

**PILOTO DE MEDICIÓN INTELIGENTE CON TECNOLOGÍA SIGFOX EN EL
SERVICIO DOMICILIARIO DE GAS NATURAL POR METREX S.A.**



**Universidad
del Cauca®**

Proyecto de Trabajo de Grado en
Modalidad de Práctica Profesional

Claudia Daniela Muñoz Rengifo

Director: Msc. Juan Fernando Flórez Marulanda

Asesor: MSc. Jaime Ovidio Ordóñez

Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Popayán, Cauca
2023

**PILOTO DE MEDICIÓN INTELIGENTE CON TECNOLOGÍA SIGFOX EN EL
SERVICIO DOMICILIARIO DE GAS NATURAL POR METREX S.A.**

Claudia Daniela Muñoz Rengifo

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

Ingeniera en Electrónica y Telecomunicaciones

Director: MSc. Juan Fernando Flórez Marulanda

Asesor: Msc. Jaime Ovidio Ordóñez

Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones

Popayán, Cauca

2023

Agradecimientos

A Dios, quien ha sido mi guía en cada paso de este camino que me trajo hasta aquí.

A mi madre, mi mayor ejemplo y fuente de fortaleza que me ha impulsado a alcanzar todas mis metas.

A mis hermanas por darle alas a todos mis sueños.

A mis amigos quienes con su presencia hicieron del proceso la mejor de las experiencias.

Mi más profundo agradecimiento a mi alma máter, la Universidad del Cauca por brindarme la oportunidad de crecer académicamente. A mi director y asesor de tesis, Mg. Juan Fernando Florez y Mg. Jaime Ordóñez, les agradezco sinceramente su orientación y valiosos aportes durante todo el proceso.

Tabla de Contenido

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Planteamiento del problema	1
1.2. Escenario de motivación	3
1.3. Objetivos	4
1.3.1. Objetivo general	4
1.3.2. Objetivos específicos	4
1.4. Partes de la memoria	4
2. ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO	6
2.1. Conceptos y definiciones fundamentales	6
2.1.1. Generación y distribución de gas natural	6
2.1.2. Pérdidas en el servicio domiciliario de gas natural	8
2.1.2.1. Pérdidas Técnicas	8
2.1.2.2. Pérdidas No Técnicas	9
2.1.3. Índices de evaluación de pérdidas	9
2.1.3.1. Índice de Gas Natural NO Contabilizado (IGNC)	9
2.1.4. Sistema AMR para el servicio domiciliario de gas natural	12
2.1.4.1. Sistema AMR	12
2.1.4.2. Medidor comercial de gas natural	13
2.1.4.3. Redes de Área Amplia de Baja Potencia (LPWAN)	15
2.1.4.4. Sigfox	15
2.2. Trabajos relacionados	17
2.2.1. Gestión del consumo de gas en Japón	17
2.2.2. Solución de medición remota para el servicio de agua en Brasil	18
2.2.3. Telemetría para el servicio domiciliario de agua en el municipio de Cota, Cundinamarca	18
2.3. Conclusiones acerca del estado actual del conocimiento	19
3. PILOTO DE MEDICIÓN INTELIGENTE PARA EL SERVICIO DOMICILIARIO DE GAS NATURAL	20
3.1. Ingeniería de diseño	20
3.1.1. Ingeniería de concepto	20
3.1.1.1. Contexto	21
3.1.1.2. Análisis de requerimientos	21
3.1.1.3. Requisitos necesarios para el sistema AMR de medición inteligente	22
3.1.2. Ingeniería básica	23
3.1.2.1. Arquitectura del sistema AMR de medición inteligente	23
3.1.2.2. Características técnicas y funcionales de los equipos que conforman el sistema AMR de medición inteligente	24

3.1.2.3. Diseño de plan de pruebas de los equipos para su correcto funcionamiento	32
3.1.2.4. Preparación de equipos para la ejecución del plan de pruebas	35
3.1.2.5. Resultados de la ejecución del plan de pruebas	39
3.1.3. Ingeniería de detalle	52
3.1.3.1. Acuerdos y condiciones de entrega	52
3.1.3.2. Listado de equipos para el sistema AMR de medición inteligente	54
3.1.3.3. Cronograma de actividades	55
3.2. Ingeniería de implementación	56
3.2.1. Procura	56
3.2.2. Construcción	59
3.2.3. Resultados	63
3.2.3.1. Consumo de gas	64
3.2.3.2. Alarmas	65
4. ANÁLISIS TÉCNICO Y FINANCIERO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS AMR EN EL SERVICIO PÚBLICO DE GAS NATURAL	68
4.1. Análisis técnico	68
4.1.1. Análisis de cobertura	68
4.1.2. Análisis de capacidad	70
4.1.3. Análisis de costo	71
4.1.4. Análisis de consumo de energía	72
4.2. Análisis financiero	73
4.3. Análisis DOFA	78
5. PROPUESTA MEJORADA HACIA LA MASIFICACIÓN DEL SISTEMA AMR DE MEDICIÓN INTELIGENTE PARA EL SERVICIO DOMICILIARIO DE GAS NATURAL	82
5.1. Arquitectura del sistema AMR de medición inteligente con Sigfox y LoRaWAN	82
5.2. Características técnicas y funcionales de los componentes del sistema AMR de medición inteligente con Sigfox y LoRaWAN	83
6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	87
6.1. Conclusiones	87
6.2. Trabajos futuros	89
BIBLIOGRAFÍA	90
ANEXOS	95

Lista de Figuras

Figura 1. Cadena del Gas Natural.....	7
Figura 2. Sistema AMR.....	13
Figura 4. Arquitectura de alto nivel de la red Sigfox.....	17
Figura 5. Fases que conforman la ejecución del piloto.....	20
Figura 6. Arquitectura del sistema AMR de medición inteligente.....	24
Figura 7. Medidores comerciales de gas tipo digital marca Metrex.....	25
Figura 8. Módulo de comunicación DGMS con cable conectado al habitáculo de batería del medidor digital.....	28
Figura 9. Interfaz de inicio de sesión para ingresar a plataforma de gestión.....	32
Figura 10. Conexión pantalla de medidor de gas G4 tipo digital y módulo de comunicación.....	35
Figura 11. Interfaz de inicio de sesión para ingresar a Backend de Sigfox.....	36
Figura 12. Interfaz de inicio de sesión para ingresar a Backend de Sigfox.....	37
Figura 13. Configuración de callback en Backend de Sigfox.....	38
Figura 14. Medidor digital de gas modelo G4 durante la ejecución de la prueba de laboratorio sin caja metálica.....	40
Figura 15. Mensajes enviados al Backend de Sigfox durante la ejecución de la prueba de laboratorio sin caja metálica.....	41
Figura 16. Medidor digital de gas modelo G4 durante la ejecución de la prueba de laboratorio con caja metálica.....	42
Figura 17. Mensajes enviados al Backend de Sigfox durante la ejecución de la prueba de laboratorio con caja metálica.....	43
Figura 18. Instalaciones de medidores de gas utilizadas para la ejecución de las pruebas en campo.....	44
Figura 19. Ubicaciones utilizadas para la ejecución de las pruebas en campo.....	45
Figura 20. Medidor digital de gas modelo G4 durante la ejecución de la prueba de duración real de batería del módulo de comunicación.....	47
Figura 21. Mensajes enviados a la plataforma de gestión y control durante la ejecución de la prueba correspondencia de lectura de consumo.....	49
Figura 22. Mensajes enviados a la plataforma durante la prueba de correspondencia de alarmas anti fraude con simultaneidad.....	50
Figura 23. Mensajes enviados a la plataforma durante la prueba de correspondencia de alarmas anti fraude sin simultaneidad.....	50
Figura 24. Cronograma de actividades para la implementación del piloto de medición inteligente.....	55
Figura 25. Registro de los medidores equipados con módulo de comunicación en la plataforma de gestión y control.....	58
Figura 26. Instalaciones de medidores equipados con módulo de comunicación Sigfox. (A) Medidor modelo G4. (B) Medidor modelo G6.....	63
Figura 27. Consumo promedio de gas natural antes y después de la instalación del	

piloto.....	65
Figura 28. Total de alarmas por desconexión del medidor durante el piloto.....	66
Figura 29. Total de alarmas por apertura de registro durante el piloto.....	67
Figura 30.Resultados de cobertura del sistema AMR durante el piloto.....	69
Figura 31.Resultados de capacidad del sistema AMR durante el piloto.....	71
Figura 32. Proyección de costos de inversión para implementar un sistema AMR bajo distintos niveles de demanda.....	78
Figura 34. Módulo de comunicación basado en tecnología LoRaWAN de Laager.	84
Figura 35. Gateway Wirnet iFemtoCell de Kerlink.....	84
Figura 36. Panel de control principal en la plataforma web de Laager.....	85
Figura 37. Pantalla de inicio de sesión en la aplicación móvil de Laager.....	86

Lista de Tablas

Tabla 1. Cantidad de fraudes entre los años 2015 y 2018 cometidos por clientes residenciales y comerciales de la Empresa A.....	2
Tabla 2. Distribución de clientes comerciales de la Empresa A.....	2
Tabla 3. Consumo de gas natural en Colombia - Mpcd.....	3
Tabla 4. Calificación de requisitos necesarios para sistema AMR de medición inteligente.....	22
Tabla 5. Especificaciones físicas y técnicas de los modelos de medidores comerciales de gas tipo digital marca Metrex.....	26
Tabla 6. Alarmas antifraude de los medidores comerciales de gas tipo digital marca Metrex.....	26
Tabla 7. Especificaciones técnicas de módulos de comunicación DGMS para medidores digitales.....	28
Tabla 8. Estructura de la trama enviada por los módulos de comunicación DGMS...	29
Tabla 9. Descomposición del byte de alarmas del medidor en bits.....	30
Tabla 10. Descomposición del byte de alarmas del módulo de comunicación en bits.....	30
Tabla 11. Características del plan de comunicación Sigfox adquirido para la implementación del sistema AMR de medición inteligente.....	31
Tabla 12. Plan de pruebas.....	33
Tabla 13. Interpretación de la trama recibida por el Backend de Sigfox.....	41
Tabla 14. Interpretación de la trama recibida por el Backend de Sigfox.....	43
Tabla 15. Resultados de las pruebas de conectividad en campo.....	46
Tabla 16. Opciones de mejora a partir del resultado de las pruebas.....	51
Tabla 17. Equipos y costos finales del piloto aprobados por las partes.....	54
Tabla 18. Relación entre la dirección y el número serial de cada medidor.....	62
Tabla 19. Equipos y costos de los componentes del sistema AMR por niveles de demanda.....	74
Tabla 20. Inversión total por parte del cliente para un sistema de 500 medidores digitales con distintas especificaciones.....	75
Tabla 21. Matriz DOFA.....	79

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del problema

En Colombia, a pesar de que el hurto de servicios públicos es un delito tipificado en el Artículo 256 del Código Penal que conlleva multas y prisión de 16 a 72 meses [1], es común para las empresas prestadoras de servicios públicos ser víctimas de conductas delictivas como el hurto a elementos de la infraestructura de sus redes, entre ellos: tubos de cobre, cables, tapas, canecas y contenedores; sin mencionar los casos de acceso ilícito al servicio o las diferentes tipologías de fraude como anomalías en las conexiones, acometidas, y medidores [2]. Lo anterior, se ve reflejado en las importantes pérdidas económicas que deben enfrentar dichas empresas.

Para el año 2018 según la Asociación Colombiana de Servicios Públicos y Comunicaciones, las compañías afiliadas a la agremiación reportaron pérdidas estimadas en \$62,480 millones COP como producto del hurto a la infraestructura de las redes y por defraudación de fluidos alrededor de \$380,000 millones COP [3], de los cuales solamente en Bogotá las pérdidas para Gas Natural Vanti superan los \$42,000 millones COP [4].

En lo que respecta al servicio de gas natural domiciliario, según Orlando Cabrales Segovia, presidente de la Asociación Colombiana de Gas Natural, los clientes o usuarios del servicio público con tendencia a cometer defraudación de fluidos están relacionados con negocios como tintorerías, hoteles, pizzerías, asaderos y fábricas de tamales, lechona, látex, detergentes y vidrio [5]. Lo cual es confirmado por una de las principales distribuidoras de gas natural en el país (Empresa A) en uno de los reportes acerca de gestión de fraudes y anomalías compartido a la empresa Metrex S.A., a través de la siguiente información:

La problemática relacionada a los fraudes de diferentes tipologías en los medidores de gas natural instalados a clientes del mercado comercial de las categorías 1, 2 y 3, así como a clientes residenciales con actividades comerciales en sus domicilios, implica un considerable aumento en el Índice de Gas Natural NO Contabilizado (IGNC), el cual se traduce en importantes pérdidas económicas para la empresa. El tipo de comportamientos fraudulentos más comunes son las alteraciones a la acometida, al regulador o al medidor, creando anomalías como: medidor invertido, ductos perforados, diafragmas perforados, perforación del visor, doble empaquetadura, manipulación interna, adición de sustancias, manipulación de sellos y manipulación de precintos.

La preocupante tendencia al alza de los fraudes de diferente tipología entre los años 2015 y 2018, con una cifra que supera los 4.200 entre un total de un poco

más de 75.000 clientes comerciales con los que cuenta la Empresa A, ver Tabla 1 y 2; incentivó la implementación de una primera solución basada en un sistema de seguridad compuesto por diferentes mecanismos que evitan y/o evidencian la manipulación de los medidores. En un piloto de seguridad digital para la Empresa A, se instalaron once (11) equipos de prueba, a clientes del mercado comercial y residencial con tendencia al fraude, en los mismos se incorporan tornillos de seguridad para el odómetro y visor digital capaz de mostrar diferentes tipos de alarmas. Adicionalmente, estos medidores son capaces de totalizar el consumo independiente de la posición en que se monten y algunas alarmas permanecen en la pantalla durante 36 días antes de borrarse para garantizar que las personas que toman las lecturas puedan verlas durante sus recorridos. La implementación de dicho piloto permitió normalizar el consumo de los 11 usuarios e incrementarlo en promedio en un 200%.

Tabla 1. Cantidad de fraudes entre los años 2015 y 2018 cometidos por clientes residenciales y comerciales de la Empresa A.

Año	Residencial 4 m3/h	Comercial Categoría 1 6 m3/h	Comercial Categoría 2 20 m3/h	Comercial Categoría 3 30 m3/h	Otros	Total	%
2015	253	70	30	8	6	367	8,6%
2016	280	78	81	11	6	456	10,7%
2017	560	233	297	23	17	1.130	26,6%
2018	847	659	662	66	58	2.292	54,0%
Total	1.940	1.040	1.070	108	87	4.245	100,0%
%	45,7%	24,5%	25,2%	2,5%	2,0%	100,0%	
Promedio al Año	485	260	268	27	22	1.061	

Tabla 2. Distribución de clientes comerciales de la Empresa A.

Cientes	Categoría 1	Categoría 2	Categoría 3	Total	Porcentaje
Total	45.138	23.401	6.639	75.178	100,0%
Porcentaje	60,0%	31,1%	8,8%	100,0%	

Sin embargo, la solución propuesta en el piloto de seguridad digital no fue suficiente, ya que la demora en la detección de los diferentes tipos de fraudes a causa de las lecturas manuales con una frecuencia de 30 días imposibilita proceder ante estos hechos delictivos de manera rápida y eficiente.

Por lo tanto, Metrex S.A., propone a la Empresa A la implementación de una solución basada en el concepto de Internet de las Cosas (IoT, *Internet of Things*) soportado bajo el uso de las Redes de Área Amplia y Baja Potencia (LPWAN, *Low Power Wide Area Network*) que permita registrar, recolectar y transferir remotamente la información asociada al consumo y alarmas antifraude para su posterior análisis, gestión y toma de decisiones.

1.2. Escenario de motivación

El gas natural es una fuente de energía de valor estratégico para más de 36 millones de colombianos, la industria y el sector eléctrico del país, dado que aporta a la seguridad y confiabilidad del sistema energético nacional con una contribución del 21% en la demanda de energía primaria de Colombia. Además, tiene un rol fundamental en la senda de la descarbonización, puesto que la generación de energía eléctrica con gas natural produce 50% menos Gases de Efecto Invernadero (GEI) que el carbón.

En cuanto a la evolución del consumo de gas natural por sectores en Colombia del último quinquenio, el sector industrial comercial se mantuvo como el de mayor participación al alcanzar un pico máximo de 304 millones de pies cúbicos por día (mpcd) en el año 2019 y 287 mpcd después de superar un 2020, en el que indudablemente el consumo de gas natural del mercado se vio afectado por la pandemia del COVID-19 [6], ver Tabla 3.

Tabla 3. Consumo de gas natural en Colombia - Mpcd. Tomado de [6].

Sector	2017	2018	2019	2020	2021
Industrial y comercial	267	290	304	258	287
Termoeléctrico	173	208	202	241	198
Petróleo y otros	210	219	210	182	175
Residencial	136	141	144	158	157
GNV	59	54	53	40	59
Petroquímico	18	18	18	16	16
Total	863	930	930	895	891

Adicionalmente, la masificación del servicio de gas natural en zonas urbanas y rurales, representa un mecanismo para reducir la pobreza y mejorar la calidad de vida de los usuarios, gracias a sus bajas tarifas y a su alta disponibilidad y aplicabilidad como servicio público.

Por lo anterior, es indispensable asegurar la presencia del gas natural en la canasta energética de Colombia y consolidar una estrategia que involucre la ejecución de una infraestructura pertinente para este fin.

En este orden de ideas, en el presente trabajo de grado, se estudia la aplicación del concepto de Internet de las Cosas soportado bajo el uso de las Redes de Área Amplia y Baja Potencia que permita registrar, recolectar y transferir remotamente la información asociada al consumo y alarmas antifraude de los medidores del servicio de gas natural para su posterior análisis, gestión y toma de decisiones.

1.3. Objetivos

A continuación, se expone el objetivo general del presente proyecto, así como los objetivos específicos mediante los que se aborda la solución de la problemática formulada en la sección 1.1.

1.3.1. Objetivo general

Evaluar un piloto de medición inteligente dirigido a clientes del mercado comercial del servicio de gas domiciliario, a través del uso de un sistema AMR que opera por medio de una red LPWAN con tecnología Sigfox.

1.3.2. Objetivos específicos

- Desarrollar un sistema AMR de medición inteligente para la Empresa Metrex S.A., que cumpla con las especificaciones de: comunicación automática, bajo consumo (low power) y uso de infraestructura de red Sigfox disponible.
- Determinar el impacto técnico y financiero de la implementación de sistemas AMR en el servicio público de gas natural.
- Proponer mejoras del sistema AMR con base en los resultados obtenidos en el piloto para propender por su futura masificación.

1.4. Partes de la memoria

La presente monografía se encuentra dividida en los siguientes seis capítulos que condensan el proyecto ejecutado:

- **Capítulo 1:** presenta la introducción, el planteamiento del problema y la estructura general del trabajo realizado.
- **Capítulo 2:** denominado “Estado actual del conocimiento”, hace referencia a las tecnologías y conceptos en los que se fundamenta el presente

proyecto, además de las experiencias previas llevadas a cabo en otras implementaciones de sistemas AMR de medición inteligente con tecnología Sigfox en servicios públicos que se relacionan con la expuesta en el presente trabajo.

- **Capítulo 3:** denominado “Piloto de medición inteligente para el servicio domiciliario de gas natural”, presenta el proceso de implementación de las fases de ingeniería para la ejecución del piloto. El proceso descrito en el capítulo comprende el diseño y la implementación del sistema.
- **Capítulo 4:** denominado “Análisis técnico y financiero de la implementación de sistemas AMR en el servicio público de gas natural”, presenta un análisis técnico y estudio financiero que apoye la evaluación de factibilidad para la implementación de sistemas AMR en el servicio público de gas natural.
- **Capítulo 5:** denominado “Propuesta mejorada hacia la masificación del Sistema AMR de medición inteligente para el servicio domiciliario de gas natural”, expone aspectos principales a tener en cuenta para la masificación del sistema, con base en los resultados obtenidos en la implementación del piloto.
- **Capítulo 6:** presenta la síntesis de los resultados del presente proyecto, así como las principales contribuciones y elementos para el desarrollo de trabajos futuros.

2. ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO

En este capítulo, se presenta la generación de la base conceptual. Con esto en mente, se recopilan los conceptos y tecnologías en que se fundamenta el presente proyecto. De igual manera, se describen proyectos recientes y/o representativos que se han desarrollado en torno a la implementación de sistemas AMR basados en redes LPWAN con tecnología Sigfox en servicios públicos domiciliarios.

El capítulo se encuentra dividido en los siguientes apartados:

- Conceptos y definiciones fundamentales: se definen las bases teóricas del proyecto llevado a cabo, exponiendo en detalle los conceptos que toman relevancia en los resultados obtenidos.
- Trabajos relacionados: presenta la exploración del estado actual del conocimiento llevada a cabo con el objetivo de determinar las investigaciones relacionadas con la presente, además de las futuras direcciones en el campo de los servicios públicos domiciliarios y el Internet de las Cosas.

2.1. Conceptos y definiciones fundamentales

2.1.1. Generación y distribución de gas natural

El gas natural es un energético que se encuentra en yacimientos en el subsuelo al igual que el petróleo, y puede encontrarse en estado **asociado** cuando al ser extraído está mezclado con el crudo, o en estado **libre o no asociado** cuando se encuentra en un yacimiento que sólo contiene gas natural. Además, se considera como el tipo de energía más amigable con el medio ambiente ya que no contamina y no es tóxico; su distribución se da por medio de gasoductos usualmente compuestos de acero y polietileno que deben cumplir con ciertas especificaciones de calidad con el fin de evitar la presencia de formación de hidratos, dado que, se presentaría una pérdida de eficiencia en el sistema de transporte [7].

En Colombia, el servicio público domiciliario de gas natural por redes, de acuerdo con la Ley 142 de 1994, es el conjunto de actividades económicas que se requieren para que los usuarios puedan recibir el servicio de gas en sus predios [8]. Las actividades en mención son: producción, transporte, distribución y comercialización, ver Figura 1.

La **producción** es la actividad en la que se extrae el gas almacenado en los yacimientos o campos de producción hasta la superficie para ser tratado en la Central de Procesamiento de Gas (CPG). Los principales campos de

producción en Colombia son: Cusiana, Floreña, Ballena, Gibraltar, La Creciente y la plataforma marina costa afuera (offshore) Chuchupa del Mar Caribe. Una vez el gas natural es tratado y cumple con las condiciones de calidad del Reglamento Único de Transporte (RUT), se inicia la actividad de **transporte**, la cual consiste en la conducción del gas en tuberías de acero a alta presión desde los campos de producción hasta las estaciones de puerta, ubicadas en las cercanías de las ciudades o poblaciones a través del Sistema Nacional de Transporte (SNT), conformado por un conjunto de gasoductos localizados en el territorio nacional. En Colombia existen dos sistemas de transporte principales: El Sistema Troncal de la Costa Atlántica y el Sistema de Transporte del Interior. Posteriormente, la actividad de **distribución** consiste en llevar el gas por redes de tubería desde las estaciones reguladoras de puerta de ciudad o desde un sistema de distribución, hasta las conexiones de los usuarios. Por último, la **comercialización** es la actividad de compra y venta del gas entre la empresa comercializadora y el usuario, que incluye el pago de los servicios de transporte y distribución, medición del consumo, emisión y entrega de facturas, recaudo, mercadeo y atención al usuario [9].

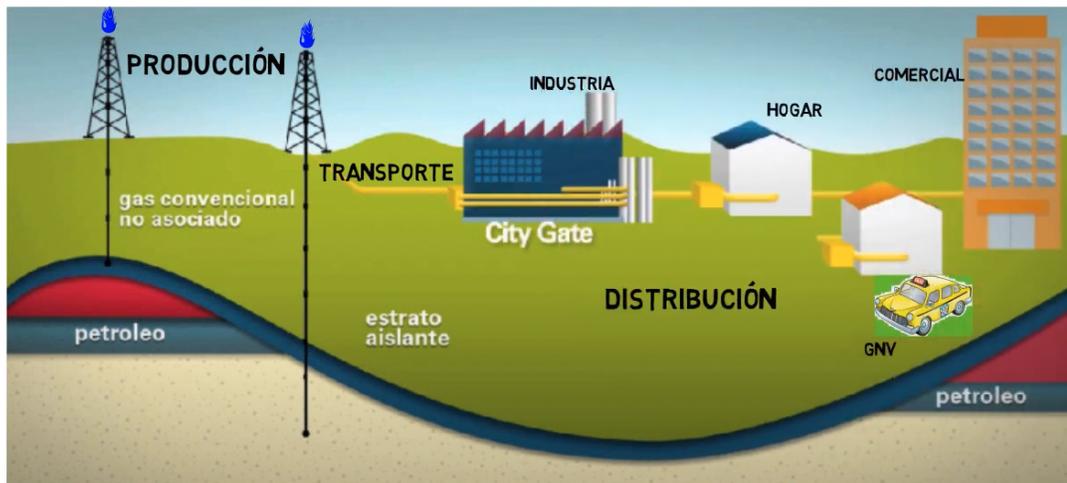


Figura 1. Cadena del Gas Natural. Tomado de [9].

De acuerdo a la metodología general adoptada conforme a la Resolución CREG-011 de 2003, se han propuesto distintas iniciativas tendientes a utilizar la tecnología de transporte de Gas Natural Comprimido (GNC) para la comercialización del servicio público domiciliario de gas natural en poblaciones aisladas del SNT [10].

2.1.2. Pérdidas en el servicio domiciliario de gas natural

Según la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), las pérdidas en el suministro del servicio domiciliario, se refieren a “la diferencia entre el gas combustible medido (en condiciones estándar) en Puerta(s) de Ciudad y el gas combustible medido (en condiciones estándar) en las conexiones de los usuarios, excluyendo el gas combustible requerido para operar el Sistema de Distribución” [10].

En este sentido, en todos los sistemas de suministro se presentan pérdidas, sin embargo, las empresas prestadoras del servicio 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 gas natural es importante tanto para la seguridad pública como para la rentabilidad y sostenibilidad a largo plazo de la industria del gas natural. Las comercializadoras pueden utilizar una variedad de tecnologías y prácticas para minimizar estas pérdidas, como la mejora de los sistemas de medición, el monitoreo regular de las redes de distribución, el uso de materiales de alta calidad, la implementación de programas de mantenimiento preventivo, la educación y concientización de los clientes sobre el uso responsable del gas natural, la implementación de políticas efectivas de cobro de facturas y la mejora de los procesos de ventilación y quema de gas natural.

