UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

TEMA:

"DISEÑO DE SISTEMA AUTO-ENERGIZABLE DE MEDICIÓN Y ENVÍO INALÁMBRICO DEL CONSUMO DEL AGUA POTABLE PARA LA JUNTA DE AGUA SAN LUIS DE LA CARBONERÍA"

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero en Telecomunicaciones

Línea de investigación: Producción industrial y tecnología sostenible

AUTOR:

Fabricio Sebastián Donoso Martínez

DIRECTOR:

MSc. Fabián Geovanny Cuzme Rodríguez

Ibarra, Ecuador 2026

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
DIRECCIÓN DE BIBLIOTECA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO	
APELLIDOS Y NOMBRES:	DONOSO MARTÍNEZ FABRICIO SEBASTIÁN

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	"DISEÑO DE SISTEMA AUTO-ENERGIZABLE DE MEDICIÓN Y ENVÍO INALÁMBRICO DEL CONSUMO DEL AGUA POTABLE PARA LA JUNTA DE AGUA SAN LUIS DE LA CARBONERÍA"
AUTOR (ES):	DONOSO MARTÍNEZ FABRICIO SEBASTIÁN
FECHA: DD/MM/AAAA	27/05/2026
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	■ **PREGRADO** ☐ **POSGRADO**
TITULO POR EL QUE OPTA:	INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES
DIRECTOR /ASESOR:	MSc. FABIÁN GEOVANNY CUZME RODRÍGUEZ MSc. JAIME ROBERTO MICHILENA CALDERÓN

2. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 27 días del mes de mayo de 2026

EL AUTOR:

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
FABRICIO SEBASTIAN
DONOSO MARTINEZ

(Firma)……..

Nombre: Donoso Martínez Fabricio Sebastián

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, 27 de mayo de 2026.

MSC. FABIÁN GEOVANNY CUZME RODRÍGUEZ

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.

(f) ..... Validar únicamente en FirmaEC. Firmado electrónicamente por: FABIAN GEOVANNY CUZME RODRIGUEZ .....

MSc. Fabián Geovanny Cuzme Rodríguez

C.C.: 1311527012

DEDICATORIA

"Todas las estrellas tienen una razón para brillar,

y tú eres la mía cuando me estoy cayendo a pedazos"

Dedico este trabajo a mis padres, por su amor incondicional, su esfuerzo constante y por ser mi apoyo más firme en cada etapa de mi vida. Gracias por creer en mí incluso en los momentos en que yo dudaba de mí mismo.

A Diana, quien nunca me dejó solo y siempre estuvo a mi lado apoyándome en los momentos más difíciles. Gracias por tu compañía, por confiar en mí y por permanecer conmigo cuando más lo necesitaba. Tu apoyo fue fundamental para poder seguir adelante.

Donoso Martínez Fabricio Sebastián

AGRADECIMIENTO

A Dios, por ser mi fortaleza y mi refugio en cada momento de este camino, por sostenerme en las dificultades y guiarme cuando más lo necesitaba.

A mis padres, quienes, aun sin rodearme de lujos materiales, me brindaron lo más valioso: amor, valores y una vida digna. Gracias por todo lo que hicieron por mí y por enseñarme que la verdadera riqueza está en el corazón.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi director de trabajo de titulación, MSc. Fabián Cuzme, y a mi asesor, MSc. Jaime Michilena, por su valiosa guía, apoyo constante y acompañamiento académico, los cuales fueron fundamentales para alcanzar esta meta. Así mismo, deseo reconocer a MSc. Marco Gordillo, ya que, sin su apoyo desde la etapa inicial de este trabajo, no habría sido posible llevarlo a su culminación.

Donoso Martínez Fabricio Sebastián

RESUMEN

El presente trabajo de grado aborda el diseño e implementación de un sistema auto-energizable para la medición y envío inalámbrico del consumo de agua potable, orientado a mejorar la gestión del servicio en la Junta de Agua “San Luis de la Carbonería”. La propuesta surge ante la necesidad de optimizar el proceso de medición, registro y gestión del consumo, reemplazando métodos manuales por una solución automática y energéticamente autónoma.

El sistema está conformado por un nodo sensor encargado de medir el volumen de agua consumida, registrar la información y transmitirla de forma inalámbrica mediante tecnología LoRa hacia un nodo gateway. Posteriormente, los datos son enviados a una plataforma web de gestión a través de una conexión Wi-Fi mediante el protocolo MQTT, para su almacenamiento, visualización y procesamiento, permitiendo el monitoreo del consumo, la administración de usuarios y la generación de información útil para la gestión comunitaria del servicio. Además, el sistema incorpora una fuente de alimentación fotovoltaica con una fuente de almacenamiento de respaldo, lo que posibilita su operación independiente de la red eléctrica.

Las pruebas experimentales mostraron un desempeño satisfactorio del sistema propuesto. La comunicación LoRa presentó una cobertura alta en distancias de 200 a 400 metros, con eficiencias de transmisión entre 100% y 95,50%; a distancias de 600 a 1000 metros, eficiencias de transmisión entre 89,30% y 73,50%; y en distancias superiores a 1200 metros el enlace se mantuvo operativo, llegando a su límite de operación con un PDR de alrededor del 50%. Adicionalmente, la incorporación de AES-128 GCM permitió evaluar la viabilidad de integrar seguridad criptográfica en el enlace LoRa, observándose un incremento de la latencia promedio desde 459,86 ms hasta 724,80 ms a 200 metros, así como una reducción de la confiabilidad hasta 67,30% a 1000 metros, sin comprometer la operatividad funcional del sistema. Así mismo, el sensor de flujo presentó una precisión cercana al 99,6%, con errores promedio entre 0,34% y 0,37%. Como resultado de la evaluación energética, se obtuvo una

autonomía teórica de 18 días en operación base, validada experimentalmente con más de 10 días de funcionamiento continuo, mientras que en condición crítica con activación continua de la electroválvula la autonomía fue cercana a 2 días. En conjunto, los resultados demuestran la viabilidad técnica y funcional del sistema en contextos rurales.

Palabras clave: Automatización de medición de agua, Comunicación LoRa, Sistemas Auto energizados, Monitoreo del consumo de agua, Internet de las Cosas.

ABSTRACT

This study presents the design and implementation of a self-powered system for the measurement and wireless transmission of drinking water consumption, with the aim of improving service management at the “San Luis de la Carbonería” Water Board. The proposal arises from the need to optimize the process of measuring, recording and managing consumption, replacing manual methods with an automated and energy-autonomous solution.

The system consists of a sensor node responsible for measuring water consumption, recording the data, and transmitting it wirelessly via LoRa technology to a gateway node. The data is then sent to a web-based management platform via a Wi-Fi connection using the MQTT protocol for storage, visualization, and processing, enabling consumption monitoring, user management, and the generation of useful information for community-based service management. Additionally, the system incorporates a photovoltaic power supply with a backup storage source, allowing it to operate independently of the electrical grid.

Experimental tests demonstrated satisfactory performance of the proposed system. LoRa communication exhibited high coverage at distances of 200 to 400 meters, with transmission efficiencies ranging from 100% to 95.50%; at distances of 600 to 1,000 meters, transmission efficiencies ranged from 89.30% to 73.50%; and at distances greater than 1,200 meters, the link remained operational, reaching its operational limit with a PDR of around 50%. Additionally, the incorporation of AES-128 GCM allowed for the evaluation of the feasibility of integrating cryptographic security into the LoRa link, with an observed increase in average latency from 459.86 ms to 724.80 ms at 200 meters, as well as a reduction in reliability to 67.30% at 1000 meters, without compromising the system’s functional operability. Likewise, the flow sensor exhibited an accuracy of nearly 99.6%, with average errors between 0.34% and 0.37%. As a result of the energy assessment, a theoretical battery life of 18 days was obtained

in base operation, experimentally validated with more than 10 days of continuous operation, while under critical conditions with continuous activation of the solenoid valve, the battery life was close to 2 days. Overall, the results demonstrate the technical and functional viability of the system in rural contexts.

Keywords: Automation of water measurement, LoRa Communication, Self-Powered Systems, Water consumption monitoring, Internet of Things.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO I: ANTECEDENTES 1
1.1. Tema 1
1.2. Problema 1
1.3. Objetivos 4
1.3.1. Objetivo General 4
1.3.2. Objetivos Específicos 4
1.4. Alcance 4
1.5. Justificación 8
CAPÍTULO II: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA 10
2.1. Modelo actual de Gestión del Agua Potable 11
2.2. Sistemas de Medición del Agua Potable 12
2.2.1. Tipos de Medidores de Agua 12
2.3. Tecnologías Inalámbricas de Transmisión de Datos 15
2.3.1. Wi-Fi 15
2.3.2. Zigbee 16
2.3.3. LPWAN 17
2.4. Sistemas Auto-Energizables 23
2.4.1. Fuentes de energía renovable 24
2.4.2. Técnicas de Ahorro Energético 25
2.5. Elementos de Hardware 27
2.5.1. Microcontrolador 27
2.5.2. Microprocesador 27
2.5.3. Sistema Electrónico 27
2.6. Elementos de Software 29

2.6.1. Software de Sistemas 29
2.6.2. Software de Aplicación 29
2.6.3 Software de Programación 29
2.7. Sistema Fotovoltaico Aislado 30
2.7.1. Estructura de Sistema Fotovoltaico Aislado 31
CAPÍTULO III: DISEÑO DEL SISTEMA 33
3.1. Estudio de la Situación Actual 34
3.2. Requerimientos 36
3.2.1. Requerimientos de Stakeholders 38
3.2.2. Requisitos del Sistema 40
3.2.3. Requisitos de Arquitectura 42
3.3. Selección de Hardware y Software 44
3.3.1. Selección de Hardware 45
3.3.2. Selección de Software 59
3.4. Diagramas de Arquitectura 62
3.4.1. Arquitectura General del Sistema 62
3.4.2. Arquitectura de la Fuente de Alimentación 63
3.4.3. Arquitectura del Nodo Sensor 64
3.4.4. Arquitectura del Nodo Gateway 65
3.4.5. Arquitectura del Cloud 65
3.5. Diagramas de Flujo 66
3.5.1. Diagrama de Flujo del Sistema General 66
3.5.2. Diagrama de Flujo de la Fuente de Alimentación 69
3.5.3. Diagrama de Flujo del Nodo Sensor 70
3.5.4. Diagrama de Flujo del Nodo Gateway 71
3.6. Diagramas de Conexiones 72

3.6.1. Diagrama de conexiones del Nodo Gateway 72
3.6.2. Diagrama de conexiones del Nodo Sensor 72
3.6.3. Diagrama de conexión global 76
3.7. Diseño Placa 77
3.8. Diseño Case 79
3.8.1. Case para el nodo sensor 79
3.8.2. Case para Controlador de Carga Solar 80
3.9. Dimensionamiento de sistema fotovoltaico 82
3.9.1. Consumo diario de los dispositivos 82
3.9.2. Energía diaria requerida 83
3.9.3. Horas solares pico 83
3.9.4. Potencia mínima del panel solar 84
3.9.5. Capacidad mínima de la batería 85
3.10. Comunicación LoRa 86
3.10.1. Potencia del Receptor 88
3.10.2. Perdida de trayecto en espacio libre 89
3.10.3. Pérdidas adicionales 90
3.10.4. Potencia de la señal recibida 92
3.10.5. Relación Señal a Ruido SNR 93
3.10.6. Sensibilidad del receptor 94
3.10.7. Margen del enlace 94
3.10.8. Presupuesto del enlace 95
3.10.9. Zona de Fresnel 97
3.10.10. Ángulo de Azimut 98
3.10.11. Ángulo de Elevación 100
3.11. Simulación en Radio Mobile 101

3.11.1. Nodo sensor 1 – Nodo Gateway 102
3.11.2. Nodo sensor 2 – Nodo Gateway 105
3.12. Almacenamiento 108
3.12.1. Modelo relacional 108
3.13. Dashboard y diseño web 109
CAPÍTULO IV: PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO 114
4.1. Implementación del sistema electrónico 114
4.1.1. Implementación de Nodo Sensor 114
4.1.2. Implementación de Nodo Gateway 116
4.2. Implementación de software embebido 117
4.2.1. Software embebido de Nodo Sensor 117
4.2.2. Software embebido de Nodo Gateway 123
4.3. Implementación de plataforma del sistema 129
4.3.1. Plataforma de gestión 129
4.3.2. Broker de comunicación 130
4.3.3. Almacenamiento de datos 132
4.3.4. Dashboard de monitoreo y control de datos 133
4.4. Instalación de nodos 135
4.4.1. Instalación del Nodo Sensor 136
4.4.2. Instalación del Nodo Gateway 138
4.5. Pruebas de funcionamiento del sistema 138
4.5.1. Pruebas de comunicación inalámbrica 140
4.5.2. Pruebas de funcionamiento de Nodo Sensor 148
4.5.3. Pruebas de funcionamiento de Nodo Gateway 151
4.5.4. Pruebas de funcionamiento de Plataforma web 153
4.5.5. Pruebas de facturación 156

4.5.6. Pruebas de la base de datos 167
4.5.7. Pruebas de control actuador 168
4.5.8. Evaluación energética del sistema auto-energizable 171
4.6. Análisis de precisión del sensor de flujo 181
4.7. Socialización del sistema 186
4.8. Análisis Costo/Beneficio 187
4.8.1. Costo de Hardware 187
4.8.2. Costo de Software 190
4.8.3. Costo de Ingeniería 190
4.8.4. Costo General del Sistema 192
4.8.5. Costo de despliegue total del sistema 193
Conclusiones y Recomendaciones 198
Conclusiones 198
Recomendaciones 202
Bibliografía 204
Anexos 208
Anexo 1: *Certificado de auspicio otorgado por la J.A.A.P. para la aplicación del trabajo de grado en la Comuna San Luis de la Carbonería* 208
Anexo 2: *Formato de entrevista para el análisis de la situación actual en la Comuna* 209
Anexo 3: *Entrevistas realizadas a miembros de la J.A.A.P. San Luis de la Carbonería* 214
Anexo 4: *Infraestructura de almacenamiento y sistema de filtrado de agua potable de la Comuna San Luis de la Carbonería* 229
Anexo 5: *Medidores mecánicos actualmente instalados en las viviendas de la Comuna San Luis de la Carbonería* 230
Anexo 6: *Formato de registro manual de lecturas de consumo de agua potable* 231

Anexo 7: *Comprobantes de facturación del consumo de agua potable emitidos por la J.A.A.P. San Luis de la Carbonería* 232

Anexo 8: *Matriz de revisión de trabajos relacionados* 233

Anexo 9: *Certificado de autorización para la instalación del prototipo del sistema de medición y transmisión inalámbrica del consumo de agua potable en la Comuna San Luis de la Carbonería* 240

Anexo 10: *Pruebas de cobertura de comunicación inalámbrica (LoRA)* 241

Anexo 11: *Mediciones experimentales del sensor de flujo a diferentes caudales* 242

Anexo 12: *Guía de uso de la plataforma web del sistema* 244

Anexo 13: *Formato de encuesta de evaluación de usabilidad y funcionalidad del sistema propuesto* 258

Anexo 14: *Encuesta de evaluación de usabilidad y funcionalidad del sistema propuesto* 261

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. *Árbol de problemas* 3

Figura 2. *Metodología en V* 5

Figura 3. *Arquitectura general del sistema de medición, corte y transmisión inalámbrica del consumo del agua potable* 7

Figura 4. *Modelo de gestión y prestación del servicio del agua potable y saneamiento* 11

Figura 5. *Medidor mecánico de agua potable* 13

Figura 6. *Medidor electromagnético de agua potable* 14

Figura 7. *Medidor de agua electrónico efecto Hall* 15

Figura 8. *Topología LoRa WAN* 21

Figura 9. *Arquitectura de Sistema Electrónico* 28

Figura 10. *Esquema de sistema fotovoltaico aislado* 30

Figura 11. *ESP32 LoRa Heltec V3* 48

Figura 12. *Sensor de Flujo YF-S201* 50

Figura 13. *Electroválvula* 52

Figura 14. *Módulo DS1307* 54

Figura 15. *Celda Fotovoltaica 12V – 80W* 57

Figura 16. *Batería 12V 40Ah* 59

Figura 17. *Arquitectura general del sistema* 63

Figura 18. *Arquitectura de la fuente de alimentación* 64

Figura 19. *Arquitectura del nodo sensor* 64

Figura 20. *Arquitectura del nodo Gateway* 65

Figura 21. *Arquitectura del cloud* 66

Figura 22. *Diagrama de flujo general de medición del sistema* 67

Figura 23. *Diagrama de flujo de corte del servicio* 68

Figura 24. *Diagrama de flujo de reconexión del servicio* 68
Figura 25. *Diagrama de flujo de la fuente de alimentación* 69
Figura 26. *Diagrama de flujo del nodo sensor* 70
Figura 27. *Diagrama de arquitectura lógico del nodo Gateway* 71
Figura 28. *Diagrama de conexión del nodo Gateway* 72
Figura 29. *Diagrama de conexiones de la fuente de alimentación* 73
Figura 30. *Diagrama de conexiones del sensor de flujo* 74
Figura 31. *Diagrama de conexiones de la electroválvula* 75
Figura 32. *Diagrama de conexiones del módulo RTC* 75
Figura 33. *Diagrama de conexiones general* 76
Figura 34. *Diagrama esquemático del circuito* 77
Figura 35. *Diseño de PCB* 78
Figura 36. *PCB vista superior* 78
Figura 37. *PCB vista inferior* 79
Figura 38. *Case del nodo sensor vista superior* 80
Figura 39. *Case del nodo sensor vista frontal* 80
Figura 40. *Case para controlador de carga solar vista frontal* 81
Figura 41. *Case para controlador de carga solar vista superior* 81
Figura 42. *Intercambio de paquetes LoRa* 87
Figura 43. *Ubicación geográfica de Nodos Sensores y Gateway* 87
Figura 44. *Configuración de coordenadas y tamaño de mapa* 101
Figura 45. *Simulación de los nodos y del enlace de comunicación* 102
Figura 46. *Propiedades de Red para Nodo Gateway – Nodo Sensor 1* 102
Figura 47. *Configuración de enlace para Nodo Gateway – Nodo Sensor 1* 103
Figura 48. *Resultados de simulación de Nodo Gateway – Nodo Sensor 1* 104

Figura 49. *Propiedades de Red para Nodo Gateway – Nodo Sensor 2* 105
Figura 50. *Configuración de enlace para Nodo Gateway – Nodo Sensor 2* 106
Figura 51. *Resultados de simulación de Nodo Gateway – Nodo Sensor 2* 107
Figura 52. *Diagrama entidad relación* 108
Figura 53. *Ventana de inicio de sesión* 109
Figura 54. *Ventana de inicio* 110
Figura 55. *Ventana de Historial de Consumo* 110
Figura 56. *Ventana de Administración de Facturación* 111
Figura 57. *Ventana de Administración de Gateways* 112
Figura 58. *Ventana de Administración de Clientes* 112
Figura 59. *Ventana de Administración de Medidores* 113
Figura 60. *Ventana de Monitoreo de Dispositivos* 113
Figura 61. *Integración de componentes electrónicos del nodo sensor* 115
Figura 62. *Integración del controlador de carga* 115
Figura 63. *Integración del case de protección* 116
Figura 64. *Integración del nodo Gateway* 117
Figura 65. *Librerías utilizadas en nodo sensor* 118
Figura 66. *Parámetros de operación de enlace de comunicación LoRa* 118
Figura 67. *Identificación del nodo y banderas de control* 118
Figura 68. *Almacenamiento local de datos* 119
Figura 69. *Configuración para sensor de flujo* 120
Figura 70. *Configuración para Módulo RTC* 121
Figura 71. *Lógica para envió programado de datos* 122
Figura 72. *Construcción del payload, envió por LoRa y guardado persistente* 122
Figura 73. *Rececpcion de comandos desde el servidor* 123

Figura 74. *Librerías utilizadas en nodo Gateway* 124
Figura 75. *Credenciales WiFi y parámetros MQTT* 124
Figura 76. *Conexión WiFi* 125
Figura 77. *Conexión MQTT y envío de comandos por LoRa* 125
Figura 78. *Recepción de paquetes LoRa y publicación MQTT* 126
Figura 79. *Recepción de comandos desde el servidor* 127
Figura 80. *Montaje de sistema de backup de datos* 127
Figura 81. *Reinicio del sistema de backup de datos* 128
Figura 82. *Función para guardar registros* 128
Figura 83. *Nodo MQTT IN* 129
Figura 84. *Nodo MQTT OUT* 130
Figura 85. *Integración entre el backend y frontend* 130
Figura 86. *Creación de cliente MQTT* 131
Figura 87. *Tópico de publicación* 131
Figura 88. *Vinculación de MySQL en bróker de comunicación* 132
Figura 89. *Almacenamiento de datos* 132
Figura 90. *Contenido HTML del dashboard* 133
Figura 91. *Contenido CSS del dashboard* 134
Figura 92. *Contenido JavaScript del dashboard* 135
Figura 93. *Instalación del Nodo Sensor C1* 136
Figura 94. *Instalación del Nodo Sensor C2* 137
Figura 95. *Instalación de la celda fotovoltaica* 137
Figura 96. *Instalación del nodo Gateway* 138
Figura 97. *Inicialización de comunicación inalámbrica* 141
Figura 98. *Frecuencia de operación LoRa del sistema* 141

Figura 99. *Mapa de calor y espectro de la señal LoRa del sistema* 142

Figura 100. *Envío programado de datos* 151

Figura 101. *Petición recibida desde el servidor* 151

Figura 102. *Establecimiento de conexión a Internet y a servicio MQTT* 152

Figura 103. *Recepción y publicación de datos* 152

Figura 104. *Recepción de solicitudes, retransmisión LoRa y publicación de respuesta* 153

Figura 105. *Login de inicio de sesión* 154

Figura 106. *Inicio de sesión incorrecto* 154

Figura 107. *Panel de inicio* 155

Figura 108. *Panel de administración de perfiles* 155

Figura 109. *Restricción de acceso a usuarios sin privilegios* 156

Figura 110. *Panel de Facturación* 157

Figura 111. *Facturación del sistema – Septiembre – Medidor 1503010150* 158

Figura 112. *Facturación del sistema – Octubre – Medidor 1503010150* 158

Figura 113. *Facturación del sistema – Noviembre – Medidor 1503010150* 159

Figura 114. *Factura oficial – Septiembre – Medidor 1503010150* 160

Figura 115. *Factura oficial – Octubre – Medidor 1503010150* 160

Figura 116. *Factura oficial – Noviembre – Medidor 1503010150* 161

Figura 117. *Facturación del sistema – Septiembre – Medidor 1503012328* 163

Figura 118. *Facturación del sistema – Octubre – Medidor 1503012328* 163

Figura 119. *Facturación del sistema – Noviembre – Medidor 1503012328* 164

Figura 120. *Factura oficial – Septiembre – Medidor 1503012328* 165

Figura 121. *Factura oficial – Octubre – Medidor 1503012328* 165

Figura 122. *Factura oficial – Noviembre – Medidor 1503012328* 166

Figura 123. *Clientes registrados* 167

Figura 124. *Medidores registrados*.....167

Figura 125. *Lecturas de Consumo de Agua Potable*.....168

Figura 126. *Facturas de Consumo de Agua Potable*.....168

Figura 127. *Electroválvula en estado abierto*.....169

Figura 128. *Electroválvula en estado cerrado*.....170

Figura 129. *Socialización del sistema*.....186

Figura 130. *Presentación del nodo Sensor*.....187

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. *Características del Protocolo IEEE 802.11 y sus variantes* 16

Tabla 2. *Características de SigFox* 18

Tabla 3. *Características de LoRa* 19

Tabla 4. *Bandas de Frecuencias de LoRaWAN* 20

Tabla 5. *Características de capacidades y rendimiento de LoRaWAN* 22

Tabla 6. *Diferencias entre LoRa y LoRaWAN* 23

Tabla 7. *Niveles y abreviaturas para la identificación de requerimientos* 37

Tabla 8. *Stakeholders involucrados en el desarrollo del proyecto* 38

Tabla 9. *Requerimientos de Stakeholders* 39

Tabla 10. *Requerimientos del sistema* 40

Tabla 11. *Requerimientos de la arquitectura* 42

Tabla 12. *Selección de la tecnología de comunicación inalámbrica* 45

Tabla 13. *Selección de microcontrolador* 47

Tabla 14. *Especificaciones técnicas del microcontrolador ESP32 LoRa Heltec V3* 48

Tabla 15. *Selección del sensor de flujo* 49

Tabla 16. *Especificaciones técnicas del sensor de Flujo YF-S201* 50

Tabla 17. *Selección de la electroválvula* 51

Tabla 18. *Especificaciones técnicas de la electroválvula* 52

Tabla 19. *Selección del módulo RTC* 53

Tabla 20. *Especificaciones técnicas del módulo DS1307* 54

Tabla 21. *Selección de fuente de energía renovable* 55

Tabla 22. *Selección de la celda fotovoltaica* 56

Tabla 23. *Especificaciones técnicas de Celda Fotovoltaica* 57

Tabla 24. *Selección de la batería de respaldo* 58

Tabla 25. *Especificaciones técnicas de Celda Fotovoltaica* 59

Tabla 26. *Selección de IDE para programación* 60

Tabla 27. *Selección de Bases de Datos* 61

Tabla 28. *Selección de software de visualización y gestión de flujo datos* 62

Tabla 29. *Consumo energético diario de los componentes electrónicos* 82

Tabla 30. *Consumo de energía diaria de los componentes electrónicos* 83

Tabla 31. *Coordenadas de los nodos* 88

Tabla 32. *Relación Señal a Ruido en función de SF* 93

Tabla 33. *Sensibilidad del receptor* 94

Tabla 34. *Presupuesto del enlace* 96

Tabla 35. *Valores de la Zona de Fresnel* 98

Tabla 36. *Comparativa de resultados de simulación y teóricos del Nodo Sensor 1* 104

Tabla 37. *Comparativa de resultados de simulación y teóricos del Nodo Sensor 2* 107

Tabla 38. *Esquema de pruebas realizadas* 139

Tabla 39. *Desempeño del enlace LoRa (SF9, 14 dBm) a diferentes distancias* 144

Tabla 40. *Desempeño temporal del enlace de comunicación del sistema* 145

Tabla 41. *Análisis de estabilidad del RTT en bloques de transmisión* 146

Tabla 42. *Desempeño del enlace LoRa (SF9, 14 dBm) a diferentes distancias con AES-128 GCM* 147

Tabla 43. *Comparativa del desempeño del enlace LoRa sin cifrado y con AES-128 GCM* 148

Tabla 44. *Comparativa de mediciones entre sensor de flujo y medidor mecánico* 149

Tabla 45. *Comparativa de facturación - Medidor 1503010150* 161

Tabla 46. *Comparativa de facturación - Medidor 1503012328* 166

Tabla 47. *Pruebas de electroválvula* 170

Tabla 48. *Consumo eléctrico del sistema según su estado de operación* 174

Tabla 49. *Energía requerida por el sistema según el tiempo de operación* 175

Tabla 50. *Resumen estadístico* 185

Tabla 51. *Costo de Hardware de nodo Sensor* 188

Tabla 52. *Costo de Hardware de fuente de alimentación auto-energizable*.....189

Tabla 53. *Costo de Hardware de nodo Gateway* 189

Tabla 54. *Costo de Software para el sistema*.....190

Tabla 55. *Costo de Ingeniería*.....191

Tabla 56. *Costo general del sistema* 192

Tabla 57. *Ciclo de vida de trabajo de los componentes electrónicos del prototipo* 193

Tabla 58. *Costo de implementación total del sistema en la comunidad* 194

CAPÍTULO I: ANTECEDENTES

1.1. Tema

DISEÑO DE SISTEMA AUTO-ENERGIZABLE DE MEDICIÓN Y ENVÍO INALÁMBRICO DEL CONSUMO DEL AGUA POTABLE PARA LA JUNTA DE AGUA "SAN LUIS DE LA CARBONERÍA"

1.2. Problema

Según la Agencia de Regulación y Control del Agua (2015), en su Artículo 40, se define a la "Junta Administradora de Agua Potable como una organización sin fines de lucro, cuyo propósito principal es la de prestar el servicio de agua potable, con criterios de eficiencia, sostenibilidad y equidad". Es así como, el control y gestión del agua potable en la Comuna San Luis de la Carbonería, perteneciente a la Parroquia de Imantag, Cantón Cotacachi, se encuentra bajo la responsabilidad de la Junta Administradora de Agua Potable San Luis de la Carbonería.

En una entrevista mantenida con el presidente de la Junta Administradora de Agua, el señor Manuel Lita, manifiesta que al igual que se ha venido realizando en años anteriores, para garantizar una gestión de facturación, corte y reconexión del agua potable en cada una de las sesenta y tres viviendas de la Comuna, es necesario llevar a cabo mediciones manuales. Para este proceso, se designa a un encargado para visitar cada hogar y recopilar los datos de consumo del agua potable. Las mediciones se registran en hojas de papel y el proceso puede tardar un día completo en realizarlo.

Posteriormente, estas mediciones se trasladan a una hoja de cálculo en Excel para facturar lo correspondiente al consumo del agua potable, de acuerdo con el valor por metro cúbico y así determinar el monto que cada habitante debe pagar mensualmente en su factura por cada medidor de agua.

Esta tarea se debe realizar mensualmente lo que implica que la persona encargada se desplace a pie, en motocicleta o en bicicleta a cada vivienda, enfrentándose a diversos desafíos como: largas distancias entre las viviendas, especialmente por tratarse del área rural, la pérdida del documento en donde se registran las mediciones del consumo del agua o la falta de respaldos de los datos en la nube.

Durante la entrevista sostenida con el presidente de la Junta Administradora de Agua, se logró identificar la falta de un sistema de medición adecuado del agua potable, lo que genera que los valores de estas mediciones estén sujetos a errores, ya sea de medición o transcripción de datos, provocando que se genere una facturación errónea, ocasionando que los ciudadanos paguen más o menos de lo debido dependiendo del error. Así también, el proceso de corte del servicio de agua potable se da tras haber trascurrido un determinado tiempo de adeudar las facturas del consumo del agua potable, de esta forma el proceso de corte o reconexión de agua potable se lo realiza de forma manual, lo que implica un consumo de tiempo adicional para el operario y un desperdicio del líquido vital durante el proceso (Aragón & Lita, 2024).

Es así como, de acuerdo con la problemática identificada en la Comuna San Luis de la Carbonería, se requiere de un sistema automatizado capaz de monitorear y recopilar datos del consumo del agua potable de manera eficiente, con la capacidad de alimentarse de forma autónoma y con un consumo mínimo de energía.

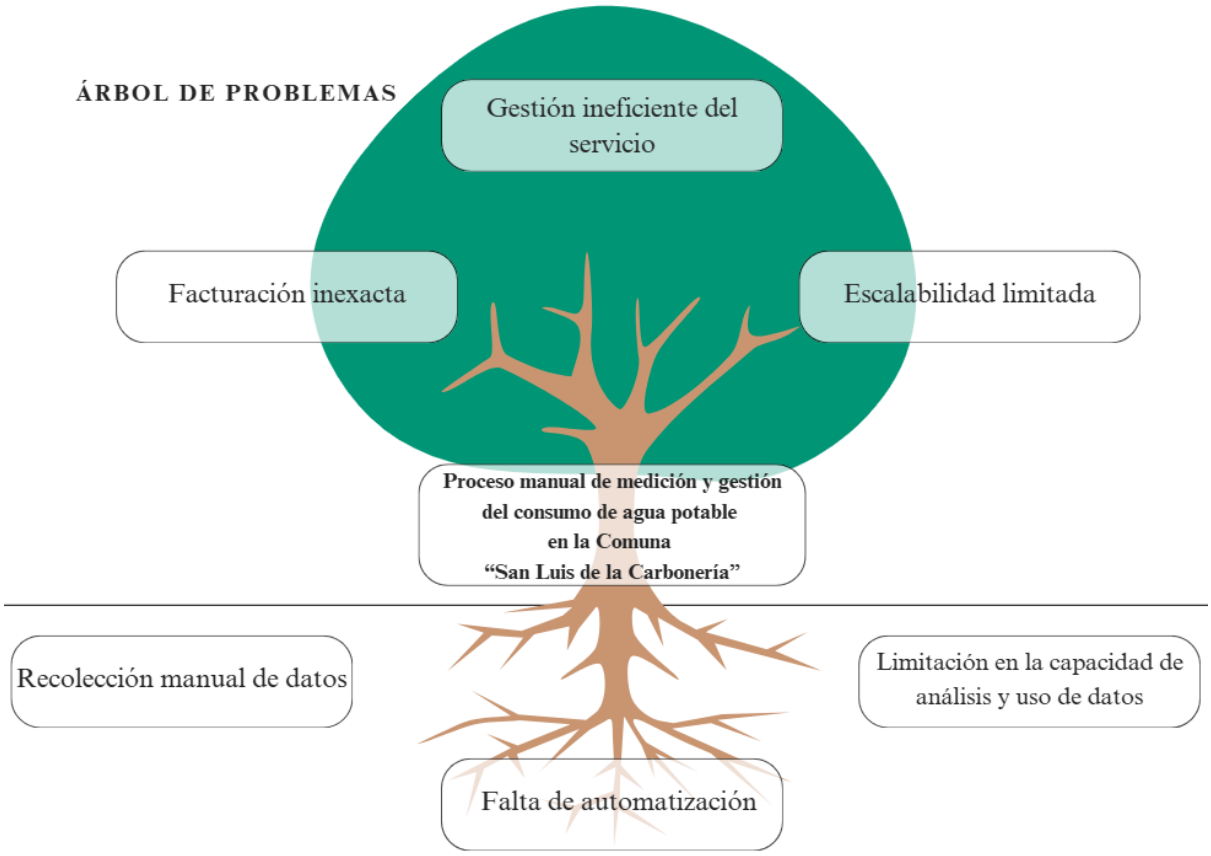
El cual permita automatizar el proceso de medición, corte y reconexión del consumo del agua potable y transmitir los datos de forma inalámbrica, permitiendo la recopilación y mejoramiento de datos del consumo del agua, facilitando su procesamiento preciso y eficiente en la facturación.

En la Figura 1, se presenta el diagrama causa-efecto realizado mediante un árbol de problemas, este esquema muestra los desafíos asociados con el proceso manual de medición y gestión del consumo del agua potable en la Comuna San Luis de la Carbonería.

Este procedimiento se ve afectado por la necesidad de dedicar una cantidad considerable de tiempo y de recursos para la movilización, lo que puede resultar en costos adicionales, como la compra de combustible por parte del operario. Además, la falta de automatización en este proceso dificulta la gestión eficiente y precisa del servicio, contradiciendo la misión de la Secretaría del Agua (2024), la cual establece que "se debe garantizar un acceso equitativo del agua, en calidad y cantidad". Estas limitaciones tienen un impacto significativo en la facturación, la gestión del servicio y la escalabilidad del sistema del agua potable.

Figura 1.

Árbol de problemas



Nota: El gráfico presenta un diagrama causa-efecto realizado mediante un árbol de problemas, este esquema muestra los desafíos asociados con el proceso manual de medición y gestión del consumo del agua potable en la Comuna San Luis de la Carbonería. Fuente: Autoría propia.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Diseñar un sistema auto-energizable de medición, corte y envío inalámbrico de datos del consumo del agua potable para la Junta Administradora de Agua "San Luis de la Carbonería" perteneciente a la Parroquia de Imantag, Cantón Cotacachi.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Realizar un análisis bibliográfico de las tecnologías inalámbricas y de auto-energización disponibles en el mercado que puedan adaptarse a las necesidades de la Comuna San Luis de la Carbonería.
- Examinar el estado actual de la gestión del sistema de agua potable dentro de la Comuna con el fin de identificar los requisitos necesarios para el diseño del nuevo sistema.
- Diseñar una arquitectura para el sistema de medición, corte y envió inalámbrico de datos que integre hardware y software que permita una gestión eficiente para el proceso de medición y facturación del consumo del agua potable.
- Realizar pruebas de funcionamiento del sistema en un entorno controlado con un prototipo a escala, verificando la precisión de las mediciones de consumo del agua, la eficiencia de la auto-energización y la medición de parámetros de los enlaces.

1.4. Alcance

El presente trabajo de titulación está enfocado en el diseño un sistema auto-energizable de medición, corte y transmisión inalámbrica del consumo del agua potable para la Junta Administradora de Agua "San Luis de la Carbonería", este sistema busca solventar los problemas asociados con el actual proceso de medición, facturación, corte y reconexión del consumo del agua potable, permitiendo una gestión eficiente y automatizada del servicio en la Comuna.

Para el diseño de este sistema, se ha considerado emplear la metodología en V, que posee un enfoque para el desarrollo sistemas que organiza las etapas de trabajo en forma de una "V". En la Figura 2, se muestra la estructura de la metodología en V, en el lado izquierdo están las fases de análisis y diseño, donde se definen los requisitos y se crea el diseño del sistema. En la punta de la “V” se realiza la implementación del sistema. En el lado derecho se encuentran las fases de pruebas y validación, donde se verifica y prueba el sistema para asegurarse de que funciona correctamente y cumpla con los requisitos definidos al principio (Vargas Chacón, 2010).

Figura 2.

Metodología en V



Nota: El gráfico presenta las fases de la metodología en V. Tomado de *Modelo en Cascada y Modelo en V*, por Vargas Chacón, 2010.

Dado que la precisión, eficiencia y confiabilidad son aspectos críticos en el diseño de sistemas de medición y corte de agua potable, la metodología en V proporciona una estructura sólida para garantizar la calidad y funcionalidad del sistema final.

De acuerdo con el primer objetivo específico y con la fase de análisis de los requerimientos de la metodología en V presentado en la Figura 2, se inicia con una investigación y evaluación de las tecnologías inalámbricas disponibles en el mercado que sean adecuadas para la transmisión de datos del consumo del agua potable. Se analizan los diferentes mecanismos de auto-energización para garantizar un funcionamiento autónomo y sostenible del sistema. Además, se investiga los dispositivos de hardware más adecuados para realizar el proceso de medición, corte y reconexión de agua potable, con el fin de obtener los conocimientos necesarios para abordar los desafíos del diseño del sistema auto-energizable de medición, corte y envío inalámbrico de datos del consumo del agua potable.

El segundo objetivo se lleva a cabo mediante la fase de diseño del sistema de la metodología en V, presentado en la Figura 2, en donde se examina el estado actual de la gestión del sistema de agua potable dentro de la Comuna con el fin de identificar los requisitos necesarios para el diseño del nuevo sistema. Además, se realiza un análisis para evaluar y aprovechar la infraestructura existente en los domicilios donde se implementarán los dispositivos de la tecnología inalámbrica para la transmisión de datos.

El tercer objetivo se desarrolla acorde a la fase de diseño detallado de la metodología en V, presentado en la Figura 2, donde se procede al diseño de una arquitectura que integre sensores de medición de consumo del agua, módulos de auto-energización y dispositivos de transmisión de datos.

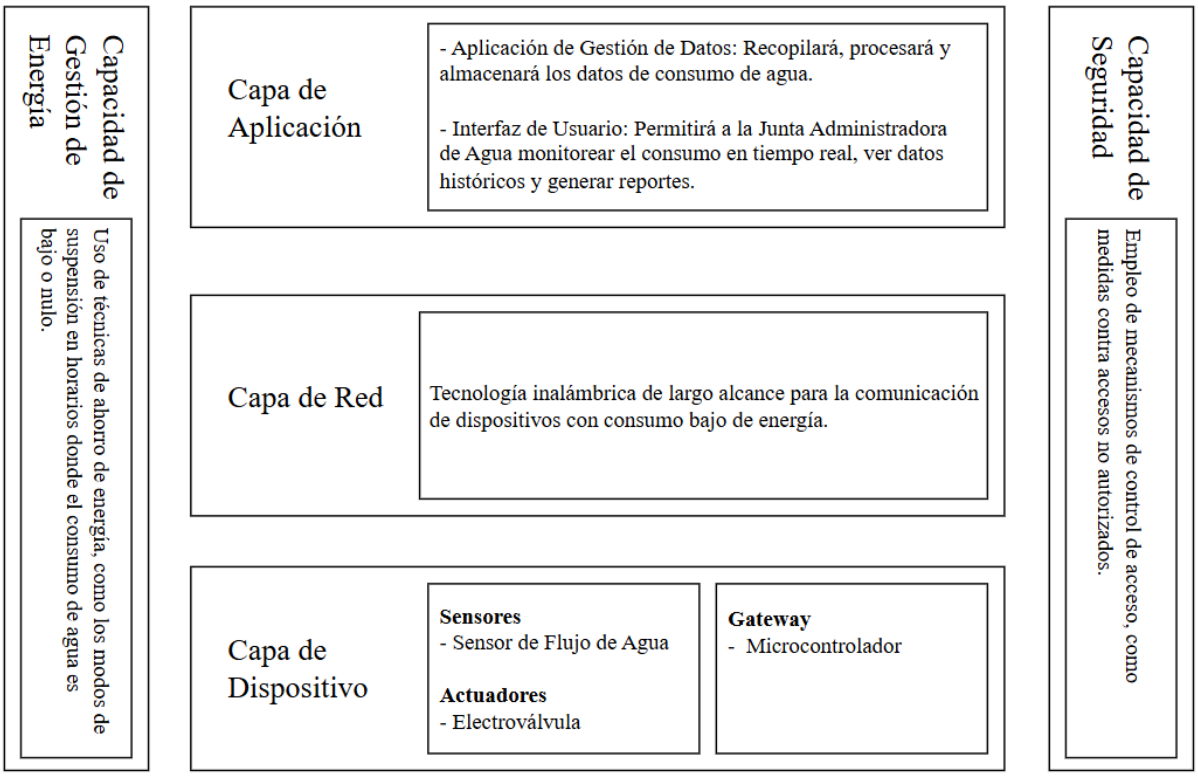
El cuarto objetivo implica la implementación como prototipo del diseño del sistema auto-energizable de medición, corte y envío inalámbrico de datos del consumo del agua potable en un ambiente controlado en la Comuna, así como la evaluación del mismo mediante pruebas de funcionamiento para verificar su precisión, eficiencia y confiabilidad.

Se evaluará la capacidad de auto-energización del sistema y su capacidad para funcionar de manera autónoma en condiciones reales. Además, se documentará el proceso de diseño, desarrollo y operación de este para futuras referencias y actualizaciones.

La Figura 3, muestra una arquitectura general del sistema auto-energizable para la medición y transmisión de manera inalámbrica del consumo de agua potable para la Junta Administradora de Agua "San Luis de la Carbonería".

Figura 3.

Arquitectura general del sistema de medición, corte y transmisión inalámbrica del consumo del agua potable



Nota: El gráfico presenta una arquitectura general del sistema auto-energizable para la medición y transmisión de manera inalámbrica del consumo de agua potable para la Junta Administradora de Agua "San Luis de la Carbonería". Fuente: Autoría propia, 2024.

En la capa de dispositivo, se encuentran sensores, actuadores y gateways, encargados de realizar el proceso de medición y corte del flujo de agua de forma automatizada. La capa de red emplea tecnología de transmisión inalámbrica para enviar los datos a la Junta Administradora de Agua. En la capa de aplicación, se gestiona la información recopilada por los sensores para la facturación mensual de cada medidor de agua, además de mantener un registro histórico del consumo del agua potable y ver el estado de si se encuentra habilitado o no este servicio.

La gestión de energía se realiza mediante técnicas de ahorro de energía, como los modos de suspensión en horarios donde el consumo de agua es bajo o nulo. Esto garantizará que el sistema funcione de manera eficiente utilizando mecanismos de auto-energización, y ayudando a prolongar la vida útil de las baterías para su uso durante la noche o en periodos de baja radiación solar, asegurando así un suministro continuo y sostenible. Finalmente, la seguridad del sistema se realizará mediante mecanismos de control de acceso para proteger la integridad de los datos.

1.5. Justificación

Según Basani (2019), “el sector de agua y saneamiento está experimentando grandes avances e innovaciones tecnológicas”, de forma que, los operadores deben ser conscientes de las opciones tecnológicas más adecuadas para mejorar el acceso y la calidad en la prestación de servicios de agua y saneamiento.

El Plan Nacional del Buen Vivir, como herramienta de planificación nacional, establece objetivos y políticas para el desarrollo integral del país. En este contexto, el presente trabajo de titulación se alinea con el objetivo de promover la innovación, el conocimiento y la tecnología para una gestión eficiente y sostenible de los recursos naturales, específicamente del agua potable (Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo, 2017).

El diseño de un sistema auto-energizable para la medición y transmisión de datos del consumo del agua potable promueve el desarrollo tecnológico en el país, ya que requiere la aplicación de tecnologías emergentes y la integración de soluciones innovadoras para resolver problemas específicos.

Mediante la automatización del proceso de medición y transmisión de datos, se mitiga la necesidad del desplazamiento por parte del personal encargado y se simplifica la recopilación y procesamiento de información para una facturación más eficiente. Esto garantiza que todos los habitantes de la Comuna San Luis de la Carbonería puedan acceder a este servicio esencial de manera equitativa, sin discriminación ni exclusión. A su vez, se fomenta el desarrollo sostenible y la protección del medio ambiente al implementar un sistema auto-energizable, que se energiza por sí mismo. Esto significa que el sistema no depende de fuentes externas de energía, como la electricidad de la red, sino que utiliza recursos propios para su funcionamiento (CeDInt-UPM, 2017).

Esta autonomía energética contribuye a reducir la dependencia de fuentes de energía convencionales, por ende, disminuye la huella ambiental asociada con la generación y el uso de dichas fuentes. De esta manera, el sistema no solo facilita el acceso equitativo al agua potable, sino que también promueve la sostenibilidad ambiental al minimizar su impacto en el entorno.

CAPÍTULO II: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

La gestión del agua potable en comunidades rurales como San Luis de la Carbonería enfrenta importantes desafíos debido a la falta de automatización en los procesos de medición, facturación, corte y reconexión del servicio. Como se evidenció en la entrevista mantenida con representantes de la Junta Administradora de Agua Potable, las tareas actuales dependen de procedimientos manuales que demandan una considerable cantidad de tiempo, recursos y esfuerzo humano, generando además una probabilidad de error durante la recolección o transcripción de datos. Estos errores afectan directamente la exactitud de la facturación, provocando dificultades en la administración del recurso hídrico.

Ante esta situación, se vuelve indispensable investigar tecnologías que permitan automatizar el sistema de medición del consumo del agua potable, con capacidades de transmisión inalámbrica de datos y de bajo consumo energético, idealmente autoabastecidas mediante fuentes de energía renovable.

Por tal razón, este capítulo presenta la fundamentación teórica que servirá de base para desarrollar el presente trabajo de titulación. Se abarcarán temas como el modelo actual de gestión de agua potable, teniendo en cuenta los sistemas de medición y los tipos de medidores disponibles en el mercado. Además, se analizarán las tecnologías inalámbricas para la transmisión de datos y el sistema de auto-energización, incluyendo estudios de fuentes de energía renovable y técnicas de ahorro de energía para un funcionamiento óptimo del sistema. Finalmente, se analizarán en forma general tanto el hardware como el software a implementarse.

2.1. Modelo actual de Gestión del Agua Potable

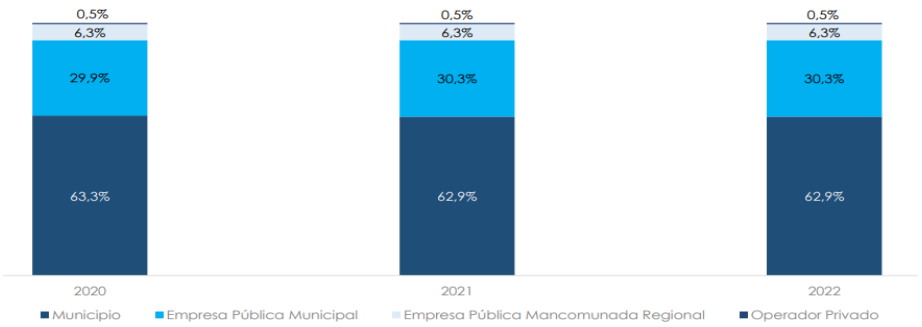
Según el INEC (2023), la gestión del agua potable en Ecuador involucra 221 municipios responsables de la prestación del servicio de agua, los cuales gestionan un total de 1,197 fuentes hídricas de captación y posterior distribución del agua potable. Así también, en Ecuador hay 583 plantas de tratamiento de agua operativas en 202 municipios. A nivel nacional, los proveedores públicos distribuyen mensualmente un promedio de 120.4 millones de metros cúbicos de agua potable. De esta cantidad, los municipios facturan un promedio mensual de 58.8 millones de metros cúbicos, representado el 46.4% del total distribuido.

El modelo de gestión y prestación del servicio del agua potable y saneamiento busca asegurar acceso universal y equitativo al agua potable, reconociendo este recurso como un derecho humano esencial. En 2022, el 62.9% de los Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales (GADS) se encargaron de gestionar el servicio de agua potable y alcantarillado directamente a través sus Municipios (INEC et al., 2023).

Un 30.3% lo gestionaron mediante empresas públicas municipales, mientras que el 6.3% restante lo hicieron a través de empresas públicas mancomunadas, como se muestra en la Figura 4 (INEC et al., 2023).

Figura 4.

Modelo de gestión y prestación del servicio del agua potable y saneamiento



Nota: Tomado de *Estadística de Información Ambiental Económica en Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales,* por ARCA-AME-INEC-BDE, 2022.

2.2. Sistemas de Medición del Agua Potable

Los sistemas de medición del agua potable llegan a ser esenciales para controlar y gestionar adecuadamente la distribución de este recurso vital. El propósito de estos sistemas son cuantificar el consumo del agua potable, proporcionar una base para una facturación justa y equitativa basada en el consumo real de cada usuario, y gestionar de manera eficiente la demanda de este recurso.

