones en la línea de energía, donde a través de un desarrollo propio logró mostrar un sistema de medición inteligente que le permite tomar el consumo de cada medidor y llevar a cabo de forma remota las acciones de corte y reconexión. Ahora su objetivo es poder implementar algo similar para la línea de agua. Esto también con el fin de combatir algunas problemáticas que presenta actualmente, pues por el hecho ser un edificio de aparta-suites, donde los usuarios se hospedan durante diferentes periodos de tiempo, bajo una tarifa establecida, el consumo de agua mensual es variado. Sin embargo, en algunos meses el consumo supera un valor promedio regular, el cual se toma externo del totalizador del edificio ya que por lo general no se contaba con el personal ni con el tiempo para recolectar mensualmente las lecturas de cada uno de los medidores internos para compararla con la del totalizador. Por tanto, los excesos se veían ya reflejados en la factura. Esto claramente se estaba convirtiendo en pérdidas. Para ello se optó por comenzar a tomar una foto mensual de la lectura de cada medidor para de esta forma identificar el área donde más agua se estaba consumiendo en el mes. Sin embargo, el problema que surgía ahora es que la lectura mensual no era suficiente, pues se presentaron algunos casos en los que los huéspedes gastaban cantidades excesivas de agua durante su estadía o también se iban dejando daños o fugas que no reportaban. Consecuencia de ello, los administrativos del hotel comenzaron a pensar en la idea de establecer un valor máximo de consumo por día de acuerdo al número

de huéspedes por apartasuite. Si este valor en m³ supera el máximo establecido por la administración, el huésped debería pagar el excedente de comprobarse que fue por un mal uso del recurso o por un daño no reportado. Esta nueva metodología implicaba que un empleado del área de servicios generales, se encargara de tomar una foto de la lectura registrada en el medidor al momento de la llegada del huésped y repetir el mismo procedimiento nuevamente a la salida, para así obtener el valor del volumen de agua consumido. Todo este proceso claramente con el tiempo se volvió tedioso e interrumpía las demás labores del personal, por tanto, no siempre se cumplía a cabalidad.

Motivado por todo lo anterior, el señor Roberto Ramírez deseaba implementar un sistema de medición inteligente para la línea de agua, de modo que le permitiera automatizar todo este proceso y que los datos de consumo registrados en cada medidor pudieran ser consultados a través de una aplicación de escritorio o una página web y de esta forma tener un mayor control e históricos de los consumos registrados en cada aparta-suite a lo largo del mes.

Para este momento el edificio cuenta con medidores de agua tipo volumétrico marca Metrex, transmisión mecánica, 115mm, DN15 para el uso de cada unidad residencial y un medidor totalizador de 1 pulgada por cada piso. Ver figura 52.



Figura 52. Medidores instalados en el edificio para el momento de la primera visita técnica. Fuente propia.

De acuerdo a lo solicitado por el cliente, se toma evidencia de los espacios donde se desea reemplazar los medidores de agua convencionales del edificio por los medidores AMR. Ver figuras 53, 54, 55, 56 y 57



Figura 53. Medidores del sótano y piso 1. Fuente propia.



Figura 54. Medidor del piso 2. Fuente propia.



Figura 55. Medidores para el Piso 3. Fuente propia.



Figura 56. Medidores del piso 5. Fuente propia.



Figura 57. Medidor del piso 6. Fuente propia.

Como consolidado de esta primera reunión, se tienen los siguientes acuerdos y pendientes, ver tabla 11.

Análisis de requerimientos para la implementación de un sistema de medición inteligente en el edificio “CALI TOWER SUITES & LOFT”			
Fecha de reunión:	19 de junio del 2019		
Asistentes:	Personal Metrex:	<ul style="list-style-type: none"> • Luis Fernando Pedraza-Coordinador I+D. • Eliecer Garcés - Auxiliar de Gestión de Calidad. 	
	Cliente:	Alberto Ramírez-Propietario del proyecto. y David Ramírez – Ingeniero de desarrollo del proyecto.	
Elaborado por:	Lina Velasco- Pasante I+D.	Aprobado por:	Jaime Ordoñez - Director Técnico.
SOLICITUDES DEL CLIENTE			
De acuerdo a lo manifestado en la reunión, el cliente requiere: <ul style="list-style-type: none"> • La instalación de nuevos medidores de agua aptos para lectura remota o la instalación de módulos de comunicación a los medidores actuales que permitan el correcto funcionamiento del sistema de medición. 			

- La instalación inicialmente de 22 medidores, los cuales serán distribuidos de la siguiente manera: 1 medidor en el piso 6, 8 medidores en el 5 piso, el cual ya se encuentra terminado, tres medidores en el sótano y 10 medidores en los pisos intermedios.
- Cobertura desde el sótano hasta el 6 piso del edificio.
- Por ahora solo la comunicación en un solo sentido, para la recolección de los datos de cada medidor, sin necesidad de enviar acciones de corte y reconexión (sistema AMR).
- Poder ver la información de la lectura registrada en los medidores desde una aplicación de escritorio o desde una página web. Opcional incluir el desarrollo de una aplicación móvil.
- Poder consultar los datos en cualquier momento del día.
- Descargar la información que solicite.
- Poder consultar la información de días y meses anteriores para generar históricos.
- Notificación a través de la plataforma en caso de que el medidor presente alguna falla o alteración.

ACUERDOS

- El alcance total del proyecto contempla el suministro de 40 medidores DN15, 115 mm dependiendo del desempeño de la red de medición inteligente.
- El cliente no tiene problema con el rango de medición, este punto puede ser recomendado por Metrex.
- El desarrollo es interno, razón por la cual, no se requiere permiso u autorización de homologación de los medidores con EMCALI.
- Se harán pruebas previas a la instalación, de modo que se garantice el correcto funcionamiento del sistema y la cobertura total del edificio, tal como lo requiere el cliente.
- Una vez se establezcan todos los acuerdos y haya una aprobación por parte del cliente, se enviará una propuesta formal para ser firmada por las partes.

COMPROMISOS ADQUIRIDOS POR PARTE DE METREX

- Enviar ficha técnica del medidor que se utilizara en el proyecto.
- Enviar información de la arquitectura y la tecnología que se empleará en el sistema AMR.
- Enviar especificaciones técnicas de cada uno de los elementos que conformarán el sistema AMR.

- Dar los contactos del área comercial para que la empresa sea estudiada y creada como cliente y se lleve a cabo la fabricación de los medidores para el proyecto.
- Enviar modelo de negocio y los costos de: medidor, dispositivo de comunicación, Gateway, software. La cotización podrá ser como conjunto o como elementos independientes. Desde este punto de vista se comentó las posibles limitantes que se pueden presentar en el caso de no contar con el sistema completo, puesto que, si ocurre alguna falla en la información, el diagnóstico y la identificación de la causa, será más compleja.
- Establecer una fecha para la instalación de los medidores y las pruebas de comunicación en campo.

Tabla 11. Análisis de requerimientos. Fuente propia.

3.1.2 Ingeniería básica

3.1.2.1 Evaluación y selección de la tecnología

Dentro de la empresa se adelantaban acciones con el fin implementar nuevas tecnologías útiles para la medición inteligente. De acuerdo a ello se eligieron inicialmente dos tecnologías LPWAN para ser probadas dentro de los proyectos piloto más próximos. Internamente los directivos decidieron probar la tecnología Sigfox en la línea de gas, y la tecnología LoRa para la línea de agua, ya que el proveedor principal de los medidores de agua para Metrex ya tenía disponibles equipos que operaban con esta tecnología.

El funcionamiento y características de operación de esta tecnología fueron especificadas en el capítulo 2. Para el desarrollo de este piloto se implementará una red privada, ya que cada dispositivo de la red está programado para operar y ser compatible únicamente con equipos de la misma marca del proveedor ya que el desarrollo es propio.

Como se evidenció en el capítulo 2, la primera ejecución del plan de pruebas dejó como resultado una serie de opciones de mejora para el proveedor de acuerdo a los errores presentados. Para solventar esto, el proveedor envió nuevamente los siguientes equipos:

- Un nuevo lote de 40 medidores de agua tipo velocidad bronce R160 pre-equipados para la adaptación de sensores de toma de pulsos.
- 40 módulos de comunicación con tecnología LoRa optimizados en el área de cobertura de su antena y con una nueva configuración física que permite que al instalar el módulo sobre el visor del medidor, el sensor del módulo quede sobre la manecilla que marca una vuelta cada 10 litros.
- Un nuevo Gateway habilitado para operar con cualquier operador móvil 4G en Colombia.

- Un nuevo perfil en la plataforma web habilitado para pruebas, en el cual ya se encuentran registrados los 40 módulos de comunicación y el Gateway.

Una vez hecho el inventario de estos equipos, se procede a seguir todos los pasos descritos en el capítulo 2 en la sección 2.5 “Alistamiento de equipos para un correcto funcionamiento dentro de la red” para poner a punto cada uno de los dispositivos hardware y software.

Posteriormente se procede a llevar a cabo nuevamente en su totalidad el plan de pruebas descrito en el capítulo 2, sección 2.6 “Diseño de plan de pruebas”. De esto se pudo concluir lo siguiente.

- Las pruebas de conectividad tanto en laboratorio como en campo fueron exitosas. Teniendo en cuenta que el escenario donde más se presentaron problemas fue en campo, esta vez se extremaron las condiciones y se ubicaron 2 medidores AMR identificados con los seriales 19080047 y 19080050 en la parte externa de la planta de Metrex S.A, ver figura 58.



Figura 58. Medidores AMR del nuevo lote ubicados para pruebas de conectividad en campo.

Posteriormente se recorrieron diferentes distancias hasta una máxima de 2km fuera de la empresa para desde ahí enviar la petición de lectura de los medidores desde la PDA, lo cual fue exitoso, comprobando así que el problema de la capacidad de cobertura de los medidores fue solventado con la mejora de la antena y se tenía una conectividad del 100% cumpliendo así con el criterio de aceptación. Ver figuras 59, 60, 61 y 62.



Figura 59. Prueba de conectividad con medidor AMR 19080047 a 1km de distancia. Fuente propia.



Figura 60. Prueba de conectividad con medidor AMR 19080050 a 1 km de distancia. Fuente propia.



Figura 61. Prueba de conectividad con medidor AMR 19080047 a 2Km de distancia. Fuente propia.



Figura 62. Prueba de conectividad con medidor AMR 19080050 a 2Km de distancia. Fuente propia.

- Para llevar a cabo las pruebas de conectividad con el Gateway, se realizó todo el proceso especificado en el capítulo 2, en la sección correspondiente a “Alistamiento del Gateway” y “Alistamiento de la plataforma web”. Posteriormente a través de la plataforma web se verificó que el estado del Gateway era “Connected” y de esta forma fue posible obtener la lectura de los medidores a través de la plataforma web de forma exitosa. Ver figura 63.

No	DMA Area	Customer	Code	Meter Address	Date	Today Consume	Yesterday Consume	Today Reading	Yesterday Reading	Method
17	AMR Cali	19080017	0000019080017	wxx	2020-02-21	0.000	0.000	0.690	0.690	Concentrator Reading
18	AMR Cali	19080018	0000019080018	wxx	2020-02-21	0.000	0.000	0.590	0.590	Concentrator Reading
19	AMR Cali	19080019	0000019080019	wxx	2020-02-21	0.000	0.000	0.840	0.840	Concentrator Reading
20	AMR Cali	19080020	0000019080020	wxx	2020-02-21	0.000	0.000	0.940	0.940	Concentrator Reading
21	AMR Cali	19080021	0000019080021	wxx	2020-02-21	0	5.270	24.180	999988.760	Concentrator Reading
22	AMR Cali	19080022	0000019080022	wxx	2020-02-21	0	4.470	215.850	186.120	Concentrator Reading
23	AMR Cali	19080023	0000019080023	wxx	2020-02-21	0.000	0.000	0.680	0.680	Concentrator Reading
24	AMR Cali	19080024	0000019080024	wxx	2020-02-21	0.000	0.000	0.710	0.710	Concentrator Reading
25	AMR Cali	19080025	0000019080025	wxx	2020-02-21	0.000	0.000	0.980	0.980	Concentrator Reading
26	AMR Cali	19080026	0000019080026	wxx	2020-02-21	0	4.530	247.490	216.890	Concentrator Reading
27	AMR Cali	19080027	0000019080027	wxx	2020-02-21	0.000	0.000	0.900	0.900	Concentrator Reading

Figura 63. Lectura de los medidores AMR enviados a la plataforma web a través del Gateway.

- En cuanto a las pruebas de consumo, se llevaron a cabo de acuerdo a lo estipulado en el plan de pruebas, y esta vez fueron todas exitosas, pues las lecturas del medidor coincidían con las visualizadas en la PDA y en plataforma. De modo que los datos no presentaban diferencias mayores a los $2m^3$ entre ellos, cumpliendo así con el criterio de aceptación. De esta forma se evidencia que el desface fue corregido al cambiar la ubicación del sensor sobre el medidor. Ver figura 63.

- 1) **Medidores AMR:** medidores para agua velocidad-bronce R160 transmisión magnética, conectado a módulo de comunicación LoRa para la de captura de datos y comunicación remota.
- 2) **Gateway:** equipo encargado de recibir datos de los medidores del sistema y enviarlos al servidor.
- 3) **Repetidor:** cuando se presentan fallos en la comunicación por alcance de la señal, se instala este equipo para ampliar la cobertura. La instalación de este dispositivo será opcional, dependerá de que el Gateway tenga una correcta línea de vista en el lugar de instalación. En caso de que la presencia de obstáculos impida la correcta recolección de datos, el repetidor será necesario.
- 4) **Servidor:** encargado de almacenar información de consumos y alarmas de los medidores del sistema. La compra de este producto será definida por parte del cliente, durante la prueba piloto, la decisión estará determinada por costo y desempeño del mismo.

Las especificaciones técnicas de cada uno de los elementos mencionados se consignaron en el capítulo 2, sección 2.4.

A continuación, se presenta el esquema de la arquitectura propuesta. Ver figura 65.

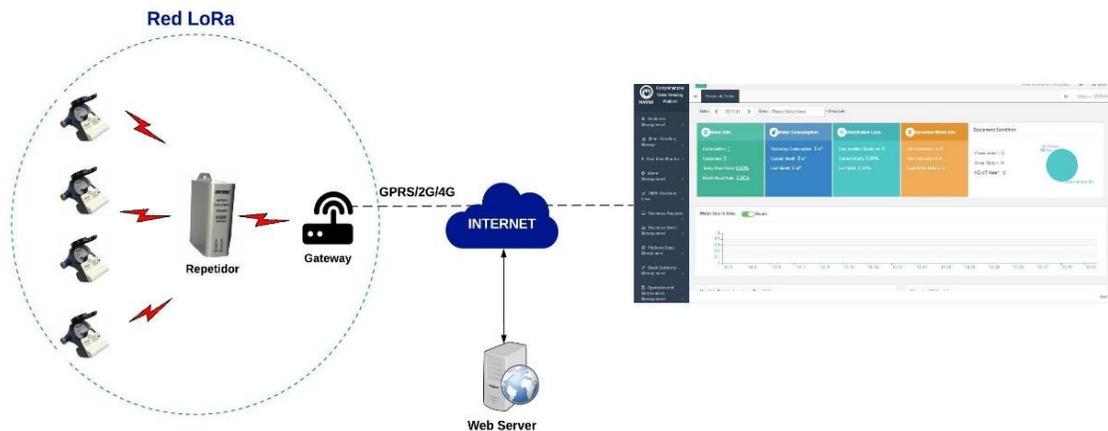


Figura 65. Arquitectura propuesta para la instalación del sistema de Lectura de Medición Automática (AMR) a un cliente residencial por medio de una red LPWAN con tecnología LoRa. Fuente propia.

3.1.3 Ingeniería de detalle

3.1.3.1 Acuerdos y condiciones de entrega

De acuerdo a las apreciaciones hechas por el cliente con respecto a la primera propuesta de diseño que se le presentó para la aprobación de los planos, arquitectura y definición y distribución del total de equipos a instalar, se elabora una propuesta final formal consignada en el anexo 4 "Propuesta técnico económica- Piloto medición inteligente". Esta fue firmada por el cliente, el señor Roberto Enrique Ramírez como representante legal del edificio Cali Tower Suites & Lofts y por parte del proveedor fue firmada por Rubén Darío González como representante legal de Metrex S.A, para así garantizar el acuerdo entre las partes.

De esta propuesta se destacan los siguientes aspectos importantes:

- Acuerdos de instalación entre las partes:
 - Para el piloto Inversiones R&S – Cali Tower Suites & Loft compra los medidores de agua y Metrex S.A se encarga de hacer el préstamo y cubrir los costos asociados al sistema de medición inteligente.
 - Una vez se establezca el cronograma de instalación se elaborará un acta de inicio, donde se establece el tiempo que durará instalado el piloto, las actividades y responsables de cada una; la misma será firmada por las partes intervinientes.
 - Durante el piloto Metrex realizará revisiones de seguimiento al sistema de medición inteligente, a través de la plataforma de gestión, mediante un perfil de pruebas independiente al perfil de usuario asignado al cliente. En caso de requerir una visita presencial, se realizará un acta de revisión que deberá ser firmada por una persona autorizada por Inversiones R&S.
 - Metrex realizará el acompañamiento en la instalación del piloto, pero Inversiones R&S será el responsable directo de la instalación de los medidores bajo los lineamientos establecidos por la normatividad vigente.
 - La información de las partes estará protegida por la firma de un acuerdo de confidencialidad. La parte que incumpla el acuerdo deberá cubrir el 100% de los costos de la inversión realizada.
 - Una vez finalizado el piloto Inversiones R&S podrá comprar el sistema de medición inteligente. En caso de no realizar la compra Metrex recolectará los equipos e Inversiones R&S facilitará la ejecución de dicha actividad.

- Si existe un daño ajeno a la operación normal de los equipos Inversiones R&S deberá cubrir el costo del equipo.
 - Metrex tendrá acceso a la información de monitoreo de consumos a través de la plataforma de gestión propia, de cara al interés técnico de evaluar el comportamiento de la tecnología.
 - Metrex brindara una asesoría para el manejo de la comunicación con el concentrador y de la plataforma web.
- Estimaciones de cara a la instalación del piloto según lo acordado con Inversiones R&S:
 - Cantidad de medidores a instalar: 22 medidores velocidad bronce transmisión magnética R160.
 - Tiempo estimado de instalación de 22 medidores: 1 día.
 - Tiempo estimado de instalación del sistema de medición inteligente: 1 día, en paralelo a la instalación de medidores.
 - Tiempo para pruebas de comunicación entre medidores y Gateway 1 hora posterior a la instalación del sistema.
 - Tiempo de monitoreo: 8 meses.
 - Cierre del piloto: 8 meses luego de finalizado el monitoreo para realizar conclusiones y determinar si Inversiones R&S compara el sistema de medición inteligente para agua.
 - Costos finales entregados y aprobados por el cliente. Ver tabla 12.

Producto	Cantidad para piloto	Valor Unitario	Valor total	Quien realiza la inversión para el piloto
Medidor velocidad bronce transmisión magnética R160	22	USD 16,00	USD 352	Inversiones R&S

Módulo de comunicación para medidor AMR	22	USD 30,00	USD 660	Metrex
Gateway	1	USD 600,0	USD 600	Metrex
Repetidor (opcional)	0	USD 130,0	USD -	Metrex
Plan de datos para Gateway (Valor por mes)	1	USD 1,50	USD 1,5	Metrex
Total			USD 1.617	

Tabla 12. Costos finales del piloto aprobados por las partes.