2.1.2.1. Pérdidas Técnicas

Hacen referencia a la cantidad de gas que se pierde durante su producción, transporte y distribución, debido a factores técnicos o físicos relacionados con el sistema. Algunos ejemplos de pérdidas técnicas de gas natural incluyen:

- Fugas de gas: son pérdidas que se producen en la red de tuberías debido a fugas en las juntas, conexiones y tuberías dañadas.
- Ventilación de gas: se produce cuando el gas se elimina intencionalmente de los sistemas de distribución para permitir trabajos de mantenimiento o reparaciones. Este proceso puede resultar en una pérdida de gas.
- Quemado no intencional: cuando el gas se quema como resultado de una combustión no deseada en los equipos de producción, transporte o distribución.

- Pérdidas por evaporación: cuando el gas natural se convierte en un gas más ligero y se evapora durante la producción, transporte o almacenamiento.

2.1.2.2. Pérdidas No Técnicas

Se refieren a la cantidad de gas natural que se pierde en el proceso de distribución y comercialización, debido a actividades ilegales, errores administrativos y fugas no detectadas en el sistema de distribución de gas. Estas pérdidas pueden incluir:

- Fraude por usuarios: El hurto de gas es una forma común de pérdida no técnica, asociada a actividades de manipulación y alteración de elementos de la red de distribución como la acometida, el regulador o el medidor, con la finalidad de obtener beneficios en la facturación del fluido.
- Aumento en la capacidad instalada sin previo aviso: La posibilidad de suministrar más gas natural a los clientes de lo que el medidor es capaz de registrar en la actualidad. Esto puede ocurrir debido al crecimiento en la demanda de gas natural y puede resultar en pérdidas no técnicas para la empresa prestadora del servicio.
- Errores administrativos: Los errores en la medición, facturación o registro de datos pueden conducir a pérdidas no técnicas. Por ejemplo, es posible que los medidores no se lean con la frecuencia adecuada o que los datos se registren incorrectamente en los sistemas de facturación.
- Ineficiencia en la gestión: La falta de mantenimiento y de inversión en infraestructura puede generar ineficiencia en la gestión del sistema de distribución de gas natural, lo que a su vez puede resultar en pérdidas no técnicas [11].

2.1.3. Índices de evaluación de pérdidas

2.1.3.1. Índice de Gas Natural NO Contabilizado (IGNC)

Es un indicador utilizado en la industria del gas natural para medir la cantidad de gas que se pierde en el sistema de distribución debido a pérdidas técnicas y no técnicas. De acuerdo al concepto adoptado conforme al Documento CREG-23 de 2003 sobre los estándares de calidad en distribución de gas natural y GLP por redes, el IGNC se

define como “la diferencia entre la cantidad de gas inyectado al sistema de distribución en todos los puntos de recibo y la cantidad de gas retirado del sistema en todos los puntos suministro” [12], ver Ecuación 1.

$$IGNC = G_I - G_R \quad (1)$$

Donde:

G_I : Volumen de gas producido o suministrado al sistema, medido en m^3 .

G_R : Volumen de gas facturado o registrado por la empresa, medido en m^3 .

La estimación del IGNC se realiza comúnmente en porcentaje, lo que representa la porción del volumen de gas natural no facturado con respecto al volumen entregado al sistema de distribución [13], ver Ecuación 2.

$$IGNC(\%) = \frac{G_I - G_R}{G_I} \times 100 \quad (2)$$

El IGNC contempla las pérdidas totales de gas natural como la suma de las pérdidas técnicas y no técnicas descritas anteriormente. Todo esto influye en el incremento del cobro a los usuarios por el servicio público, la disminución en las utilidades de la empresa prestadora del mismo y el desperdicio del fluido. El nivel máximo de pérdidas de gas combustible trasladable a los usuarios del servicio, es del 3.7%, conforme a lo establecido en la Resolución 240 A de 2016 de la CREG, la cual establece la fórmula que el distribuidor o el comercializador utilizará para determinar el porcentaje de pérdidas en el sistema de distribución, ver Ecuación 3 [14].

$$p_m = \frac{\sum_{j=2}^{13} \left(\sum_{k=1}^n V_{m-j,k} - V_{Usuario, m-j} \right)}{\sum_{j=2}^{13} \sum_{k=1}^n V_{m-j,k}} \quad (3)$$

Donde:

p_m : Es el porcentaje de pérdidas en el sistema de distribución en el mes m de facturación.

$V_{Usuario, m-j}$: Es la sumatoria de los volúmenes de las facturas emitidas a los usuarios en el mes m-j, expresados en metros cúbicos (m^3), corregidos por compresibilidad a condiciones estándar de presión y temperatura.

$V_{m-j,k}$: Es el volumen de gas combustible medido en el mes m-j en las estaciones de puerta de ciudad y/o puntos de inyección al sistema de distribución, expresado en metros cúbicos (m^3), corregido por compresibilidad a condiciones estándar de presión y temperatura.

n : Número total de puntos de inyección.

k : Corresponde a los puntos de inyección del sistema de distribución.

En caso de que el resultado de aplicar la Ecuación 3 sea un valor negativo, se trasladará al usuario este valor. Y en caso contrario, se establece el máximo porcentaje de pérdidas a trasladar a los usuarios regulados y no regulados conforme al siguiente cálculo, ver Ecuación 4.

$$\left(FP_{máx} \right)_m = \frac{e_{máx UR} \sum_{j=2}^{13} V_{UR,m-j} + e_{máx UNR} \sum_{j=2}^{13} V_{UNR,m-j}}{\sum_{j=2}^{13} (V_{UR,m-j} + V_{UNR,m-j})} + 0,5 \quad (4)$$

$\left(FP_{máx} \right)_m$: Factor de pérdidas máximo trasladable a los usuarios regulados y no regulados en el mes m de facturación.

$e_{máx UR}$: Error máximo permisible del sistema de medición del usuario regulado.

$e_{máx UNR}$: Error máximo permisible del sistema de medición del usuario no regulado.

$V_{UR,m-j}$: Sumatoria de los volúmenes en metros cúbicos (m^3) facturados a los usuarios regulados en el mes m-j, corregidos por compresibilidad a condiciones estándar de presión y temperatura.

$V_{UNR,m-j}$: Sumatoria de los volúmenes en metros cúbicos (m^3) facturados a los usuarios no regulados en el mes m-j, corregidos por compresibilidad a condiciones estándar de presión y temperatura.

El error máximo del sistema de medición de los usuarios regulados y no regulados, $e_{máxUR}$ y $e_{máxUNR}$ respectivamente, se calculan de acuerdo a las siguientes expresiones, ver Ecuación 5 y 6.

$$e_{máxUR} = \left(\sqrt{e_{CG}^2 + e_{UR}^2} \right) \quad (5)$$

$$e_{máxUNR} = \left(\sqrt{e_{CG}^2 + e_{UNR}^2} \right) \quad (6)$$

Donde:

e_{CG} : Error máximo permisible del sistema de medición en la estación puertas de ciudad, fijado en +/- 0.9% según el artículo 3 de la Resolución CREG 127 de 2013.

e_{UR} : Error máximo permisible del sistema de medición del usuario regulado, fijado en $\pm 3.0\%$ según el artículo 3 de la Resolución CREG 127 de 2013.

e_{UNR} : Error máximo permisible del sistema de medición del usuario regulado, fijado en $\pm 2.0\%$ según el artículo 3 de la Resolución CREG 127 de 2013 [15].

2.1.4. Sistema AMR para el servicio domiciliario de gas natural

2.1.4.1. Sistema AMR

Corresponde al sistema que permite 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 a través de radiofrecuencia, transmisión por línea eléctrica (PLC, *Power Line Communications*), redes móviles de segunda generación (GPRS, *General Packet Radio Service*), redes LPWAN, entre otras; con el fin de posteriormente llevar a cabo procesos de facturación, registro y análisis de la información. Este flujo de datos 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 órdenes de ejecución en sentido contrario [16][17], ver Figura 2. De este modo, la implementación de sistemas AMR 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 [18].

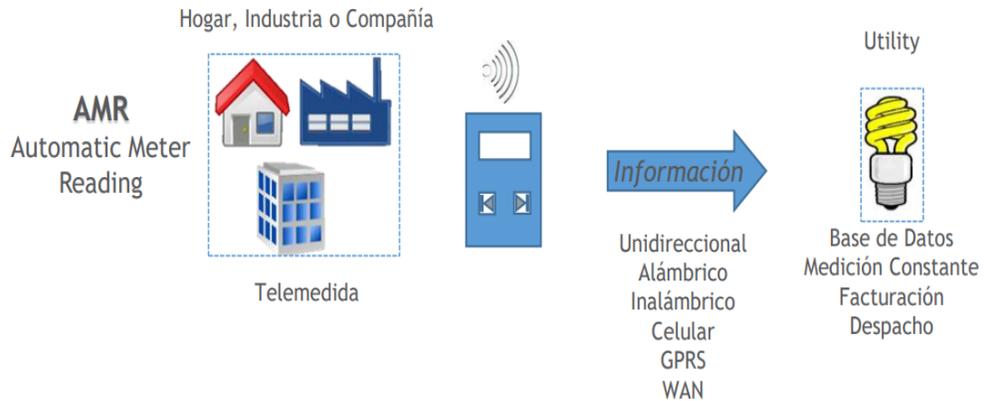


Figura 2. Sistema AMR. Tomado de [19].

Por medio de los sistemas AMR es posible realizar de forma automática algunas tareas o la totalidad del proceso de medición convencional de servicios públicos. Por esta razón, la implementación de estos sistemas conlleva importantes ventajas tanto para el usuario final como para las empresas prestadoras 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 [20].

El sector en el que más se ha extendido la implementación de sistemas AMR es en el servicio público de energía eléctrica mediante la evolución de medidores mecánicos a los de tipo digital. Lo anterior, ha generado que las empresas prestadoras de servicios públicos de distintos sectores 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 información relacionada con el tipo de servicio que prestan [21].

2.1.4.2. Medidor comercial de gas natural

Según la terminología utilizada en la Norma Técnica Colombiana NTC 6337-1, el medidor de gas es un “Instrumento destinado a medir, memorizar y visualizar la cantidad de gas que pasa por el sensor de flujo” [22] . Su función es registrar el volumen de gas que pasa hacia las instalaciones internas de los comercios, con el fin de

que las empresas prestadoras del servicio conozcan el consumo, puedan aplicar los costos pactados en la tarifa y generar la factura de cobro.

El rango de flujo máximo para un medidor comercial puede variar desde algunos cientos de metros cúbicos por hora (m^3/h) hasta varios miles de m^3/h , dependiendo del modelo y el fabricante del medidor, así como de las necesidades específicas de la empresa o industria que lo utiliza. En el caso de los medidores comerciales fabricados por Metrex S.A., el flujo mínimo es de $0,04 m^3/h$ y el máximo es $10 m^3/h$ [23]. La elección del modelo o referencia del medidor a instalar depende del caudal o volumen total generado en el comercio.

Los medidores comerciales utilizados en el suministro de fluidos pueden clasificarse según el propósito de calcular el caudal o el volumen total, en dos tipos: medidores de raíz cuadrada (generadores de presión diferencial) y medidores lineales. Los medidores lineales son por lo general los más utilizados en aplicaciones de gas, específicamente los de desplazamiento positivo, donde sus partes mecánicas se mueven aprovechando la energía del fluido que ocasiona una pérdida de presión. Estos se clasifican a su vez en rotativos y de diafragmas [24], siendo estos últimos los más comunes de instalar, y los que fabrica y comercializa Metrex S.A., ver Figura 3.

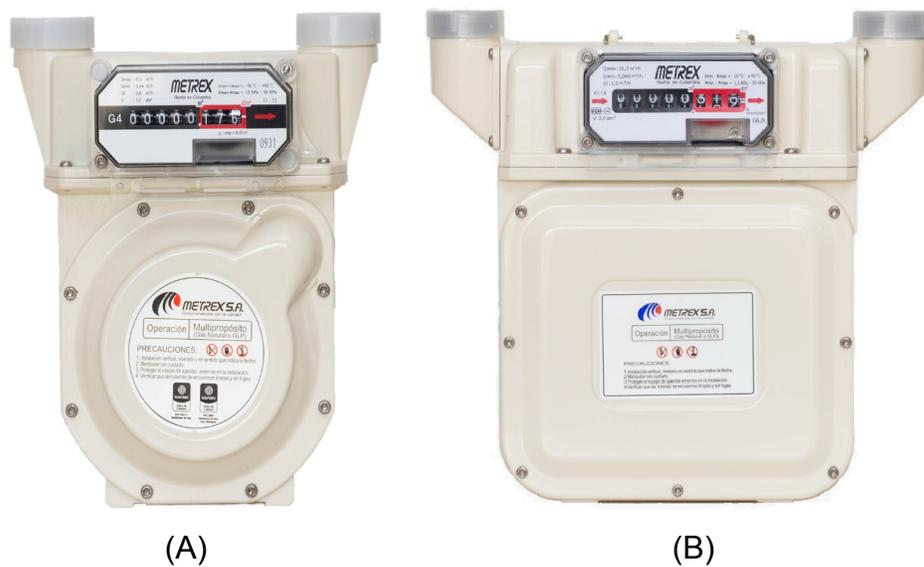


Figura 3. Medidores comerciales de gas marca Metrex. (A) Modelo G4. (B) Modelo G6. Tomado de [23].

2.1.4.3. Redes de Área Amplia de Baja Potencia (LPWAN)

Las Redes de Área Amplia de Baja Potencia son un tipo de redes de comunicación inalámbrica diseñadas para permitir comunicaciones de largo alcance a una baja velocidad de transmisión de datos, bajo consumo de potencia, despliegue de red escalable y de bajo costo. Son comúnmente empleadas para suplir necesidades de los sistemas IoT; donde se busca interconectar una gran cantidad de dispositivos para recopilar e intercambiar datos, permitiendo su monitoreo remoto a través del uso de servicios en la nube [25].

La cobertura de las LPWAN alcanza distancias del rango de los kilómetros, se caracterizan por operar en las bandas Sub-GHz sin licencia, permitiendo una comunicación robusta y confiable, maneja pequeñas cantidades de datos de transmisión y un bajo consumo de energía, lo que garantiza una larga duración de las baterías de los dispositivos y por lo tanto bajo costo en la fabricación de los dispositivos [26].

Las LPWAN se han convertido en uno de los impulsores de la reacceleración del mercado de IoT. Según el informe de IoT Analytics LPWAN 2020-2025, el mercado de LPWAN actualmente está creciendo más del 100% y se concentra principalmente en 4 tecnologías: Sigfox, NB-IoT, LTE-M, LoRa; siendo el continente asiático el mayor adaptador de tecnologías LPWAN y el segmento principal de mercado, el de los servicios públicos [27]. De manera que, las tecnologías LPWAN son prometedoras y se pueden aplicar en una amplia gama de aplicaciones que incluyen monitoreo ambiental, ciudades inteligentes, automatización industrial, medición inteligente de servicios públicos, seguimiento de activos, logística y transporte, y muchas más [28].

2.1.4.4. Sigfox

Es una red LPWAN, creada en 2010 con la visión de conectar todos los objetos del mundo físico con el mundo digital. Durante los 13 años desde su creación, Sigfox ha sido adoptada por más de 70 operadores de red alrededor del mundo, cuenta con más de 1500 clientes negocio a negocio (B2B, Business to Business) y más de 800 stakeholders del ecosistema IoT, entre fabricantes de dispositivos, proveedores de soluciones e integradores de sistemas, que colaboran para habilitar aplicaciones con baja capacidad, transmisiones esporádicas y gran cantidad de objetos de muy baja

potencia para que ocasionalmente envíen pequeñas cantidades de datos a la nube [29]. Actualmente, son 20 millones de dispositivos conectados a la red Sigfox y casi 80 millones de mensajes enviados al día.

La tecnología Sigfox, utiliza la modulación de ancho de banda ultra estrecha (UNB, Ultra Narrow Band) para enviar mensajes a través de las bandas ISM (Industrial, Scientific and Medical), las cuales se pueden usar sin necesidad de adquirir licencias y su frecuencia de operación depende de la región donde se encuentre, por ejemplo, 868 MHz en Europa, 915 MHz en América del Norte y 433 MHz en Asia. Los datos que pueden ser transmitidos con esta red tienen un tamaño de 12 bytes con un límite de 140 mensajes al día en enlace ascendente y 4 mensajes en el enlace descendente con un tamaño de 8 bytes. Cada mensaje tiene un ancho de banda de 100 Hz y la tasa de transmisión de datos varía de 100-600 bps de acuerdo a la región, además el consumo energético en cada transmisión es de 10 mA a 50 mA [30].

La conectividad a la red Sigfox tiene importantes beneficios dado que se basa en enviar pequeños mensajes pocas veces al día, por consiguiente los dispositivos consumen menos energía y el ciclo de vida de la batería se alarga drásticamente. Por otro lado, como Sigfox ha decidido eliminar la señalización para el control de acceso al medio (MAC, Media Access Control), los dispositivos no intercambian tráfico de control con la red, sólo se despiertan para transmitir su carga útil. De esta manera, en lugar de que la red administre cómo los dispositivos acceden al recurso físico, utiliza un mecanismo pseudoaleatorio, por el cual se obtiene una alta capacidad y escalabilidad de red. Además, la señal emitida por un dispositivo Sigfox ocupa muy poco ancho de banda, lo que genera una alta eficiencia espectral y capacidad de red porque se optimiza el acceso a los recursos físicos. También, debido al uso de modulación UNB, Sigfox permite un presupuesto de enlace muy grande mientras utiliza una potencia de transmisión muy baja en el lado del dispositivo. Por último, dado que Sigfox opera en bandas que no requieren ninguna licencia, no es necesario pagar tarifa para operar la red, lo que representa ofrecer conectividad a la misma a un bajo precio.

La arquitectura de la tecnología inalámbrica Sigfox, está compuesta principalmente por dos capas. La primera es la capa de Equipo de

Red, la cual está conformada por las estaciones base que son las responsables de recibir los mensajes transmitidos por los dispositivos conectados, y posteriormente enviarlos a la segunda capa que es el Sistema de Soporte de Sigfox que procesa la información mediante una devolución de llamada denominada callback que entrega los datos al cliente, además de almacenarlos [31], ver Figura 4.

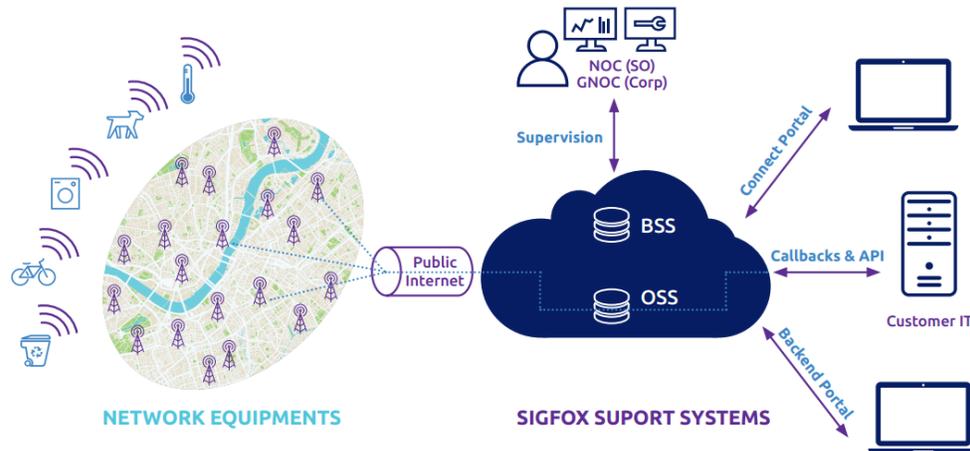


Figura 4. Arquitectura de alto nivel de la red Sigfox. Tomado de [31].

2.2. Trabajos relacionados

2.2.1. Gestión del consumo de gas en Japón

En el año 2019, la compañía de gas japonesa Nippon Gas Co. (Nicigas), bajo la iniciativa de modernizar su parque de medidores de gas licuado de petróleo (GLP) y digitalizar la recopilación de datos asociados al consumo de gas, desarrolló junto a UnaBiz y Soracom una solución de medición inteligente compuesta por el “Space Hotaru”, una Unidad de Control de Red (NCU) que transmite datos sobre el consumo de gas a la plataforma de datos IoT, “NICIGAS Stream”, a través de la red inalámbrica 0G de Sigfox [32]. Los datos recopilados se utilizan para visualizar y predecir la cantidad de gas que queda en los hogares, lo que permite un reemplazo más oportuno de los cilindros de gas y representa una mejora en la calidad del servicio a sus usuarios. Además, informa acerca de incidentes relacionados con desastres naturales que afectan el medidor y requieran un cierre automático de la válvula de gas para brindar comodidad y seguridad en tiempo real a las propiedades de los usuarios [33].

El despliegue del lector de medidores “Space Hotaru”, ha continuado de manera constante desde febrero de 2020 con el fin de activar más de 520.000 dispositivos. Adicionalmente, con el propósito de cerrar la brecha

de cobertura de la red Sigfox del 5%, desde 2021 se implementa una versión Space Hotaru con LTE-M [34].

2.2.2. Solución de medición remota para el servicio de agua en Brasil

La empresa Iguá Saneamento, encargada de proveer el servicio de agua en Brasil, alcanzó el hito de 13.500 contadores de agua conectados con lectura remota, acelerando la digitalización del agua en la empresa y convirtiéndola en la de mayor porcentaje de clientes conectados en el país. La solución, que nació de un proyecto de innovación interno, utiliza la tecnología Sigfox para medir el consumo de agua de sus clientes, garantizando, además de agilidad y precisión, ahorro de costos en la lectura presencial y reducción de pérdidas por fugas y fraudes que se pueden identificar fácilmente a través de medidores de agua inteligentes. Además, permite identificar un patrón de consumo que puede servir para detectar anomalías y posibles necesidades como cambiar el medidor de agua. La tecnología también aprovecha la red de datos disponible para ayudar a las operaciones de Iguá a obtener datos de presión, caudal, estado de las bombas y consumo de energía [35].

2.2.3. Telemetría para el servicio domiciliario de agua en el municipio de Cota, Cundinamarca

Este proyecto fue adelantado por la Empresa de Servicios Públicos de Cota (Emsercota S.A. E.S.P.), debido a la necesidad de desarrollar soluciones para la reducción del Índice de Agua No Contabilizada (IANC), basadas en herramientas tecnológicas como la telemetría que permite a la empresa conocer información clave para su operación como el patrón de consumo en un barrio o localidad o el perfil de consumo de los clientes o suscriptores del servicio [36], de manera que se pueda evidenciar inconsistencias en el comportamiento de los consumos y reaccionar de manera eficiente ante posibles fugas o fraudes [37], asimismo dimensionar anticipadamente la cantidad de agua a producir y suministrar a la red de distribución [36].

En este sentido, la solución implementada en 4000 hogares del municipio en el año 2019, se compone de los micro medidores con módulo de lectura remota diaria, denominados My Water y desarrollados en Portugal por la compañía JANZ Water Meter [38], y los dispositivos de mínimo vital que garantizan la cantidad adecuada de agua para el consumo humano al día [39] e incluso permiten el corte y la reconexión del servicio [37]. Finalmente, en lo que respecta a la plataforma web de control y monitoreo de la

información recolectada por los dispositivos de medición, estaría basada en el concepto de IoT, y soportada bajo la conocida red SigFox [39].

2.3. Conclusiones acerca del estado actual del conocimiento

El presente capítulo contiene, además de los conceptos y definiciones que sirven como base para la consecución de los resultados del presente trabajo, un estudio construido para reconocer los trabajos existentes que guardan relación con la problemática abordada en el presente proyecto. En este sentido, tomando como base el análisis y los resultados presentados en el capítulo, se concluye:

- Existe poca variedad de proyectos reconocidos, dedicados a la implementación de soluciones de telemetría con tecnología Sigfox en los servicios públicos. Los principales enfoques de dichos proyectos son: control y monitoreo de consumo del fluido medido, detección de fugas y fraudes, corte y reconexión del servicio, entre otros.
- Mediante el uso de la integración entre IoT y red Sigfox es posible construir soluciones para distintos problemas como lo son la detección de fugas y fraudes, además obtener datos adicionales como presión y caudal.
- Después de analizar los proyectos acerca de la integración entre IoT y red Sigfox en los servicios públicos, se concluye que el presente trabajo propone un nuevo enfoque que puede aportar no solamente al gas natural, sino también al campo ingenieril. Utilizando un modelo de medidor de gas comercial novedoso que permita registrar, recolectar y transferir a través de la red Sigfox, la información asociada al consumo y alarmas antifraude de los medidores del servicio de gas natural para su posterior análisis, gestión y toma de decisiones.

3. PILOTO DE MEDICIÓN INTELIGENTE PARA EL SERVICIO DOMICILIARIO DE GAS NATURAL

En este capítulo se expone el proceso llevado a cabo para la ejecución del piloto de medición inteligente en el servicio domiciliario de gas natural. Este proceso

consta de dos etapas principales: ingeniería de diseño e ingeniería de implementación. Cada una de estas etapas está compuesta por diferentes fases. En la etapa de ingeniería de diseño, se incluyen las fases de ingeniería conceptual, básica y de detalle. Estas fases describen en detalle los subsistemas, componentes y partes que conforman el piloto.

Por otro lado, en la etapa de ingeniería de implementación se abordarán las fases de procura, construcción y resultados. En estas fases se lleva a cabo la adquisición de los servicios y equipos necesarios para la implementación del sistema, asegurando su correcto funcionamiento. Para tener una representación visual de este proceso, ver Figura 5.