Estos sistemas consisten principalmente en un medidor de agua, dispositivo utilizado para medir el flujo del agua que pasa a través de tuberías en una red de abastecimiento, ya sea en una vivienda o en un grupo de viviendas. El medidor registra el flujo de agua sobre unidades de tiempo (m^3/s), con el fin de proveer y facturar el consumo del recurso hídrico (Comisión Nacional del Agua, 2015).

2.2.1. Tipos de Medidores de Agua

Existen varios tipos de medidores que se utilizan para medir el caudal o volumen de agua. En este capítulo se abordarán los medidores mecánicos, como los de turbina y de chorro único, al igual que los medidores electrónicos, como los electromagnéticos y de efecto Hall. La elección de un medidor depende de factores como el tamaño de la instalación, la precisión requerida y los costos del dispositivo.

2.2.1.1. Medidor Mecánico.

Los medidores mecánicos de tipo rotativo son dispositivos que miden el flujo de un fluido, típicamente agua o gas, al registrar el volumen que circula dentro de la tubería como se muestra en la Figura 5. Funcionan mediante mecanismos internos, como un rotor o un pistón, que gira o se desplaza en función del flujo del fluido. A medida que el fluido atraviesa el medidor, impulsa el movimiento del rotor o el pistón, y este movimiento mecánico se convierte en una lectura de volumen (Ordonez Arias, 2007).

Figura 5.

Medidor mecánico de agua potable



Nota: Medidor de agua potable utilizado comúnmente en las viviendas. Tomado de *Tipos de medidores de agua que existen,* Hidroconta, 2024.

2.2.1.2. Medidor Electrónico.

Este tipo de medidor funciona accionado por una turbina o propela la cual registra el volumen o caudal del agua que circula a través de él contando las vueltas de sus álabes. Son conocidos por su alta confiabilidad y precisión, ya que la turbina o propela plástica gira de forma proporcional a la velocidad del flujo del agua. La propela se encuentra ubicada en el centro del flujo para una medición más precisa. Por otro lado, la turbina está dispuesta a lo ancho de la circunferencia del tubo, similar a las aspas de un ventilador (Ordonez Arias, 2007).

- Medidor electromagnético

Este tipo de medidor emplea la Ley de Faraday para determinar la velocidad media del agua, su funcionamiento se debe a dos bobinas situadas a los lados del cuerpo del medidor, las cuales son accionadas por una corriente alterna, creando un campo magnético uniforme dentro del tubo, como se presenta en la Figura 6.

De manera que el agua fluye por medio del medidor, corta este campo magnético, generando una inducción de voltaje. Este voltaje es detectado por dos electrodos, que están colocados diametralmente opuestos y perpendiculares al campo magnético (Comisión Nacional del Agua, 2015).

Figura 6.

Medidor electromagnético de agua potable



Nota: Tomado de *Tipos de medidores de agua que existen,* Hidroconta, 2024.

- Medidor de agua electrónico efecto Hall

El medidor de efecto Hall utiliza un rotor con un imán que gira debido al flujo de agua, cada vuelta del rotor genera un pulso en el sensor de efecto Hall, lo que permite al circuito electrónico contar el volumen de agua consumido, como se presenta en la Figura 7. Este tipo de medidor presenta varias ventajas, como la ausencia de piezas móviles en contacto directo con el agua, una mayor precisión a bajos caudales y la capacidad de transmitir datos de forma remota (Ordonez Arias, 2007).

Figura 7.

Medidor de agua electrónico efecto Hall



Nota: El caudalímetro de Efecto Hall utiliza la tecnología del efecto Hall para medir el flujo de líquidos o gases. Tomado de *Caudalímetro de Efecto Hall sensor de Flujo Agua Efecto Hall,* Vilcherrez, J., 2025.

2.3. Tecnologías Inalámbricas de Transmisión de Datos

Las tecnologías inalámbricas permiten establecer redes de comunicación entre dispositivos sin requerir conexiones físicas, lo que resulta especialmente útil en zonas rurales como la Comuna San Luis de la Carbonería, donde el tendido de cableado puede ser inviable o costoso debido a la dispersión geográfica de las viviendas. Estas tecnologías han transformado la manera en que los sistemas embebidos recolectan y envían información, permitiendo monitorear parámetros a distancia y en tiempo real (Adel & Al, 2006).

Las tecnologías que se presentan a continuación permiten una transmisión rápida y eficiente de información a través del aire, utilizando diferentes métodos y características como tipos de modulación, velocidades de transmisión, etc.

2.3.1. Wi-Fi

Según Adel & Al (2006), Wireless Fidelity, más conocido como Wi-Fi, es una tecnología inalámbrica la cual brinda una conexión inalámbrica entre un cliente y una base, o entre dos clientes. Ofrece libertad al permitir una conexión a Internet sin cables en diversos lugares, como una casa, un hotel o en el trabajo.

Esta tecnología utiliza el estándar IEEE 802.11, con variantes como 802.11a, 802.11b, 802.11g, 802.11n, 802.11ac, y 802.11ax, cada una con características específicas en cuanto a velocidad, frecuencia, ancho de banda y velocidad de datos máxima como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1.

Características del Protocolo IEEE 802.11 y sus variantes

Protocolo	Frecuencia	Ancho del canal	MIMO	Velocidad de datos máxima (en teoría)
802.11ax	2,4 o 5 GHz	20, 40, 80, 160 MHz	Usuario múltiple (MIMO-MU)	2,4 Gbps
802.11ac wave2	5 GHz	20, 40, 80, 160 MHz	Usuario múltiple (MIMO-MU)	1,73 Gbps
802.11ac wave1	5 GHz	20, 40, 80 MHz	Un solo usuario (SU-MIMO)	866,7 Mbps
802.11n	2,4 o 5 GHz	20, 40 MHz	Un solo usuario (SU-MIMO)	450 Mbps
802.11g	2,4 GHz	20 MHz	No se aplica	54 Mbps
802.11a	5 GHz	20 MHz	No se aplica	54 Mbps
802.11b	2,4 GHz	20 MHz	No se aplica	11 Mbps
Tradicional 802.11	2,4 GHz	20 MHz	No se aplica	2 Mbps

Nota: Adaptado de *Diferentes protocolos de Wi-Fi y velocidades de datos,* por Intel, 2021.

2.3.2. Zigbee

Según Midda & Koner (2023), ZigBee (Estándar IEEE 802.15.4) es un protocolo global y abierto, ideal para redes de sensores inalámbricos y ampliamente utilizado en sistemas de instrumentación y control en redes de área personal inalámbrica (WPAN), conocidas como Internet de las Cosas (IoT).

Opera en frecuencia de 2.4 GHz, consume poca energía gracias a sus opciones de gestión de energía por batería, y cubre un rango de alcance bajo a medio con una tasa de datos máxima de 250 Kb/seg. Está diseñado para proporcionar redes inalámbricas seguras, fiables y de bajo consumo, esta tecnología elimina la necesidad de cableado costoso y propenso a daños en aplicaciones industriales, permitiendo que los dispositivos se coloquen y muevan libremente sin afectar la comunicación con el sistema (Tomar, 2011).

2.3.3. LPWAN

Las redes de área extensa de bajo consumo de potencia (LPWAN) es una de las categorías de tecnologías inalámbricas diseñadas para proporcionar conectividad en áreas amplias, ideal para aplicaciones de IoT. Estas redes destacan por su capacidad para cubrir distancias de hasta 15 km en entornos urbanos y con bajo consumo de energía, permitiendo que los dispositivos operen con baterías durante extensos períodos de tiempo. Esta eficiencia energética es esencial para aplicaciones IoT que requieren comunicación a larga distancia y una amplia cobertura geográfica sin necesidad de intervención frecuente para cambiar o recargar baterías (Andre et al., 2022).

2.3.3.1. SigFox.

Según Sarath Kumar (2022), SigFox es un protocolo basado principalmente en la red de baja capacidad (LTN), diseñado para la comunicación en Internet de las Cosas (IoT), este protocolo se caracteriza por su eficiencia energética y su simplicidad. Cada mensaje transmitido por un dispositivo SigFox tiene una longitud de 12 bytes e incluye un número de secuencia para fines de seguridad. Los dispositivos pueden enviar hasta 140 mensajes por día y el resto del tiempo permanecen en modo de suspensión, lo que optimiza el consumo de energía y mejora la seguridad del sistema (Hemjal, 2019). La Tabla 2, muestra algunas de las características principales de esta tecnología.

Tabla 2.

Características de SigFox

Característica	Detalles
Bandas de Frecuencia (MHz)	Europa: 868, Otras: 902 - 928
Potencia de Salida Tx	Europa: 14 dB, USA: 22 dBm
Ancho de Banda	192 kHz
Tasa de Datos	100 bps o 600 bps
Modulación	Subida: DBPSK, Bajada: GFSK
Carga Útil	Subida: 12 bytes, Bajada: 8 bytes
Consumo de Energía	Activo: 10 - 50 mA, Inactivo: 6 nA
Número de Mensajes	Por Hora: 6, Por Día: 140
Seguridad	AES
Roaming Requerido	No

Nota: Adaptado de *Sigfox Protocol,* por Tampere University, 2019.

2.3.3.2. LoRa.

Long Range (LoRa) es también una más de las tecnologías de comunicación inalámbrica de baja potencia y largo alcance, opera en frecuencias de 915 MHz en América del Norte, 868 MHz en Europa y finamente 433 MHz en Asia. Pertenece a la categoría LPWAN (Low Power Wide Area Network) y fue desarrollada por Semtech Corporation, su propósito es equilibrar el consumo de energía y la distancia de transmisión, permitiendo una comunicación eficiente en comparación con otras tecnologías inalámbricas de similar consumo energético (George Hardesty, 2024).

Esta tecnología fue diseñada específicamente para dispositivos IoT, lo que permite una transmisión de datos a largas distancias y con bajo consumo de energía, ofreciendo además una fuerte capacidad de penetración en edificios y terrenos. Su implementación es ideal para escenarios donde se requiere comunicación punto a punto o punto a multipunto, facilitando la conexión directa entre sensores y estaciones base (Semtech, 2025). La Tabla 3, muestra distintas características de esta tecnología.

Tabla 3.

Características de LoRa

Característica	Detalles
Escalabilidad de ancho de banda y frecuencia	Permite ajustar el ancho de banda y la frecuencia según las necesidades de la red y la región donde se opere.
Baja potencia de salida de los transmisores	Optimiza el consumo de energía, logrando una mayor duración de la batería en dispositivos IoT.
Resistencia a interferencias	Tolera interferencias tanto dentro como fuera de banda, asegurando una comunicación estable.
Resistencia a desvanecimiento y efecto Doppler	Mantiene la calidad de la señal en entornos con variaciones en la propagación o movimiento de los dispositivos.
Compatibilidad con conectividad de largo alcance	Puede establecer comunicación a varios kilómetros, dependiendo del entorno.

Nota: Adaptado de *LoRa: Red Inalámbrica de largo alcance para el Internet de las cosas (IOT): bandas de frecuencia y antenas,* por Data-Alliance, 2024.

2.3.3.3. LoRa WAN.

Long Range Wide Area Network (LoRa WAN) es el protocolo de comunicación de bajo consumo que opera en bandas de radio industriales, científicas y médicas (ISM) sin licencia, utilizando las frecuencias de 433 MHz, 686 MHz o 915 MHz, dependiendo de la región donde se utilice, como se presenta en la Tabla 4. En Ecuador, la banda de frecuencias utilizada para LoRa WAN es 915 MHz, según la normativa de la Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (2022). Esta banda pertenece a la región de Estados Unidos y Canadá la cual comprende regiones como América del Norte, América Central, y América del Sur. Esta tecnología, ha sido estandarizada por LoRa Alliance (Andre et al., 2022).

Tabla 4.

Bandas de Frecuencias de LoRaWAN

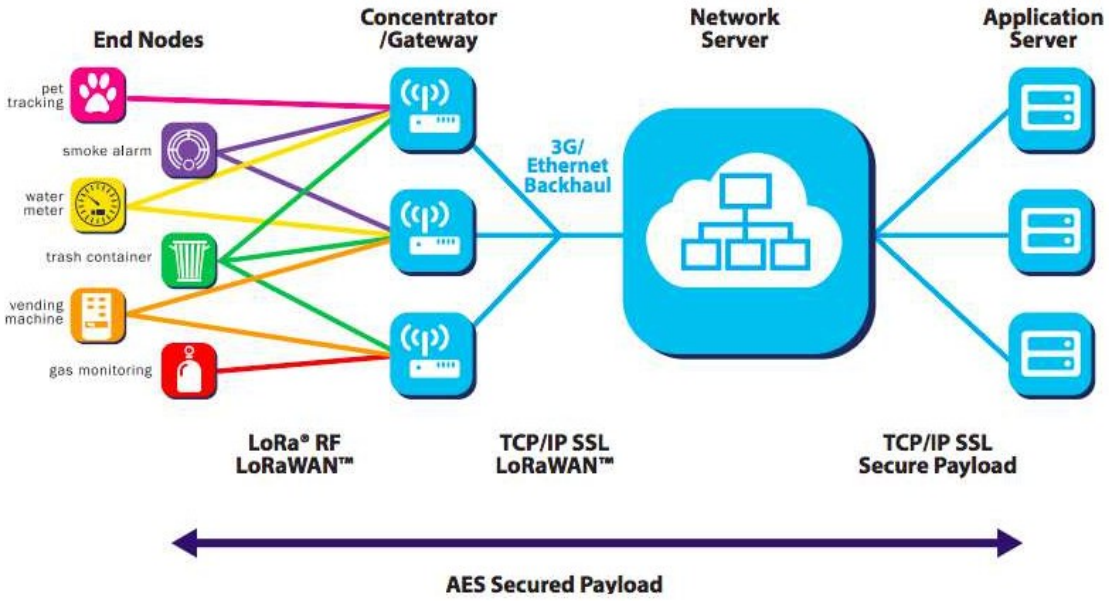
Región	Banda de Frecuencia
Europa	863 - 870 MHz
Estados Unidos y Canadá	902 - 928 MHz
China	779 - 787 MHz
Japón	920 - 928 MHz
Australia	915 - 928 MHz
Corea del Sur	920 - 923 MHz
Singapur	920 - 925 MHz
Malasia	865 - 870 MHz
India	865 - 867 MHz
Rusia	864 - 870 MHz

Nota: Adaptado de *LPWAN Communication in IoT Network for Electrical Energy Monitoring,* por Andre et al., 2022.

La arquitectura de LoRaWAN sigue un modelo en estrella distribuida. En este modelo, los dispositivos finales, como sensores y actuadores, se comunican directamente con puertas de enlace que actúan como intermediarias entre los dispositivos y el servidor de red, como se presenta en la Figura 8.

Figura 8.

Topología LoRaWAN



Nota: Tomado de *LPWAN Communication in IoT Network for Electrical Energy Monitoring,* por Andre et al., 2022.

LoRa WAN utiliza cifrado AES-128 (Advanced Encryption Standard con una clave de 128 bits) para proteger la confidencialidad de los datos. El cifrado AES-128 es un estándar robusto ampliamente utilizado en la industria y considerado seguro para la mayoría de las aplicaciones (Andre et al., 2022).

Esta tecnología está diseñada para proporcionar conectividad eficiente y de largo alcance para dispositivos IoT. Sus capacidades y rendimiento se destacan en varios aspectos como se presenta en la Tabla 5.

Tabla 5.

Características de capacidades y rendimiento de LoRaWAN

Característica	Valor
Alcance	Hasta 15 km
Velocidad de datos	Adaptativa entre 0,3 kbps y 50 kbps, se ajustada según las necesidades de los dispositivos
Consumo de energía	Muy bajo, ideal para dispositivos alimentados por batería
Capacidad de carga útil	• 51 bytes en la banda de 868 MHz • 222 bytes en la banda de 915 MHz
Número de puertas de enlace	Múltiples puertas de enlace reciben los mismos paquetes, mejorando la cobertura y confiabilidad

Nota: Adaptado de *LPWAN Communication in IoT Network for Electrical Energy Monitoring,* por Andre et al., 2022.

- *Diferencias entre LoRa y LoRaWAN*

LoRa es una tecnología de capa física (PHY) que permite el intercambio de información entre dispositivos. Por otra parte, LoRaWAN es un protocolo de nivel superior, basado en capa MAC, que actúa principalmente como un protocolo de red encargado de gestionar la comunicación para los dispositivos finales y las puertas de enlace. Este protocolo incorpora funciones como programación de red, enrutamiento, y gestión de enlaces ascendentes y descendentes, optimizando el uso de la batería y mejorando la seguridad en la comunicación (Semtech, 2025). La Tabla 6, muestra algunas de las principales diferencias entre estas tecnologías.

Tabla 6.

Diferencias entre LoRa y LoRaWAN

Diferencias	LoRa	LoRa WAN
Tipo de tecnología	Tecnología de transmisión de capa física.	Tecnología de red basada en LoRa, definida en la capa MAC.
Características principales	• Larga distancia. • Bajo consumo de energía. • Velocidad de transmisión baja.	• Estandariza la comunicación. • Gestiona la red. • Permite escalabilidad.
Componentes	Modulación de señal y transmisión de datos a nivel físico.	Nodos LoRaWAN, puertas de enlace, protocolo LoRaWAN y plataforma en la nube.
Compatibilidad	Limitada a dispositivos que usen la misma modulación.	Permite la conexión de múltiples nodos de diferentes fabricantes en una misma red.
Seguridad y escalabilidad	No incluye mecanismos de autenticación integrados, ni gestión de red.	Ofrece autenticación segura, y facilidad de expansión.

Nota: Adaptado de *LoRs (PHY),* por Semtech, 2025.

2.4. Sistemas Auto-Energizables

Un sistema auto-energizable, también llamado sistema autónomo, es un sistema capaz de producir y almacenar su propia energía utilizando fuentes de energía renovables del entorno. Esto le permite operar sin necesidad de conectarse a la red eléctrica convencional (Creus Solé, 2014).

2.4.1. Fuentes de energía renovable

Según Creus Solé (2014), las energías renovables, conocidas también como energías alternativas o limpias, engloba varias fuentes energéticas que pueden restaurarse naturalmente y son casi inagotables con el tiempo. Estas fuentes de energía renovable se dividen en Fotovoltaica, Eólica, Hidráulica, Biomasa y Geotérmica.

2.4.1.1. Energía Fotovoltaica.

La energía fotovoltaica transforma la energía solar directamente en electricidad mediante el uso de minerales específicos, como los cristales de silicio y el arseniuro de galio. Las células fotovoltaicas convierten la luz solar en corriente eléctrica, esta tecnología se ha aplicado en una variedad de dispositivos, incluyendo relojes, calculadoras, botes, dispositivos de ayuda a la navegación, postes de socorro en autopistas, teléfonos remotos y viviendas rurales (Vargas et al., 2020).

2.4.1.2. Energía Eólica.

Este tipo de energía es generada gracias al movimiento de palas de un aerogenerador. Cuando el viento sopla, logra hacer girar las palas que están conectadas a un rotor. El cual está vinculado a un generador eléctrico. Mientras las palas giran, el rotor transforma la energía cinética del viento en energía mecánica, que luego el generador transformará en electricidad. Esta forma de generar energía no produce emisiones contaminantes y puede integrarse en redes eléctricas para proporcionar energía limpia y renovable (Vargas et al., 2020).

2.4.1.3. Energía Hidráulica.

Se produce aprovechando la energía potencial del agua en los ríos almacenada mediante represas. Estas represas liberan el agua a un nivel inferior para generar energía en una central hidroeléctrica. La planta hidroeléctrica utiliza turbinas y generadores para transformar la energía del agua en electricidad (Creus Solé, 2014).

2.4.1.4. Energía Biomasa.

La biomasa hace referencia a materia biológicamente renovable, como madera, celulosa y carbón vegetal. Esta energía puede ser utilizada en diferentes formas: sólida mediante combustión, líquida a través de la fermentación de azúcares, o gaseosa por la descomposición de materia orgánica.

El aprovechamiento de esta energía puede variar desde métodos simples, como la quema de madera, hasta procesos más complejos, como la conversión de azúcares de caña de azúcar, girasol u otros cultivos en combustibles líquidos (Vargas et al., 2020).

2.4.1.5. Energía Geotérmica.

La energía geotérmica se genera gracias al gradiente térmico entre la temperatura del núcleo de la Tierra y la superficie. A profundidades de entre 3 y 5 kilómetros, corrientes de agua subterránea fluyen cerca de rocas calientes, lo que permite aprovechar su energía. Esta energía puede ser utilizada para calefacción residencial o para generar electricidad mediante la inyección de agua, la cual se convierte en vapor a alta presión y mueve turbinas generadoras de electricidad (Creus Solé, 2014).

2.4.2. Técnicas de Ahorro Energético

En las redes inalámbricas, es importante optimizar el consumo de energía debido a que muchos dispositivos operan con baterías, lo cual impone limitaciones significativas. El consumo de energía se relaciona directamente con el tiempo de operación del dispositivo, por lo que optimizar el ahorro de energía debe ser una prioridad. Una medida efectiva es utilizar modos de suspensión para reducir el consumo de energía cuando el dispositivo no está en uso (Díaz Serrano, 2015).

2.4.2.1. Modos de Suspensión.

Los enlaces ya sean físicos o inalámbricos, consumen energía según la cantidad de datos que se transmiten por medio de ellos. Por lo tanto, el consumo energético depende tanto de la capacidad del enlace como del nivel de uso que se le esté dando (Díaz Serrano, 2015).

Para mejorar la eficiencia energética, es posible adaptar la velocidad de los enlaces utilizando métodos como el modo Sleeping, que consiste en apagar los enlaces cuando no se están utilizando activamente.

Otra forma para mejorar la eficiencia energética es emplear Adaptación de Tasa (Rate Adaptation), que implica reducir el ancho de banda del enlace para ajustarlo según las necesidades de transmisión, optimizando así el consumo energético.

- Modo Sleeping

Según Díaz Serrano (2015), este método se enfoca en la gestión de enlaces en una topología de red, lo que implica tener dos estados de funcionamiento: uno inactivo y otro en modo activo. El modo Sleeping puede implementarse de dos maneras: apagando completamente el enlace o dejándolo en un estado de baja potencia donde pueda activarse rápidamente si recibe paquetes de datos.

- Modo Rate Adaptation

Según Díaz Serrano (2015), este modo se centra en reducir la capacidad del enlace en la red, lo que implica establecer diferentes velocidades de transmisión de datos. Esto puede ser beneficioso al reducir el consumo de energía de los enlaces. Sin embargo, en redes con alto tráfico, la reducción de la capacidad del enlace podría causar retardos en la transmisión de datos debido a la limitación de recursos disponibles para la comunicación.

2.5. Elementos de Hardware

Según Serrano Perez & Moreno Perez (2015), son componentes físicos del sistema, el hardware está compuesto por dispositivos electrónicos y electromecánicos que permiten la recepción de información, procesamiento de datos y presentación de información por medio de sensores, dispositivos de procesamiento y almacenamiento, monitores, entre otros.

2.5.1. Microcontrolador

Dispositivo electrónico que incorpora numerosos componentes en su estructura, se caracteriza por ser programable y capaz de ejecutar de manera autónoma instrucciones preprogramadas. En otras palabras, estos dispositivos pueden llevar a cabo operaciones lógicas de forma independiente (Serrano Perez & Moreno Perez, 2015).

2.5.2. Microprocesador

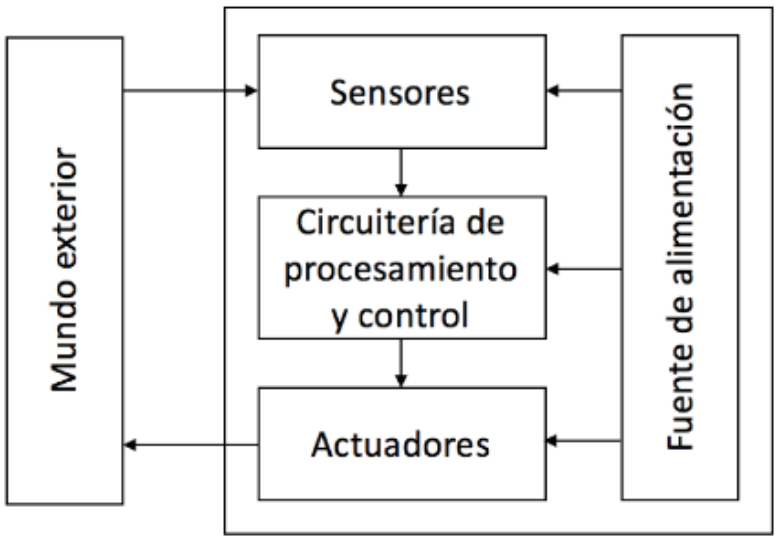
Circuito integrado que posee una unidad de procesamiento central (CPU) en un solo chip. Es el componente principal que ejecuta las instrucciones de un programa al realizar operaciones aritméticas, lógicas, de control y de entrada/salidas especificadas (Rocabado Moreno & Arias Figueroa, 2016).

2.5.3. Sistema Electrónico

Según Moreno Munoz & Corcoles Corcoles (2018), un sistema electrónico está compuesto por un conjunto de sensores, actuadores, circuitos de procesamiento y control, así como una fuente de alimentación. Estos componentes trabajan de manera integrada para captar datos, procesarlos, realizar acciones basadas en los datos procesados como se presenta en la Figura 9.

Figura 9.

Arquitectura de Sistema Electrónico



Nota: Tomado de *Sistema electrónico (p. 37), Arduino curso práctico, RA-MA,* por A. Moreno, 2018.

- **Sensores:** Dispositivos electrónicos encargados de transformar las variables físicas del entorno en señales eléctricas que pueden ser procesadas por circuitos de control internos.
- **Actuadores:** Componentes electrónicos encargados de interactuar con el entorno fuera de la placa, los actuadores convierten las señales eléctricas en energía capaz de generar una acción directa sobre el medio físico.
- **Circuitería:** Componentes responsables de interpretar las señales provenientes de los sensores y generar salidas eléctricas necesarias para activar los actuadores tras el procesamiento de dicha información.
- **Fuente de alimentación:** Componente encargado de proporcionar la energía necesaria para el funcionamiento de todo el sistema, asegurando que todos los dispositivos y circuitos internos reciban la potencia requerida para operar correctamente.

2.6. Elementos de Software

Según Amaya Amaya (2010), son elementos del sistema que no poseen una naturaleza física y se utilizan para el procesamiento de la información. Estos son programas de ordenador que gestionan estructuras como bases de datos, las cuales son colecciones organizadas de información que soportan el funcionamiento del sistema.

2.6.1. Software de Sistemas

El software de sistemas gestiona y coordina las diferentes partes del sistema informático, actúa como puente entre el software de aplicación y el hardware del circuito. El sistema operativo es un tipo de software de sistemas que administra y controla las operaciones fundamentales de un computador (Amaya Amaya, 2010).

2.6.2. Software de Aplicación

Programas diseñados para permitir a los usuarios realizar una o varias tareas específicas en diferentes áreas o campos de actividad. A diferencia del software de sistema, que se encarga del control y gestión de los recursos básicos del dispositivo, el software de aplicación está diseñado con un propósito funcional más directo y orientado a necesidades concretas de los usuarios (Amaya Amaya, 2010).

2.6.3 Software de Programación

Grupo de herramientas que facilitan al programador el desarrollo de programas informáticos. Incluye diversas herramientas como editores de texto, compiladores, intérpretes, enlazadores y depuradores, aunque en la actualidad todos estos elementos vienen incluidos en los entornos de desarrollo integrados (IDE) (Amaya Amaya, 2010).

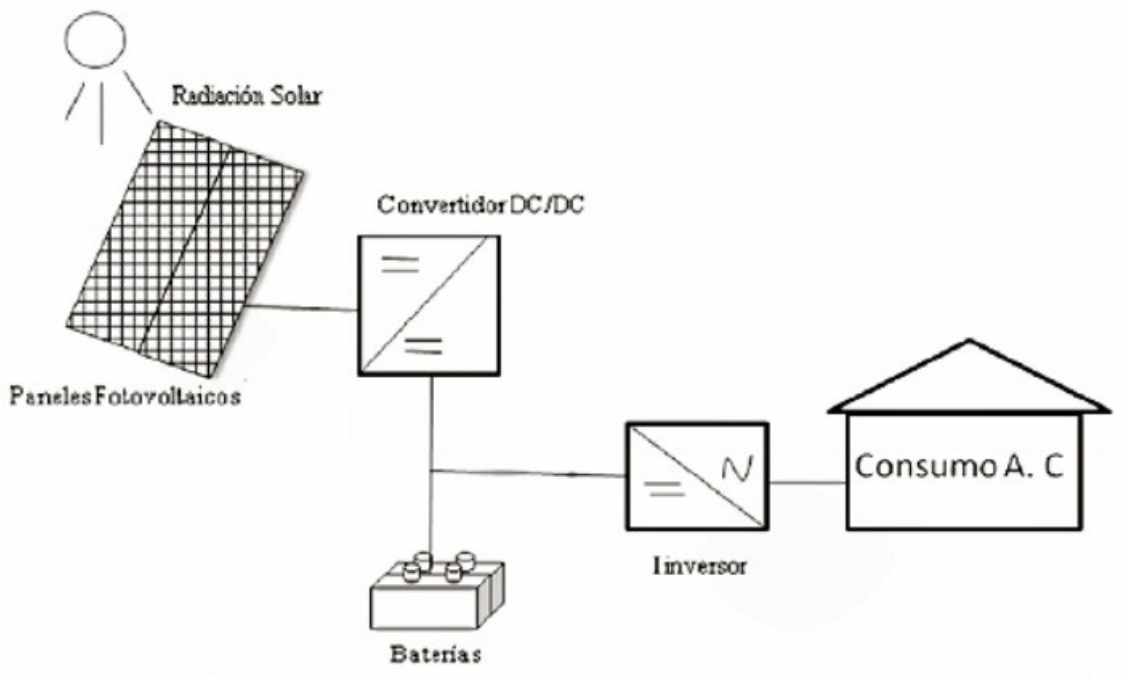
2.7. Sistema Fotovoltaico Aislado

Según Chico Ramírez (2023), un sistema de energía solar autónomo está diseñado para funcionar de manera independiente de la red eléctrica convencional. Para ello, es necesario almacenar la energía producida durante el día en baterías, de modo que se pueda utilizar durante la noche. Estos sistemas se diseñan considerando la potencia y capacidad de almacenamiento adecuados para asegurar un suministro confiable incluso en períodos prolongados de baja radiación solar. Por lo tanto, deben ser dimensionados de manera que las baterías puedan recargarse y alimentar la carga estimada al mismo tiempo durante la exposición a la radiación solar.

Un sistema fotovoltaico autónomo (SFA) está compuesto, por tres componentes principales: un generador energético, un sistema de control y baterías. En la Figura 10 se presenta un esquema simple de este sistema.

Figura 10.

Esquema de sistema fotovoltaico aislado



Nota: Tomado de *Sistema Fotovoltaico Aislado*, por Kleber Chico, 2023.

2.7.1. Estructura de Sistema Fotovoltaico Aislado

La conversión de energía en estos sistemas se lleva a cabo a través de paneles fotovoltaicos, los cuales pueden generar corriente continua a 48V, 24V o 12V, dependiendo de la configuración. La energía se almacena mediante baterías para su uso en cualquier momento, asegurando un suministro constante incluso cuando no hay sol.

Para aplicaciones específicas, se puede instalar un convertidor de corriente continua a corriente alterna de 220V o 110V, permitiendo operar otros dispositivos de bajo consumo (Chico Ramírez, 2023).

2.7.1.1. Módulo Fotovoltaico.

Es un dispositivo que captura la energía solar y la convierte en energía eléctrica en forma de corriente continua (CC). Está compuesto por varias celdas solares, comúnmente de silicio, las cuales generan electricidad cuando son expuestas a la luz del sol. Estos módulos son la unidad básica de los sistemas de energía solar y pueden conectarse en serie o en paralelo para alcanzar la tensión y corriente deseadas según la aplicación (Cuco Pardillos, 2021).

2.7.1.2. Regulador de Carga.

Este dispositivo se encarga de gestionar y controlar el proceso de carga en las baterías de un sistema de energía solar. Tiene como principal función es proteger las baterías de sobrecargas y descargas profundas, asegurando que se carguen de manera óptima y prolongando su vida útil. A su vez, también puede equilibrar la carga entre múltiples baterías y desconectarlas cuando estén completamente cargadas o demasiado descargadas (Cuco Pardillos, 2021).

2.7.1.3. Inversor.

Transforma la corriente continua (CC) generada por las celdas solares o almacenada en las baterías en corriente alterna (CA). Esta conversión es necesaria ya que la mayoría de los electrodomésticos y equipos eléctricos utilizan corriente alterna para su funcionamiento. De esta manera, el inversor permite que la energía solar pueda ser utilizada en una amplia gama de aplicaciones domésticas y comerciales (Cuco Pardillos, 2021).

2.7.1.4. Batería.

Este dispositivo almacena energía eléctrica y la libera en forma de corriente continua (CC) cuando se necesita. Se compone por celdas electroquímicas que tienen electrodos de materiales específicos y un electrolito que permite el flujo de iones. Las baterías son importantes ya que proporcionan energía en períodos en que la fuente primaria no está disponible, como la noche o en días nublados (Cuco Pardillos, 2021).

CAPÍTULO III: DISEÑO DEL SISTEMA

El presente capítulo tiene como propósito examinar el estado actual de la gestión del sistema del agua potable en la Comuna San Luis de la Carbonería, con el objetivo de identificar los requisitos necesarios para el diseño del nuevo sistema de medición, corte y reconexión del agua potable. De este modo, el capítulo se ha estructurado en dos fases:

La primera fase se centra en realizar un vínculo dentro de la Junta de Agua, formalizado mediante el **Anexo 1:** *Certificado de auspicio otorgado por la J.A.A.P. para la aplicación del trabajo de grado en la Comuna San Luis de la Carbonería*. Este documento habilita la ejecución de la investigación y permite realizar el análisis de la situación actual. En esta etapa se busca recopilar información sobre las prácticas actuales de gestión del agua potable, la infraestructura existente y los principales desafíos que enfrenta la Junta Administradora de Agua Potable en los procesos de medición, corte y reconexión del servicio. Así mismo, se analizan los componentes disponibles para la medición del consumo, los métodos empleados para la recolección de datos y el procedimiento utilizado para su procesamiento y facturación. Con base en este análisis, se definen los requisitos técnicos que deberá cumplir el nuevo sistema.

La segunda fase se orienta en el diseño del sistema, lo que implica seleccionar los componentes de hardware y software más adecuados según los requisitos previamente definidos, para luego integrarlos en una arquitectura general que asegure un funcionamiento eficiente. Esta etapa también incluye la elaboración de diagramas de arquitectura que representen la estructura física, diagramas de flujo que describan los procesos operativos y el diseño de la interfaz gráfica para una visualización clara de la información recolectada. Posteriormente, se desarrolla la placa de circuito impreso (PCB), donde se integran y conectan todos los elementos electrónicos del sistema, y finalmente se diseñan los cases de protección, destinados a resguardar a los componentes de las condiciones reales de operación.

3.1. Estudio de la Situación Actual

La Comuna San Luis de la Carbonería, se encuentra ubicada al noroccidente de la ciudad de Imantag, a una distancia aproximada de 20 km. Esta comunidad forma parte de la parroquia de Imantag, en el cantón Cotacachi, provincia de Imbabura.

Para entender el estado actual de la gestión del sistema del agua potable en la Comuna, se realizaron entrevistas a algunos de los representantes de la nueva Junta Administradora de Agua que asumió funciones a principios del año 2025. En el **Anexo 2:** Formato *de entrevista para el análisis de la situación actual en la Comuna* se presenta el formato de entrevista aplicado, mientras que en el **Anexo 3:** *Entrevistas realizadas* se adjuntan las entrevistas realizadas al personal de la Junta. Entre los entrevistados estuvieron el Sr. Lisandro Acosta (tesorero), el Sr. Miguel Liquinchano (secretario) y el Sr. Jaime Ayala (operador), quienes compartieron información importante sobre el funcionamiento operativo y administrativo del servicio de agua potable en la comunidad.

Actualmente, se estima que existen entre 62 y 101 viviendas registradas, según los datos recopilados de las entrevistas realizadas, aunque no todas cuentan con servicio activo de agua potable. Algunas propiedades, especialmente en zonas más bajas como Santa Bárbara, acceden al servicio desde comunidades vecinas como Quitumba Grande. El número de medidores instalados se sitúa entre 62 a 74, incluyendo propiedades no habitadas que ya cuentan con su medidor instalado. La comunidad alberga aproximadamente entre 150 a 470 habitantes, sin embargo, no se dispone de un número exacto, ya que esa información es administrada directamente por el cabildo.

El agua que consume la comunidad proviene de fuentes naturales, el sistema cuenta con al menos dos vertientes adjudicadas ubicadas en la parte alta del cerro, desde donde el agua es captada y transportada hasta tanques de reserva y tratamiento.

La distribución hacia las viviendas se realiza mediante una red de tuberías, antes de ser entregada a los usuarios, el agua pasa por un tanque de almacenamiento y un sistema de filtrado como se presenta en el **Anexo 4:** *Infraestructura de almacenamiento y sistema de filtrado de agua potable de la Comuna San Luis de la Carbonería*, donde se realiza un proceso de cloración manual a cargo del operador.

El mantenimiento del sistema es frecuente, especialmente en las cajas de revisión y el tanque de tratamiento, que se limpia mensualmente debido a la acumulación de sedimentos provenientes de las vertientes.

En cuanto al método de medición del consumo de agua potable, actualmente se emplean medidores mecánicos, instalados en la mayoría de las viviendas como se muestra en el **Anexo 5:** *Medidores mecánicos actualmente instalados*, su estado general es bueno y no se han reportado fallas importantes. La lectura de los medidores se realiza mensualmente de forma manual, mediante una hoja preparada por el secretario como se muestra en el **Anexo 6:** *Formato de registro manual de lecturas de consumo de agua potable*. El operador, Jaime Ayala, se encarga de recorrer las viviendas para registrar las lecturas, actividad que puede tomar entre 3 a 6 horas, dependiendo de la extensión de la zona y el medio de transporte utilizado (motocicleta o a pie).

El proceso de facturación también es manual, una vez tomadas las lecturas la información se digitaliza para generar recibos impresos, que se entregan a los usuarios como se presenta en el **Anexo 7:** *Comprobantes de facturación del consumo de agua potable emitidos por la J.A.A.P. San Luis de la Carbonería*. La base del servicio es de 3 dólares mensuales, cubriendo un consumo de hasta 20 m^3, si se supera dicho límite, se cobra 15 centavos por cada metro cúbico adicional.

En caso de falta de pago luego de tres meses de atraso se aplica el corte del servicio, para realizar este proceso primero se entrega una notificación que otorga un mes adicional. Si persiste la deuda, se procede al corte del servicio mediante la colocación de un tapón en la tubería principal, para la reconexión el usuario debe cancelar un valor adicional.

En cuanto a la gestión interna y documentación, los entrevistados confirmaron que se conserva un respaldo físico de los registros de consumo y pagos en las oficinas de la Junta. Si bien se han mencionado errores menores en administraciones anteriores, la nueva directiva asegura no haber tenido inconvenientes hasta la fecha.

En lo relacionado con la posibilidad de modernización del sistema, los tres representantes coincidieron en que la implementación de un sistema automatizado de medición y corte sería beneficiosa para optimizar la gestión. Consideran que reduciría la carga operativa, facilitaría el control del consumo y brindaría mayor transparencia. Todos señalaron que la comunidad estaría dispuesta a aceptar la implementación tecnológica, siempre y cuando se presente un proyecto claro y viable en términos de costo y beneficio.

Por último, en cuanto a las tarifas, actualmente no existen tarifas diferenciadas, aunque se ha planteado en reuniones la posibilidad de aplicar descuentos para adultos mayores o personas con discapacidad.

3.2. Requerimientos

En base al estudio realizado sobre la situación actual de la gestión del agua potable en la Comuna San Luis de la Carbonería, y aplicando las recomendaciones del estándar ISO/IEC/IEEE 29148, se procede a identificar los requerimientos necesarios para el diseño del nuevo sistema de medición, corte y reconexión del agua potable.

La identificación de requerimientos tiene como finalidad asegurar que el sistema propuesto cumpla con criterios de funcionalidad, eficiencia y adaptabilidad, garantizando el éxito del proyecto. Así mismo, cada uno de los requerimientos definidos serán validados mediante trabajos de investigación similares antes realizados, todo esto se presentará en el **Anexo 8:** *Matriz de revisión de trabajos relacionados*.

El estándar ISO/IEC/IEEE 29148 establece lineamientos para la ingeniería de requisitos de hardware y software, promoviendo buenas prácticas que mejoran la calidad, claridad y consistencia de los requerimientos durante todo el ciclo de vida del proyecto. Su aplicación facilita la comunicación entre los actores involucrados, minimiza riesgos de errores durante el desarrollo y contribuye a que el sistema final cumpla con las necesidades de la comunidad.

Para identificar los requerimientos, se consideran tres niveles principales como se puede apreciar en la Tabla 7, en donde se muestra las abreviaturas que se van a usar a lo largo de este capítulo, los requerimientos y una breve descripción de cada uno de ellos.

Tabla 7.

Niveles y abreviaturas para la identificación de requerimientos

Abreviaturas	Requerimientos	Descripción
StRS	Requerimientos de Stakeholders	Reflejan las necesidades y expectativas de los actores involucrados.
SyRS	Requerimientos del sistema	Definen las funciones que debe realizar el sistema para cumplir con dichas necesidades.
ArRS	Requerimientos de arquitectura	Describen cómo se debe estructurar el sistema desde el punto de vista técnico.

Nota: Elaboración propia, 2025.

Este proceso permite definir con claridad los elementos principales del sistema, asegurando que su implementación sea técnica y operativamente viable, alineada con el entorno de la comunidad y capaz de solventar las limitaciones del modelo actual.

3.2.1. Requerimientos de Stakeholders

Los Stakeholders o actores involucrados son personas, grupos u organizaciones que presentan interés, influencia o se ven afectados de manera directa o indirecta a lo largo del proyecto que se esté realizando.

La Tabla 8 a continuación enlista a los Stakeholders que están involucrados en el desarrollo de este trabajo de grado, así como las funciones o cargos que ejercen.

Tabla 8.

Stakeholders involucrados en el desarrollo del proyecto

Nro.	Actores Involucrados	Función
1	Habitantes de la Comuna San Luis de la Carbonería	Usuarios del sistema propuesto.
2	MSc. Fabián Cuzme	Director del trabajo de titulación.
3	MSc. Jaime Michilena	Asesor del trabajo de titulación.
4	Dr. Rolando Lomas	Presidente de la Comuna.
5	Fabricio Donoso	Desarrollador del proyecto.

Nota: Elaboración propia, 2025.

Para el desarrollo del sistema, es importante definir los requerimientos clave que debe cumplir la parte operativa, considerando las necesidades y expectativas de los usuarios. La Tabla 9 presenta los requerimientos de Stakeholders (StRS) identificados que deben ser considerados para el diseño del sistema.

Tabla 9.

Requerimientos de Stakeholders

Requerimientos de Stakeholders (StRS)					
Nro.	**Requerimientos**	**Prioridad**			**Pre req.**
		Alta	**Media**	**Baja**	
Requerimientos Operacionales					
StRS1	Adquisición y almacenamiento de datos del consumo del agua potable de forma automática.	X			
StRS2	Comunicación inalámbrica para transmisión de los datos entre el nodo sensor y el Gateway.		X		
StRS3	Operatividad continua las 24 horas del día.	X			
StRS4	Trabajar con bajo consumo energético.		X		
StRS5	Emplear energías alternativas para su autoabastecimiento.	X			
StRS6	Visualización del historial de consumo de agua potable por vivienda.	X			
Requerimientos de Usuario					
StRS7	Acceso mediante credenciales de inicio de sesión a plataforma de visualización del historial de consumo de agua potable.	X			
StRS8	Disponibilidad de datos recopilados del consumo de agua potable para revisión del personal autorizado.	X			
StRS9	Automatización del cálculo del valor mensual de facturación según el consumo.	X			

Nota: La Tabla muestra los requerimientos del sistema definidos a partir de las necesidades de los actores involucrados. Elaboración propia, 2025.

3.2.2. Requisitos del Sistema

Para garantizar la funcionalidad del proyecto, se consideran los requerimientos del sistema (SySR), donde se detalla de manera general las características y propiedades que debe cumplir. En la Tabla 10 se presentan los requerimientos relacionados con el uso del sistema, su interfaz, los modos y estados de operación, así como sus características físicas.

Tabla 10.

Requerimientos del sistema

Requerimientos del Sistema (SyRS)					
Nro.	**Requerimientos**	**Prioridad**			**Pre req.**
		Alta	**Media**	**Baja**	
	Requisitos de Uso				
SyRS1	La tecnología de comunicación inalámbrica deberá permitir un alcance de transmisión adecuado para entornos rurales.	X			**StRS2**
SyRS2	La tecnología de comunicación inalámbrica deberá operar con bajo consumo energético.		X		**StRS4**
SyRS3	La fuente de energía primaria deberá ser capaz de energizar a todos componentes del nodo sensor.	X			
SyRS4	El nodo sensor deberá permanecer energizado de forma continua durante las 24 horas del día.	X			**StRS3**
SyRS5	El nodo sensor deberá contar con una fuente de energía secundaria que garantice su operatividad.	X			
SyRS6	El nodo sensor deberá ser instalado en la red de distribución de agua domiciliaria.		X		
SyRS7	La electroválvula deberá ser controlada mediante un relé que permita su activación y desactivación.		X		

	Requisitos de Performance			
SyRS8	La medición del consumo del agua potable se realizará mediante un sensor de flujo.	X		
SyRS9	La suspensión del servicio de agua potable se realizará mediante la electroválvula.	X		**SyRS7**
SyRS10	El almacenamiento de datos recolectados deberá realizarse en la nube.	X		
SyRS11	Los datos recolectados del sensor de flujo serán procesados para determinar las tarifas de facturación.	X		
	Requisitos de Modo/Estado			
SyRS12	El funcionamiento del sistema deberá ser de forma ininterrumpida las 24 horas del día.	X		**StRS3**
SyRS13	El dispositivo deberá contar con una fuente de energía primaria basada en energía renovable que permita la integración de una fuente secundaria que asegure la autonomía en ausencia de la fuente primaria.		X	**StRS5**
SyRS14	Los cortes del servicio se efectuarán conforme a los plazos especificados por la Junta de Agua.		X	
SyRS15	La recopilación de datos se realizará conforme a los plazos especificados por la Junta de Agua.		X	
	Requisitos de Interfaz			
SyRS16	El sistema deberá contar con una interfaz gráfica que permita visualizar el consumo de agua potable por usuario.	X		**StRS6**
SyRS17	La interfaz deberá permitir la generación de reportes de consumo y facturación de agua potable.	X		
SyRS18	La interfaz deberá ser accesible desde cualquier navegador web.		X	
SyRS19	El sistema deberá requerir autenticación de usuario para acceder a la plataforma de visualización y consumo de agua potable.	X		**StRS7**

Requisitos Físicos			
SyRS20	El módulo sensor de flujo deberá ser calibrado antes de ser incorporado al sistema.	X	**SyRS8**
SyRS21	El nodo sensor deberá estar instalado cerca del medidor mecánico para comprobar la precisión de las mediciones.	X	**SyRS6**
SyRS22	El nodo sensor deberá estar protegido mediante case de protección contra factores ambientales.	X	

Nota: Elaboración propia, 2025.

3.2.3. Requisitos de Arquitectura

En esta sección se describen los requisitos que debe cumplir tanto el Hardware como el Software necesarios para el desarrollo del sistema de medición, corte y reconexión de agua potable. La Tabla 11 presenta los requerimientos de arquitectura (ArRS) definidos para el sistema.

Tabla 11.

Requerimientos de la arquitectura

Requerimientos de Arquitectura (ArRS)					
Nro.	**Requerimientos**	**Prioridad**			**Pre req.**
		Alta	**Media**	**Baja**	
Requisitos de Hardware					
ArRS1	El microcontrolador deberá presentar características de bajo consumo energético.		X		**StRS4**
ArRS2	El microcontrolador deberá disponer de puertos digitales para controlar la electroválvula mediante el relé.	X			
ArRS3	El microcontrolador deberá ser compatible y capaz de operar utilizando la tecnología de comunicación inalámbrica elegida para el sistema.	X			

ArRS4	La comunicación inalámbrica del microcontrolador deberá operar en un rango de frecuencias acorde a la normativa del país.	X		
ArRS5	El microcontrolador deberá tener un costo accesible que permita la viabilidad económica del sistema		X	
ArRS6	El microcontrolador deberá integrar un circuito de gestión de carga de baterías.		X	
ArRS7	El sensor de flujo y la electroválvula deberán tener dimensiones para acoplarse a tuberías de ½ pulgada.	X		
	Requisitos de Software			
ArRS8	Utilizar un IDE de programación compatible con el microcontrolador.	X		
ArRS9	Software de curva de aprendizaje y adaptabilidad rápida.	X		
ArRS10	Seleccionar librerías compatibles con el microcontrolador que garanticen su correcto funcionamiento e integración en el sistema.	X		
ArRS11	La página web deberá realizarse utilizando una plataforma de código abierto.		X	
ArRS12	La plataforma de desarrollo deberá permitir la conexión e interacción con una base de datos para almacenar y consultar los datos de consumo de agua potable.	X		
	Requisitos de Diseño			
ArRS13	El sistema debe ser de bajo costo.		X	**ArRS5**
ArRS14	El sistema debe ser de bajo consumo energético.		X	**StRS4**
ArRS15	El nodo sensor deberá ser colocado en un lugar estratégico para una óptima comunicación con el Gateway.		X	

ArRS16	El nodo sensor deberá estar protegido de posibles daños externos.	X		**SyRS22**
	Requisitos Eléctricos			
ArRS17	La alimentación del nodo sensor deberá ser conmutada para un funcionamiento ininterrumpido.	X		
ArRS18	Optimizar lo máximo posible el sistema para un bajo consumo energético.		X	
ArRS19	La fuente principal de energía deberá ser de energía renovable, garantizando una fuente autorrenovable y limpia.	X		**StRS5**
ArRS20	La fuente de energía secundaria deberá ser mediante el uso de baterías garantizando un funcionamiento ininterrumpido del sistema.	X		**SyRS5**
ArRS21	La fuente de alimentación deberá operar en un rango de 5V a 12V para garantizar un funcionamiento seguro y estable del sistema.		X	

Nota: Elaboración propia, 2025.