3.1.3.2 Listado de equipos

De acuerdo a lo acordado en la propuesta final, el señor Roberto Ramírez, representante legal del edificio Cali Tower Suites & Loft, requiere la instalación de un sistema de AMR por medio de una red LPWAN con tecnología LoRa, para lo cual se empleará lo siguiente:

- 22 medidores de agua AMR tipo velocidad – bronce, transmisión magnética.
- 1 concentrador o Gateway.
- 1 Sim Card 4G.
- 1 repetidor, en caso de ser necesario.
- Plataforma web de gestión.

Una vez definido lo anterior, se le envió al señor Roberto Ramírez vía correo electrónico un listado de los 22 medidores para que él relacionara la dirección o número de apartamento donde se instalará cada uno de ellos, teniendo como resultado lo evidenciado en la tabla 13.

N°	Medidor	Modelo	Dirección / Apartamento
1	Medidor de agua + módulo de comunicación LoRa	VEL BRO R160 MG	Sótano Piso 0
2	Medidor de agua + módulo de comunicación LoRa	VEL BRO R160 MG	Local L2 Piso 1
3	Medidor de agua + módulo de comunicación LoRa	VEL BRO R160 MG	Local L3 Piso 1
4	Medidor de agua + módulo de comunicación LoRa	VEL BRO R160 MG	Totalizador Piso 2
5	Medidor de agua + módulo de comunicación LoRa	VEL BRO R160 MG	Totalizador Piso 3

6	Medidor de agua + módulo de comunicación LoRa	VEL BRO R160 MG	Ap-Suite 301
7	Medidor de agua + módulo de comunicación LoRa	VEL BRO R160 MG	Ap-Suite 302
8	Medidor de agua + módulo de comunicación LoRa	VEL BRO R160 MG	Ap-Suite 303
9	Medidor de agua + módulo de comunicación LoRa	VEL BRO R160 MG	Ap-Suite 304
10	Medidor de agua + módulo de comunicación LoRa	VEL BRO R160 MG	Ap-Suite 305
11	Medidor de agua + módulo de comunicación LoRa	VEL BRO R160 MG	Ap-Suite 306
12	Medidor de agua + módulo de comunicación LoRa	VEL BRO R160 MG	Ap-Suite 307
13	Medidor de agua + módulo de comunicación LoRa	VEL BRO R160 MG	Totalizador Piso 4
14	Medidor de agua + módulo de comunicación LoRa	VEL BRO R160 MG	Totalizador Piso 5
15	Medidor de agua + módulo de comunicación LoRa	VEL BRO R160 MG	Ap-Suite 501
16	Medidor de agua + módulo de comunicación LoRa	VEL BRO R160 MG	Ap-Suite 502
17	Medidor de agua + módulo de comunicación LoRa	VEL BRO R160 MG	Ap-Suite 503
18	Medidor de agua + módulo de comunicación LoRa	VEL BRO R160 MG	Ap-Suite 504
19	Medidor de agua + módulo de comunicación LoRa	VEL BRO R160 MG	Ap-Suite 505
20	Medidor de agua + módulo de comunicación LoRa	VEL BRO R160 MG	Ap-Suite 506
21	Medidor de agua + módulo de comunicación LoRa	VEL BRO R160 MG	Ap-Suite 507
22	Medidor de agua + módulo de comunicación LoRa	VEL BRO R160 MG	Totalizador Piso 6

Tabla 13. Asignación parte del cliente de dirección a los medidores a instalar.

3.1.3.3 Cronograma de actividades

Una vez se tenían establecidos los lineamientos y acuerdos entre las partes, se creó un cronograma de actividades que detalla el proceso previo y posterior a la instalación, definiendo responsables, recursos, periodos de tiempo, resultados y registros generados por cada una de las actividades. Ver tabla 14.

Fecha de elaboración: 30-07-2020

Elaborado Por: Eliécer Garcés Girón

Aprobado Por:
Tema: Cronograma de actividades Piloto de Medición Inteligente (Cali Tower Suites & Loft)

Objetivo: Programar las actividades para la instalación del piloto en la ciudad de Cali

No.	Actividad	Responsable	Recursos	Periodo:												Resultado U Observación	Registro.												
				Agosto			Septiembre			Octubre			Noviembre					Diciembre			Enero								
				1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4		
1	Solicitar gestión documental al área comercial para despacho de los medidores	Eliécer Garcés	Computador, internet																									Factura, certificados, despacho etc.	Formato de despacho
2	Enviar información de facturación al ingeniero Roberto	Eliécer Garcés	Computador, internet																									Información de facturación recibida por Inversiones R&S.	Factura proforma
3	Realizar carta de solicitud retiro medidores	Roberto Ramírez	Computador, internet																									Los medidores de agua actualmente instalados en el edificio Cali Tower Suites & Loft serán retirados en su totalidad.	Carta individual retiro de medidores
4	Realizar acta de inicio del piloto	Eliécer Garcés	Computador, internet																									Se elaborará un acta de inicio, donde se establece el tiempo que durara instalado el piloto, las actividades y responsables de cada una; la misma será firmada por las	Acta de inicio y finalización piloto
5	Solicitar formato de salida de activos por el Gateway, PDA y elementos necesarios para la instalación	Eliécer Garcés	Computador, internet																									Se diligenciará el formato de salida de activos para su correspondiente autorización por 22 medidores de agua AMR velocidad magnético bronce R 160, 1 Gateway con su respectivo adaptador y 2 antenas, 1 repetidor, 1 PDA, destornillador en L	Formato autorizado de salida de activos
6	Confirmar que se cumplan las condiciones de instalación referidas en la propuesta.	Roberto Ramírez	Herramientas, equipos.																									Inversiones R&S deberá confirmar que cuenta con todos los equipos y herramientas necesarias.	
7	Garantizar que se cumplan todos los protocolos de bioseguridad de las partes implicadas.	Metrex S.A., Inversiones R&S																										Tantos el equipo de Metrex S.A como el de Cali Tower Suites & Loft deberá cumplir con todos los protocolos de bioseguridad durante el tiempo de instalación del	EPPS de bioseguridad.
8	Gestionar permisos de movilidad		Computador, internet																									Permisos de movilidad autorizados que permitan el desplazamiento entre Popayán-Cali y viceversa.	Permisos de movilidad autorizados.
9	Solicitar viáticos para viaje a Cali	Eliécer Garcés	Computador, internet																									Autorización de los viáticos para el viaje a la ciudad de Cali.	Correo de solicitud y autorización
10	Desplazamiento a la ciudad de Cali	Eliécer Garcés, Lina Velasco	Vehículo, protocolos de bioseguridad																									Llegada a la ciudad de Cali y desplazamiento a Cali Tower Suites & Loft.	
11	Reconocer área de instalación de equipos y realizar pruebas de comunicación	Eliécer Garcés, Lina Velasco	Computador, internet																									Comunicación exitosa de los 22 medidores instalados evidenciado en plataforma.	Evidencias fotográficas
12	Proceso de inducción sobre el funcionamiento de la red Lora	Eliécer Garcés, Lina Velasco	Computador, internet, manuales de usuario.																									El equipo designado por Roberto Ramirez estará en capacidad de operar la plataforma web tras el proceso de inducción.	Evidencias fotográficas.
13	Monitoreo del piloto	Eliécer Garcés, Lina Velasco	Computador, internet																									La plataforma será monitoreada constantemente para garantizar el correcto funcionamiento de la red instalada.	Pantallazos de la plataforma
14	Realizar visitas presenciales o virtuales	Eliécer Garcés, Lina Velasco	Computador, internet																									Se informará sobre el estado y funcionamiento de la red instalada en Cali Tower Suites & Loft.	Evidencia del tipo de visita
15	Finalización piloto	Eliécer, Lina, Roberto	Computador, internet																									Estado de finalización del piloto.	Acta de inicio y finalización piloto
16	Decisión por parte de Roberto sobre el piloto	Roberto Ramírez	Computador, internet																									Una vez finalizado el piloto Inversiones R&S podrá comprar el sistema de medición inteligente, en caso de no realizar la compra Metrex recolectará los equipos e Inversiones R&S facilitará la ejecución de dicha actividad.	Comunicado o correo por parte del cliente
17	Realizar informe de entrega del proyecto.	Eliécer Garcés, Lina Velasco	Computador, internet																									Aprobación del informe de entrega del proyecto.	Informe de entrega del piloto

Tabla 14. Cronograma de actividades.

3.2. Ingeniería de Implementación

3.2.1 Procura

Una vez listados todos los equipos y elementos necesarios, se procede a la consecución y alistamiento de los mismos teniendo en cuenta el cronograma de actividades.

Del lote de 40 medidores AMR se seleccionaron 22 de ellos que contaban con certificado de calibración, lo cual es necesario para garantizar su correcta operación. Posteriormente se procedió a realizar todo el proceso de alistamiento a cada uno de los elementos de la red, los cuales se especifican en el capítulo 2, en la sección 2.5. Una vez realizado este proceso, a partir de la información de la tabla 13 se procede a relacionar cada una de las direcciones asignadas por el cliente con el número serial de cada medidor. Ver tabla 15.

Item	NºMedidor	Modelo	Dirección / Apartamento
1	19080001	VEL BRO R160 MG	Sótano Piso 0
2	19080002	VEL BRO R160 MG	Local L2 Piso 1
3	19080003	VEL BRO R160 MG	Local L3 Piso 1
4	19080004	VEL BRO R160 MG	Totalizador Piso 2
5	19080005	VEL BRO R160 MG	Totalizador Piso 3
6	19080006	VEL BRO R160 MG	Ap-Suite 301
7	19080007	VEL BRO R160 MG	Ap-Suite 302
8	19080008	VEL BRO R160 MG	Ap-Suite 303
9	19080009	VEL BRO R160 MG	Ap-Suite 304
10	19080010	VEL BRO R160 MG	Ap-Suite 305
11	19080015	VEL BRO R160 MG	Ap-Suite 306
12	19080016	VEL BRO R160 MG	Ap-Suite 307
13	19080017	VEL BRO R160 MG	Totalizador Piso 4
14	19080018	VEL BRO R160 MG	Totalizador Piso 5
15	19080019	VEL BRO R160 MG	Ap-Suite 501
16	19080020	VEL BRO R160 MG	Ap-Suite 502
17	19080023	VEL BRO R160 MG	Ap-Suite 503
18	19080024	VEL BRO R160 MG	Ap-Suite 504
19	19080012	VEL BRO R160 MG	Ap-Suite 505
20	19080014	VEL BRO R160 MG	Ap-Suite 506
21	19080029	VEL BRO R160 MG	Ap-Suite 507
22	19080030	VEL BRO R160 MG	Totalizador Piso 6

Tabla 15. Relación entre la dirección y el número serial de cada medidor. Elaboración propia.

Teniendo en cuenta la información de la tabla 15, se procede a asignar estos datos a cada medidor en la plataforma. Ver figura 66.

Residents Water		Consumer management						
No	CustomerNo	CustomerName	CustomerAddr	WaterUsage	Customer Type	Company	Area	
<input type="radio"/>	1	1908030	1908030	Totalizador Piso 6	Civil Use	Residents	Cali Towers	AMR Cali
<input type="radio"/>	2	1908029	1908029	Apt-Suite 507	Civil Use	Residents	Cali Towers	AMR Cali
<input type="radio"/>	3	1908024	1908024	Apt-Suite 504	Civil Use	Residents	Cali Towers	AMR Cali
<input type="radio"/>	4	1908023	1908023	Apt-Suite 503	Civil Use	Residents	Cali Towers	AMR Cali
<input type="radio"/>	5	1908020	1908020	Apt-Suite 502	Civil Use	Residents	Cali Towers	AMR Cali
<input type="radio"/>	6	1908019	1908019	Apt-Suite 501	Civil Use	Residents	Cali Towers	AMR Cali
<input type="radio"/>	7	1908018	1908018	Totalizador Piso 5	Civil Use	Residents	Cali Towers	AMR Cali
<input type="radio"/>	8	1908017	1908017	Totalizador Piso 4	Civil Use	Residents	Cali Towers	AMR Cali
<input type="radio"/>	9	1908016	1908016	Apt-Suite 306	Civil Use	Residents	Cali Towers	AMR Cali
<input type="radio"/>	10	1908015	1908015	Apt-Suite 306	Civil Use	Residents	Cali Towers	AMR Cali
<input type="radio"/>	11	1908014	1908014	Apt-Suite 506	Civil Use	Residents	Cali Towers	AMR Cali
<input type="radio"/>	12	1908012	1908012	Apt-Suite 505	Civil Use	Residents	Cali Towers	AMR Cali
<input type="radio"/>	13	1908010	1908010	Apt-Suite 305	Civil Use	Residents	Cali Towers	AMR Cali
<input type="radio"/>	14	1908009	1908009	Apt-Suite 304	Civil Use	Residents	Cali Towers	AMR Cali
<input type="radio"/>	15	1908008	1908008	Apt-Suite 303	Civil Use	Residents	Cali Towers	AMR Cali
<input type="radio"/>	16	1908007	1908007	Apt-Suite 302	Civil Use	Residents	Cali Towers	AMR Cali
<input type="radio"/>	17	1908006	1908006	Apt-Suite 301	Civil Use	Residents	Cali Towers	AMR Cali
<input type="radio"/>	18	1908005	1908005	Totalizador Piso 3	Civil Use	Residents	Cali Towers	AMR Cali
<input type="radio"/>	19	1908004	1908004	Totalizador Piso 2	Civil Use	Residents	Cali Towers	AMR Cali
<input type="radio"/>	20	1908003	1908003	Local L3 Piso 1	Civil Use	Residents	Cali Towers	AMR Cali
<input type="radio"/>	21	1908002	1908002	Local L2 Piso 1	Civil Use	Residents	Cali Towers	AMR Cali
<input type="radio"/>	22	1908001	1908001	Sótano Piso 0	Civil Use	Residents	Cali Towers	AMR Cali

Figura 66. Asignación de información a cada medidor en la plataforma web. Fuente propia.

De igual forma, con información de la tabla 15, se procedió a rotular cada una de las cajas de los medidores con el fin de poder hacer un inventario previo a la instalación y también para poder facilitar un poco la distribución de los mismos en su respectivo lugar dentro del edificio el día de la instalación, y así de forma paralela poder comenzar las pruebas de comunicación y de acuerdo a ello fijar el lugar de instalación del Gateway. Ver figura 67.



Figura 67. Rotulación de la cada una de las 22 cajas que contienen los medidores. Fuente propia.

En cuanto al Gateway, uno de los lugares posibles para su instalación es en pared, por tanto, se mandó a elaborar un soporte resistente que permita una instalación segura en caso dado. Ver figura 68.



Figura 68. Estructura elaborada para soporte del gateway. Fuente propia.

Teniendo listos todos los equipos hardware y software que se iban a instalar, se llevaron a cabo unas últimas pruebas de conectividad y consumo para dejar evidencia y garantizar

que todos los equipos de la red estén trabajando adecuadamente. El informe de estas pruebas se adjunta en el anexo 5 “Informe final pre instalación - Piloto Cali”.

3.2.2 Construcción

De acuerdo al cronograma de actividades, el 19 de agosto de 2020 se realizó la instalación del piloto. Para ello, según lo estipulado, por parte de Metrex, se trasladan a la ciudad de Cali, Eliecer Garcés, auxiliar de metrología y Lina Velasco, pasante universitaria en el área de I+D, para hacer el acompañamiento al proceso de instalación y el montaje de la red de medición inteligente.

Estando ya en el edificio Cali Tower Suites&Loft, se procedió a socializar con el cliente el proceso de instalación que se iba a llevar a cabo durante el día. Se inició con la distribución de los medidores dentro de sus cajas, en cada uno de los pisos correspondientes, de acuerdo a la información de la tabla 15 para que el personal asignado por el señor Roberto Ramírez, iniciara con el proceso de cambio de medidores.

Mientras tanto, se realizó la instalación del Gateway en el lugar que cumple con las condiciones para la instalación del mismo. Esto fue en el sexto piso, dentro del rack de comunicaciones del edificio, ya que aquí podrá estar conectado al suministro eléctrico de forma constante y las antenas quedan ubicadas en la parte externa. Estas quedaron fijas sobre la pared superior del rack gracias a que poseen una base imantada. Ver figura 69 y 70.



Figura 69. Ubicación y conexión del Gateway en el rack de comunicaciones. Fuente propia



Figura 70. Ubicación del gateway en el rack de comunicaciones. Fuente propia.

El proceso de instalación se llevó a cabo durante el día de acuerdo al ritmo de trabajo del personal asignado por el cliente. A medida que los medidores iban siendo instalados en cada piso, se tomaron evidencias fotográficas. Ver figuras 71, 72, y 73.



Figura 71. Medidores AMR instalados en el sótano. Fuente propia.



Figura 72. Medidores AMR instalados en el piso 2. Fuente propia.

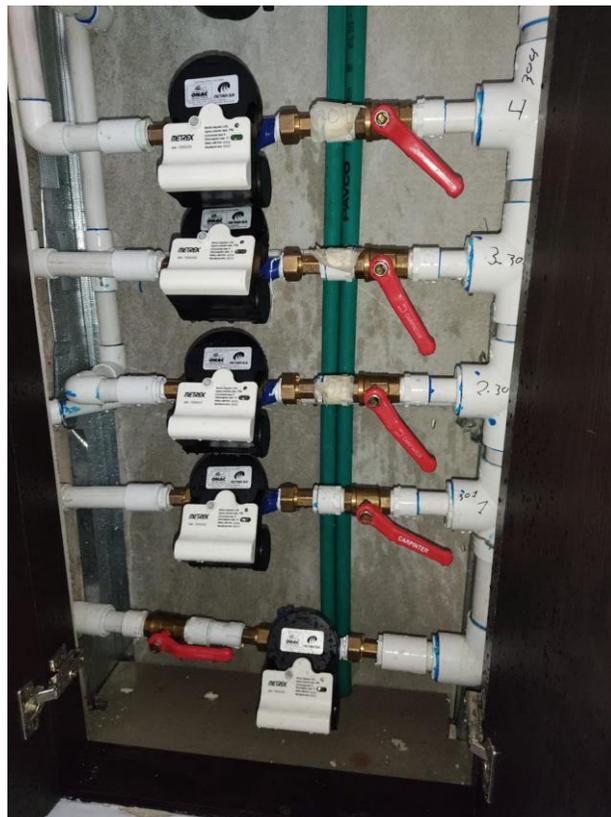


Figura 73. Medidores AMR instalados en el piso 3. Fuente propia.

Mientras se avanzaba en el proceso de instalación de los medidores, se realizó una capacitación sobre el manejo de la plataforma y el funcionamiento del Gateway al señor Roberto Ramírez y al personal que estaría encargado del manejo de la plataforma. Para ello se les entregó un manual de usuario donde se especificaba el manejo de cada una de las funcionalidades de la plataforma a las que ellos como clientes tendrían acceso.

Finalmente, como ya cada medidor estaba ubicado en su lugar de instalación, se comprobó a través de la plataforma web desde el perfil del cliente, que el sistema AMR estuviese operando correctamente y para ello se envió desde la plataforma el comando que solicita la lectura de todos los medidores que tienen cobertura dentro de la red. La respuesta del envío de este comando, fue un 100% de conexión, es decir que se logró obtener los datos de lectura de los 22 medidores AMR dentro del edificio. Ver figura 74.