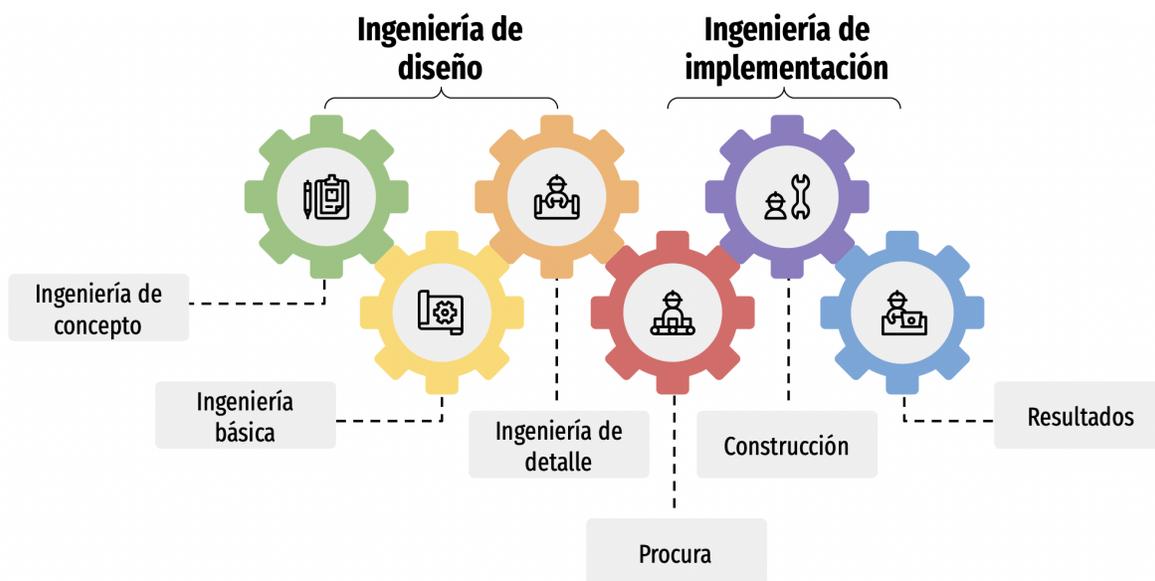


Figura 5. Fases que conforman la ejecución del piloto. Fuente propia.

3.1. Ingeniería de diseño

3.1.1. Ingeniería de concepto

Durante el desarrollo de esta fase se realiza un análisis de los requerimientos para la solución de medición inteligente que requiere la empresa prestadora del servicio domiciliario de gas natural (Empresa A). Además, se estudian los requisitos necesarios para la implementación del sistema AMR de medición inteligente soportado bajo el uso de la tecnología Sigfox.

3.1.1.1. Contexto

La empresa Metrex S.A., se ha encargado de producir y comercializar medidores para diferentes empresas nacionales e

internacionales que prestan el servicio domiciliario de gas natural. Durante los más de 20 años desde su creación ha estado a la vanguardia tecnológica para brindar a sus clientes soluciones que solventen problemas comunes y crecientes de este sector que representa un 95% de sus ventas. Por este motivo, surgió el piloto de seguridad digital descrito en la sección 1.1. del presente documento, el cual fue el inicio del proyecto objetivo de este trabajo, dado que se identificó una nueva necesidad relacionada con la detección tardía de los diferentes tipos de fraudes que permite reconocer el medidor digital, a causa de las lecturas manuales con una frecuencia de 30 días que impide reaccionar ante hechos delictivos de manera rápida y eficiente.

3.1.1.2. Análisis de requerimientos

Una vez identificada la nueva oportunidad de mejora descrita anteriormente para el proceso de medición en el servicio de gas natural, es importante que Metrex realice innovación y desarrollo en sistemas de lectura remota, teniendo en cuenta este nuevo mercado que tiene grandes perspectivas en un futuro cercano. Por lo tanto, se han identificado los siguientes requerimientos de funcionamiento del sistema AMR de medición inteligente a implementar:

- Instalación de medidores comerciales de gas tipo digital que sean aptos para la lectura de consumo y alarmas de manera remota.
- Comunicación únicamente en sentido ascendente (UL, *Up Link*) para la recolección de los datos de cada medidor, sin necesidad de enviar acciones de corte y reconexión.
- Visualización de la lectura de consumo y alarmas de los medidores a través de una aplicación de escritorio o de una página web.
- Posibilidad de consultar los datos en cualquier momento del día.
- Capacidad de descargar la información consultada.

3.1.1.3. Requisitos necesarios para el sistema AMR de medición inteligente

La cobertura, capacidad, costo y bajo consumo de potencia son las

principales características de las aplicaciones LPWAN, incluyendo medición inteligente. Sin embargo, cualquier aplicación puede implicar compensaciones significativas entre diferentes requisitos como: cobertura versus costo. En efecto, algunas aplicaciones son comparativamente homogéneas, por ejemplo, las de uso de medidores, mientras que otras tienen abundantes dispositivos heterogéneos con diferentes expectativas de cada uno. Por lo tanto, las soluciones LPWAN pueden personalizarse de acuerdo a los atributos específicos que se desean obtener de la misma.

A continuación, se proporciona un mapeo de las características principales necesarias para la solución de medición inteligente con el uso de la escala Alto (A), Medio (M) y Bajo (B) dependiendo de la necesidad de aplicación del requisito, ver Tabla 4.

Tabla 4. Calificación de requisitos necesarios para sistema AMR de medición inteligente. Adaptado de [28].

Requisito	Calificación
Cobertura	A
Capacidad	A
Costo	A
Bajo consumo de potencia	M

En conclusión, la cobertura es un requisito de gran importancia para un sistema de medición inteligente con LPWAN, dado que se necesita garantizar el envío de la información para su respectivo monitoreo. Sin embargo, el entorno de implementación puede implicar la operación localizada del mismo. En tal caso, se puede compensar este requisito con la capacidad, para centrarse en el tipo y la cantidad de dispositivos que se admitirán, asegurando el requisito de cobertura intensa en la zona de instalación. Por otro lado, el bajo consumo de potencia está impulsado principalmente por la disponibilidad del suministro de energía eléctrica; en caso de que la instalación se realice en zonas remotas o de difícil acceso, se necesitan baterías que duren más de 10 años sin recargar, con lo cual requisito de baja potencia cobra gran importancia, pero en aquellas instalaciones donde la energía eléctrica puede estar fácilmente disponible, este requisito puede considerarse de baja prioridad. Finalmente, dado que una aplicación de medición

inteligente requiere comúnmente de una gran cantidad de dispositivos, es necesaria la adquisición de dispositivos de bajo costo, con el fin de que la solución sea rentable para la empresa prestadora del servicio, por consiguiente se considera un requisito de alta relevancia [28].

3.1.2. Ingeniería básica

En el desarrollo de ésta, la segunda fase del proyecto, se plantea la arquitectura y las características técnicas y funcionales de los equipos que conforman el sistema AMR de medición inteligente a implementar.

3.1.2.1. Arquitectura del sistema AMR de medición inteligente

La arquitectura del sistema AMR de medición inteligente, está conformada por los **medidores digitales de gas**, equipados con módulos de comunicación para cumplir las funciones de registrar, recolectar y enviar por medio de enlaces inalámbricos la información asociada al consumo y alarmas antifraude a las **estaciones base de red Sigfox**, gestionadas por el operador WND Group. Luego, a través de conexión VPN, se comunican las estaciones base con la **nube**, que constituye la capa principal del Sistema de Soporte Sigfox, donde además de procesar los mensajes y enviarlos mediante callbacks al **sistema TI del cliente**, incluye módulos y funciones que son esenciales para garantizar el despliegue, la operación y el monitoreo de la red. Finalmente, la información transmitida remotamente desde los medidores se visualiza a través de la **interfaz de gestión y control de datos** en equipos de escritorio o en dispositivos móviles para el análisis y toma de decisiones, ver Figura 6.

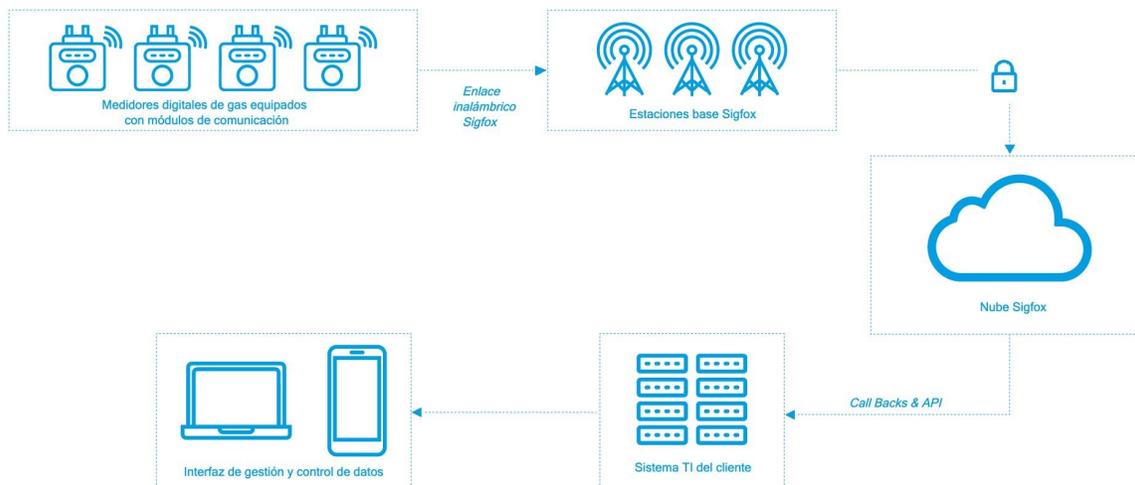


Figura 6. Arquitectura del sistema AMR de medición inteligente. Fuente propia.

3.1.2.2. 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 conforman la arquitectura de red para la puesta en marcha del sistema AMR.

- **Medidores comerciales de gas tipo digital**

Los medidores comerciales de gas tipo digital son similares en características físicas y técnicas a los medidores comerciales tradicionales. Sin embargo, se diferencian por tener un sistema electrónico de seguridad. Este sistema no solo muestra la lectura numérica del flujo de gas a través de una pantalla, sino que también genera y visualiza alarmas de manipulación con fines fraudulentos, mediante íconos en la pantalla que reemplaza al visor odómetro convencional.

Metrex S.A. comercializa una variedad de modelos de medidores comerciales de gas tipo digital, que incluyen los modelos tradicionales y dos adicionales: el G10 y el G16. Estos modelos adicionales tienen un flujo máximo permitido de $16 \text{ m}^3/\text{h}$ y $25 \text{ m}^3/\text{h}$, respectivamente, ver Figura 7.



Figura 7. Medidores comerciales de gas tipo digital marca Metrex. (A) Modelo G4. (B) Modelo G6. (C) Modelo G10. (D) Modelo G16. Fuente propia.

A continuación, se detallan las principales especificaciones físicas y técnicas de los modelos de medidores comerciales de gas tipo digital, ver Tabla 5.

Tabla 5. Especificaciones físicas y técnicas de los modelos de medidores comerciales de gas tipo digital marca Metrex. Adaptado de [23].

	G4	G6	G10	G16
Flujo máximo	6,0 m ³ /h	10,0 m ³ /h	16,0 m ³ /h	25 m ³ /h
Flujo mínimo	0,04 m ³ /h	0,06 m ³ /h	0,10 m ³ /h	0,16 m ³ /h
Flujo de transición	0,6 m ³ /h	1,0 m ³ /h	1,6 m ³ /h	2,5 m ³ /h
Alto	238 mm ± 5 mm	271,5 mm ± 5 mm	346 mm ± 5 mm	346 mm ± 5 mm
Ancho	194 mm ± 5 mm	206 mm ± 5 mm	415 mm ± 5 mm	415 mm ± 5 mm
Profundidad	136,7 mm ± 5 mm	148.3 mm ± 5 mm	248 mm ± 5 mm	248 mm ± 5 mm
Presión máxima	0,5 bar	0,69 bar	1,0 bar	1,0 bar
Temperatura de operación	-10°C ~ 55°C	-10°C ~ 55°C	-10°C ~ 55°C	-10°C ~ 55°C
Volumen cíclico	1,2 dm ³ /Rev	2,0 dm ³ /Rev.	6,0 dm ³ /Rev.	6,0 dm ³ /Rev.

Las alarmas que indican posibles manipulaciones en los medidores comerciales de tipo digital, se visualizan mediante íconos en la pantalla. A continuación, se presentan los íconos que las identifican, su descripción y la forma de activación y desactivación, ver Tabla 6.

Tabla 6. Alarmas antifraude de los medidores comerciales de gas tipo digital marca Metrex. Fuente propia

Indicación	Descripción	Activación	Desactivación
	Batería baja	Carga de la batería menor a 3.1 V.	Cambio de batería.
	Fugas pequeñas	Más de 168 h (7 días) de consumo constante en cualquier caudal.	Detener la fuga.
	Exceso de flujo	Más de 1.2 veces el caudal máximo por más de 10 s.	Borrado por personal autorizado.
	Flujo cero	Sin operación por más de 20 días.	Hasta que el medidor registre flujo nuevamente.
CAU 01	Ataque magnético	Presencia de un campo	Borrado por personal

		magnético por más de 10 segundos.	autorizado.
CAU 02	Apertura de registro	Registro abierto por más de 1 segundo.	Borrado por personal autorizado.
CAU 03	Flujo inverso	Flujo inverso por más de 10 segundos.	Borrado por personal autorizado.
CAU 04	Retiro de batería	Batería del medidor desconectada del circuito.	Borrado por personal autorizado.
	Indicación de operación	Gira en sentido del flujo del medidor mientras esté en operación.	No requiere ninguna acción.

- **Módulo de comunicación**

El módulo de comunicación DGMS es un dispositivo de IoT que utiliza el protocolo Sigfox para la lectura y transmisión de información de medidores de gas digitales. Representa una solución innovadora y eficaz para la gestión remota del consumo de gas en instalaciones comerciales y residenciales, y es compatible con todos los modelos de medidores de gas Metrex mencionados anteriormente. Una vez instalados en los medidores, los módulo transmiten los datos de consumo y alarmas antifraude a través de la red de comunicación Sigfox a la interfaz de aplicación web Sigfox Back-End para la gestión de dispositivos y configuración de la integración de datos a una plataforma de gestión remota que facilite la lectura y el control del consumo en tiempo real.

Este módulo fue diseñado y desarrollado por el equipo de profesionales de la empresa caucana IoT Tech Solutions, en colaboración con Metrex S.A. Juntos, determinaron las necesidades de funcionamiento del módulo para la comunicación remota de los medidores digitales, y posteriormente lo diseñaron y desarrollaron de acuerdo con los requerimientos encontrados, ver Figura 8.



Figura 8. Módulo de comunicación DGMS con cable conectado al habitáculo de batería del medidor digital. Fuente propia.

Además de permitir la comunicación remota de los medidores de gas, el módulo DGMS Sigfox también es capaz de generar alarmas relacionadas con su funcionamiento, tales como: batería baja o desconexión al medidor digital. Esto permite detectar y reaccionar ante situaciones que puedan afectar el buen funcionamiento del módulo.

A continuación, se presentan las especificaciones técnicas del módulo de comunicación, ver Tabla 7.

Tabla 7. Especificaciones técnicas de módulos de comunicación DGMS para medidores digitales. Fuente propia.

Especificaciones	DGMS
Protocolo de comunicación	Sigfox
Puerto de comunicación	UART
Frecuencia	RC1/ RC2/ RC3/ RC4/ RC5/ RC6/ RC7 (detección automática de la zona Monarch)
Protección	IP 68
Protección eléctrica	Por polarización inversa

Temperatura de trabajo	5°C a 85°C
Memoria interna	Si
Fuente de alimentación	Batería Litio no recargable 3.6Vdc (con supercap)
Consumo en reposo	10uA
Consumo en transmisión	200mA
Vida útil de batería	~ 8 años (según frecuencia de transmisión)
Tipo de antena	Interna

La estructura de la trama utilizada por el módulo de comunicación DGMS para enviar los datos sigue un formato específico y está compuesta por diferentes campos o secciones. Estos campos incluyen la información de interés del sistema, como la lectura del consumo, la cual se representa mediante 10 dígitos, donde 7 dígitos corresponden a la parte entera y los restantes al valor decimal. Además, se incluye el estado de las alarmas del medidor, el estado de las alarmas del módulo y el estado de la batería del módulo, para los cuales se necesitan 2 dígitos cada uno. Cada uno de estos campos es fundamental para transmitir de manera precisa y completa los datos relevantes del sistema AMR y su funcionamiento al nodo final que es la plataforma de gestión y control, ver Tabla 8.

Tabla 8. Estructura de la trama enviada por los módulos de comunicación DGMS.
Fuente propia

	Trama							
Byte	8	7	6	5	4	3	2	1
Datos	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
Descripción	Estado de batería voltios x 10	Byte de alarmas del módulo	Byte de alarmas del medidor	Lectura del consumo acumulado				

El campo que representa las alarmas del medidor se codifica utilizando el sistema Decimal Codificado en Binario (BCD, Binary-Coded Decimal). Cada dígito decimal se codifica mediante una secuencia de 4 bits, donde los dígitos del 1 al 9 tienen una codificación asignada, mientras que los demás dígitos no cuentan

con una codificación específica. Para representar los dígitos no codificados, se utiliza la letra "f".

En este caso, la secuencia de 4 bits indica la activación o desactivación de cada una de las 8 alarmas del medidor, donde el valor "1" en la secuencia representa la activación de la alarma correspondiente, mientras que un valor de "0" indica que la alarma no está activada. Por lo tanto, se requieren 2 secuencias de 4 bits para representar dos dígitos decimales mediante la codificación BCD, ver Tabla 9.

Tabla 9. Descomposición del byte de alarmas del medidor en bits. Fuente propia.

Código BCD	X				X			
Código binario	0-1	0-1	0-1	0-1	0-1	0-1	0-1	0-1
Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Ícono de alarma	 CAU 02	CAU 04		 CAU 01		CAU 03		

Por otro lado, el campo que representa las alarmas del módulo de comunicación también se codifica utilizando el sistema BCD, aunque en este caso, debido a que solo hay dos alarmas para el módulo, algunos bits quedan libres, ver Tabla 10.

Tabla 10. Descomposición del byte de alarmas del módulo de comunicación en bits. Fuente propia.

Código BCD	X				X			
Código binario	0-1	0-1	0-1	0-1	0-1	0-1	0-1	0-1
Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Alarma	Libre	Libre	Libre	Libre	Libre	Libre	Batería baja	Desconexión del medidor

- **Plan de comunicación Sigfox**

Dado que la tecnología Sigfox es una red gestionada, los clientes no necesitan realizar ninguna actividad de instalación o mantenimiento, ya que funciona de manera transparente y está lista para su uso mediante la adquisición de un plan de suscripción renovable para el

módulo de comunicación compatible con la red. Estos planes están disponibles a través de distintos operadores designados en cada país. En el caso de Colombia, WND Group ha creado una red de largo alcance y baja velocidad que permite la comunicación de datos entre dispositivos conectados sin depender de un teléfono móvil ni de la cobertura y disponibilidad de la red móvil [40].

El plan adquirido a través WND Group para la ejecución del piloto de este proyecto es un plan básico que incluye las siguientes características, ver Tabla 11.

Tabla 11. Características del plan de comunicación Sigfox adquirido para la implementación del sistema AMR de medición inteligente. Fuente propia.

Características	Plan
Tipo de plan	Básico
Número de conexiones	1.000
Cantidad de mensajes Uplink	2 por día
Cantidad de mensajes Downlink	4 por mes

- **Plataforma web de gestión y control de datos**

A esta plataforma se puede acceder a través de internet con la dirección https://iot.laager.com.br/users/sign_in. Ver Figura 9.

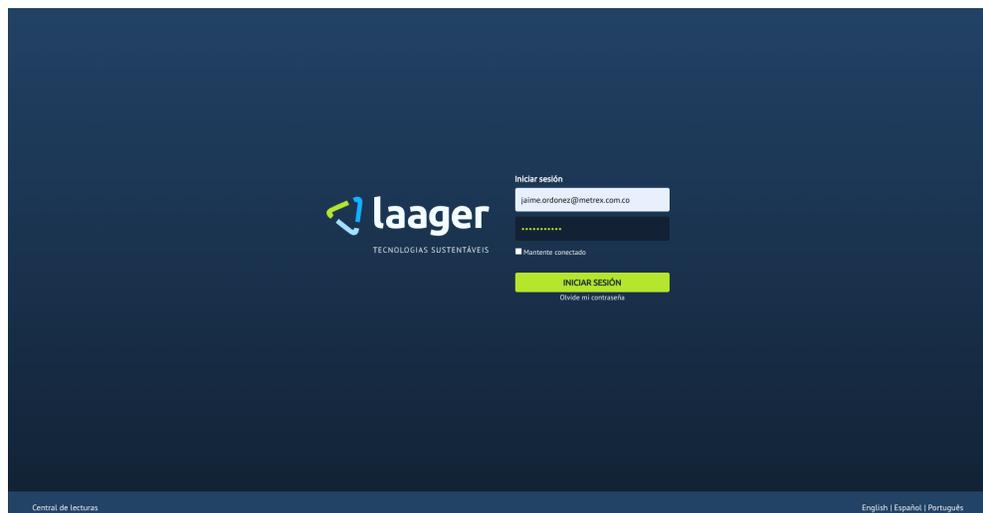


Figura 9. Interfaz de inicio de sesión para ingresar a plataforma de gestión. Fuente propia.

3.1.2.3. Diseño de plan de pruebas de los equipos para su correcto funcionamiento

En esta sección, se procede a elaborar un plan de pruebas que se llevará a cabo antes del proceso de instalación, con el fin de identificar fallas y oportunidades de mejora en el funcionamiento de los equipos que puedan afectar el correcto funcionamiento del sistema AMR. De esta forma, se podrá tomar medidas al respecto. Las pruebas se realizan evaluando dos criterios relevantes que están estrechamente relacionados con la medición inteligente del servicio domiciliario de gas natural: la conectividad y la correspondencia entre los datos de lectura generados por los medidores y los registrados en el Backend de Sigfox y la plataforma web. Se propusieron dos escenarios diferentes para llevar a cabo estas pruebas: el laboratorio y el campo, de modo que se puedan variar las condiciones y evaluar todas las posibilidades, ver Tabla 12.

Tabla 12. Plan de pruebas. Fuente propia

Plan de pruebas			
Elaborado por:	Claudia Daniela Muñoz R.	Aprobado por:	Jaime Ordóñez
Tema:	Plan de pruebas previo a instalación de piloto de medición inteligente con tecnología Sigfox para el servicio domiciliario de gas natural a través de la instalación de un sistema de Lectura de Medición Automática (AMR).		
Objetivo:	Identificar las fallas y oportunidades de mejora para un óptimo funcionamiento del sistema AMR de medición inteligente.		
Tiempo estimado:	2 semanas (1 semana para pruebas en laboratorio y 1 semana para pruebas en campo)		
Implementos:	<ul style="list-style-type: none"> ● Medidor digital de gas G4 ● Módulo de comunicación DMGS Sigfox ● Kit Sigfox Access Station Micro SMBS-T4 + Accesorios ● 1 imán ● Compresor industrial de aire seco disponible en Laboratorio de Metrex S.A. 		
Descripción			
Escenario	Criterio de conectividad	Criterio de correspondencia entre los datos	
Laboratorio	1. Comprobar la concordancia del	1. Simular el paso de caudal de	

	<p>valor de la lectura registrada en el medidor, con la transmitida por el módulo de comunicación al Backend de Sigfox.</p> <ol style="list-style-type: none"> 2. Comprobar la concordancia de la activación de las alarmas anti fraude del medidor y la información que se visualiza en el Backend de Sigfox. 3. Evaluar la calidad de transmisión a diferentes condiciones dentro del laboratorio para comprobar el alcance de señal del módulo empleando el Backend de Sigfox. 4. Estimar la duración real de la batería del módulo de comunicación a través de la configuración de envío de mensajes cada 10 minutos. 	<p>gas natural por el medidor a través de un compresor de aire.</p> <ol style="list-style-type: none"> 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 a la plataforma de gestión y control. 3. Simular la activación de cada una de las alarmas anti fraude del medidor. 4. Verificar que la alarma activada y visualizada en la pantalla del medidor corresponda con la misma alarma captada y transmitida por el módulo de comunicación a la plataforma de gestión y control.. 5. 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 a la plataforma de gestión y control..
<p>Campo</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Comprobar la concordancia del valor de la lectura registrada en el medidor, con la transmitida por el módulo de comunicación al Backend de Sigfox y la plataforma de gestión y control. 2. Comprobar la concordancia entre la activación de las alarmas anti fraude del medidor y la información que se visualiza en el Backend de Sigfox y la plataforma de gestión y control. 3. Evaluar la calidad de transmisión a diferentes distancias y con presencia de obstáculos para comprobar el alcance de señal del módulo. 	

Criterios de aceptación
<ul style="list-style-type: none">• Los datos de consumo y alarmas antifraude deben ser registrados y transmitidos de manera precisa y sin errores, alcanzando un nivel de precisión del 100%. Dado que la información se obtiene a través de un puerto digital, no se tolera la presencia de errores.• Recibir al menos el 90% de los mensajes enviados durante el proceso de prueba permitiendo un margen para posibles pérdidas o fallas ocasionales.

3.1.2.4. Preparación de equipos para la ejecución del plan de pruebas

Para garantizar el correcto funcionamiento del sistema AMR de medición inteligente, es necesario realizar la preparación de cada uno de los equipos que conforman la red para la ejecución del plan de pruebas, tal como se especifica a continuación:

- **Medidor comercial de gas tipo digital equipado con módulo de comunicación**

Se selecciona un medidor comercial de tipo digital, en este caso, se elige un modelo G4 que ha sido calibrado previamente en el laboratorio de gas. La calibración garantiza la precisión y confiabilidad de las mediciones que se llevarán a cabo durante las pruebas.

Una vez seleccionado el medidor, se procede a conectar el cable de comunicación del módulo DGMS a la pantalla del medidor, donde deben coincidir los colores negro, rojo y blanco en ambas partes. Esta conexión establece una comunicación unidireccional entre el módulo y el medidor, lo cual es fundamental para recopilar los datos necesarios durante las pruebas, ver Figura 10.



Figura 10. Conexión pantalla de medidor de gas G4 tipo digital y módulo de comunicación. Fuente propia.

- **Backend de Sigfox**

El proceso de configuración del Backend de Sigfox para agregar el dispositivo a la cuenta designada y consumir el plan de comunicación adquirido, comienza ingresando a la plataforma del backend de Sigfox con las credenciales correspondientes a dicha cuenta, ver Figura 11.

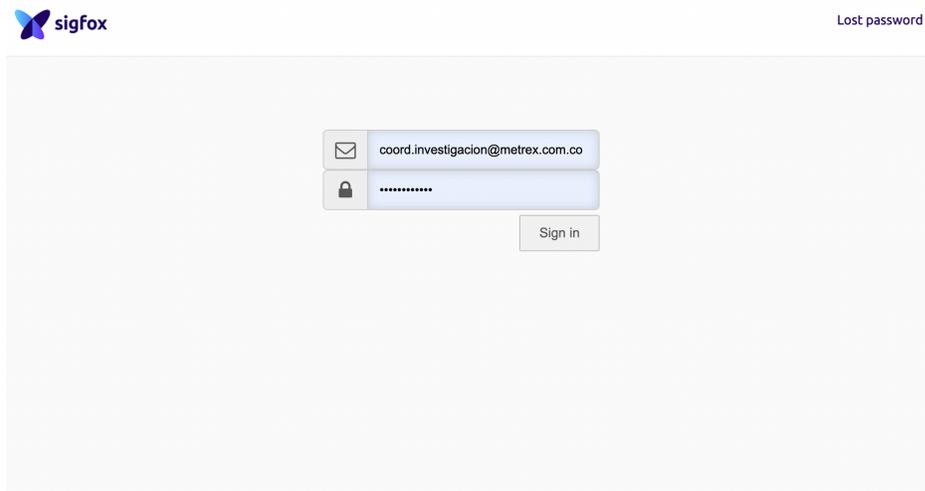


Figura 11. Interfaz de inicio de sesión para ingresar a Backend de Sigfox. Fuente propia.