3.3. Selección de Hardware y Software

Para la elección de los componentes de hardware y software necesarios en el desarrollo del sistema se realizará en base a los requerimientos previamente definidos. Cada una de las opciones disponibles en el mercado será evaluada considerando su capacidad de cumplir con las especificaciones técnicas establecidas. Para llevar a cabo esta evaluación, se aplicará un método de ponderación binaria, asignando un valor de 1 en caso de que el componente cumpla con el requerimiento y 0 si no lo cumple. De esta manera, se garantizará una selección objetiva y alineada a las necesidades del sistema, priorizando aquellos elementos que aseguren la funcionalidad, eficiencia y sostenibilidad del proyecto de trabajo de grado.

3.3.1. Selección de Hardware

Para la selección del hardware se realizará en función del cumplimiento de los requerimientos de arquitectura antes definidos. Para ello, se aplicará un sistema de ponderación binaria, en el cual se asignará un valor de 1 sí el componente cumple con el requerimiento y 0 sí no lo cumple. Esta metodología permitirá comparar de forma objetiva las diferentes alternativas disponibles en el mercado. Al finalizar el proceso, se seleccionará el componente que posea la mayor puntuación total, asegurando así que la elección responda de manera óptima a las necesidades técnicas del sistema.

3.3.1.1. Tecnología de Comunicación Inalámbrica.

La selección de la tecnología de comunicación inalámbrica es un punto clave en el diseño del sistema, ya que de esta dependerá la eficiencia, el alcance y el consumo energético del hardware empleado para la transmisión de datos entre los nodos sensores y el Gateway.

En la Tabla 12 se presentan y comparan las tecnologías inalámbricas más relevantes para este tipo de aplicaciones, considerando criterios como: el alcance, consumo energético, compatibilidad con microcontroladores y el cumplimiento normativo, con el fin de identificar la opción más adecuada para garantizar una transmisión de datos eficiente y de bajo consumo energético.

Tabla 12.

Selección de la tecnología de comunicación inalámbrica

	Requerimientos					
	StRS2	**SyRS1**	**SyRS2**	**ArRS3**	**ArRS4**	**Valoración**
Wi-Fi	1	0	0	1	1	3
Zigbee	1	0	1	1	1	4
LoRa	1	1	1	1	1	5

Cumple “1” – No cumple “0”
Elección: Mediante la evaluación realizada, la tecnología LoRa fue seleccionada para la transmisión de datos en el sistema propuesto. Esta elección se basa por su cumplimiento en todos los requerimientos definidos, como el alcance necesario para zonas rurales (SyRS1), el bajo consumo energético (SyRS2), la compatibilidad para microcontroladores (ArRS3) y el cumplimiento dentro de la normativa de frecuencias en el país (ArRS4).

Nota: Elaboración propia, 2025.

3.3.1.2. Microcontrolador.

Dentro del diseño del sistema automatizado de medición y control del consumo de agua potable, la elección del microcontrolador es fundamental, ya que será utilizado tanto en el nodo Gateway como en el nodo sensor. En el caso del Gateway, este dispositivo será el encargado de recibir, centralizar y retransmitir los datos enviados por los sensores hacia el servidor mediante conexión WiFi y protocolo MQTT. Por otra parte, en el nodo sensor, el microcontrolador será responsable de adquirir las lecturas del caudal, controlar la electroválvula, gestionar el módulo RTC, y transmitir los datos vía LoRa al Gateway.

Dado que ambos nodos requieren características similares como bajo consumo energético, compatibilidad con tecnología LoRa, disponibilidad de puertos digitales, operación en frecuencia normativa y capacidad para manejar baterías, se ha optado por utilizar el mismo modelo de microcontrolador para ambos.

En la Tabla 13 se presentan las alternativas evaluadas, aplicando una metodología de ponderación binaria, esta evaluación permite identificar el microcontrolador más adecuado, tanto en términos técnicos como económicos.

Tabla 13.

Selección de microcontrolador

	Requerimientos						
	ArRS1	**ArRS2**	**ArRS3**	**ArRS4**	**ArRS5**	**ArRS6**	**Valoración**
ESP32 LoRa Heltec V3	1	1	1	1	1	1	6
TTGO LoRa32 V2.1	1	1	1	1	1	0	5
Arduino MKR WAN 1310	1	1	1	1	0	1	5
Módulo LoRa SX1278	1	0	1	1	1	0	4
TTGO T-Beam V1.1 LoRa	1	1	1	1	1	0	5

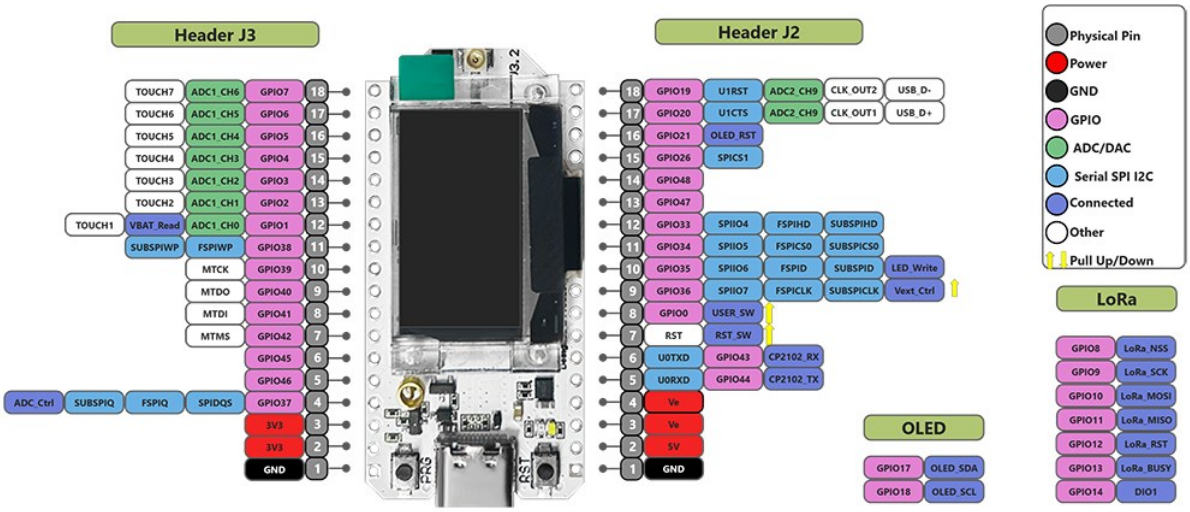
Cumple "1" – No cumple "0"

Elección: Tras evaluar las distintas alternativas disponibles en el mercado, se seleccionó el ESP32 LoRa Heltec V3 como microcontrolador para ambos nodos del sistema: Gateway y sensor. Se tomo esta decisión dado que el dispositivo cumple con todos los requerimientos de arquitectura definidos, ofrece una excelente relación entre costo y funcionalidad, y garantiza un desempeño confiable en sistemas alimentados por energía renovable. Además, cuenta con compatibilidad con tecnología LoRa, múltiples puertos de entradas/salidas digitales, capacidad de gestión de batería, y facilidad de integración lo convierten en una solución versátil y robusta para el desarrollo del prototipo. En la Figura 11 se presenta el microcontrolador seleccionado, mientras que en la Tabla 14 se detallan sus principales características técnicas.

Nota: La Tabla muestra la selección del microcontrolador que será implementado en el diseño del prototipo del sistema tanto como nodo sensor y nodo Gateway. Elaboración propia, 2025.

Figura 11.

ESP32 LoRa Heltec V3



Nota: Extraído de ZonaIndustrial, 2025.

Tabla 14.

Especificaciones técnicas del microcontrolador ESP32 LoRa Heltec V3

Parámetros	Descripción
Chip principal	ESP32-S3FN8 (doble núcleo, 32 bits Xtensa® lx7)
Módulo LoRa	SX1262
Frecuencia LoRa	470~510 MHz 863~928 MHz
Potencia TX	21 ± 1 dBm
Sensibilidad RX	hasta -134 dBm (SF12, BW 125 KHz)
Conectividad	Wi-Fi 802.11 b/g/n hasta 150 Mbps, Bluetooth 5
Interfaz USB	USB Tipo C
Alimentación	entrada para batería de litio 3,7 V
Memoria	384 KB ROM, 512 KB SRAM, 8 MB Flash, 16 KB RTC SRAM
Alcance	1 – 10 Km
Temperatura de operación	-20 °C a 70 °C
Dimensiones	50,2 × 25,5 × 10,2 mm

Nota: Adaptado de ZonaIndustrial, 2025.

3.3.1.3. Sensor de Flujo.

El sensor de flujo permitirá cuantificar el volumen de agua consumido en cada vivienda. Su correcta elección no solo asegura la fiabilidad de las mediciones, sino también una integración óptima con el microcontrolador y el resto de los componentes electrónicos del sistema.

En la Tabla 15 se presentan las opciones disponibles en el mercado, las cuales serán evaluadas aplicando un criterio de ponderación binaria que permitirá identificar al dispositivo más adecuado que asegure un funcionamiento eficiente del prototipo.

Tabla 15.

Selección del sensor de flujo

	Requerimientos					
	SyRS8	**SyRS20**	**ArRS7**	**ArRS14**	**ArRS13**	**Valoración**
Sensor de Flujo YF-S201	1	1	1	1	1	5
Sensor de Flujo YF-S402	1	1	1	1	0	4
Sensor de Flujo FS300A	1	1	0	1	1	4

Cumple “1” – No cumple “0”

Elección: Para la selección del sensor de flujo, se consideraron los requerimientos técnicos del sistema, como la capacidad de medir el caudal de agua (SyRS8), la posibilidad de calibración previa (SyRS20), la compatibilidad con tuberías de ½ pulgada (ArRS7), el bajo consumo energético (ArRS14) y la viabilidad económica del componente (ArRS13). Tras la evaluación, se seleccionó el Sensor de Flujo YF-S201 como se presenta en la Figura 12, dado que cumple con la totalidad de los requerimientos definidos, ofreciendo una medición precisa, bajo consumo energético, bajo costo y una fácil integración con el sistema de medición propuesto. En la Tabla 16 se presentan los detalles técnicos de este sensor.

Nota: Elaboración propia, 2025.

Figura 12.

Sensor de Flujo YF-S201



Nota: Extraído de La Electrónica, 2025.

Tabla 16.

Especificaciones técnicas del sensor de Flujo YF-S201

Parámetros	Descripción
Voltaje de operación	5V - 18V DC
Consumo de corriente	15mA (5V)
Capacidad de carga	10mA (5 VDC)
Salida	Onda cuadrada pulsante
Rango de Flujo	1-30L/min
Volumen promedio por pulso	2.25mL
Pulsos por litro	450
Factor de conversión	7.5
Rosca externa	1/2" NPS
Presión de trabajo máx.	1.75MPa (17 bar)
Temperatura de funcionamiento	-25ºC a 80ºC
Material	Plástico color negro

Nota: Adaptado de NayLamp Mechatronics, 2025.

3.3.1.4. Electroválvula.

La electroválvula será el componente encargado de activar o interrumpir el paso del agua según los requerimientos del operario, permitiendo ejecutar el corte o la reconexión del servicio. Para su selección se consideraron diferentes opciones comerciales con características similares, evaluando su compatibilidad con el sistema de control, el tipo de alimentación, la facilidad de integración con las tuberías existentes y su comportamiento eléctrico.

En la Tabla 17 se presentan las alternativas comparadas, aplicando un criterio de ponderación binaria que permite identificar la opción que mejor se ajusta al funcionamiento esperado del sistema.

Tabla 17.

Selección de la electroválvula

	Requerimientos					
	SyRS8	**ArRS8**	**ArRS9**	**ArRS10**	**ArRS13**	**Valoración**
Electroválvula 1/2" 12VDC	1	1	1	1	1	5
Electroválvula 2W-160-15 12V 1/2"	1	1	1	0	0	3
Electroválvula 1/2" Latón 12VDC	1	1	1	1	1	5
Cumple “1” – No cumple “0”						
Elección: Para la selección de la electroválvula se consideraron los requerimientos técnicos del sistema, como el control preciso del flujo de agua (SyRS8), la compatibilidad con tuberías de ½ pulgada (ArRS8), la operación a 12VDC (ArRS9), el bajo consumo de corriente (ArRS10) y el bajo costo (ArRS13). Tras la evaluación, se seleccionó la Electroválvula de ½ pulgada 12VDC como se presenta en la Figura 13, dado que cumple con todos los requerimientos establecidos, es ampliamente comercializada y garantiza una integración rápida y efectiva dentro del sistema. La Tabla 18 presenta los detalles técnicos de esta electroválvula.						

Nota: La electroválvula de Latón también cumple con los requisitos sin embargo fue descartada debido a que su costo es mayor a la electroválvula seleccionada. Elaboración propia, 2025.

Figura 13.

Electroválvula



Nota: Extraído de NovatronicEc, 2020.

Tabla 18.

Especificaciones técnicas de la electroválvula

Parámetros	Descripción
Voltaje de operación	12V DC
Consumo de corriente	0.6A
Modo de operación	Normalmente abierta
Tipo de válvula	Diafragma (operado por servo)
Rosca externa	1/2" NPS
Presión	0.02 a 0.8 mPa
Temperatura máxima del fluido	100 °C
Tiempo de respuesta	≤ 0.15s, apagar el ≤ 0.3s
Rectificación	Rectificación síncrona
Válvula de estimado de vida	500.000 ciclos
Material	Metal y plástico

Nota: Adaptado de ElectroStore, 2025.

3.3.1.5. Módulo de Reloj.

El módulo de reloj de tiempo real (RTC) permite establecer y controlar los momentos específicos en los que el nodo sensor debe enviar los datos hacia el Gateway. Esta función contribuye a organizar el flujo de información y optimizar el consumo energético, especialmente en sistemas que operan de forma autónoma. Para esta función se consideraron distintos módulos disponibles en el mercado, valorando su precisión, estabilidad operativa y facilidad de integración con el resto del hardware.

En la Tabla 19 se muestran las alternativas evaluadas, aplicando un criterio de ponderación binaria que facilita la selección del módulo más adecuado para el funcionamiento del prototipo.

Tabla 19.

Selección del módulo RTC

	Requerimientos				
	SyRS12	**SyRS15**	**ArRS13**	**ArRS14**	**Valoración**
DS3231	1	1	1	0	3
DS1307	1	1	1	1	4
PCF85263A	1	1	0	1	3

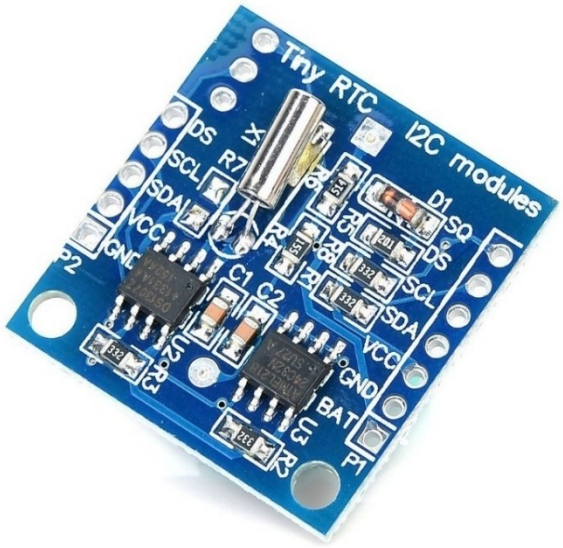
Cumple “1” – No cumple “0”

Elección: Para realizar la transmisión de datos desde el nodo sensor hacia el Gateway, se consideró la integración de un módulo de reloj de tiempo real (RTC). La elección se realizó en base a los requerimientos de funcionamiento continuo (SyRS12), cumplimiento de los intervalos de recolección definidos por la Junta de Agua (SyRS15), bajo costo (ArRS13) y bajo consumo energético (ArRS14). Tras la evaluación de las alternativas, se seleccionó el módulo DS1307 como se presenta en la Figura 14, dado que cumple con todos los requerimientos planteados, ofrece un consumo reducido y es una opción accesible y ampliamente disponible, en la Tabla 20 se presentan los detalles técnicos de este módulo.

Nota: Elaboración propia, 2025.

Figura 14.

Módulo DS1307



Nota: Extraído de Novatronic, 2020.

Tabla 20.

Especificaciones técnicas del módulo DS1307

Parámetros	Descripción
Voltaje de operación	4.5V DC a 5.5V DC
Consumo de corriente	1.5 mA
Voltaje de Batería	2V DC A 3.5V DC
Puerto de comunicación	I2C
Frecuencia máxima de transmisión	100KHz
Formato	BCD
Temperatura de operación	de 0°C a +70°C
Dimensiones	Largo 2.8cm; ancho 2.7cm; alto 0.9cm

Nota: Adaptado de Electrónica Plug and Play, 2025.

3.3.1.6. Fuente de Energía Renovable.

El sistema de medición y control propuesto requiere una fuente de energía renovable que asegure su funcionamiento continuo. Por ello, se analizaron tres alternativas viables para el entorno de implementación: energía solar, eólica e hidráulica. Cada opción fue evaluada según su viabilidad operativa, facilidad de integración y adecuación a las condiciones del lugar.

En la Tabla 21 se presentan las fuentes comparadas mediante un criterio de ponderación binaria, lo cual permite identificar la alternativa más adecuada para garantizar el suministro energético del sistema.

Tabla 21.

Selección de fuente de energía renovable

	Requerimientos					
	StRS5	**SyRS13**	**ArRS14**	**ArRS18**	**ArRS19**	**Valoración**
Energía Solar	1	1	1	1	1	5
Energía Eólica	1	1	1	0	1	4
Energía Hidráulica	1	1	1	0	1	4
Cumple “1” – No cumple “0”						

Elección: Se evaluaron tres fuentes de energía renovable en función de los requerimientos establecidos: uso de energía renovable (StRS5), presencia de fuente primaria y acoplamiento sencillo de fuente secundaria para garantizar autonomía (SyRS13), bajo consumo energético del sistema (ArRS14), optimización energética (ArRS18), y sostenibilidad ambiental mediante una fuente limpia y autorrenovable (ArRS19). Tras la evaluación, se optó por hacer uso de energía solar como fuente principal, ya que cumple con la totalidad de los requerimientos establecidos. Además de su eficiencia y bajo mantenimiento, se adapta fácilmente a zonas rurales, donde su disponibilidad y facilidad de instalación la convierten en una solución viable y sostenible para el sistema propuesto.

Nota: Elaboración propia, 2025.

3.3.1.7. Celda Fotovoltaica.

Tras haber seleccionado la energía solar como la fuente renovable principal para el sistema, se procede a evaluar diferentes opciones de paneles solares disponibles en el mercado que permitan abastecer de forma continua al nodo sensor y a la fuente de energía secundaria. Para ello, se consideraron tres paneles solares de 12V con distintas potencias (30W, 60W y 100W), y se los evaluará con criterios como autonomía operativa, viabilidad económica, sostenibilidad ambiental y facilidad de implementación. En la Tabla 22 se presenta la comparación entre estas alternativas mediante una ponderación binaria que permitirá identificar la opción más adecuada para el sistema.

Tabla 22.

Selección de la celda fotovoltaica

	Requerimientos					
	StRS5	**SyRS13**	**ArRS13**	**ArRS18**	**ArRS19**	**Valoración**
Panel 60W 12V	1	0	1	0	1	3
Panel 80W 12V	1	1	1	1	1	5
Panel 100W 12V	1	1	0	1	1	4

Cumple “1” – No cumple “0”

Elección: Se evaluaron tres opciones de celdas fotovoltaicas de 12V con distintas potencias nominales (60W, 80W y 100W), en función de los requerimientos del sistema: uso de energía renovable (StRS5), autonomía operativa (SyRS13), viabilidad económica (ArRS13), optimización energética (ArRS18) y sostenibilidad ambiental (ArRS19). El panel solar de 80W como se muestra en la Figura 15, obtuvo la mayor puntuación, ya que representa una solución más equilibrada en cuanto a rendimiento, costo y dimensiones. Esta parte se considera preliminar y será validada posteriormente mediante un análisis energético detallado, que tomará en cuenta el consumo real del sistema y las condiciones solares promedio del sitio de instalación, en la Tabla 23 se presentan algunos detalles técnicos.

Nota: La Tabla muestra la selección de la celda fotovoltaica preliminar que será implementada en el diseño del sistema. Elaboración propia, 2025.

Figura 15.

Celda Fotovoltaica 12V – 80W



Nota: La Figura muestra una imagen referencial de la celda fotovoltaica que se desea implementar en el prototipo del sistema. Extraído de Megatronica, 2025.

Tabla 23.

Especificaciones técnicas de Celda Fotovoltaica

Parámetros	Descripción
Voltaje de salida	12V a 18V
Potencia	80W
Tensión máx. potencia (VMPP)	17.6 V
Corriente máx. potencia (IMPP)	4.55 A
Tensión circuito abierto (VOC)	21.80 V
Corriente corto circuito (ISC)	4.90 A

Nota: La Tabla muestra detalles técnicos de la celda fotovoltaica que será considerada para la implementación en el diseño del sistema. Adaptado de AutoSolar, 2025.

3.3.1.8. Batería de Respaldo.

La batería es un componente esencial para asegurar el funcionamiento ininterrumpido del sistema, especialmente durante las horas en las que no hay luz solar. Su función es almacenar la energía generada por la celda fotovoltaica durante el día y suministrarla al nodo sensor durante la noche o en días nublados.

Para esta elección, se consideraron opciones de baterías de 12V con diferentes capacidades, ampliamente disponibles en el mercado, que sean compatibles con sistemas de carga solar. La evaluación se basa en criterios como autonomía energética, compatibilidad con el sistema, durabilidad, eficiencia en carga-descarga y sostenibilidad. En la Tabla 24 se presentan las alternativas comparadas mediante un sistema de ponderación binaria, que permitirá identificar la opción preliminar que mejor se ajuste al diseño del sistema.

Tabla 24.

Selección de la batería de respaldo

	Requerimientos					
	SyRS13	**ArRS13**	**ArRS14**	**ArRS18**	**ArRS19**	**Valoración**
Batería 12V 40Ah	1	1	1	1	1	5
Batería 12V 50Ah	1	0	1	1	1	4
Batería 12V 20Ah	0	1	1	0	1	3

Cumple "1" – No cumple "0"

Elección: Tras evaluar tres opciones de baterías de 12V con distintas capacidades, se selecciona la batería de 12V y 40Ah como se muestra en la Figura 16. Esta batería ofrece un buen equilibrio entre autonomía, tamaño y costo, además de ser ampliamente compatible con aplicaciones solares y presentar un buen rendimiento en carga y descarga. Aunque la batería de 50Ah presenta una mayor capacidad, su disponibilidad y costo son menos favorables. Por otro lado, la batería de 20Ah no cumple con los niveles de autonomía requeridos para mantener el sistema operativo durante toda la noche.

Esta elección es provisional, y se validará posteriormente mediante cálculos energéticos más detallados, considerando el consumo real del sistema y las condiciones de radiación solar del lugar de instalación, en la Tabla 25 se presentan algunos detalles técnicos.

Nota: La Tabla muestra la selección de la batería de respaldo preliminar que será implementada en el diseño del sistema. Elaboración propia, 2025.

Figura 16.

Batería 12V 40Ah



Nota: La Figura muestra una imagen referencial de la batería que se desea implementar en el prototipo del sistema. Extraído de Volta, 2025.

Tabla 25.

Especificaciones técnicas de Celda Fotovoltaica

Parámetros	Descripción
Voltaje Nominal	12V
Capacidad	40Ah
Tasa de descarga	0.2 - 0.5V
Electrolito	Gel
Uso	Solar/UPS/Telecomunicaciones

Nota: La Tabla muestra detalles técnicos de la batería que será considerada para la implementación en el diseño del sistema. Adaptado de Volta, 2025.

3.3.2. Selección de Software

Además del hardware, la elección del software es fundamental para garantizar el correcto funcionamiento e integración del sistema de medición y envío inalámbrico del consumo del agua potable.

El sistema requiere herramientas de software que permitan programar los microcontroladores, almacenar la información registrada, y gestionar los datos en una interfaz gráfica comprensible para los usuarios. Para ello, se ha considerado software accesible, de código abierto y con amplia documentación, que aseguren compatibilidad, facilidad de uso y eficiencia en el desarrollo.

3.3.2.1. Software para Programación de los Microcontroladores.

La programación de los microcontroladores utilizados en el sistema requiere de un entorno de desarrollo que sea compatible con las placas seleccionadas. Para facilitar el proceso de codificación, depuración y carga de programas, se evaluaron entornos que cuenten con soporte para esta arquitectura, sean de uso libre, posean una comunidad activa y documentación accesible. En la Tabla 26 se comparan dos entornos de desarrollo integrados (IDE) comúnmente utilizados, considerando su compatibilidad, facilidad de uso y funcionalidad para este tipo de aplicaciones.

Tabla 26.

Selección de IDE para programación

	Requerimientos			
	ArRS8	**ArRS9**	**ArRS10**	**Valoración**
Arduino IDE	1	1	1	3
VSCode	1	0	1	2
Cumple “1” – No cumple “0”				

Elección: Luego de evaluar los entornos de programación, se seleccionó Arduino IDE como software de desarrollo para programar los microcontroladores del sistema. Esta elección se basa en su compatibilidad nativa con el microcontrolador seleccionando previamente, su interfaz sencilla, el amplio soporte de librerías y gran documentación, además de la existencia de una comunidad activa.

Nota: Elaboración propia, 2025.

3.3.2.2. Software de Gestión para Base de Datos.

Para el almacenamiento y consulta de los datos registrados por los nodos sensores, es necesario implementar un sistema de gestión de bases de datos que brinde una manipulación eficiente, segura y estructurada de la información. En la Tabla 27 se comparan dos sistemas de bases de datos ampliamente utilizados en proyectos IoT y de software libre: MySQL y FireBase Realtime Database, evaluados en función de los requerimientos definidos para el desarrollo del software.

Tabla 27.

Selección de Bases de Datos

	Requerimientos		
	ArRS9	**ArRS13**	**Valoración**
MySQL	1	1	2
FireBase	1	0	1
Cumple “1” – No cumple “0”			

Elección: Se optó por elegir a MySQL como sistema de gestión de base de datos, ya que cuenta con amplia documentación y soporte comunitario, y es completamente gratuito. Esto lo convierte en una solución viable de bajo costo y fácil implementación. Firebase, aunque funcional, requiere mayor familiaridad con entornos en la nube y presenta restricciones en su plan gratuito, lo cual limita su adaptabilidad para este proyecto.

Nota: Elaboración propia, 2025.

3.3.2.3. Software para Visualización y Flujo de Datos.

El sistema requiere una plataforma de desarrollo que permita crear una interfaz visual para mostrar los datos recolectados al usuario, y que, a su vez, permita interactuar con la base de datos. Esta herramienta debe ser de código abierto para garantizar sostenibilidad, libertad de modificación y facilidad de integración. En la Tabla 28 se comparan Node-RED y Grafana, dos herramientas populares para visualización y gestión de datos.

Tabla 28.

Selección de software de visualización y gestión de flujo datos

	Requerimientos				
	ArRS9	**ArRS11**	**ArRS12**	**ArRS13**	**Valoración**
Node-RED	1	1	1	1	4
Grafana	0	1	1	1	3
Cumple “1” – No cumple “0”					
Elección: El software elegido como herramienta para la visualización de datos y el control del flujo de información es Node-RED. Esta plataforma de código abierto permite la conexión directa con bases de datos como MySQL, y ofrece una curva de aprendizaje baja gracias a su entorno visual. Su capacidad para construir dashboards dinámicos e interactuar con los microcontroladores lo convierte en una solución práctica y funcional.					

Nota: Elaboración propia, 2025.

3.4. Diagramas de Arquitectura

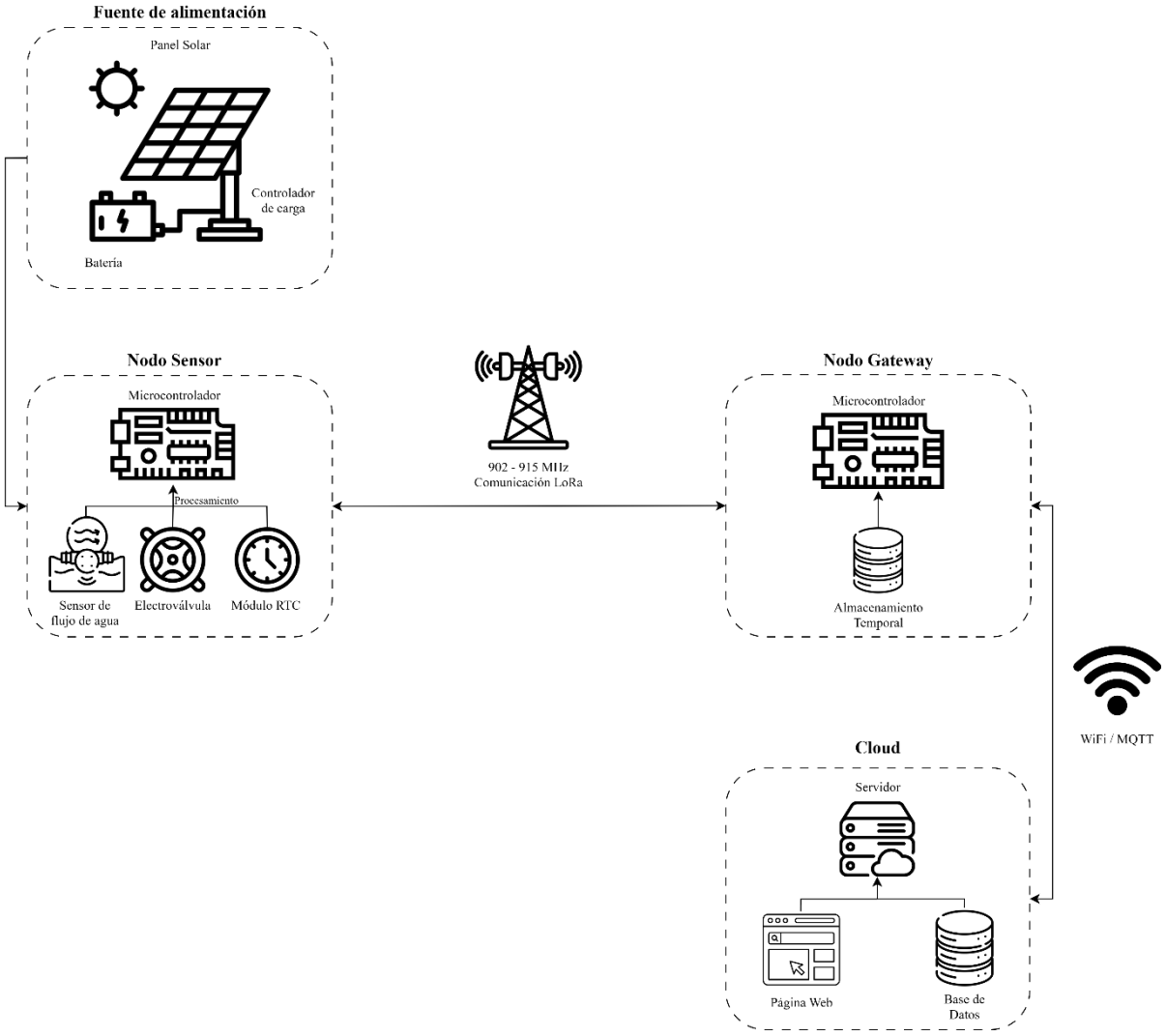
Realizada la selección de hardware y software, la siguiente fase consiste en diseñar la estructura del sistema. Para ello, se parte desde una perspectiva general, considerando el funcionamiento del mismo.

3.4.1. Arquitectura General del Sistema

La Figura 17 presenta el diagrama general de la arquitectura, donde se muestran los componentes del sistema de medición, corte y reconexión del servicio de agua potable, divididos en cuatro bloques principales que interactúan entre sí para garantizar un funcionamiento eficiente, autónomo y automatizado.

Figura 17.

Arquitectura general del sistema



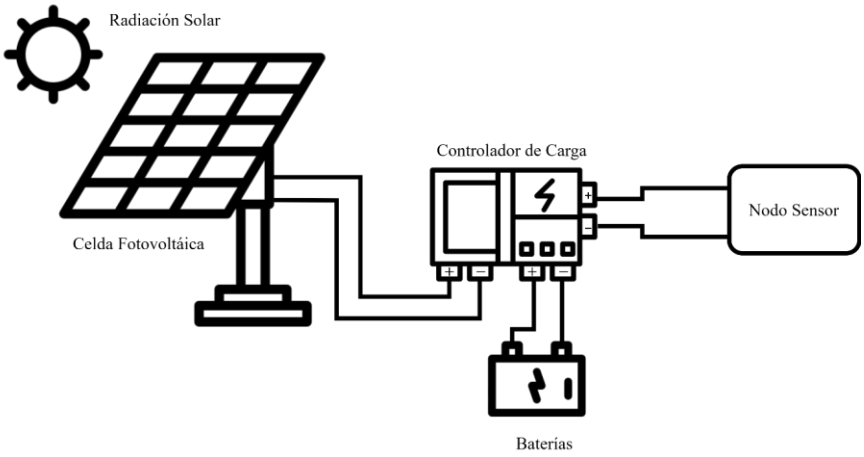
Nota: Elaboración propia, 2025.

3.4.2. Arquitectura de la Fuente de Alimentación

La Figura 18 presenta la arquitectura de la fuente de alimentación del nodo sensor, donde se muestra el flujo energético desde la celda fotovoltaica que capta la energía solar y la conduce hacia un controlador de carga, el cual es el encargado de regular la tensión y corriente que se envía a la batería de 12V. Esta batería almacena la energía necesaria para mantener el funcionamiento continuo del sistema durante la noche o en condiciones de baja radiación solar, garantizando la autonomía y estabilidad operativa del nodo sensor durante las 24 horas del día.

Figura 18.

Arquitectura de la fuente de alimentación



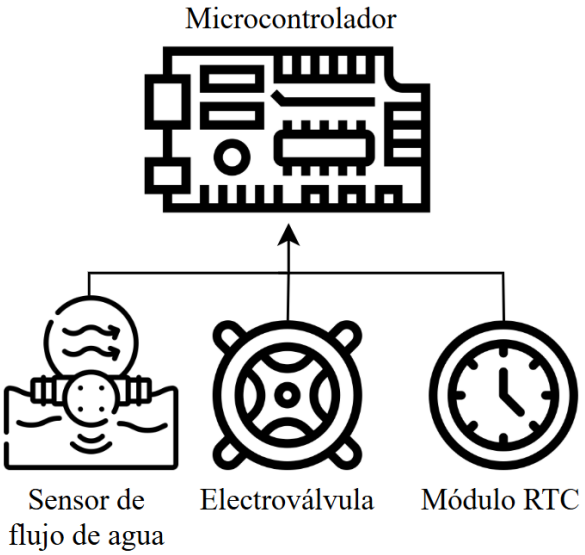
Nota: Elaboración propia, 2025.

3.4.3. Arquitectura del Nodo Sensor

El Nodo Sensor es el responsable de medir el consumo del agua potable en cada punto de conexión domiciliaria. Este nodo está conformado por un microcontrolador ESP32 LoRa, un sensor de flujo para detectar el caudal del agua, una electroválvula encargada de abrir o cerrar el paso del agua potable, y un módulo RTC que permite programar horarios de envío de datos, como se muestra en la Figura 19.

Figura 19.

Arquitectura del nodo sensor



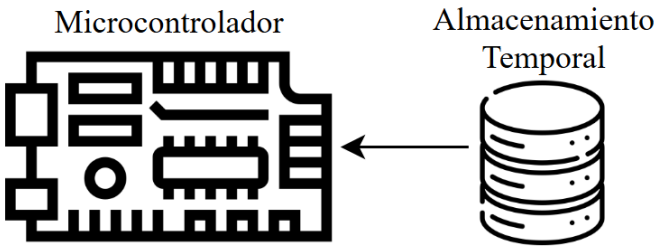
Nota: Elaboración propia, 2025.

3.4.4. Arquitectura del Nodo Gateway

El Nodo Gateway, como se presenta en la Figura 20 actúa como puente para la comunicación entre los nodos sensores desplegados y el servidor en la nube. Su función principal es la recepción de los datos del consumo enviados por los nodos sensores mediante comunicación LoRa, procesarlos y enviarlos a la plataforma de gestión (Node-RED) a través de WiFi utilizando el protocolo MQTT. También se encarga de recibir instrucciones desde el servidor, para la apertura o cierre de la electroválvula, y retransmitirlas de vuelta al nodo correspondiente.

Figura 20.

Arquitectura del nodo Gateway



Nota: Elaboración propia, 2025.

3.4.5. Arquitectura del Cloud

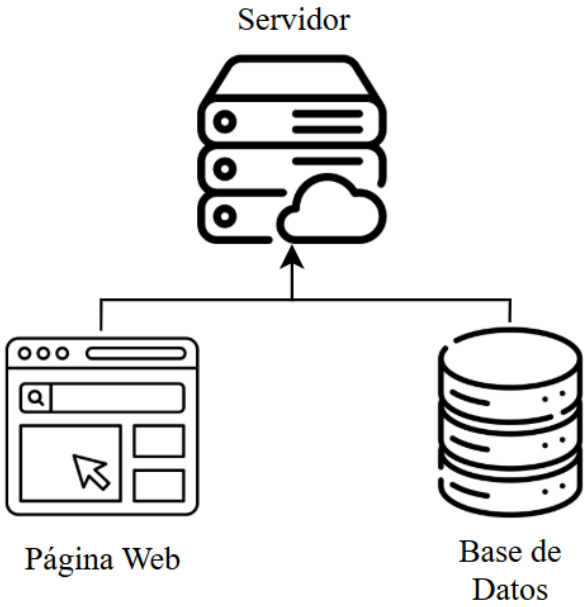
El Cloud centraliza la gestión lógica, almacenamiento de datos y visualización del sistema su arquitectura se muestra en la Figura 21. Está compuesto por dos elementos principales: Node-RED y MySQL. Node-RED funciona como el servidor lógico del sistema, siendo responsable de gestionar los datos recibidos desde el Gateway, procesarlos y tomar decisiones en función de reglas establecidas, como el corte del servicio ante la falta de pago.

Por otra parte, MySQL está encargado de almacenar de manera estructurada y segura la información generada por el sistema. Esto incluye registros de consumo, fechas de lectura, estados del servicio (activo, suspendido) lo que permite mantener un historial detallado para facilitar la generación de reportes y procesos de facturación.

Finalmente, la plataforma web proporciona una interfaz gráfica accesible desde cualquier navegador, diseñada para que el operador pueda consultar el consumo, verificar el estado del servicio, emitir facturas y ejecutar acciones como cortes o reconexiones.

Figura 21.

Arquitectura del cloud



Nota: Elaboración propia, 2025.

3.5. Diagramas de Flujo

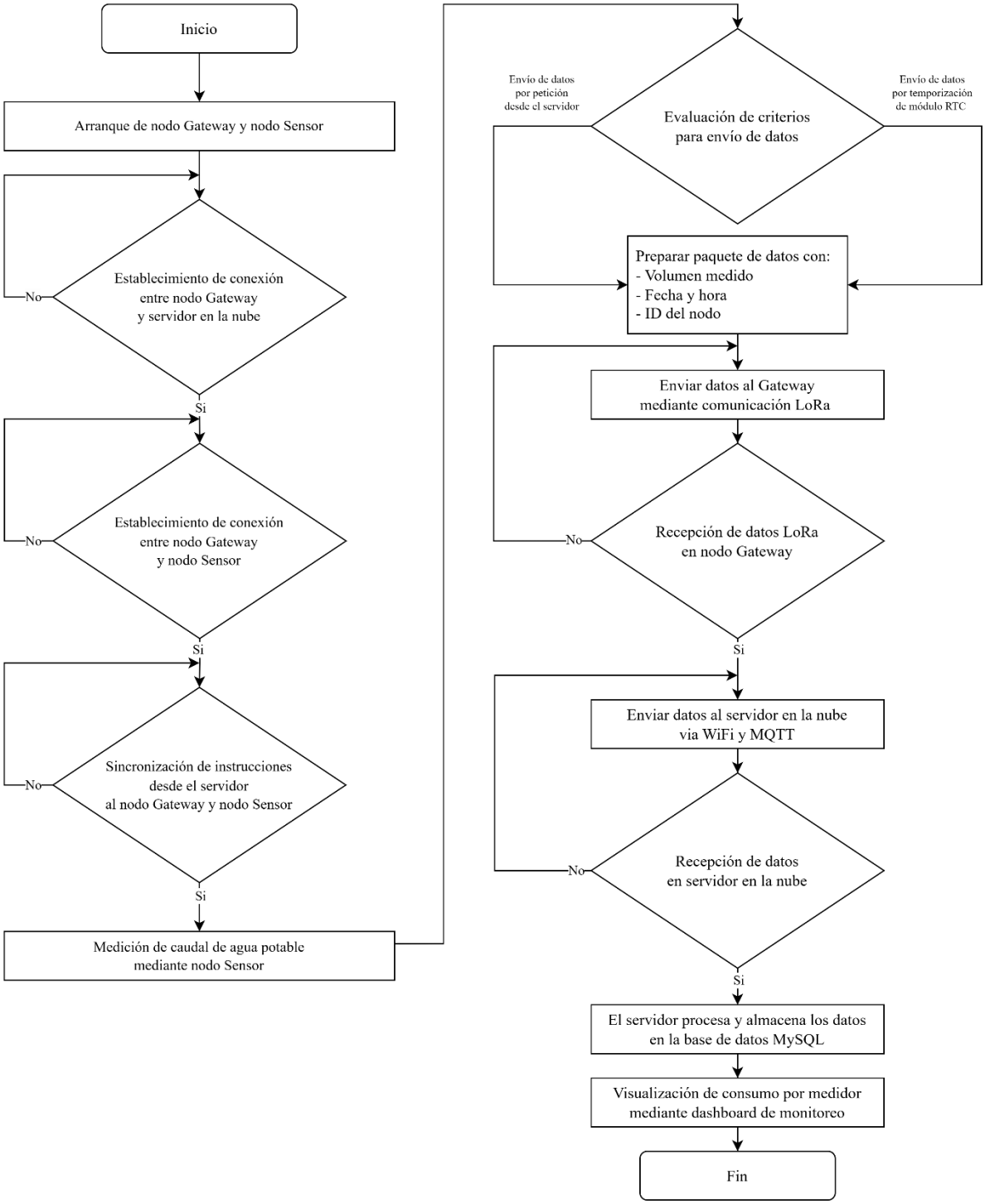
Los Diagramas de Flujo facilitan la comprensión lógica de las funciones y procesos que ejecutará el sistema, permitiendo tener una idea estructurada de la secuencia de operaciones, decisiones e interacciones entre los distintos módulos.

3.5.1. Diagrama de Flujo del Sistema General

En la Figura 22, Figura 23 y Figura 24 se muestra el funcionamiento lógico general del sistema, detallando la interacción entre sus componentes y el flujo de información que se establece dentro de este.

Figura 22.

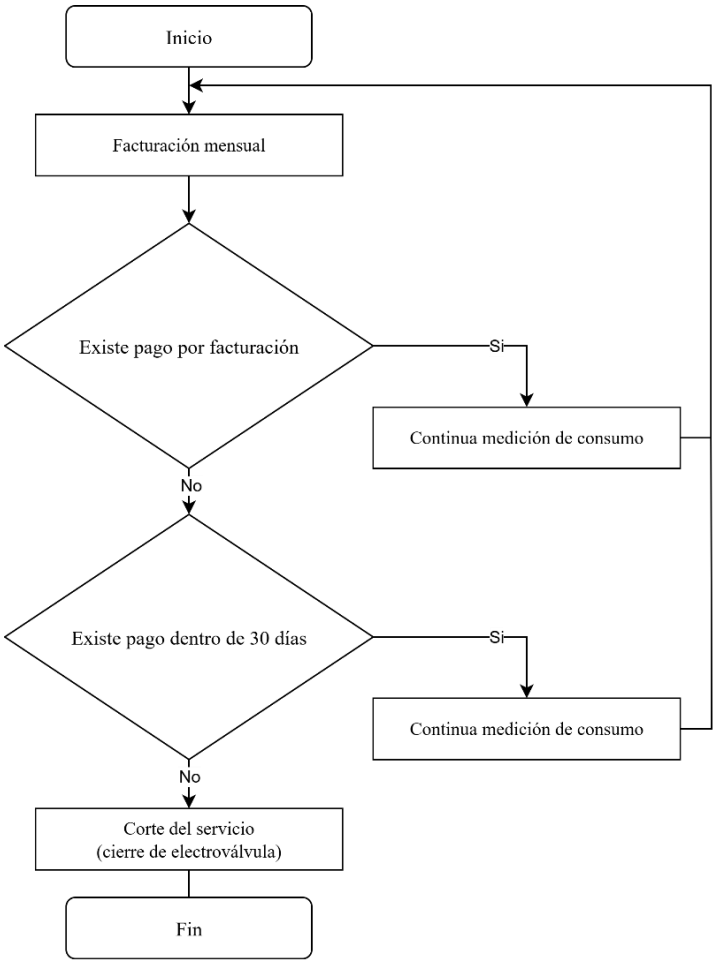
Diagrama de flujo general de medición del sistema



Nota: Elaboración propia, 2025.

Figura 23.

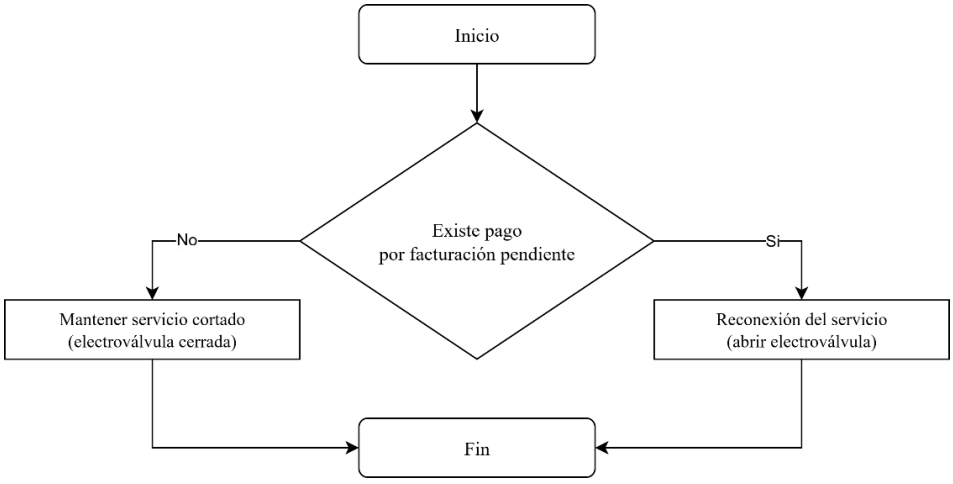
Diagrama de flujo de corte del servicio



Nota: Elaboración propia, 2025.

Figura 24.

Diagrama de flujo de reconexión del servicio



Nota: Elaboración propia, 2025.

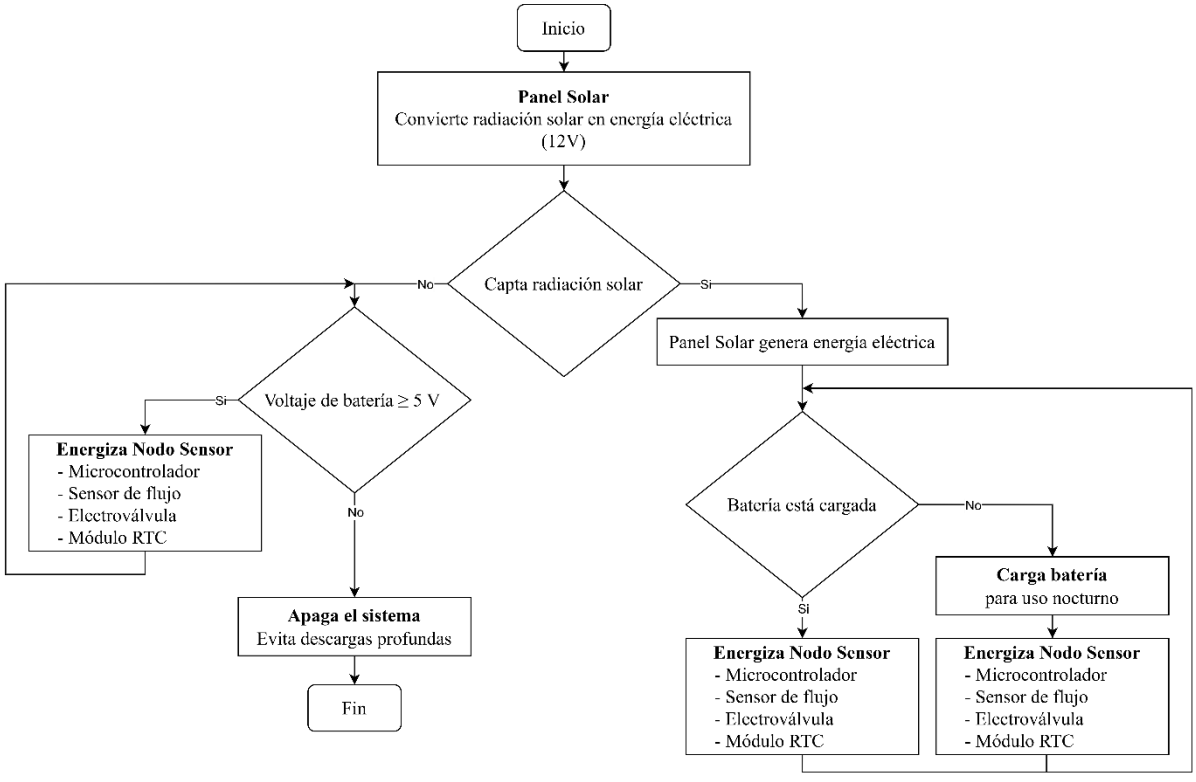
3.5.2. Diagrama de Flujo de la Fuente de Alimentación

La Figura 25 presenta el diagrama de flujo de la fuente de alimentación del nodo sensor, en donde se describe el flujo de energía desde su captación hasta su distribución.