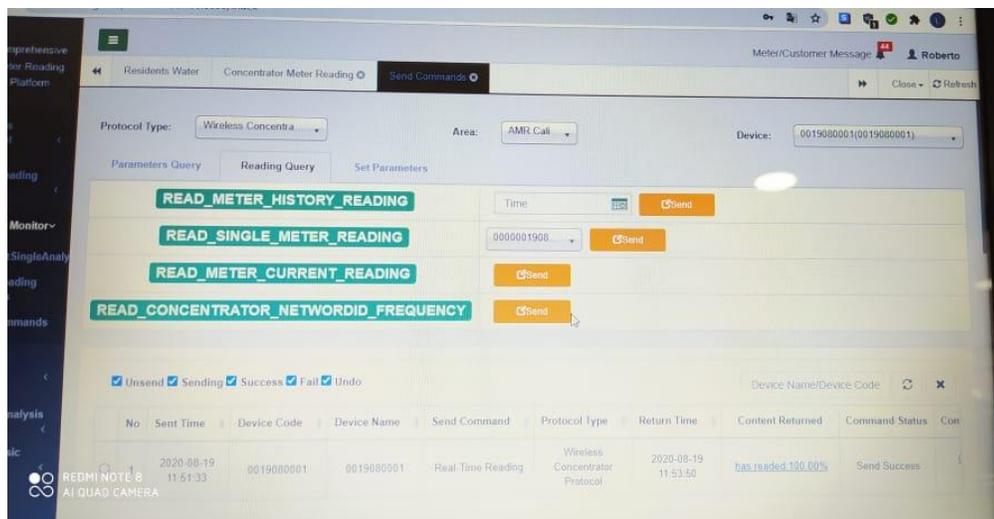


Figura 74. Conectividad del 100% de los medidores instalados. Fuente propia.

3.2.3 Pruebas y seguimiento

Con el fin de realizar un seguimiento y evaluar el funcionamiento del piloto, se realizaron una serie de pruebas y monitoreo a través de la plataforma web, ingresado al perfil asignado a Metrex. Para ello, se tuvo en cuenta dos aspectos evaluados en el plan de pruebas inicial consignado en la tabla 9, que son conectividad y correspondencia entre datos de lectura.

En cuanto al consumo, es realmente importante su evaluación pues tras la puesta en marcha del sistema AMR, se debe conocer cuál es su comportamiento en el tiempo y si los datos transmitidos a la plataforma coinciden y qué tan similares son a los datos reales, puesto que son los datos que el usuario tendrá a su disposición de forma remota para procesos de facturación.

En caso de que los datos presenten desfases significativos entre sí, generaría inconvenientes al usuario y no se estaría cumpliendo con los objetivos del sistema AMR.

Evaluar la conectividad también es indispensable, pues lo ideal es que el 100% de los medidores instalados estén conectados de forma continua, tal como se comprobó el día de la instalación. Para analizar este aspecto, se verificó que en la plataforma se registraran tanto el dato de lectura que envían los módulos de comunicación de la totalidad de medidores instalados una vez al día a las 6:00 AM, como los datos solicitados a través del envío del comando de lectura al momento de realizar la prueba. De esta forma se evaluará la relación entre la cantidad de medidores que enviaron datos, respecto a la cantidad de medidores instalados.

Para poder llevar a cabo la evaluación de los aspectos mencionados, se realizó el siguiente proceso: A través del perfil de usuario asignado a Metrex, se envió un comando solicitando los datos de lectura de los medidores, captados y enviados por los módulos de comunicación. Estos serán comparados con las fotografías tomadas a los medidores de agua instalados en el edificio. Debido a las restricciones de movilidad generadas por la pandemia, para el personal de Metrex era imposible desplazarse a la ciudad de Cali de forma continua, por tanto, para poder obtener las fotografías de los medidores, se solicitó el favor al cliente que nos pudiera colaborar con esta tarea. Atendiendo a la solicitud, él asignó a uno de los trabajadores del edificio, con quien se tuvo contacto vía WhatsApp. Esto se realizó una vez por semana, en seis ocasiones. De acuerdo a ello, en el momento en que la persona asignada tenía la disponibilidad en el día para realizar la tarea, daba aviso inmediatamente al personal de Metrex encargado, de modo que la hora de la toma de las fotografías fuese lo más cercana posible a la hora en la que se enviaba el comando de solicitud de lectura de los medidores desde la plataforma. De esa forma se aseguraba que el margen de diferencia entre los valores se redujera en gran medida. Teniendo las fotografías de los medidores y los datos de la plataforma, fue posible evaluar tanto la correspondencia entre los datos de lectura y a través del análisis de los datos obtenidos por la plataforma fue posible determinar la cantidad de medidores que habían enviado datos.

Las evidencias fotográficas de cada una de las pruebas realizadas, se encuentran consignadas en el anexo 6 “Evidencia fotográficas para pruebas”.

- **Primera prueba:**

A continuación, se presentan los datos obtenidos a través de la plataforma web para esta primera prueba realizada el 19 de enero de 2021. Ver figura 75.

No	Meter Info:	Meter Name	Reading	Date:
1	00000019080001	Sótano Piso 0	2.56000	2021-01-19 07:13:07
2	00000019080002	Local L2 Piso 1	1.31000	2021-01-19 07:13:07
3	00000019080003	Local L3 Piso 1	26.62000	2021-01-19 07:13:07
4	00000019080004	Totalizador Piso 2	60.27000	2021-01-19 07:13:07
5	00000019080005	Totalizador Piso 3	155.28000	2021-01-19 07:13:07
6	00000019080006	Apt-Suite 301	9.24000	2021-01-19 07:13:07
7	00000019080007	Apt-Suite 302	12.01000	2021-01-19 07:13:07
8	00000019080008	Apt-Suite 303	39.67000	2021-01-19 07:13:07
9	00000019080009	Apt-Suite 304	17.05000	2021-01-19 07:13:07
10	00000019080010	Apt-Suite 305	14.18000	2021-01-19 07:13:07
11	00000019080012	Apt-Suite 505	8.16000	2021-01-19 07:13:07
12	00000019080014	Apt-Suite 506	10.72000	2021-01-19 07:13:07
13	00000019080015	Apt-Suite 306	15.55000	2021-01-19 07:13:07
14	00000019080016	Apt-Suite 307	23.11000	2021-01-19 07:13:07
15	00000019080018	Totalizador Piso 5	152.07000	2021-01-19 07:13:07
16	00000019080019	Apt-Suite 501	20.85000	2021-01-19 07:13:16
17	00000019080020	Apt-Suite 502	14.85000	2021-01-19 07:13:16
18	00000019080023	Apt-Suite 503	30.65000	2021-01-19 07:13:16
19	00000019080024	Apt-Suite 504	17.82000	2021-01-19 07:13:16
20	00000019080029	Apt-Suite 507	14.28000	2021-01-19 07:13:16
21	00000019080030	Totalizador Piso 6	10.47000	2021-01-19 07:13:16

Figura 75. Monitoreo a través de la plataforma web el 19 de enero de 2021. Fuente propia.

A continuación, se presentan los datos obtenidos de las fotografías tomadas a los medidores AMR instalados en el edificio “CALI TOWER SUITES & LOFT” para esta primera prueba realizada el 19 de enero de 2021. Ver tabla 16.

Item	N°Medidor	Dirección / Apartamento	Lectura registrada en el medidor (m ³)
1	19080001	Sótano Piso 0	2,52
2	19080002	Local L2 Piso 1	1,31
3	19080003	Local L3 Piso 1	26,61
4	19080004	Totalizador Piso 2	60,22
5	19080005	Totalizador Piso 3	155,25
6	19080006	Ap-Suite 301	9,22
7	19080007	Ap-Suite 302	12,01
8	19080008	Ap-Suite 303	39,68
9	19080009	Ap-Suite 304	17,04
10	19080010	Ap-Suite 305	14,18
11	19080012	Ap-Suite 505	8,16
12	19080014	Ap-Suite 506	10,71
13	19080015	Ap-Suite 306	15,54
14	19080016	Ap-Suite 307	23,10
15	19080017	Totalizador Piso 4	No instalado
16	19080018	Totalizador Piso 5	151,99
17	19080019	Ap-Suite 501	20,85

18	19080020	Ap-Suite 502	14,86
19	19080023	Ap-Suite 503	30,64
20	19080024	Ap-Suite 504	17,79
21	19080029	Ap-Suite 507	14.28
22	19080030	Totalizador Piso 6	10.46

Tabla 16. Datos basados en las fotografías de las lecturas registradas por los medidores el 19 de enero de 2021. Fuente propia

- **Segunda prueba:**

Se presentan a continuación los datos obtenidos a través de la plataforma web para esta segunda prueba realizada el 30 de enero de 2021. Ver figura 76.

No	Meter Info	Meter Name	Reading	Date
1	00000019080001	Sótano Piso 0	3.31000	2021-01-30 04:50:16
2	00000019080002	Local L2 Piso 1	1.31000	2021-01-30 04:50:16
3	00000019080003	Local L3 Piso 1	26.81000	2021-01-30 04:50:16
4	00000019080004	Totalizador Piso 2	65.76000	2021-01-30 04:50:16
5	00000019080005	Totalizador Piso 3	166.29000	2021-01-30 04:50:16
6	00000019080006	Apt-Suite 301	10.01000	2021-01-30 04:50:16
7	00000019080007	Apt-Suite 302	14.31000	2021-01-30 04:50:16
8	00000019080008	Apt-Suite 303	40.05000	2021-01-30 04:50:16
9	00000019080009	Apt-Suite 304	19.97000	2021-01-30 04:50:16
10	00000019080010	Apt-Suite 305	14.68000	2021-01-30 04:50:16
11	00000019080012	Apt-Suite 505	8.95000	2021-01-30 04:50:16
12	00000019080014	Apt-Suite 506	11.25000	2021-01-30 04:50:16
13	00000019080015	Apt-Suite 306	16.45000	2021-01-30 04:50:16
14	00000019080018	Totalizador Piso 5	165.73000	2021-01-30 04:50:16
15	00000019080019	Apt-Suite 501	20.87000	2021-01-30 04:50:16
16	00000019080020	Apt-Suite 502	16.22000	2021-01-30 04:50:25
17	00000019080023	Apt-Suite 503	35.86000	2021-01-30 04:50:25
18	00000019080024	Apt-Suite 504	19.15000	2021-01-30 04:50:25
19	00000019080029	Apt-Suite 507	15.47000	2021-01-30 04:50:25
20	00000019080030	Totalizador Piso 6	11.14000	2021-01-30 04:50:25

Figura 76. Monitoreo a través de la plataforma web el 30 de enero de 2021. Fuente propia.

Se presentan a continuación los datos obtenidos de las fotos tomadas a los medidores AMR instalados en el edificio “CALI TOWER SUITES & LOFT” para esta segunda prueba realizada el 30 de enero de 2021. Ver tabla 17.

Item	NºMedidor	Dirección / Apartamento	Lectura registrada en el medidor (m^3)
1	19080001	Sótano Piso 0	3,22
2	19080002	Local L2 Piso 1	1,31
3	19080003	Local L3 Piso 1	26,81
4	19080004	Totalizador Piso 2	65,76
5	19080005	Totalizador Piso 3	165,74
6	19080006	Ap-Suite 301	9,97
7	19080007	Ap-Suite 302	14,20
8	19080008	Ap-Suite 303	40,00
9	19080009	Ap-Suite 304	19,83
10	19080010	Ap-Suite 305	14,68
11	19080012	Ap-Suite 505	8,91
12	19080014	Ap-Suite 506	11,25
13	19080015	Ap-Suite 306	16,37
14	19080016	Ap-Suite 307	24,44
15	19080017	Totalizador Piso 4	No instalado
16	19080018	Totalizador Piso 5	165,46
17	19080019	Ap-Suite 501	20,87
18	19080020	Ap-Suite 502	16,17
19	19080023	Ap-Suite 503	35,85
20	19080024	Ap-Suite 504	19,10
21	19080029	Ap-Suite 507	15,43
22	19080030	Totalizador Piso 6	11,15

Tabla 17. Datos basados en las fotografías de las lecturas registradas por los medidores el 30 de enero de 2021. Fuente propia.

- **Tercera prueba:**

Se presentan a continuación los datos obtenidos a través de la plataforma web para esta tercera prueba realizada el 6 de febrero de 2021. Ver figura 77.

No	Meter Info:	Meter Name	Reading	Date:
1	00000019080001	Sótano Piso 0	4.12000	2021-02-06 01:53:28
2	00000019080002	Local L2 Piso 1	1.31000	2021-02-06 01:53:28
3	00000019080003	Local L3 Piso 1	26.81000	2021-02-06 01:53:28
4	00000019080004	Totalizador Piso 2	67.85000	2021-02-06 01:53:28
5	00000019080005	Totalizador Piso 3	173.43000	2021-02-06 01:53:28
6	00000019080007	Apt-Suite 302	16.07000	2021-02-06 01:53:28
7	00000019080008	Apt-Suite 303	41.02000	2021-02-06 01:53:28
8	00000019080009	Apt-Suite 304	22.21000	2021-02-06 01:53:28
9	00000019080010	Apt-Suite 305	14.68000	2021-02-06 01:53:28
10	00000019080012	Apt-Suite 505	9.39000	2021-02-06 01:53:28
11	00000019080014	Apt-Suite 506	11.26000	2021-02-06 01:53:28
12	00000019080015	Apt-Suite 306	17.38000	2021-02-06 01:53:28
13	00000019080016	Apt-Suite 307	24.53000	2021-02-06 01:53:28
14	00000019080018	Totalizador Piso 5	169.38000	2021-02-06 01:53:28
15	00000019080019	Apt-Suite 501	21.24000	2021-02-06 01:53:28
16	00000019080020	Apt-Suite 502	16.74000	2021-02-06 01:53:37
17	00000019080023	Apt-Suite 503	36.17000	2021-02-06 01:53:37
18	00000019080024	Apt-Suite 504	19.77000	2021-02-06 01:53:37
19	00000019080029	Apt-Suite 507	15.47000	2021-02-06 01:53:37
20	00000019080030	Totalizador Piso 6	11.33000	2021-02-06 01:53:37

Figura 77. Monitoreo a través de la plataforma web el 6 de febrero de 2021. Fuente propia.

Se presentan a continuación los datos obtenidos de las fotos tomadas a los medidores AMR instalados en el edificio “CALI TOWER SUITES & LOFT” para esta tercera prueba realizada el 6 de febrero de 2021. Ver tabla 18.

Item	NºMedidor	Dirección / Apartamento	Lectura registrada en el medidor (m ³)
1	19080001	Sótano Piso 0	4,13
2	19080002	Local L2 Piso 1	1,31
3	19080003	Local L3 Piso 1	26,81
4	19080004	Totalizador Piso 2	67,84
5	19080005	Totalizador Piso 3	173,50
6	19080006	Ap-Suite 301	10,25
7	19080007	Ap-Suite 302	16,07
8	19080008	Ap-Suite 303	41,04
9	19080009	Ap-Suite 304	22,25
10	19080010	Ap-Suite 305	14,68
11	19080012	Ap-Suite 505	9,40
12	19080014	Ap-Suite 506	11,25
13	19080015	Ap-Suite 306	17,38
14	19080016	Ap-Suite 307	24,51
15	19080017	Totalizador Piso 4	No instalado
16	19080018	Totalizador Piso 5	169,39
17	19080019	Ap-Suite 501	21,24
18	19080020	Ap-Suite 502	16,74
19	19080023	Ap-Suite 503	36,18
20	19080024	Ap-Suite 504	19,76

21	19080029	Ap-Suite 507	15,47
22	19080030	Totalizador Piso 6	11,33

Tabla 18. Datos basados en las fotografías de las lecturas registradas por los medidores el 6 de febrero de 2021. Fuente propia

- Cuarta prueba:**

Se presentan a continuación los datos obtenidos a través de la plataforma web para esta cuarta prueba realizada el 13 de febrero de 2021. Ver figura 78.

No	Meter Info:	Meter Name	Reading	Date:
1	00000019080001	Sótano Piso 0	5.13000	2021-02-13 04:56:39
2	00000019080002	Local L2 Piso 1	1.31000	2021-02-13 04:56:39
3	00000019080003	Local L3 Piso 1	26.82000	2021-02-13 04:56:39
4	00000019080005	Totalizador Piso 3	180.35000	2021-02-13 04:56:39
5	00000019080006	Ap-Suite 301	10.27000	2021-02-13 04:56:39
6	00000019080007	Ap-Suite 302	17.88000	2021-02-13 04:56:39
7	00000019080008	Ap-Suite 303	42.09000	2021-02-13 04:56:39
8	00000019080009	Ap-Suite 304	24.20000	2021-02-13 04:56:39
9	00000019080010	Ap-Suite 305	14.69000	2021-02-13 04:56:39
10	00000019080012	Ap-Suite 505	9.96000	2021-02-13 04:56:39
11	00000019080014	Ap-Suite 506	11.65000	2021-02-13 04:56:39
12	00000019080015	Ap-Suite 306	18.31000	2021-02-13 04:56:39
13	00000019080016	Ap-Suite 307	24.56000	2021-02-13 04:56:39
14	00000019080017	Totalizador Piso 4	0.80000	2021-02-13 04:56:39
15	00000019080018	Totalizador Piso 5	175.52000	2021-02-13 04:56:39
16	00000019080019	Ap-Suite 501	22.57000	2021-02-13 04:56:49
17	00000019080020	Ap-Suite 502	17.77000	2021-02-13 04:56:49
18	00000019080023	Ap-Suite 503	37.01000	2021-02-13 04:56:49
19	00000019080024	Ap-Suite 504	19.91000	2021-02-13 04:56:49
20	00000019080029	Ap-Suite 507	15.47000	2021-02-13 04:56:49
21	00000019080030	Totalizador Piso 6	11.75000	2021-02-13 04:56:49

Figura 78. Monitoreo a través de la plataforma web el 13 de febrero de 2020. Fuente propia.

Se presentan a continuación los datos obtenidos de las fotos tomadas a los medidores AMR instalados en el edificio “CALI TOWER SUITES & LOFT” para esta cuarta prueba realizada el 13 de febrero de 2021. Ver tabla 19.

Item	NºMedidor	Dirección / Apartamento	Lectura registrada en el medidor (m^3)
1	19080001	Sótano Piso 0	5,13
2	19080002	Local L2 Piso 1	1,31
3	19080003	Local L3 Piso 1	26,81
4	19080004	Totalizador Piso 2	71,05
5	19080005	Totalizador Piso 3	180,35
6	19080006	Ap-Suite 301	10,26
7	19080007	Ap-Suite 302	17,88

8	19080008	Ap-Suite 303	42,10
9	19080009	Ap-Suite 304	24,21
10	19080010	Ap-Suite 305	14,68
11	19080012	Ap-Suite 505	9,95
12	19080014	Ap-Suite 506	11,65
13	19080015	Ap-Suite 306	18,30
14	19080016	Ap-Suite 307	24,54
15	19080017	Totalizador Piso 4	No instalado
16	19080018	Totalizador Piso 5	175,51
17	19080019	Ap-Suite 501	22,57
18	19080020	Ap-Suite 502	17,77
19	19080023	Ap-Suite 503	37,01
20	19080024	Ap-Suite 504	19,89
21	19080029	Ap-Suite 507	15,47
22	19080030	Totalizador Piso 6	11,74

Tabla 19. Datos basados en las fotografías de las lecturas registradas por los medidores el 13 de febrero de 2021. Fuente propia.

- **Quinta prueba:**

Se presentan a continuación los datos obtenidos a través de la plataforma web para esta quinta prueba realizada el 20 de febrero de 2021. Ver figura 79.