Una vez dentro del Backend, se accede al apartado de administración de dispositivos denominado "Devices". En esta sección, se selecciona el botón "New" para agregar el dispositivo con el que se realizarán las pruebas. Para ello, se introducen el ID y PAC, que son claves únicas proporcionadas por el proveedor de los módulos de comunicación para cada dispositivo. A continuación, se asigna un nombre al dispositivo y, de manera opcional, se añaden las coordenadas del lugar donde se ubicará el dispositivo, en este caso, se agregan las coordenadas de Metrex. Por último, se seleccionan las opciones de suscripción renovable y activable marcando las casillas correspondientes.

La opción de suscripción renovable implica que el plan de conectividad se renueva automáticamente después de un período específico, generalmente mensual o anual. Esto garantiza la continuidad en la transmisión de datos y evita interrupciones en la conectividad. El usuario no necesita preocuparse por renovar manualmente el plan, ya que se renueva automáticamente a menos que se solicite su cancelación.

Por otro lado, la opción de suscripción activable se refiere a la capacidad de activar o desactivar la conectividad de un dispositivo según sea necesario. Esto proporciona una mayor flexibilidad en la gestión de los dispositivos y su consumo de datos. Si un dispositivo no requiere estar conectado durante un período específico, se puede desactivar temporalmente la suscripción para evitar costos innecesarios. Luego, cuando se vuelva a necesitar la conectividad, se puede activar el dispositivo, ver Figura 12.

The screenshot shows the 'Device - New' form in the Sigfox Backend. The form is titled 'Device - New' and contains the following fields and options:

- Identifier (hex): 44ADB7
- Name: DGMS0044ADB7
- PAC: BB6F34776E1C2A7F
- End product certificate: (empty field with help icon)
- Where can I find the end product certificate?
 - Type: test_sistemas (dropdown menu) Available Tokens: 19
- Lat (-90° to +90°): 2.5080782
- Lng (-180° to +180°): -76.5642019
- Map: Locate on map
- Subscription automatic renewal:
- Activable: (with help icon)
- Buttons: Ok, Cancel

Figura 12. Interfaz de inicio de sesión para ingresar a Backend de Sigfox. Fuente propia.

Después de ingresar los datos requeridos, se envía la solicitud para agregar el dispositivo a la cuenta, seleccionando el botón “Ok”. El Backend de Sigfox procesa la solicitud y genera una respuesta que confirma de manera exitosa la adición del dispositivo.

Una vez agregado el dispositivo, se puede visualizar y revisar los mensajes que envía para verificar que la información transmitida por el módulo de comunicación coincide con la que se muestra en la pantalla del medidor. Esto permite asegurar la precisión y consistencia de los datos capturados y enviados por el dispositivo.

- **Plataforma de gestión y control**

En el proceso de alistamiento de la plataforma de gestión y control, es necesario configurar el callback que establece la conexión entre el Backend de Sigfox y la plataforma en cuestión. Este callback es fundamental para permitir la transferencia de los datos recopilados por los dispositivos conectados a la red hacia la plataforma, asegurando su posterior visualización con claridad y accesibilidad.

El callback funciona como un mecanismo de notificación, encargado de transmitir los datos de los dispositivos vinculados a la red Sigfox hacia la dirección web (URL, *Uniform Resource Locator*) de la plataforma designada. Este direccionamiento se realiza mediante una solicitud que utiliza el protocolo de comunicación HTTP.

La configuración del callback implica definir la URL de destino y los parámetros de comunicación, como el método de envío, que puede ser POST, GET o PUT. La elección del método depende de la naturaleza de la interacción requerida. Para enviar nuevos datos a la plataforma desde los dispositivos, se utiliza el método POST, donde los datos se incluyen en el cuerpo de la solicitud. Por otro lado, si se necesita obtener información existente de la plataforma, se emplea el método GET, que permite solicitar y recibir datos específicos. Asimismo, el método PUT resulta útil cuando se desea actualizar o modificar recursos existentes en la plataforma. En el caso de esta implementación específica, se ha seleccionado el método POST, ver Figura 13

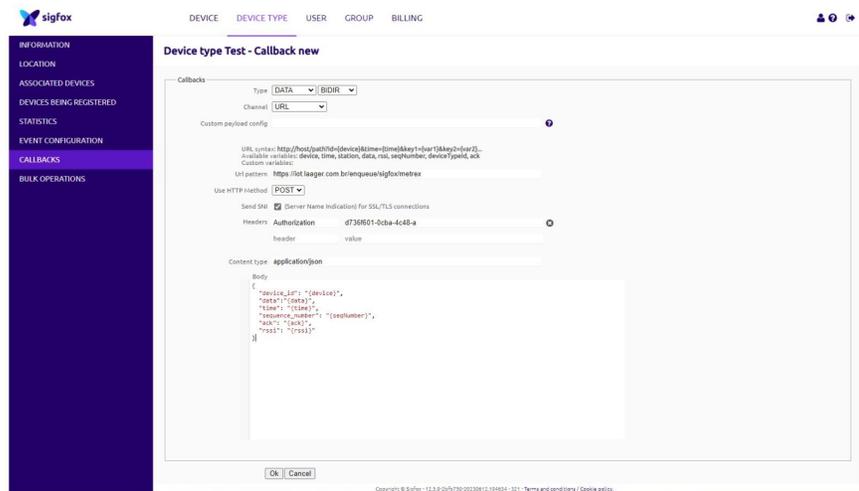


Figura 13. Configuración de callback en Backend de Sigfox. Fuente propia.

Una vez completada la configuración del callback, Laager, en calidad de proveedor de la plataforma de gestión y control, adquiere la capacidad de acceder a los mensajes transmitidos por los dispositivos a través de la red Sigfox. Estos mensajes son recibidos y sometidos a un proceso de interpretación según las instrucciones estipuladas por el proveedor del módulo de comunicación, el cual determina la estructura de la trama transmitida en cada mensaje.

Con la información interpretada y organizada, la plataforma de gestión tiene la capacidad de presentar los datos recibidos acerca de lecturas de consumo, eventos o alarmas de manera comprensible en su interfaz, facilitando su comprensión y análisis.

3.1.2.5. Resultados de la ejecución del plan de pruebas

El plan de pruebas detallado en la tabla 9 se llevó a cabo por primera vez utilizando los equipos de prueba proporcionados por los distintos proveedores. Esta etapa fue fundamental para verificar el correcto funcionamiento de los equipos y proceder con la instalación del piloto de acuerdo a las características técnicas y funcionales establecidas. Durante este proceso, se identificaron posibles fallos y deficiencias en el rendimiento de los equipos, lo que condujo a la generación de informes y solicitudes de mejora y soporte técnico dirigidas a los proveedores. Esta retroalimentación permite garantizar que los equipos a instalar contarán con las mejoras necesarias, asegurando así la calidad y eficiencia del sistema.

- **Resultados pruebas de conectividad en laboratorio**

Con el objetivo de evaluar la calidad de transmisión en diversas condiciones dentro del laboratorio, se establecen dos distintos escenarios para la ejecución de pruebas de funcionamiento. En cada uno de estos escenarios, se verifica la correcta transmisión de la información de lectura de consumo y alarmas antifraude desde el medidor equipado con el módulo de comunicación hacia el backend de Sigfox, así como su adecuada presentación en la plataforma de gestión y control.

Escenario 1: *Prueba de laboratorio sin caja metálica*

- El medidor, equipado con el módulo de comunicación, se coloca en el laboratorio en su posición normal de instalación, sin presentar obstáculos aparentes que puedan interferir en la transmisión. Adicionalmente, se activan las 8 alarmas disponibles en el medidor. Estas alarmas fueron activadas en un orden específico para realizar las pruebas de manera adecuada. El orden de activación fue el siguiente: exceso de flujo, apertura de registro, retiro de batería, flujo inverso, flujo cero, ataque magnético, fugas pequeñas y batería baja, ver Figura 14.



Figura 14. Medidor digital de gas modelo G4 durante la ejecución de la prueba de laboratorio sin caja metálica. Fuente propia.

- La transmisión de mensajes desde el medidor hacia el Backend de Sigfox se realiza activando secuencialmente cada una de las alarmas en el orden mencionado, antes de cada transmisión del módulo de comunicación. Dicho módulo está configurado con una frecuencia de envío de dos mensajes diarios, lo que equivale a un mensaje cada 12 horas, desde que es activado y envía su primer mensaje.
- Finalmente, se verifica que los mensajes con la información de consumo y alarmas antifraude sean recibidos correctamente por el Backend de Sigfox. Esta verificación se lleva a cabo mediante la interpretación detallada de la trama enviada por el módulo de comunicación, la cual se especifica con precisión en la sección 3.1.2.2. donde se detallan las características técnicas y funcionales del módulo de comunicación DGMS , ver Figura 15.

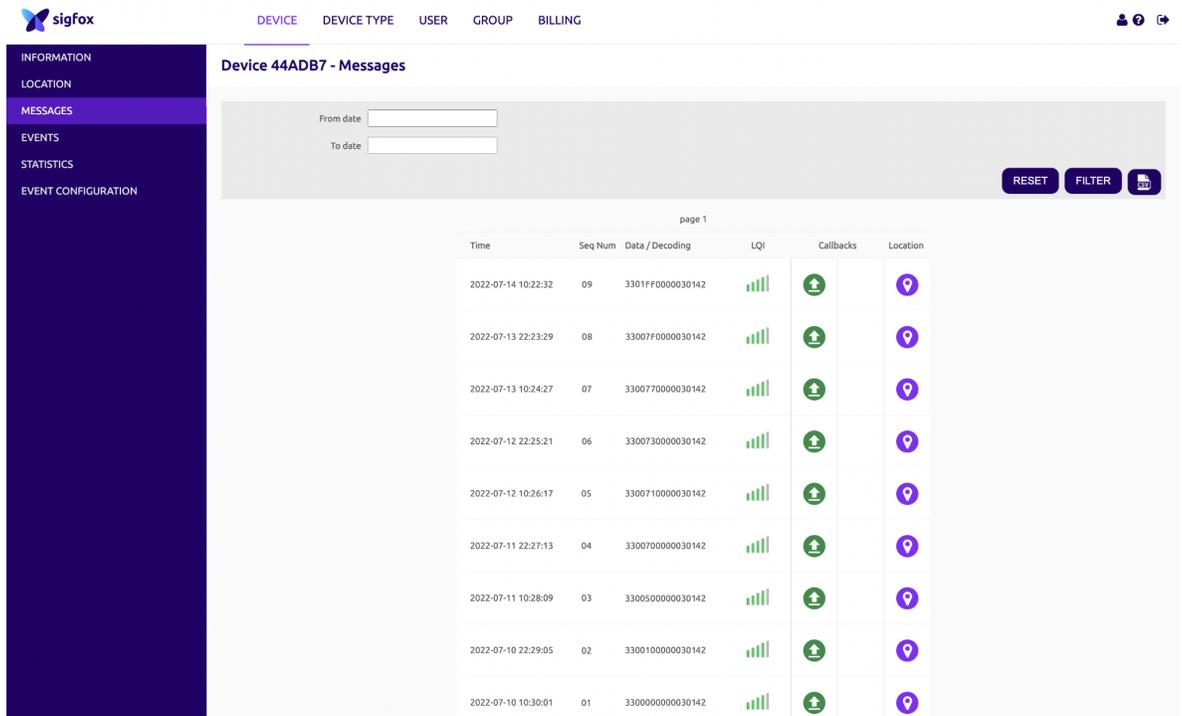


Figura 15. Mensajes enviados al Backend de Sigfox durante la ejecución de la prueba de laboratorio sin caja metálica. Fuente propia.

De acuerdo a lo esperado en la prueba, se recibieron 9 tramas distintas que representan la activación de cada una de las 8 alarmas del medidor de manera sucesiva, comenzando por ninguna alarma activada. Además, mediante la interpretación de la última trama recibida por el Backend de Sigfox, se determina que el estado actual de la batería es de 3.3 voltios (V). Esta misma trama también indica la activación de la alarma del módulo de comunicación por desconexión del medidor. Asimismo, el registro de la activación de todas las alarmas del medidor digital, junto a un consumo de $30,142 m^3$, ver Tabla 13.

Tabla 13. Interpretación de la trama recibida por el Backend de Sigfox. Fuente propia

	Trama							
Datos	33	01	ff	00	00	03	01	42
Descripción	3.3 V	Alarma por desconexión del medidor	Todas las alarmas del medidor digital	0000030,142				

Escenario 2: Prueba de laboratorio con caja metálica

- Se ubica el medidor, equipado con el módulo de comunicación, en el interior de una caja metálica similar a las utilizadas en instalaciones reales, con el fin de simular de la mejor manera posible los obstáculos que podrían interferir en la correcta transmisión de los mensajes. Además, mediante el uso de aire comprimido se simula el flujo de gas natural a través del medidor. Esto permite generar cambios en la lectura del consumo y obtener resultados diferentes a los obtenidos en el escenario previo, ver Figura 16.

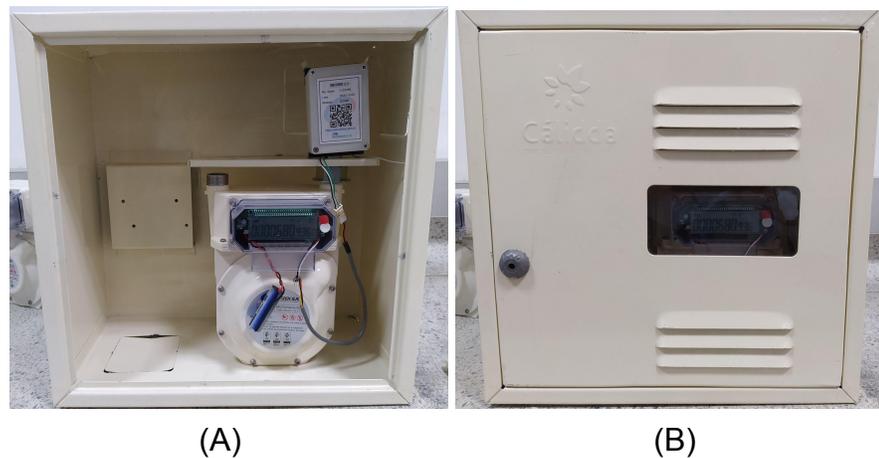


Figura 16. Medidor digital de gas modelo G4 durante la ejecución de la prueba de laboratorio con caja metálica. (A) Caja abierta. (B) Caja cerrada.
Fuente propia.

- Se procede a iniciar el envío de mensajes desde el medidor hacia el Backend de Sigfox mediante el módulo de comunicación con la configuración de frecuencia de transmisión establecida. El envío de mensajes se realiza en dos condiciones distintas: con la caja metálica abierta y con la caja cerrada.
- A continuación, se verifica la correcta recepción de los mensajes que contienen la información de consumo y alarmas anti fraude por parte del Backend de Sigfox. Esta verificación se lleva a cabo mediante la interpretación de la trama, tal como se describió en la prueba del escenario anterior, ver Figura 17.

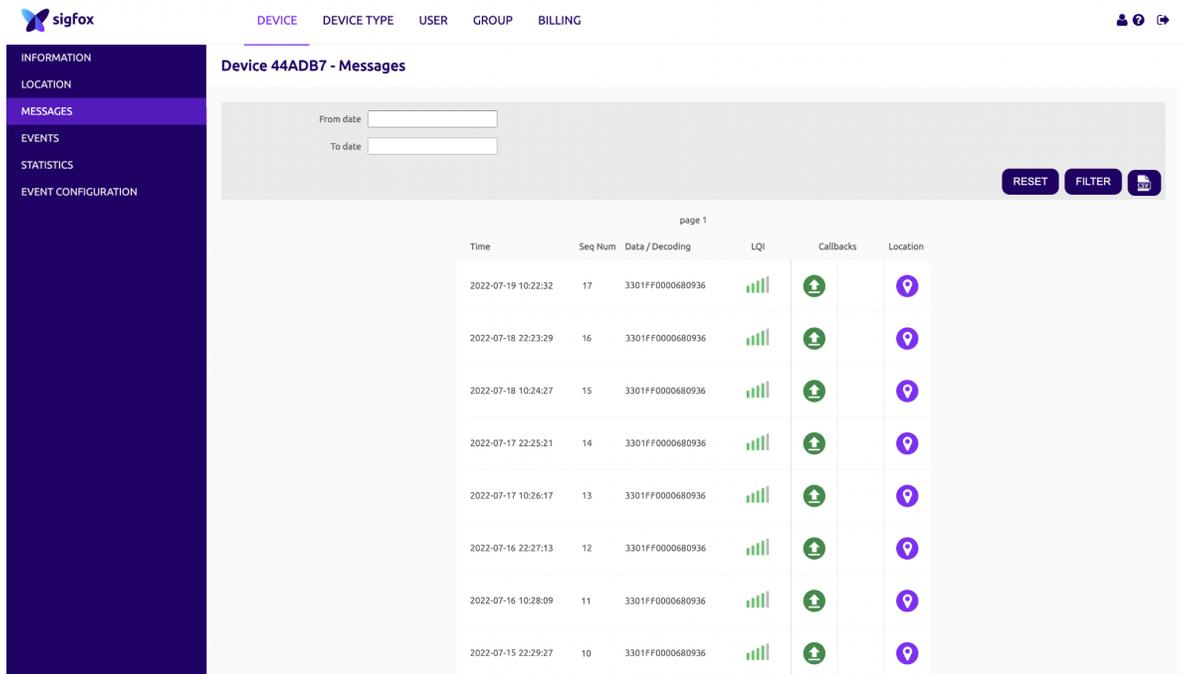


Figura 17. Mensajes enviados al Backend de Sigfox durante la ejecución de la prueba de laboratorio con caja metálica. Fuente propia.

De acuerdo a lo esperado en la prueba, se recibieron en total 8 mensajes. Los primeros cuatro corresponden a la prueba realizada con la caja de metal abierta, mientras que los otros cuatro corresponden a la prueba con la caja cerrada.

Según la interpretación de la trama recibida por el Backend de Sigfox en los 8 mensajes, se establece que el estado actual de la batería es de 3.3 V. Además, se confirmó la activación de todas las alarmas del medidor digital de gas, junto a la alarma del módulo de comunicación que indica la desconexión del medidor. Adicionalmente, el consumo registrado por el medidor de gas es de $680,936 m^3$, ver Tabla 14.

Tabla 14. Interpretación de la trama recibida por el Backend de Sigfox. Fuente propia

	Trama							
Datos	33	01	ff	00	00	68	09	36
Descripción	3.3 V	Alarma por desconexión del medidor	Todas las alarmas del medidor digital	0000680,936				

- **Resultados pruebas de conectividad en campo**

Para evaluar la conectividad del módulo de comunicación en ambientes reales se llevan a cabo las pruebas en campo donde se verifica la correcta transmisión de la información de consumo y alarmas antifraude desde el medidor hacia el backend de Sigfox y la plataforma de gestión y control. Las pruebas mencionadas consisten en el envío de mensajes a diferentes distancias de la Estación Base de Sigfox. Es importante destacar que la estación base utilizada en estas pruebas ha sido instalada por el equipo de WND Colombia en la residencia del Ingeniero Jaime Ordoñez, y se diferencia de la Estación Base Móvil (BTS, *Base Transceiver Station*) utilizada en pruebas anteriores.

En este sentido, se coloca el módulo de comunicación en una ubicación de una instalación real de un medidor de gas. Sin embargo, no es necesario conectar el módulo al medidor de gas dado que el objetivo principal de la prueba es evaluar la capacidad de transmisión del módulo y no la concordancia de los datos transmitidos, ver Figura 18.



Figura 18. Instalaciones de medidores de gas utilizadas para la ejecución de las pruebas en campo. (A) Ubicación 1. (B) Ubicación 2. (C) Ubicación 3. Fuente propia.

Luego, se seleccionan tres distancias diferentes entre el módulo de comunicación y la estación base: 1.34 Km, 4.63 Km y 3,21 Km , ver Figura 19. Luego, se procede a enviar un mensaje desde el módulo. Dado que el módulo no tiene la capacidad de enviar mensajes de forma aleatoria fuera de la frecuencia establecida, se lleva a cabo una acción específica: se desconecta y se vuelve a conectar la

batería del módulo. De esta manera, se garantiza que el mensaje se envíe tan pronto como se restablezca la conexión.

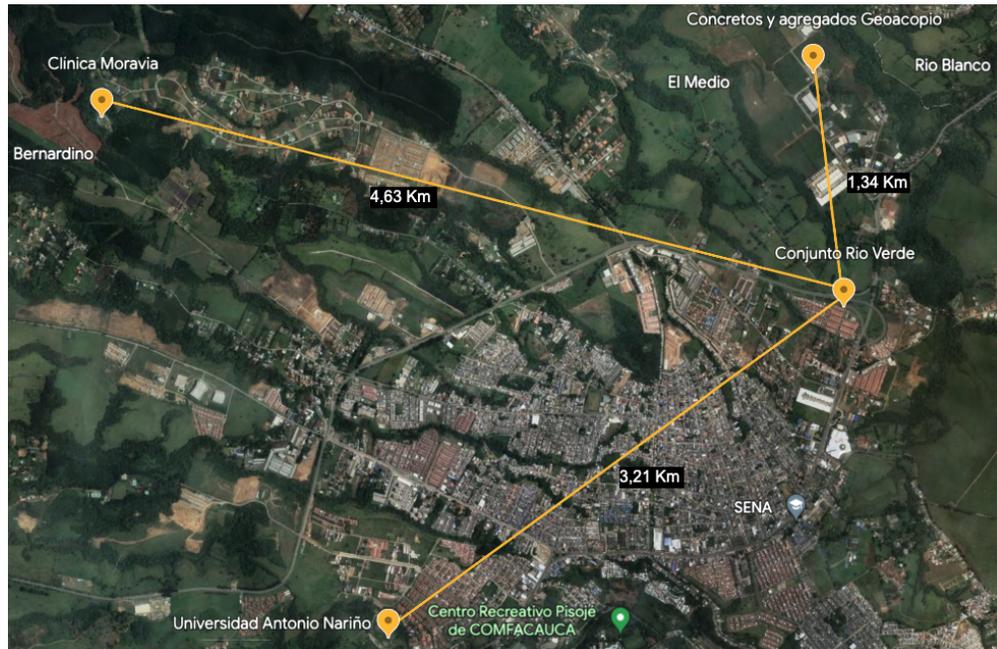


Figura 19. Ubicaciones utilizadas para la ejecución de las pruebas en campo. Fuente propia.

Este enfoque permite evaluar la calidad de la conectividad del módulo de comunicación a distintas distancias de la estación base, replicando situaciones reales de instalación de medidores de gas. Los resultados obtenidos en estas pruebas han constatado que la red tiene un largo alcance, lo cual ha permitido que los mensajes enviados desde el medidor equipado con el módulo de comunicación lleguen exitosamente a la estación base objetivo de las pruebas, así como a otras estaciones base desplegadas en la ciudad. Esto evidencia una diversificación en la conectividad y demuestra la capacidad de la red Sigfox para abarcar múltiples ubicaciones, como se evidencia en la característica **Tasa de recepción por Estaciones Base**.

Por otro lado, al analizar la **Tasa de recepción de mensajes**, se observa que el 100% de los mensajes son recibidos en dos ubicaciones, lo cual indica una excelente calidad de conexión. Sin embargo, en una de las ubicaciones se ha registrado una tasa de recepción del 40%, lo que sugiere que esta ubicación no sería apropiada para la instalación del sistema, ver Tabla 15.

En conclusión, estos resultados proporcionan información valiosa para optimizar el desempeño y la cobertura del sistema de comunicación en campo.

Tabla 15. Resultados de las pruebas de conectividad en campo. Fuente propia

Ubicación	Latitud	Longitud	Tasa de recepción por EB	Tasa de recepción de mensajes
1	2.5056996	-76.563854	1/7	2/5
2	2.5035142	-76.6028378	3/7	5/5
3	2.4767414	-76.5857208	4/7	5/5

- **Resultados prueba de duración real de batería del módulo de comunicación**

Con el fin de obtener información precisa y confiable sobre la duración real de la batería del módulo de comunicación, se llevará a cabo una prueba de duración en condiciones reales. Esta prueba es esencial debido a las siguientes razones electrónicas:

- Planificación y gestión eficientes: Conocer la duración de la batería permite una mejor planificación y gestión de los recursos. Con esta información, se puede determinar con mayor precisión cuándo se debe realizar el reemplazo o recarga de la batería, evitando interrupciones inesperadas en la transmisión de datos.
- Optimización del rendimiento: Al conocer la duración real de la batería, se pueden implementar estrategias para optimizar el rendimiento energético del módulo de comunicación. Esto incluye ajustar la frecuencia de envío de mensajes o implementar técnicas de ahorro de energía, lo que puede prolongar la vida útil de la batería y mejorar la eficiencia del sistema en general.

La prueba mencionada consiste en conectar el medidor digital de pruebas a un módulo de comunicación que envía mensajes a una frecuencia establecida de cada 10 minutos, ver Figura 20. Esto se realiza con el propósito de acelerar el proceso de pruebas y evitar tener que esperar largos periodos de tiempo si se utiliza una frecuencia de 2 veces al día. Es importante destacar que durante la simulación, se activa el flujo de aire que representa el flujo de gas

natural durante 8 horas diarias, desde el inicio de la jornada laboral hasta su finalización. De esta manera, se generan lecturas cambiantes del consumo en los mensajes. Cabe mencionar que ninguna alarma anti fraude se activa hasta que la batería se agote por completo.



Figura 20. Medidor digital de gas modelo G4 durante la ejecución de la prueba de duración real de batería del módulo de comunicación. Fuente propia.