El proceso inicia con la celda fotovoltaica, encargada de convertir la radiación solar en energía eléctrica. Esta energía fluye hacia un controlador de carga, que tiene la función de regular la tensión y corriente de entrada, además de proteger la batería contra sobrecargas o descargas profundas. Desde el controlador, la energía se distribuye en dos direcciones: hacia la batería de 12V que almacena la energía para su uso en periodos como la noche o en ausencia de luz solar y hacia el nodo sensor, compuesto por el microcontrolador, el sensor de flujo, la electroválvula y el módulo RTC, garantizando su operación continua.

Figura 25.

Diagrama de flujo de la fuente de alimentación



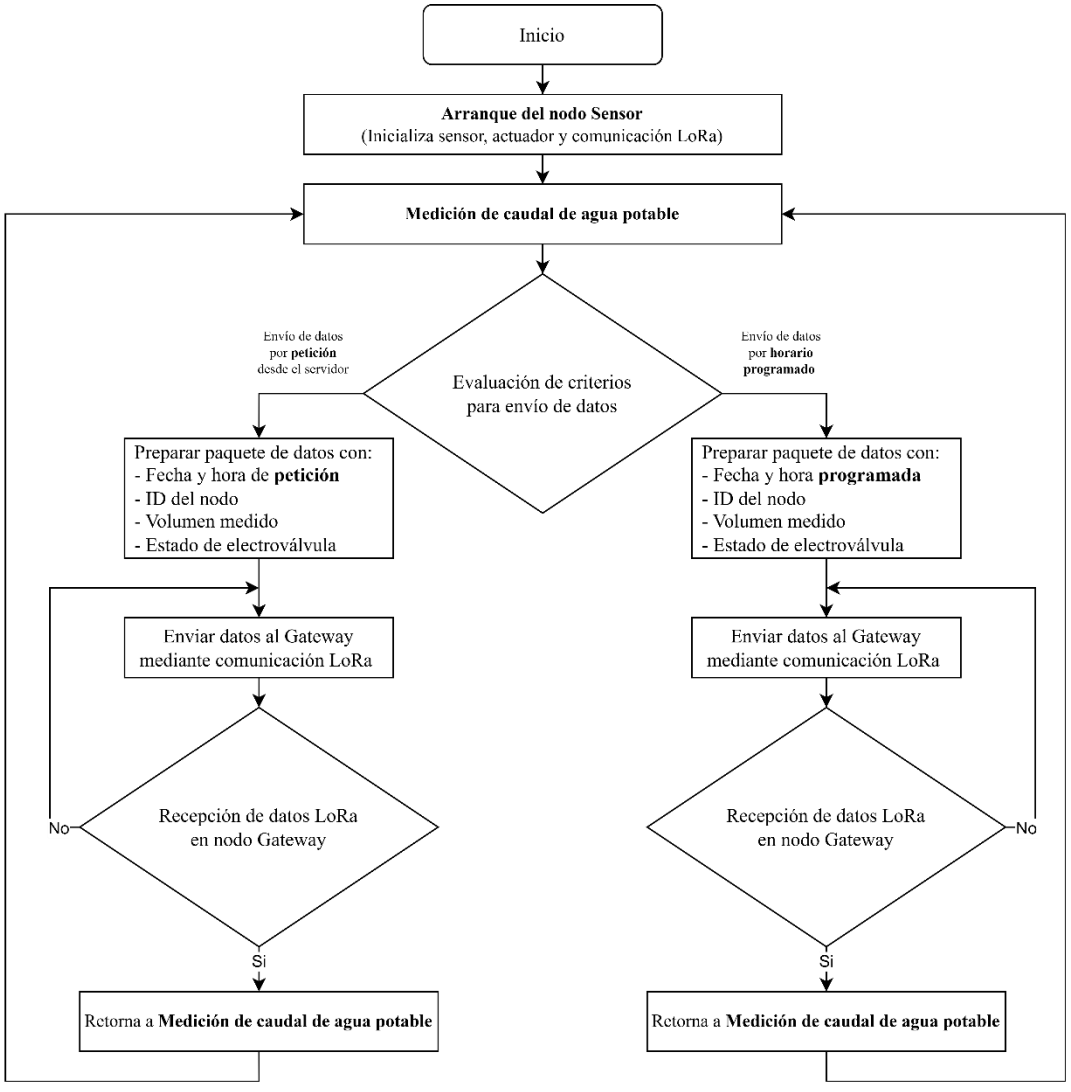
Nota: Elaboración propia, 2025.

3.5.3. Diagrama de Flujo del Nodo Sensor

La Figura 26 presenta el diagrama de flujo del nodo sensor, el cual inicia con el arranque del microcontrolador y sus módulos, seguido de la activación de la electroválvula. A continuación, el nodo toma lecturas del caudal de agua mediante el sensor de flujo y verifica la hora programada a través del módulo RTC o una petición realizada por el servidor. Cuando se cumple el tiempo establecido o existe alguna petición, se genera un paquete de datos con el ID del nodo, volumen consumido, fecha y hora, el cual es enviado al Gateway mediante comunicación LoRa.

Figura 26.

Diagrama de flujo del nodo sensor



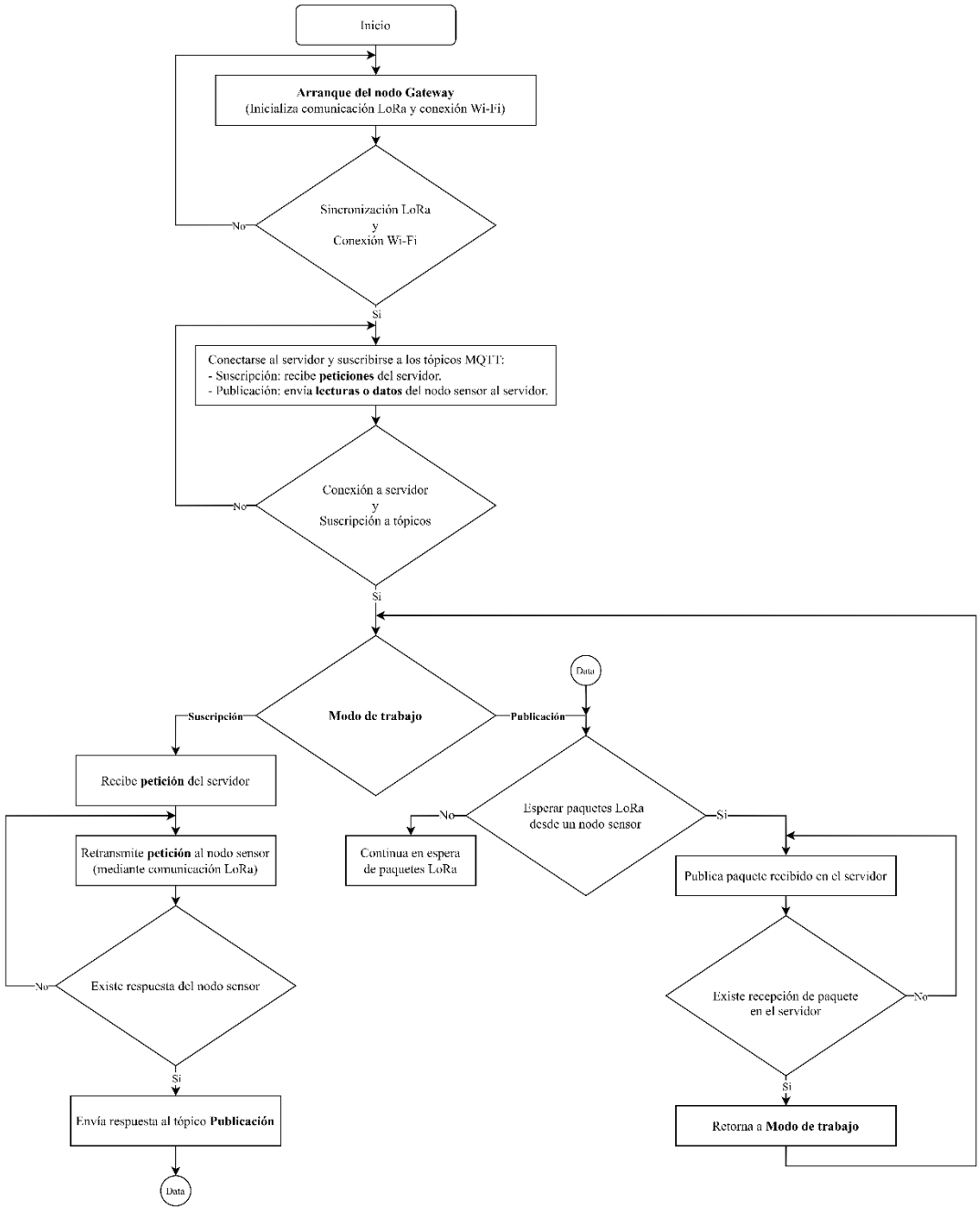
Nota: Elaboración propia, 2025.

3.5.4. Diagrama de Flujo del Nodo Gateway

La Figura 27 presenta el diagrama de flujo del nodo Gateway, en él se detalla el proceso desde la inicialización del microcontrolador, las conexiones LoRa y WiFi, hasta la suscripción a los tópicos MQTT y el funcionamiento que tiene cada uno de los tópicos a los cuales esta suscrito.

Figura 27.

Diagrama de arquitectura lógico del nodo Gateway



Nota: Autoría propia, 2025.

3.6. Diagramas de Conexiones

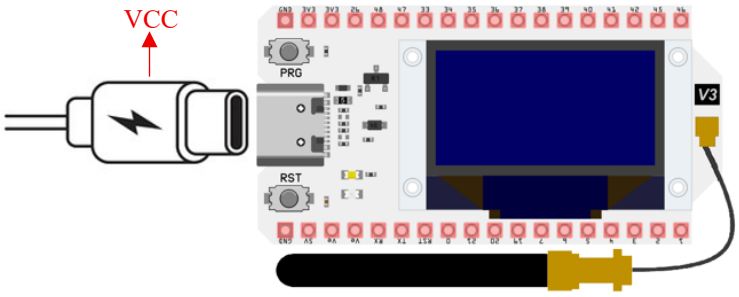
A continuación, se presentan las conexiones de cada uno de los componentes del nodo Gateway y del nodo sensor. Para ello, se realiza diagramas de conexión que permitirán visualizar de manera clara las conexiones, facilitando así el diseño e implementación del sistema.

3.6.1. Diagrama de conexiones del Nodo Gateway

La Figura 28 muestra al nodo Gateway del sistema, basado en un microcontrolador ESP32 LoRa Heltec V3. Este nodo cumple la función central dentro de la arquitectura de comunicaciones, ya que se encarga de recibir los datos transmitidos por los nodos sensores a través del protocolo LoRa y mediante conexión Wi-Fi envía los datos recopilados hacia la nube a través del protocolo MQTT.

Figura 28.

Diagrama de conexión del nodo Gateway



Nota: Elaboración propia, 2025.

3.6.2. Diagrama de conexiones del Nodo Sensor

A continuación, se presentan los diagramas de conexión de cada uno de los componentes que integran el nodo sensor. Estos incluyen la fuente de alimentación, el sensor de flujo y el actuador, encargado de habilitar o interrumpir el suministro de agua potable dentro del sistema. Cada diagrama muestra la forma en que los componentes se interconectan para garantizar el correcto funcionamiento del nodo y la transmisión confiable de los datos hacia el Gateway.

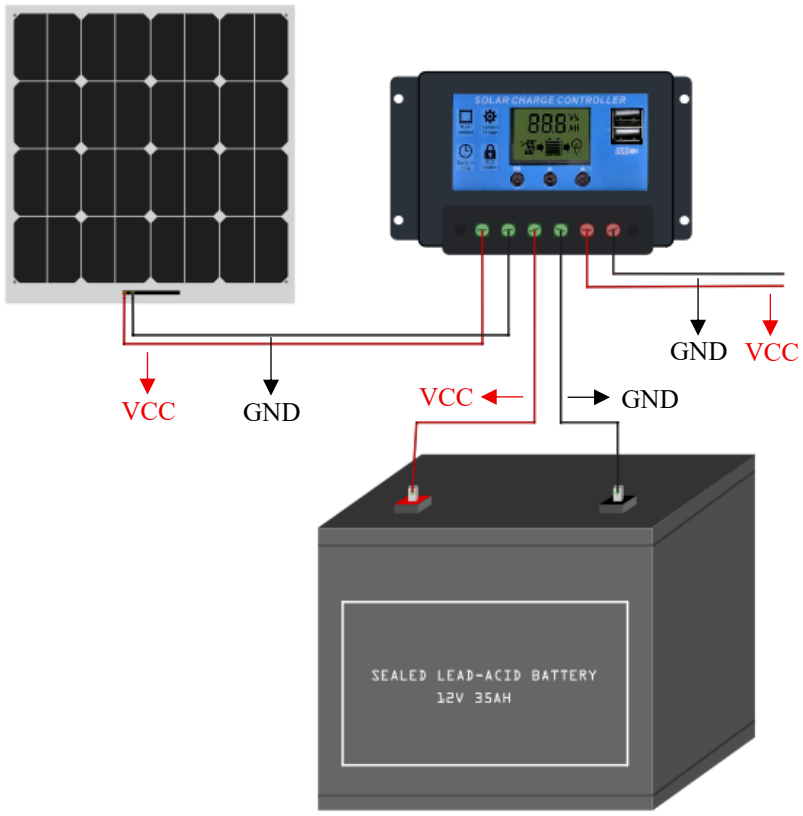
3.6.2.1. Fuente de alimentación.

La Figura 29 muestra el esquema de conexión del sistema de alimentación fotovoltaico compuesto por un panel solar, un controlador de carga y una batería de 12V 35Ah. El panel solar convierte la energía solar en electricidad y la envía al controlador de carga, el cual regula el voltaje y la corriente para cargar de forma segura la batería.

A su vez, la batería almacena la energía para alimentar el sistema en condiciones de baja radiación o durante la noche. Este tipo de configuración permite mantener la autonomía energética para el nodo sensor.

Figura 29.

Diagrama de conexiones de la fuente de alimentación



Nota: Elaboración propia, 2025.

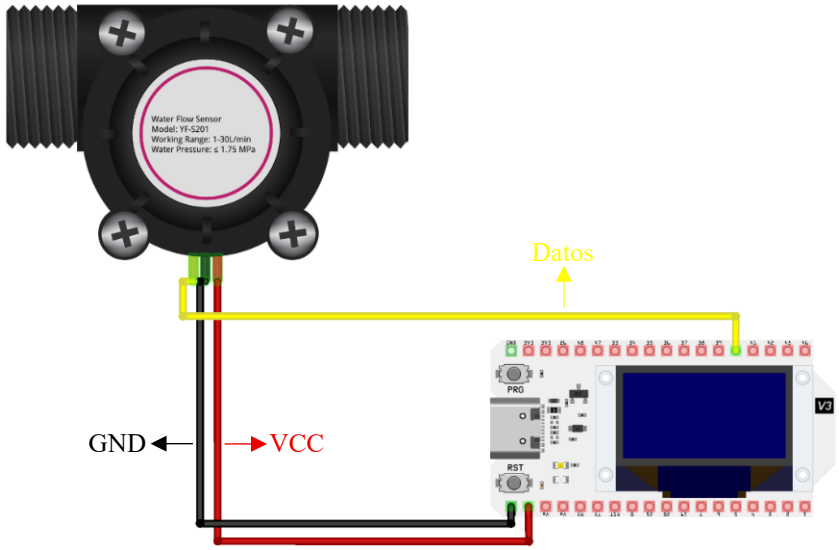
3.6.2.2. Sensor de flujo.

La Figura 30 muestra la conexión del sensor de flujo de agua YF-S201 con el microcontrolador ESP32 LoRa. El cable rojo del sensor se conecta al pin de 5V del ESP32, el

cable negro se conecta al pin de GND y, por último, el cable amarillo, correspondiente a la salida de señal del sensor, se conecta a un pin digital del ESP32, a través del cual se reciben los pulsos generados por el paso del agua. Estos pulsos serán utilizados por el microcontrolador para tomar lectura del flujo de agua consumido.

Figura 30.

Diagrama de conexiones del sensor de flujo



Nota: Elaboración propia, 2025.

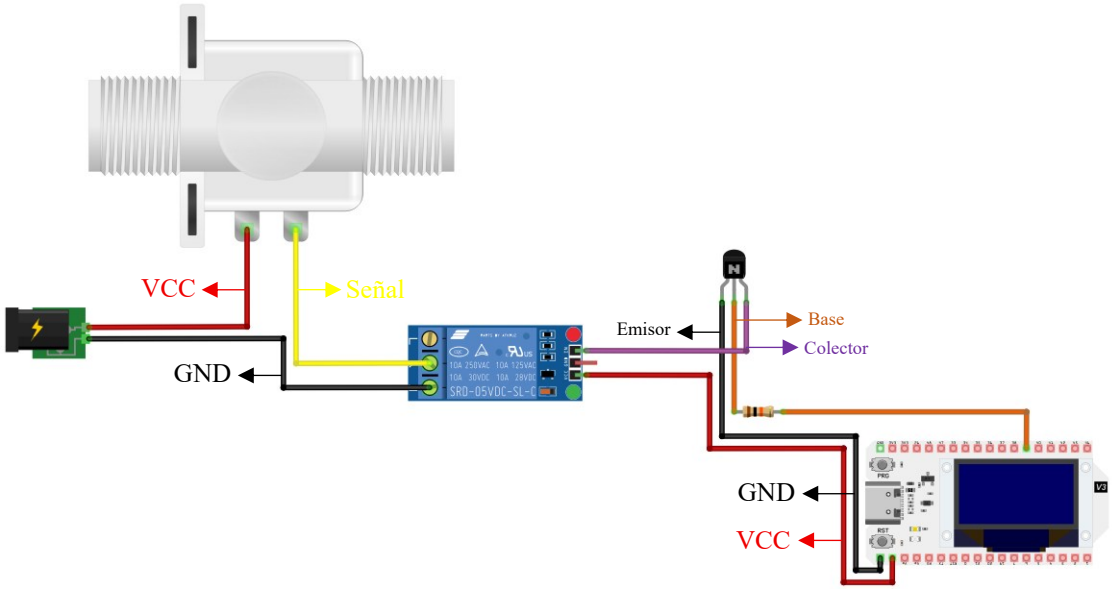
3.6.2.3. Electroválvula.

La Figura 31 muestra la conexión de la electroválvula controlada mediante un módulo relé. La electroválvula está conectada a una fuente de alimentación externa de 12V (cable rojo) y GND (cable negro), mientras que el cable amarillo de control se conecta al contacto normalmente abierto (NO) del relé. El módulo relé, se alimenta con 5V y GND desde el ESP32 LoRa, a su vez recibe la señal de activación a través de un pin digital.

El transistor NPN con la resistencia actúa como fase de conmutación entre el ESP32 y el relé, permitiendo controlar cargas mayores sin dañar el microcontrolador. Esta configuración permite activar o desactivar la electroválvula de forma segura, gestionando el paso de agua según las necesidades del sistema.

Figura 31.

Diagrama de conexiones de la electroválvula



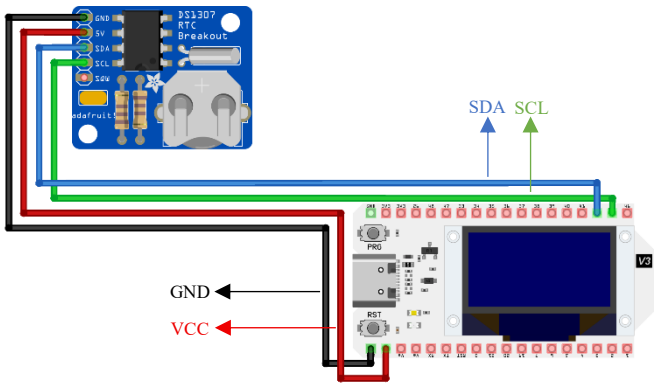
Nota: Elaboración propia, 2025.

3.6.2.4. Módulo RTC.

La Figura 32 muestra la conexión del módulo RTC DS1307 con el microcontrolador, esto para mantener un registro preciso del tiempo. El pin VCC (rojo) en el módulo se conecta al pin de 5V de la ESP32 LoRa, y el pin GND (negro) al ping correspondiente, asegurando la alimentación del módulo. La comunicación entre el RTC y el microcontrolador se realiza mediante el protocolo I2C, conectando el pin SDA (azul), el pin SCL (verde).

Figura 32.

Diagrama de conexiones del módulo RTC



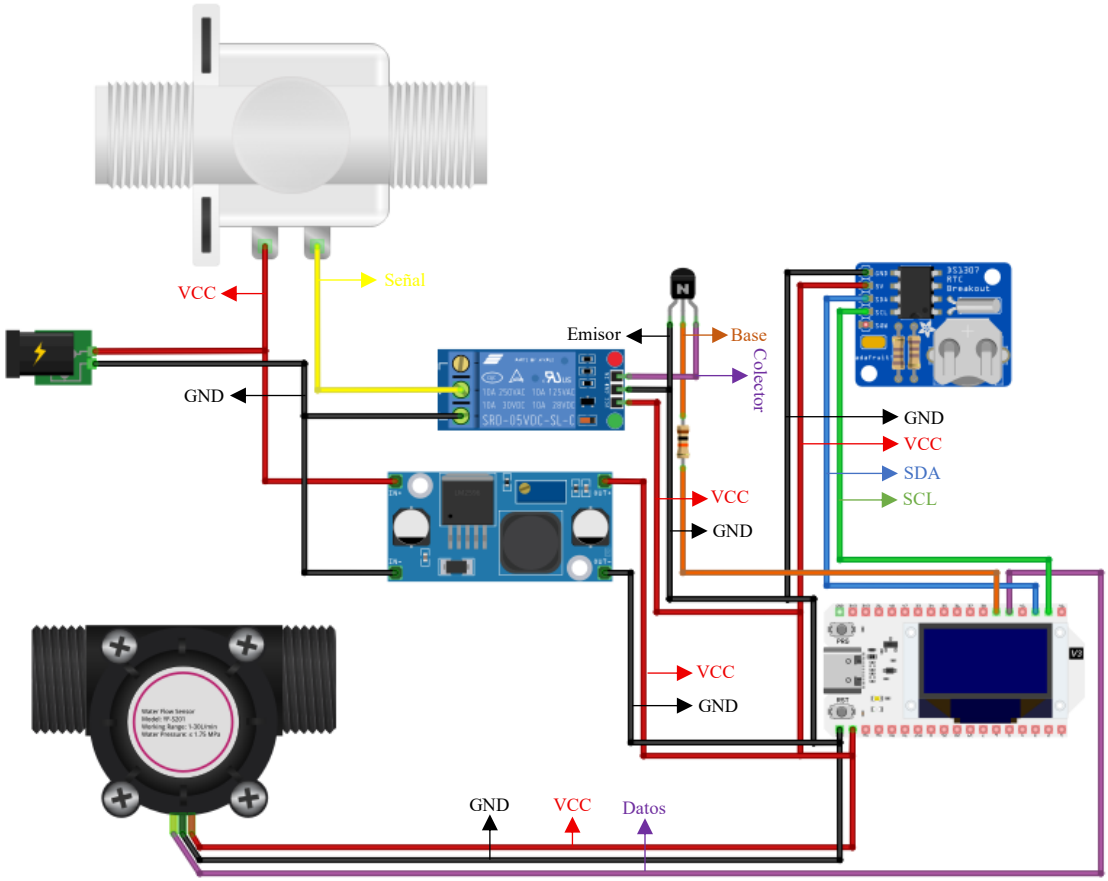
Nota: Elaboración propia, 2025.

3.6.3. Diagrama de conexión global

La Figura 33 presenta la integración de todos los componentes del nodo sensor con el microcontrolador. Las conexiones corresponden a las mismas presentadas previamente en los diagramas individuales de cada componente. Sin embargo, este diagrama representa el esquema completo que será implementado para la realización de las pruebas correspondientes.

Figura 33.

Diagrama de conexiones general



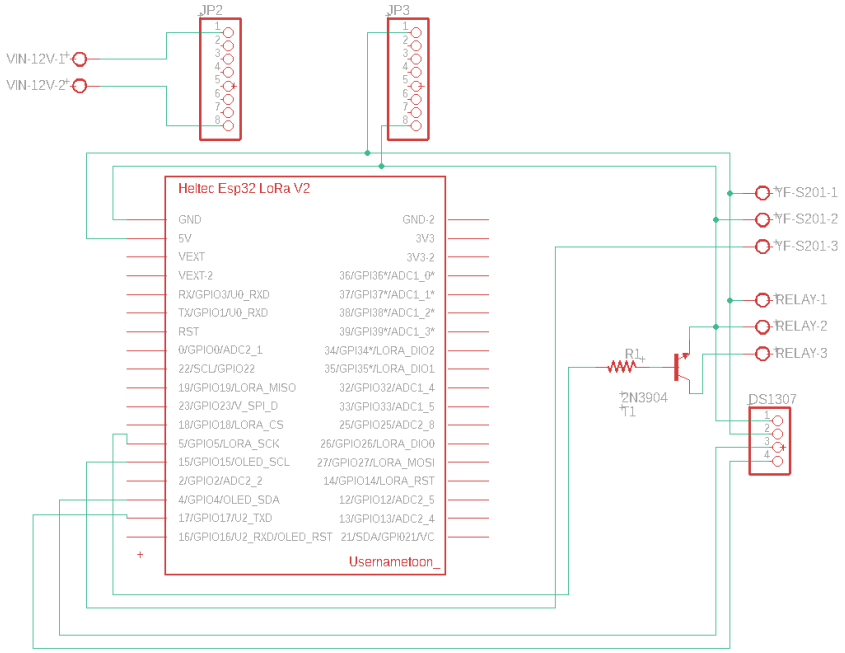
Nota: Elaboración propia, 2025.

3.7. Diseño Placa

En la Figura 34 se presenta el diseño esquemático del circuito electrónico que compone el nodo sensor del sistema. Este circuito integra los elementos necesarios para la adquisición y transmisión de datos del consumo de agua potable. La Figura muestra el microcontrolador Heltec ESP32 LoRa como unidad central, al cual se conecta el sensor de flujo YF-S201 encargado de medir el caudal, un módulo RTC DS1307 para la gestión de tiempo, y un transistor 2N3904 que permite controlar el estado de activación del relé conectado a la electroválvula. El sistema recibe alimentación desde una fuente de 12V, asegurando su autonomía y funcionalidad en campo.

Figura 34.

Diagrama esquemático del circuito

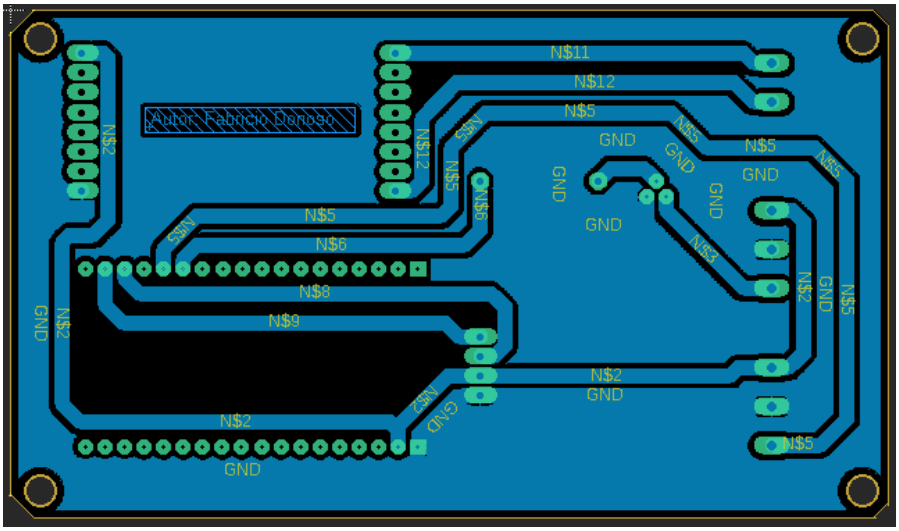


Nota: Autoría propia, 2025.

La Figura 35 muestra el diseño de la placa PCB del nodo sensor. Esta placa fue diseñada con dimensiones de 114 mm por 81.28 mm. En ella se destacan las pistas de conexión que interconectan el microcontrolador con el sensor de flujo, el módulo RTC, el transistor de control y los terminales del relé. Además, cuenta con bornes para la entrada de alimentación de 12V, lo que permite su integración directa con la fuente fotovoltaica.

Figura 35.

Diseño de PCB

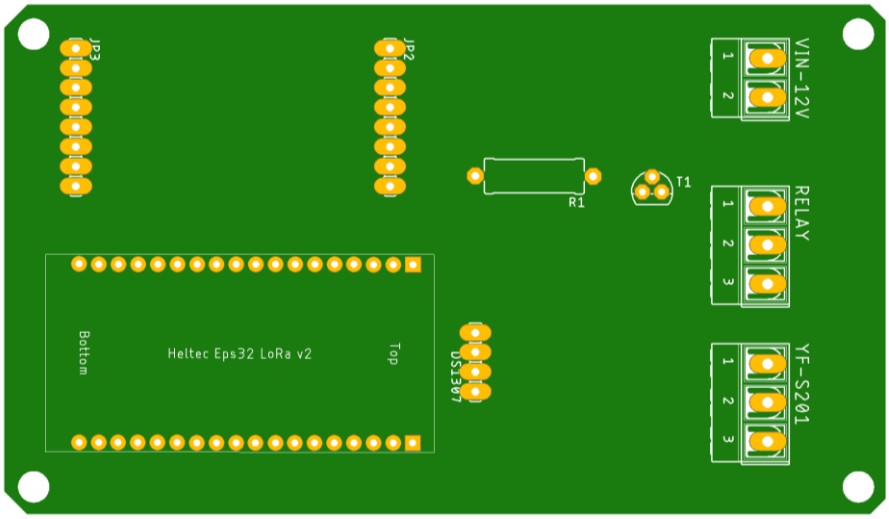


Nota: Autoría propia, 2025.

La Figura 36 y Figura 37 muestran el resultado final del diseño de la placa PCB. En las Figuras se puede observar la distribución de los componentes, tanto en la vista superior como en la inferior, optimizando el espacio y asegurando un montaje eficiente. Este diseño facilita la conexión del sensor, el módulo RTC, el relé y el microcontrolador, integrando todos los elementos necesarios para el funcionamiento del sistema de medición, corte y reconexión del servicio de agua potable.

Figura 36.

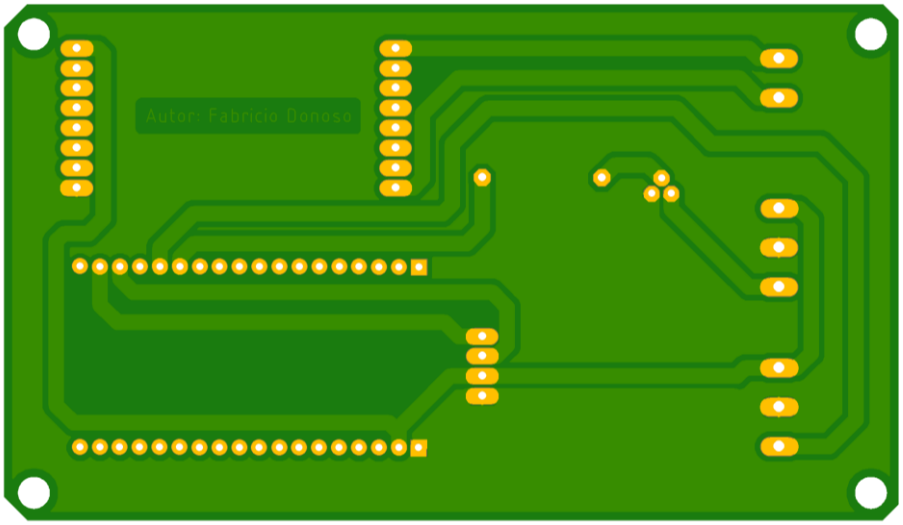
PCB vista superior



Nota: Autoría propia, 2025.

Figura 37.

PCB vista inferior



Nota: Autoría propia, 2025.

3.8. Diseño Case

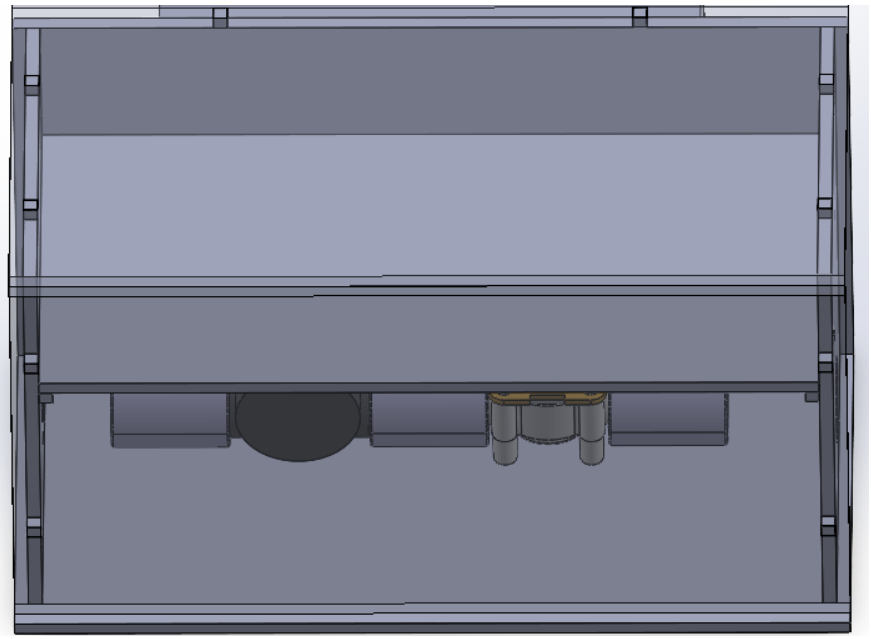
Para garantizar la durabilidad y el correcto funcionamiento del sistema en entornos expuestos a condiciones ambientales adversas, es fundamental implementar cases de protección para los componentes electrónicos. Esta sección presenta el diseño de los cases destinados a resguardar tanto el nodo sensor como el controlador de carga solar, brindando protección contra humedad, polvo, e impactos. Esto no solo prolongará la vida útil del sistema, sino que también aseguran su estabilidad operativa, ayudando a una instalación más segura y confiable.

3.8.1. Case para el nodo sensor

Para proteger adecuadamente el sistema electrónico, se diseñó un case que resguardara la placa PCB junto con el sensor y actuador. Este diseño contempla una estructura cerrada que proporciona aislamiento frente al polvo, la humedad y golpes. En la Figura 38 y Figura 39 se muestra la cubierta superior y una vista frontal del case, el diseño no solo resguarda los componentes internos, sino que también facilita el mantenimiento y mejora la durabilidad del sistema en entornos expuestos a condiciones ambientales adversas.

Figura 38.

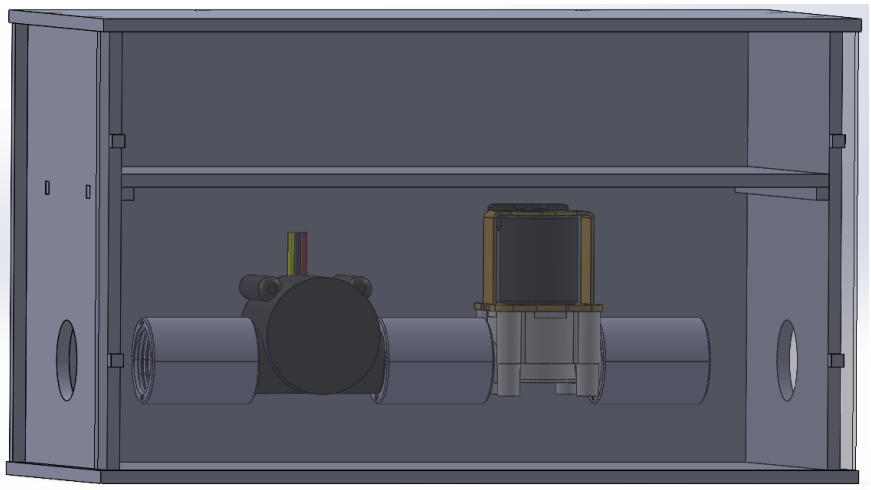
Case del nodo sensor vista superior



Nota: Autoría propia, 2025.

Figura 39.

Case del nodo sensor vista frontal



Nota: Autoría propia, 2025.

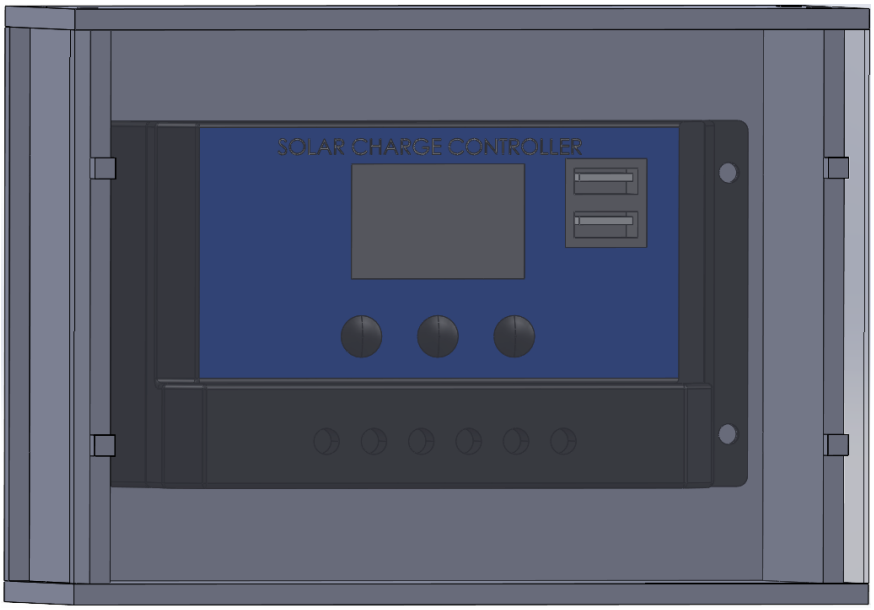
3.8.2. Case para Controlador de Carga Solar

Para garantizar la protección física del controlador de carga solar y prolongar su vida útil en condiciones ambientales variables, se diseñó un case de protección, con esto se busca resguardar el componente frente a la humedad, polvo y posibles impactos.

En la Figura 40 y Figura 41 se muestran la vista frontal y superior del diseño, permitiendo visualizar su estructura, el diseño contempla una instalación sencilla y segura, ideal para su implementación en campo abierto.

Figura 40.

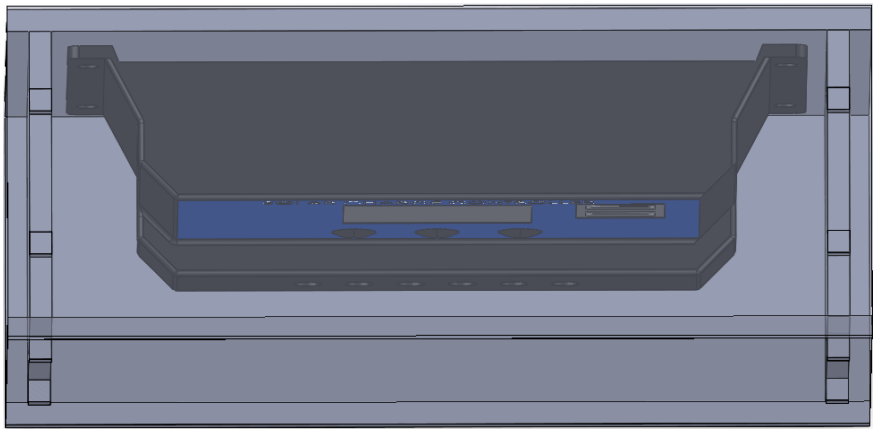
Case para controlador de carga solar vista frontal



Nota: Autoría propia, 2025.

Figura 41.

Case para controlador de carga solar vista superior



Nota: Autoría propia, 2025.

3.9. Dimensionamiento de sistema fotovoltaico

En esta sección se lleva a cabo el dimensionamiento energético específico para el nodo sensor, considerando el consumo individual de dispositivos como el microcontrolador, el sensor de flujo, la electroválvula y el módulo RTC.

Se calculará el consumo diario total, la energía diaria requerida, las horas solares pico correspondientes a la ubicación geográfica del proyecto, así como la potencia mínima del panel solar y la capacidad mínima de la batería necesaria para asegurar autonomía energética las 24 horas del día. Este análisis permitirá seleccionar adecuadamente los componentes del sistema fotovoltaico y garantizar la continua operatividad del nodo sin interrupciones.

3.9.1. Consumo diario de los dispositivos

A continuación, se detalla el consumo energético estimado de los componentes electrónicos que forman parte del nodo sensor. Para ello, se considera la corriente promedio de operación de cada dispositivo y su tiempo estimado de funcionamiento durante el día.

Este análisis permite calcular el consumo en miliamperios-hora (mAh) y la energía en vatios-hora (Wh), fundamental para dimensionar adecuadamente la fuente de alimentación solar. En la Tabla 29 se presenta un resumen con los valores considerados.

Tabla 29.

Consumo energético diario de los componentes electrónicos

Componente	Corriente aproximada (mA)	Tiempo de operación diaria (h)	Consumo diario (mAh)
Microcontrolador	250 mA	24 h	6000 mAh
Sensor de flujo YF-S201	15 mA	24 h	360 mAh
Electroválvula (NA)	600 mA	24 h	14400 mAh
Módulo RTC DS1307	1.5 mA	24 h	36 mAh
Total			**20796 mAh**

Nota: Estos valores pueden variar según el uso real del sistema. Elaboración propio autor, 2025.

3.9.2. Energía diaria requerida

Para determinar la energía diaria que el sistema necesita, se multiplica el consumo diario de cada componente en (mAh) por el voltaje de operación. Posteriormente, el resultado se convierte a vatios-hora (Wh) utilizando la Ecuación 1, mientras que en la Tabla 30 se presenta el cálculo por cada componente.

Ecuación 1.

Energía diaria requerida

$$\boldsymbol{Energía\ (Wh)} = \frac{Corriente\ (mAh)\ x\ Voltaje\ (V)}{1000}$$

Tabla 30.

Consumo de energía diaria de los componentes electrónicos

Componente	Consumo diario (mAh)	Voltaje (V)	Energía diaria (Wh)
Microcontrolador	6000 mAh	5 V	30 Wh
Sensor de flujo YF-S201	180 mAh	5 V	0,90 Wh
Electroválvula (NC)	14400 mAh	12 V	172,80 Wh
Módulo RTC DS1307	36 mAh	5 V	0,18 Wh
Total			**203,88 Wh**

Nota: Estos valores pueden variar según el uso real del sistema. Elaboración propio autor, 2025.

3.9.3. Horas solares pico

Las Horas Solares Pico (HSP) representan el número de horas diarias en las que la irradiación solar alcanza un valor estándar de 1000 W/m², equivalente a una hora de sol pleno. Este concepto permite simplificar el cálculo de la energía disponible para los sistemas fotovoltaicos, transformando la variabilidad de la radiación solar a lo largo del día en un valor promedio útil para dimensionamiento.

El valor de HSP varía según la ubicación geográfica, la época del año y las condiciones climáticas. Para el presente proyecto, ubicado en la Comuna San Luis de la Carbonería, Imantag - Ecuador, se ha tomado como referencia un valor promedio de 4 horas solares pico al día, considerando datos climáticos históricos y mapas solares proporcionados por Conelec, 2008.

Este valor representa un escenario conservador que permite asegurar el funcionamiento del sistema incluso en días parcialmente nublados o con menor radiación, aportando mayor confiabilidad al dimensionamiento del sistema fotovoltaico. En base a este valor, se realizan los cálculos de potencia requerida del panel solar en la siguiente sección.

3.9.4. Potencia mínima del panel solar

La potencia mínima requerida del panel solar se determina en función de la energía diaria que necesita el nodo sensor y las horas solares pico (HSP) disponibles en la ubicación del proyecto. Este cálculo considera además un factor de corrección por pérdidas del sistema, tales como ineficiencias en el regulador de carga, temperatura ambiente, suciedad en el panel, y caídas de tensión en el cableado. En la Ecuación 2 se presenta la fórmula para calcular la potencia mínima del panel solar.

Ecuación 2.

Potencia mínima del panel solar (W)

$$\textbf{Potencia del panel } (\boldsymbol{W}) = \frac{Energía\ diaria\ requerida\ (Wh)}{HSP\ (h)\ x\ Eficiencia\ del\ Sistema}$$

Donde:

- **Energía diaria requerida**: 203.88 Wh
- **Horas solares pico (HSP)**: 4 h/día
- **Eficiencia del sistema**: 80%

Aplicando los valores:

$$\boldsymbol{Potencia\ del\ panel}\ (\boldsymbol{W}) = \frac{203.88\ (Wh)}{4\ x\ 0.8}$$

$$\boldsymbol{Potencia\ del\ panel}\ (\boldsymbol{W}) \approx 63{,}72\ (W)$$

Se concluye que la potencia mínima requerida del panel solar es de aproximadamente 80 W. Sin embargo, considerando la necesidad de mantener la operatividad del nodo sensor las 24 horas del día, incluso en días con baja radiación solar, se recomienda utilizar un panel de mayor potencia, entre 120W y 160W, para asegurar un margen adecuado de autonomía y estabilidad energética del sistema.

3.9.5. Capacidad mínima de la batería

Para garantizar la operatividad del nodo sensor durante las horas sin irradiación solar (noches o en días nublados), es importante contar con una batería que tenga la capacidad suficiente para almacenar la energía diaria requerida por el sistema. Esta capacidad se calcula considerando el consumo energético diario, el número de días de autonomía deseado y un margen de seguridad que evite descargas profundas que reduzcan la vida útil de la batería. En la Ecuación 3 se presenta la fórmula para calcular la capacidad de la batería.

Ecuación 3.

Capacidad de la batería

$$\boldsymbol{Capacidad\ de\ batería}\ (\boldsymbol{Ah}) = \frac{Energía\ diaria\ requerida\ (Wh)\ x\ Días\ de\ autonomía}{Voltaje\ de\ la\ batería\ (V)\ x\ Profundidad\ de\ descarga\ (DoD)}$$

Donde:

- **Energía diaria requerida**: 203,88 Wh
- **Voltaje de la batería**: 12V
- **Días de autonomía**: 1 día
- **Profundidad de descarga (DoD)**: 80%

Aplicando los valores:

$$\boldsymbol{Capacidad\ de\ batería\ (Ah)} = \frac{203{,}88\ (Wh)\ x\ 1}{12\ (V)\ x\ 0{,}8}$$

$$\boldsymbol{Capacidad\ de\ batería\ (Ah)}\ \approx 21{,}24\ (Ah)$$

Para garantizar la operatividad del nodo sensor durante la noche o en días con baja radiación solar, se ha estimado una capacidad mínima de batería de aproximadamente 21,24 Ah a 12V, considerando un consumo diario de 203,88 Wh, un día de autonomía y una profundidad de descarga del 80%. Sin embargo, con el fin de asegurar mayor confiabilidad, evitar ciclos profundos de descarga y permitir un margen de respaldo ante condiciones climáticas adversas, se ha optado por utilizar una batería de 40 Ah a 12V, lo cual proporciona una autonomía extendida y mejora la vida útil del sistema energético.

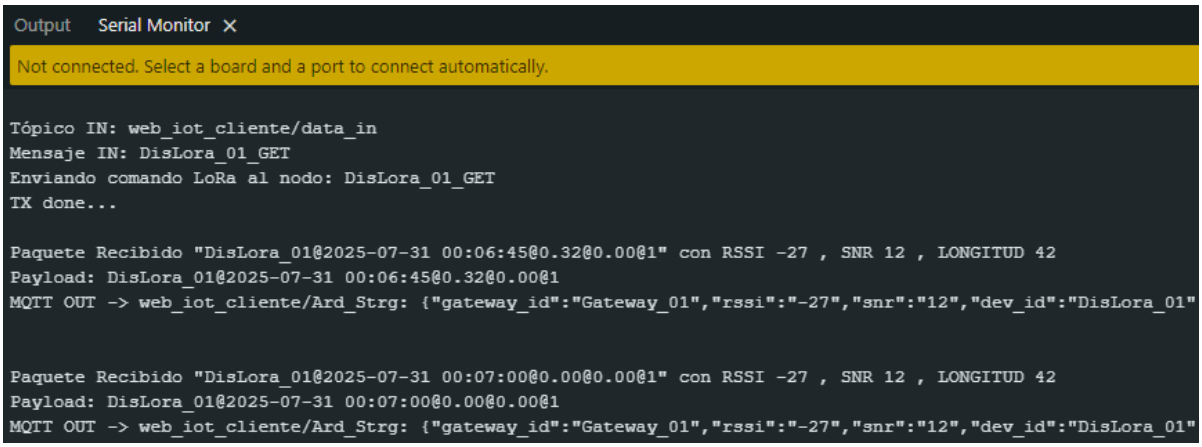
3.10. Comunicación LoRa

El nodo sensor diseñado en este proyecto utiliza el microcontrolador ESP32 Heltec WiFi LoRa V3, el cual integra un ESP32 de doble núcleo con conectividad Wi-Fi, Bluetooth y un módulo de comunicación LoRa SX1262, todo en una sola placa de bajo consumo y alto rendimiento. Esta integración permite realizar tanto el procesamiento local de datos como su transmisión inalámbrica a largas distancias, sin requerir componentes adicionales.