No	Meter Info	Meter Name	Reading	Date
1	00000019080001	Sótano Piso 0	6.26000	2021-02-20 07:02:30
2	00000019080002	Local L2 Piso 1	1.31000	2021-02-20 07:02:30
3	00000019080003	Local L3 Piso 1	26.82000	2021-02-20 07:02:30
4	00000019080004	Totalizador Piso 2	73.19000	2021-02-20 07:02:30
5	00000019080005	Totalizador Piso 3	187.48000	2021-02-20 07:02:30
6	00000019080006	Ap-Suite 301	10.28000	2021-02-20 07:02:30
7	00000019080007	Ap-Suite 302	18.78000	2021-02-20 07:02:30
8	00000019080008	Ap-Suite 303	42.91000	2021-02-20 07:02:30
9	00000019080009	Ap-Suite 304	26.76000	2021-02-20 07:02:30
10	00000019080010	Ap-Suite 305	15.17000	2021-02-20 07:02:30
11	00000019080012	Ap-Suite 505	10.53000	2021-02-20 07:02:30
12	00000019080014	Ap-Suite 506	12.44000	2021-02-20 07:02:30
13	00000019080015	Ap-Suite 306	18.90000	2021-02-20 07:02:30
14	00000019080016	Ap-Suite 307	24.96000	2021-02-20 07:02:30
15	00000019080018	Totalizador Piso 5	184.23000	2021-02-20 07:02:30
16	00000019080019	Ap-Suite 501	24.37000	2021-02-20 07:02:39
17	00000019080020	Ap-Suite 502	18.44000	2021-02-20 07:02:39
18	00000019080023	Ap-Suite 503	39.46000	2021-02-20 07:02:39
19	00000019080024	Ap-Suite 504	19.95000	2021-02-20 07:02:39
20	00000019080029	Ap-Suite 507	15.70000	2021-02-20 07:02:39
21	00000019080030	Totalizador Piso 6	12.07000	2021-02-20 07:02:39

Figura 79. Monitoreo a través de la plataforma web el 20 de febrero de 2020. Fuente propia.

Se presentan a continuación los datos obtenidos de las fotos tomadas a los medidores AMR instalados en el edificio “CALI TOWER SUITES & LOFT” para esta quinta prueba realizada el 20 de febrero de 2021. Ver tabla 20.

Item	NºMedidor	Dirección / Apartamento	Lectura registrada en el medidor (m^3)
1	19080001	Sótano Piso 0	6,25
2	19080002	Local L2 Piso 1	1,31
3	19080003	Local L3 Piso 1	26,81
4	19080004	Totalizador Piso 2	73,19
5	19080005	Totalizador Piso 3	187,48
6	19080006	Ap-Suite 301	10,27
7	19080007	Ap-Suite 302	18,78
8	19080008	Ap-Suite 303	42,92
9	19080009	Ap-Suite 304	26,76
10	19080010	Ap-Suite 305	15,17
11	19080012	Ap-Suite 505	10,52
12	19080014	Ap-Suite 506	12,42
13	19080015	Ap-Suite 306	18,89
14	19080016	Ap-Suite 307	24,95
15	19080017	Totalizador Piso 4	No instalado
16	19080018	Totalizador Piso 5	184,21
17	19080019	Ap-Suite 501	24,37
18	19080020	Ap-Suite 502	18,44
19	19080023	Ap-Suite 503	39,47
20	19080024	Ap-Suite 504	19,93
21	19080029	Ap-Suite 507	15,71
22	19080030	Totalizador Piso 6	12,07

Tabla 20. Datos basados en las fotografías de las lecturas registradas por los medidores el 20 de febrero de 2021. Fuente propia.

- **Sexta prueba:**

Se presentan a continuación los datos obtenidos a través de la plataforma web para esta sexta prueba realizada el 6 de abril de 2021. Ver figura 80.

Item	N°Medidor	Dirección / Apartamento	Lectura registrada en el medidor (m ³)	Fecha y hora
1	00000019080001	Sótano Piso 0	7.20000	2021-04-06 05:33:21
2	00000019080002	Local L2 Piso 1	1.31000	2021-04-06 05:33:21
3	00000019080003	Local L3 Piso 1	26.82000	2021-04-06 05:33:21
4	00000019080004	Totalizador Piso 2	85.65000	2021-04-06 05:33:21
5	00000019080005	Totalizador Piso 3	220.12000	2021-04-06 05:33:21
6	00000019080006	Apt-Suite 301	10.40000	2021-04-06 05:33:21
7	00000019080007	Apt-Suite 302	23.66000	2021-04-06 05:33:21
8	00000019080008	Apt-Suite 303	46.27000	2021-04-06 05:33:21
9	00000019080009	Apt-Suite 304	38.45000	2021-04-06 05:33:21
10	00000019080010	Apt-Suite 305	16.50000	2021-04-06 05:33:21
11	00000019080012	Apt-Suite 505	14.03000	2021-04-06 05:33:21
12	00000019080014	Apt-Suite 506	15.95000	2021-04-06 05:33:21
13	00000019080015	Apt-Suite 306	18.93000	2021-04-06 05:33:21
14	00000019080016	Apt-Suite 307	27.40000	2021-04-06 05:33:21
15	00000019080017	Totalizador Piso 4	0.80000	2021-04-06 05:33:21
16	00000019080018	Totalizador Piso 5	230.29000	2021-04-06 05:33:30
17	00000019080019	Apt-Suite 501	33.23000	2021-04-06 05:33:30
18	00000019080020	Apt-Suite 502	27.02000	2021-04-06 05:33:30
19	00000019080023	Apt-Suite 503	46.28000	2021-04-06 05:33:30
20	00000019080024	Apt-Suite 504	20.83000	2021-04-06 05:33:30
21	00000019080029	Apt-Suite 507	18.44000	2021-04-06 05:33:30
22	00000019080030	Totalizador Piso 6	14.66000	2021-04-06 05:33:30

Figura 80. Monitoreo a través de la plataforma web el 6 de abril de 2021. Fuente propia.

Se presentan a continuación los datos obtenidos de las fotos tomadas a los medidores AMR instalados en el edificio “CALI TOWER SUITES & LOFT” para esta sexta prueba realizada el 6 de abril de 2021. Ver tabla 21.

Item	N°Medidor	Dirección / Apartamento	Lectura registrada en el medidor (m ³)
1	19080001	Sótano Piso 0	7,20
2	19080002	Local L2 Piso 1	1,31
3	19080003	Local L3 Piso 1	26,81
4	19080004	Totalizador Piso 2	85,65
5	19080005	Totalizador Piso 3	220,16
6	19080006	Ap-Suite 301	10,40
7	19080007	Ap-Suite 302	23,67
8	19080008	Ap-Suite 303	46,28
9	19080009	Ap-Suite 304	38,46
10	19080010	Ap-Suite 305	16,50
11	19080012	Ap-Suite 505	14,02
12	19080014	Ap-Suite 506	15,95
13	19080015	Ap-Suite 306	18,93
14	19080016	Ap-Suite 307	27,39
15	19080017	Totalizador Piso 4	No instalado
16	19080018	Totalizador Piso 5	230,29
17	19080019	Ap-Suite 501	33,23

18	19080020	Ap-Suite 502	27,02
19	19080023	Ap-Suite 503	46,29
20	19080024	Ap-Suite 504	20,82
21	19080029	Ap-Suite 507	18,44
22	19080030	Totalizador Piso 6	14,65

Tabla 21. Datos basados en las fotografías de las lecturas registradas por los medidores el 6 de abril de 2021. Fuente propia.

3.2.4 Análisis de los datos

Teniendo en cuenta los datos recolectados en la sección anterior, se hará un análisis de los mismos con el fin de evaluar la correspondencia entre los datos transmitidos desde los módulos de comunicación a la plataforma web y los datos reales tomados de los medidores, y la correcta conectividad de los nodos finales de la red que garanticen un correcto funcionamiento de la misma.

Para evaluar la correspondencia entre los datos de lectura, se presenta un análisis estadístico que tendrá en cuenta la comparación entre el valor de lectura registrado en la plataforma y el observado en cada medidor a través de las fotografías. Para ello, se toma la diferencia entre el valor entero de metros cúbicos. ver figura 81. Esto debido a que los metros cúbicos son muy importante en el proceso de facturación que llevan a cabo las empresas prestadoras del servicio público. Mensualmente un operador de la empresa toma el registro de los metros cúbicos que indica el medidor de cada residencia y el resultado de restar a lo leído en el mes actual, el valor registrado en el mes anterior, se indica el consumo de metros cúbicos durante el mes, valor que le será cobrado en la factura mensual.

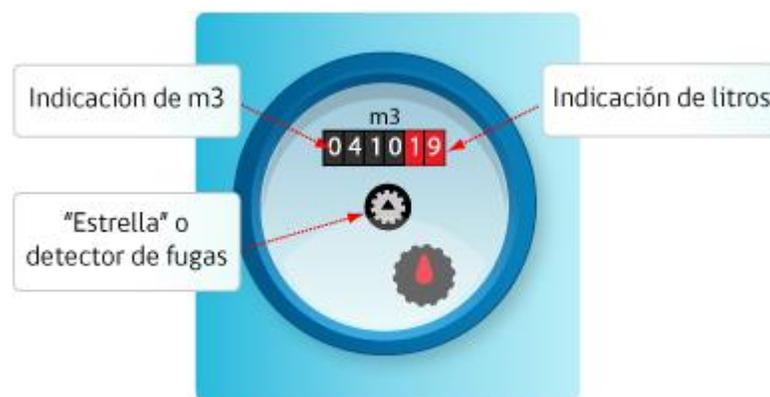


Figura 81. Forma de leer el odómetro de un medidor de agua. Fuente propia.

Con los datos obtenidos, se siguió el criterio de aceptación establecido en el plan de pruebas consignado en la tabla 9 para evaluar la correspondencia entre datos de lectura, que indica que la

diferencia máxima permisible entre el valor real observado en el medidor y el registrado en la plataforma es de $2m^3$, siendo este valor el 100% de error. Un valor superior no será aceptable para validar la calidad de los datos, teniendo en cuenta que cada metro cúbico de diferencia representa costos adicionales para el usuario, y lo que se busca es que sea un valor lo más exacto posible para así enfrentar directamente los problemas asociados a la toma manual de datos y a los consumos promedios. Para validar si el criterio de aceptación se cumple o no, se aplicará la ecuación presentada a continuación:

$$\text{Porcentaje de error} = \frac{|DR - DP|}{2} \times 100 \quad (1)$$

Donde:

DR = Dato real obtenido de las fotografías del medidor de agua AMR.

DP = Dato obtenido de la plataforma web.

Para evaluar la conectividad de los nodos finales de la red, se tuvo en cuenta también el criterio de aceptación establecido en el plan de pruebas, que indica que teniendo en cuenta la relación entre la cantidad de medidores que transmiten datos con respecto al total de medidores instalados, el porcentaje de éxito debe ser igual o superior al 95%. Para ello, se evaluará en cada caso de prueba, la cantidad de medidores conectados, es decir, los que enviaron datos a la plataforma a través del envío del comando de lectura en el momento de la prueba, con respecto a la cantidad de medidores instalados, que en este caso son 21, debido a que el medidor asignado al totalizador del piso 4 aún no está instalado debido a obras de remodelación. Para validar si el criterio de aceptación se cumple o no, se aplicará la ecuación presentada a continuación:

$$\text{Porcentaje de conectividad} = \frac{TMC}{TMI} \times 100 \quad (2)$$

Donde:

TMC = Total de medidores conectados

TMI = Total de medidores instalados

Análisis de la correspondencia entre los datos de lectura.

Para tener una mejor visualización del comportamiento de los datos reales observados en el medidor y los datos registrados en la plataforma, se mostrarán a través de una gráfica cada uno de los casos de prueba. Ver figuras 82, 84, 86, 88, 90 y 92.

- **Primera prueba**

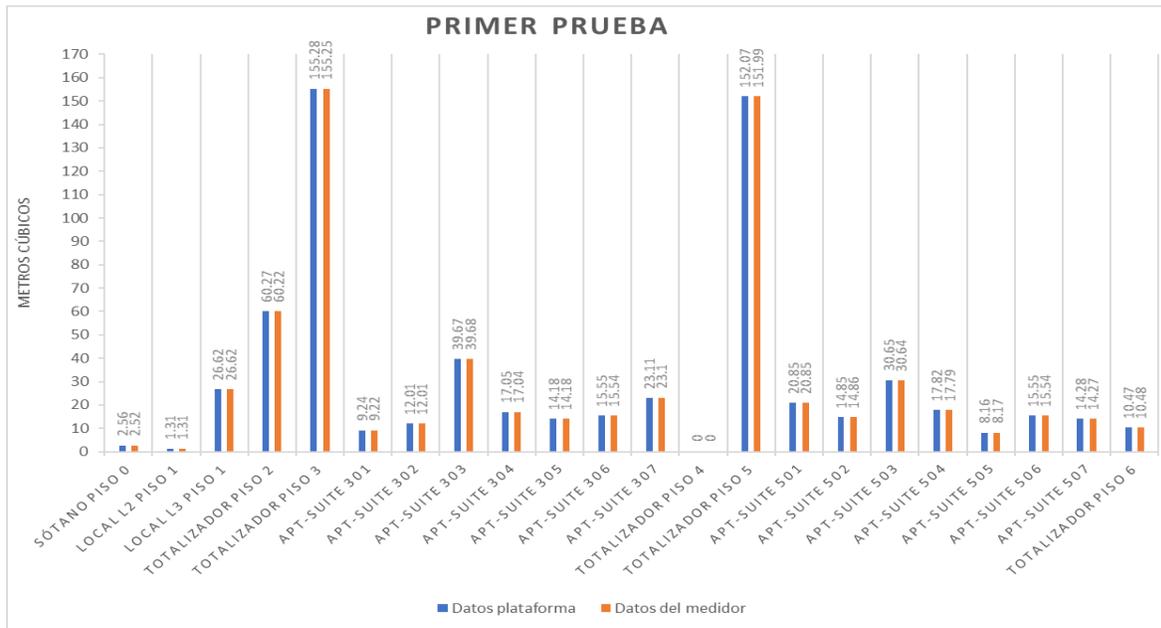


Figura 82. Comportamiento de los datos obtenidos de la plataforma y del medidor. Fuente propia.

De acuerdo a lo establecido para evaluar la correspondencia entre los datos de lectura, donde se tiene como criterio de aceptación que los datos registrados en plataforma tengan una diferencia máxima de $2m^3$ por debajo o por encima del valor real registrado en el medidor, se realizó el análisis para esta primera prueba bajo la aplicación de la ecuación (1). Como resultado se obtuvo un porcentaje de error del 0% para 21 de los 22 medidores instalados, y solo uno de estos correspondiente al totalizador del piso 5, tiene un porcentaje del 50%, de modo que en este caso ninguno de los datos supera el 100% de error. Ver figura 83. Con esto es posible afirmar que el 95% de los 21 medidores instalados tiene una correspondencia del 100% entre los datos de lectura registrados en la plataforma y los datos reales obtenidos de los medidores. A partir de esto se concluyó que hay una buena calidad en los datos transmitidos por los módulos de comunicación a la plataforma web.



Figura 83. Porcentaje de error entre los datos obtenidos para la primera prueba.

- Segunda prueba

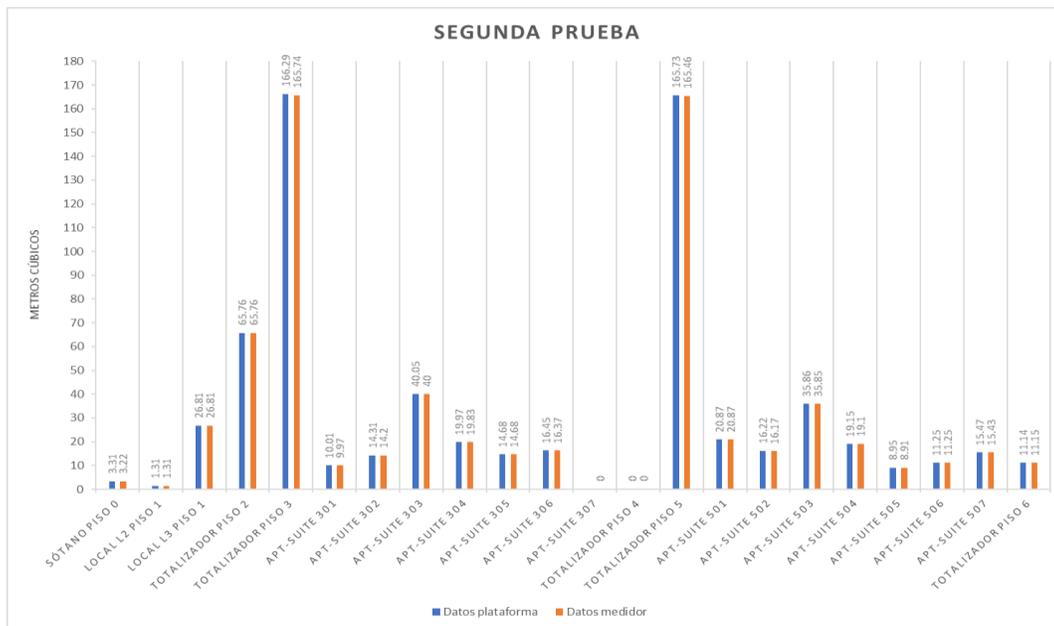


Figura 84. Comportamiento de los datos obtenidos de la plataforma y del medidor. Fuente propia.

De acuerdo a lo establecido para evaluar la correspondencia entre los datos de lectura, donde se tiene como criterio de aceptación que los datos registrados en plataforma tengan una diferencia máxima de $2m^3$ por debajo o por encima del valor real registrado en el medidor, se realizó el análisis para esta primera prueba bajo la aplicación de la ecuación (1). Como resultado se obtuvo

un porcentaje de error del 0% para 20 de los 22 medidores instalados, y los dos restantes, correspondiente al totalizador del piso 3 y al apt- suite 301, tienen un porcentaje del 50%, de modo que en este caso ninguno supera el 100% de error. Ver figura 85. Con esto es posible afirmar que el 91% de los 21 medidores instalados tiene una correspondencia del 100% entre los datos de lectura registrados en la plataforma y los datos reales obtenidos de los medidores. A partir de esto se concluyó que hay una buena calidad en los datos transmitidos por los módulos de comunicación a la plataforma web.



Figura 85. Porcentaje de error entre los datos obtenidos para la segunda prueba.

- Tercera prueba

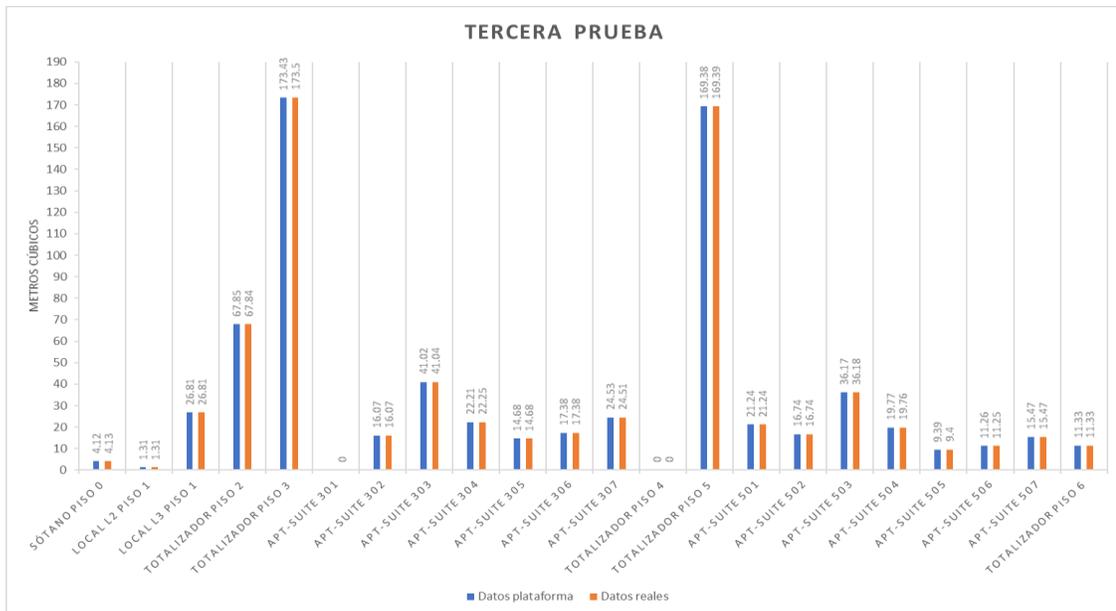


Figura 86. Comportamiento de los datos obtenidos de la plataforma y del medidor. Fuente propia.