Los resultados obtenidos en esta prueba indican que la duración de la batería del módulo de comunicación DGMS con tecnología Sigfox es de 7,45 años. Durante la prueba, el módulo logró enviar un total de 5443 mensajes, lo cual indica que, según la configuración de la frecuencia de envío de 2 mensajes por día, la duración estimada de la batería alcanza dicho período de tiempo, ver Ecuaciones 7 y 8.

$$2 \frac{\text{mensajes}}{\text{día}} \times 365 \frac{\text{días}}{\text{año}} = 730 \frac{\text{mensajes}}{\text{año}} \quad (7)$$

$$\frac{5443 \text{ mensajes}}{730 \frac{\text{mensajes}}{\text{año}}} = 7,45 \text{ años} \quad (8)$$

- **Resultados pruebas de correspondencia entre los datos en laboratorio**

Con el objetivo de asegurar la precisión de los datos transmitidos desde el medidor de gas natural equipado con el módulo de comunicación hacia la plataforma de gestión y control, se han planteado dos partes distintas de pruebas. La primera parte consiste

en verificar la concordancia exclusivamente de las lecturas de consumo, mientras que la segunda parte se enfoca en analizar únicamente la información relacionada con las alarmas antifraude.

Estas pruebas se llevan a cabo con el propósito de comprobar la fiabilidad y consistencia de los datos enviados y recibidos a lo largo de la arquitectura de red, desde el nodo inicial hasta el nodo final. Mediante el enfoque diferenciado en las lecturas de consumo y las alarmas, se logra una evaluación precisa de la concordancia entre los datos transmitidos y los datos recibidos, teniendo en cuenta la naturaleza específica de la información en cada caso.

Enfoque 1: *Correspondencia de las lecturas de consumo*

Para verificar la concordancia entre el valor del volumen de consumo registrado en el medidor y la plataforma de gestión y control, se requiere realizar una simulación del flujo utilizando aire comprimido como sustituto del gas natural. Además, el módulo de comunicación transmitirá mensajes siguiendo la frecuencia de envío de 2 mensajes por día, tal como ha sido utilizada en la mayoría de la ejecución del plan de pruebas. Esto con el fin de observar cambios en las lecturas registradas en la plataforma de gestión y control.

En esta prueba, al igual que en la anterior, se simula el flujo al inicio de la jornada laboral y se interrumpe al finalizarla. Con el propósito de que el módulo de comunicación envíe la lectura con el flujo simulado al comienzo de cada día, se programará su envío a las 10 am. Esta lectura inicial representará aproximadamente un incremento de un metro cúbico ($1m^3$) en comparación con la lectura anterior.

Adicionalmente, antes de que finalice la jornada, se restablecerá el flujo al medidor añadiendo $1m^3$, lo que ocasiona que la lectura registrada a las 10 pm también experimente cambios. Este proceso se repetirá diariamente durante 5 días consecutivos.

Los resultados obtenidos en la prueba descrita fueron consultados en la plataforma de gestión y control, donde se pudo observar que de los 10 mensajes esperados durante los 5 días de duración de la prueba, con una frecuencia de envío

de 2 mensajes por día, se recibieron 9 mensajes. Este número se encuentra dentro del límite mínimo establecido por el criterio de aceptación, que contempla un margen para posibles pérdidas de mensajes, como sucedió en este caso. Además, es importante destacar que los mensajes recibidos en la plataforma mostraron coherencia con lo registrado por el medidor, lo que demuestra un nivel de precisión del 100%. Esto resalta la fiabilidad y consistencia de los datos obtenidos en la prueba, ver Figura 21.

Central de lecturas

Historial de medición

Ingrese el período y la identificación del cliente que desea consultar

Fecha inicio: 25/07/2022 00:00 | Fecha fin: 29/07/2022 00:00 | ID del Cliente: METREX S.A.

Filtrar | Generar Excel | Información | Atrás

GAS

ID del Cliente	ID Módulo	Nro Medidor (Actual)	Volt / Bat.	Estado	RSSI	Lectura medida	Regreso	Medido en
METREX S.A.	10777053	30082021-2	3.3	TESTE	-65	9,115	0,000	29/07/2023, 22:09:09
METREX S.A.	10777053	30082021-2	3.3	TESTE	-63	8,115	0,000	29/07/2023, 10:09:08
METREX S.A.	10777053	30082021-2	3.3	TESTE	-54	7,115	0,000	28/07/2023, 22:09:08
METREX S.A.	10777053	30082021-2	3.3	TESTE	-64	6,115	0,000	28/07/2023, 10:09:06
METREX S.A.	10777053	30082021-2	3.3	TESTE	-64	4,113	0,000	27/07/2023, 10:00:00
METREX S.A.	10777053	30082021-2	3.3	TESTE	-64	3,113	0,000	26/07/2023, 22:00:00
METREX S.A.	10777053	30082021-2	3.3	TESTE	-64	2,112	0,000	26/07/2023, 10:09:04
METREX S.A.	10777053	30082021-2	3.3	TESTE	-65	1,110	0,000	25/07/2023, 22:09:04
METREX S.A.	10777053	30082021-2	3.3	TESTE	-65	0,110	0,000	25/07/2023, 10:00:00

Figura 21. Mensajes enviados a la plataforma de gestión y control durante la ejecución de la prueba correspondencia de lectura de consumo. Fuente propia.

Enfoque 2: Correspondencia de las alarmas anti fraude

Para evaluar la concordancia de las alarmas, se activarán una a una y se enviará un mensaje a la plataforma cada vez que se active una alarma, hasta alcanzar el total de alarmas. Luego, se repetirá el proceso, activando una alarma, enviando un mensaje y luego desactivándola, para proceder a activar otra alarma distinta, asegurándose de que no haya dos alarmas activadas simultáneamente.

Los resultados obtenidos en esta prueba revelan un nivel de precisión del 100% en la información recibida por la

plataforma de gestión y control con respecto a la activación de alarmas. Esto significa que la plataforma es capaz de detectar y registrar de manera confiable la activación de alarmas de forma consecutiva, así como la activación individual de cada alarma después de un reinicio para evitar la simultaneidad de múltiples alarmas, ver Figura 22 y 23.

Unidad de Negocio	Gerencia	Categoría	ID del Cliente	Nro Medidor (Actual)	Alarma	Descripción	Status	Última Ocurrencia	Comportamiento
Metrex Pruebas	METREX S.A.	Comercial	METREX S.A.		F1	Sobreflujo	ACTIVO	05/08/2022, 10:05:24	Ver
Metrex Pruebas	METREX S.A.	Comercial	METREX S.A.		D7	Apertura de registro	ACTIVO	05/08/2022, 10:05:24	Ver
Metrex Pruebas	METREX S.A.	Comercial	METREX S.A.		G1	Retiro de batería	ACTIVO	05/08/2022, 10:05:24	Ver
Metrex Pruebas	METREX S.A.	Comercial	METREX S.A.		C1	Cambio de sentido de flujo	ACTIVO	05/08/2022, 10:05:24	Ver
Metrex Pruebas	METREX S.A.	Comercial	METREX S.A.		C3	Flujo cero	ACTIVO	05/08/2022, 10:05:24	Ver
Metrex Pruebas	METREX S.A.	Comercial	METREX S.A.		B1	Ataque magnético	ACTIVO	05/08/2022, 10:05:24	Ver
Metrex Pruebas	METREX S.A.	Comercial	METREX S.A.		F2	Fugas pequeñas	ACTIVO	05/08/2022, 10:05:24	Ver
Metrex Pruebas	METREX S.A.	Comercial	METREX S.A.		G2	Batería baja	ACTIVO	05/08/2022, 10:05:24	Ver

Figura 22. Mensajes enviados a la plataforma durante la prueba de correspondencia de alarmas anti fraude con simultaneidad. Fuente propia.

Unidad de Negocio	Gerencia	Categoría	ID del Cliente	Nro Medidor (Actual)	Alarma	Descripción	Status	Última Ocurrencia	Comportamiento
Metrex Pruebas	METREX S.A.	Comercial	METREX S.A.		F1	Sobreflujo	RESUELTO	10/08/2022, 10:05:20	Ver
Metrex Pruebas	METREX S.A.	Comercial	METREX S.A.		D7	Apertura de registro	RESUELTO	10/08/2022, 10:03:24	Ver
Metrex Pruebas	METREX S.A.	Comercial	METREX S.A.		G1	Retiro de batería	RESUELTO	10/08/2022, 10:05:24	Ver
Metrex Pruebas	METREX S.A.	Comercial	METREX S.A.		C1	Cambio de sentido de flujo	RESUELTO	10/08/2022, 10:07:24	Ver
Metrex Pruebas	METREX S.A.	Comercial	METREX S.A.		C3	Flujo cero	RESUELTO	10/08/2022, 10:05:27	Ver
Metrex Pruebas	METREX S.A.	Comercial	METREX S.A.		B1	Ataque magnético	RESUELTO	10/08/2022, 10:02:24	Ver
Metrex Pruebas	METREX S.A.	Comercial	METREX S.A.		F2	Fugas pequeñas	RESUELTO	10/08/2022, 10:05:23	Ver
Metrex Pruebas	METREX S.A.	Comercial	METREX S.A.		G2	Batería baja	ACTIVO	10/08/2022, 10:05:24	Ver

Figura 23. Mensajes enviados a la plataforma durante la prueba de correspondencia de alarmas anti fraude sin simultaneidad. Fuente propia.

La alta precisión en la transmisión de datos hacia la plataforma garantiza la confiabilidad de la información recibida

para tomar decisiones rápidas y efectivas en caso de cualquier situación irregular. Esto contribuye a una operación eficiente de la información de lecturas de consumo y las alarmas antifraude.

Una vez completado el plan de pruebas con los primeros equipos de muestra enviados por los proveedores, no se han reportado fallas que afecten el correcto funcionamiento del sistema AMR. Sin embargo, durante el proceso se identificaron oportunidades de mejora tanto en el módulo de comunicación como en la plataforma de gestión y control. Para lo anterior, se ha elaborado una lista de solicitudes dirigidas a los proveedores, solicitando su intervención para mejorar las características técnicas y funcionales de los equipos. Es fundamental contar con su colaboración para incorporar estas mejoras en el lote de equipos que se utilizará en la instalación.

Estas solicitudes buscan optimizar el desempeño y la eficiencia del sistema, garantizando un funcionamiento óptimo y satisfaciendo las necesidades específicas de los usuarios. La colaboración con los proveedores es esencial para lograr un producto final de calidad y asegurar el éxito en la implementación del sistema de medición inteligente, ver Tabla 16.

Tabla 16. Opciones de mejora a partir del resultado de las pruebas. Fuente propia

Opciones de mejora a partir de los resultados de la ejecución del plan de pruebas			
Elaborado por:	Claudia Daniela Muñoz R.	Aprobado por:	Jaime Ordóñez
Tema:	Solicitudes de mejora dirigidas a los proveedores, a partir de los resultados obtenidos en las pruebas realizadas en laboratorio y en campo sobre conectividad y correspondencia de datos.		
Objetivo:	Optimizar las condiciones de operación de los equipos que componen el sistema AMR para garantizar su correcto funcionamiento.		
Solicitudes			
<ul style="list-style-type: none"> • Incorporar una nueva funcionalidad al módulo de comunicación que permita enviar mensajes fuera de la frecuencia de transmisión programada, evitando así la necesidad de desconectar y volver a conectar la batería para realizar un envío inmediato de datos. Para lograr esto, se sugiere introducir un mecanismo basado en el uso de un imán que active la solicitud de envío de mensaje de manera rápida y sencilla. Con esta mejora, se eliminará la necesidad de manipular la batería y se agilizará el acceso a los datos necesarios en cualquier momento, mejorando así la eficiencia y la comodidad en el uso del sistema. 			

- Personalizar la interfaz de la plataforma de gestión y control para Metrex S.A. con los colores corporativos y elementos gráficos asociados a la empresa. Esta personalización ayudaría a crear una identidad visual consistente y fortalecería la relación entre la plataforma y la marca de Metrex. Asimismo, se sugiere incluir la opción de seleccionar el idioma de visualización de la interfaz, permitiendo que los usuarios puedan utilizarla en su idioma preferido. Esto contribuiría a una mejor experiencia de uso y facilitaría la adopción del sistema por parte de los usuarios.

3.1.3. Ingeniería de detalle

La fase de ingeniería de detalle tiene como objetivo convertir los conceptos y diseños generales del proyecto en instrucciones claras y detalladas para su implementación. Proporciona una base sólida para la ejecución efectiva del proyecto, permitiendo llevar a cabo las tareas requeridas de manera correcta.

3.1.3.1. Acuerdos y condiciones de entrega

De acuerdo a las apreciaciones realizadas por el cliente con respecto a sus expectativas sobre el sistema de medición inteligente AMR a implementar, se ha elaborado una propuesta final formal detallada en el anexo "Propuesta técnico-económica: Piloto de medición inteligente para el servicio de gas natural". Dicha propuesta ha sido aprobada por el Gerente de Gestión de Fraudes y Anomalías de la Empresa A y ha sido firmada por Jaime Ovidio Ordóñez, Director Técnico de Metrex S.A., con el objetivo de asegurar el acuerdo entre ambas partes.

De esta propuesta, se destacan los siguientes acuerdos de instalación:

- En relación a los equipos necesarios para el piloto de medición inteligente, los medidores comerciales de gas tipo digital serán suministrados mediante el contrato regular existente entre la Empresa A y Metrex S.A. Por otro lado, la Empresa A adquirirá los módulos de comunicación a través de una nueva orden de compra a Metrex S.A. Asimismo, Metrex S.A. asumirá la responsabilidad del plan de comunicación Sigfox y del servicio de la plataforma web de gestión y control.
- Se deberá hacer pruebas de cobertura Sigfox para garantizar su existencia en las ubicaciones donde se instalarán los medidores equipados con el módulo de comunicación. Para ello, se contará con la colaboración conjunta de todas las partes involucradas en el proyecto, incluyendo Metrex S.A., WND Colombia y la Empresa A. Esta colaboración permitirá evaluar y aprobar los comercios

prioritarios que formarán parte del piloto. Tanto Metrex S.A como WND Colombia estarán activamente involucrados en las pruebas de campo que se realizarán para seleccionar las ubicaciones más idóneas y de interés para la Empresa A.

- Metrex brindará el acompañamiento necesario durante la instalación de los equipos requeridos para el piloto. Sin embargo, el equipo técnico de la Empresa A será el responsable de instalar los medidores de acuerdo con las directrices establecidas por la normativa vigente. Además, se proporcionarán capacitaciones relacionadas con el funcionamiento del sistema implementado y el uso de la plataforma web de gestión y control.
- Durante el piloto, Metrex S.A., realizará revisiones periódicas al sistema AMR de medición inteligente a través de la plataforma de gestión y control. Estas revisiones se llevarán a cabo mediante un perfil independiente al del usuario asignado a la Empresa A. Además, en caso de ser necesario, se brindará acompañamiento presencial para asegurar el adecuado funcionamiento del sistema.
- Una vez finalizado el piloto de medición inteligente en el servicio de gas natural para la Empresa A, esta tendrá la opción de adquirir los equipos necesarios para la implementación masiva en el servicio que ofrecen.
- Metrex S.A. tendrá acceso a la información de monitoreo de consumos y alarmas a través de la plataforma de gestión y control, con el propósito de evaluar el comportamiento de la tecnología desde una perspectiva técnica. No obstante, actuará como responsable del tratamiento de datos, asegurando el cumplimiento de la normativa vigente que prohíbe el uso de los datos personales propiedad de la Empresa A para fines distintos al desarrollo y mantenimiento de la relación contractual entre ambas empresas. Además, Metrex S.A. y su personal mantendrán la máxima confidencialidad y secreto en relación con los mencionados datos personales pertenecientes a la Empresa A.

Adicionalmente, se presentan a continuación las siguientes estimaciones en relación a la implementación del piloto, tal como se acordó con la Empresa A:

- Cantidad de medidores comerciales de gas natural tipo digital a instalar: 50 medidores, distribuidos entre los modelos G4, G6, G10 y G16.
- Tiempo estimado de ejecución de pruebas de cobertura en puntos preseleccionados para instalación de medidores: 5 días.
- Tiempo estimado de instalación de medidores comerciales de gas natural tipo digital: 5 días
- Tiempo de monitoreo: 3 meses

3.1.3.2. Listado de equipos para el sistema AMR de medición inteligente

En esta sección, se presenta el listado completo de los equipos necesarios para la implementación del sistema AMR de medición inteligente. Se proporcionan detalles sobre las cantidades requeridas de cada equipo, los costos asociados a su adquisición y se identifica el responsable de realizar la inversión correspondiente, ver Tabla 16.

Tabla 17. Equipos y costos finales del piloto aprobados por las partes. Fuente propia

Equipo	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total	Responsable Inversión
Medidor digital de gas G4	10	USD 76	USD 760	Empresa A
Medidor digital de gas G6	10	USD 114	USD 1.140	Empresa A
Medidor digital de gas G10	15	USD 268	USD 4.020	Empresa A
Medidor digital de gas G16	15	USD 301	USD 4.515	Empresa A
Módulo de comunicación Sigfox	50	USD 39	USD 1.950	Empresa A
Plan de comunicación Sigfox	1	USD 0,16 medidor/mes	USD 24	Metrex S.A.
Plataforma de gestión y control	1	USD 0,376 medidor/mes	USD 56,4	Metrex S.A.

3.2. Ingeniería de implementación

3.2.1. Procura

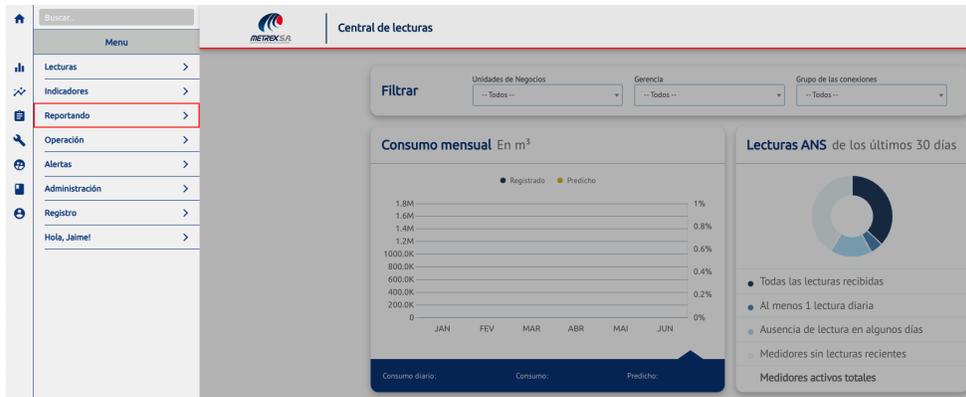
Durante esta fase, se debe asegurar que los recursos necesarios para la implementación del piloto de medición inteligente estén disponibles en las cantidades y calidades requeridas. Por lo tanto, una vez que se han adquirido todos los equipos requeridos, se procede a la preparación de los mismos, teniendo en cuenta el cronograma de actividades.

- Se seleccionan 50 medidores comerciales de gas tipo digital pertenecientes a uno de los lotes incluidos en el contrato regular de suministro pactado con la Empresa A. Estos medidores cuentan con el respectivo certificado de calibración, garantizando su correcta operación.
- Además, se eligen 50 módulos de comunicación DGMS del primer lote proporcionado por el proveedor que incorpora la mejora solicitada tras ejecutar el plan de pruebas. Esta mejora permite el envío de mensajes fuera de la frecuencia de transmisión programada al acercar un imán al módulo.
- A continuación, se inicia el proceso de carga de los módulos de comunicación en el Backend de Sigfox, utilizando las claves ID y PAC proporcionadas por el proveedor para garantizar la identificación precisa de cada dispositivo. Este proceso de carga se lleva a cabo siguiendo las instrucciones detalladas en la sección "Backend de Sigfox" del numeral 3.1.2.4.
- Una vez seleccionados los medidores y cargados los módulos de comunicación en el Backend de Sigfox, se procede a establecer la conexión entre ambos equipos, siguiendo el procedimiento descrito en la sección "Medidor comercial de gas tipo digital equipado con módulo de comunicación" del numeral 3.1.2.4.
- Concluido el proceso anterior, los medidores están equipados con sus respectivos módulos de comunicación y, en teoría, están listos para enviar mensajes a través de la red Sigfox, ya que se encuentran registrados en el Backend. No obstante, para garantizar su correcto funcionamiento, utilizamos la nueva funcionalidad de los módulos. Mediante la aproximación de un imán a cada uno de los 50 dispositivos, se genera el envío de un mensaje fuera del horario establecido (8 am y 8 pm). A través de este envío, se verifica que la

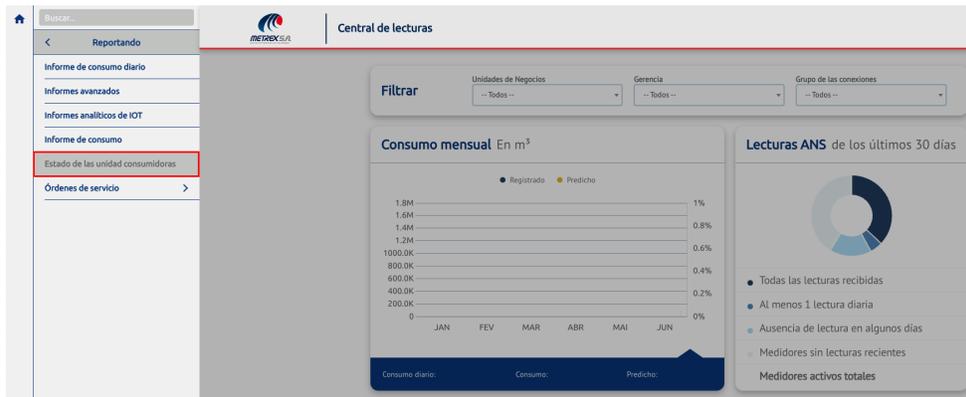
lectura actual registrada por el medidor al finalizar la prueba de calibración coincide con la almacenada en el Backend. Asimismo, se confirma que no se haya activado ninguna alarma. Este proceso se lleva a cabo mediante la interpretación de la trama, como se explica detalladamente en la sección "Módulo de comunicación" del numeral 3.1.2.2. Como resultado de esta actividad, se genera una lista que contiene los seriales de los 50 medidores de gas digitales, los cuales están asociados al ID de los módulos a los que fueron conectados. Este listado se encuentra disponible en el anexo titulado "Lista de seriales de los medidores digitales de gas natural equipados con módulo de comunicación con su respectivo ID", donde se puede consultar de manera detallada.

- Con la lista obtenida en el proceso anterior, se procede a cargar los dispositivos en la plataforma de gestión y control. Dado que ya no se trata solo de un dispositivo que debe ser visualizado en la plataforma, es necesario que Metrex S.A., se encargue del proceso de carga. A diferencia de la ejecución de las pruebas, donde solo se trataba de un medidor y el proveedor se encargó de agregarlo utilizando la configuración del callback, como se explica en la sección 'Plataforma de gestión y control' del numeral 3.1.2.4. Es importante destacar que en aquel momento, esta funcionalidad no estaba disponible en la plataforma web. Por lo tanto, los medidores debían ser cargados por el proveedor después de configurar el callback. Esta funcionalidad fue desarrollada por el proveedor para permitir que Metrex S.A. agregara sus medidores sin depender de ellos.

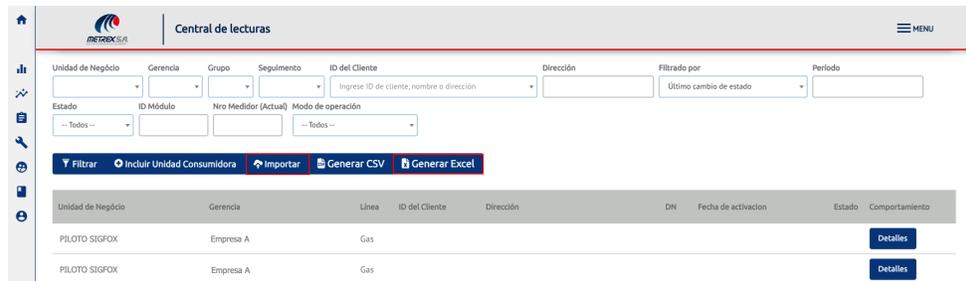
El proceso de carga de dispositivos en la plataforma se lleva a cabo seleccionando la opción "Reportando" del menú desplegable, seguida de la elección de "Estado de las unidades consumidoras". Después, se descarga un archivo Excel utilizando el botón "Generar Excel", el cual contendrá la base de datos de los dispositivos del piloto. En dicho documento, se deben ingresar los datos correspondientes a cada dispositivo, como el número de serie del medidor y su ID de módulo asociado, la unidad de negocio que representa al grupo del piloto (denominado "Piloto Sigfox" para este caso), la ciudad de instalación y el grupo al que pertenece el equipo dueño de los medidores (en este caso, la empresa A). Por último, se importa el archivo Excel diligenciado mediante el botón "Importar", ver Figura 25.



(A)



(B)



(C)

Figura 25. Registro de los medidores equipados con módulo de comunicación en la plataforma de gestión y control. (A) Opción "Reportando". (B) Opción "Estado de las unidades consumidoras". (C) Botones "Generar excel" e "Importar". Fuente propia.

- Después de cargar los dispositivos en la plataforma para realizar el monitoreo deseado, se lleva a cabo el proceso estándar de control de calidad de los medidores, verificando los tornillos, etiquetas, pintura y sellos de seguridad. Posteriormente, los dispositivos se empacan siguiendo los procedimientos habituales antes de ser enviados al proveedor.
- Finalmente, una vez que la Empresa A recibe los equipos, se

encarga de llevar a cabo los procedimientos necesarios para registrar los dispositivos en su sistema SAP y completar el proceso de ingreso de los mismos en dicho sistema.

3.2.2. Construcción

Esta fase se caracteriza por convertir los conceptos y diseños teóricos en una realidad tangible. Su objetivo principal es garantizar que el proyecto se construya de manera consistente con los requisitos y estándares establecidos en las fases anteriores.

En el marco del cronograma establecido para la implementación del sistema de medición inteligente AMR, resulta imprescindible garantizar la adecuada cobertura Sigfox en los puntos de instalación, a fin de asegurar la correcta transmisión de los mensajes. En este sentido, se ha planteado como una actividad fundamental previa a la instalación del piloto, la cual conlleva la selección de las zonas idóneas mediante el análisis de los mapas de calor proporcionados por WND Colombia. Estos mapas, suministrados por WND a Metrex S.A. y compartidos posteriormente con la Empresa A, constituyen una herramienta esencial para determinar las áreas potencialmente cubiertas por las estaciones base de Sigfox. Cada zona se representa mediante una variedad de colores, los cuales indican el nivel de cobertura estimado. Así, el color azul representa la cobertura por una estación base, el verde denota la cobertura por dos estaciones y el rojo señala la cobertura por tres estaciones. Es relevante destacar que dichos mapas de calor son de carácter confidencial y se manejan siguiendo rigurosamente los lineamientos establecidos por la empresa A. Esto se fundamenta en la necesidad de preservar la privacidad de la información, ya que la divulgación de la ciudad y los lugares involucrados en el piloto podría comprometer la confidencialidad de los datos personales propiedad de la Empresa A. Estos aspectos se encuentran detallados específicamente en la sección 3.1.3.1., reafirmando que la información contenida en los mapas de calor es de exclusiva propiedad y uso de la Empresa A, con el propósito de tomar decisiones estratégicas fundamentadas en una evaluación precisa de la cobertura de red.