El módulo LoRa SX1262, incluido en esta versión del Heltec V3, opera en frecuencias de 433 MHz o 868/915 MHz según la versión y permite establecer enlaces punto a punto o en red con un alcance de varios kilómetros, dependiendo de las condiciones del entorno. En la Figura 42 se puede apreciar el enlace de comunicación entre el nodo sensor y el Gateway, donde se lleva a cabo el intercambio de paquetes para el envío y recepción de datos.

Figura 42.

Intercambio de paquetes LoRa



Nota: Elaboración propio autor, 2025.

Como parte del diseño del enlace de comunicación inalámbrica entre el nodo sensor y el Gateway, es necesario evaluar las pérdidas que sufre la señal durante su propagación desde el transmisor hasta el receptor. Este análisis permite validar la eficiencia del diseño del sistema y determinar su viabilidad operativa en condiciones reales.

Para ello, se ha determinado la ubicación geográfica de los puntos de transmisión y recepción utilizando la herramienta Google Earth como se muestra en la Figura 43, a través de la cual se obtuvieron las coordenadas de latitud y longitud de cada nodo. Estos datos sirven de base para calcular la distancia lineal entre los dispositivos, así como otros parámetros relevantes para el análisis del enlace, como la pérdida en espacio libre, la zona de Fresnel y el ángulo de elevación.

Figura 43.

Ubicación geográfica de Nodos Sensores y Gateway



Nota: Elaboración propio autor, 2025.

En la Tabla 31 se presentan los valores registrados de latitud, longitud y distancia para cada uno de los nodos considerados, esta información es esencial para comprobar la factibilidad de la comunicación y garantizar el correcto funcionamiento del sistema de monitoreo a través de tecnología LoRa.

Tabla 31.

Coordenadas de los nodos

Nodo	Coordenadas Geográficas		Coordenadas Angulares		Distancia con el Gateway
	Latitud	Longitud	Latitud	Longitud	
Nodo Gateway	0°21'50.7"N	78°17'05.6"W	0.3640868	-78.2848961	0 m
Nodo sensor C1	0°21'55.6"N	78°17'04.8"W	0.3654490	-78.2846780	151,18 m
Nodo sensor C2	0°21'56.0"N	78°17'24.1"W	0.3646630	-78.2928370	886,55 m

Nota: Elaboración propio autor, 2025.

3.10.1. Potencia del Receptor

En los sistemas de comunicación inalámbrica como LoRa, la potencia del receptor es un parámetro fundamental para garantizar una conexión confiable entre el nodo sensor y el Gateway. Esta potencia representa el nivel de señal que llega al receptor después de haber sido transmitida por el emisor, teniendo en cuenta las ganancias y pérdidas asociadas a las antenas y conectores del sistema.

Para este proyecto se utiliza el microcontrolador Heltec WiFi LoRa ESP32 V3, el cual integra un módulo SX1262, capaz de transmitir con una potencia de hasta 21 ± 1 dBm y operar con una sensibilidad de hasta -137 dBm, dependiendo de la configuración del ancho de banda y el factor de expansión (Spreading Factor). En la Ecuación 4 se presenta la fórmula para calcular la potencia del receptor.

Ecuación 4

Potencia del receptor

$$\boldsymbol{P_{R_x}} = \left(P_{T_x} + G_{T_x} + G_{R_x} - L_{cT_x} - L_{cR_x}\right) dBm$$

Donde:

- $\boldsymbol{P_{T_x}}$: Potencia de transmisión (dBm)
- $\boldsymbol{G_{T_x}}$: Ganancia de la antena transmisora (dBi)
- $\boldsymbol{G_{R_x}}$: Ganancia de la antena receptora (dBi)
- $\boldsymbol{L_{cT_x}}$: Pérdida por conector de la antena transmisora (dB)
- $\boldsymbol{L_{cR_x}}$: Pérdida por conector de la antena receptora (dB)

Aplicando los valores:

$$\boldsymbol{P_{R_x}} = (20 + 2 + 2 - 0{,}5 - 0{,}5)\ dBm$$

$$\boldsymbol{P_{R_x}} = 23\ dBm$$

Este valor representa la potencia máxima disponible en el receptor antes de considerar las pérdidas por propagación en el medio las cuales se evaluarán en los siguientes apartados. Sin embargo, sirve como base para comparar con la sensibilidad del receptor, que en el caso del SX1262 puede llegar a ser de hasta -137 dBm bajo condiciones óptimas.

Esta diferencia muestra que el sistema tiene un amplio margen de recepción, lo que indica que la comunicación LoRa establecida entre el nodo sensor y el Gateway es sólida y confiable, siempre que se mantengan condiciones físicas adecuadas para la propagación de la señal.

3.10.2. Perdida de trayecto en espacio libre

La pérdida de trayecto en espacio libre representa la atenuación que sufre una señal de radiofrecuencia al propagarse por el aire, sin obstáculos intermedios entre el transmisor y el receptor. Este parámetro es fundamental en el análisis del enlace LoRa, ya que permite estimar cuánta potencia de la señal transmitida llega efectivamente al receptor.

En la Ecuación 5 se presenta la fórmula utilizada para calcular la pérdida de trayecto en espacio libre.

Ecuación 5.

Pérdida de trayecto en espacio libre

$$\boldsymbol{L_p(dB)} = 20log_{10}(d) + 20log_{10}(f) + 32{,}45$$

Donde:

- $\boldsymbol{d}$: distancia entre el transmisor y receptor (en km)
- $\boldsymbol{f}$: frecuencia de operación (en MHz)
- **32,45**: constante que ajusta unidades para d en km y f en MHz

Para el presente diseño, se utiliza la frecuencia de operación de 915 MHz compatible con el módulo SX1262 en versiones para América y las distancias estimadas entre los nodos sensores y el Gateway en la Ecuación 5, como se presenta a continuación.

C1: 151.18 m

$$\boldsymbol{L_p(dB)} = 20log_{10}(0{,}15118\ \text{km}) + 20log_{10}(915\ MHz) + 32{,}45$$

$$\boldsymbol{L_p(dB)} = 75{,}3\ (dB)$$

C2: 886.55 m

$$\boldsymbol{L_p(dB)} = 20log_{10}(0{,}88655\ \text{km}) + 20log_{10}(915\ MHz) + 32{,}45$$

$$\boldsymbol{L_p(dB)} = 90{,}6\ (dB)$$

3.10.3. Pérdidas adicionales

Representan el conjunto de atenuaciones que se suman a la pérdida básica por espacio libre, con el fin de reflejar las condiciones reales del entorno de propagación. Estas pérdidas corrigen el modelo teórico ideal considerando los efectos de obstáculos, vegetación y las variaciones estadísticas propias del medio.

El valor de pérdidas adicionales se obtiene mediante la suma de tres componentes como se muestra en la Ecuación 6.

Ecuación 6.

Pérdidas adicionales

$$\boldsymbol{L_{add}(dB)} = L_{obst} + L_{bosque} + L_{estad}$$

Donde:

- $\boldsymbol{L_{obst}}$: Originado por la presencia de elementos físicos (edificaciones, colinas, torres) que interfieren con la línea de vista del enlace. Se calculan mediante el análisis del perfil del terreno y de la obstrucción de la primera zona de Fresnel, considerando la difracción producida por dichos obstáculos.
- $\boldsymbol{L_{bosque}}$: Provienen de la atenuación causada cuando la señal atraviesa zonas con vegetación. Se estiman mediante modelos empíricos que relacionan la pérdida con el tipo y densidad del follaje, la distancia recorrida en el bosque y la frecuencia de operación.
- $\boldsymbol{L_{estad}}$: Representan un margen adicional para contemplar la variabilidad del nivel de señal debida a desvanecimientos o fluctuaciones del entorno. Este valor depende del modelo de propagación y del tipo de entorno urbano, suburbano o rural, para garantizar una cobertura confiable.

Aplicando valores en C1 y C2 da como resultado:

C1:

$$\boldsymbol{L_{add}(dB)} = 0{,}3 + 1{,}0 + 5{,}2$$

$$\boldsymbol{L_{add}(dB)} = 6{,}5\ dB$$

C2:

$$\boldsymbol{L_{add}(dB)} = 4{,}3 + 1{,}0 + 6{,}4$$

$$\boldsymbol{L_{add}(dB)} = 11{,}7\ dB$$

3.10.4. Potencia de la señal recibida

La potencia de la señal recibida (P_{R_x}) representa el nivel efectivo con el que la señal llega al receptor después de haber recorrido la distancia entre el nodo sensor y el Gateway, considerando las ganancias y pérdidas del sistema, incluyendo la atenuación causada por la propagación en el espacio libre. En Ecuación 7, se presenta la fórmula para calcular la potencia de la señal recibida.

Ecuación 7.

Potencia de la señal recibida

$$\boldsymbol{P_{R_x}} = \left(P_{T_x} + G_{T_x} + G_{R_x} - L_p - L_{add}\right) dBm$$

Donde:

- $\boldsymbol{P_{T_x}}$: Potencia de transmisión del módulo (dBm)
- $\boldsymbol{G_{T_x}}$: Ganancia de la antena transmisora (dBi)
- $\boldsymbol{G_{R_x}}$: Ganancia de la antena receptora (dBi)
- $\boldsymbol{L_p}$: Pérdida por trayecto en espacio libre (dB)
- $\boldsymbol{L_{add}}$: Pérdidas adicionales (dB)

Aplicando valores de C1 y C2 da como resultado:

C1:

$$\boldsymbol{P_{R_x}} = (20 + 1{,}5 + 1{,}5 - 75{,}3 - 6{,}5)\ dBm$$

$$\boldsymbol{P_{R_x}} = -58{,}8\ dBm$$

C2:

$$\boldsymbol{P_{R_x}} = (20 + 1{,}5 + 1{,}5 - 90{,}6 - 11{,}7)\ dBm$$

$$\boldsymbol{P_{R_x}} = -79{,}3\ dBm$$

Estos resultados muestran que el sistema cuenta con un margen de enlace amplio, lo cual permite mantener una comunicación confiable incluso ante posibles pérdidas adicionales por interferencias, obstáculos o condiciones ambientales desfavorables.

3.10.5. Relación Señal a Ruido SNR

La Relación Señal a Ruido (SNR) representa la diferencia en decibelios entre el nivel de la señal útil recibida y el nivel de ruido presente en el canal. Cuanto mayor sea el SNR, mejor será la claridad con la que el receptor puede interpretar la señal.

A diferencia de otros sistemas de comunicación que requieren SNR positivos, la tecnología LoRa puede operar incluso con valores negativos de SNR gracias a su modulación basada en espectro ensanchado de chirp. Esto le permite mantener enlaces estables y confiables en entornos ruidosos o con señales muy débiles.

LoRa puede demodular señales que están por debajo del ruido de fondo. La SNR mínima requerida para la demodulación en diferentes factores de dispersión se muestra en la Tabla 32.

Tabla 32.

Relación Señal a Ruido en función de SF

Factor de propagación (SF)	Relación señal a ruido (SNR)
6	-5 dB
7	-7,5 dB
8	-10 dB
9	-12,5 dB
10	-15 dB
11	-17,5 dB
12	-20 dB

Nota: Adaptado de TheThingsNetwork, 2025.

3.10.6. Sensibilidad del receptor

La sensibilidad del receptor es el nivel mínimo de potencia de señal que puede ser detectado y procesado de forma confiable por el módulo receptor. En sistemas de comunicación inalámbrica como LoRa, este parámetro es importante para determinar la distancia máxima del enlace, ya que establece el umbral mínimo por debajo del cual la señal ya no es interpretable.

El módulo SX1262, incorporado en el microcontrolador Heltec WiFi LoRa ESP32 V3, presenta una sensibilidad que puede alcanzar hasta -137 dBm bajo configuraciones óptimas de modulación. La sensibilidad varía principalmente según el ancho de banda (BW) y el factor de expansión (Spreading Factor, SF) utilizados. A mayor SF y menor BW, mayor será la sensibilidad del sistema.

A continuación, se muestran en la Tabla 33 algunos valores típicos de sensibilidad del SX1262 según la configuración de la modulación LoRa.

Tabla 33.

Sensibilidad del receptor

Ancho de Banda (kHz)	Factor de expansión (SF)	Sensibilidad (dBm)
125	12	-137 dBm
125	10	-130 dBm
125	7	-124 dBm

Nota: Adaptado de HTIT-WB32LA_V3.2 Heltec, 2025.

3.10.7. Margen del enlace

El margen del enlace representa la diferencia entre la potencia de la señal recibida y la sensibilidad del receptor. Este parámetro indica cuánto margen adicional tiene el sistema para enfrentar pérdidas imprevistas causadas por interferencias, desvanecimiento, obstáculos u otras condiciones adversas. La Ecuación 8 presenta la fórmula para calcular el margen del enlace.

Ecuación 8.

Margen del enlace

$$\boldsymbol{M_{enlace}\ (dB)} = P_{R_x} - S$$

Donde:

- $\boldsymbol{P_{R_x}}$: Potencia de la señal recibida (dBm)
- $\boldsymbol{S}$: Sensibilidad del receptor (dBm)

Aplicando valores de C1 y C2 da como resultado:

C1:

$$\boldsymbol{M_{enlace}\ (dB)} = -58{,}8\ (dBm) - (-137\ (dBm))$$

$$\boldsymbol{M_{enlace}\ (dB)} = 78{,}2\ (dB)$$

C2:

$$\boldsymbol{M_{enlace}\ (dB)} = -79{,}3\ (dBm) - (-137\ (dBm))$$

$$\boldsymbol{M_{enlace}\ (dB)} = 57{,}7(dB)$$

Estos resultados muestran que el sistema cuenta con un margen de enlace alto, lo que significa que la señal puede atenuarse considerablemente por condiciones ambientales, obstáculos o interferencia, y aun así mantenerse dentro del umbral detectable por el receptor.

Un margen superior a 20 dB ya es considerado robusto en comunicaciones inalámbricas; por lo tanto, este sistema cuenta con una alta confiabilidad para operar en entornos rurales, como los contemplados en este proyecto.

3.10.8. Presupuesto del enlace

El presupuesto del enlace representa la máxima pérdida de señal que puede tolerar un sistema de comunicación inalámbrica sin comprometer la calidad del enlace. Es una herramienta fundamental en el diseño de redes LoRa, ya que permite estimar la viabilidad de la comunicación a determinada distancia y en condiciones reales de operación. La Ecuación 9 presenta la fórmula para calcular el presupuesto del enlace.

Ecuación 9.

Presupuesto del enlace

$$\boldsymbol{P_{enlace}(dB)} = P_{T_x} + G_{T_x} + G_{R_x} - S$$

Donde:

- $\boldsymbol{P_{T_x}}$: Potencia de transmisión (dBm)
- $\boldsymbol{G_{T_x}}$: Ganancia de la antena transmisora (dBi)
- $\boldsymbol{G_{R_x}}$: Ganancia de la antena receptora (dBi)
- $\boldsymbol{S}$: Sensibilidad del receptor (dBm)

Aplicando valores da como resultado:

$$\boldsymbol{P_{enlace}(dB)} = 20\ (dBm) + 1{,}5\ (\text{dBi}) + 1{,}5\ (\text{dBi}) - (-137\ (dBm))$$

$$\boldsymbol{P_{enlace}(dB)} = 160\ (dB)$$

Este valor refleja que el sistema puede soportar un nivel significativo de pérdidas entre el transmisor y el receptor sin que la señal se degrade por debajo del umbral mínimo de detección. El presupuesto del enlace representa la pérdida máxima total permitida que puede tener la señal en su recorrido antes de que el receptor no pueda procesarla.

Al comparar con las pérdidas de espacio libre y adicionales como se muestra en la

Tabla 34, se evidencia que el sistema cuenta con un margen suficiente para enfrentar variaciones en el entorno como interferencias, obstáculos o condiciones atmosféricas. Este margen asegura que la comunicación entre el nodo sensor y el Gateway se mantenga estable y confiable, incluso en ubicaciones rurales o escenarios adversos, sin comprometer la transmisión de datos.

Tabla 34.

Presupuesto del enlace

Nodo Sensor	Pérdida de espacio libre	Pérdidas adicionales	Presupuesto del enlace	Margen del enlace
C1	75,3 (dB)	6,5 (dB)	160 (dB)	78,2 (dB)
C2	90,6 (dB)	11,7 (dB)	160 (dB)	57,7 (dB)

Nota: Elaborado por propio autor, 2025.

3.10.9. Zona de Fresnel

La zona de Fresnel es una región elíptica tridimensional que rodea la línea de vista directa entre un transmisor y un receptor. Si la zona está parcialmente obstruida, la señal puede sufrir reflexiones, difracciones y cancelaciones, lo cual reduce la potencia de la señal recibida y afecta negativamente la calidad del enlace. En la Ecuación 10 se presenta la fórmula para calcular la zona de Fresnel.

Ecuación 10.

Zona de Fresnel

$$\boldsymbol{r} = \sqrt{\frac{n\ x\ \lambda\ x\ d_1\ x\ d_2}{d_1 + d_2}}$$

Donde:

- $\boldsymbol{n = 1}$: primera zona de Fresnel
- $\boldsymbol{\lambda}$: longitud de onda (m)
- $\boldsymbol{d_1, d_2}$: distancia del transmisor y receptor al punto de análisis (m)
- $\boldsymbol{d_1 + d_2 = d}$: distancia total entre nodos (m)

Aplicando valores de C1 y C2 da como resultado:

C1:

$$\boldsymbol{r} = \sqrt{\frac{1\ x\ 0{,}3279\ (m) x\ 75{,}59\ (m)\ x\ 75{,}59\ (m)}{151{,}18\ (m)}}$$

$$\boldsymbol{r} = 3{,}52\ (m)$$

C2:

$$\boldsymbol{r} = \sqrt{\frac{1\ x\ 0{,}3279\ (m) x\ 443{,}28\ (m)\ x\ 443{,}28\ (m)}{886{,}55\ (m)}}$$

$$\boldsymbol{r} = 8{,}52\ (m)$$

Para que una señal de radio se propague eficientemente, esta zona debe estar libre, al menos en un 60%, de obstáculos físicos como árboles, construcciones, terreno irregular o estructuras metálicas. La Tabla 35 presenta valores con el 100% libre de radio y el 60% necesario para la comunicación efectiva de cada nodo.

Tabla 35.

Valores de la Zona de Fresnel

Nodos	100% libre	60% necesario
C1	3,52 (m)	2,22 (m)
C2	8,52 (m)	5,11 (m)

Nota: Elaborado por propio autor, 2025.

3.10.10. Ángulo de Azimut

Es el ángulo horizontal que define la dirección en la que una antena debe ser orientada respecto al norte geográfico, para lograr un alineamiento directo con otra antena o dispositivo remoto. Este parámetro es especialmente útil cuando se desea dirigir una antena direccional o verificar la orientación de antenas en entornos geográficos reales. La Ecuación 11 muestra la fórmula para calcular el ángulo de azimut.

Ecuación 11.

Ángulo de Azimut

$$\boldsymbol{azimut} = tan^{-1}(\theta)$$

Donde θ depende de la longitud y latitud de cada nodo. La Ecuación 12 presenta la fórmula para calcular el ángulo theta.

Ecuación 12.

Ángulo Theta

$$\boldsymbol{\theta} = \frac{\Delta Longitud}{\Delta Latitud}$$

$$\boldsymbol{\theta} = \frac{\text{Lns} - \text{Lng}}{\text{Lans} - \text{Lang}}$$

Donde:

- **Lns**: longitud del nodo sensor
- **Lng**: longitud del nodo Gateway
- **Lans**: latitud del nodo sensor
- **Lang**: latitud del nodo Gateway

Aplicando valores de C1 y C2 da como resultado:

C1:

$$\boldsymbol{\theta} = \frac{-78{,}2846780 - (-78{,}2848961)}{0{,}3654490 - 0{,}3640868}$$

$$\boldsymbol{\theta} = 0{,}1601$$

$$\boldsymbol{azimut} = tan^{-1}(0{,}1601)$$

$$\boldsymbol{azimut} = 9{,}1°$$

C2:

$$\boldsymbol{\theta} = \frac{-78{,}2928370 - (-78{,}2848961)}{0{,}3646630 - 0{,}3640868}$$

$$\boldsymbol{\theta} = -13{,}7815$$

$$\boldsymbol{azimut} = tan^{-1}(-13{,}7815)$$

$$\boldsymbol{azimut} = -85{,}85° = 274{,}15°$$

Para C1, se obtuvo un azimut de aproximadamente 9,1°, lo que indica que el nodo sensor se encuentra orientado ligeramente hacia el noreste respecto al Gateway. Mientras que para C2, el ángulo de azimut fue de −85,85°, lo cual equivale a una orientación hacia el noroeste, considerando que los valores negativos indican una dirección en sentido antihorario desde el norte.

3.10.11. Ángulo de Elevación

Ángulo vertical entre el plano horizontal del transmisor y la línea recta que une este con el receptor. Este parámetro permite conocer si existe una diferencia significativa de altura entre los dos dispositivos del enlace, lo cual puede afectar la línea de vista y el despeje adecuado de la zona de Fresnel. La Ecuación 13 presenta la fórmula para calcular el ángulo de elevación.

Ecuación 13.

Ángulo de Elevación

$$\boldsymbol{\theta_{elevación}} = \arctan\left(\frac{h_2 - h_1}{d}\right)$$

Donde:

- $\boldsymbol{h_1}$: altura del transmisor - nodo sensor (m)
- $\boldsymbol{h_2}$: altura del receptor - Gateway (m)
- $\boldsymbol{d}$: distancia horizontal entre los dos dispositivos (m)
- $\boldsymbol{\theta_{elevación}}$: ángulo de elevación en radianes o grados

Aplicando valores de C1 y C2 da como resultado:

C1:

$$\boldsymbol{\theta_{elevación}} = \arctan\left(\frac{5 - 0{,}5}{151{,}18}\right)$$

$$\boldsymbol{\theta_{elevación}} = 1{,}71°$$

C2:

$$\boldsymbol{\theta_{elevación}} = \arctan\left(\frac{5 - 0{,}5}{886{,}55}\right)$$

$$\boldsymbol{\theta_{elevación}} = 0{,}29°$$

Estos resultados provienen de un modelo geométrico ideal que considera únicamente la diferencia de alturas y la distancia horizontal entre los puntos. En consecuencia, no es viable compararlos con los valores generados por Radio Mobile, ya que el software incorpora factores reales como la topografía, la curvatura terrestre y el modelo digital de elevación, elementos que el cálculo teórico no contempla, por lo que son valores únicamente referenciales.

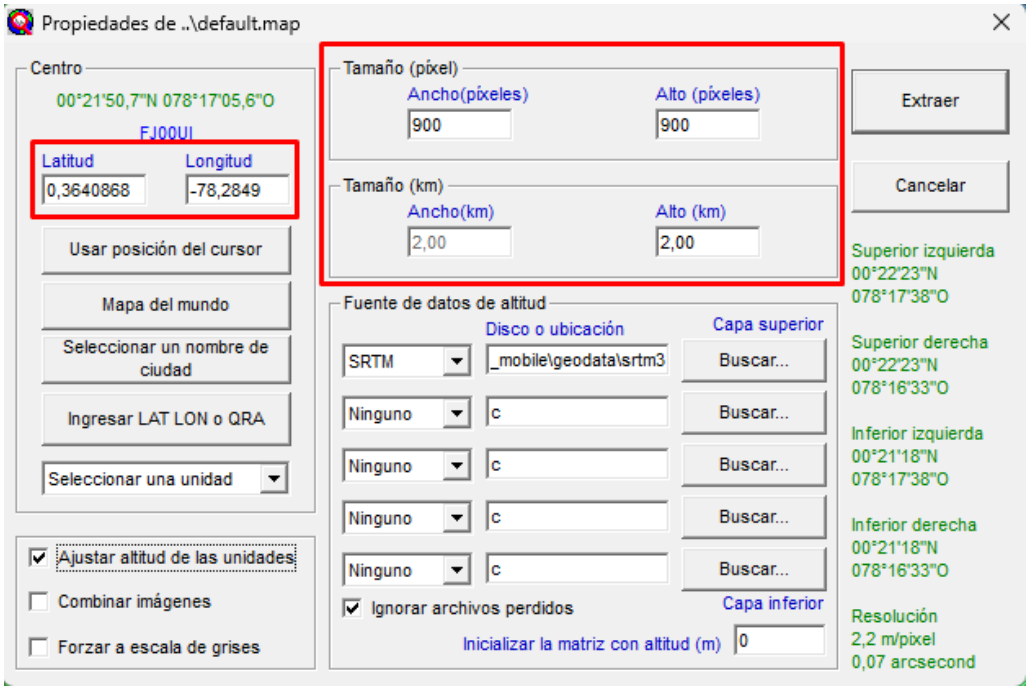
3.11. Simulación en Radio Mobile

Para obtener una representación más realista del comportamiento del enlace de comunicación, se realiza la simulación en Radio Mobile. Permitiéndonos visualizar cómo influye el relieve, la topografía y las condiciones del entorno sobre la propagación de la señal.

Para iniciar con la simulación del enlace de comunicación en Radio Mobile lo primero que se realiza es definir la ubicación del área donde se desplegara dicho enlace. Para ello, se ingresan las coordenadas obtenidas de Google Earth y se establece el tamaño del mapa que será utilizado como base para la simulación, como se presenta en la Figura 44.

Figura 44.

Configuración de coordenadas y tamaño de mapa



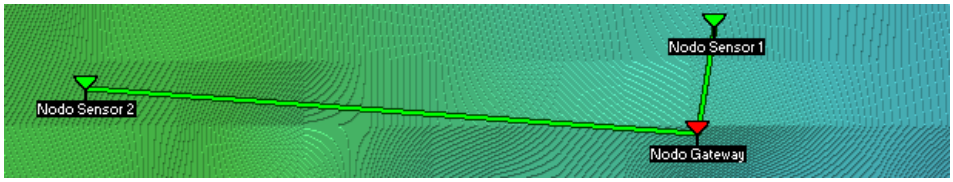
Nota: Autoría propia, 2025.

A continuación, se ingresan las coordenadas correspondientes a los Nodos Sensores y al Gateway dentro del entorno de simulación. Una vez definidos estos puntos, Radio Mobile los muestra sobre el mapa, permitiendo visualizar su ubicación. Para trazar las líneas de comunicación entre los dispositivos, es necesario configurar los parámetros del enlace, como frecuencia, potencia de transmisión, ganancia, altura de antenas, así como pérdidas asociadas.

Con estos valores establecidos, Radio Mobile genera automáticamente una representación tanto de la ubicación de los dispositivos sobre el mapa, así como del enlace de comunicación, tal como se muestra en la Figura 45.

Figura 45.

Simulación de los nodos y del enlace de comunicación



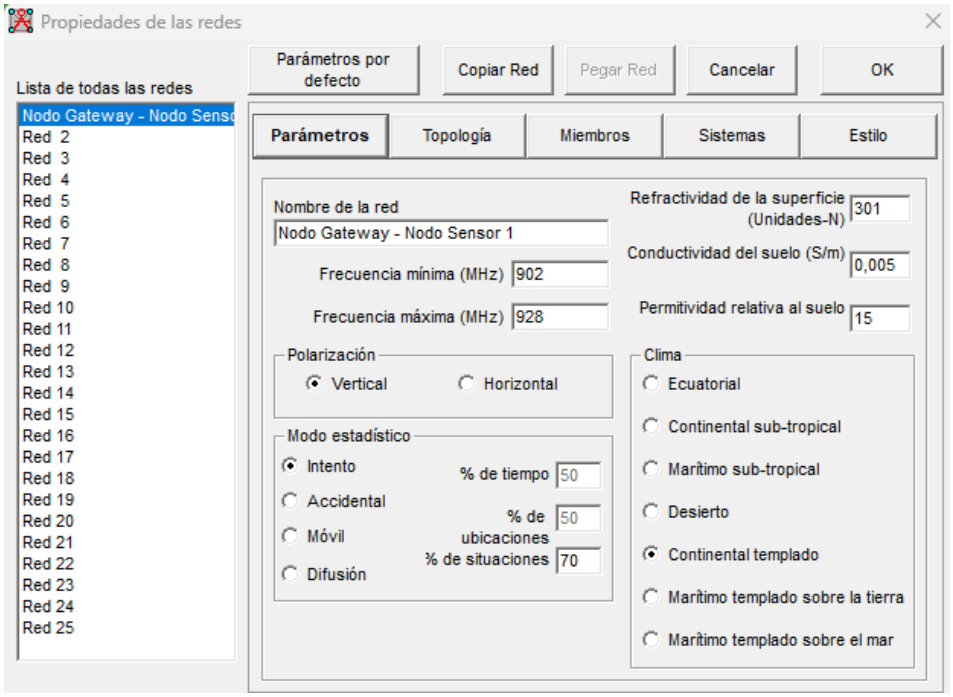
Nota: Autoría propia, 2025.

3.11.1. Nodo sensor 1 – Nodo Gateway

Para configurar el primer enlace de comunicación entre el Nodo Sensor 1 y el Gateway, primero se asigna un nombre a la red. Posteriormente, se establecen los parámetros del enlace, como el rango de frecuencia de operación, el tipo de polarización de la señal y las condiciones climáticas que influirán en la propagación, como se muestra en la Figura 46.

Figura 46.

Propiedades de Red para Nodo Gateway – Nodo Sensor 1

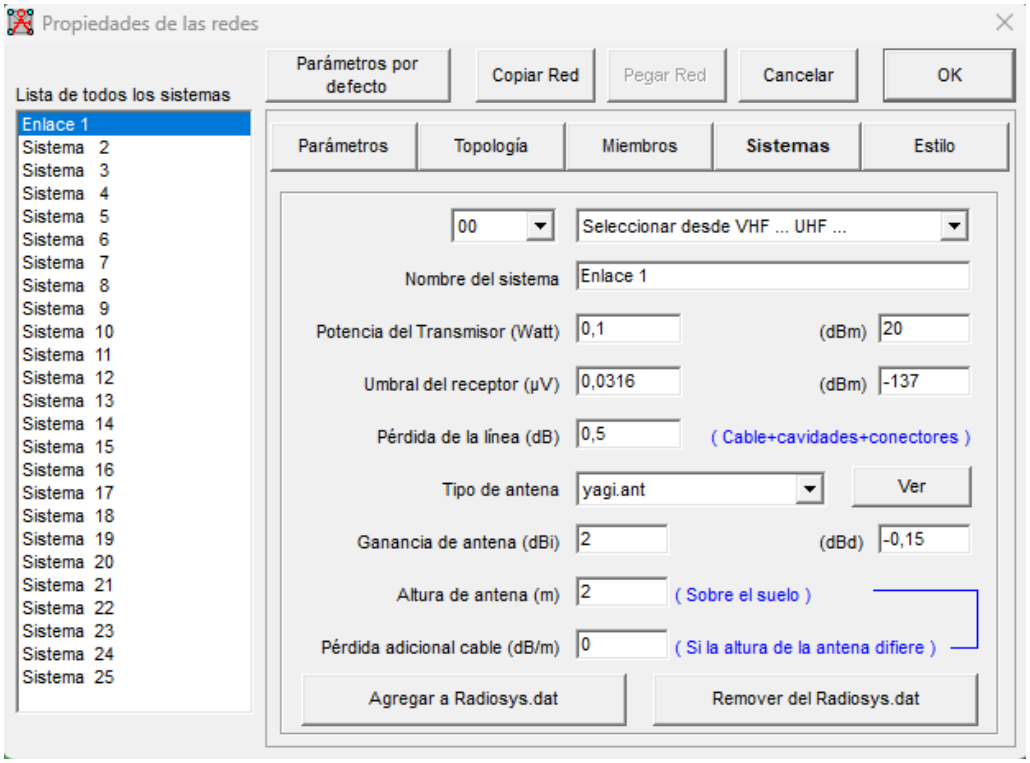


Nota: Autoría propia, 2025.

A continuación, se configuran parámetros del enlace, como la potencia de transmisión, el umbral de sensibilidad del receptor, las pérdidas de línea, así como el tipo y la ganancia de las antenas empleadas. Finalmente, se define la altura de instalación de la antena, tal como se muestra en la Figura 47.

Figura 47.

Configuración de enlace para Nodo Gateway – Nodo Sensor 1

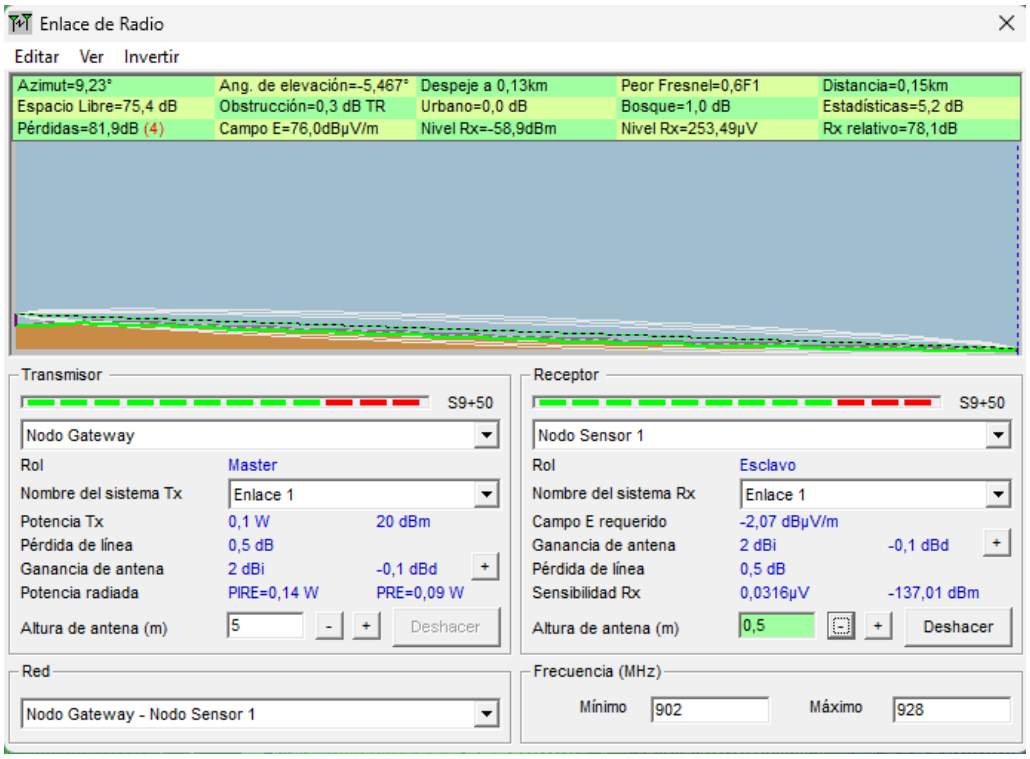


Nota: Autoría propia, 2025.

Una vez configurados todos los parámetros del enlace, Radio Mobile genera los resultados de la simulación, como se observa en la Figura 48. Entre los valores presentados se incluyen el azimut, las pérdidas por espacio libre, el nivel de señal recibido (Rx), el nivel relativo de recepción y la distancia del enlace.

Figura 48.

Resultados de simulación de Nodo Gateway – Nodo Sensor 1



Nota: Autoría propia, 2025.

Los datos obtenidos en la simulación permiten a su vez realizar una comparación directa con los parámetros obtenidos mediante los cálculos teóricos, tal como se muestra en la Tabla 36 a continuación.

Tabla 36.

Comparativa de resultados de simulación y teóricos del Nodo Sensor 1

Parámetro	Calculo Teórico	Radio Mobile	Diferencia
Distancia del enlace (km)	0,15 (km)	0,15 (km)	0,0 (km)
Pérdidas por espacio libre (dB)	75,3 (dB)	75,4 (dB)	0,1 (dB)
Potencia recibida Rx (dBm)	-58,8 (dBm)	-58,9 (dBm)	0,1 (dBm)
Nivel Rx relativo (dB)	78,2 (dB)	78,1 (dB)	0,1 (dBm)
Azimut (°)	9,1 (°)	9,2 (°)	0,1 (°)

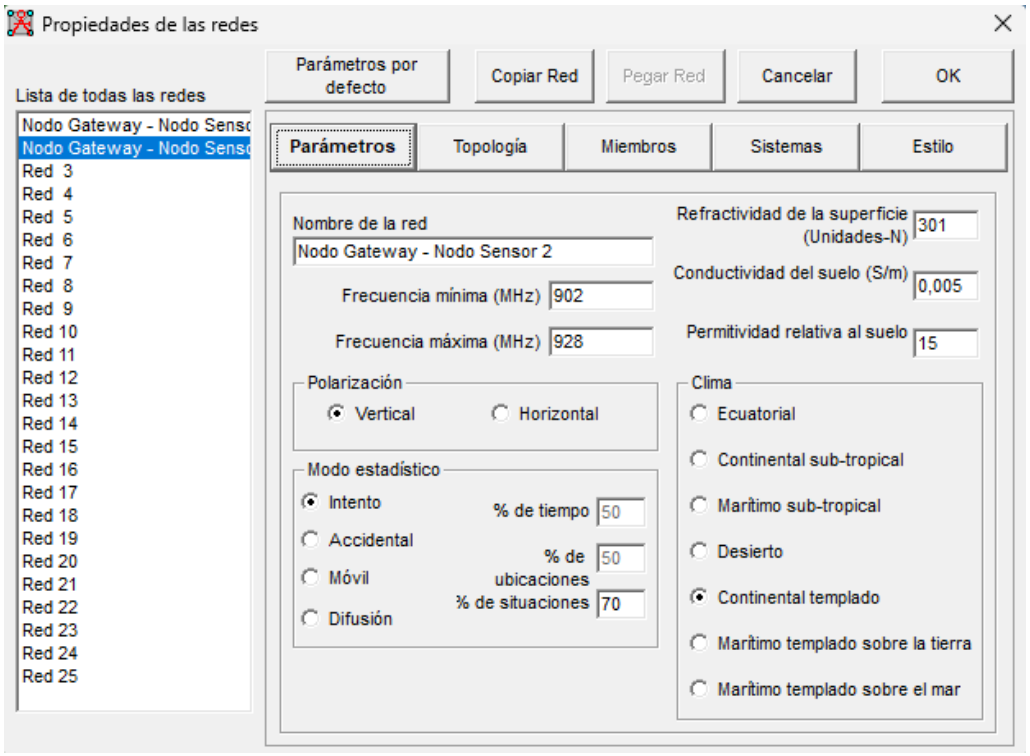
Nota: Elaborado por propio autor, 2025.

3.11.2. Nodo sensor 2 – Nodo Gateway

Para configurar el segundo enlace de comunicación entre el Nodo Sensor 2 y el Gateway, primero se asigna un nombre a la red. Posteriormente, se establecen los parámetros del enlace, como el rango de frecuencia de operación, el tipo de polarización de la señal y las condiciones climáticas que influirán en la propagación, como se muestra en la Figura 49.

Figura 49.

Propiedades de Red para Nodo Gateway – Nodo Sensor 2

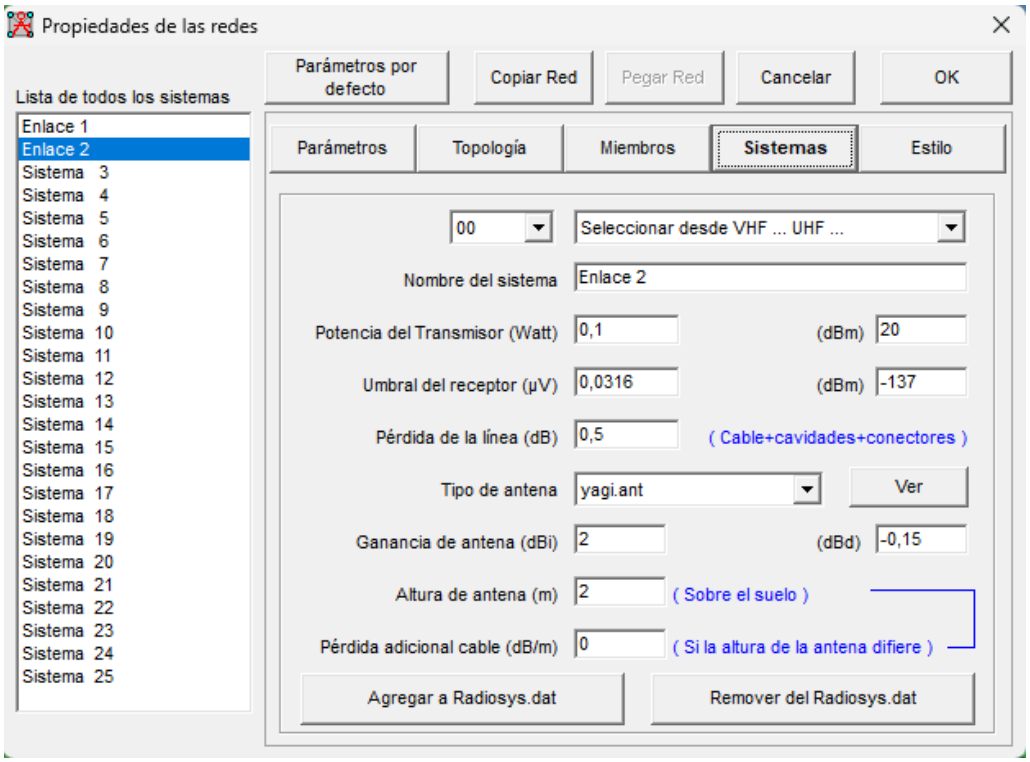


Nota: Autoría propia, 2025.

A continuación, se configuran los parámetros específicos del enlace, como la potencia de transmisión, el umbral de sensibilidad del receptor, las pérdidas de línea, el tipo y la ganancia de la antena utilizada. Finalmente, se establece la altura de instalación de la antena, como se muestra en la Figura 50.

Figura 50.

Configuración de enlace para Nodo Gateway – Nodo Sensor 2

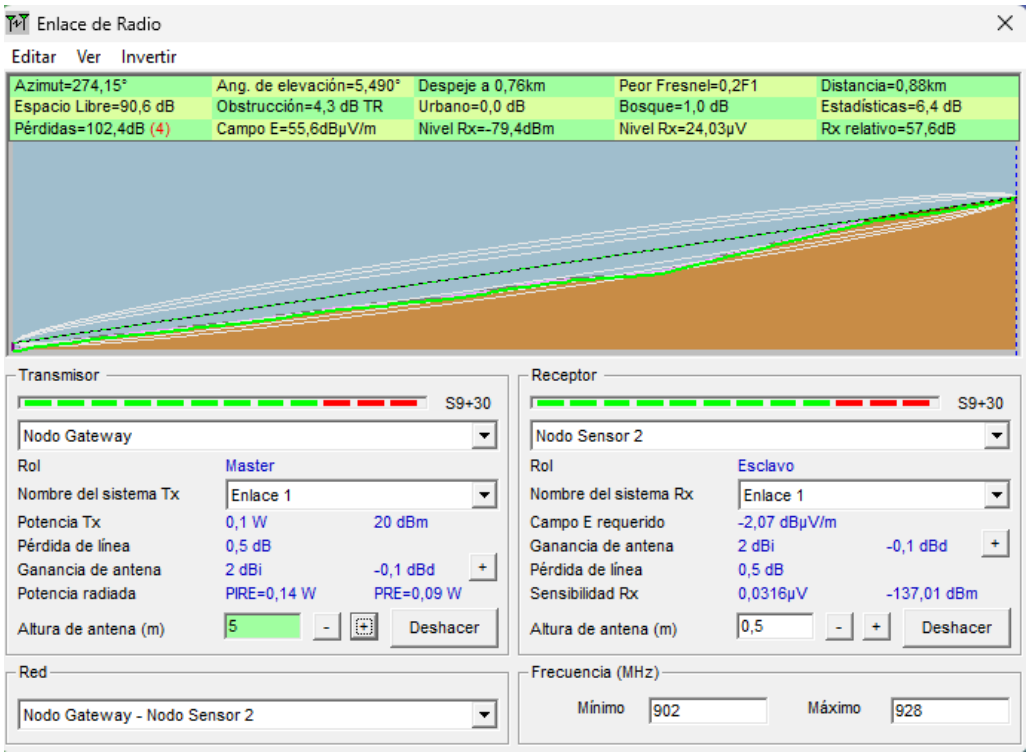


Nota: Autoría propia, 2025.

Una vez configurados todos los parámetros del enlace, Radio Mobile genera los resultados de la simulación, como se muestra en la Figura 51. Entre los valores obtenidos se incluyen el azimut, las pérdidas por espacio libre, el nivel de señal recibida (Rx), el nivel relativo de recepción y la distancia total del enlace, parámetros fundamentales para evaluar el desempeño del enlace simulado.

Figura 51.

Resultados de simulación de Nodo Gateway – Nodo Sensor 2



Nota: Autoría propia, 2025.

Los datos obtenidos en la simulación permiten realizar una comparación directa con los parámetros calculados teóricamente, tal como se presenta en la Tabla 37 a continuación.

Tabla 37.

Comparativa de resultados de simulación y teóricos del Nodo Sensor 2

Parámetro	Calculo Teórico	Radio Mobile	Diferencia
Distancia del enlace (km)	0,88 (km)	0,88 (km)	0,0 (km)
Pérdidas por espacio libre (dB)	90,6 (dB)	90,6 (dB)	0,0 (dB)
Potencia recibida Rx (dBm)	-79,3 (dBm)	-79,4 (dBm)	0,1 (dBm)
Nivel Rx relativo (dB)	57,7 (dB)	57,6 (dB)	0,1 (dBm)
Azimut (°)	274,15 (°)	274,15 (°)	0 (°)

Nota: Elaborado por propio autor, 2025.

3.12. Almacenamiento

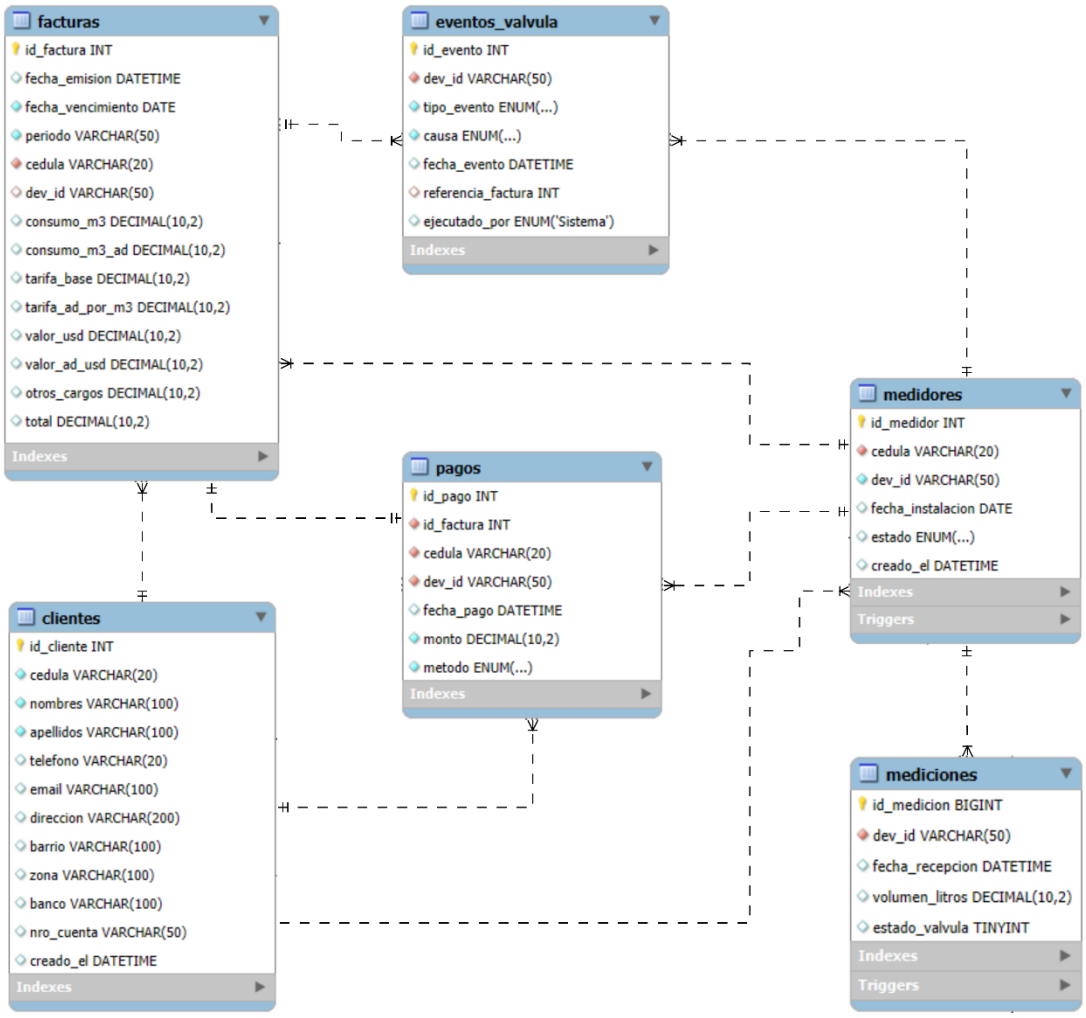
Para almacenar la información generada por los nodos sensores, se utiliza una base de datos MySQL, la cual permite guardar de forma organizada los datos de consumo, fechas de lectura y estados del servicio.

3.12.1. Modelo relacional

La Figura 52 muestra la relación entre las tablas de la base de datos, la cual está diseñada para gestionar integralmente el consumo de agua potable por familias, centralizando la información en la tabla principal clientes, que almacena datos de identificación, ubicación y datos bancarios.

Figura 52.

Diagrama entidad relación



Nota: Autoría propia, 2025.

A partir de la tabla clientes se relacionan otras entidades clave como: facturas, que registra los consumos mensuales, tarifas y totales a pagar; la tabla pagos, donde se documentan los pagos realizados por cada cliente; y medidores, que almacena información de los dispositivos instalados, vinculados a la tabla mediciones, donde se registran los volúmenes consumidos y el estado de las válvulas, la tabla eventos_valvula permite llevar el control de apertura o cierre de las válvulas. Esta estructura permite automatizar procesos de facturación, monitoreo remoto y gestión operativa del servicio de agua potable.