De acuerdo a lo establecido para evaluar la correspondencia entre los datos de lectura, donde se tiene como criterio de aceptación que los datos registrados en plataforma tengan una diferencia máxima de $2m^3$ por debajo o por encima del valor real registrado en el medidor, se realizó el análisis para esta primera prueba bajo la aplicación de la ecuación (1). Como resultado se obtuvo porcentaje de error del 0% para los 21 medidores instalados, de modo que en este caso ninguno supera el 100% de error. Ver figura 87. Con esto es posible afirmar que el 100% de los medidores instalados tiene una correspondencia del 100% entre los datos de lectura registrados en la plataforma y los datos reales obtenidos de los medidores. A partir de esto se concluyó que hay una buena calidad en los datos transmitidos por los módulos de comunicación a la plataforma web.

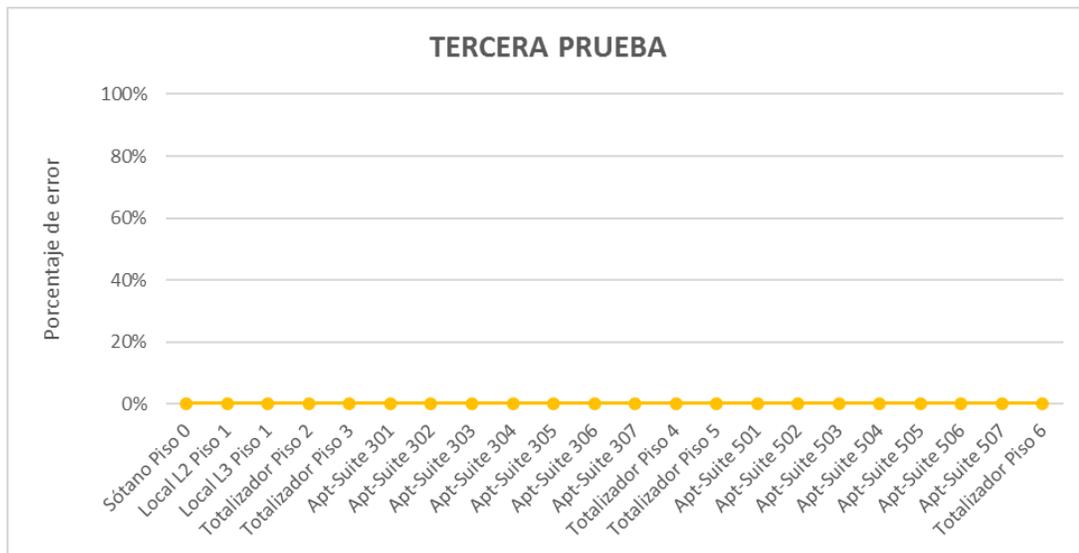


Figura 87. Porcentaje de error entre los datos obtenidos para la segunda prueba.

- Cuarta prueba

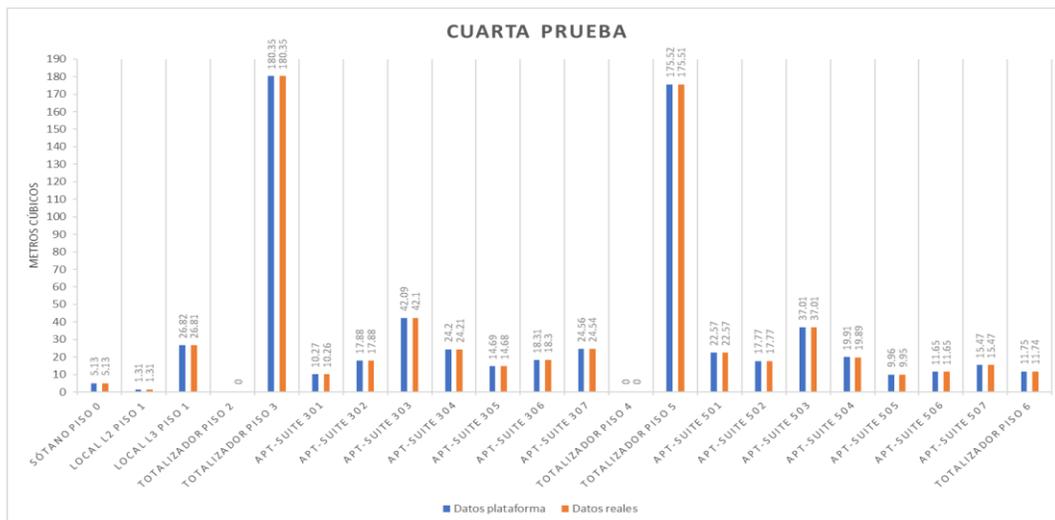


Figura 88. Comportamiento de los datos obtenidos de la plataforma y del medidor. Fuente propia.

De acuerdo a lo establecido para evaluar la correspondencia entre los datos de lectura, donde se tiene como criterio de aceptación que los datos registrados en plataforma tengan una diferencia máxima de $2m^3$ por debajo o por encima del valor real registrado en el medidor, se realizó el análisis para esta primera prueba bajo la aplicación de la ecuación (1). Como resultado se obtuvo porcentaje de error del 0% para los 21 medidores instalados, de modo que en este caso ninguno supera el 100% de error. Ver figura 89. Con esto es posible afirmar que el 100% de los medidores instalados tiene una correspondencia del 100% entre los datos de lectura registrados en la plataforma y los datos reales obtenidos de los medidores. A partir de esto se concluyó que hay una buena calidad en los datos transmitidos por los módulos de comunicación a la plataforma web.

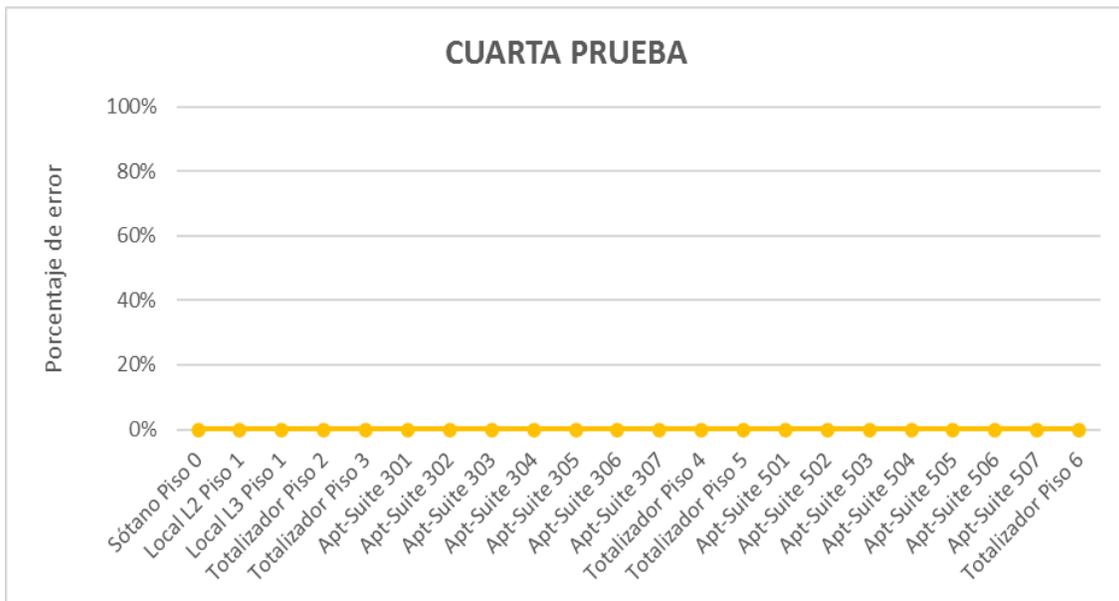


Figura 89. Porcentaje de error entre los datos obtenidos para la segunda prueba.

- **Quinta prueba**

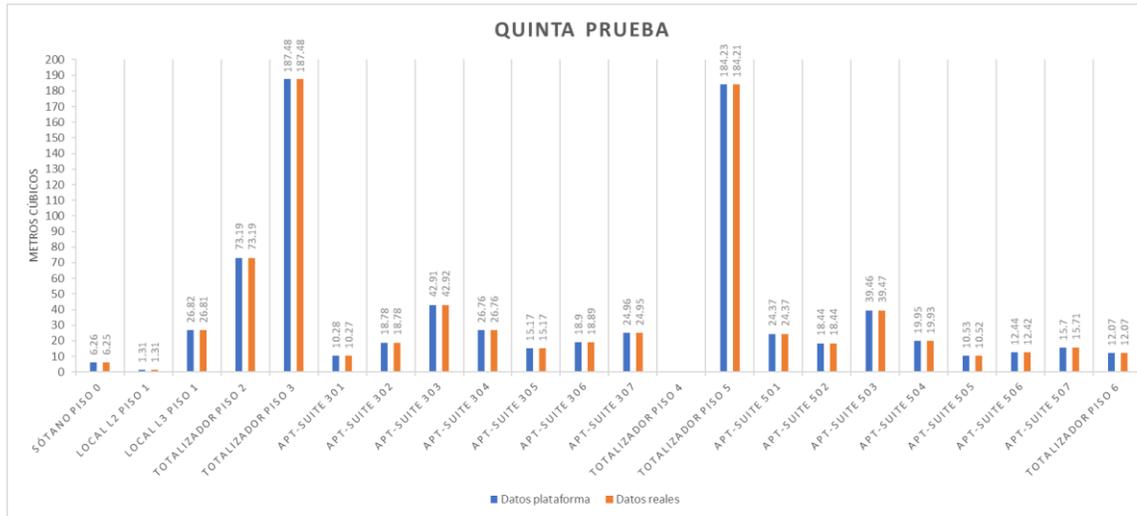


Figura 90. Comportamiento de los datos obtenidos de la plataforma y del medidor. Fuente propia.

De acuerdo a lo establecido para evaluar la correspondencia entre los datos de lectura, donde se tiene como criterio de aceptación que los datos registrados en plataforma tengan una diferencia máxima de $2m^3$ por debajo o por encima del valor real registrado en el medidor, se realizó el análisis para esta primera prueba bajo la aplicación de la ecuación (1). Como resultado se obtuvo porcentaje de error del 0% para los 21 medidores instalados, de modo que en este caso ninguno supera el 100% de error. Ver figura 91. Con esto es posible afirmar que el 100% de los medidores instalados tiene una correspondencia del 100% entre los datos de lectura registrados en la plataforma y los datos reales obtenidos de los medidores. A partir de esto se concluyó que hay una buena calidad en los datos transmitidos por los módulos de comunicación a la plataforma web.

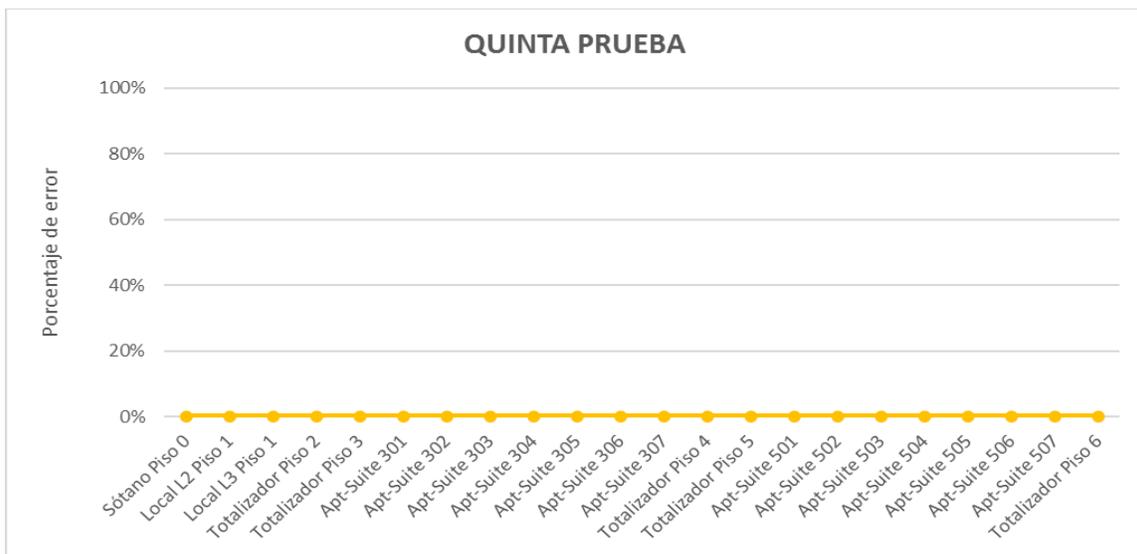


Figura 91. Porcentaje de error entre los datos obtenidos para la segunda prueba. Fuente propia.

- Sexta prueba

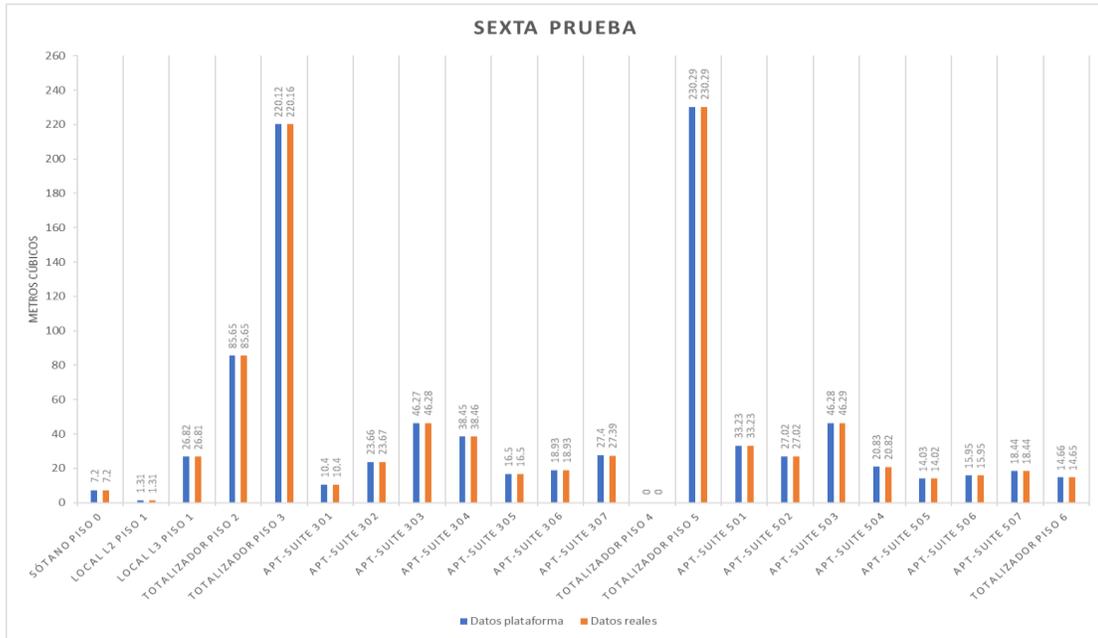


Figura 92. Comportamiento de los datos obtenidos de la plataforma y del medidor. Fuente propia.

De acuerdo a lo establecido para evaluar la correspondencia entre los datos de lectura, donde se tiene como criterio de aceptación que los datos registrados en plataforma tengan una diferencia máxima de $2m^3$ por debajo o por encima del valor real registrado en el medidor, se realizó el análisis para esta primera prueba bajo la aplicación de la ecuación (1). Como resultado se obtuvo porcentaje de error del 0% para los 21 medidores instalados, de modo que en este caso ninguno supera el 100% de error. Ver figura 93. Con esto es posible afirmar que el 100% de los medidores instalados tiene una correspondencia del 100% entre los datos de lectura registrados en la plataforma y los datos reales obtenidos de los medidores. A partir de esto se concluyó que hay una buena calidad en los datos transmitidos por los módulos de comunicación a la plataforma web.

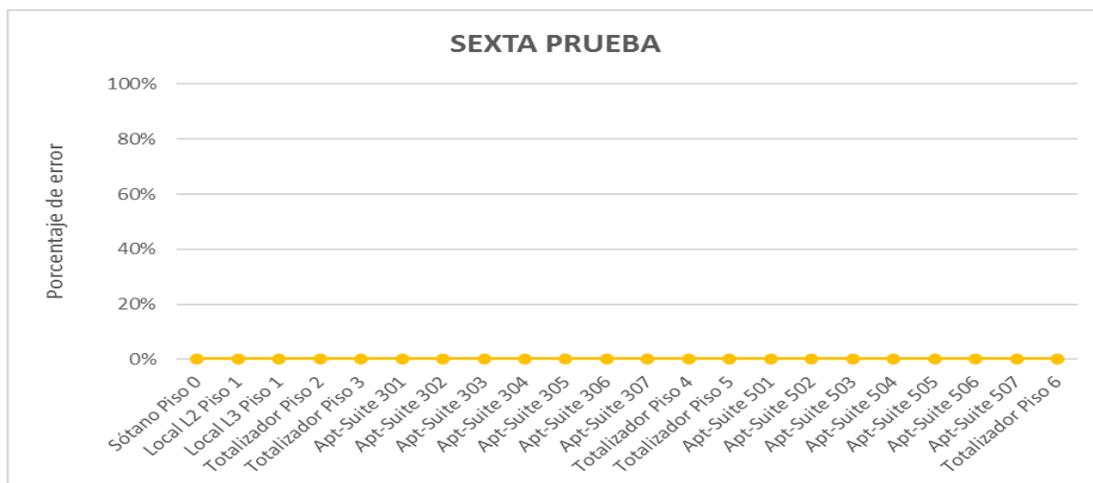


Figura 93. Porcentaje de error entre los datos obtenidos para la segunda prueba. Fuente propia.

Como se pudo observar, solo en 2 de los 6 casos de prueba se presentaron un porcentaje de error diferente de cero, sin embargo, ninguno que represente anomalías significativas, pues no superan el 100% de error, es decir no presentan diferencias superiores a $2m^3$. En los casos en los que el porcentaje de error fue diferente de 0% lo atribuimos a la diferencia de tiempo que inevitablemente hay entre la toma de fotografías y el envío de comando de lectura, teniendo en cuenta que este proceso se realiza en el día, mientras los medidores continúan funcionando normalmente.

Finalmente, fue posible concluir que hay una concordancia promedio del 98% entre los datos obtenidos en plataforma y los datos reales de los medidores en los 6 casos de prueba, lo cual es muy positivo teniendo en cuenta que las pruebas fueron tomadas en diferentes fechas a lo largo del tiempo. De esta forma se concluyó que los datos obtenidos en la plataforma son confiables y verídicos pues hay una alta calidad en los datos transmitidos desde el medidor hacia la plataforma.

Análisis de conectividad

Para establecer si la red está operando correctamente, es necesario evaluar el criterio de aceptación establecido para ello, que indica que teniendo en cuenta la relación entre la cantidad de medidores que transmiten datos con respecto al total de medidores instalados, el porcentaje de éxito debe ser igual o superior al 95%. El análisis se realizó para cada uno de los casos de prueba en base a los datos obtenidos en la sección 3.2.3, aplicando la ecuación (2) para caso y teniendo en cuenta se tomará como referencia un total de 21 medidores instalados. Ver figura 94.