En consonancia con los mapas de calor, la Empresa A utilizará esta valiosa información para crear una lista preliminar de puntos candidatos destinados a la instalación del piloto del sistema AMR de medición inteligente. Con el objetivo de salvaguardar la efectividad del proyecto y asegurar que se cumplan los requisitos de cobertura, se ha decidido ampliar la cantidad inicial de 50 puntos y considerar un total de 75 ubicaciones. Esta elección

estratégica permitirá contar con suficientes alternativas en caso de que algunas ubicaciones no alcancen la cobertura necesaria. De esta forma, se garantiza una selección sólida de 50 puntos finales que serán instalados. Cabe mencionar que la empresa A basará su selección de puntos en sus propios criterios de interés, tomando en cuenta aquellos clientes que desee monitorear mediante la medición inteligente, siempre dentro de las áreas de cobertura mostradas en los mapas de calor y sean parte del color rojo, lo que significa que dichos puntos contarán con cobertura proveniente de tres estaciones, brindando redundancia y minimizando la posibilidad de pérdida de mensajes.

Una vez que la Empresa A ha elaborado el listado de puntos candidatos para la instalación del piloto, se procede a llevar a cabo las pruebas en campo que permitan corroborar de manera precisa y efectiva si estas ubicaciones cumplen verdaderamente con el requisito de cobertura necesario para su utilización en el proyecto. Estas pruebas de campo se realizan en estrecha colaboración y coordinación con todos los actores involucrados en el proyecto, siendo Metrex S.A. quien ejerce el rol de orquestador, WND Colombia quien se encarga de garantizar la adecuada cobertura y la Empresa A, como principal beneficiaria de los resultados obtenidos.

Es importante destacar que, debido a que las pruebas se llevan a cabo en las ubicaciones reales de instalación, se requiere del apoyo y acompañamiento del equipo de la Empresa A para abordar cualquier inquietud o desconfianza por parte de los usuarios afectados. Este acompañamiento tiene como finalidad informar y explicar a los usuarios sobre la naturaleza de las pruebas y obtener su consentimiento, asegurando la transparencia y el compromiso de la Empresa A con la calidad y el adecuado funcionamiento del servicio de gas natural.

Durante estas pruebas en campo, se utiliza un módulo de comunicación Sigfox con una frecuencia de transmisión de 10 mensajes, programados para enviarse uno cada 20 segundos una vez se enciende el dispositivo. Esta configuración específica tiene como objetivo minimizar los períodos de espera entre el envío de mensajes y acelerar el ritmo de las pruebas, permitiendo una evaluación más ágil de la cobertura y asegurando el funcionamiento de los dispositivos en cada uno de los puntos seleccionados.

Con base en los resultados obtenidos durante la ejecución de las pruebas, se llevará a cabo la selección de los puntos definitivos para la instalación

del piloto de medición inteligente. Con el fin de garantizar la calidad y eficiencia del proyecto, se han establecido criterios de aceptación que servirán como guía en este proceso de selección.

- El primer criterio se basa en el valor de la Relación Señal a Ruido (SNR, *Signal to Noise Ratio*), el cual indica la calidad de la señal de comunicación. Se ha establecido que el valor de SNR de los mensajes recibidos no debe ser inferior a 16 dB. Esta elección se fundamenta en que un SNR dentro de este rango asegura una comunicación óptima y confiable, evitando posibles interferencias o degradación de la señal.
- El segundo criterio se refiere a la ubicación del punto seleccionado. Se descartan aquellos puntos considerados Indoor, es decir, ubicados en espacios interiores. Esta exclusión se basa en el hecho de que los puntos indoor suelen presentar mayores dificultades para obtener una cobertura adecuada y estable, ya que las señales inalámbricas tienden a debilitarse al atravesar estructuras físicas.
- El tercer criterio establece que los puntos definitivos deben ser capaces de recibir al menos el 90% de los mensajes enviados durante el proceso de prueba. Esta condición garantiza un margen de tolerancia para posibles pérdidas o fallas ocasionales, asegurando que la comunicación sea efectiva y confiable en la etapa de implementación del piloto.

Conforme a estos criterios de aceptación, se evaluaron los 75 puntos previamente revisados durante las pruebas. Como resultado, se determinó que 53 de ellos cumplen con todos los criterios y son aptos para la instalación del piloto. Este porcentaje representa más del 70% de los puntos revisados, lo que indica que la red Sigfox demuestra un buen comportamiento de cobertura en campo y se alinea de manera coherente con lo mostrado en los mapas de calor proporcionados.

Para la instalación de los dispositivos en las ubicaciones seleccionadas se requiere una vez más la estrecha colaboración de los tres principales actores involucrados en el proyecto: Metrex S.A., WND Colombia y Empresa A. Con el objetivo de organizar eficientemente esta actividad, se crea una tabla detallada que relaciona cada dirección del piloto con su número de serie de medidor y el ID del módulo de comunicación correspondiente. Además, se especifica el modelo exacto de medidor que se instalará en cada ubicación. Esta tabla desempeña un papel fundamental en la gestión y organización de la información relevante,

facilitando el proceso de instalación y garantizando la correcta identificación y configuración de cada dispositivo.

Asimismo, se ha llevado a cabo un meticuloso trabajo de planificación para establecer el orden secuencial de las instalaciones. Mediante la creación de una ruta estratégica basada en las ubicaciones seleccionadas, se ha diseñado cuidadosamente la secuencia de instalación de los medidores, ver Tabla 18.

Tabla 18. Relación entre la dirección y el número serial de cada medidor. Fuente propia

Secuencia	Serial del medidor	Modelo del medidor	ID del módulo de comunicación	Dirección
1	216414000013	G4	2023-000463	Confidencial
2	216414000014	G4	2023-000464	Confidencial

Durante el proceso de instalación del piloto, el equipo de la Empresa A asume la responsabilidad de retirar los medidores de gas natural instalados en las ubicaciones seleccionadas y reemplazarlos con los medidores comerciales de gas natural tipo digital correspondientes.

Metrex S.A., en su rol de verificador de calidad, desempeña una función esencial durante la instalación. Tan pronto como el equipo de la Empresa A finaliza la instalación de los medidores, el equipo de Metrex S.A. acerca un imán al módulo de comunicación de cada medidor instalado. Este procedimiento genera un envío de mensaje fuera de la frecuencia establecida, lo que permite verificar el correcto funcionamiento y la capacidad de comunicación de los medidores. Utilizando dispositivos móviles y la plataforma de gestión y control, Metrex verifica que los mensajes sean transmitidos y recibidos de manera satisfactoria, asegurando así la integridad y la confiabilidad de los datos.

Por otro lado, WND Colombia se encarga de brindar acompañamiento y soporte técnico durante todo el proceso de instalación. Su experiencia como operadores de la red Sigfox les permite estar alerta ante cualquier novedad o eventualidad relacionada con la conectividad y la cobertura de la red, garantizando así un proceso de instalación fluido y sin contratiempos.

A continuación, se presentan ejemplos concretos de la instalación del piloto de medición inteligente para el servicio de gas con tecnología Sigfox. Estas instalaciones representan un hito importante en el avance de la modernización y eficiencia en la gestión del suministro de gas natural, ver Figura 26.



Figura 26. Instalaciones de medidores equipados con módulo de comunicación Sigfox. (A) Medidor modelo G4. (B) Medidor modelo G6. Fuente propia.

3.2.3. Resultados

De acuerdo al cronograma establecido para la ejecución del piloto, una vez finalizado el proceso de instalación, se lleva a cabo una fase de monitoreo que abarca desde enero hasta marzo de 2023, con el propósito evaluar el desempeño del sistema implementado. Durante este proceso de monitoreo, se realiza un seguimiento constante de la plataforma de gestión y control de datos, donde se reciben y registran los datos recolectados por el sistema de medición inteligente AMR.

Este monitoreo se extiende a lo largo de tres meses, durante los cuales se recopilan y analizan exhaustivamente los datos provenientes de los equipos que conforman el sistema implementado. Estos datos recopilados representan los resultados fundamentales que nos permiten evaluar el comportamiento del sistema y el impacto logrado a través del piloto.

El análisis de los resultados se centra en dos enfoques principales: el consumo de gas natural y las alarmas anti fraude, que indican problemas de funcionamiento o posibles actos fraudulentos.

A continuación, se mostrará como el sistema AMR de medición inteligente basado en la red Sigfox obtuvo resultados que muestran la optimización de la medición del consumo de gas y la detección temprana de problemas técnicos o fraudes en los medidores de gas.

3.2.3.1. Consumo de gas

Con el objetivo de evaluar el impacto en el consumo de gas natural tras la instalación del sistema, se llevó a cabo una evaluación comparativa de los 50 medidores de gas, previa y posterior a la sustitución de los dispositivos mecánicos por sus equivalentes digitales. Con la transición de los medidores de gas desde una versión mecánica hacia una digital, se espera una mejora en la precisión del consumo registrado, la cual se alinea con las características inherentes a estos dispositivos para la prevención de fraudes. Para determinar la existencia de dicho impacto, se realizó una comparación de las medias de consumo de gas natural correspondientes a los 50 medidores de gas, contrastando los períodos anteriores y posteriores a la instalación del sistema. Este análisis comparativo de medias aporta evidencia robusta y cuantificable acerca de las eventuales alteraciones en el consumo de gas que podrían estar asociadas a la implementación del sistema.

Al ejecutar el análisis comparativo de las medias de consumo de gas natural, se observó que en un período de tres meses previos a la instalación de los medidores digitales, el promedio de consumo era de 515,38 metros cúbicos. En contraste, tras la instalación, el consumo promedio en un lapso equivalente se incrementó a 580,75 metros cúbicos. Esta observación sugiere un incremento del 12% en el consumo de gas promedio mensual. Este incremento se debe a distintas razones a causa de la implementación del sistema AMR que ha permitido una captura más precisa y confiable de los datos de consumo, eliminando posibles errores inherentes a la intervención manual. También, el sistema impacta directamente a las manipulaciones fraudulentas que buscaban reducir la lectura de consumo y eran comunes con los medidores mecánicos. Actualmente, pueden ser detectadas y registradas de manera precisa gracias a la tecnología de los nuevos medidores. En consecuencia, las estrategias fraudulentas previamente empleadas por ciertos usuarios ya no resultan viables en el contexto actual, gracias a las capacidades de estos dispositivos modernos, ver Figura 27.

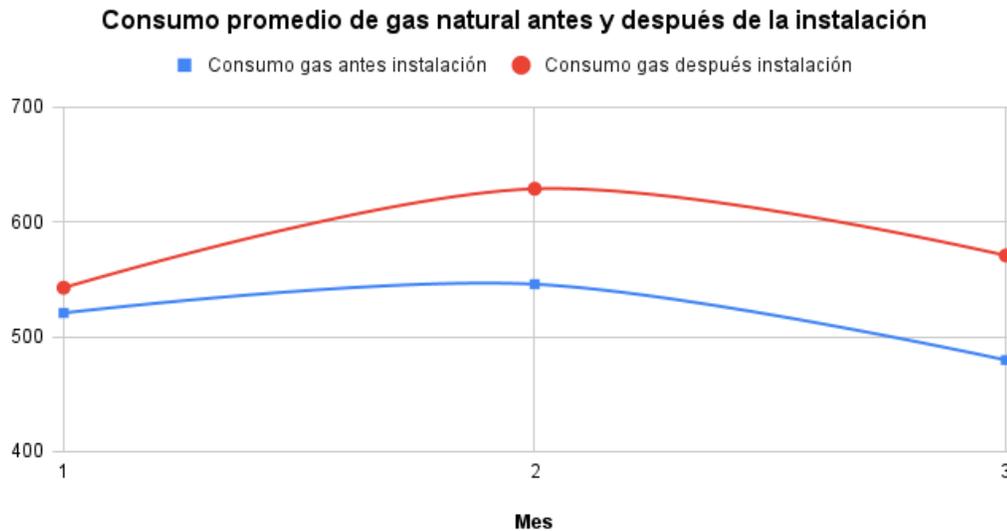


Figura 27. Consumo promedio de gas natural antes y después de la instalación del piloto. Fuente propia.

Este efecto positivo se traduce en una reducción de las pérdidas monetarias por fraude para las empresas distribuidoras de gas natural.

3.2.3.2. Alarmas

Durante el transcurso del piloto, se registraron y transmitieron alarmas antifraude que constituyen un aspecto relevante de los resultados obtenidos. Estas alarmas fueron generadas en respuesta a dos situaciones específicas: la desconexión del medidor y la apertura del registro.

La alarma generada por la desconexión del medidor se analiza con el objetivo de mejorar el seguimiento y la respuesta a casos de fraude, lo cual conlleva a una mayor eficiencia operativa. Durante el piloto, se generaron y registraron dos alarmas de desconexión del medidor en los días 16 y 46, respectivamente. En ambos casos, las alarmas se activaron debido a interrupciones en la conexión entre el medidor de gas y el módulo de comunicación. En la primera alarma, la interrupción fue causada por un corte en el cable que conecta ambos componentes, y en la segunda alarma, el motivo fue el robo del módulo de comunicación. Esta evidencia demuestra cómo el sistema AMR puede detectar y registrar eficazmente estos tipos de incidencias, mejorando así la capacidad de respuesta ante posibles actos de fraude, ver Figura 28.

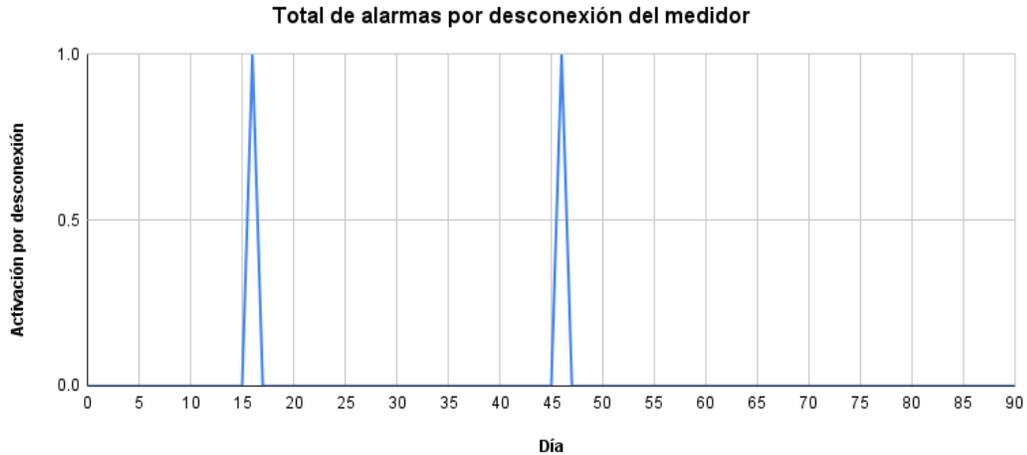


Figura 28. Total de alarmas por desconexión del medidor durante el piloto. Fuente propia.

En resumen, la utilización de las alarmas por desconexión del medidor como parte del sistema AMR permitió mejorar la detección de fraude y lograr una respuesta más ágil y efectiva por parte de la empresa distribuidoras de gas. Esto conlleva a una mayor eficiencia operativa y a la reducción de pérdidas económicas asociadas a prácticas fraudulentas, asegurando así la calidad y confiabilidad del servicio de suministro de gas.

La alarma generada por la apertura del registro tiene como objetivo mejorar el monitoreo y la respuesta ante posibles casos de fraude, lo cual conlleva a una mayor eficiencia operativa. Durante el piloto, se registró un evento de alarma por apertura del registro el día 10, en respuesta a la detección de una manipulación en los registros de consumo de gas. Este ejemplo ilustra cómo el sistema AMR tiene la capacidad de identificar y documentar de manera efectiva este tipo de situaciones, mejorando así la capacidad de reacción frente a posibles actos fraudulentos.

En este caso particular, la activación de la alarma por apertura de registros se produjo debido a una alteración intencionada en los registros de consumo, con el propósito de reducir artificialmente la cantidad de gas registrada. Este hallazgo resalta la habilidad del sistema AMR para detectar anomalías en los registros de consumo, brindando a las empresas distribuidoras de gas una herramienta efectiva para combatir el fraude y tomar medidas de manera inmediata, ver Figura 29.

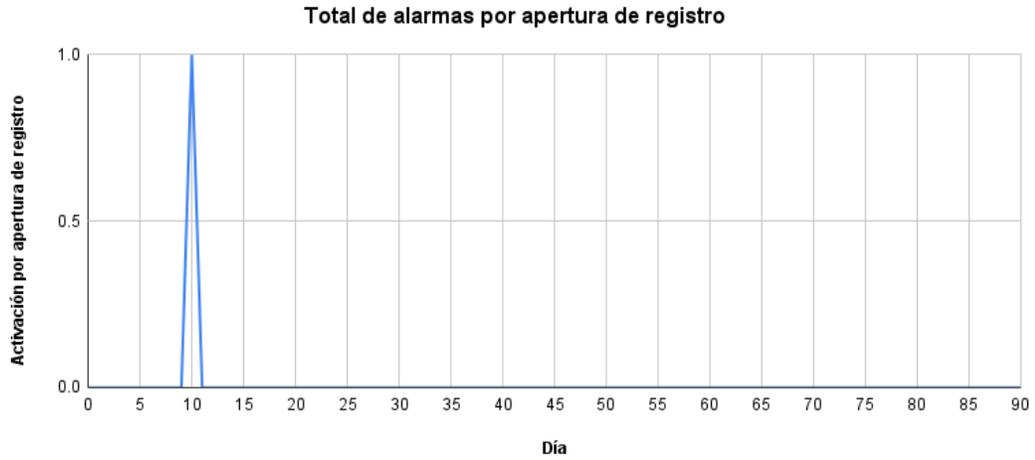


Figura 29. Total de alarmas por apertura de registro durante el piloto. Fuente propia.

En resumen, la implementación de las alarmas por apertura de registros como parte del sistema AMR ha mejorado la detección de fraudes y ha permitido una respuesta más ágil y eficiente por parte de las empresas distribuidoras de gas. Esto se traduce en una mayor eficiencia operativa y en la reducción de pérdidas económicas asociadas con prácticas fraudulentas, garantizando así la calidad y confiabilidad del servicio de suministro de gas.

4. ANÁLISIS TÉCNICO Y FINANCIERO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS AMR EN EL SERVICIO PÚBLICO DE GAS NATURAL

4.1. Análisis técnico

El análisis técnico tiene como objetivo evaluar la viabilidad, efectividad y eficiencia del sistema de medición inteligente AMR implementado. Este análisis se realiza teniendo en cuenta los criterios técnicos mínimos que todo sistema de medición inteligente AMR debería cumplir, los cuales están detallados en la sección 3.1.1.3. Estos criterios incluyen aspectos como la cobertura, capacidad, costos y bajo consumo de energía.

La importancia de este análisis radica en proporcionar una evaluación sistemática y objetiva de la capacidad del sistema para satisfacer las exigencias técnicas de un sistema de medición inteligente AMR. Asimismo, constituye la base fundamental para determinar el impacto técnico del sistema, destacando sus fortalezas y señalando las áreas que requieren mejoras o atención adicional. A partir de esta evaluación técnica, todas las partes interesadas pueden tomar decisiones informadas sobre la optimización del sistema

Se recomienda que, una vez implementado el sistema, el análisis técnico se convierta en una herramienta continua de supervisión y evaluación, en lugar de ser realizado únicamente finalizada la implementación. A medida que el sistema empieza a generar datos, el análisis técnico nos permite conocer el rendimiento y la eficiencia de la red en relación con los criterios técnicos establecidos inicialmente. Esta práctica nos permite monitorear en tiempo real la operación del sistema, identificar posibles problemas o ineficiencias, y tomar medidas correctivas u optimizadoras según sea necesario. De esta manera, el análisis técnico se vuelve una herramienta vital para asegurar que nuestro sistema de medición inteligente AMR, basado en la red Sigfox, cumpla con nuestras expectativas y requisitos a lo largo del tiempo.

4.1.1. Análisis de cobertura

En un sistema de medición inteligente AMR, la cobertura es una característica importante para garantizar una comunicación eficaz entre los medidores y la red. Una cobertura sólida y de alta calidad permite la recopilación eficiente de los datos de consumo y alarmas anti fraude generadas por los medidores digitales. De esta forma, la cobertura puede influir directamente en la capacidad de un sistema para mantener un seguimiento riguroso del consumo de gas natural y detectar actividades fraudulentas. Además, al posibilitar una detección temprana y precisa de irregularidades, una cobertura adecuada puede mejorar notablemente la eficiencia operativa y la seguridad del servicio de gas natural.

El análisis de cobertura se lleva a cabo a través de una métrica de desempeño que se calcula como la proporción entre los mensajes totales recibidos por la red en comparación con el total de mensajes que podrían enviarse a la red. Este índice ofrece una visión precisa del nivel de cobertura de la red. Así, mediante el uso de esta métrica, se puede tener un entendimiento claro y cuantitativo del grado de cobertura de nuestra red.

$$Cobertura = \frac{MRx}{MTx} \times 100 \quad (9)$$

Donde:

MRx = Total de mensajes totales recibidos

MTx = Total de mensajes enviados

Para ilustrar, si la red muestra una cobertura del 100%, esto indica que puede recibir todos los mensajes que los medidores digitales envían. En cambio, si el valor es menor, esto podría ser una señal de que algunos mensajes podrían estar perdidos. Estos mensajes perdidos pueden ser el resultado de una variedad de factores, incluyendo obstáculos físicos, interferencia de señal, o incluso la distancia entre los medidores y la estación base más cercana. Por lo tanto, la evaluación continua y precisa de la cobertura es crucial para mantener la integridad y la eficiencia del sistema de medición inteligente AMR, ver Figura 30.

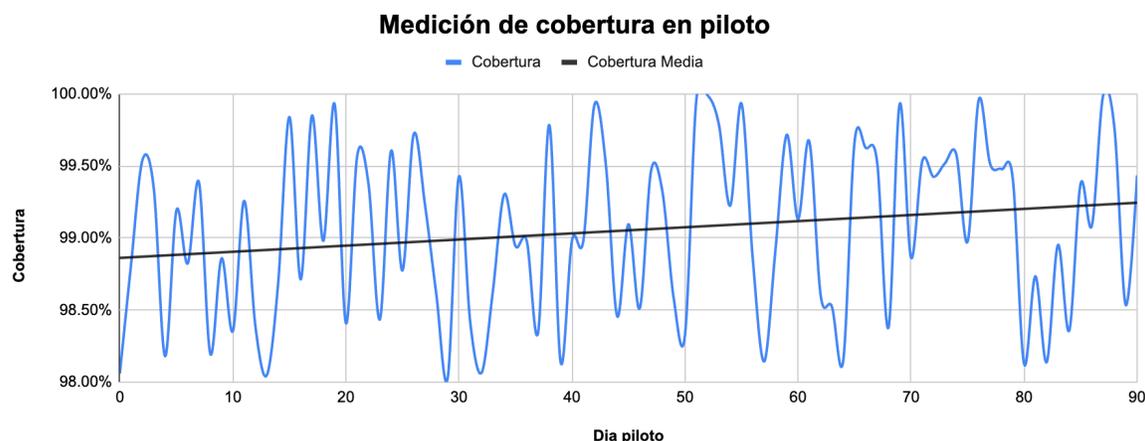


Figura 30. Resultados de cobertura del sistema AMR durante el piloto. Fuente propia.

Durante el transcurso del piloto, el sistema de medición inteligente AMR demostró un alto nivel de cobertura. La media de cobertura fue del 99.05% y la mediana del 99.09%, lo que indica que más del 99% de los mensajes enviados por los medidores de gas digitales fueron recibidos exitosamente por la red. Este alto nivel de cobertura garantiza un seguimiento eficiente y preciso del consumo de gas natural, lo que es esencial para la eficiencia operacional y la detección oportuna de fraudes.

La desviación estándar de 0.0059 señala que los resultados de cobertura a lo largo del piloto fueron consistentes y poco variados. Esto implica que el sistema mostró una robusta fiabilidad y que la cobertura no fue afectada significativamente por variaciones o circunstancias inesperadas. Por tanto, podemos concluir que el sistema AMR es altamente eficaz en términos de cobertura, ofreciendo una red estable y confiable que puede recibir y procesar casi todos los mensajes enviados por los medidores de gas digitales. Sin embargo, cabe destacar que, aunque la cobertura sea del 99%, aún hay un pequeño porcentaje de mensajes que podrían no ser recibidos por la red. Esta pequeña brecha puede ser explorada en futuras investigaciones o mejoras del sistema, buscando alcanzar el 100% de cobertura.

4.1.2. Análisis de capacidad

La capacidad de la red en un sistema de medición inteligente AMR es una característica fundamental que define la cantidad de medidores de gas que la red puede soportar de manera simultánea. Esta característica es de gran importancia, ya que un sistema con una alta capacidad puede manejar un gran número de medidores, lo que a su vez permite un seguimiento y control más exhaustivos del sistema. Además, una alta capacidad es crucial para mantener una eficiencia operacional óptima y garantizar un servicio de medición preciso y constante a todos los clientes del servicio.

El análisis de capacidad se lleva a cabo a través de una métrica de desempeño definida como el número de medidores digitales de gas activos en relación a la cantidad total de medidores digitales de gas instalados. Esta métrica proporciona una evaluación directa de la habilidad de la red para soportar el volumen total de medidores. Esta métrica evalúa la capacidad de la red y su rendimiento en términos de manejo de la carga de medidores.

$$Capacidad = \frac{MA}{MI} \times 100 \quad (9)$$

Donde:

MA = Total de medidores de gas activos.

MI = Total de medidores de gas instalados.

Un alto porcentaje en esta métrica indicaría que la red puede manejar eficientemente un alto número de medidores de manera simultánea. Por otro lado, un porcentaje más bajo en esta métrica podría sugerir que la red está siendo sobrecargada y que la capacidad de la red necesita ser mejorada. Este escenario podría resultar en retrasos en la recopilación de datos o incluso en pérdidas de información, lo cual podría comprometer la precisión de la medición del consumo

de gas y la detección de fraudes. Por lo tanto, es crucial mantener un control constante sobre la capacidad de la red y tomar medidas para mejorarla si es necesario, asegurando así la fiabilidad y eficiencia del sistema AMR, ver Figura 31.