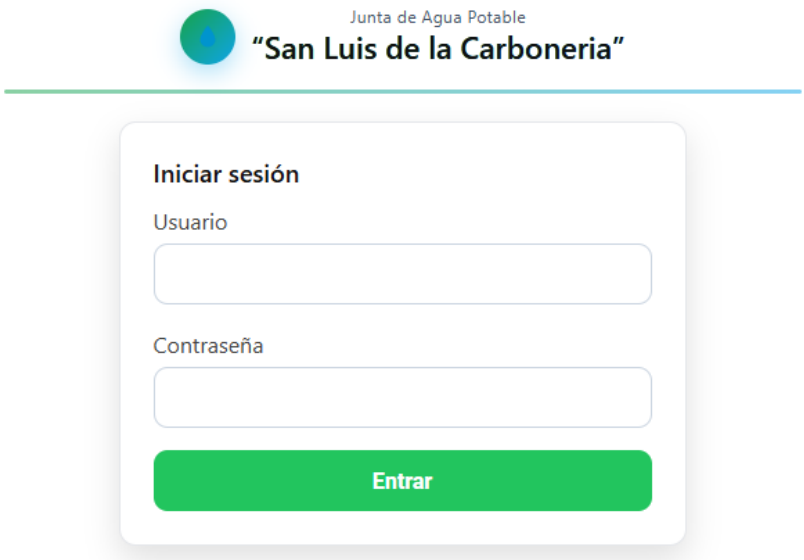
3.13. Dashboard y diseño web

La visualización de los datos almacenados es importante para facilitar la gestión operativa del sistema. Es así como, través de una plataforma web el operario de la comunidad puede acceder de forma sencilla a la información de consumo generada por cada usuario.

El sistema cuenta con una pantalla de inicio de sesión (login) que garantiza el acceso restringido únicamente al personal autorizado, como se presenta en la Figura 53. Esta medida de autenticación refuerza la seguridad del sistema y protege información sensible relacionada con la gestión del servicio de agua potable.

Figura 53.

Ventana de inicio de sesión

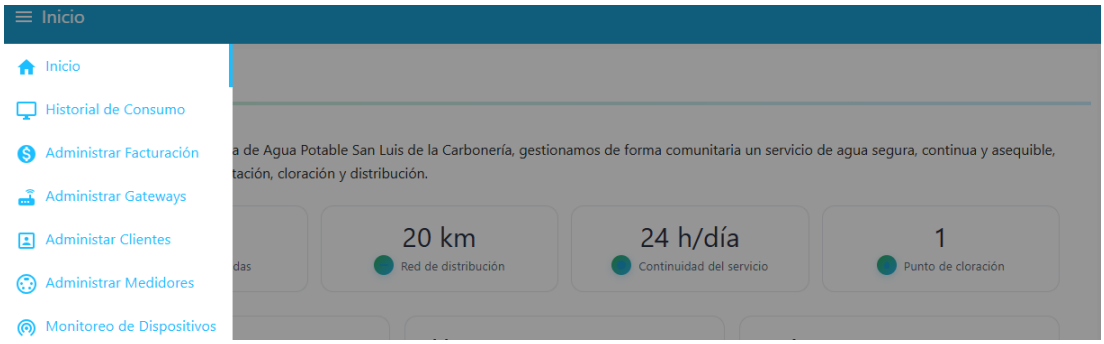


Nota: Autoría propia, 2025.

Al iniciar sesión nos redirigirá una página inicial, desde la cual se accede a funciones clave para la gestión del servicio, como se muestra en la Figura 54. En la parte izquierda se presenta un menú de navegación con opciones para visualizar el historial de consumo, administrar la facturación, gateways, clientes, medidores y monitorear los dispositivos.

Figura 54.

Ventana de inicio



Nota: Autoría propia, 2025.

El historial muestra el consumo de agua potable que un usuario a presentado con solo seleccionar el usuario correspondiente. Además, desde la misma plataforma es posible ejecutar acciones como el corte o reconexión del servicio, optimizando el control administrativo y operativo del sistema de agua potable como se muestra en la Figura 55.

Figura 55.

Ventana de Historial de Consumo

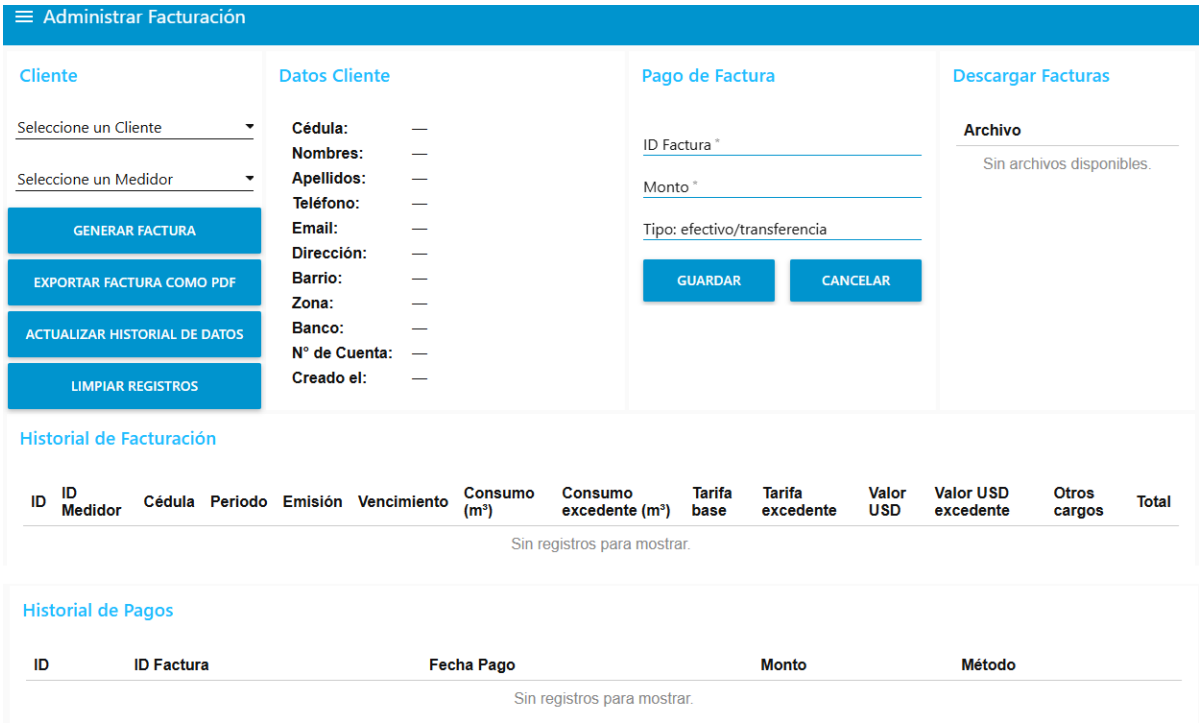


Nota: Autoría propia, 2025.

La sección Administrar Facturación permite gestionar de forma centralizada los procesos de facturación del sistema. En ella se selecciona al cliente y su medidor, mostrando los datos del usuario, su historial de facturación y el registro de pagos. Además, ofrece funciones para guardar nuevos pagos, generar facturas, exportarlas en formato PDF y acceder al repositorio de facturas previamente generadas como se presenta en la Figura 56.

Figura 56.

Ventana de Administración de Facturación

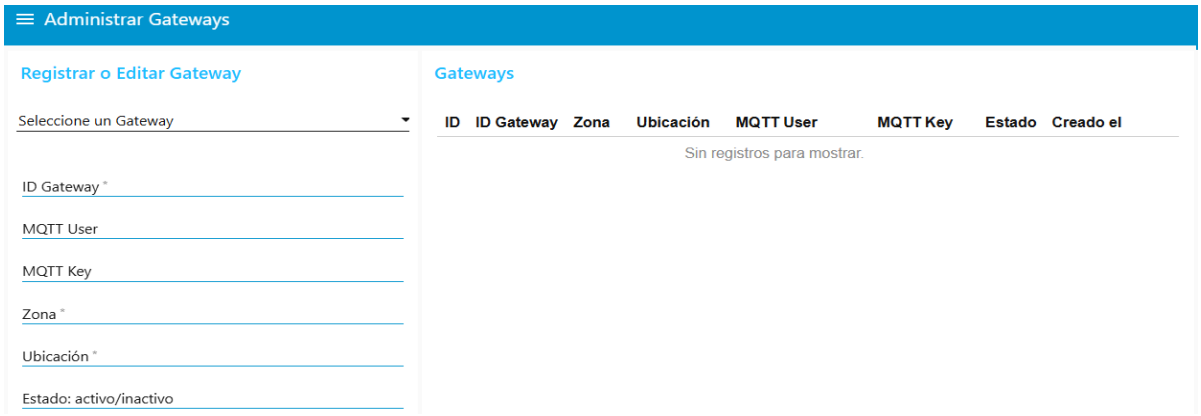


Nota: Autoría propia, 2025.

La sección Administrar Gateways incorpora un formulario que permite registrar nuevos dispositivos o editar la información de los ya existentes. Además, dispone de una tabla donde se visualizan todos los Gateways registrados junto con su información, facilitando su gestión y control dentro del sistema como se muestra en la Figura 57.

Figura 57.

Ventana de Administración de Gateways

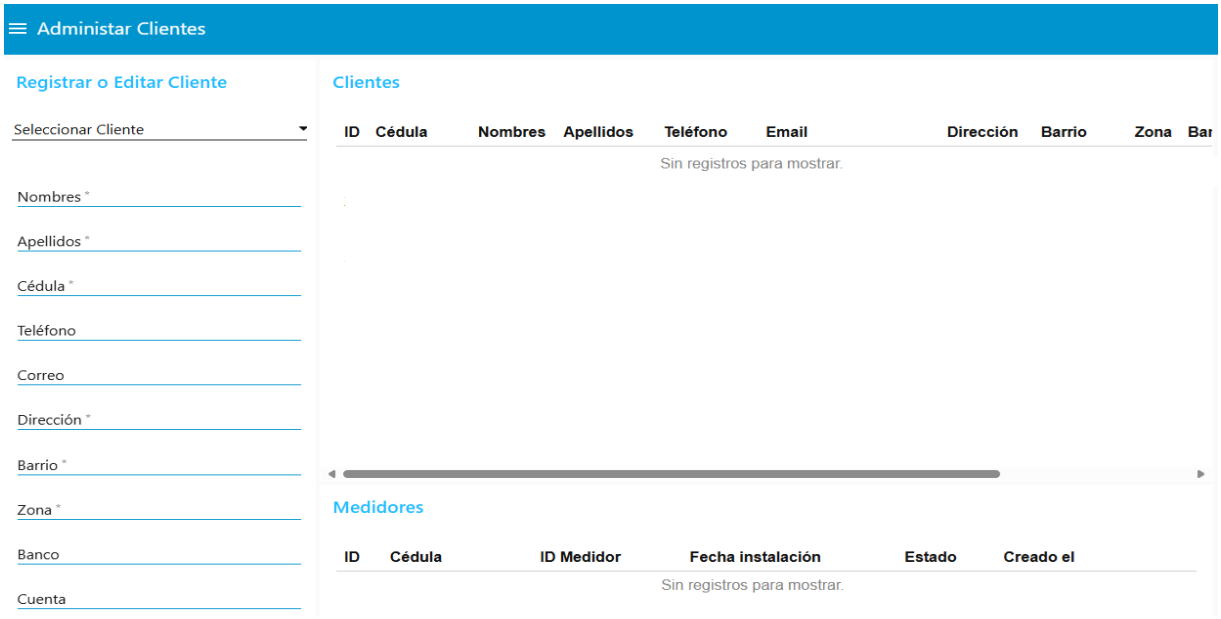


Nota: Autoría propia, 2025.

La sección Administrar Clientes dispone de un formulario para registrar nuevos usuarios o editar la información de clientes existentes. En este apartado se solicitan datos de identificación, ubicación, información bancaria y el código del medidor correspondiente. Así mismo, cuenta con una tabla que muestra todos los clientes registrados y otra tabla adicional que permite visualizar el listado completo de medidores asociados como se presenta en la Figura 58.

Figura 58.

Ventana de Administración de Clientes



Nota: Autoría propia, 2025.

La sección Administrar Medidores permite visualizar todos los medidores registrados en el sistema y realizar la eliminación individual de los mismos. A diferencia de la sección Administrar Clientes, donde al eliminar un cliente se borran también todos sus medidores asociados, en este apartado la función de eliminación afecta únicamente al medidor seleccionado, sin alterar la información del cliente vinculado como se muestra en la Figura 59.

Figura 59.

Ventana de Administración de Medidores

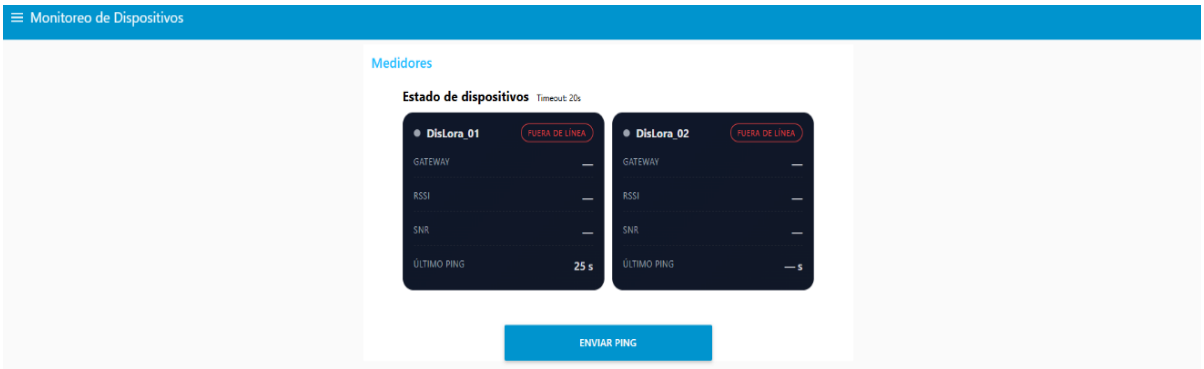


Nota: Autoría propia, 2025.

La sección Monitoreo de Dispositivos muestra los medidores registrados en el sistema, permitiendo verificar su estado de conectividad. Para ello, se incorpora un botón, mediante el cual, tras seleccionar un medidor específico, es posible determinar si este se encuentra en línea o fuera de servicio. Esta funcionalidad facilita la detección de posibles desconexiones y garantiza el control oportuno del correcto funcionamiento de los dispositivos como se muestra en la Figura 60.

Figura 60.

Ventana de Monitoreo de Dispositivos



Nota: Autoría propia, 2025.

CAPÍTULO IV: PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

El presente capítulo describe la implementación del sistema propuesto, así como el análisis de su eficiencia mediante un conjunto de pruebas experimentales. De este modo, el capítulo se estructura en dos secciones principales.

La primera se centra en el ensamblaje de los distintos componentes de hardware que conforman la solución planteada dentro de la arquitectura general. A su vez, se presenta el desarrollo de software embebido implementado en cada uno de los microcontroladores, detallando su interacción y funcionamiento dentro del sistema.

La segunda sección está orientada a la evaluación del rendimiento y verificación del funcionamiento del sistema bajo condiciones reales de uso, a través de pruebas experimentales realizadas en un entorno controlado.

4.1. Implementación del sistema electrónico

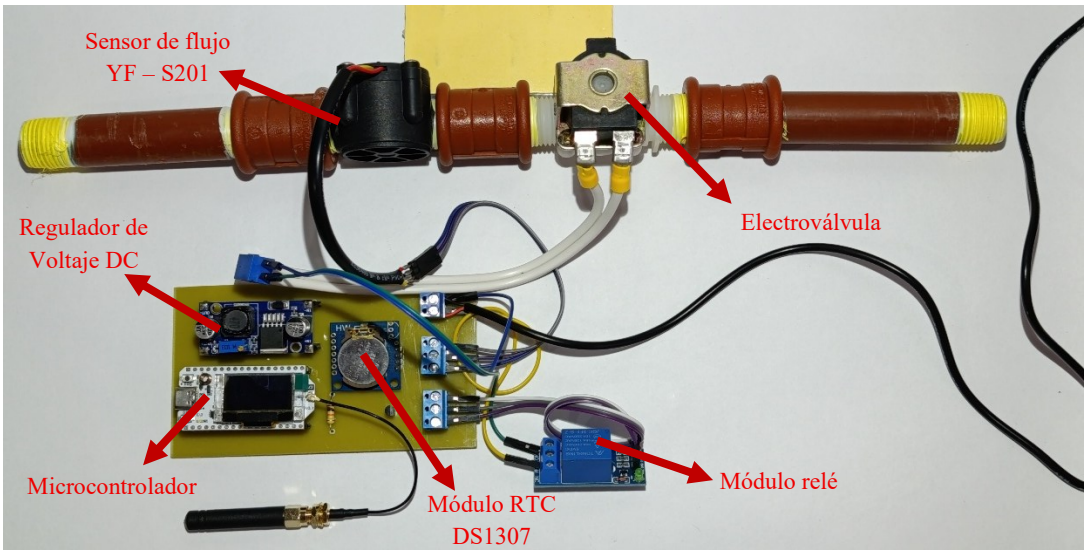
Este apartado contempla la integración física y funcional de los distintos componentes definidos en el diseño del Capítulo III, tanto en el nodo Sensor como en el nodo Gateway. Este proceso abarca la interconexión de los dispositivos electrónicos, tales como sensores y actuadores, así como el esquema de alimentación, con el fin de garantizar un funcionamiento coordinado y eficiente en cada nodo.

4.1.1. Implementación de Nodo Sensor

La implementación del nodo sensor se realiza sobre la placa PCB diseñada en el capítulo III, en la cual se integran de manera organizada el microcontrolador, actuador, sensor, módulo de tiempo, modulo relé y regulador de voltaje ya que algunos de los componentes trabajan únicamente a 5V y el sistema de alimentación entrega aproximadamente 12V. En la Figura 61, se muestra la integración de todos los componentes electrónicos que conforman el nodo sensor.

Figura 61.

Integración de componentes electrónicos del nodo sensor

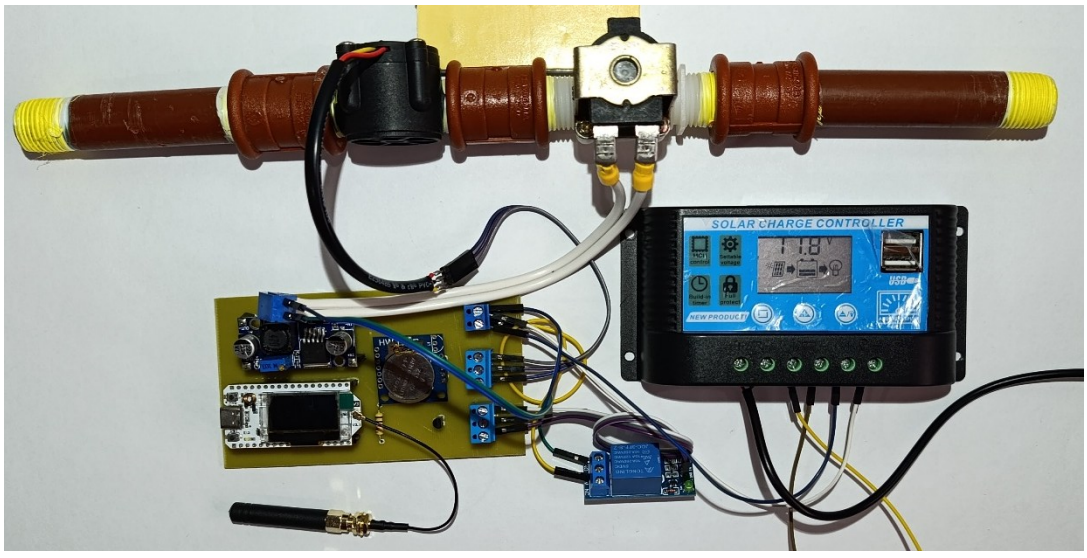


Nota: Autoría propia, 2025.

Posteriormente, se integra el controlador de carga, el cual se encarga de administrar la energía proveniente de la celda fotovoltaica, controlar ciclos de carga y descarga de la batería y suministrar de forma estable energía eléctrica al circuito del nodo. De esta forma se protege a los componentes frente a sobrecargas, descargas profundas y variaciones de voltaje, en la Figura 62, se muestra la integración del controlador de carga al circuito.

Figura 62.

Integración del controlador de carga

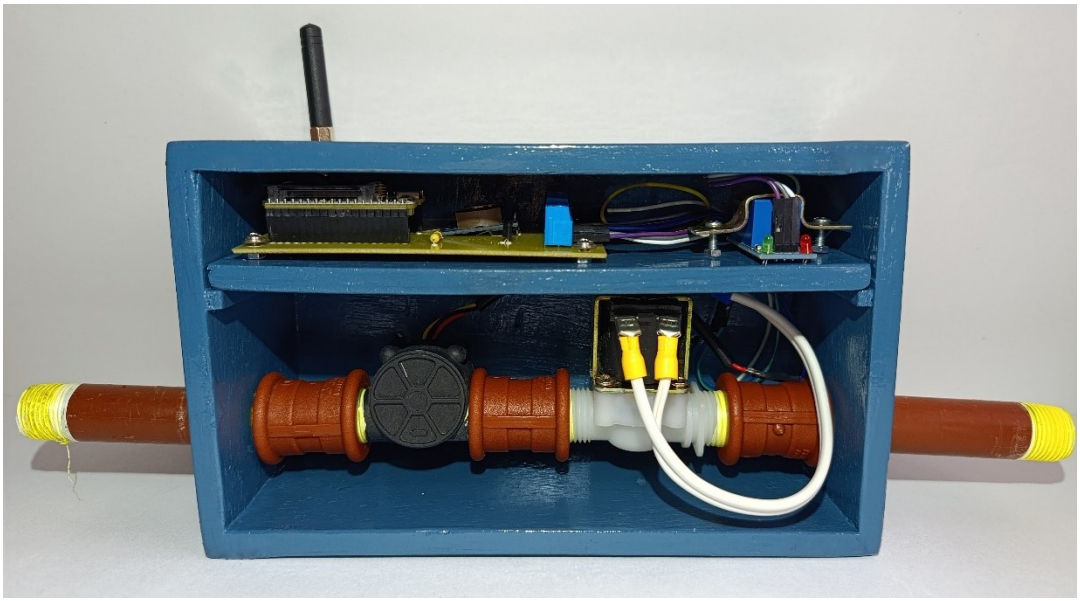


Nota: Autoría propia, 2025.

Finalmente, se integra el case al circuito, su función es resguardar los componentes electrónicos de condiciones climáticas, tales como humedad, polvo y lluvia, además de la manipulación externa por parte de personal no autorizado. La Figura 63, muestra la integración del case que se encargará de proteger al circuito electrónico.

Figura 63.

Integración del case de protección



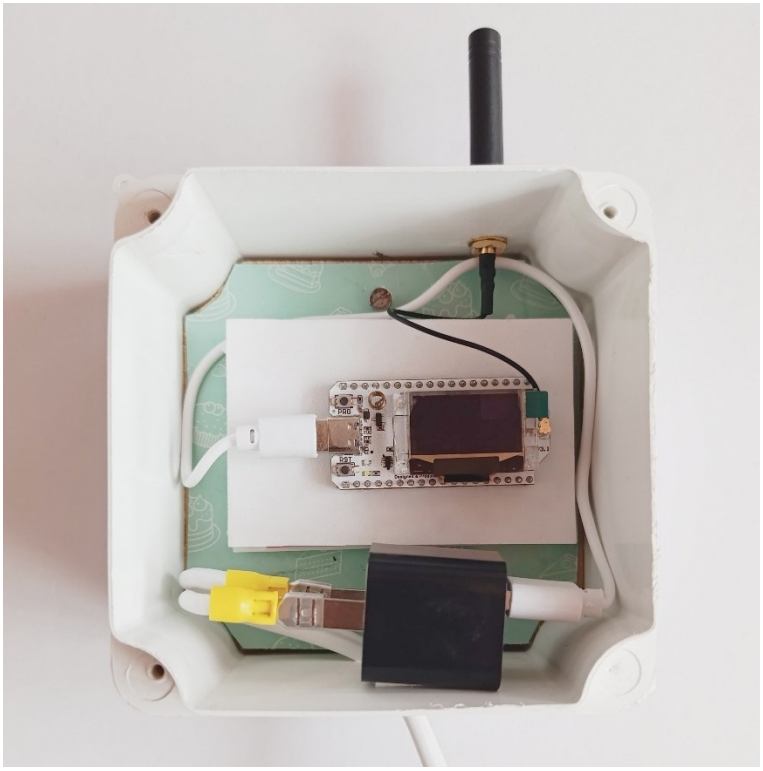
Nota: Autoría propia, 2025.

4.1.2. Implementación de Nodo Gateway

La integración del nodo Gateway se muestra en la Figura 64, este nodo está conformado por el microcontrolador, la antena encargada de la recepción de datos y la retransmisión de instrucciones desde el servidor hacia el nodo sensor, así como la fuente de alimentación necesaria para su operación. El case resguardara los componentes frente a las condiciones climáticas que puedan presentarse, asegurando su correcto funcionamiento en el entorno de operación.

Figura 64.

Integración del nodo Gateway



Nota: Autoría propia, 2025.

4.2. Implementación de software embebido

Para el desarrollo e implementación del software embebido se hizo uso del IDE de Arduino, herramienta mediante la cual se desarrolla y compila el código de cada uno de los nodos. A continuación, se presenta el código implementado en cada nodo del sistema.

4.2.1. Software embebido de Nodo Sensor

La Figura 65, muestra las librerías utilizadas durante el desarrollo del código que se implementa en el microcontrolador del nodo sensor, dentro de las librerías se pueden encontrar la comunicación LoRa, el núcleo de Arduino, la comunicación I2C y el módulo de reloj en tiempo real (RTC). Adicionalmente, se utiliza el sistema de archivos SPIFFS, el cual permite el almacenamiento local de datos en la memoria Flash del microcontrolador, permitiendo la conservación de información en caso de pérdida temporal de conectividad.

Figura 65.

Librerías utilizadas en nodo sensor

```
#include "LoRaWan_APP.h"
#include "Arduino.h"
#include <Wire.h>
#include "RTClib.h"
#include "FS.h"
#include "SPIFFS.h"
```

Nota: Autoría propia, 2025.

La Figura 66, presenta como se definen los parámetros con los que operará el enlace de comunicación LoRa, como la frecuencia de operación de 915 MHz, la potencia de transmisión de 14 dBm, el ancho de banda de 125 KHz, el factor de ensanchamiento de SF9 y el nivel de corrección de errores que es de 4/5, 4 bits de datos y 1 de corrección, usado por la transmisión para poder detectar y corregir errores causados por ruido o distancia. Estos parámetros afectan directamente el alcance, robustez y tasa de datos dentro del sistema.

Figura 66.

Parámetros de operación de enlace de comunicación LoRa

```
#define RF_FREQUENCY            915000000 // Hz
#define TX_OUTPUT_POWER         14        // dBm
#define LORA_BANDWIDTH          0         // [0: 125 kHz, 1: 250 kHz, 2: 500 kHz, 3: Reserved]
#define LORA_SPREADING_FACTOR   9         // [SF7..SF12]
#define LORA_CODINGRATE         1         // [1: 4/5, 2: 4/6, 3: 4/7, 4: 4/8]
```

Nota: Autoría propia, 2025.

La Figura 67, muestra el ID del nodo con el que se identificara el envío de datos hacia el servidor, además de las banderas de control para él envió de datos.

Figura 67.

Identificación del nodo y banderas de control

```
String StrIndx = "xxxxxxxxxx";  //ID del dispositivo

bool BandSendData = false;      //BandTimeOk: envío automático según RTC
bool BandTimeOk   = false;      //BandSendData: envío por evento/comando
```

Nota: Autoría propia, 2025.

La Figura 68, muestra la implementación del almacenamiento local de datos, donde se define la ruta del log, el tamaño máximo que tendrá y el reinicio del log al exceder el límite de datos.

Figura 68.

Almacenamiento local de datos

```
// Ruta del archivo de log dentro del sistema de archivos SPIFFS
static const char* LOG_PATH = "/lora_log.txt";

// Tamaño máximo permitido para el archivo de log (200 KB)
static const uint32_t LOG_MAX_BYTES = 200 * 1024;

// Inicializa el sistema de archivos SPIFFS
bool initFS() {
  // Monta SPIFFS (true = formatea si falla)
  if (!SPIFFS.begin(true)) return false;

  // Si el archivo de log NO existe, se crea
  if (!SPIFFS.exists(LOG_PATH)) {
    File f = SPIFFS.open(LOG_PATH, FILE_WRITE);
    if (f) {
      // Escribe una línea inicial en el log
      f.println("==== LOG LORA (inicio) ====");
      f.close();
    }
  }
  return true;  // SPIFFS inicializado correctamente
}

// Verifica si el archivo de log supera el tamaño máximo permitido
void rotateLogIfNeeded() {
  // Si el archivo no existe, no hay nada que hacer
  if (!SPIFFS.exists(LOG_PATH)) return;

  // Abre el archivo en modo lectura para conocer su tamaño
  File f = SPIFFS.open(LOG_PATH, FILE_READ);
  if (!f) return;

  // Obtiene el tamaño actual del archivo
  uint32_t sz = (uint32_t)f.size();
  f.close();

  // Si el tamaño supera el límite configurado
  if (sz >= LOG_MAX_BYTES) {
    // Elimina el archivo viejo
    SPIFFS.remove(LOG_PATH);

    // Crea un nuevo archivo de log limpio
    File nf = SPIFFS.open(LOG_PATH, FILE_WRITE);
    if (nf) {
      // Mensaje indicando que el log fue reiniciado automáticamente
      nf.println("==== LOG LORA (auto-reiniciado por limite) ====");
      nf.close();
    }
  }
}
```

Nota: Autoría propia, 2025.

La Figura 69, muestra la configuración realizada para el sensor de flujo, el cual es el encargado de censar las lecturas de consumo de agua potable.

Figura 69.

Configuración para sensor de flujo

```
// Variable compartida con la interrupción (ISR)
// volatile evita que el compilador optimice su acceso
volatile int pulsos = 0;

// Caudal instantáneo en litros por minuto (L/min)
float caudal;

// Volumen total acumulado en litros (L)
float volumen;

// Guarda el tiempo de la última medición
unsigned long tiempoAnterior = 0;

// Pin digital donde está conectado el sensor de flujo
const int pinSensorFlujo = 3;

// Rutina de interrupción (ISR)
// Se ejecuta cada vez que el sensor genera un pulso
void IRAM_ATTR contarPulsos() {
  // Incrementa el contador de pulsos del sensor
  pulsos++;
}

// --------- CÓDIGO DENTRO DEL loop() ---------
// Este bloque se ejecuta aproximadamente cada 1000 ms
if (intervalo >= 1000) {

  // Factor de calibración del sensor
  // Indica cuántos pulsos equivalen a 1 litro por minuto
  float factorCalibracion = 7.5;

  // Calcula el caudal instantáneo (L/min)
  // pulsos contados en 1 segundo / factor de calibración
  caudal = (pulsos / factorCalibracion);

  // Calcula el volumen acumulado
  // Se divide el caudal entre 60 para pasar de L/min a L/seg
  volumen += (caudal / 60.0);

  // Reinicia el contador de pulsos para la próxima medición
  pulsos = 0;

  // Actualiza el tiempo de referencia
  tiempoAnterior = tiempoActual;
}
```

Nota: Autoría propia, 2025.

La Figura 70, muestra la configuración para el módulo RTC, en este fragmento se presenta la configuración I2C y el ajuste del formato horario que tendrá al momento de estar en funcionamiento.

Figura 70.

Configuración para Módulo RTC

```
// Inicializa el bus I2C
// SDA en el pin 5 y SCL en el pin 6
Wire.begin(5, 6);

// Inicializa el módulo RTC
if (!rtc.begin()) {
  // Mensaje de error si no se detecta el RTC
  Serial.println("No se puede encontrar al modulo RTC");

  // Detiene el programa completamente
  while (1);
}

// Verifica si el RTC está funcionando
if (!rtc.isrunning()) {
  // Usa la fecha y hora de compilación del sketch
  rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__)));
}

// ------------------------------------------------
// Función que lee la fecha y hora actuales del RTC
// ------------------------------------------------
void LeerHora(void) {

  // Lee la fecha y hora actual desde el RTC
  DateTime now = rtc.now();

  // Suma 1 minuto al tiempo leído
  // (útil para correcciones manuales o desfases)
  now = now + TimeSpan(0, 0, 1, 0);

  // Obtiene el año
  int Anio = now.year();

  // Obtiene el mes
  byte Mes = now.month();

  // Obtiene el día del mes
  byte Dia = now.day();

  // Obtiene la hora
  byte Hora = now.hour();

  // Obtiene los minutos
  byte Minuto = now.minute();

  // Obtiene los segundos
  byte Segundo = now.second();

  // Convierte el valor del año a una cadena de texto en base decimal y lo almacena
  StrFechaHora = String(Anio, DEC);
}
```

Nota: Autoría propia, 2025.

Tras la configuración para el módulo RTC se realiza la lógica de envío programado en este caso se establecido cada 8 horas con el fin de obtener más datos al realizar las pruebas en el entorno controlado de producción. La Figura 71, muestra el formato que se tendrá para el envió programado de datos.

Figura 71.

Lógica para envió programado de datos

```
// Guarda la última fecha y hora en la que se ejecutó el envío, para evitar repeticiones
static int lastSendY=-1, lastSendM=-1, lastSendD=-1, lastSendH=-1, lastSendMin=-1;

// Verifica si la hora actual es múltiplo de 8 y si estamos exactamente en el minuto y segundo 0
if ((Hora % 8) == 0 && Minuto == 0 && Segundo == 0) {

    // Comprueba que este evento no haya sido procesado ya en esta misma fecha y hora
    if (lastSendY != Anio || lastSendM != Mes || lastSendD != Dia || lastSendH != Hora || lastSendMin != Minuto) {

        // Activa la bandera indicando que es el momento válido para realizar el envío
        BandTimeOk = true;

        // Actualiza la última fecha y hora registrada del envío
        lastSendY = Anio; lastSendM = Mes; lastSendD = Dia; lastSendH = Hora; lastSendMin = Minuto;
    }
}
```

Nota: Autoría propia, 2025.

La Figura 72, muestra la construcción del payload para su envío mediante comunicación LoRa y el almacenamiento local de datos. Además, una vez realizado el envío se reinician los valores de volumen y las banderas para su funcionamiento continuo.

Figura 72.

Construcción del payload, envió por LoRa y guardado persistente

```
// Verifica si es momento de enviar datos por tiempo o si hay una solicitud de envío
if ((BandTimeOk == true) || (BandSendData == true)) {

    // Lee el estado actual del pin de salida definido como PIN_SALIDA_1
    EstadoPinSalida = digitalRead(PIN_SALIDA_1);

    // Construye la cadena de datos a enviar: índice + fecha/hora + volumen + estado del pin
    StrDataResp = StrIndx + "@" + StrFechaHora + "@" + String(volumen,2) + "@" + String(EstadoPinSalida);

    // Guardado persistente en archivo TXT usando la función de log
    appendLog(StrDataResp);

    // Convierte la cadena de respuesta a un arreglo de caracteres para el envío LoRa
    StrDataResp.toCharArray(txpacket, BUFFER_SIZE);

    // Envía los datos por LoRa usando el método Send
    Radio.Send((uint8_t *)txpacket, strlen(txpacket));

    // Marca que la radio ya no está en estado inactivo
    lora_idle = false;

    // Reinicia el volumen acumulado después de enviarlo
    volumen = 0;

    // Resetea la bandera de envío manual
    BandSendData = false;

    // Resetea la bandera de envío por tiempo
    BandTimeOk = false;
}
```

Nota: Autoría propia, 2025.

La Figura 73, muestra la recepción de comandos desde el servidor, estos comandos permiten obtener la lectura al momento del consumo de agua potable, activar o desactivar la electroválvula o saber si el nodo esta activo.

Figura 73.

Rececpcion de comandos desde el servidor

```
// Función que se llama automáticamente cuando llega un paquete por LoRa
// Recibe el payload, tamaño, RSSI y SNR
void OnRxDone(uint8_t *payload, uint16_t size, int16_t rssi, int8_t snr) {

    // Copia los datos recibidos al buffer rxpacket
    memcpy(rxpacket, payload, size);

    // Agrega un carácter nulo al final para convertirlo en cadena C
    rxpacket[size] = '\0';

    // Pone la radio en modo Sleep después de recibir
    Radio.Sleep();

    // Convierte el paquete recibido en un String de Arduino
    StrDataIn = String(rxpacket);

    // ------------------------------------------------------
    // Comandos para activar o desactivar la electroválvula
    // ------------------------------------------------------
    // Comando de encendido: si el mensaje coincide, activa el pin y marca envío de datos
    if (StrDataIn == "xxxxxxxxxx_ON")  { digitalWrite(PIN_SALIDA_1, HIGH); BandSendData = true; }

    // Comando de apagado: si el mensaje coincide, desactiva el pin y marca envío de datos
    if (StrDataIn == "xxxxxxxxxx_OFF") { digitalWrite(PIN_SALIDA_1, LOW);  BandSendData = true; }

    // ------------------------------------------------------------
    // Comandos para envío de lecturas de consumo en tiempo actual
    // ------------------------------------------------------------
    // Comando de solicitud de datos: simplemente marca envío de datos
    if (StrDataIn == "xxxxxxxxxx_GET") { BandSendData = true; }

    // ------------------------------------------------
    // Comandos para identificar si el nodo está activo
    // ------------------------------------------------
    // Comando de "ping": responde con un "pong" y guarda en log
    if (StrDataIn == "xxxxxxxxxx_PING") {
        String resp = StrIndx + "_PONG";                    // Crea la respuesta
        appendLog(resp);                                    // Guarda el pong en el log
        resp.toCharArray(txpacket, BUFFER_SIZE);            // Convierte la respuesta a char array
        Radio.Send((uint8_t *)txpacket, strlen(txpacket));  // Envía la respuesta por LoRa
        lora_idle = false;                                  // Marca que la radio está ocupada
        return;                                             // Termina la función
    }

    // Si no fue un ping, se considera que la radio quedó inactiva
    lora_idle = true;
}
```

Nota: Autoría propia, 2025.

4.2.2. Software embebido de Nodo Gateway

La Figura 74, muestra las librerías utilizadas en el código del nodo Gateway. Las cuales fueron para establecer la comunicación LoRa, el núcleo de Arduino, para establecer conexión WiFi, para establecer conexión al bróker MQTT y para almacenar de manera local las lecturas de consumo de agua potable.

Figura 74.

Librerías utilizadas en nodo Gateway

```
#include "LoRaWan_APP.h"
#include "Arduino.h"
#include <WiFi.h>
#include <PubSubClient.h>
#include "FS.h"
#include "SPIFFS.h"
```

Nota: Autoría propia, 2025.

Posteriormente se declaran las credenciales para la conexión a Internet por medio de WiFi, también se definen los tópicos de publicación y suscripción MQTT y se define un ID para la identificación del nodo, la Figura 75, muestra la configuración realizada.

Figura 75.

Credenciales WiFi y parámetros MQTT

```
// Nombre de la red WiFi a la que se conectará el dispositivo
#define WIFI_SSID " "

// Contraseña de la red WiFi
#define WIFI_PASSWORD " "

// Usuario para autenticar la conexión MQTT
#define MQTT_USER "web_iot_cliente"

// Clave o contraseña para el broker MQTT
#define ADAFRUIT_KEY "web1234abcd"

// Dirección del servidor MQTT al que se conectará el dispositivo
#define ADAFRUIT_SERVER "medidor-lora.com"

// Puerto utilizado por el broker MQTT
#define ADAFRUIT_PORT 1883

// Topic MQTT para publicar datos desde Arduino hacia el servidor
#define ADAFRUIT_FEED_Strg   MQTT_USER "/Ard_Strg"

// Topic MQTT para recibir datos desde el servidor hacia Arduino
#define ADAFRUIT_DATA_IN     MQTT_USER "/data_in"

// Identificador único del gateway LoRa utilizado en el sistema
#define GATEWAY_ID "GTW_01"

```

Nota: Autoría propia, 2025.

La configuración para establecer el enlace de comunicación LoRa es exactamente el mismo que se configuro para el nodo sensor. A su vez, en la Figura 76, se muestra la función que permite que el nodo Gateway pueda conectarse a internet mediante WiFi.

Figura 76.

Conexión WiFi

```
// Función que se encarga de conectar el dispositivo a la red WiFi
void setup_wifi() {

    // Inicia la conexión WiFi usando el SSID y la contraseña definidos
    WiFi.begin(WIFI_SSID, WIFI_PASSWORD);

    // Espera hasta que la conexión se establezca
    while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
        delay(500);  // Retardo de medio segundo entre intentos
    }
}

```

Nota: Autoría propia, 2025.

La Figura 77, muestra la configuración para mantener viva la conexión MQTT, y también se verifica si hay comandos pendientes los cuales deben ser procesados.

Figura 77.

Conexión MQTT y envío de comandos por LoRa

```
// Función principal que se ejecuta repetidamente después de setup()
void loop() {

    // Si el cliente MQTT no está conectado, intenta reconectar
    if (!client.connected()) {
        reconnect();
    }

    // Procesa las tareas pendientes del cliente MQTT
    client.loop();

    // Si hay datos para enviar, la radio LoRa está inactiva y la trama tiene contenido
    if (BandSendData && lora_idle && StrTramaSend.length() > 0) {

        // Resetea la bandera de envío de datos para no enviar varias veces
        BandSendData = false;

        // Calcula la longitud de la cadena a enviar
        int str_len = StrTramaSend.length() + 1;

        // Limita la longitud al tamaño máximo del buffer
        if (str_len > BUFFER_SIZE) str_len = BUFFER_SIZE;

        // Convierte la cadena de Arduino a un arreglo de caracteres para LoRa
        StrTramaSend.toCharArray(txpacket, str_len);

        // Envía los datos por LoRa
        Radio.Send((uint8_t *)txpacket, strlen(txpacket));

        // Marca la radio como ocupada mientras se envía
        lora_idle = false;
    }

    // Procesa las interrupciones y eventos de la radio LoRa
    Radio.IrqProcess();
}
```

Nota: Autoría propia, 2025.

La Figura 78, muestra la recepción de paquetes LoRa que llegan desde el nodo sensor, luego se los trata para ser publicados por MQTT hacia el servidor.

Figura 78.

Recepción de paquetes LoRa y publicación MQTT

```
// Función que se ejecuta cuando llega un paquete LoRa
// Recibe el payload, su tamaño, RSSI y SNR
void OnRxDone(uint8_t *payload, uint16_t size, int16_t rssi, int8_t snr) {

    // Si el tamaño excede el buffer, se ajusta para no desbordar
    if (size >= BUFFER_SIZE) size = BUFFER_SIZE - 1;

    // Copia los datos recibidos al buffer rxpacket
    memcpy(rxpacket, payload, size);

    // Agrega un carácter nulo para que rxpacket sea una cadena C
    rxpacket[size] = '\0';

    // Convierte el paquete recibido a String de Arduino
    StrDataLoraIn = String(rxpacket);

    // Parseo del mensaje usando '@' como separador
    String dev_id     = getValue(StrDataLoraIn, '@', 0);  // ID del dispositivo
    String fecha_hora = getValue(StrDataLoraIn, '@', 1);  // Fecha y hora del registro
    String volumen    = getValue(StrDataLoraIn, '@', 2);  // Volumen medido
    String estado     = getValue(StrDataLoraIn, '@', 3);  // Estado del pin/dispositivo

    // Construcción del payload JSON para MQTT
    String jsonPayload = "{";
    jsonPayload += "\"gateway_id\":\"" + String(GATEWAY_ID) + "\",";
    jsonPayload += "\"rssi\":\"" + String(rssi) + "\",";
    jsonPayload += "\"snr\":\"" + String(snr) + "\",";
    jsonPayload += "\"dev_id\":\"" + dev_id + "\",";
    jsonPayload += "\"fecha_hora\":\"" + fecha_hora + "\",";
    jsonPayload += "\"volumen\":\"" + String(volumen) + "\",";
    jsonPayload += "\"estado\":\"" + estado + "\",";
    jsonPayload += "\"raw_payload\":\"" + StrDataLoraIn + "\"";
    jsonPayload += "}";

    // Publica el JSON en el broker MQTT en el topic definido
    mqtt_publish_str(ADAFRUIT_FEED_Strg, jsonPayload);

    // Marca la radio como inactiva para poder recibir nuevos paquetes
    lora_idle = true;

    // Pone la radio en modo recepción nuevamente
    Radio.Rx(0);
}

```

Nota: Autoría propia, 2025.

La Figura 79, muestra la función que permite recibir comandos desde el servidor para posteriormente retransmitirlos al nodo sensor.

Figura 79.

Recepción de comandos desde el servidor

```
// Función que se ejecuta cuando llega un mensaje MQTT al topic suscrito
void callback(char *topic, byte *payload, unsigned int length) {

    // Convierte el payload recibido a un String de Arduino
    String mensaje = "";
    for (unsigned int i = 0; i < length; i++) mensaje += (char)payload[i];

    // Elimina espacios al inicio y final del mensaje
    mensaje.trim();

    // Guarda el mensaje para enviarlo por LoRa
    StrTramaSend = mensaje;

    // Activa la bandera para indicar que hay datos pendientes de enviar por LoRa
    BandSendData = true;
}
```

Nota: Autoría propia, 2025.

La Figura 80, muestra la implementación del almacenamiento local de datos, con el fin de evitar la pérdida de lecturas de consumo recibidas a través del enlace de comunicación LoRa, en situaciones de desconexión o fallos en la conectividad a Internet.

Figura 80.

Montaje de sistema de backup de datos

```
// Ruta del archivo de log en SPIFFS
static const char* LOG_PATH = "/mqtt_consumo_log.txt";

// Tamaño máximo del archivo de log en bytes
static const uint32_t LOG_MAX_BYTES = 200 * 1024; // 200 KB

// Función que inicializa el sistema de archivos SPIFFS
bool initFS() {

    // Intenta montar SPIFFS; true = formatea si falla el montaje
    if (!SPIFFS.begin(true)) {
        Serial.println("[SPIFFS] Error al montar SPIFFS");  // Mensaje de error
        return false;  // Retorna falso si no se puede montar
    }
    Serial.println("[SPIFFS] Montado correctamente");  // Mensaje de éxito

    // Si el archivo de log no existe, se crea
    if (!SPIFFS.exists(LOG_PATH)) {
        File f = SPIFFS.open(LOG_PATH, FILE_WRITE);  // Abre el archivo en modo escritura
        if (f) {
            f.println("==== LOG MQTT CONSUMO (inicio) ====");  // Mensaje inicial en el log
            f.close();  // Cierra el archivo
            Serial.println("[SPIFFS] Archivo de log creado");  // Mensaje de éxito
        } else {
            Serial.println("[SPIFFS] No se pudo crear el archivo de log");  // Mensaje de error
            return false;  // Retorna falso si no se pudo crear
        }
    }

    return true;  // Retorna verdadero si todo salió bien
}
```

Nota: Autoría propia, 2025.

La Figura 81, muestra el reinicio para el sistema de archivos de backup si llegase a superar el tamaño máximo definido, esto evita que el archivo crezca indefinidamente.

Figura 81.

Reinicio del sistema de backup de datos

```
// Función que revisa si el archivo de log excede el tamaño máximo y lo reinicia si es necesario
void rotateLogIfNeeded() {

    // Si el archivo de log no existe, no hace nada
    if (!SPIFFS.exists(LOG_PATH)) return;

    // Abre el archivo de log en modo lectura
    File f = SPIFFS.open(LOG_PATH, FILE_READ);
    if (!f) return;  // Si no se pudo abrir, sale de la función

    // Obtiene el tamaño actual del archivo en bytes
    uint32_t sz = (uint32_t)f.size();
    f.close();  // Cierra el archivo

    // Si el tamaño supera el límite definido
    if (sz >= LOG_MAX_BYTES) {

        // Elimina el archivo de log antiguo
        SPIFFS.remove(LOG_PATH);

        // Crea un nuevo archivo de log
        File nf = SPIFFS.open(LOG_PATH, FILE_WRITE);
        if (nf) {
            // Escribe un mensaje indicando que el log fue reiniciado
            nf.println("==== LOG MQTT CONSUMO (auto-reiniciado por limite) ====");
            nf.close();  // Cierra el archivo
            Serial.println("[SPIFFS] Log consumo auto-reiniciado (supero limite).");
        }
    }
}
```

Nota: Autoría propia, 2025.

La Figura 82, muestra la función encargada de guardar cada registro en el sistema de archivos backup.

Figura 82.

Función para guardar registros

```
// Función que agrega una línea de log (en formato JSON) al archivo de consumo MQTT
void appendConsumoMqttLog(const String& jsonLine) {

    // Revisa si el archivo de log excede el tamaño máximo y lo reinicia si es necesario
    rotateLogIfNeeded();

    // Abre el archivo de log en modo append
    File f = SPIFFS.open(LOG_PATH, FILE_APPEND);

    // Si no se pudo abrir el archivo, imprime error y sale
    if (!f) {
        Serial.println("[SPIFFS] No se pudo abrir el log de consumo para append");
        return;
    }

    // Escribe la línea JSON en el archivo, una lectura por línea
    f.println(jsonLine);

    // Cierra el archivo para asegurar que los datos queden guardados en SPIFFS
    f.close();
}
```

Nota: Autoría propia, 2025.

4.3. Implementación de plataforma del sistema

La plataforma del sistema se realiza mediante el uso de Node-RED como entorno central de integración de componentes del sistema. Esta plataforma permite establecer la comunicación entre los microcontroladores y el bróker de mensajería, gestionar el flujo de datos hacia la base de datos para su almacenamiento, y coordinar el procesamiento de la información recibida.