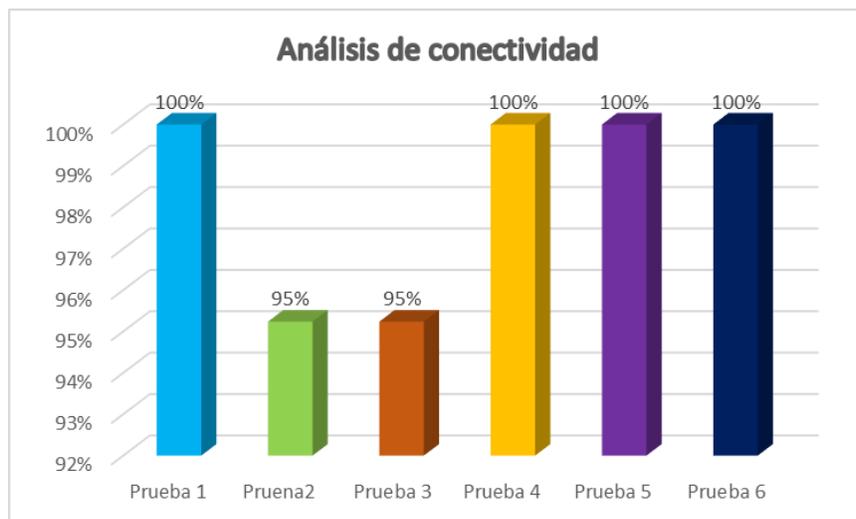


Figura 94. Análisis de conectividad para cada caso de prueba.

Como se observa en la figura 94, en todos los casos de prueba, el porcentaje de conectividad es igual o superior al 95%, lo cual cumple con el criterio de aceptación establecido para este aspecto. Con ello es posible decir que la red ha tenido un correcto funcionamiento en el tiempo.

La causa principal que se atribuye a los casos donde no se obtuvo un 100% de conectividad es la presencia de obstáculos que provoca una disminución de la línea de vista entre el medidor y el gateway al momento del envío de datos, lo cual impidió que se registrara en la plataforma web. Esto se afirma puesto que al realizar el análisis de conectividad en base a los datos de lectura que envían los módulos de comunicación una vez por día a la plataforma web, se pudo comprobar que para los mismos días de las pruebas, hubo registro de dicha lectura en el 100% de los medidores instalados, por ende se descarta una desconexión permanente de los módulos que no enviaron datos en la prueba anterior. Ver figura 95.

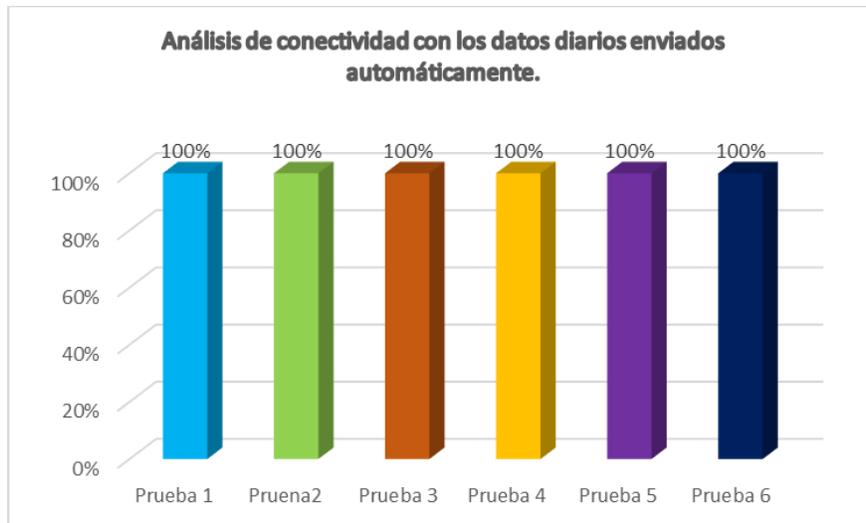


Figura 95. Análisis de conectividad en base a los datos diarios enviados automáticamente. Fuente propia.

Capítulo 4

Diagnóstico del funcionamiento del sistema AMR

4.1. Retroalimentación

Para poder realizar una correcta evaluación sobre los diferentes aspectos que componen el funcionamiento del piloto de medición inteligente, es necesario conocer la opinión de los actores que hicieron parte de los diferentes niveles del proceso de diseño e implementación del proyecto. Para ello se hace uso de un formato de Google tipo encuesta que se compartió tanto a personal de Metrex que hizo parte de toda la construcción del proyecto y también al cliente. De esta forma se tendrá una visión global de sus opiniones y de esta forma poder tener una correcta retroalimentación que permita resaltar los aspectos positivos y tomar acciones sobre los negativos. El enlace al formate de encuesta aplicado se adjunta en el anexo 7 “Formato de encuesta para retroalimentación”

La encuesta fue respondida por dos personas por parte del cliente y por 3 personas por parte del proveedor, es decir, personal de Metrex que participó en la construcción del proyecto. A continuación, se realiza un análisis general con base en las respuestas dadas por los participantes, con el fin de medir y destacar las respuestas más relevantes, que permitan identificar posteriormente las ventajas, desventajas, amenazas y oportunidades de mejora.

Análisis a preguntas generales

1. ¿Considera que la navegación a través de la plataforma web permite explorar y hacer uso de todas las herramientas que contiene es intuitiva y de fácil acceso?

Esta pregunta tenía como opciones de respuesta SI y NO las cuales obtuvieron un 0% y un 100% de porcentaje de selección respectivamente.

En caso de que la respuesta fuese no, se solicitaba al encuestado especificar las razones a través de una pregunta abierta, de la cual se pudo extraer las respuestas más relevantes y repetitivas, listadas a continuación:

- La plataforma es poco amigable visualmente
- Fue necesario consultar el manual repetidas veces para poder encontrar algunas opciones.
- La plataforma solo se puede usar en idioma inglés.

2. ¿Considera usted que la plataforma web contiene todas las opciones necesarias para realizar un adecuado monitoreo y gestión de los datos transmitidos a través del sistema AMR?

Esta pregunta tenía como opciones de respuesta SI y NO las cuales obtuvieron un 100% y un 0% de porcentaje de selección respectivamente. Por ende, no hubo respuestas abiertas pues estas se daban solo en caso de que la respuesta seleccionada inicialmente fuese NO.

3. ¿Considera útil que el módulo de comunicación permita la detección y notificación alarmas por funcionamientos irregulares como flujo inverso, desconexión del módulo, ataque magnético y batería baja?

Esta pregunta tenía como opciones de respuesta BASTANTE ÚTIL, MEDIANAMENTE ÚTIL Y MUY POCO ÚTIL, las cuales obtuvieron un 60%, 40% y un 0% de porcentaje de selección respectivamente.

Para complementar la respuesta a esta pregunta se incluyó una pregunta abierta que solicitaba justificar la respuesta seleccionada. De acuerdo a ello lo más relevante y repetitivo analizado en las respuestas, se lista a continuación:

- Bastante útil porque permite identificar irregularidades a tiempo para evitar fraudes.
- Medianamente útil porque para estar al tanto de si hay alguna notificación de alarma, se debe revisar la plataforma continuamente. Sería más útil si las notificaciones se transmitieran también a otros canales como mensajes de texto o correo electrónico.

Análisis a preguntas exclusivas para el cliente

4. ¿Considera que el poder tomar los datos de los medidores desde la plataforma web ha traído beneficios significativos?

Esta pregunta tenía como opciones de respuesta SI y NO las cuales obtuvieron un 100% y un 0% de porcentaje de selección respectivamente. Por ende no hubo respuestas abiertas pues estas se daban solo en caso de que la respuesta seleccionada inicialmente fuese NO.

5. Califique usted la calidad de los datos que puede obtener desde la plataforma web con respecto a los reales.

Esta pregunta tenía como opciones de respuesta EXCELENTE, BUENA, REGULAR Y MALA, las cuales obtuvieron un 100%, 0%, 0% y un 0% de porcentaje de selección respectivamente.

Para complementar la respuesta a esta pregunta se incluyó una pregunta abierta que solicitaba justificar la respuesta seleccionada. De acuerdo a ello lo más relevante y repetitivo analizado en las respuestas, se menciona a continuación:

- No hubo inconvenientes en los temas de facturación pues los datos de metros cúbicos obtenidos en la plataforma coincidían exactamente con los registrados en los medidores.
- Las pruebas realizadas por Metrex fueron compartidas al usuario y con esto se pudo evidenciar que efectivamente había correspondencia entre los datos.

6. ¿Ha considerado la posibilidad de incrementar el número de medidores conectados a la red de acuerdo a la experiencia que ha tenido hasta el momento?

Esta pregunta tenía como opciones de respuesta SI y NO las cuales obtuvieron un 100% y un 0% de porcentaje de selección respectivamente. Por ende, no hubo respuestas abiertas pues estas se daban solo en caso de que la respuesta seleccionada inicialmente fuese NO.

7. ¿La instalación del sistema AMR ha traído ventajas para usted y para los servicios que presta en su edificio?

Esta pregunta tenía como opciones de respuesta SI y NO las cuales obtuvieron un 100% y un 0% de porcentaje de selección respectivamente.

Para complementar la respuesta a esta pregunta se incluyó una pregunta abierta que solicitaba justificar la respuesta seleccionada. De acuerdo a ello lo más relevante y repetitivo analizado en las respuestas, se menciona a continuación:

- El poder consultar los datos generados por los medidores a través de cualquier ordenador con acceso a internet, sin tener que desplazarse hacia el edificio.
- El tener la posibilidad de enviar un comando para consultar la lectura de los medidores en cualquier momento del día permite tener control sobre el consumo de agua durante la estadía de los huéspedes y así controlar que no se registre un consumo excesivo por encima del promedio general.
- Al tener registro en la plataforma sobre el consumo generado de un día a otro, gracias a la lectura que envían los módulos de comunicación una vez al día, es posible identificar fugas en los aparta-suites que estén vacíos.

- El poder descargar la información de las lecturas diarias en formato Excel.
- El poder generar históricos de consumos con la información registrada en la plataforma diariamente.
- Poder confirmar que la suma de los datos registrados en los totalizadores internos, coincide con el registrado por el totalizador externo sobre el cual se toma el valor de metros cúbicos para la facturación.
- El no tener que retirar de sus labores al personal que trabaja en el edificio para llevar a cabo el proceso de recolección de los datos de los medidores de forma manual.

8. ¿Cuáles han sido las mayores desventajas o inconvenientes que se le han presentado durante el funcionamiento del sistema AMR?

Para esta pregunta se permitió una respuesta abierta, las cuales fueron analizadas y a continuación se listan las respuestas más relevantes y comunes entre los encuestados:

- El no poder integrar los medidores de energía al mismo sistema, ya que son de otra marca.
- Poca y lenta adaptabilidad al uso de la plataforma web.
- El no tener disponible una aplicación móvil.
- La plataforma no cuenta con la opción de consultar el valor del consumo mensual, por ende, el proceso de resta entre el valor registrado en el mes actual y el anterior, debe hacerse manualmente.

9. ¿Ha visto reflejadas las ventajas de la implementación del sistema AMR en el proceso de facturación?

Esta pregunta tenía como opciones de respuesta SI y NO las cuales obtuvieron un 100% y un 0% de porcentaje de selección respectivamente. Por ende, no hubo respuestas abiertas pues estas se daban solo en caso de que la respuesta seleccionada inicialmente fuese NO.

10. ¿Cómo califica usted el servicio post venta por parte de la empresa Metrex S.A?

Esta pregunta tenía como opciones de respuesta EXCELENTE, BUENA, REGULAR Y MALA, las cuales obtuvieron un 100%, 0%, 0% y un 0% de porcentaje de selección respectivamente.

Para complementar la respuesta a esta pregunta se incluyó una pregunta abierta que solicitaba justificar la respuesta seleccionada. De acuerdo a ello lo más relevante y repetitivo analizado en las respuestas, se menciona a continuación:

- Fue posible mantener una comunicación directa con el personal de Metrex encargado del soporte técnico y siempre estuvieron atentos a responder las inquietudes.

Preguntas exclusivas para el proveedor

11. ¿Considera que la tecnología LoRa empleada en esta red, ha permitido cumplir con los objetivos principales del sistema AMR?

Esta pregunta tenía como opciones de respuesta SI y NO las cuales obtuvieron un 100% y un 0% de porcentaje de selección respectivamente.

Para complementar la respuesta a esta pregunta se incluyó una pregunta abierta que solicitaba justificar la respuesta seleccionada. De acuerdo a ello lo más relevante y repetitivo analizado en las respuestas, se menciona a continuación:

- Las pruebas de conectividad y correspondencia entre datos de lectura fueron exitosas bajo los criterios de evaluación, lo que permite concluir que la tecnología LoRa empleada en esta red responde correctamente a los objetivos planteados.
- Las características técnicas y ventajas que ofrece esta tecnología, permiten que la LoRa sea una muy buena opción para ser empleada en este tipo de proyectos de medición inteligente en los que se caracterizan por necesitar el envío de pequeños paquetes de datos a grandes distancias.

12. ¿Qué ventajas y efectos positivos trae para Metrex la instalación de este tipo de pilotos de medición inteligente?

Para esta pregunta se permitió una respuesta abierta, las cuales fueron analizadas y a continuación se listan las respuestas más relevantes y comunes entre los encuestados:

- Estar actualizados y a la vanguardia en cuanto a las tecnologías y equipos hardware y software necesarios para la instalación de sistemas de medición inteligente, lo cual es una realidad actual en algunos sectores y una necesidad a futuro.
- Los proyectos piloto se convierten para Metrex en una evidencia real para ser presentada a otros clientes y de esta forma conozcan las ventajas que trae la instalación de sistemas AMR y se interesen en probarlos.

- El contar con nuevos equipos hardware y software para la instalación de sistemas AMR, le permite a Metrex ampliar su portafolio de productos y servicios, lo cual aumenta su reconocimiento en un mercado donde aún no hay una oferta significativa, pero si una demanda creciente.

13. ¿Qué desventajas y efectos negativos trae para Metrex el desarrollo de este tipo de pilotos de medición inteligente?

Para esta pregunta se permitió una respuesta abierta, las cuales fueron analizadas y a continuación se listan las respuestas más relevantes y comunes entre los encuestados:

- Los costos que asume la empresa en los proyectos piloto teniendo en cuenta que apenas se están probando las tecnologías y dando a conocer los beneficios de los sistemas AMR y AMI con pocas unidades instaladas.
- La poca oferta de proveedores reconocidos para poder tercerizar el suministro de productos y servicios necesarios para la instalación de los sistemas.

14. ¿Qué ventajas considera que trae para los usuarios la instalación de este tipo de proyectos piloto?

Para esta pregunta se permitió una respuesta abierta, las cuales fueron analizadas y a continuación se listan las respuestas más relevantes y comunes entre los encuestados:

- Poder obtener información de forma remota y así un mayor control sobre las variables medibles que sean de interés para el usuario.
- Eliminar sobrecostos asociados a las pérdidas no técnicas donde se encuentran los errores humanos asociados al procedo manual de toma de lecturas o a los consumos promedios.
- Con la instalación de este tipo de sistemas, las empresas prestadoras de servicios públicos pueden reducir los costos asociados a la contratación del personal encargado de la toma de lectura manual.
- Tener a disposición mayor información sobre los medidores, como la notificación de alarmas que permita un mantenimiento correctivo a tiempo.

- Realizar análisis estadísticos al tener mayor información sobre los consumos de los usuarios y así crear reportes o análisis más detallados que impacten positivamente el desempeño de las empresas.

15. ¿Considera realizar las actualizaciones y opciones de mejora necesarias para brindar un mejor servicio en proyectos futuros?

Esta pregunta tenía como opciones de respuesta SI y NO las cuales obtuvieron un 100% y un 0% de porcentaje de selección respectivamente.

Para complementar la respuesta a esta pregunta se incluyó una pregunta abierta que solicitaba justificar la respuesta seleccionada. De acuerdo a ello lo más relevante y repetitivo analizado en las respuestas, se menciona a continuación:

- Metrex tiene como objetivo continuar actualizándose y aprovechar las experiencias obtenidas de los proyectos piloto para atacar las desventajas y generar mejoras a partir de ellas que le permitan brindar soluciones integrales y productos y servicios de calidad.

4.2. Matriz DOFA

Para identificar las fortalezas, debilidades, oportunidades y amenazas del piloto de medición inteligente para el servicio domiciliario de agua a través de la instalación de un sistema de Lectura de Medición Automática (AMR) a un cliente residencial por medio de una red LPWAN con tecnología LoRa, se empleará la matriz DOFA que permite desagregar de una mejor forma estos aspectos. El insumo utilizado como fuente de información para llenar la matriz DOFA, corresponde al consolidado de cinco encuestas aplicadas entre cliente y proveedor. Ver tabla 22.

MATRIZ DOFA	
Fortalezas	Debilidades
<p>1. La instalación se sistemas AMR le permite al cliente visualizar los datos de consumo de los medidores desde el ordenador, eliminando así el proceso de realizar toma de lectura manual y disminuir el porcentaje de errores humanos asociados a dicho proceso.</p>	<p>1. Al ser una red LoRa privada donde no es posible conectar dispositivos de otra marca o proveedor, elimina por completo la posibilidad de escalabilidad en el tiempo.</p>

2. Permite generar estadísticas de consumo diario y no promedio mensual como normalmente se hace para el proceso de facturación.

3. Es posible identificar y detectar de forma temprana comportamientos irregulares a través de la activación y notificación de alarmas como detección de flujo inverso, desconexión del módulo, batería baja y ataque magnético.

4. Es posible consultar a través de la plataforma web, la lectura de todos los medidos o de forma individual en cualquier momento del día.

5. La calidad de los datos transmitidos a través de la plataforma es adecuada y los datos son confiables ya que no superan el porcentaje de error permitido.

6. La cantidad de nodos finales conectados es igual o superior al 95% a lo largo del tiempo, lo que garantiza un adecuado funcionamiento del sistema AMR.

7. Gracias al sistema AMR el cliente ha tenido mejoras significativas en el servicio de hospedaje que presta en su edificio. Por ejemplo, la posibilidad de tener un control sobre el consumo de cada huésped en el apartamento, pues tiene la posibilidad de registrar el valor de lectura del medidor en el momento del ingreso y de salida del huésped. De este modo ataca problemáticas como el consumo excesivo de agua durante la estadía por una misma tarifa de hospedaje, las fugas o daños causados por el usuario y no reportados al momento de su salida.

2. La navegación en la plataforma web actual es poco intuitiva y dificulta la posibilidad de entender y sacar el máximo provecho de cada una de las herramientas que brinda. Adicional a ello, se encuentra configurada en el idioma inglés y no es posible modificar el idioma de lectura.

3. No cuenta con la opción de obtener el valor del consumo de cada medidor de forma automática, solo es posible obtener las lecturas del medidor en fechas determinadas y con esto realizar forma manual el proceso de resta entre el consumo actual y el anterior.

4. Aun no cuenta con una aplicación móvil a través de la cual se puedan visualizar también los datos e información de la red o notificaciones sobre el estado de alarmas a través de mensajes de texto o correo electrónico.

5. Al no tener posibilidad de escalabilidad, no es posible adicionar otras redes de medición inteligente de los servicios de gas y energía a la misma plataforma web, de modo que el cliente no puede tener un centro de gestión único y centralizado.