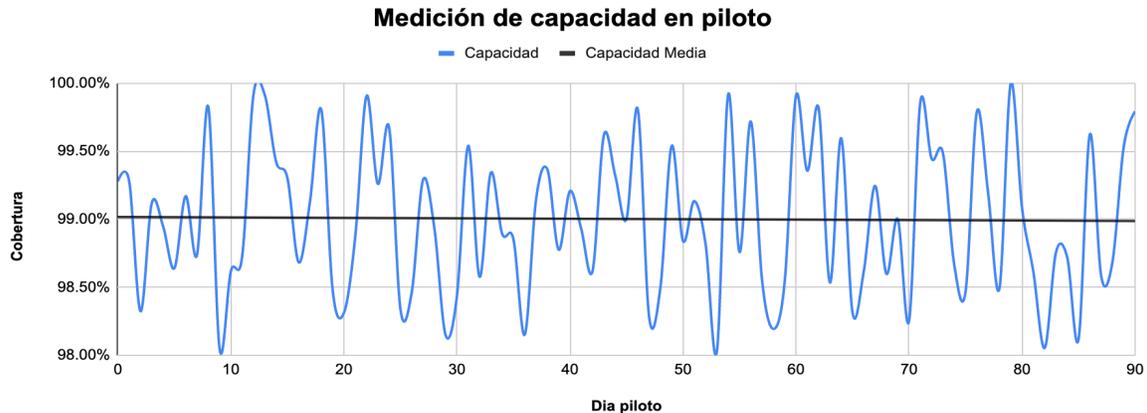


Figura 31. Resultados de capacidad del sistema AMR durante el piloto. Fuente propia.

Los resultados obtenidos en el piloto indican que la capacidad del sistema de medición inteligente AMR es excepcionalmente alta, con una media del 99.07% y una mediana del 99.15%. Esto implica que casi todos los medidores de gas instalados estaban activos y comunicándose eficientemente con la red durante el periodo de prueba. Este resultado es especialmente relevante porque indica que la red tiene una alta capacidad para manejar eficientemente un gran número de medidores, permitiendo un seguimiento y control extensos del consumo de gas natural.

La baja desviación estándar de 0.005460575503 indica que los resultados obtenidos durante el piloto de 90 días fueron consistentemente altos, con poca variación en el rendimiento de la red. Esto significa que la red es muy estable y es capaz de mantener un alto rendimiento constante, a pesar de las posibles variaciones en las condiciones de operación. Esto demuestra la robustez y la fiabilidad de la red, aspectos cruciales para garantizar un servicio de medición preciso y constante a todos los clientes. En resumen, estos resultados destacan la alta capacidad y la consistencia de la red del sistema AMR, fortaleciendo la propuesta de valor de este sistema.

4.1.3. Análisis de costo

El costo es una métrica financiera que tiene un impacto significativo en la viabilidad y rentabilidad de la implementación del sistema. En el caso de un sistema de medición inteligente AMR, el análisis de los costos es esencial para garantizar que la implementación del sistema proporcione un retorno de inversión adecuado. Realizar un análisis detallado de los costos permitirá tomar decisiones

informadas sobre la viabilidad económica de la implementación del sistema AMR de medición inteligente con red Sigfox.

El costo constituye un indicador financiero crítico que influye de manera significativa en la viabilidad y rentabilidad al implementar cualquier sistema. En el contexto de un sistema de medición inteligente AMR, la evaluación de los costos resulta vital para garantizar que su implementación sea económicamente sostenible y genere un retorno de inversión apropiado. Realizar un análisis de costos minucioso permitirá tomar decisiones fundamentadas acerca de la factibilidad económica del despliegue del sistema de medición inteligente AMR con la red Sigfox.

El análisis de costos se aborda en profundidad durante la evaluación financiera. En esta fase se consideran todos los aspectos que pueden afectar el coste total de implementación y operación del sistema, proporcionando así una visión completa y detallada de la inversión necesaria.

En la estructura del sistema de medición inteligente AMR con tecnología Sigfox, que se está implementando en el piloto, se lleva a cabo un análisis pormenorizado de los costos asociados a cada componente. El objetivo es calcular la inversión total que los clientes de Metrex S.A. asumirán en futuras instalaciones y evaluar el impacto de dicha inversión en relación con las pérdidas económicas actuales que enfrentan las empresas proveedoras del servicio de gas natural.

4.1.4. Análisis de consumo de energía

En un sistema de medición inteligente AMR, el consumo de energía es una característica fundamental que define la capacidad de que el sistema funcione durante largos periodos de tiempo sin necesidad de recargas frecuentes o de reemplazar las baterías. Esto adquiere especial relevancia en situaciones en las que los medidores están ubicados en áreas remotas o de difícil acceso, donde las intervenciones para recargar o reemplazar las baterías pueden resultar costosas y logísticamente complicadas. La eficiencia energética de los medidores es, por lo tanto, un componente clave que puede determinar la eficiencia del sistema de medición inteligente.

La eficiencia energética se mide en términos de años de vida útil de las baterías del sistema. Una vida útil más larga significa que los medidores pueden operar durante más tiempo sin necesidad de intervención, lo que se traduce en una mejor eficiencia operacional y reducción de los costos de mantenimiento.

Según las características técnicas del módulo de comunicación, se estima que la vida útil de la batería es de aproximadamente 8 años, variando en función de la frecuencia de transmisión utilizada. Para evaluar esta estimación, se realizó un

cálculo específico en la sección "Resultados prueba de duración real de batería del módulo de comunicación" del numeral 3.1.2.5. En dicha prueba, se empleó una frecuencia de transmisión de dos mensajes por día, y el resultado obtenido fue una vida útil de 7,45 años.

Con base en lo anterior para el piloto implementado con la misma configuración de frecuencia de envío de mensajes, se proyecta que el sistema mantendrá un funcionamiento óptimo hasta junio de 2030. Los datos proyectados sugieren que la batería del módulo de comunicación será capaz de mantener su rendimiento adecuadamente hasta esa fecha, considerando el uso de dos mensajes diarios.

Es importante destacar que el cálculo mencionado se soporta en una prueba concreta y en el resultado obtenido bajo condiciones controladas. No obstante, es relevante tener en cuenta que diversos factores externos y el uso real del sistema pueden influir en su desempeño y durabilidad. Por lo tanto, se recomienda efectuar seguimientos periódicos y un monitoreo constante para garantizar que el sistema opere de manera eficiente, y en caso necesario, realizar ajustes en el diseño electrónico del módulo de comunicación con base en la experiencia adquirida durante el piloto implementado.

4.2. Análisis financiero

En el marco de la arquitectura del sistema AMR de medición inteligente con tecnología Sigfox implementado en el piloto, se realiza un análisis detallado de los costos asociados a cada uno de los componentes. El objetivo es calcular la inversión total que los clientes de Metrex S.A. asumirán en futuras instalaciones, y evaluar el impacto de dicha inversión en relación con las pérdidas económicas actuales que enfrentan las empresas proveedoras del servicio de gas natural.

Para calcular los costos, se consideran los distintos niveles de demanda de los medidores digitales de gas establecidos en un esquema de descuentos progresivos para los precios unitarios de todos los componentes del sistema, considerando el rango de cantidad requerida de dichos componentes.

Este enfoque estratégico brinda a los clientes de Metrex S.A. una visión clara y transparente de los costos asociados a la implementación de un sistema AMR de medición inteligente con tecnología Sigfox. Además, les proporciona la oportunidad de tomar decisiones informadas, teniendo en cuenta tanto los beneficios operativos y económicos, como la relación costo-beneficio a largo plazo.

A continuación, se describen los rangos establecidos en el esquema de descuentos mencionado:

- **Rango 1:** Para compras de 1 a 999 unidades, no se aplica ningún descuento en los componentes.
- **Rango 2:** Para compras de 1,000 a 9,999 unidades, se aplica un descuento del 5% en medidores de gas.
- **Rango 3:** Para compras de 10,000 a 24,999 unidades, se aplica un descuento del 10% en medidores de gas y un descuento del 12,5% en el módulo de comunicación, plan de comunicación y plataforma de gestión y control.
- **Rango 4:** Para compras de 25,000 a 49,999 unidades, se aplica un descuento del 15% por unidad y un descuento del 18,75% en el módulo de comunicación, plan de comunicación y plataforma de gestión y control.
- **Rango 5:** Para las compras de 50,000 a 99,999 unidades, se aplica un descuento del 20% por unidad y un descuento del 25% en el módulo de comunicación, plan de comunicación y plataforma de gestión y control.

La información detallada, que incluye la estructura de descuentos por volumen, permite calcular la inversión total asumida por los clientes de Metrex S.A. que deseen implementar el sistema. Además, se estima el costo considerando diferentes niveles de demanda, lo que facilita la optimización de la inversión a medida que los clientes expandan el sistema brindando así oportunidades de ahorro. A continuación se detalla los costos unitarios del sistema, ver Tabla 19.

Tabla 19. Equipos y costos de los componentes del sistema AMR por niveles de demanda. Fuente propia.

Equipo	Precio Rango 1	Precio entre Rango 2	Precio entre Rango 3	Precio entre Rango 4	Precio entre Rango 5
Medidor digital de gas G4	USD 76	USD 72	USD 68	USD 65	USD 61
Medidor digital de gas G6	USD 114	USD 108	USD 103	USD 97	USD 91
Medidor digital de gas G10	USD 268	USD 255	USD 241	USD 228	USD 214
Medidor digital de gas G16	USD 301	USD 286	USD 271	USD 256	USD 241

Módulo de comunicación Sigfox	USD 39	USD 37	USD 35	USD 33	USD 31
Plan de comunicación Sigfox	USD 0,16 / medidor / mes	USD 0,16 / medidor / mes	USD 0,14 / medidor / mes	USD 0,13 / medidor / mes	USD 0,12 / medidor / mes
Plataforma de gestión y control	USD 0,376 / medidor / mes	USD 0,376 / medidor / mes	USD 0,329 / medidor / mes	USD 0,306 / medidor / mes	USD 0,282 / medidor / mes

Con base en la información proporcionada en la Tabla 19 sobre los costos variables de los componentes del sistema de medición inteligente, clasificados según los rangos de las cantidades, es posible calcular la inversión total necesaria para la hipotética implementación de un sistema que incluye los siguientes componentes: 100 medidores digitales de gas modelo G4, 100 medidores digitales de gas modelo G6, 150 medidores digitales de gas modelo G10, 150 medidores digitales de gas modelo G16, 500 módulos de comunicación Sigfox, un plan de comunicación que incluye soporte anual para 500 dispositivos y una plataforma de gestión y control con seguimiento para 500 medidores digitales.

A continuación se presenta el detalle completo del costo total, donde se especifica la cantidad, el valor unitario y el valor total de cada componente, ver Tabla 20.

Tabla 20. Inversión total por parte del cliente para un sistema de 500 medidores digitales con distintas especificaciones. Fuente propia.

Equipo	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total
Medidor digital de gas G4	100	USD 76	USD 7.600
Medidor digital de gas G6	100	USD 114	USD 11.400
Medidor digital de gas G10	150	USD 268	USD 40.200
Medidor digital de gas G16	150	USD 301	USD 42.150
Módulo de comunicación Sigfox	500	USD 50	USD 25.000
Plan de comunicación Sigfox	500	USD 0,16 / medidor / mes	USD 288
Plataforma de gestión y control	500	USD 0,376 / medidor / mes	USD 677
Total			USD 127.315

Esta es una inversión estratégica para la industria dado que solamente en Bogotá las pérdidas para Gas Natural Vanti superan los \$42,000 millones COP [4]. Estas cifras evidencian la necesidad que tienen las empresas de implementar soluciones

que puedan abordar estos desafíos en el corto plazo. El costo total para la implementación de un sistema de medición inteligente AMR, basado en la red Sigfox, que incluye la capacidad de 500 medidores de gas inteligentes, asciende a USD 127.315. Esta inversión genera ahorros operativos significativos, brinda eficiencia a largo plazo y permite descuentos por volumen al expandir la capacidad de implementación. Por lo tanto, la adopción del sistema AMR tiene un impacto directo y significativo en la reducción de estas pérdidas. Los medidores digitales facilitan una recopilación de datos más precisa, eficiente y en tiempo real, minimizando los riesgos de errores humanos. Además, mediante el registro, monitoreo y seguimiento efectivo de las métricas de consumo en tiempo real, se logra la identificación de patrones de uso y la implementación de estrategias de ahorro de energía. Asimismo, estas herramientas permiten la detección temprana de problemas o irregularidades, como fugas o fraudes. Todo lo anterior, resulta en ahorros significativos para el cliente que implementa el sistema.

La implementación del sistema de medición inteligente AMR otorga a Metrex S.A. ventajas competitivas estratégicas en su portafolio de productos de medidores de gas, gracias a sus atributos competitivos en el mercado colombiano. Los medidores digitales de gas equipados con módulos de comunicación inalámbricos optimizan el proceso de recolección y registro de datos al permitir la recopilación y transmisión automática en tiempo real. Esta capacidad mejora considerablemente la eficiencia operativa de sus clientes al agilizar el análisis y la toma de decisiones basadas en información actualizada.

Además, el sistema proporciona la capacidad de detectar y reportar de manera inmediata cualquier indicio de fraude, lo cual fortalece la seguridad y confiabilidad del sistema de medición de gas. Esta capacidad de alerta temprana no solo permite una respuesta rápida ante posibles irregularidades, sino que también reduce los riesgos asociados con pérdidas y daños, generando confianza y ahorros a los clientes de Metrex S.A.

La arquitectura del sistema AMR mejora la capacidad de los clientes de Metrex S.A para gestionar y analizar datos de consumo de gas de manera eficaz y eficiente. La información recolectada por los medidores se transmite a la nube, donde se procesa y se envía al sistema TI del cliente. Esta centralización de datos facilita los análisis, lo que lleva a una mayor comprensión del comportamiento de consumo y, en última instancia, a la toma de decisiones más informadas. Por último, la capacidad para visualizar los datos recopilados a través de una interfaz de gestión y control en equipos de escritorio o dispositivos móviles proporciona una mayor accesibilidad y flexibilidad. En conjunto, estos beneficios mejoran la eficiencia operativa de los clientes de Metrex S.A, al aumentar la seguridad y confiabilidad de su sistema de medición de gas, y fortalecer su capacidad para

tomar decisiones basadas en datos

Estos atributos distintivos brindan a Metrex S.A una posición estratégica sólida, destacándose como una empresa líder en el mercado al ofrecer soluciones de medición de gas innovadoras y confiables. Mediante la implementación del sistema AMR, Metrex S.A se posiciona favorablemente para satisfacer las demandas del mercado, superar a la competencia y alcanzar el éxito a corto, medio y largo plazo.

Teniendo en cuenta los puntos anteriores, es evidente que la inversión en un sistema de medición inteligente representa una decisión estratégica crucial para las empresas prestadoras del servicio de gas natural. En un mundo cada vez más digitalizado, es muy probable que los medidores inteligentes se conviertan en la norma en lugar de la excepción. Al adoptar esta tecnología de vanguardia, la empresa puede posicionarse como líder en el mercado y estar mejor preparada para adaptarse a las futuras innovaciones tecnológicas.

Con base en esta perspectiva, es fundamental realizar una proyección precisa de los costos de inversión al implementar un sistema AMR de medición inteligente, considerando los distintos niveles de demanda establecidos en el esquema de costo de equipos y componentes de los medidores digitales de gas. Dicha proyección comienza con una cantidad inicial de 500 medidores de gas, de acuerdo con el plan de implementación propuesto, y se extiende hasta alcanzar un máximo de 99,999 medidores de gas. Esta cifra representa el límite máximo de unidades conectadas que el plan de comunicación, gestión y control puede soportar. El cálculo de los costos se realiza considerando los precios unitarios de cada equipo y componente que conforma el sistema, basado en la escala de precios establecida en función del volumen de medidores digitales a implementar. De esta manera, se evalúa de manera precisa el costo total de inversión en relación con la cantidad de medidores a ser incorporados en el sistema, ver Figura 32.

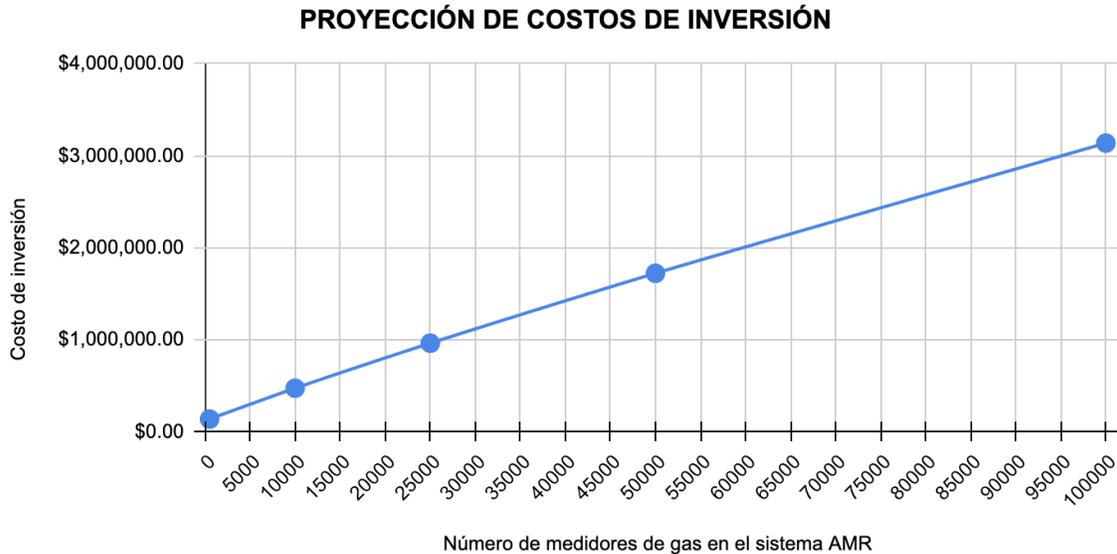


Figura 32. Proyección de costos de inversión para implementar un sistema AMR bajo distintos niveles de demanda. Fuente propia.

La proyección financiera del sistema AMR, considerando varios niveles de demanda, proporciona a Metrex S.A, una herramienta esencial para calcular los costos de inversión derivados de un aumento en la cantidad de medidores de gas integrados en el sistema. Basándose en esta modelación, Metrex S.A. puede establecer un precio de venta apropiado para su sistema de medición inteligente. Este proceso de fijación de precios es crucial, ya que influye directamente en la competitividad de Metrex S.A. en el mercado y en la rentabilidad de los productos y servicios que ofrece para la implementación del sistema.

Considerando la información proporcionada, Metrex S.A. tiene la capacidad de suministrar los componentes necesarios para construir el sistema de medición inteligente utilizando la tecnología Sigfox. Esto posiciona a Metrex S.A. como un proveedor competitivo en el mercado de productos y servicios IoT orientados al sector de servicios públicos domiciliarios.

4.3. Análisis DOFA

Para identificar las fortalezas, debilidades, oportunidades y amenazas del piloto de medición inteligente en el servicio domiciliario de gas natural, el cual utiliza un sistema AMR que opera por medio de una red LPWAN con tecnología Sigfox, se emplea la matriz DOFA. Esta herramienta permitirá analizar de manera detallada los diferentes aspectos involucrados en el proyecto.

El insumo utilizado como fuente de información para completar la matriz DOFA proviene de los resultados obtenidos y de las características detectadas durante la fase de implementación y monitoreo del piloto, ver Tabla 21.

Tabla 21. Matriz DOFA. Fuente propia.

Fortalezas	Debilidades
<ul style="list-style-type: none"> ● La instalación de sistemas AMR brinda a la empresa proveedora del servicio la ventaja de visualizar los datos de consumo de los medidores desde un ordenador, eliminando así la toma de lectura manual y reduciendo los errores humanos asociados a este proceso. ● La instalación de sistemas AMR permite generar estadísticas de consumo diario en lugar de promedios mensuales, que es el enfoque habitual en el proceso de facturación. Esta mejora en la precisión y frecuencia de los datos de consumo posibilita una visión más detallada que favorece una facturación más precisa y justa. ● La activación y notificación de alarmas antifraude permite identificar y detectar de manera temprana comportamientos irregulares. Estas alertas brindan la oportunidad de tomar acciones correctivas para asegurar la integridad y seguridad del sistema de medición inteligente. ● Es posible consultar, a través de la plataforma web, la lectura de todos los medidores o de forma individual en cualquier momento del día. Además, se pueden generar informes que permitan una visualización clara y detallada del comportamiento del consumo de los clientes. ● Más del 99% de los mensajes enviados por los medidores son recibidos exitosamente por la red. Esta alta tasa de cobertura asegura un seguimiento eficiente y preciso del consumo de gas natural, lo que resulta fundamental para mantener la eficiencia operacional y detectar de manera oportuna cualquier intento de fraude. ● La capacidad del sistema AMR es excepcionalmente alta, con una media del 99.07%, lo que indica que casi todos los medidores de gas instalados estaban activos y comunicándose eficientemente con la red durante el piloto. Esta alta tasa 	<ul style="list-style-type: none"> ● Los sistemas AMR soportados bajo la tecnología Sigfox, se ven un tanto limitados debido a que la cobertura depende únicamente del operador de la red. Esta restricción puede sesgar la instalación del sistema, ya que no es posible implementarlo en lugares donde el operador no haya desplegado una antena que brinde la cobertura necesaria. ● La navegación en la plataforma web actual es poco intuitiva debido a que está diseñada para el uso de servicios públicos en Brasil, lo cual ha llevado a que el despliegue de filtros no sea claro y comprensible. Además, se encuentra configurada únicamente en portugués, sin la opción de cambiar el idioma. ● El uso de la tecnología Sigfox implica una limitación en la cantidad de datos transmitidos por mensaje, restringiéndola a unos pocos bytes. Esta característica hace que la tecnología sea adecuada para sistemas AMR que requieren poca información. ● Aunque Sigfox es una tecnología escalable, es importante tener en cuenta que puede presentar limitaciones en cuanto a la capacidad de dispositivos conectados debido a su ancho de banda reducido. Por lo tanto, esta tecnología es más adecuada para sistemas AMR con un número moderado de dispositivos, especialmente aquellos que requieren una baja tasa de transmisión de datos.

<p>de éxito en la transmisión de datos es un indicador sólido de la fiabilidad y rendimiento del sistema.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mediante el bajo consumo de energía de los módulos de comunicación que operan con baterías, es posible esperar una vida útil de 7,45 años. Esta eficiencia energética permite garantizar un funcionamiento sostenible y confiable a lo largo del tiempo, lo cual resulta altamente beneficioso en términos de costos y mantenimiento. • La inversión para la adopción del sistema AMR tiene un impacto directo y significativo en la reducción de las pérdidas de las empresas prestadoras del servicio. Esto se debe a que el sistema genera ahorros operativos significativos y brinda eficiencia a largo plazo. Además, al expandir la capacidad de implementación, se pueden obtener descuentos por volumen, lo que resulta en un beneficio económico adicional para la empresa. 	
Oportunidades	Amenazas
<ul style="list-style-type: none"> • Posibilidad de ampliar el lote de medidores que conforman el sistema AMR de medición inteligente, teniendo en cuenta las ventajas que brinda a la empresa prestadora del servicio y tomando acciones sobre las oportunidades de mejora. • La tecnología Sigfox, empleada en la implementación del sistema AMR de medición inteligente, se destaca por ser una red de bajo consumo y largo alcance utilizada en el ámbito de IoT. Debido a sus características, esta tecnología tiene la oportunidad de complementarse y coexistir con otras tecnologías de comunicación, como LoRaWAN. Esta compatibilidad entre tecnologías brinda flexibilidad y opciones para adaptar el sistema AMR a diferentes escenarios y requisitos de conectividad, asegurando así un óptimo desempeño. • Para Metrex S.A., la implementación de pilotos representa una gran oportunidad para seguir trabajando en la optimización de elementos software y hardware que 	<ul style="list-style-type: none"> • El escaso conocimiento de las empresas sobre soluciones IoT para medición inteligente. Además, el poco riesgo económico que están dispuestas a tomar para implementar nuevas propuestas. • Cobertura de red Sigfox insuficiente en ciertas áreas, lo que podría dificultar la transmisión de datos y afectar la precisión de la medición. Especialmente en zonas remotas o con una infraestructura de red limitada. • La tecnología Sigfox opera en bandas de frecuencia no licenciadas, lo que la hace susceptible a interferencias y ruido en la señal. Estos problemas podrían afectar la fiabilidad de la comunicación y llevar a la pérdida o corrupción de datos de medición. • La transmisión de datos a través de la red Sigfox plantea desafíos en términos de seguridad y privacidad. Existe el riesgo de posibles ataques cibernéticos o violaciones de la privacidad, lo que podría comprometer la integridad y

<p>permitan aumentar su portafolio de productos y servicios relacionados con sistemas de medición inteligente, de cara a un futuro cercano en el que cada vez más elementos están conectados a internet. De esta forma, la empresa estará un paso adelante, considerando una posible reglamentación nacional que exija la instalación de sistemas AMR o AMI en las redes de servicios públicos, similar a lo que ya ha ocurrido en el sector de la energía.</p>	<p>confidencialidad de los datos de medición.</p>
---	---

Una vez creada la matriz DOFA, es posible analizar y extraer los aspectos más relevantes de cada sección:

- La ventaja más destacada tras la instalación del piloto de medición inteligente es la posibilidad para la empresa prestadora del servicio de gas natural de obtener de manera remota los datos de lectura de los medidores instalados en su red y recibir reportes de alarmas por irregularidades. Esto se puede realizar desde cualquier ordenador con acceso a internet, eliminando así los errores asociados al proceso de lectura manual.
- La desventaja más relevante es que los sistemas AMR soportados bajo la tecnología Sigfox se ven limitados debido a que la cobertura depende exclusivamente del operador de la red. Esta restricción puede afectar la instalación del sistema, ya que no es posible implementarlo en áreas donde el operador no haya desplegado una antena para brindar la cobertura necesaria. Esta limitación geográfica puede afectar la viabilidad del proyecto y reducir la eficacia del monitoreo en ciertas ubicaciones.
- La oportunidad más relevante radica en el uso de la tecnología Sigfox en la implementación de los sistemas AMR de medición inteligente. Esta red de bajo consumo y largo alcance, dentro del ámbito de IoT, ofrece la posibilidad de complementarse con otras tecnologías como LoRaWAN. Esta compatibilidad brinda flexibilidad y opciones para adaptar el sistema AMR a diferentes escenarios y requisitos de conectividad, asegurando un óptimo desempeño.
- La amenaza más crítica para los sistemas de medición inteligente con tecnología Sigfox es la cobertura de red insuficiente en ciertas áreas. Esta limitación podría dificultar la transmisión de datos y afectar la precisión de la medición, especialmente en zonas remotas o con una infraestructura de red limitada

5. PROPUESTA MEJORADA HACIA LA MASIFICACIÓN DEL SISTEMA AMR DE MEDICIÓN INTELIGENTE PARA EL SERVICIO DOMICILIARIO DE GAS NATURAL

Tomando en cuenta los resultados del piloto, así como los análisis tanto técnico como financiero realizados, es posible afirmar que la tecnología Sigfox resulta adecuada y eficaz para la adquisición de datos verídicos provenientes de los medidores en tiempo real. Con base en estos hallazgos, se puede utilizar esta tecnología para desarrollar una arquitectura mixta que integra Sigfox y LoRaWAN. Sin embargo, es imperativo abordar y neutralizar las desventajas y amenazas identificadas en el análisis DOFA, para garantizar la optimización del sistema. Esto es posible, a través de la oportunidad de mejora que consiste en hacer una migración hacia una arquitectura de red mixta Sigfox y LoRaWAN que trae consigo beneficios técnicos y funcionales significativos. Con este objetivo en mente, se detalla la arquitectura mixta del sistema AMR de medición inteligente, describiendo las características técnicas y funcionales de sus componentes junto con los beneficios esperados de la implementación de este sistema.