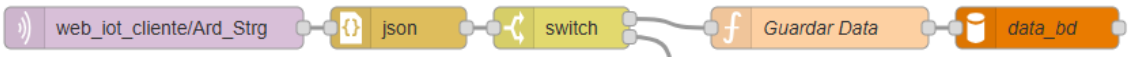
Adicionalmente se integra un dashboard desarrollado con tecnologías web, el cual se conecta a Node-RED para la visualización y monitoreo de los datos, proporcionando una interfaz de gestión eficiente y centralizada para el sistema.

4.3.1. Plataforma de gestión

Se levanta Node-RED como núcleo de integración y control de la arquitectura propuesta, a través de esta plataforma se gestiona la comunicación entre los nodos del sistema. La Figura 83, muestra la conexión con el nodo MQTT IN, el cual permite la conexión al bróker de mensajería y al tópico de suscripción mediante el cual se recibirán los datos que envíe el nodo Gateway para posteriormente almacenarlos en la base de datos del sistema.

Figura 83.

Nodo MQTT IN



Nota: Autoría propia, 2025.

La Figura 84, muestra la conexión al nodo MQTT OUT, este nodo también permite la conexión al bróker y al tópico de publicación, en el cual se publicarán las peticiones del servidor hacia los nodos, ya sea para pedir lecturas de consumo, apertura o cierre de electroválvula, o monitorear el estado de conectividad de los nodos.

Figura 84.

Nodo MQTT OUT

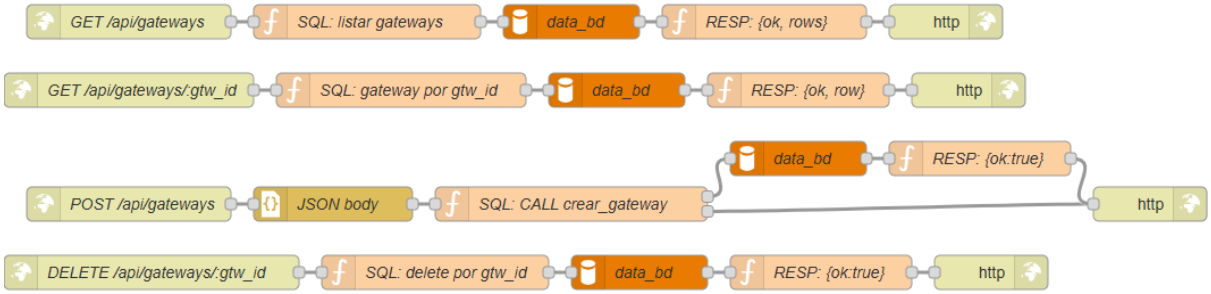


Nota: Autoría propia, 2025.

Node-RED también se usa para la conexión entre el backend y el frontend del sistema, como una capa intermedia de servicios basada en APIs, para esto se hizo uso de nodos HTTP IN y HTTP Response para la exposición de endpoints que permitan la interacción con la interfaz web mediante métodos GET, POST y DELETE como se muestra en la Figura 85, para facilitar la consulta, registro y gestión de la información.

Figura 85.

Integración entre el backend y frontend



Nota: Autoría propia, 2025.

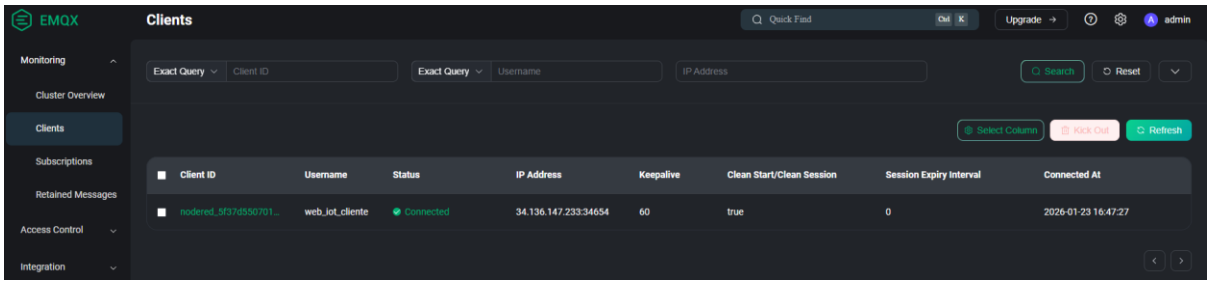
4.3.2. Broker de comunicación

Para la comunicación entre los nodos del sistema y la plataforma de gestión se empleó EMQX como bróker de mensajería, este bróker implementa el protocolo MQTT bajo un modelo de comunicación publicador – suscriptor.

La Figura 86, muestra la creación del cliente MQTT, esto permite la conexión y acceso al bróker para el intercambio de información tanto desde el nodo Gateway como desde la plataforma de gestión.

Figura 86.

Creación de cliente MQTT

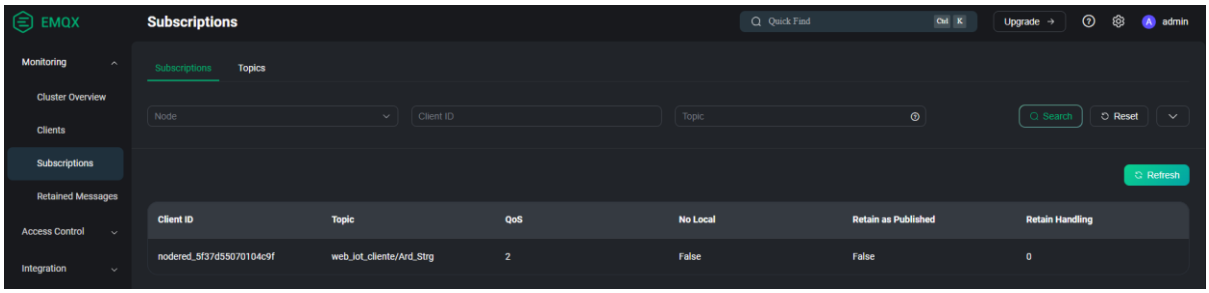


Nota: Autoría propia, 2025.

Posteriormente, se crea el tópico de publicación mediante el cual el nodo Gateway publica las lecturas de consumo de agua potable. La Figura 87, muestra el tópico configurado en el bróker MQTT para la transmisión de dichos datos.

Figura 87.

Tópico de publicación

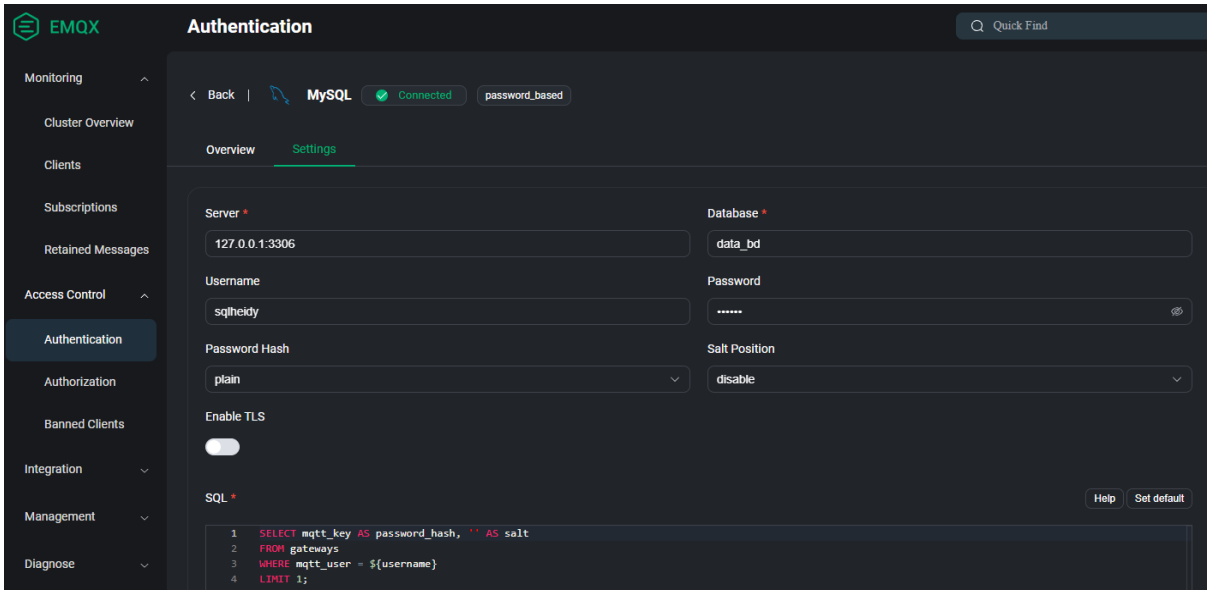


Nota: Autoría propia, 2025.

Se implementa a su vez un mecanismo de autenticación basado en base de datos, de este modo el acceso de los nodos al servicio MQTT está controlado por credenciales registradas previamente. Cada vez que un nodo Gateway intenten establecer conexión, el bróker validará el usuario y la contraseña consultando en la base de datos. Si la validación es satisfactoria se permite la conexión y la posterior suscripción a los tópicos. La Figura 88, muestra la configuración para el mecanismo de autentificación mediante base de datos.

Figura 88.

Vinculación de MySQL en bróker de comunicación



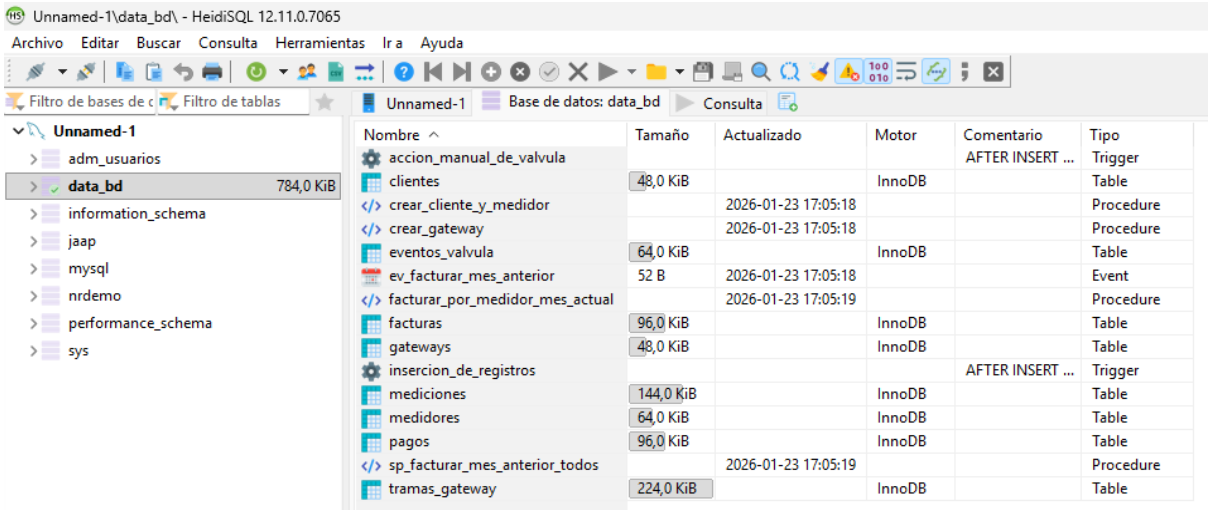
Nota: Autoría propia, 2025.

4.3.3. Almacenamiento de datos

Para el almacenamiento de la información se integra una base de datos MySQL, la Figura 89, muestra la base de datos en la cual podemos encontrar tablas como clientes, medidores, gateways, mediciones, facturas, pagos y tramas_gateways, las cuales permiten organizar los datos de identificación, adquisición de mediciones y gestión administrativa.

Figura 89.

Almacenamiento de datos



Nota: Autoría propia, 2025.

Para automatizar procesos como la creación de clientes, medidores, registro de Gateways y procesos de facturación se emplearon procedimientos almacenados, así como triggers y eventos programados que permiten ejecutar acciones automáticas tras la inserción de datos o en intervalos de tiempo definidos.

4.3.4. Dashboard de monitoreo y control de datos

El dashboard del sistema fue desarrollado utilizando tecnologías web, con el fin de proporcionar una interfaz gráfica intuitiva y funcional para la gestión y monitoreo de la información.

La Figura 90, muestra que a través de código HTML se estructura el contenido y los elementos visuales de la interfaz del panel de Administrar Medidores.

Figura 90.

Contenido HTML del dashboard

```html
<!doctype html>
<html lang="es">
<head>
  <!-- ================ META & CONFIGURACIÓN BÁSICA ================ -->
  <meta charset="utf-8" />
  <meta name="viewport" content="width=device-width,initial-scale=1" />
  <title>Administrar Medidores</title>

  <!-- ================ ICONO DEL SITIO ================ -->
  <link rel="icon" href="/mtz/icono.png" type="image/png">

  <!-- ================ ESTILOS ================ -->
  <link rel="stylesheet" href="css/admMed.css">

  <!-- ================ PROTECCIÓN / CONTROL DE ACCESO ================ -->
  <script src="js/protect.js" defer></script>
  <script>
    // Al cargar el DOM se valida el acceso a este módulo
   window.addEventListener("DOMContentLoaded", () => {
      protect("admMed");
    });
  </script>
</head>
```

Nota: Autoría propia, 2025.

La Figura 91, muestra el código CSS utilizado para el diseño y la presentación visual del panel para Administrar Medidores, garantizando una disposición clara y ordenada de la información.

Figura 91.

Contenido CSS del dashboard

```css
/* ========================================================
   IMPORTACIÓN DE FUENTE
   Se importa la fuente Montserrat desde Google Fonts
   con varios pesos para mayor flexibilidad visual
   ======================================================== */
@import url('https://fonts.googleapis.com/css2?family=Montserrat:wght@400;500;600;700;800&display=swap');


/* ========================================================
   RESET BÁSICO Y CONFIGURACIÓN GLOBAL
   - box-sizing uniforme
   - fuente principal aplicada a todo el documento
   ======================================================== */
*, *::before, *::after{
  box-sizing: border-box;
  font-family: 'Montserrat',
               system-ui,
               -apple-system,
               BlinkMacSystemFont,
               'Segoe UI',
               sans-serif;
}


/* ========================================================
   APP BASE
   Contenedor principal de la aplicación
   ======================================================== */
#app{
  min-height: 100vh;
  background: #f1f5f9;
}


/* ========================================================
   CONTENEDOR DE PÁGINA
   Área donde vive el contenido principal
   ======================================================== */
.page{
  min-height: 100vh;
  display: flex;
  flex-direction: column;
  padding-left: 74px;
}


/* ========================================================
   TOPBAR / BARRA SUPERIOR
   Barra fija superior con título y acciones
   ======================================================== */
.topbar{
  position: sticky;
  top: 0;
  z-index: 50;

  display: flex;
  align-items: center;
  justify-content: space-between;
  gap: 12px;

  padding: 18px 22px;
  background: rgb(11, 18, 32);
  border-radius: 15px;
  margin-bottom: 5px;
}
```

Nota: Autoría propia, 2025.

Para la interacción dinámica con la plataforma se implementa JavaScript, la Figura 92, muestra el código que permite la interacción desde el frontend hacia el backend.

Figura 92.

Contenido JavaScript del dashboard

```javascript
/* ========================================================
   CONFIGURACIÓN GENERAL
   ======================================================== */
const NR_BASE = "http://medidor-lora.com:1880";
const token = () => localStorage.getItem("token") || "";

const HOME_PAGE_MAP = {
  home: "home.html",
  histCons: "histCons.html",
  admFact: "admFact.html",
  admGate: "admGate.html",
  admCli: "admCli.html",
  admMed: "admMed.html",
  admPerf: "admPerf.html",
  monDisp: "monDisp.html"
};


/* ========================================================
   ELEMENTOS BASE DE LA INTERFAZ (SIDEBAR / TOPBAR)
   ======================================================== */
const elWho = document.getElementById("who");
const btnLogout = document.getElementById("btnLogout");
const btnLogoutSide = document.getElementById("btnLogoutSide");
const btnRefresh = document.getElementById("btnRefresh");


/* ========================================================
   ELEMENTOS DE LA INTERFAZ - ADMINISTRAR MEDIDORES
   ======================================================== */
const inpSearch = document.getElementById("searchKey");
const btnSearch = document.getElementById("btnSearch");

const btnClear = document.getElementById("btnClear");
const btnEliminar = document.getElementById("btnEliminar");
const btnToggleEstado = document.getElementById("btnToggleEstado");

const msgBox = document.getElementById("msgBox");

const medidoresBody = document.getElementById("medidoresBody");


/* ========================================================
   CONTENEDOR DE INFORMACIÓN DEL CLIENTE
   (Soporta múltiples IDs posibles)
   ======================================================== */
const clienteBox =
  document.getElementById("clienteBox") ||
  document.getElementById("clienteInfo") ||
  document.getElementById("clienteCard") ||
  null;
```

Nota: Autoría propia, 2025.

4.4. Instalación de nodos

La instalación de los nodos Sensor y Gateway se realizó en las coordenadas previamente definidas en la Tabla 31 del Capítulo III, con el fin de adquirir datos en campo y garantizar su transmisión hacia el nodo Gateway.

Previo a la ejecución de esta fase, se solicitó un certificado de autorización por parte de la Junta Administradora de Agua Potable de la Comunidad, mediante el cual se conceda un permiso formal para la implementación del presente trabajo de grado dentro de la comunidad.

El documento que respalda esta autorización se presenta en el **Anexo 9:** *Certificado de autorización para la instalación del prototipo del sistema de medición y transmisión inalámbrica del consumo de agua potable en la Comuna San Luis de la Carbonería*.

4.4.1. Instalación del Nodo Sensor

La instalación de los nodos sensores C1 y C2 se realiza próxima al medidor mecánico de cada vivienda, con el fin de contrastar las mediciones obtenidas del sistema propuesto con las del medidor tradicional.

La Figura 93, muestra la instalación del nodo sensor C1. En este caso debido a que la instalación de agua potable principal se encuentra enterrada y a su vez presenta ramificaciones en la tubería, se optó por adaptar el sistema de tuberías del nodo sensor. Esto con el fin de minimizar cualquier intervención sobre la instalación original de la vivienda, atendiendo además la preferencia de los propietarios de evitar modificaciones en la tubería principal.

Figura 93.

Instalación del Nodo Sensor C1



Nota: Autoría propia, 2025.

La Figura 94, muestra la instalación del nodo sensor C2. Al igual que con la instalación del nodo sensor C1, este nodo también se instaló próximo al medidor mecánico, y se trató de minimizar cualquier intervención sobre la instalación original de la vivienda.

Figura 94.

Instalación del Nodo Sensor C2



Nota: Autoría propia, 2025.

La Figura 95, muestra la instalación de la celda fotovoltaica, fuente de alimentación del nodo sensor C2. Debido a que el medidor se encuentra ubicado a una distancia considerable de la vivienda, se optó por instalarlo cerca de este y del nodo sensor.

Figura 95.

Instalación de la celda fotovoltaica



Nota: Autoría propia, 2025.

4.4.2. Instalación del Nodo Gateway

El nodo Gateway se instala en la casa comunal, a una altura aproximada de cinco metros, con el fin de optimizar la recepción de datos provenientes de los nodos sensores. Adicionalmente, se aprovecha la conectividad a Internet disponible del lugar, al cual se conecta el Gateway, permitiendo subir la información al servidor y poderla visualizar a través del dashboard del sistema.

Figura 96.

Instalación del nodo Gateway



Nota: Autoría propia, 2025.

4.5. Pruebas de funcionamiento del sistema

Para validar el funcionamiento del sistema, se realizan distintas pruebas experimentales orientadas a evaluar el desempeño individual de cada nodo, así como el funcionamiento integral del sistema propuesto. En la Tabla 38, se presenta el esquema de pruebas ejecutadas durante esta etapa de evaluación.

Tabla 38.

Esquema de pruebas realizadas

Test de prueba	Descripción	Resultado Esperado
Test 1: Pruebas de comunicación inalámbrica	Se verifica la inicialización de la comunicación inalámbrica para el intercambio de información entre nodos.	Se visualiza el uso y alcance de la comunicación LoRa.
Test 2: Pruebas de funcionamiento de Nodo Sensor	Se evalúa la precisión del sensor de flujo, envío programado de datos y el envío de datos mediante peticiones del servidor.	Se obtiene el margen de error del sensor de flujo, se verifica la visualización del envío programado de datos y la respuesta a las peticiones del servidor.
Test 3: Pruebas de funcionamiento de Nodo Gateway	Se inicializan las configuraciones para el acceso a internet y conexión al servicio MQTT, se comprueba la recepción de datos provenientes del nodo sensor, la publicación de datos hacia la plataforma, la recepción de peticiones del servidor y el envió de estas al nodo sensor.	Establecimiento de conexión a internet y MQTT, obtención y publicación de datos, recepción y envío de peticiones desde el servidor hacia el nodo sensor.
Test 4: Pruebas de funcionamiento de Plataforma web	Se verifica el inicio de sesión a la plataforma, visualización de datos y administración de clientes.	Inicio de sesión para personal autorizado, visualización de datos procesados y gráficas, ingreso y listado de usuarios.
Test 5: Pruebas de facturación	Se verifica la generación automática de facturas mensuales.	El sistema genera las facturas de manera mensual, reflejando el consumo y monto correspondiente de cada usuario.
Test 6: Pruebas de control en actuador	Se evalúa el corte y reconexión del servicio de agua potable.	Se verifica el correcto accionamiento de la electroválvula.
Test 7: Pruebas de rendimiento para la fuente de alimentación del nodo sensor	Se evalúa el tiempo de autonomía que proporciona la fuente de alimentación del nodo sensor.	Se establece el tiempo de operación del nodo sensor sin el aporte de la celda fotovoltaica.

Nota: Elaborado por propio autor, 2025.

4.5.1. Pruebas de comunicación inalámbrica

Con el propósito de validar el desempeño del sistema de comunicación inalámbrica, se realizaron pruebas experimentales centradas en la evaluación del enlace LoRa entre el nodo sensor y el nodo gateway.

La evaluación inició validando la operación del sistema en la banda de frecuencias LoRa definida en la normativa vigente. Posteriormente, se llevó a cabo el análisis de métricas asociadas a la calidad de señal, la confiabilidad en la entrega de datos y el desempeño temporal del enlace, incluyendo RSSI, SNR, Packet Delivery Ratio (PDR), pérdida de paquetes, latencia de ida y vuelta (Round-Trip Time, RTT) y el tiempo de respuesta del receptor. Esta aproximación permite analizar el comportamiento del sistema en condiciones de cobertura progresivamente más exigentes, manteniendo una configuración operativa fija y representativa del escenario real de despliegue.

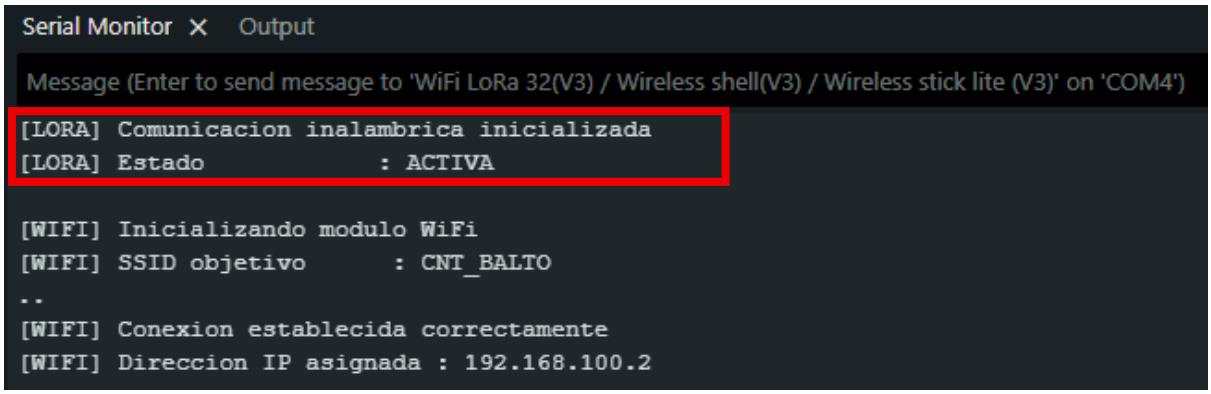
4.5.1.1. Configuración e inicialización del enlace de comunicación

La validación experimental se realizó con dos placas Heltec ESP32 LoRa V3, configuradas como nodo sensor y nodo gateway, operando en la banda ISM de 915 MHz. Para la evaluación, se eligió un spreading factor SF9 y una potencia de transmisión de 14 dBm, buscando explorar un equilibrio entre robustez del enlace, tolerancia a pérdidas de señal y latencia, además de analizar la estabilidad del enlace bajo condiciones realistas de operación.

Para la inicialización y monitoreo del enlace se empleó el IDE de Arduino, el cual permite observar la activación del enlace inalámbrico y el intercambio de datos entre el nodo sensor y el nodo Gateway, a través del monitor serial. La Figura 97, muestra la inicialización del enlace de comunicación inalámbrica el cual permite el intercambio de información entre el nodo Sensor y el nodo Gateway.

Figura 97.

Inicialización de comunicación inalámbrica



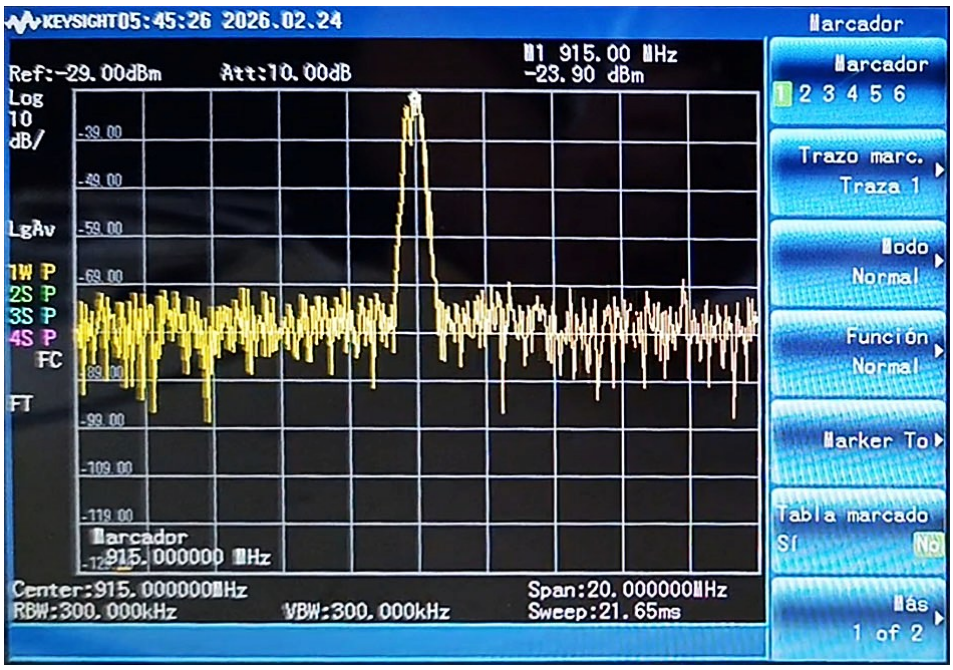
Nota: Autoría propia, 2025.

4.5.1.2. Verificación de la frecuencia de operación

El analizador de espectro Keysight, modelo N9322C, permite visualizar la frecuencia de operación de los microcontroladores empleados en cada uno de los nodos del sistema. La Figura 98 muestra que la señal transmitida opera en la banda de 915 MHz, evidenciando que el sistema hace uso de la frecuencia establecida para la comunicación LoRa.

Figura 98.

Frecuencia de operación LoRa del sistema

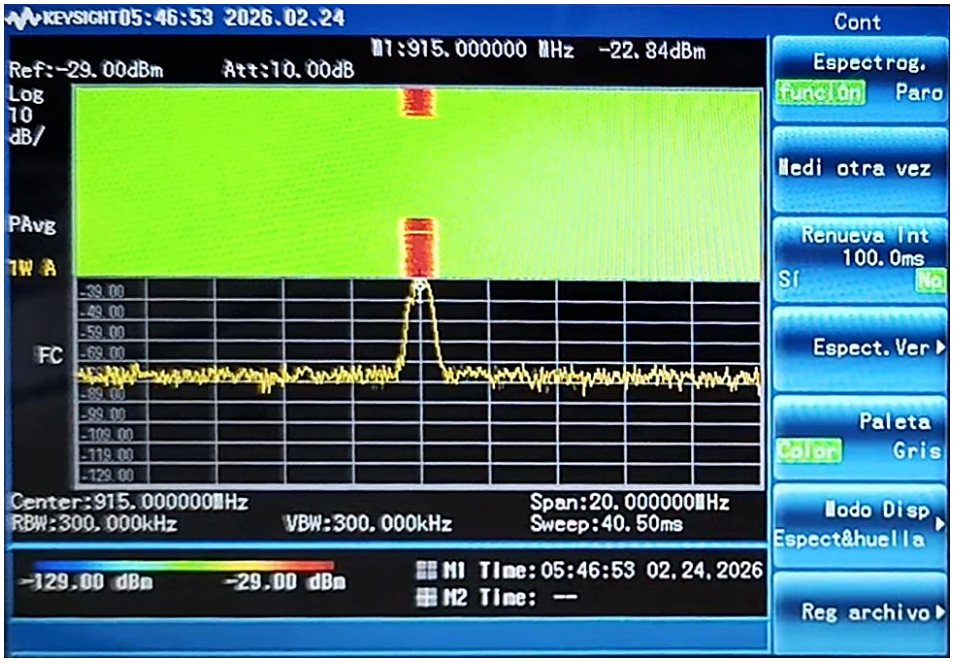


Nota: Autoría propia, 2025.

En la Figura 99 se observa el muestreo del espectro junto con el mapa de calor, donde las zonas resaltadas en color rojo corresponden a los paquetes LoRa transmitidos dentro de la banda de 915 MHz.

Figura 99.

Mapa de calor y espectro de la señal LoRa del sistema



Nota: Autoría propia, 2025.

4.5.1.3. Pruebas de cobertura

Una vez verificada la frecuencia de operación del sistema, se realizaron pruebas de cobertura para analizar el comportamiento del enlace en función de la distancia, con el objetivo de estimar el alcance efectivo y la estabilidad de la comunicación.

Para evaluar el enlace, se empleó un conjunto de métricas, seleccionadas para describir tanto la calidad de señal como la confiabilidad y el comportamiento temporal de la comunicación. A continuación, se presentan las métricas utilizadas para describir de manera clara cómo se evaluó el desempeño del sistema:

- **RSSI:** mide la potencia de la señal recibida en dBm y permite evaluar la intensidad del enlace inalámbrico.

- **SNR:** indica la relación entre la señal y el ruido en dB y permite identificar la calidad del enlace frente a interferencias, se calcula mediante la Ecuación 14.

Ecuación 14.

Relación señal a ruido

$$SNR = P_{señal} - P_{ruido}$$

- **Tasa de entrega de paquetes:** representa la proporción de paquetes correctamente recibidos respecto a los transmitidos, se calcula mediante la Ecuación 15.

Ecuación 15.

Tasa de entrega de paquetes

$$PDR\ (\%) = \frac{Paquetes\ recibidos}{Paquetes\ transmitidos} * 100$$

- **Pérdida de paquetes:** indica el porcentaje de paquetes que no llegaron a su destino, se calcula mediante la Ecuación 16.

Ecuación 16.

Pérdida de paquetes

$$PLR\ (\%) = \frac{Paquetes\ transmitidos - Paquetes\ recibidos}{Paquetes\ transmitidos} * 100$$

- **RTT:** mide el tiempo que tarda un paquete en ir desde el nodo origen hasta el destino y regresar, permitiendo evaluar la eficiencia de la red, se calcula mediante la Ecuación 17.

Ecuación 17.

Latencia de ida y vuelta

$$RTT = t_{respuesta} - t_{envío}$$

- **Tiempo de respuesta:** indica el intervalo entre la solicitud de un servicio y la recepción de la respuesta, reflejando la rapidez de la red, se calcula mediante la Ecuación 18.

Ecuación 18.

Tiempo de respuesta

$$\boldsymbol{Tiempo\ de\ respuesta = t_{recepción} - t_{inicio\ de\ solicitud}}$$

Se evaluaron seis distancias entre el nodo Sensor y el nodo Gateway: 200m, 400m, 600m, 800m, 1km y 1,2km; en el **Anexo 10:** *Pruebas de cobertura de comunicación inalámbrica (LoRA)* se presentan evidencias de algunas de las distancias evaluadas. Para cada distancia se realizaron cinco repeticiones independientes, transmitiendo 200 paquetes en cada repetición. De esta manera, cada distancia quedó representada por 1000 paquetes, y el análisis completo comprendió un total de 6000 paquetes. Los resultados de las métricas evaluadas se presentan en la Tabla 39.

Tabla 39.

Desempeño del enlace LoRa (SF9, 14 dBm) a diferentes distancias

Distancia	Paquetes enviados	ACK correctos	Paquetes perdidos	PDR (%)	PLR (%)	RSSI promedio (dBm)	RSSI mínimo (dBm)	RSSI máximo (dBm)	SNR promedio (dB)	SNR mínimo (dB)	SNR máximo (dB)
200m	1000	1000	0	100.00	0,00	-90,07	-107,00	-82,00	10,13	3,00	12,00
400m	1000	955	45	95,50	4,50	-99,11	-116,00	-81,00	4,18	-8,00	11,00
600m	1000	893	107	89,30	10,70	-107,98	-121,00	-92,00	-0,12	-12,00	7,00
800m	1000	735	265	73,50	26,50	-108,64	-112,00	-103,00	0,46	-9,00	7,00
1000m	1000	848	152	84,80	15,20	-111,10	-112,00	-109,00	-11,23	-16,00	-8,00
1200m	1000	500	500	50,00	50,00	-111,26	-116,00	-110,00	-11,70	-20,00	-6,00

Nota: Elaborado por propio autor, 2025.

La Tabla 39 muestra que a 200m, el enlace presentó un desempeño óptimo, con un PDR del 100% y condiciones de señal favorables, evidenciando una operación robusta y estable, a 400m, se mantuvo una alta confiabilidad (PDR > 95%), aunque con reducción del margen radioeléctrico y ligera variabilidad entre bloques, en 600m, el enlace continuó siendo funcional (PDR ≈ 89 %), pero con una degradación progresiva del RSSI y del SNR, reflejando una

disminución del margen operativo, a 800m y 1km, el enlace permaneció operativo (PDR entre ~73% y 85%), aunque con mayor variabilidad, lo que indica la influencia de factores de propagación del entorno. Finalmente, a 1.2km, el sistema operó cercano a su límite práctico, con un PDR del 50% y condiciones de señal desfavorables.

El desempeño temporal del enlace se evaluó mediante dos métricas: la latencia de ida y vuelta (RTT), definida como el tiempo entre el envío de un paquete y la recepción de su ACK, y el tiempo de respuesta del receptor, correspondiente al intervalo necesario para que el Gateway genere dicha confirmación tras recibir un paquete válido. En conjunto, estas métricas permiten diferenciar entre el retardo total del proceso de comunicación y el tiempo asociado al procesamiento en el receptor. Los resultados de las métricas evaluadas se presentan en la Tabla 40.

Tabla 40.

Desempeño temporal del enlace de comunicación del sistema

Distancia	RTT promedio (ms)	RTT mínima (ms)	RTT máxima (ms)	Incremento de RTT respecto a 200m (ms)	Incremento relativo (%)	Tiempo de respuesta medio del receptor (ms)
200m	459,86	421	483	0,00	0,00	2,15
400m	460,82	436	467	0,96	0,21	2,14
600m	472,02	445	489	12,16	2,64	2,27
800m	464,81	455	483	4,95	1,08	2,15
1000m	478,79	474	484	18,93	4,12	2,17
1200m	480,31	461	483	20,45	4,45	2,25

Nota: Elaborado por propio autor, 2025.

La Tabla 40 muestra que a 200m, el RTT medio fue de 459.86 ms, constituyendo la referencia de mejor desempeño, a 400m, la latencia aumentó ligeramente a 460.82ms, a 600m, el RTT ascendió a 472.02ms, reflejando un primer incremento apreciable asociado a menor margen de enlace, a 800m, la latencia fue de 464.81ms, evidenciando que la evolución temporal no sigue una progresión estricta con la distancia debido a la variabilidad del canal. Finalmente,

a 1km y 1.2km, el RTT alcanzó 478.79ms y 480.31ms respectivamente, permaneciendo relativamente contenido pese a la degradación de la confiabilidad del enlace. Por otro lado, el tiempo de respuesta del receptor se mantuvo estable entre 2.14 ms y 2.27 ms en todos los escenarios, indicando que la mayor parte del retardo se debe al enlace inalámbrico y no al procesamiento del Gateway.

La Tabla 41 presenta la estabilidad temporal del enlace mediante el análisis del RTT promedio calculado a partir de los cinco bloques de 200 paquetes transmitidos en cada escenario de distancia. Estos datos permiten evaluar cómo la latencia se comporta a medida que aumenta la separación entre nodos.

Tabla 41.

Análisis de estabilidad del RTT en bloques de transmisión

Distancia	Media de RTT por bloque (ms)	Desviación estándar entre bloques (ms)	RTT mínimo de bloque (ms)	RTT máximo de bloque (ms)	Rango (ms)	Coeficiente de variación (%)
200m	459,86	0,55	458,95	460,43	1,48	0,12
400m	460,91	2,27	458,84	464,14	5,30	0,49
600m	472,36	6,67	465,30	481,45	16,15	1,41
800m	463,80	4,55	458,67	468,82	10,15	0,98
1000m	478,74	0,55	478,03	479,39	1,36	0,11
1200m	480,26	0,56	479,60	480,87	1,27	0,12

Nota: Elaborado por propio autor, 2025.

La Tabla 41 indica que, a 200m, el enlace mostró alta estabilidad temporal, con desviación estándar entre bloques de solo 0.55ms y coeficiente de variación de 0.12%, mientras que en 400m la dispersión aumentó ligeramente a 2.27ms sin afectar significativamente la latencia media. A 600m se observó la mayor variabilidad, con desviación estándar de 6.67ms y rango de 16.15ms, reflejando la sensibilidad del enlace a las condiciones del canal. En 800m la dispersión entre bloques se mantuvo elevada, mientras que a 1 km y 1.2 km la variabilidad fue baja, indicando que los paquetes confirmados siguieron un patrón temporal uniforme.

En general, la latencia media aumentó moderadamente con la distancia, mientras que el tiempo de respuesta del receptor permaneció constante, evidenciando que el enlace mantiene estabilidad temporal incluso en condiciones de menor margen radioeléctrico.

Por otra parte, con el fin evaluar el efecto de la seguridad criptográfica sobre el enlace LoRa, se realizaron pruebas de cobertura empleando cifrado AES-128 GCM, manteniendo la configuración de comunicación en SF9 y 14 dBm. Para cada escenario se transmitieron 1000 paquetes, y se analizaron las métricas de confiabilidad, calidad de señal y desempeño temporal.

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 42, la cual muestra que el enlace cifrado mantuvo operación funcional en las distancias evaluadas, aunque con una degradación progresiva de la confiabilidad a medida que aumentó la separación entre nodos.

Tabla 42.

Desempeño del enlace LoRa (SF9, 14 dBm) a diferentes distancias con AES-128 GCM

Distancia	Paquetes enviados	ACK correctos	Paquetes perdidos	PDR (%)	PLR (%)	RSSI promedio (dBm)	SNR promedio (dB)	RTT promedio (ms)	Tiempo de respuesta medio del receptor (ms)
200m	1000	954	46	95,40	4,60	-107,83	4,77	724,80	2,49
600m	1000	910	90	91,00	9,00	-113,43	-3,17	726,97	2,48
1000m	1000	673	327	67,30	32,70	-115,02	-10,04	726,49	2,43

Nota: Elaborado por propio autor, 2025.

Desde el punto de vista temporal, el enlace con cifrado presenta un incremento claro en la latencia respecto al sistema sin protección criptográfica. La Tabla 43 presenta el impacto de la criptografía mediante la comparación directa entre el enlace sin cifrado y el enlace cifrado con AES-128 GCM.

Tabla 43.

Comparativa del desempeño del enlace LoRa sin cifrado y con AES-128 GCM

Distancia	Modo	PDR (%)	PLR (%)	RSSI promedio (dBm)	SNR promedio (dB)	RTT promedio (ms)	Tiempo de respuesta medio del receptor (ms)
200m	Sin cifrado	100,00	0,00	-90,07	10,13	459,86	2,15
200m	AES-128 GCM	95,40	4,60	-107,83	4,77	724,80	2,49
600m	Sin cifrado	89,30	10,70	-107,98	-0,12	472,02	2,27
600m	AES-128 GCM	91,00	9,00	-113,43	-3,17	726,97	2,48
1000m	Sin cifrado	84,80	15,20	-111.10	-11,23	478,79	2,17
1000m	AES-128 GCM	67,30	32,70	-115,02	-10,04	726,49	2,43

Nota: Elaborado por propio autor, 2025.

En general, los resultados muestran que la incorporación de AES-128 GCM introduce un costo medible sobre el desempeño del enlace, principalmente en la latencia y, en menor grado, en la confiabilidad de entrega en escenarios de mayor distancia. No obstante, el sistema conserva operación funcional en distancias medias y demuestra que la incorporación de seguridad criptográfica puede implementarse sobre dispositivos LoRa de recursos limitados sin comprometer por completo la viabilidad del enlace para aplicaciones de monitoreo y transmisión de datos.

4.5.2. Pruebas de funcionamiento de Nodo Sensor

Para determinar que las lecturas del sensor de flujo sean consistentes con las del medidor mecánico utilizado en la comunidad, se evalúa la precisión del sensor con el fin de determinar un margen de error aceptable.

Para ello, se realizan mediciones aplicando distintos rangos de caudal sobre un volumen constante de 10 litros. La Tabla 44, presenta los valores obtenidos en las mediciones y el margen de error correspondiente en las lecturas. El **Anexo 11:** *Mediciones experimentales del sensor de flujo a diferentes caudales*, muestra los valores de las mediciones tomadas con el sensor de flujo implementado en el nodo Sensor.

Tabla 44.

Comparativa de mediciones entre sensor de flujo y medidor mecánico

Rango de caudal	Sensor de Flujo (l)	Medidor Mecánico (l)	Margen de error (%)
Bajo	10,03	10	0,3
	10,03	10	0,3
	10,01	10	0,1
	10,02	10	0,2
	9,98	10	-0,2
	10,04	10	0,4
	9,95	10	-0,5
	9,97	10	-0,3
	10,03	10	0,3
	9,96	10	-0,4

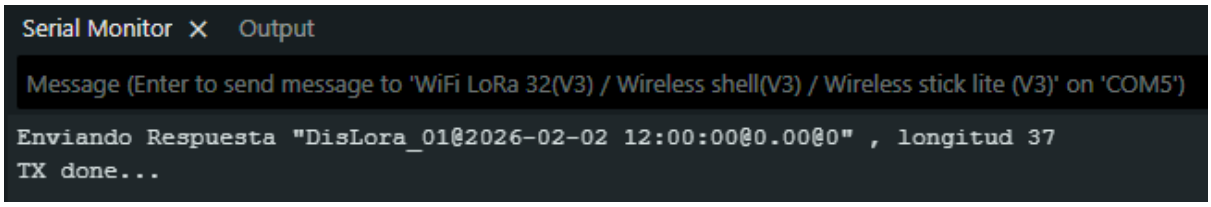
Medio	10,05	10	0,5
	10,01	10	0,1
	10,02	10	0,2
	10,03	10	0,3
	9,97	10	-0,3
	10,04	10	0,4
	9,95	10	-0,5
	10,03	10	0,3
	9,98	10	-0,2
	10,01	10	0,1
Alto	9,95	10	-0,5
	9,96	10	-0,4
	10,02	10	0,2
	10,03	10	0,3
	9,98	10	-0,2
	10,05	10	0,5
	9,97	10	-0,3
	10,01	10	0,1
	10,03	10	0,3
	9,96	10	-0,4

Nota: Elaborado por propio autor, 2025.

La Figura 100, muestra el envío programado de datos, este envió programado se lo realiza mediante el módulo RTC donde se establece un horario de envío y al cumplirse dicho horario el nodo Sensor procede a enviar de manera automática las mediciones del consumo de agua hasta ese momento.

Figura 100.

Envío programado de datos

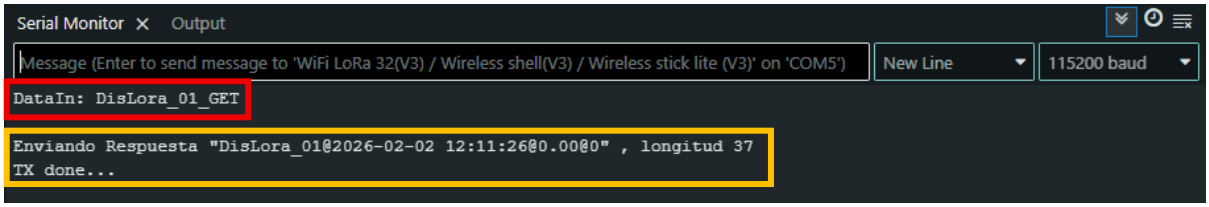


Nota: Autoría propia, 2025.

La Figura 101 muestra que, al recibir una petición desde el servidor, el sistema genera una respuesta inmediata. En este caso, el servidor solicita el valor de consumo acumulado de agua potable hasta el momento, y el nodo Sensor responde enviando dicha información.

Figura 101.

Petición recibida desde el servidor



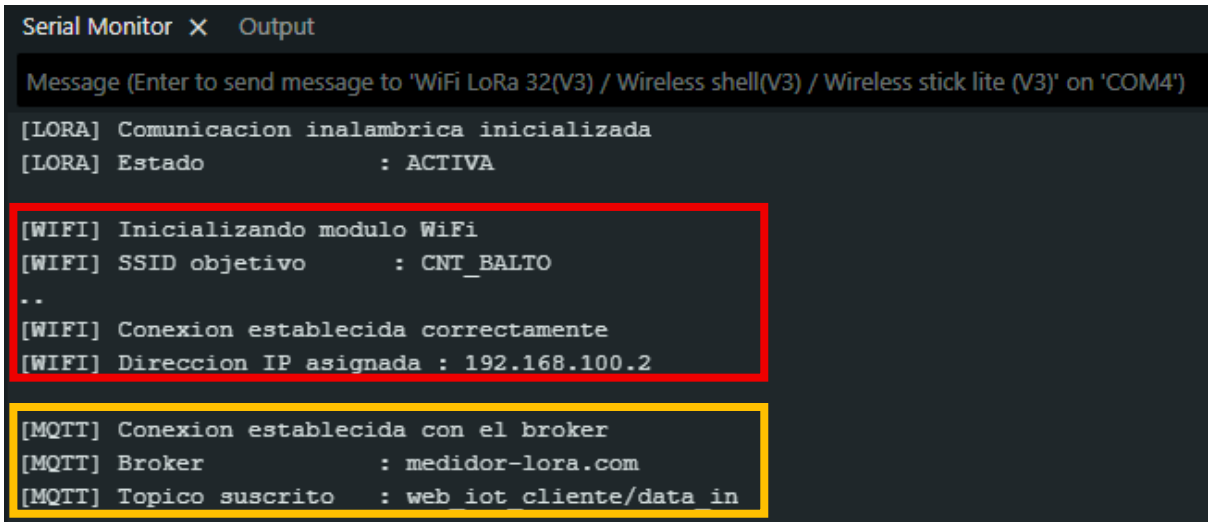
Nota: Autoría propia, 2025.

4.5.3. Pruebas de funcionamiento de Nodo Gateway

Mediante el monitor serial del IDE de Arduino se puede verificar el establecimiento de conexión a Internet y al broker MQTT, así como la suscripción al tópico para la publicación de la información que el nodo Gateway realiza al momento de iniciarse. En la Figura 102, se muestra el proceso de establecimiento de conexión que realiza el nodo Gateway al momento de su inicialización.

Figura 102.

Establecimiento de conexión a Internet y a servicio MQTT

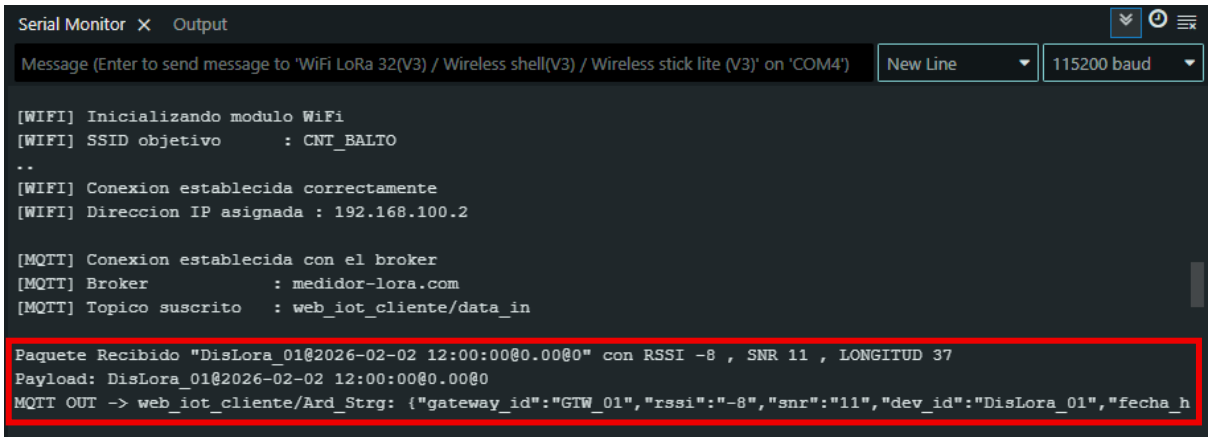


Nota: Autoría propia, 2025.

Una vez que el nodo Sensor envía la información, el nodo Gateway la recibe y posteriormente la publica en el tópico al cual se suscribió durante su inicialización. En la Figura 103, se muestra el proceso de recepción y posterior publicación de los datos.

Figura 103.