<p>8. Gracias a su bajo consumo de energía para los dispositivos que operan con baterías lo cual prolonga su vida útil hasta por 10 años</p>	
Oportunidades	Amenazas
<p>6. Posibilidad de ampliación del lote de medidores AMR que conforman la red teniendo en cuenta las ventajas que ha traído para el cliente, pero tomando acciones de mejora sobre las desventajas.</p> <p>7. Al ser LoRa la tecnología empleada en la capa física, tiene la oportunidad de emplear LoRaWAN como protocolo de acceso al medio y de esa forma evolucionar implementando una red LoRaWAN que permita una escalabilidad en el tiempo de la red e integrar elementos de diferentes proveedores, lo cual amplía la posibilidad de implementar redes de medición inteligente en todas las líneas de servicios públicos, operando bajo una misma tecnología. Además, agrega importantes beneficios de funcionamiento como un alcance de 10 a 15km en línea de vista, encriptación AES 128, posibilidad de implementar redes públicas o privadas, administración de dispositivos y soporte para 3 clases de nodos, posibilidad de conectar hasta 1 millón de nodos en la red, entre otros.</p> <p>8. Para Metrex como proveedor, la implementación de esto pilotos representa una gran oportunidad de seguir trabajando en la optimización de elementos software y hardware que permitan aumentar su portafolio de productos y servicio con relación a las redes de medición inteligente, de cara a un futuro cercano en el que cada vez hay más elementos</p>	<p>1. El costo por el uso de la plataforma web empleada en este piloto, es demasiado alto, por fuera del tiempo de prueba establecido, lo cual puede hacer que el cliente desista de adquirir o ampliar la red, teniendo en cuenta las deficiencias que presenta hasta ahora la plataforma.</p> <p>2. La dependencia continua de un operador móvil para que el Gateway pueda transmitir los datos hacia el servidor.</p> <p>3. La poca oferta actual que hay en el mercado nacional de operadores de red LoRaWAN y de dispositivos equipados con esta tecnología para operar en este tipo de redes.</p> <p>4. El poco conocimiento que aún tienen las empresas sobre la existencia de soluciones IoT para medición inteligente y el poco riesgo económico que están dispuestos a tomar cuando se trata de implementar nuevas propuestas.</p>

<p>conectados a internet. De esta forma la empresa podrá ir un paso adelante teniendo en cuenta una posible reglamentación nacional en la que se exija la instalación de sistemas AMR o AMI en las redes de servicios públicos, como ya ocurrió en energía.</p>	
---	--

Tabla 22. Matriz DOFA para el análisis del funcionamiento del sistema AMR. Fuente propia.

Una vez creada la matriz DOFA es posible analizar y extraer de ella los aspectos más relevantes de cada una de sus secciones

- La ventaja más relevante tras la instalación del piloto de medición inteligente es la posibilidad que tiene el usuario de obtener los datos de lectura de los medidores instalados en su red y el reporte de alarmas generadas por irregularidades en los mismos, de forma remota, desde cualquier ordenador con acceso a internet, lo cual elimina errores asociados al proceso de lectura que se realiza de forma manual.
- La desventaja más relevante es que al ser una red LoRa privada anula la posibilidad de escalabilidad, pues no permite conectar dispositivos creados por otros fabricantes lo cual es una limitante para el cliente si desea adaptar sus otras líneas de servicios públicos al sistema AMR.
- La oportunidad más relevante es que al haber validado el correcto funcionamiento de la tecnología y al ser ésta la tecnología operada en la capa física, tiene la oportunidad de emplear LoRaWAN como protocolo de acceso al medio y de esa forma evolucionar a la implementación de una red LoRaWAN que permita una escalabilidad en el tiempo de la red con la integración de más número de unidades fabricados por diferentes proveedores, lo cual amplía la posibilidad de implementar redes de medición inteligente en todas las líneas de servicios públicos, operando bajo una misma tecnología. Además, LoRaWAN agrega importantes beneficios de funcionamiento como un alcance de 10 a 15km en línea de vista, encriptación AES 128, posibilidad de implementar redes públicas o privadas, administración de dispositivos y soporte para 3 clases de nodos, posibilidad de conectar hasta 1 millón de nodos en la red, entre otros.
- La amenaza más relevante es la poca oferta de proveedores que hay en el mercado nacional de operadores de red LoRaWAN y de dispositivos equipados con esta tecnología para operar en este tipo de redes.

CAPÍTULO 5

Análisis técnico – económico para la implementación de sistemas AMR en el servicio público de agua.

Teniendo en cuenta el desempeño del piloto, la evaluación realizada en el capítulo 4 y los análisis de correspondencia de datos y conectividad realizados en el capítulo 3, en la sección “Análisis de datos” es posible determinar que la tecnología LoRa es adecuada y eficiente para lograr la obtención de datos verídicos de los medidores en tiempo real. Dicho esto, es posible continuar trabajando con esta tecnología, sin embargo, es necesario atacar las desventajas y amenazas mencionadas en la matriz DOFA. Esto es posible a través de la oportunidad de mejora que consiste en hacer una actualización a una red LoRaWAN que trae consigo beneficios significativos. Por ello se hará un análisis técnico económico sobre una propuesta presentada por proveedores de elementos hardware y software y aceptada por los directivos de Metrex S.A. Esto con el fin de determinar la viabilidad en la implementación de este tipo de redes en proyectos futuros.

5.1. LoRaWAN

LoRaWAN es un protocolo MAC, creado para utilizar la capa física LoRa. Está diseñado principalmente para redes LPWAN. Ver figura 74.

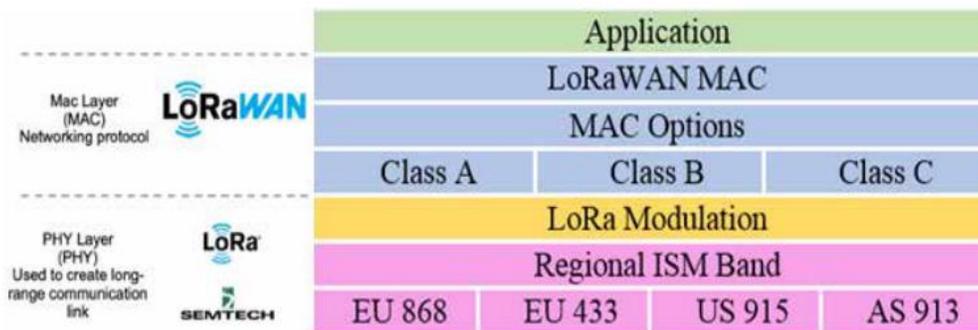


Figura 96. Arquitectura del protocolo LoRaWAN [36].

Los elementos que conforman una red LoRaWAN se describen a continuación. Ver figura 97.

- **Dispositivo final:** son los sensores de bajo consumo de energía conectados a los dispositivos donde medirán determinada variable y que se comunican con los gateway mediante tecnología LoRa.

- **Gateway:** son dispositivos intermedios que reenvían los paquetes que provienen de los dispositivos finales a un servidor de red a través de una interfaz de backhaul IP que permite un mayor rendimiento. Puede haber varias puertas de enlace en una implementación de LoRaWAN, y más de una Gateway puede recibir (y reenviar) el mismo paquete de datos.
- **Servidor de red:** responsable de deduplicar y decodificar los paquetes de datos enviados por los dispositivos y generar los paquetes que deben enviarse de regreso a los dispositivos de ser necesario. A diferencia de las redes celulares tradicionales, los dispositivos finales no están asociados con una única puerta de enlace para tener acceso a la red. Los gateways sirven simplemente como un relé de capa de enlace y reenvían el paquete recibido de los dispositivos finales al servidor de red después de agregar información sobre la calidad de recepción. Por lo tanto, un dispositivo final está asociado con un servidor de red, que es responsable de detectar paquetes duplicados, enrutar de mensajes a la aplicación correspondiente y descifrar y encriptar mensajes.
- **Servidor de aplicaciones:** En el servidor de aplicación se da utilidad a los datos recopilados por los nodos. Se pueden ejecutar tanto en una nube pública como en una privada, la cual está en continua interacción con el servidor de red. Este gestiona la interfaz que da acceso al usuario a los datos ubicados en la aplicación.

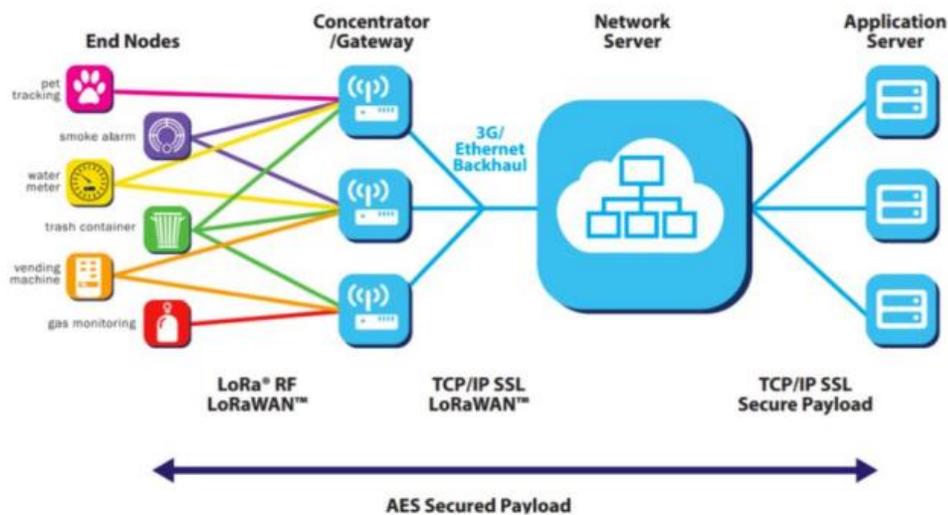


Figura 97. Arquitectura de red LoRaWAN [37].

LoRaWAN tiene tres clases diferentes de dispositivos finales para abordar las diversas necesidades de las aplicaciones. Ver figura 98.

- Clase A, bidireccional: los dispositivos finales de Clase A pueden programar una transmisión de enlace ascendente según sus propias necesidades, con una pequeña fluctuación (variación aleatoria antes de la transmisión). Esta clase de dispositivos permite comunicaciones bidireccionales, por lo que cada transmisión de enlace ascendente es seguida por dos breves ventanas de recepción de enlace descendente. La transmisión de enlace descendente desde el servidor en cualquier otro momento tiene que esperar hasta que se produzca la siguiente transmisión de enlace ascendente. Los dispositivos de clase A tienen el menor consumo de energía, pero también ofrecen menos flexibilidad en las transmisiones de enlace descendente.
- Clase B, bidireccional con ranuras de recepción programadas: los dispositivos finales de Clase B abren ventanas de recepción adicionales en horarios programados. Por lo tanto, se requiere una baliza sincronizada desde la puerta de enlace, de modo que el servidor de red pueda saber cuándo está escuchando el dispositivo final.
- Clase C, bidireccional con ranuras de recepción máximas: los dispositivos finales de Clase C tienen ventanas de recepción casi continuas. Por tanto, tienen el máximo consumo de energía.

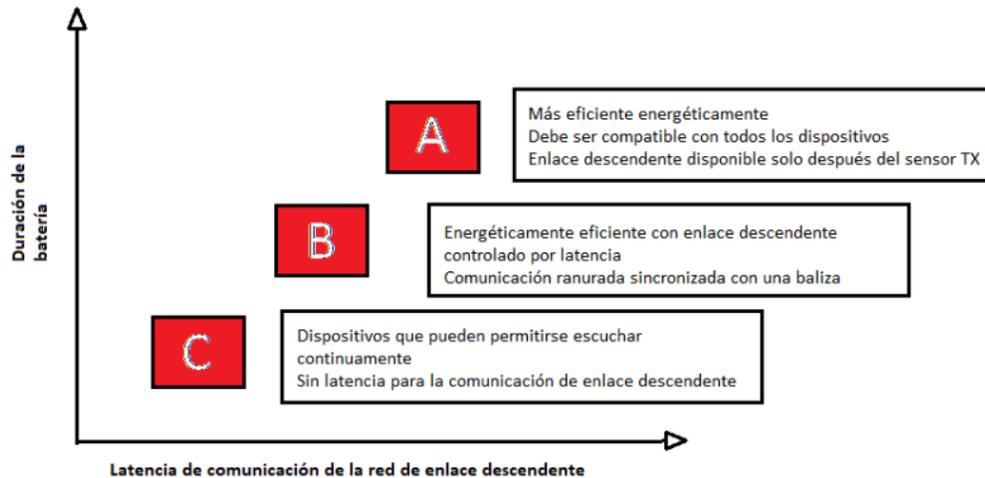


Figura 98. Comparación clases LoRa en función de la latencia y la duración de la batería [37].

Para prevenir un posible ataque a la red es fundamental dotarla de mecanismos de seguridad, y más aún cuando puede contener información sensible que debe ser protegida. Para ello, LoRaWAN aplica varias capas de cifrado utilizando el algoritmo criptográfico AES-128 (Estándar de Encriptación Avanzado).

LoRaWAN es una de las pocas redes IoT que implementa encriptación de extremo a extremo y hace uso de tres tipos de claves para mantener la seguridad en su red:

- Network Session Key: Clave de 128 bits compartida entre el NS y el nodo para asegurar la comunicación segura entre ambos realizando tanto cifrado como autenticación a nivel de red.
- Application Session Key: Clave de 128 bits que garantiza la seguridad entre el nodo hasta la propia aplicación, es decir, de extremo a extremo, a nivel de aplicación. Incluso cuando se usan redes LoRaWAN públicas, esta clave permite la confidencialidad de los datos.
- Application Key: Clave de 128 que se utiliza con los nodos que usan el modo OTAA (Over the Air Activation).

5.2. Análisis técnico

Teniendo en cuenta los elementos que conforman la arquitectura de una red LoRaWAN, la empresa Metrex S.A realiza de forma interna una selección de los que serán los proveedores de los elementos hardware y software que conformarán la red.

Uno de los proveedores es Laager, que será el encargado de fabricar y suministrar los módulos de comunicación LoRaWAN y de prestar el servicio de soporte para el servidor de red y de aplicaciones. Es una empresa brasilera con 10 años de experiencia en el mercado desarrollando soluciones IoT y cuyo objetivo es implementar tecnologías de automatización para optimizar el consumo de recursos naturales y facilitar la vida de las personas a través de sistemas disruptivos y autónomos. Sus productos hardware y software están diseñados para permitir un mayor control sobre determinadas variables de forma remota y así permitir la automatización de redes de agua, gas y energía.

El otro proveedor es Kerlink, una empresa fundada en 2004, con sede en Francia y filiales en los EE. UU., Singapur, India y Japón. Es un proveedor líder de soluciones de Internet de las cosas de rápido crecimiento, que sirve a empresas privadas, ciudades, industrias y operadores de red para diseñar, lanzar y operar de manera rentable tanto en el sector público como en el privado. Kerlink será el proveedor de gateways, puesto que ofrece una cartera completa de gateways para interiores o exteriores ya sea de tipo operador o industrial.

Con el objetivo de evaluar los proveedores seleccionados, se realizó una matriz de evaluación técnica, en la cual se consideraron los criterios más importantes para Metrex, así como el peso porcentual asignado a cada criterio, y se calificó de 1 a 10 cada proveedor, dependiendo de sus características, donde 1 correspondió a la calificación más baja y 10 a la más alta. Ver tabla 23.

PROVEEDORES	CRITERIOS						Total
	0.1	0.14	0.11	0.24	0.21	0.2	
	Experiencia en el mercado	Prestación de servicio postventa	Capacitación	Relación calidad/precio	Soporte técnico	Desarrollo de soluciones personalizadas	
	10	7	8	10	9	10	9.15
	10	6	6	10	9	5	7.79

Tabla 23. Matriz de evaluación técnica de proveedores.

De acuerdo a los resultados obtenidos en la matriz de evaluación, se evidencia que ambos proveedores cuentan con una muy buena favorabilidad, de acuerdo a los criterios evaluados, lo cual reafirma la decisión tomada por Metrex para que estas dos empresas sean los proveedores de los elementos de una red LoRaWAN.

Teniendo los elementos que componen la arquitectura de una red LoRaWAN, como se indica en la figura 94, se especifican a continuación los elementos hardware y software que ofrecen los proveedores mencionados anteriormente. Para su selección, se tuvo en cuenta que cada uno de ellos cumplieran como mínimo con las características técnicas de los equipos ya empleados en el piloto de medición inteligente, y adicional a ello, se tuvieron en cuenta las desventajas y amenazas mencionadas en la matriz DOFA que se encuentra en la tabla 22, para así asegurar que tuviesen características adicionales que permitieran un mejor funcionamiento de la red y prestar un mejor producto y/o servicio a los clientes. A continuación, se describe técnicamente a cada uno de los elementos que conformarán una red LoRaWAN. Ver tabla 24.

Dispositivo	Descripción	Imagen
Módulo de comunicación	<p>Este módulo está diseñado para operar con LoRaWAN y cuenta con una cobertura de largo alcance que puede llegar a los 5km sin barreras, así como una eficiente gestión de energía con una batería de litio de alta capacidad, que proporciona una vida útil entre 8 y 10 años, lo que reduce significativamente los costos de mantenimiento e intercambio.</p> <p>El producto fue desarrollado para la lectura y automatización de sensores de presión, caudal, temperatura, humedad o contadores pre-equipados de agua, gas o energía. Los</p>	

	<p>transceptores tienen funciones integradas tales como: recolección, medición, comunicación bidireccional, control de fecha y hora, consumo de energía ultra bajo, largo alcance de la señal y sistemas antifraude. (Ver anexo 8, “Ficha técnica módulo de comunicación Laager”)</p>													
<p>Gateway</p>	<p>El Wirnet iFemtoCell es un Gateway LoRaWAN diseñado para crear redes públicas o privadas en interiores, con la ventaja de tener un alto rendimiento en entornos exigentes como sótanos, subterráneos, aparcamientos, huecos de ascensores, etc, pues es potente y robusta. Se encarga de recibir los mensajes de los nodos finales y convertirlos en mensajes IP para enviarlos al servidor de red.</p> <p>Cuenta con conectividad backhaul Wi-Fi 2.4GHz, Ethernet (RJ45) y y como accesorios una antena omnidireccional con hasta 15km de alcance en línea de vista y una fuente alimentación 220 Vac / 12 Vcc con conector. Jack. Soporta las frecuencias de trabajo de 915-928 Mhz para Latinoamérica. (Ver anexo 9, “Ficha técnica Gateway Kerlink”).</p>													
<p>Servidor web y servidor de aplicaciones</p>	<p>Este servicio lo prestará Laager, de modo que el servidor web de Laager, permitirá que conecten los sensores y gateways con las aplicaciones superiores garantizando la seguridad y fiabilidad del enrutamiento de los datos en toda la cadena de comunicación.</p> <p>El servidor de aplicaciones maneja la capa de la aplicación LoRaWAN, y es el encargado del descifrado y decodificación de datos de enlace ascendente, la cola de enlace descendente y la codificación y cifrado de datos de enlace descendente. Este servidor permite que las aplicaciones puedan conectarse al él a través de múltiples protocolos. De este modo es posible</p>	 <table border="1"> <caption>Métrica de Consumo Diario dos últimos 7 días</caption> <thead> <tr> <th>Categoría</th> <th>Consumo (m³)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Total</td> <td>1700 m³</td> </tr> <tr> <td>Industrial</td> <td>7500 m³</td> </tr> <tr> <td>Residencial</td> <td>1100 m³</td> </tr> <tr> <td>Público</td> <td>8400 m³</td> </tr> <tr> <td>Comercial</td> <td>100 m³</td> </tr> </tbody> </table>	Categoría	Consumo (m³)	Total	1700 m³	Industrial	7500 m³	Residencial	1100 m³	Público	8400 m³	Comercial	100 m³
Categoría	Consumo (m³)													
Total	1700 m³													
Industrial	7500 m³													
Residencial	1100 m³													
Público	8400 m³													
Comercial	100 m³													

	<p>visualizar la información de la red a través de la plataforma web y la aplicación móvil desarrollada por Laager a través de las cuales es posible llevar a cabo tareas como el monitoreo de los nodos finales de forma centralizada. Permite observar la información relevante sobre los datos obtenidos a través de un completo dashboard con gráficas, mapas y tablas de forma agradable visualmente. Permite exportar los resultados y configurar los parámetros deseados. Es posible realizar el seguimiento a las métricas, consulta de datos de los medidores, generación de datos estadísticos, permite obtener el valor del consumo mensual de forma automática y es posible la creación de usuarios con diferentes permisos de acceso según los roles. Además, ante casos de alarma, se pueden reportar los problemas y crear ordenes de servicio para informar al personal de soporte en caso de ser necesario.</p>	
--	--	---

Tabla 24. Descripción técnica de elementos suministrados por los proveedores.