5.1. Arquitectura del sistema AMR de medición inteligente con Sigfox y LoRaWAN

La arquitectura del sistema AMR de medición inteligente mixta se basa en la integración de las redes Sigfox y LoRaWAN. Está compuesta por **medidores digitales de gas** equipados con módulos de comunicación compatibles con las redes Sigfox o LoRaWAN. Estos módulos permiten capturar, recopilar y transmitir de forma inalámbrica la información relacionada con el consumo y alertas antifraude hacia las **estaciones base Sigfox y LoRaWAN**. Posteriormente, mediante una conexión, se establece un enlace inalámbrico entre las **estaciones base para Sigfox o dispositivos gateway para LoRaWAN y la nube** de cada red, en donde se procesa la información y se envía a través de callbacks al **sistema TI del cliente**. Además, se incorporan módulos y funciones esenciales que garantizan el despliegue, la operación y el monitoreo efectivos de la red mixta. Finalmente, la información transmitida remotamente desde los medidores se visualiza a través de la **interfaz de gestión y control de datos** en equipos de escritorio o en dispositivos móviles para el análisis y toma de decisiones. Esta arquitectura mixta mejora la capacidad, cobertura de la red y escalabilidad en el tiempo, optimizando la eficacia de la medición inteligente, ver Figura 33.

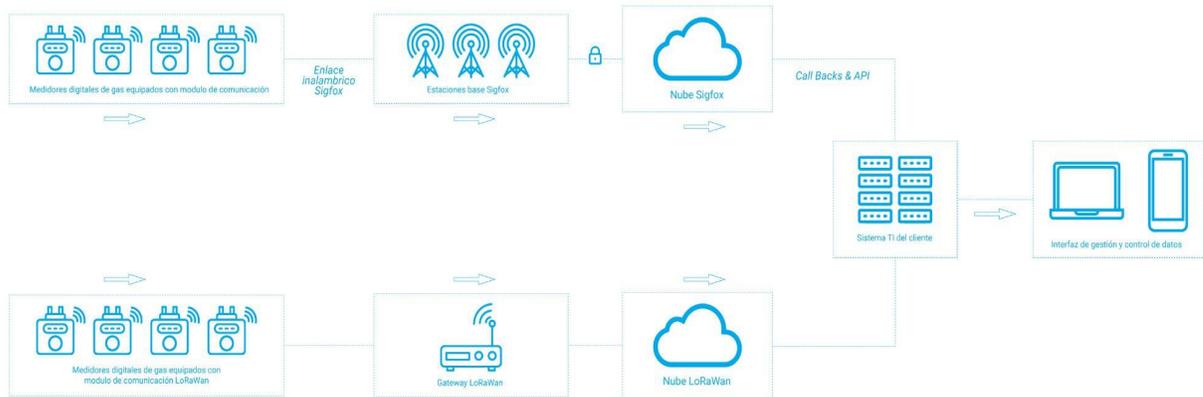


Figura 33. Arquitectura del sistema AMR de medición inteligente con Sigfox y LoRaWAN.
Fuente propia.

5.2. Características técnicas y funcionales de los componentes del sistema AMR de medición inteligente con Sigfox y LoRaWAN

El sistema AMR de medición inteligente mixto incorpora elementos de las redes Sigfox y LoRaWAN. Se aplican las características técnicas y funcionales de los componentes de hardware y software que constituyen la red Sigfox, tal como se implementó en el piloto. Por otro lado, las características técnicas y funcionales de los componentes de hardware y software pertenecientes a la red LoRaWAN serán detalladas en esta sección.

- **Módulo de comunicación LoRaWAN**

El módulo de comunicación fabricado por Laager, que está basado en el protocolo de comunicaciones LoRa y es compatible con LoRaWAN, permite la transferencia de datos de uso y alertas de prevención y detección de fraude desde medidores digitales de gas. Este aparato tiene una notable capacidad de alcance, extendiéndose hasta una cobertura de 5 km bajo condiciones ideales. Además, este módulo tiene un consumo de energía optimizado gracias a una batería de litio de alto rendimiento que puede durar entre 8 a 10 años. A su vez, los transceptores incorporados permiten funciones indispensables como el registro de información, evaluación precisa, diálogo a doble vía, sincronización de fecha y hora, eficiente uso de energía, extensión del rango de señal y sistemas de defensa contra el fraude. Este dispositivo de Laager brinda una respuesta total y fiable para la supervisión y administración eficiente de medidores digitales de gas, ver Figura 34.



Figura 34. Módulo de comunicación basado en tecnología LoRaWAN de Laager. Fuente propia.

- **Gateway**

El Gateway LoRaWAN Wirnet iFemtoCell fabricado por Kerlink, que proporciona una conexión backhaul a través de Wi-Fi 2.4GHz, Ethernet (RJ45), una antena omnidireccional que puede cubrir distancias de hasta 15 km en línea de visión, y una fuente de alimentación de 220 Vac / 12 Vcc con un conector Jack. Está configurado para operar en el espectro de frecuencias de 915-928 Mhz. Estas características permiten desplegar redes interiores públicas o privadas en condiciones difíciles dadas su potencia y robustez. Este dispositivo juega un papel fundamental al recolectar la información de los nodos finales y convertirlas en paquetes IP, que a continuación son transmitidos a las correspondientes estaciones base LoRaWAN, ver Figura 35.



Figura 35. Gateway Wirnet iFemtoCell de Kerlink. Fuente propia.

- **Plataforma web de gestión y control y aplicación móvil**

La empresa Laager proporcionará la plataforma web de gestión y control, así como la aplicación móvil, asegurando la interconexión de módulos de comunicación, gateways LoRaWAN y nube. A través de la plataforma web de gestión y control, se dispondrá de todas las características funcionales y técnicas que detallaron en el piloto, ver Figura 36.



Figura 36. Panel de control principal en la plataforma web de Laager. Fuente propia.

A través de la aplicación móvil, se dispondrá de un panel de control detallado que incluirá gráficos, mapas y tablas con los datos recolectados de los medidores de gas para el seguimiento de métricas, datos de medidores, seguimiento al consumo y alertas antifraude en tiempo real. Adicionalmente, se dispone de un sistema de creación de órdenes de servicio para reportar problemas antes casos de alarma, ver Figura 37.

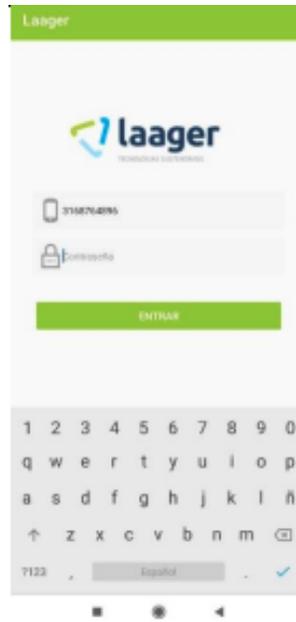


Figura 37. Pantalla de inicio de sesión en la aplicación móvil de Laager. Fuente propia.

6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

6.1. Conclusiones

- Al implementar Sigfox, una tecnología de comunicación LPWAN con amplia cobertura, bajo consumo de energía y transmisión de datos de baja velocidad, es fundamental considerar diversos factores. Entre ellos, destaca la necesidad de tener en cuenta la frecuencia de operación específica de cada región, ya que Sigfox utiliza bandas de frecuencia asignadas a nivel mundial. Además, Sigfox proporciona parámetros configurables que permiten ajustar la red según las necesidades operativas. Estos parámetros abarcan aspectos como el tamaño de mensaje (payload), la tasa de transmisión de datos y otros elementos relacionados con la eficiencia y el rendimiento de la comunicación.
- La correcta definición y ejecución de las fases de un proyecto de ingeniería, es fundamental para determinar su éxito y evaluar de manera sistemática aspectos clave. En el contexto del presente proyecto, se logró evaluar la calidad y conectividad de los datos tanto durante las pruebas como en el monitoreo final tras la instalación del proyecto. Esto permitió obtener una visión completa de la transmisión de datos, asegurando así la fiabilidad y efectividad del sistema implementado. De esta manera, se pudo garantizar la satisfacción del cliente y cumplir con los objetivos del proyecto de manera eficiente y precisa.
- Es evidente que la implementación de la medición inteligente en los servicios públicos domiciliarios es una realidad. Por lo tanto, este tipo de proyectos piloto sienta las bases para futuras implementaciones, permitiendo identificar claramente las ventajas, desventajas y oportunidades de mejora asociadas.
- Una vez comprobado el adecuado funcionamiento de una red que opera bajo la tecnología Sigfox en proyectos de medición inteligente, es posible implementar una arquitectura de red mixta que combine Sigfox y LoRaWAN. Esta combinación ofrece beneficios significativos, como una mayor cobertura al poder utilizar LoRaWAN en áreas donde la red Sigfox aún no está desplegada, así como la escalabilidad en el tiempo al permitir la incorporación de nodos y dispositivos adicionales según los requisitos específicos. Además, la arquitectura de red mixta brinda la posibilidad de integración con otros sistemas que operen bajo tecnologías similares, lo que amplía las oportunidades de conectividad y colaboración en el ecosistema de medición inteligente. Esta combinación estratégica

maximiza los recursos disponibles y proporciona una solución flexible y adaptativa para satisfacer las necesidades cambiantes de los proyectos de medición inteligente.

- La implementación de pilotos de sistemas AMR de medición inteligente proporciona una valiosa oportunidad para identificar y aprovechar las mejoras técnicas y funcionales en los equipos involucrados. Estos pilotos permiten evaluar el rendimiento y la eficacia de los dispositivos en entornos reales, además de obtener la percepción de los clientes sobre la tecnología implementada. Al recopilar datos y retroalimentación durante los pilotos, se pueden realizar ajustes y mejoras necesarios para optimizar el sistema AMR, garantizando una operación más eficiente y satisfactoria.
- La iniciativa de Metrex S.A. en realizar proyectos piloto de medición inteligente tiene una clara proyección de obtener beneficios a futuro, ya que les permitirá mantenerse a la vanguardia y ampliar su oferta de productos y servicios al proporcionar una solución integral para la implementación de sistemas de medición inteligente que a la vez brinde la posibilidad al cliente de adquirir los productos o servicios de manera individual, según sus necesidades o instalaciones existentes. Todo esto, en anticipación a futuras regulaciones y normativas que requerirán a las empresas prestadoras del servicio público de gas realizar la transición de medidores convencionales a medidores que sean compatibles con sistemas AMR o AMI, similar a lo que ya ha sido reglamentado en el servicio público de energía.
- La implementación de sistemas AMR de medición inteligente generan un importante beneficio en la reducción de las pérdidas no técnicas que enfrentan las empresas prestadoras de servicios públicos dado que al eliminar los errores humanos asociados con la recolección manual de datos y los cálculos basados en consumos promedio, se logra una mayor precisión en la medición y facturación de los servicios. Esto resulta en ahorros significativos para las empresas y mejora sus indicadores de eficiencia. Además, la implementación de sistemas con alarmas antifraude, como en este proyecto en particular, proporciona la capacidad de reaccionar rápidamente ante la activación de dichas alarmas. Esto permite detectar y prevenir de manera oportuna cualquier intento de fraude o manipulación en el suministro de servicios, protegiendo así los ingresos y garantizando la integridad del sistema de medición. En resumen, la implementación de sistemas AMR no solo optimiza la gestión de los servicios públicos, sino que también fortalece la confiabilidad y transparencia en el suministro de dichos servicios.

6.2. Trabajos futuros

En el presente trabajo se propone e implementa una solución de medición inteligente dirigido a clientes del mercado comercial del servicio de gas domiciliario, a través del uso de un sistema AMR que opera por medio de una red LPWAN con tecnología Sigfox. Para ello, se ejecutan las fases de un proyecto de ingeniería desde el diseño hasta la implementación. En este sentido, con relación a los resultados obtenidos en el presente investigación, se proponen los siguientes trabajos futuros:

- Implementación del sistema AMR de medición inteligente con tecnología Sigfox en los servicios de agua potable y energía eléctrica.
- Implementación de sistemas AMR de medición inteligente con tecnología Sigfox para el servicio de gas natural en entornos como edificios que cuentan con un armario centralizado que alberga todos los medidores, con el fin de enfrentar desafíos de comunicación que pueden surgir en ubicaciones donde la conectividad puede ser más difícil de establecer.
- Implementación de sistemas AMR de medición inteligente que operen bajo el uso de una red mixta que combine Sigfox y LoRaWAN y que estén dirigidos a clientes del mercado residencial o comercial del servicio público de gas natural en áreas urbanas o rurales.
- Implementación de sistemas AMR de medición inteligente que integren el módulo de comunicación directamente dentro del medidor, eliminando la necesidad de un módulo externo y evitando la posibilidad de fraude a través del cable de conexión, con el fin de garantizar la integridad del dispositivo al eliminar puntos vulnerables que podrían ser aprovechados para su manipulación.
- Implementación de sistemas de medición inteligente que incorporen la capacidad de comunicación bidireccional, es decir sistemas de infraestructura de medición avanzada (AMI, Advanced Metering Infrastructure) que permitan el envío de instrucciones a los medidores a través de una comunicación interactiva entre el centro de gestión y control y los medidores, lo que brinda la posibilidad de enviar y recibir información en tiempo real.

BIBLIOGRAFÍA

- [1]W. A. Martínez Sánchez, “Marco jurídico-práctico de la investigación de delitos contra la prestación de los servicios públicos domiciliarios,” *Estudios Socio-Jurídicos*, vol. 10, no. 2, Jul. 2008, doi: <http://dx.doi.org/10.12804/esj>.
- [2]E. N. Siglo, “‘Cartel del Cobre’: \$62 mil millones en un año,” *El Nuevo Siglo*, Aug. 17, 2019. Accessed: Jun. 13, 2023. [Online]. Available: <https://www.elnuevosiglo.com.co/articulos/08-2019-cartel-del-cobre-62-mil-millones-en-un-ano>
- [3]E. N. Siglo, “\$442 mil millones en pérdidas por robo a servicios públicos,” *El Nuevo Siglo*, Jun. 16, 2019. Accessed: Jun. 13, 2023. [Online]. Available: <https://www.elnuevosiglo.com.co/articulos/06-2019-442-mil-millones-en-perdidas-p-or-robo-servicios-publicos>
- [4]M. Olaya, “Conexiones ilegales de gas generan pérdidas de 25.000 millones al año: Vanti,” *RCN Radio*, Apr. 07, 2021. Accessed: Jun. 13, 2023. [Online]. Available: <https://www.rcnradio.com/economia/conexiones-ilegales-de-gas-generan-perdidas-de-25000-millones-al-ano-vanti>
- [5]O. G. A. Rojas, “Fraude a los servicios públicos: prometen ahorro hasta del 60%,” *El Tiempo*, Jun. 25, 2019. Accessed: Jun. 13, 2023. [Online]. Available: <https://www.eltiempo.com/economia/finanzas-personales/fraude-en-servicios-publicos-va-en-aumento-380588>
- [6]Promigas S.A. E.S.P., “InfoGas,” *Apps on Google Play*, 2022. <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.PromigasISGN> (accessed Jun. 13, 2023).
- [7]X. Pulido, “Extracción Dinámica Óptima De Gas Y Petróleo En Colombia: Retos Del Uso Simultáneo De Dos Recursos Naturales (Optimal Dynamic Extraction of Gas and Oil in Colombia: Challenges of the Simultaneous Use of Two Natural Resources),” *Social Science Research Network*, Sep. 06, 2017. <https://ssrn.com/abstract=3036567>
- [8]Congreso de Colombia, *Ley 142 de 1994*. 1994. Accessed: Jun. 13, 2023. [Online]. Available:

- <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=2752>
- [9]Llanogas S.A E.S.P, “Cadena del gas natural en Colombia .mp4,” *Google Docs*. 2020. Accessed: Jun. 13, 2023. [Online]. Available: https://drive.google.com/file/d/1h6YGY_B53PIPYhd9wfmeSPvx0BaU8-5P/view?usp=sharing&authuser=1&hl=es
- [10]Comisión de Regulación de Energía y Gas, *Resolución No. 011 (12 Feb. 2003)*. 2003. Accessed: Jun. 13, 2023. [Online]. Available: <http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/Indice01/Resoluci%C3%B3n-2003-CREG011-2003>
- [11]Fedesarrollo, C. Caballero A., and D. Reinstein G., “Obstáculos para el desarrollo del gas natural en Colombia,” in *Working Paper Series*, Aug. 2004.
- [12]Comisión de Regulación de Energía y Gas, *Estándares de Calidad en Distribución de Gas Natural y GLP por Redes*. 2003. Accessed: Jun. 13, 2023. [Online]. Available: https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/pdf/doc_creg_0023_2003.pdf
- [13]G. Rodríguez, “Regulación del Servicio de Gas Natural por Indicadores de Calidad,” *GN - La Revista del Gas Natural*, Sep. 06, 1999. Accessed: Jun. 27, 2023. [Online]. Available: http://larevistadelgasnatural.osinerg.gob.pe/articulos_recientes/files/archivos/20.pdf
- [14]Comisión de Regulación de Energía y Gas, “Resolución 240A de 2016 CREG,” *Comisión de Regulación de Energía y Gas CREG*, Dec. 06, 2016. https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_creg_0240a_2016.htm (accessed Jun. 14, 2023).
- [15]Comisión de Regulación de Energía y Gas CREG, *Resolución 127 de 2013 CREG*. 2013. Accessed: Jun. 27, 2023. [Online]. Available: https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_creg_0127_2013.htm
- [16]H. A. Foudeh and A. S. Mokhtar, “Automated Meter Reading and Advanced Metering Infrastructure projects,” in *2015 9th Jordanian International Electrical and*

- Electronics Engineering Conference (JIEEEEC)*, Oct. 2015. Accessed: Jun. 14, 2023. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/jieeec.2015.7470753>
- [17]K. Sridharan and N. Schulz, "Outage Management through AMR Systems Using an Intelligent Data Filter," *IEEE Power Engineering Review*, vol. 21, no. 8, pp. 64–64, Aug. 2001, doi: 10.1109/mper.2001.4311582.
- [18]A. Abdollahi, M. Dehghani, and N. Zamanzadeh, "SMS-based Reconfigurable Automatic Meter Reading System," in *2007 IEEE International Conference on Control Applications*, Oct. 2007. Accessed: Jun. 14, 2023. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/cca.2007.4389381>
- [19]Corporación Ruta N, "Observatorio CT+i: Informe de actualización No. 1 Área de oportunidad Smart Grid en Medición inteligente," Corporación Ruta N, 2016. Accessed: Jun. 28, 2023. [Online]. Available: <https://observatoriocti.rutanmedellin.org/pdfs/MEDICION-INTELIGENTE.pdf>
- [20]A. Parrado Duque, "Propuesta de arquitectura de medición inteligente en sistemas de distribución con generación distribuida en redes eléctricas de baja tensión," 2018. Accessed: Jun. 28, 2023. [Online]. Available: <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2018/172981.pdf>
- [21]M. C. Gutiérrez, "Estudio para la implementación del sistema de infraestructura de medición avanzada (AMI) en la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur C.A.," Universidad Politécnica Salesiana, 2011. Accessed: Jun. 28, 2023. [Online]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/1104/14/UPS-CT002098.pdf>
- [22]Icontec, *Norma Técnica Colombiana NTC 6337-1*. 2019. Accessed: Jun. 28, 2023. [Online]. Available: <https://tienda.icontec.org/gp-medidores-de-gas-parte-1-requisitos-metrologicos-y-tecnicos-parte-2-controles-metrologicos-y-ensayos-de-desempeno-ntc6337-1-2019.html>
- [23]Metrex S.A., "Medidores Comerciales gas," *Metrex S.A.*, Jun. 11, 2020. <https://metrex.com.co/medidores-comerciales-gas/> (accessed Jun. 28, 2023).
- [24]É. Tapias and O. Naranjo, "Tecnologías de medición de fluidos," *5^a Jornada Técnica Internacional de Medición de Fluidos*, 2008.

- [25]U. Raza, P. Kulkarni, and M. Sooriyabandara, “Low Power Wide Area Networks: An Overview,” *IEEE Xplore*, Jan. 16, 2016. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7815384> (accessed Jun. 28, 2023).
- [26]P. Pardal Garcés, “Redes de Área Extensa para aplicaciones de IoT: modelado de comunicaciones Sigfox,” 2017. Accessed: Jun. 28, 2023. [Online]. Available: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/86052/PARDAL%20-%20Redes%20de%20%C3%81rea%20Extensa%20para%20aplicaciones%20de%20IoT:%20modelado%20de%20comunicaciones%20Sigfox.pdf?sequence=1>
- [27]A. Perez, “Cómo avanzan las redes LPWAN en Colombia,” *Bismark Colombia*, Mar. 10, 2021. <https://bismark.net.co/como-avanzan-redes-lpwan/> (accessed Jun. 28, 2023).
- [28]B. S. Chaudhari and M. Zennaro, *LPWAN Technologies for IoT and M2M Applications*. Academic Press, 2020, pp. 1–13.
- [29]O. Q. Muñoz, *Internet de las Cosas (IoT)*. Ibukku, LLC, 2019.
- [30]O. Bautista, J. Elizabeth, R. Reinoso, and M. Augusta, “Implementación de un prototipo de geoposicionamiento con tecnología Sigfox, aplicado a paradas inteligentes y rastreo de niños,” Universidad de las Fuerzas Armadas, 2021. Accessed: Jun. 28, 2023. [Online]. Available: <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/25209/1/T-ESPE-044591.pdf>
- [31]Sigfox, “Sigfox Technical Overview,” Jul. 2017. Accessed: Jul. 28, 2023. [Online]. Available: <https://www.ismac-nc.net/wp/wp-content/uploads/2017/08/sigfoxtechnicaloverviewjuly2017-170802084218.pdf>
- [32]Sigfox, “CASE STUDY - NICIGAS,” *Sigfox 0G Technology*, Jul. 15, 2020. <https://www.sigfox.com/en/news/case-study-nicigas> (accessed Jun. 28, 2023).
- [33]UnaBiz, “Connecting 850,000 Gas Meters in Japan – UnaBiz,” *UnaBiz*, Nov. 29, 2019. <https://www.unabiz.com/nicigas-gas-meter-reader-with-soracom-unabiz/> (accessed Jun. 28, 2023).
- [34]Sigfox, “NICIGAS ANNOUNCES 900,000 SMART GAS METERS BY THE END OF 2020 DESPITE COVID-19,” *Sigfox 0G Technology*, Dec. 02, 2020. <https://www.sigfox.com/nicigas-announces-900000-smart-gas-meters-by-the-end-o>

f-2020-despite-covid-19/ (accessed Jun. 28, 2023).

[35]N. Valencio, "Entrevista com Iguá Saneamento," *Próximo Nível*, Mar. 02, 2023. <https://proximonivel.embratel.com.br/entrevista-com-igua-saneamento/> (accessed Jun. 28, 2023).

[36]EMSERCOTA S.A. E.S.P, "Interventoría de la construcción de la infraestructura para el abastecimiento de agua potable mediante la interconexión al sistema de acueducto operado por la empresa de Acueducto de Bogotá SA E.S.P al municipio de Cota - Primera etapa y actividades de procesos de disponibilidad y factibilidad de servicios públicos domiciliarios," 2019. Accessed: Jun. 28, 2023. [Online]. Available:

http://emsercota.gov.co/contratacion/2019/C.PR-EMSERCOTA%20002-2019/CONDICIONES_TECNICAS_DEFINITIVAS_INTERVENTORIA_INTERCONEXION.pdf

[37]Helbert y Cia, "Somos pioneros en telemetría para medición de agua," *Helbert y Cia*, Sep. 15, 2020. <https://www.helbertycia.com/index.php/blogitem/pioneros-en-telemetry> (accessed Jun. 28, 2023).

[38]Sigfox España, "Consultores en Tecnología instalará 8,000 dispositivos en hogares pertenecientes al municipio de Cota," *UnaBiz Spain*, Aug. 12, 2019. <https://www.sigfox.es/blogs/post/MyWaterWNBBrasil> (accessed Jun. 28, 2023).

[39]EMSERCOTA S.A. E.S.P., "Informe de Gestión 2018 - 2020," Jul. 2020. Accessed: Jun. 28, 2023. [Online]. Available: http://emsercota.gov.co/contratacion/2020/CONTROL%20INTERNO/Informe_de_Empalme_Jos%C3%A9_Mu%C3%B1oz_Emsercota.pdf

[40]WND Group, "Operador Sigfox para Colombia," WND Colombia, 2023. <https://wndgroup.io/colombia/> (accessed Jun. 28, 2023).

[41]Laager Tecnologias Sustentáveis, "Quem Somos," Laager, 2023. <https://www.laager.com.br/quem-somos> (accessed Jun. 28, 2023).

ANEXOS

- Propuesta técnico-económica: Piloto de medición inteligente para el servicio de gas natural.
- Lista de seriales de los medidores digitales de gas natural equipados con módulo de comunicación con su respectivo ID.
- Ficha técnica Módulo LoRaWAN Laager.
- Ficha técnica Gateway Kerlink