5.3. Análisis financiero

Con los elementos especificados anteriormente, se presentan a continuación los costos asociados a cada uno de los elementos y los planes ofertados por el proveedor del servidor web y de aplicaciones para así calcular la inversión total que asumiría Metrex en caso de futuras instalaciones de redes LoRaWAN. De acuerdo a ello, se presentan dos opciones de inversión de con los diferentes planes ofertados por el proveedor de los servicios software. Se debe tener en cuenta que los valores referenciados para los equipos hardware fueron tomados sin considerar el valor del IVA y que el valor que se paga al proveedor por los servicios software es anual. Ver tabla 25 y 26.

Opción 1

Equipo	Cantidad	Precio
Medidor de agua	1	\$ 72.000
Módulos de comunicación	1	\$152.000
Gateway + accesorios	1	\$10.418.200
Servidor web y de aplicaciones	1 Gateway con 1 a 250 puntos conectados. 10% de descuento por punto conectado cada 250 puntos adicionales.	\$ 4200 por punto conectado

Tabla 25. Opción de inversión 1. Fuente propia.

Opción 2

Equipo	Cantidad	Precio
Medidor de agua	1	\$ 72.000
Módulos de comunicación	1	\$152.000
Gateway + accesorios	1	\$10.418.200
Servidor web y de aplicaciones	A partir de 7 gateways conectados con mínimo 250 puntos conectados. 10% de descuento por punto conectado cada 250 puntos adicionales.	\$ 2500 por punto conectado

Tabla 26. Opción de inversión 2. Fuente propia.

Se toman los datos de la tabla 25 como punto de partida para crear un análisis financiero tomando como base un caso hipotético de un piloto de medición inteligente que requiera la instalación de una red LoRaWAN con 250 medidores AMR conectados. A continuación, se presentan los costos correspondientes para el número de unidades requeridas y el valor total de la inversión. Ver tabla 27.

Equipo	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Medidor de agua	250	\$ 72.000	\$18.000.000
Módulos de comunicación	250	\$152.000	\$38.000.000
Gateway + accesorios	1	\$10.418.200	\$10.418.200
Servidor web y de aplicaciones	1 Gateway con 250 puntos conectados.	\$ 4.200 por punto conectado	\$1.050.000
Total			\$ 67.468.200

Tabla 27. Costos de inversión para caso piloto. Fuente propia.

De acuerdo a lo planteado en la tabla 27, la inversión total que debe realizar Metrex para un proyecto piloto de esta dimensión, es elevado. Sin embargo, se debe tener en cuenta que, en un proyecto piloto, es importante llegar a acuerdos con el cliente sobre cuáles serán los gastos que asumirá cada uno, teniendo en cuenta que el objetivo para Metrex con un proyecto piloto es probar

el funcionamiento de la tecnología y a la vez permitir que el cliente pueda experimentar por un lapso de tiempo acordado, las ventajas en diferentes aspectos que trae consigo la instalación de este tipo de redes. De este modo este cliente puede convertirse en uno potencial para la adquisición total de equipos software y hardware que conforman la red y considerar la posibilidad de ampliación a más unidades. Además, si tras una evaluación del piloto, se garantiza que este fue exitoso, esta experiencia es una vitrina de venta para llegar a otros clientes importantes como las diferentes empresas prestadoras de servicios públicos dentro y fuera del país.

Teniendo en cuenta lo anterior, lo ideal es que lo que ahora son proyectos piloto para Metrex, se conviertan a futuro en oportunidades de negocio importantes, que le permitan convertirse en un proveedor de soluciones integrales y parciales para la instalación de redes de medición inteligente LoRaWAN. En base a ello, se realiza una proyección de los costos de inversión al ofertar una solución integral para la instalación de una red LoRaWAN. Esto de acuerdo a un aumento de 250 usuarios hasta llegar a un tope de mil usuarios conectados, ya que este es la cantidad máxima de unidades conectadas que soporta el gateway suministrado por el proveedor Kerlink. El cálculo de los costos se realiza teniendo en cuenta el plan ofertado por el proveedor de los servicios software, especificado en la tabla 25, donde menciona un descuento del 10% cada 250 unidades conectadas adicionales. Ver Figura 99.

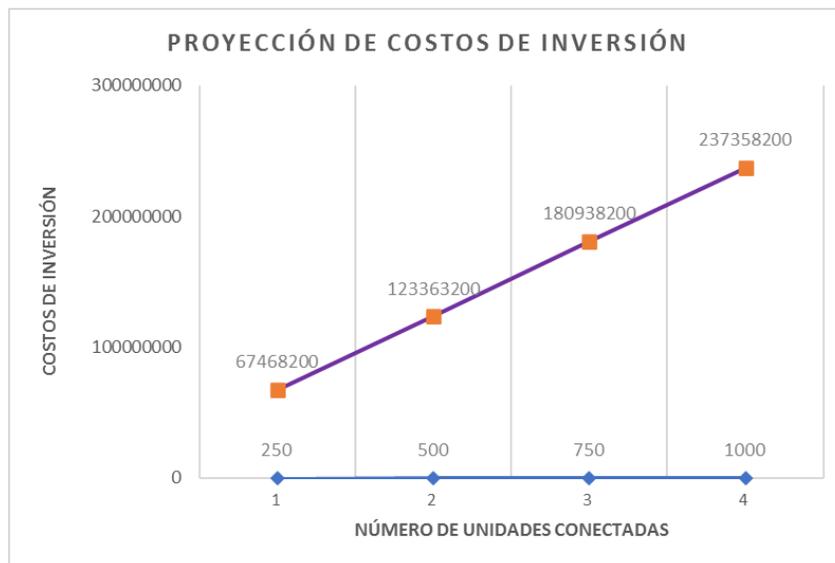


Figura 99. Proyección de costos de inversión. Fuente propia.

Es importante tener en cuenta que los costos proyectados de acuerdo al aumento en el número de unidades, a pesar de ser altos, cuentan con descuentos que los respaldan e impiden que dichos costos se incrementen aún más. Es el caso del proveedor de los servicios software que brinda planes de conectividad en los cuales disminuye el costo a mayor número de unidades conectadas. Además, el hecho de que un solo gateway del proveedor Kerlink permita la conexión de hasta mil nodos, hace que no sea necesario adquirir nuevos gateways en caso de que este número no se supere. Y finalmente se podría considerar la opción de que el proveedor de los módulos de

comunicación también oferte algún descuento en caso de que las solicitudes de compra de estos dispositivos aumenten.

Con los datos presentados en la gráfica de la figura 96, Metrex puede tener en cuenta los costos de inversión que tendría tras un crecimiento en el número de unidades conectadas a lo largo del tiempo, que es lo que se esperaría lograr al convertirse en proveedor de este tipo de soluciones de medición inteligente para futuros clientes. En base a estos datos, Metrex puede calcular más fácilmente los costos de ventas de los productos y servicios que ofertará para la implementación de sistemas de medición inteligente, y de esta forma poder definir un precio de venta adecuado. El cual es clave para competir y conocer el margen de ganancia que se puede obtener y de esta forma solventar los costos de inversión.

Con la información presentada, Metrex puede analizar la viabilidad técnica y económica que tendría al tercerizar el suministro de los productos y servicios para convertirse en proveedor de elementos hardware y software necesarios para la instalación de redes de medición inteligente LoRaWAN. Esto de cara a entrar a competir a un mercado de soluciones IoT en el sector de los servicios públicos domiciliarios en el que se evidencia una evolución gradual hacia la medición inteligente.

TRABAJOS FUTUROS

- Implementación de sistemas AMR en el servicio público de agua potable en áreas urbanas o rurales.
- Realizar una actualización del sistema AMR operado bajo tecnología LoRa, a uno operado bajo LoRaWAN que permita un mayor despliegue y cobertura.
- Implementar proyectos piloto de instalación de sistemas AMR también en los servicios de gas y energía.
- Implementar proyectos piloto que permitan también la instalación de sistemas AMI para evaluar su desempeño.

CONCLUSIONES

1. LoRa es una tecnología de la capa física que permite comunicación inalámbrica de largo alcance, baja velocidad y bajo consumo de energía y una red LPWAN que opera empleando esta tecnología, debe tener en cuenta factores como la frecuencia habilitada de trabajo según la región en la que se encuentre y además al ser una red configurable por cada propietario, esta cuenta con tres parámetros configurables como lo son el factor de ensanchamiento (SF), la tasa de código (CR) y el ancho de banda (BW), los cuales pueden variar de acuerdo a las necesidades de operación de la red.
2. Es importante establecer las fases de un proyecto de ingeniería y ejecutarlo de acuerdo a ellas para poder determinar el éxito del mismo y evaluar aspectos importantes de forma ordenada y precisa. En este caso fue posible evaluar la calidad de transmisión de los datos y la conectividad de los mismos tanto en fase de pruebas como en el monitoreo final tras la instalación del proyecto.
3. En este tipo de sistemas de medición inteligente, donde se busca reemplazar la recolección de datos manual por automática, es importante establecer criterios de aceptación que permitan determinar si la calidad de lectura de los datos es aceptable y la conectividad de los nodos finales efectivamente permite garantizar un adecuado funcionamiento de la red.
4. Es claro que la medición inteligente implementada en los servicios públicos domiciliarios ya es una realidad, por ende, este tipo de proyectos piloto abre caminos para posteriores implementaciones, ya que es posible evidenciar las ventajas, desventajas y oportunidades de mejora.
5. Una vez comprobado el adecuado funcionamiento de una red que opera bajo la tecnología LoRa, es posible hacer una actualización a una red LoRaWAN al ser este último el protocolo de acceso al medio de dicha tecnología. Esto con el fin de agregar beneficios como una mayor cobertura, escalabilidad en el tiempo, posibilidad de integración con otros sistemas que operen bajo la misma tecnología, mayor seguridad de los datos gracias a su encriptación AES 128, posibilidad de implementar redes públicas o privadas, administración de dispositivos y soporte para 3 clases de nodos.
6. La inversión realizada por Metrex S.A en proyectos piloto, tiene una proyección clara para la obtención de beneficios a futuro, pues esto le permitirá estar un paso adelante y ampliar su portafolio de productos y servicios al ofrecer una solución completa e integral para la implementación de sistemas de medición inteligente y a la vez brindar la posibilidad al cliente de adquirir los productos o servicios por separado de acuerdo a sus necesidades o instalaciones previas. Esto de cara a una regulación y reglamentación que llegará en futuro

no lejano, para que las empresas prestadoras de los servicios públicos de agua y gas realicen el cambio de los medidores convencionales a medidores pre equipados que estén en la capacidad de funcionar en sistemas AMR o AMI, de la misma forma que ya se reglamentó en el servicio público de energía.

7. La implementación de este tipo de sistemas AMR generan un beneficio directo sobre la disminución en las pérdidas no técnicas que enfrentan las empresas prestadoras de servicios públicos ya que de esta forma disminuye el porcentaje de error asociado a los errores humanos cometidos en el proceso de recolección de datos manual y a los consumos promedio que se le asignan a los usuarios en caso de que el personal no tenga acceso al medido. Esto representa un ahorro para las empresas prestadoras y unos mejores indicadores de eficiencia de las mismas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico-CRA, “Resolución CRA 287 2004 Metodología Tarifaria.pdf.” .
- [2] Portafolio, “Pérdidas por fallas en contadores de agua en Colombia,” *Portafolio*, 2018.
- [3] Superintendencia de Industria y Comercio, “Análisis De Impacto Normativo. Implementación de un reglamento técnico metrológico aplicable a medidores domiciliarios de agua potable fría y caliente,” 2017.
- [4] P. Sérgio, R. Garcia, and J. H. Kleinschmidt, “Tecnologías Emergentes de Conectividad en IoT: Estudio de Redes LPWAN,” 2017. doi: 10.14209/sbrt.2017.141.
- [5] Pedro Bertoleti, R. Paiotti, and R. Leca, *Proyectos con ESP32 y LoRa*, InstitutoN. 2019, p. 200.
- [6] Edwin javier hernández and C. A. C. Briceño, “Diseño y construcción de una planta modelo de tratamiento para la potabilización de agua, se dispondrá en el laboratorio de aguas de la universidad católica de Colombia,” 2017.
- [7] N. Cristina and C. Camacho, “Tratamiento de agua para consumo humano,” 2011.
- [8] Ley 142, “Ley 142 de 1994,” *D. Of.*, vol. 1994, no. 41.433, p. 597, 1994, [Online]. Available: <http://www.acueducto.com.co>.
- [9] “ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE Fuentes de Abastecimiento de Agua.”
- [10] C. Ramirez, “Guía Técnica Acueducto y Alcantarillado,” *Univ. Catol. Colomb.*, p. 112, 2018.
- [11] M. De and L. P. Social, *DECRETO NÚMERO 1575 DE 2007*. 2007.
- [12] R. Lopéz, *Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados*, vol. 1. 1995.
- [13] Comisión Nacional del Agua, *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento Diseño de Redes de Distribución de Agua Potable*. 2007.
- [14] ICONTEC, “Medición Del Flujo De Agua En Conductos Cerrados. Medidores Para Agua Potable Fría. Parte 1: Especificaciones,” p. 17, 1995.
- [15] ICONTEC, *NTC-ISO 4064-1_2016*. Colombia, 2016, p. 51.
- [16] Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico-CRA, “Pérdidas de agua en sistemas de acueducto, uso eficiente y ahorro del agua.” <https://www.smart-energy.com/wp-content/uploads/Cristian.pdf> (accessed Dec. 22, 2020).
- [17] C. Salcedo, “Localización y ajustes óptimos de válvulas reductoras de presión (VRP) en

- RDAP para minimizar el índice de agua no contabilizada (IANC),” 2014.
- [18] L. Acevedo, V. J. Enrique, P. Castellanos, A. G. Echeverry, S. Amaris, and F. Fecha, “SISTEMA INTEGRADO DE GESTION,” 2017.
- [19] M. P. D. La Torre, “Gestión de Agua No Contabilizada en Empresas de Servicios Públicos de Agua Potable .,” 2018.
- [20] C. Andr, “AGUA POTABLE DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ Laura Viviana Parra Pérez,” 2019.
- [21] L. Acevedo, V. J. Enrique, P. Castellanos, A. G. Echeverry, S. Amaris, and F. Fecha, “PLAN DE REDUCCIÓN PÉRDIDAS 2017 - 2025,” 2017, [Online]. Available: <http://www.aguasdebarrancabermeja.gov.co/images/planes/4.Plan de Reducción Perdidas.pdf>.
- [22] C. A. Castillo, “Documento de trabajo proyecto general Marco Tarifario para los servicios públicos de Acueducto y Alcantarillado Nivel de pérdidas aceptable REGG-FOR07 2 CONTENIDO,” 2014.
- [23] S. D. S. PÚBLICOS and DOMICILIARIOS, *Estudio sectorial de los servicios públicos domiciliarios de acueducto y alcantarillado 2018*. 2019.
- [24] S. D. S. PÚBLICOS and DOMICILIARIOS, “Estudio sectorial de los servicios públicos domiciliarios de Acueducto y Alcantarillado 2019,” 2020, [Online]. Available: https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/Publicaciones/Publicaciones/2020/Dic/estudio_sectorial_de_los_servicios_publicos_domiciliarios_de_acueducto_y_alcantarillado_28_dic_rev_1.pdf.
- [25] CRA, “Res. 688: Por la cual se establece la metodología tarifaria para las personas prestadoras de los servicios públicos domiciliarios de acueducto y alcantarillado con más de 5.000 suscriptores en el área urbana,” vol. 2014, p. 102, 2014, [Online]. Available: https://cra.gov.co/documents/Resolucion_CRA_688_de_2014_Firmada.pdf.
- [26] K. P. Díaz Porras, “El Oro Azul Y Su Gestión De Pérdidas En Colombia,” *Módulo Arquitect. Cuc*, vol. 23, no. 1, pp. 9–22, 2019, doi: 10.17981/mod.arq.cuc.23.1.2019.01.
- [27] Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico-CRA, “Anexo 1 de la resolución 688 de 2014- Plan de reducción y nivel económico de pérdidas.” .
- [28] A. Abdollahi, M. Dehghani, and N. Zamanzadeh, “SMS-based reconfigurable automatic meter reading system,” *Proc. IEEE Int. Conf. Control Appl.*, no. October, pp. 1103–1107, 2007, doi: 10.1109/CCA.2007.4389381.
- [29] J. Molina, V. Medina, J. Barros, and J. Luque, “Red radio para la telegestión de servicios públicos.” Accessed: Jan. 15, 2021. [Online]. Available:

<https://www.researchgate.net/publication/229016450>.

- [30] C. Liting, T. Jingwen, and L. Yanxia, "Remote real time automatic meter reading system based on wireless sensor networks," *3rd Int. Conf. Innov. Comput. Inf. Control. ICICIC'08*, pp. 0–3, 2008, doi: 10.1109/ICICIC.2008.443.
- [31] K. Mekki, E. Bajic, F. Chaxel, and F. Meyer, "A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment," *ICT Express*, vol. 5, no. 1, pp. 1–7, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.ict.2017.12.005.
- [32] A. Augustin, J. Yi, T. Clausen, and W. Townsley, "A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things," *Sensors*, vol. 16, no. 9, p. 1466, Sep. 2016, doi: 10.3390/s16091466.
- [33] M. Angel, M. Latorre, L. Marcela, B. Márquez, and J. Hernández-gutiérrez, "Redes LoRaWAN. Revisión de componentes funcionales en aplicaciones IoT.," *Univ. Dist. Fr. José Caldas*, p. 32.
- [34] I. O. Monfort, "Estudio de la arquitectura y el nivel de desarrollo de la red LoRaWAN y de los dispositivos LoRa."
- [35] U. Noreen, A. Bounceur, and L. Clavier, "A Study of LoRa Low Power and Wide Area Network Technology."
- [36] D. Pérez and R. Risco, "Implementación de Lora y Lorawan como escenario futuro de la industrias 4.0 en el sector agroindustrial peruano," *Rev. Campus*, vol. 25, no. 29, Apr. 2020, doi: 10.24265/campus.2020.v25n29.10.
- [37] M. Marín, "Sistema de monitorización para elementos móviles iot mediante redes LPWAN," pp. 1–86, 2020, [Online]. Available: <https://repositorio.upct.es/handle/10317/8861>.

ANEXOS

- 1.** Manual de usuario PDA
- 2.** Manual- Alistamiento de medidores de agua AMR
- 3.** Manual de usuario plataforma web
- 4.** Propuesta técnico económica- Piloto medición inteligente
- 5.** Informe final pre instalación - Piloto Cali
- 6.** Evidencias fotográficas para pruebas
- 7.** Formato de encuesta para retroalimentación (<https://forms.gle/LPazhRkWTe2FWNK8A>)
- 8.** Ficha técnica - Módulo LoRaWAN Laager.
- 9.** Ficha técnica Gateway Kerlink