Recepción y publicación de datos

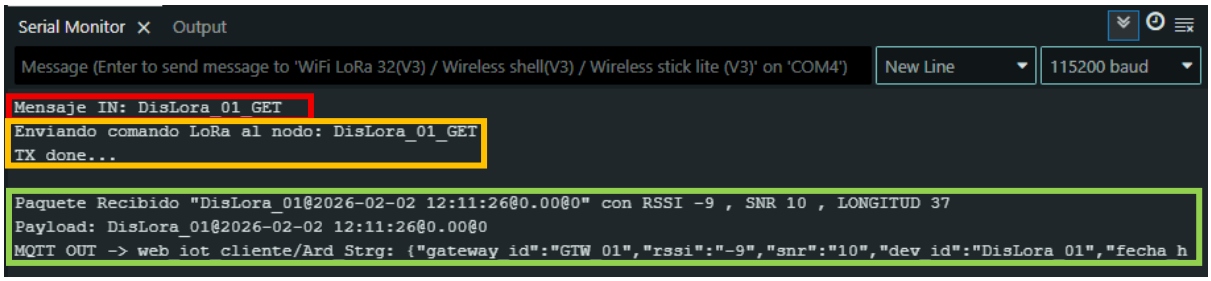


Nota: Autoría propia, 2025.

El nodo Gateway también permanece a la espera de solicitudes provenientes del servidor. Cuando se genera una petición, esta es recibida a través del protocolo MQTT y posteriormente retransmitida mediante el enlace de comunicación LoRa hacia el nodo Sensor, la Figura 104 se muestra el proceso de recepción y envío de dichas solicitudes.

Figura 104.

Recepción de solicitudes, retransmisión LoRa y publicación de respuesta



Nota: Autoría propia, 2025.

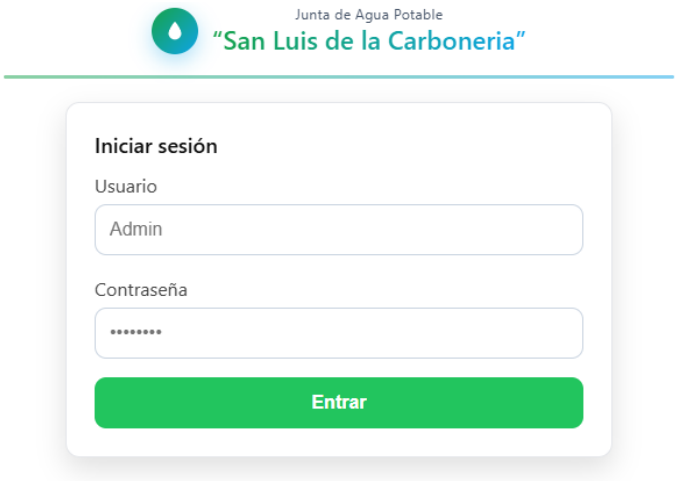
4.5.4. Pruebas de funcionamiento de Plataforma web

Este apartado presenta las pruebas de funcionamiento de la plataforma web, cuyo propósito es validar la correcta operación de los módulos que conforman el sistema de administración y gestión. Se verifica que únicamente el personal autorizado tenga acceso al dashboard de administración, además del adecuado funcionamiento del sistema de roles, el cual restringe el acceso a determinados paneles según el perfil del usuario. Así mismo, se evalúa la correcta visualización de los datos procesados y de las gráficas de consumo de agua potable, el accionamiento remoto de la electroválvula para la gestión de corte y reconexión del servicio, el funcionamiento del sistema de facturación, el registro de nuevos Gateways y clientes con sus respectivos medidores, así como el monitoreo del estado de operatividad de cada nodo dentro del sistema. El **Anexo 12:** *Guía de uso de la plataforma web del sistema*, muestra una guía de uso de la plataforma web.

La Figura 105 muestra la interfaz de inicio de sesión de la plataforma web. En esta ventana, el personal autorizado debe ingresar sus credenciales, que corresponden a un usuario y contraseña, para acceder al dashboard del sistema y visualizar la información disponible.

Figura 105.

Login de inicio de sesión

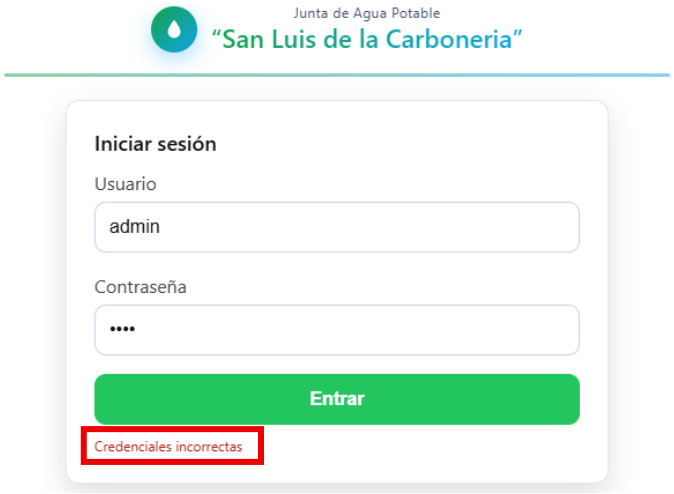


Nota: Autoría propia, 2025.

Si el personal ingresa credenciales incorrectas, el sistema despliega un mensaje de alerta indicando que son incorrectas. En la Figura 106 se muestra el intento de acceso fallido a la plataforma web, evidenciando el mecanismo de validación implementado.

Figura 106.

Inicio de sesión incorrecto



Nota: Autoría propia, 2025.

En la Figura 107 se muestra el panel de inicio al que accede el usuario tras ingresar correctamente sus credenciales. En la parte superior derecha de la interfaz se visualiza el nombre de usuario junto con el rol o cargo asignado, permitiendo identificar el perfil.

Figura 107.

Panel de inicio

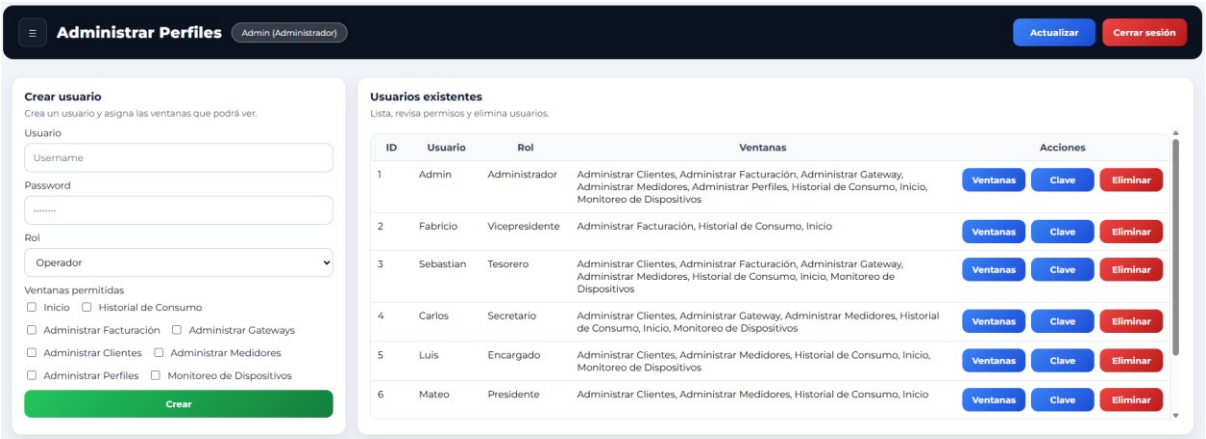


Nota: Autoría propia, 2025.

El usuario con rol de administrador tiene la facultad de registrar nuevos usuarios para que puedan acceder a la plataforma. Durante este proceso, es posible asignar un rol específico y definir los paneles del dashboard a los que cada usuario tendrá acceso, garantizando una gestión controlada de permisos. La Figura 108 muestra el panel de administración de perfiles integrado en el sistema.

Figura 108.

Panel de administración de perfiles

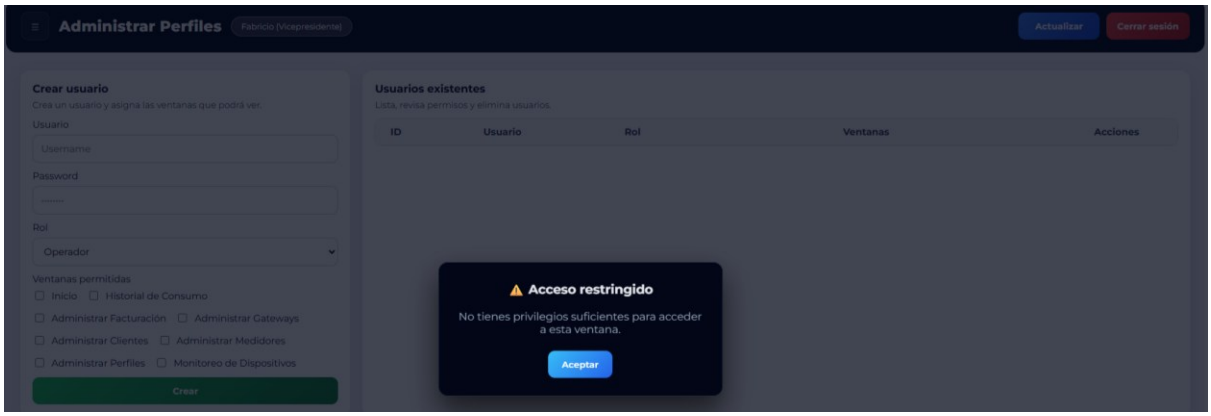


Nota: Autoría propia, 2025.

En caso de que un usuario intente acceder a un panel para el cual no dispone de los privilegios correspondientes, el sistema mostrará un mensaje indicando la falta de privilegios suficientes. En la Figura 109 se presenta un caso donde el usuario intenta ingresar a un panel para el cual no tiene los privilegios suficientes.

Figura 109.

Restricción de acceso a usuarios sin privilegios



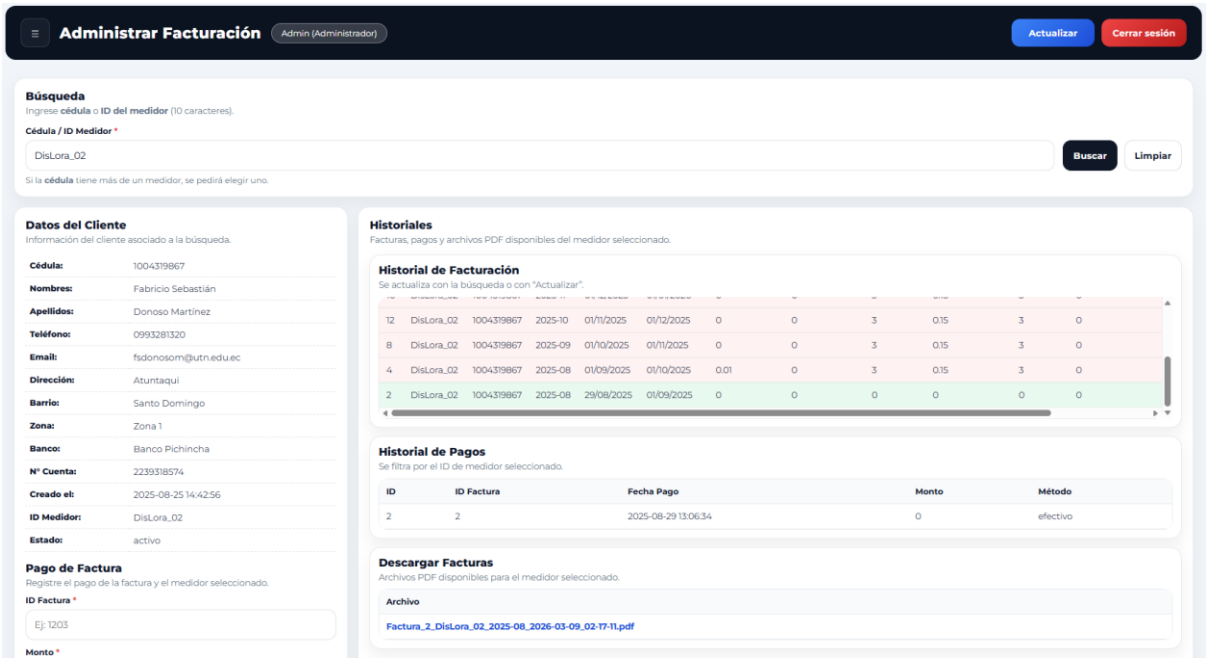
Nota: Autoría propia, 2025.

4.5.5. Pruebas de facturación

Este apartado presenta las pruebas al sistema de facturación, es importante resaltar que las facturas se generan de manera automática. Para facilitar su identificación, aquellas facturas pendientes de pago se muestran resaltadas en color rojo, mientras que las facturas canceladas se presentan en color verde. Esta diferenciación visual permite una gestión más clara del estado de cada registro. En la Figura 110 se muestra el sistema de identificación implementado.

Figura 110.

Panel de Facturación



Nota: Autoría propia, 2025.

Las pruebas del sistema de facturación se llevaron a cabo durante los meses de septiembre, octubre y noviembre del año 2025. Se seleccionaron dos domicilios en los cuales se recopiló tanto la facturación generada por el sistema propuesto como las facturas emitidas por la Junta Administradora de Agua Potable. Esta información permitió realizar una comparación directa entre ambos registros, con el fin de verificar la precisión y confiabilidad del sistema desarrollado.

A continuación, se presentan las facturas correspondientes al medidor identificado con el código 1503010150, perteneciente al primer domicilio seleccionado para el análisis. Estas facturas serán utilizadas para realizar la comparación entre los valores generados por el sistema propuesto y los emitidos por la Junta Administradora de Agua Potable.

La Figura 111 muestra la facturación realizada por el sistema correspondiente al mes de septiembre.

Figura 111.

Facturación del sistema – Septiembre – Medidor 1503010150

JUNTA ADMINISTRADORA DE AGUA POTABLE
"SAN LUIS DE LA CARBONERIA"

NOMBRE CONSUMIDOR:	Jeanette Germania Aragón Proaño		
SECTOR:	Zona 1	N° CONSUMIDOR:	3
FECHA:	Miércoles 1 de Octubre 2025	N° MEDIDOR:	1503010150
CÉDULA:	1002817961	TELÉFONO:	0999479725

LECTURA ANTERIOR	LECTURA ACTUAL	CONSUMO M3
0.00	28.72	28.72
FECHA LECT. ANTERIOR	**FECHA LECT. ACTUAL**	**MES DE CONSUMO**
Lunes 1 de Septiembre 2025	Miércoles 1 de Octubre 2025	Septiembre 2025

CONCEPTO

DETALLE	M3	TARIFA USD	VALOR USD
Costo Básico	20	$3.00	$3.00
Costo Excedente	8.72	$0.15	$1.31
Otros Cargos	-	-	$0.00
		TOTAL JUNTA	$4.31

Lisandro Acosta
TESORERO
0998785135

Jaime Ayala
OPERADOR
0981138301

Nota: Autoría propia, 2025.

La Figura 112 muestra la facturación realizada por el sistema correspondiente al mes de octubre.

Figura 112.

Facturación del sistema – Octubre – Medidor 1503010150

JUNTA ADMINISTRADORA DE AGUA POTABLE
"SAN LUIS DE LA CARBONERIA"

NOMBRE CONSUMIDOR:	Jeanette Germania Aragón Proaño		
SECTOR:	Zona 1	N° CONSUMIDOR:	3
FECHA:	Sábado 1 de Noviembre 2025	N° MEDIDOR:	1503010150
CÉDULA:	1002817961	TELÉFONO:	0999479725

LECTURA ANTERIOR	LECTURA ACTUAL	CONSUMO M3
28.72	14.53	14.53
FECHA LECT. ANTERIOR	**FECHA LECT. ACTUAL**	**MES DE CONSUMO**
Miércoles 1 de Octubre 2025	Sábado 1 de Noviembre 2025	Octubre 2025

CONCEPTO

DETALLE	M3	TARIFA USD	VALOR USD
Costo Básico	14.53	$3.00	$3.00
Costo Excedente	0	$0.15	$0.00
Otros Cargos	-	-	$0.00
		TOTAL JUNTA	$3.00

LISANDRO ACOSTA
TESORERO
0998785135

Jaime Ayala
OPERADOR
0981138301

Nota: Autoría propia, 2025.

La Figura 113 muestra la facturación realizada por el sistema correspondiente al mes de noviembre.

Figura 113.

Facturación del sistema – Noviembre – Medidor 1503010150

JUNTA ADMINISTRADORA DE AGUA POTABLE
"SAN LUIS DE LA CARBONERIA"

NOMBRE CONSUMIDOR:	Jeanette Germania Aragón Proaño		
SECTOR:	Zona 1	**N° CONSUMIDOR:**	3
FECHA:	Lunes 1 de Diciembre 2025	**N° MEDIDOR:**	1503010150
CÉDULA:	1002817961	**TELÉFONO:**	0999479725

LECTURA ANTERIOR	LECTURA ACTUAL	CONSUMO M3
14.53	20.31	20.31
FECHA LECT. ANTERIOR	**FECHA LECT. ACTUAL**	**MES DE CONSUMO**
Sábado 1 de Noviembre 2025	Lunes 1 de Diciembre 2025	Noviembre 2025

CONCEPTO

DETALLE	M3	TARIFA USD	VALOR USD
Costo Básico	20	$3.00	$3.00
Costo Excedente	0.31	$0.15	$0.05
Otros Cargos	-	-	$0.00
		TOTAL JUNTA	$3.05

LISANDRO ACOSTA
TESORERO
0998785135

Jaime Ayala
OPERADOR
0981138301

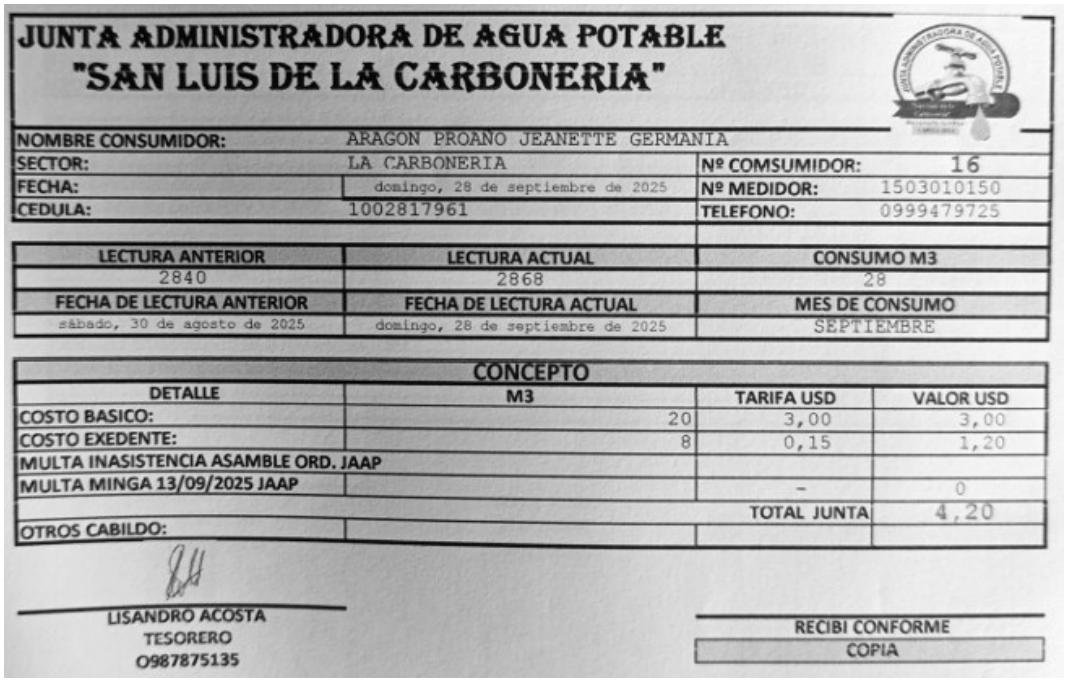
Nota: Autoría propia, 2025.

A continuación, se presentan las facturas emitidas por la Junta Administradora de Agua Potable correspondientes al mismo periodo de análisis y al domicilio previamente identificado. Estas facturas servirán como referencia para realizar la comparación con los valores generados por el sistema propuesto.

La Figura 114 muestra la facturación emitida por la Junta de Agua Potable de la comunidad correspondiente al mes de septiembre.

Figura 114.

Factura oficial – Septiembre – Medidor 1503010150



JUNTA ADMINISTRADORA DE AGUA POTABLE
"SAN LUIS DE LA CARBONERIA"

NOMBRE CONSUMIDOR:	ARAGON PROAÑO JEANETTE GERMANIA		
SECTOR:	LA CARBONERIA	Nº COMSUMIDOR:	16
FECHA:	domingo, 28 de septiembre de 2025	Nº MEDIDOR:	1503010150
CEDULA:	1002817961	TELEFONO:	0999479725

LECTURA ANTERIOR	LECTURA ACTUAL	CONSUMO M3
2840	2868	28
FECHA DE LECTURA ANTERIOR	FECHA DE LECTURA ACTUAL	MES DE CONSUMO
sábado, 30 de agosto de 2025	domingo, 28 de septiembre de 2025	SEPTIEMBRE

CONCEPTO			
DETALLE	M3	TARIFA USD	VALOR USD
COSTO BASICO:	20	3,00	3,00
COSTO EXEDENTE:	8	0,15	1,20
MULTA INASISTENCIA ASAMBLE ORD. JAAP			
MULTA MINGA 13/09/2025 JAAP		-	0
		TOTAL JUNTA	4,20
OTROS CABILDO:			

LISANDRO ACOSTA
TESORERO
0987875135

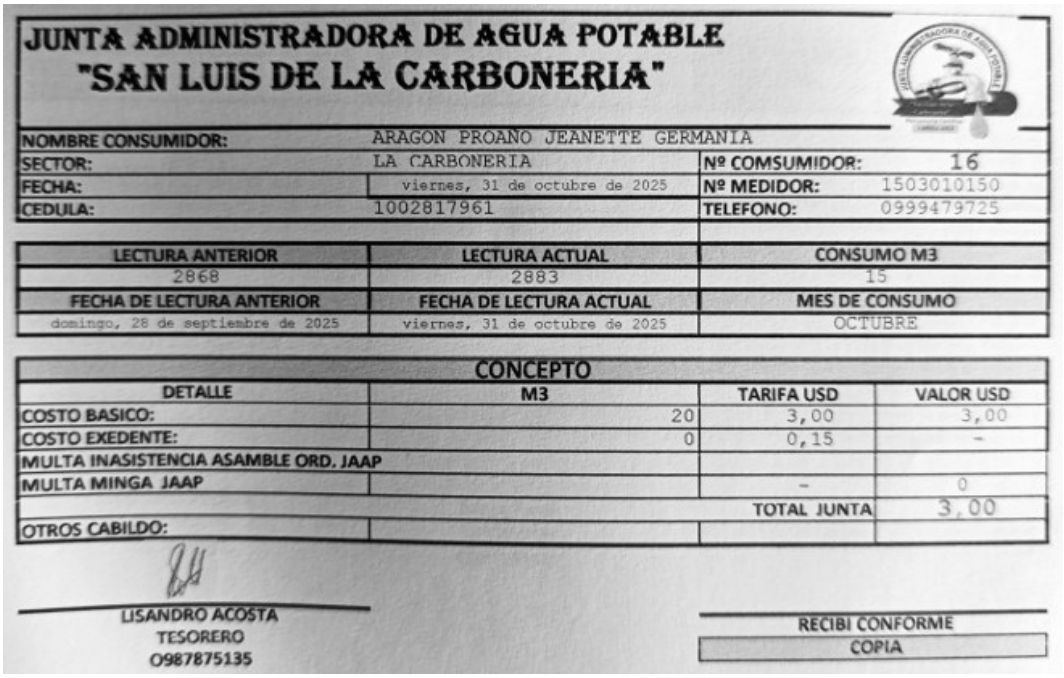
RECIBI CONFORME
COPIA

Nota: Autoría propia, 2025.

La Figura 115 muestra la facturación emitida por la Junta de Agua Potable de la comunidad correspondiente al mes de octubre.

Figura 115.

Factura oficial – Octubre – Medidor 1503010150



JUNTA ADMINISTRADORA DE AGUA POTABLE
"SAN LUIS DE LA CARBONERIA"

NOMBRE CONSUMIDOR:	ARAGON PROAÑO JEANETTE GERMANIA		
SECTOR:	LA CARBONERIA	Nº COMSUMIDOR:	16
FECHA:	viernes, 31 de octubre de 2025	Nº MEDIDOR:	1503010150
CEDULA:	1002817961	TELEFONO:	0999479725

LECTURA ANTERIOR	LECTURA ACTUAL	CONSUMO M3
2868	2883	15
FECHA DE LECTURA ANTERIOR	FECHA DE LECTURA ACTUAL	MES DE CONSUMO
domingo, 28 de septiembre de 2025	viernes, 31 de octubre de 2025	OCTUBRE

CONCEPTO			
DETALLE	M3	TARIFA USD	VALOR USD
COSTO BASICO:	20	3,00	3,00
COSTO EXEDENTE:	0	0,15	-
MULTA INASISTENCIA ASAMBLE ORD. JAAP			
MULTA MINGA JAAP		-	0
		TOTAL JUNTA	3,00
OTROS CABILDO:			

LISANDRO ACOSTA
TESORERO
0987875135

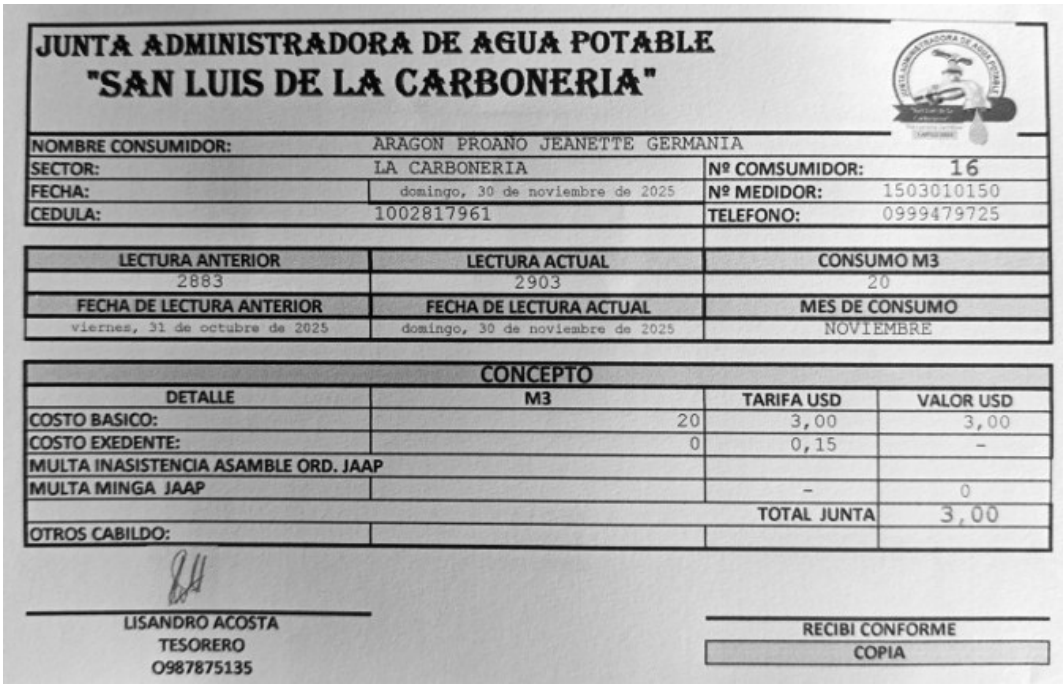
RECIBI CONFORME
COPIA

Nota: Autoría propia, 2025.

La Figura 116 muestra la facturación emitida por la Junta de Agua Potable de la comunidad correspondiente al mes de noviembre.

Figura 116.

Factura oficial – Noviembre – Medidor 1503010150



JUNTA ADMINISTRADORA DE AGUA POTABLE
"SAN LUIS DE LA CARBONERIA"

NOMBRE CONSUMIDOR:	ARAGON PROAÑO JEANETTE GERMANIA		
SECTOR:	LA CARBONERIA	Nº COMSUMIDOR:	16
FECHA:	domingo, 30 de noviembre de 2025	Nº MEDIDOR:	1503010150
CEDULA:	1002817961	TELEFONO:	0999479725

LECTURA ANTERIOR	LECTURA ACTUAL	CONSUMO M3
2883	2903	20
FECHA DE LECTURA ANTERIOR	**FECHA DE LECTURA ACTUAL**	**MES DE CONSUMO**
viernes, 31 de octubre de 2025	domingo, 30 de noviembre de 2025	NOVIEMBRE

CONCEPTO			
DETALLE	M3	TARIFA USD	VALOR USD
COSTO BASICO:	20	3,00	3,00
COSTO EXEDENTE:	0	0,15	-
MULTA INASISTENCIA ASAMBLE ORD. JAAP			
MULTA MINGA JAAP		-	0
		TOTAL JUNTA	3,00
OTROS CABILDO:			

LISANDRO ACOSTA
TESORERO
0987875135

RECIBI CONFORME
COPIA

Nota: Autoría propia, 2025.

A continuación, en la Tabla 45 se presenta una comparación entre la facturación generada por el sistema propuesto y la emitida por la Junta Administradora de Agua Potable de la comunidad.

Tabla 45.

Comparativa de facturación - Medidor 1503010150

Mes	Consumo Sistema (m^3)	Consumo Junta (m^3)	Diferencia (m^3)	Error (%)	Valor facturado Sistema ($)	Valor facturado Junta ($)	Diferencia ($)
Septiembre	28,72	28	0,72	2,57	4,31	4,20	0,11
Octubre	14,53	15	0,47	-3,13	3,00	3,00	0,00
Noviembre	20,31	20	0,31	1,55	3,05	3,00	0,05

Nota: Elaborado por propio autor, 2025.

De acuerdo con la normativa internacional OIML R49 e ISO 4064, los errores máximos permisibles para medidores de agua oscilan entre ±5 % en la zona inferior de medición y ±2 % en la zona superior, dependiendo del rango de caudal en el que opere el dispositivo. (Casilla Gutiérrez, 2014)

Así mismo, la Agencia de Regulación y Control del Agua, en la *Guía Técnica para la Gestión y Fortalecimiento de los Procesos Relacionados con los Sistemas de Micromedición en la Prestación del Servicio de Agua Potable brindado por los Prestadores Públicos y Comunitarios*, en su apartado 5.3 referente a la curva de error, establece la importancia de que los medidores operen dentro de los márgenes entre ±5 % en la zona inferior de medición y ±2 % permisibles definidos por la normativa para garantizar la confiabilidad de la medición. (Salazar et al., 2022)

Considerando que el sistema desarrollado presentó un margen de error entre 1,55 % y -3,13 %, los valores obtenidos se encuentran dentro de los rangos aceptables establecidos para medidores en uso, lo que evidencia un comportamiento adecuado del sensor implementado y su viabilidad técnica.

Así mismo, se presentan las facturas correspondientes al medidor identificado con el código 1503012328, perteneciente al segundo domicilio seleccionado para el análisis. La Figura 117 muestra la facturación realizada por el sistema correspondiente al mes de septiembre.

Figura 117.

Facturación del sistema – Septiembre – Medidor 1503012328

JUNTA ADMINISTRADORA DE AGUA POTABLE
"SAN LUIS DE LA CARBONERIA"

NOMBRE CONSUMIDOR:	Segundo Manuel Liquinchano Perugachi		
SECTOR:	Zona 1	**N° CONSUMIDOR:**	4
FECHA:	Miércoles 1 de Octubre 2025	**N° MEDIDOR:**	1503012328
CÉDULA:	1705568887	**TELÉFONO:**	0988780237

LECTURA ANTERIOR	LECTURA ACTUAL	CONSUMO M3
0.00	9.15	9.15
FECHA LECT. ANTERIOR	**FECHA LECT. ACTUAL**	**MES DE CONSUMO**
Lunes 1 de Septiembre 2025	Miércoles 1 de Octubre 2025	Septiembre 2025

CONCEPTO

DETALLE	M3	TARIFA USD	VALOR USD
Costo Básico	9.15	$3.00	$3.00
Costo Excedente	0	$0.15	$0.00
Otros Cargos	-	-	$0.00
		TOTAL JUNTA	$3.00

LISANDRO ACOSTA
TESORERO
0998785135

Jaime Ayala
OPERADOR
0981138301

Nota: Autoría propia, 2025.

La Figura 118 muestra la facturación realizada por el sistema correspondiente al mes de octubre.

Figura 118.

Facturación del sistema – Octubre – Medidor 1503012328

JUNTA ADMINISTRADORA DE AGUA POTABLE
"SAN LUIS DE LA CARBONERIA"

NOMBRE CONSUMIDOR:	Segundo Manuel Liquinchano Perugachi		
SECTOR:	Zona 1	**N° CONSUMIDOR:**	4
FECHA:	Sábado 1 de Noviembre 2025	**N° MEDIDOR:**	1503012328
CÉDULA:	1705568887	**TELÉFONO:**	0988780237

LECTURA ANTERIOR	LECTURA ACTUAL	CONSUMO M3
9.15	7.08	7.08
FECHA LECT. ANTERIOR	**FECHA LECT. ACTUAL**	**MES DE CONSUMO**
Miércoles 1 de Octubre 2025	Sábado 1 de Noviembre 2025	Octubre 2025

CONCEPTO

DETALLE	M3	TARIFA USD	VALOR USD
Costo Básico	7.08	$3.00	$3.00
Costo Excedente	0	$0.15	$0.00
Otros Cargos	-	-	$0.00
		TOTAL JUNTA	$3.00

LISANDRO ACOSTA
TESORERO
0998785135

Jaime Ayala
OPERADOR
0981138301

Nota: Autoría propia, 2025.

La Figura 119 muestra la facturación realizada por el sistema correspondiente al mes de noviembre.

Figura 119.

Facturación del sistema – Noviembre – Medidor 1503012328

JUNTA ADMINISTRADORA DE AGUA POTABLE
"SAN LUIS DE LA CARBONERIA"

NOMBRE CONSUMIDOR:	Segundo Manuel Liquinchano Perugachi		
SECTOR:	Zona 1	**N° CONSUMIDOR:**	4
FECHA:	Lunes 1 de Diciembre 2025	**N° MEDIDOR:**	1503012328
CÉDULA:	1705568887	**TELÉFONO:**	0988780237

LECTURA ANTERIOR	LECTURA ACTUAL	CONSUMO M3
7.08	7.23	7.23
FECHA LECT. ANTERIOR	**FECHA LECT. ACTUAL**	**MES DE CONSUMO**
Sábado 1 de Noviembre 2025	Lunes 1 de Diciembre 2025	Noviembre 2025

CONCEPTO

DETALLE	M3	TARIFA USD	VALOR USD
Costo Básico	7.23	$3.00	$3.00
Costo Excedente	0	$0.15	$0.00
Otros Cargos	-	-	$0.00
		TOTAL JUNTA	$3.00

LISANDRO ACOSTA
TESORERO
0998785135

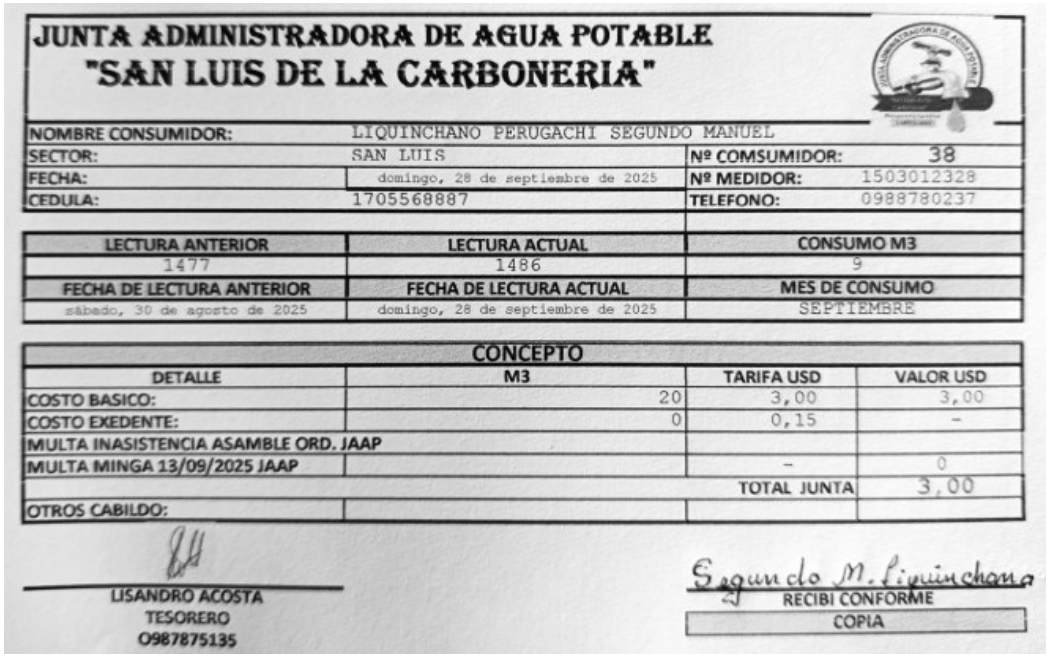
Jaime Ayala
OPERADOR
0981138301

Nota: Autoría propia, 2025.

A continuación, se presentan las facturas emitidas por la Junta Administradora de Agua Potable correspondientes al mismo periodo de análisis y al domicilio previamente identificado. La Figura 120 muestra la facturación emitida por la Junta de Agua Potable de la comunidad correspondiente al mes de septiembre.

Figura 120.

Factura oficial – Septiembre – Medidor 1503012328



JUNTA ADMINISTRADORA DE AGUA POTABLE
"SAN LUIS DE LA CARBONERIA"

NOMBRE CONSUMIDOR:	LIQUINCHANO PERUGACHI SEGUNDO MANUEL		
SECTOR:	SAN LUIS	Nº COMSUMIDOR:	38
FECHA:	domingo, 28 de septiembre de 2025	Nº MEDIDOR:	1503012328
CEDULA:	1705568887	TELEFONO:	0988780237

LECTURA ANTERIOR	LECTURA ACTUAL	CONSUMO M3
1477	1486	9
FECHA DE LECTURA ANTERIOR	FECHA DE LECTURA ACTUAL	MES DE CONSUMO
sábado, 30 de agosto de 2025	domingo, 28 de septiembre de 2025	SEPTIEMBRE

CONCEPTO			
DETALLE	M3	TARIFA USD	VALOR USD
COSTO BASICO:	20	3,00	3,00
COSTO EXEDENTE:	0	0,15	-
MULTA INASISTENCIA ASAMBLE ORD. JAAP			
MULTA MINGA 13/09/2025 JAAP		-	0
		TOTAL JUNTA	3,00
OTROS CABILDO:			

LISANDRO ACOSTA
TESORERO
0987875135

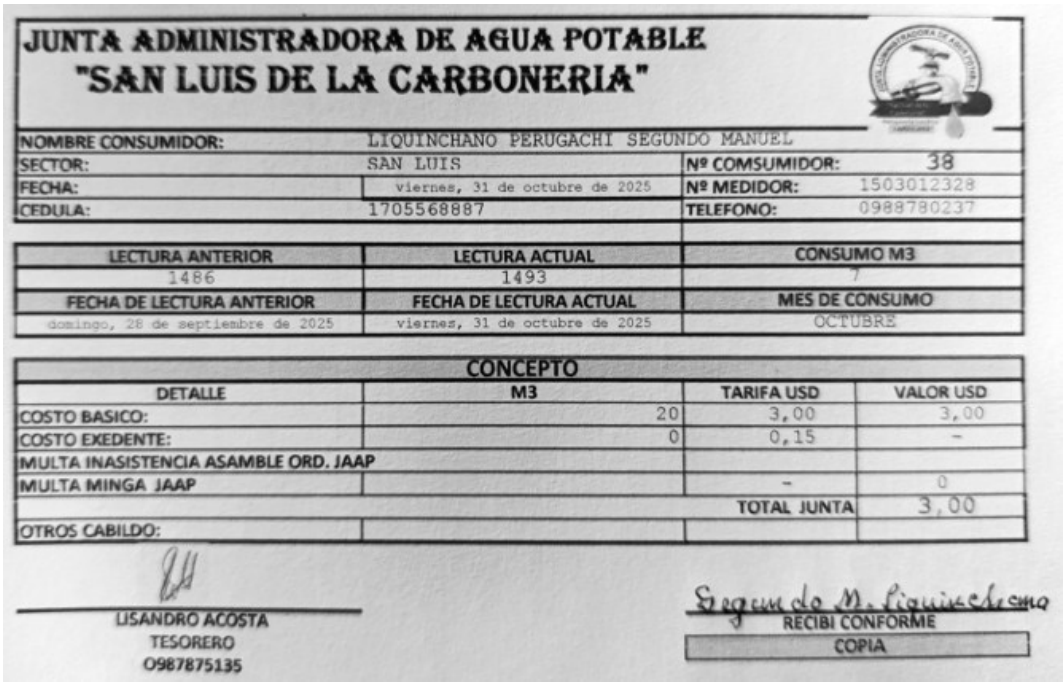
Segundo M. Liquinchano
RECIBI CONFORME
COPIA

Nota: Autoría propia, 2025.

La Figura 121 muestra la facturación emitida por la Junta de Agua Potable de la comunidad correspondiente al mes de octubre.

Figura 121.

Factura oficial – Octubre – Medidor 1503012328



JUNTA ADMINISTRADORA DE AGUA POTABLE
"SAN LUIS DE LA CARBONERIA"

NOMBRE CONSUMIDOR:	LIQUINCHANO PERUGACHI SEGUNDO MANUEL		
SECTOR:	SAN LUIS	Nº COMSUMIDOR:	38
FECHA:	viernes, 31 de octubre de 2025	Nº MEDIDOR:	1503012328
CEDULA:	1705568887	TELEFONO:	0988780237

LECTURA ANTERIOR	LECTURA ACTUAL	CONSUMO M3
1486	1493	7
FECHA DE LECTURA ANTERIOR	FECHA DE LECTURA ACTUAL	MES DE CONSUMO
domingo, 28 de septiembre de 2025	viernes, 31 de octubre de 2025	OCTUBRE

CONCEPTO			
DETALLE	M3	TARIFA USD	VALOR USD
COSTO BASICO:	20	3,00	3,00
COSTO EXEDENTE:	0	0,15	-
MULTA INASISTENCIA ASAMBLE ORD. JAAP			
MULTA MINGA JAAP		-	0
		TOTAL JUNTA	3,00
OTROS CABILDO:			

LISANDRO ACOSTA
TESORERO
0987875135

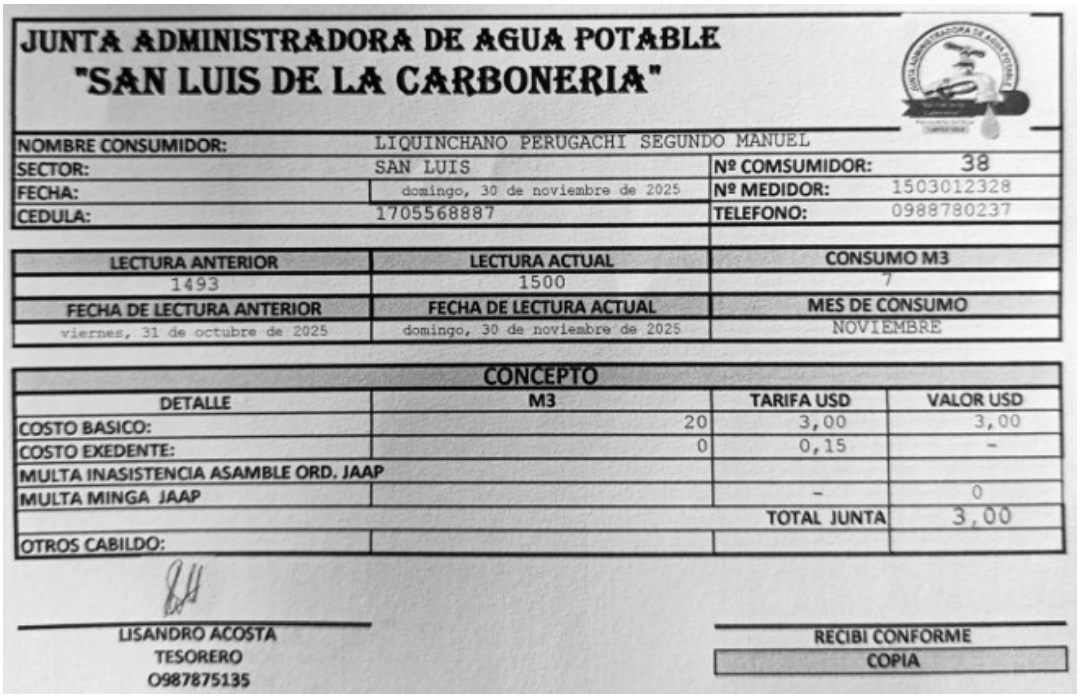
Segundo M. Liquinchano
RECIBI CONFORME
COPIA

Nota: Autoría propia, 2025.

La Figura 122 muestra la facturación emitida por la Junta de Agua Potable de la comunidad correspondiente al mes de noviembre.

Figura 122.

Factura oficial – Noviembre – Medidor 1503012328



JUNTA ADMINISTRADORA DE AGUA POTABLE
"SAN LUIS DE LA CARBONERIA"

NOMBRE CONSUMIDOR:	LIQUINCHANO PERUGACHI SEGUNDO MANUEL		
SECTOR:	SAN LUIS	Nº COMSUMIDOR:	38
FECHA:	domingo, 30 de noviembre de 2025	Nº MEDIDOR:	1503012328
CEDULA:	1705568887	TELEFONO:	0988780237

LECTURA ANTERIOR	LECTURA ACTUAL	CONSUMO M3
1493	1500	7
FECHA DE LECTURA ANTERIOR	FECHA DE LECTURA ACTUAL	MES DE CONSUMO
viernes, 31 de octubre de 2025	domingo, 30 de noviembre de 2025	NOVIEMBRE

CONCEPTO			
DETALLE	M3	TARIFA USD	VALOR USD
COSTO BASICO:	20	3,00	3,00
COSTO EXEDENTE:	0	0,15	-
MULTA INASISTENCIA ASAMBLE ORD. JAAP			
MULTA MINGA JAAP		-	0
		TOTAL JUNTA	3,00
OTROS CABILDO:			

LISANDRO ACOSTA
TESORERO
0987875135

RECIBI CONFORME
COPIA

Nota: Autoría propia, 2025.

A continuación, en la Tabla 46 se presenta una comparación entre la facturación generada por el sistema propuesto y la emitida por la Junta Administradora de Agua Potable de la comunidad.

Tabla 46.

Comparativa de facturación - Medidor 1503012328

Mes	Consumo Sistema (m^3)	Consumo Junta (m^3)	Diferencia (m^3)	Error (%)	Valor facturado Sistema ($)	Valor facturado Junta ($)	Diferencia ($)
Septiembre	9,15	9	0,15	1,67	3,00	3,00	0,00
Octubre	7,08	7	0,08	1,14	3,00	3,00	0,00
Noviembre	7,23	7	0,23	3,29	3,00	3,00	0,00

Nota: Elaborado por propio autor, 2025.

Para el caso del segundo domicilio, los resultados obtenidos muestran un margen de error comprendido entre 1,14 % y 3,29 %, valores que mantienen similitud con los obtenidos en el análisis anterior. Considerando la normativa presentada anteriormente, estos porcentajes se encuentran dentro de los rangos permisibles para medidores en uso.

4.5.6. Pruebas de la base de datos

En este apartado se verifica el correcto almacenamiento de la información generada e ingresada en el sistema. Se evalúa que los datos enviados desde los nodos y registrados desde la plataforma web sean guardados adecuadamente en las tablas correspondientes, garantizando integridad, persistencia y disponibilidad de la información para su posterior consulta y procesamiento.

La Figura 123 muestra los clientes registrados a través de la plataforma web, evidenciando que la información ingresada ha sido almacenada correctamente en la base de datos.

Figura 123.

Clientes registrados

Result Grid | Filter Rows: | Edit: | Export/Import: | Wrap Cell Content:

id_cliente	cedula	nombres	apellidos	telefono	email	direccion	barrio
1	1004319867	Fabricio Sebastián	Donoso Martínez	0993281320	fsdonosom@utn.edu.ec	Atuntaqui	Santo Domingo
2	1002817961	Jeanette Germania	Aragón Proaño	0999479725	germaniaaragon@hotmail.com	San Luis de la Carbonería	San Luis de la Carbonería
3	1705568887	Segundo Manuel	Liquinchano Perugachi	0988780237	NULL	San Luis de la Carbonería	San Luis de la Carbonería

Nota: Autoría propia, 2025.

La Figura 124 muestra los medidores registrados mediante la plataforma web, evidenciando que la información correspondiente ha sido almacenada correctamente en la base de datos

Figura 124.

Medidores registrados

id_medidor	cedula	dev_id	fecha_instalacion	estado	creado_el
1	1004319867	DisLora_01	2025-08-25	activo	2025-08-25 14:42:56
2	1004319867	DisLora_02	2025-08-29	activo	2025-08-29 13:06:34
3	1002817961	1503010150	2025-09-01	activo	2025-09-01 11:52:01
4	1705568887	1503012328	2025-09-01	activo	2025-09-01 14:38:38

Nota: Autoría propia, 2025.

La Figura 125 muestra las lecturas de consumo de agua potable enviadas por el nodo Sensor, evidenciando que los datos transmitidos han sido registrados y almacenados correctamente en la base de datos del sistema.

Figura 125.

Lecturas de Consumo de Agua Potable

Result Grid | Filter Rows: | Edit: | Export/Import:

id_medicion	dev_id	fecha_recepcion	volumen_litros	estado_valvula
386	1503010150	2025-10-23 00:00:00	69.81	0
387	1503012328	2025-10-23 00:02:00	22.22	0
388	1503010150	2025-10-23 08:00:00	53.80	0
389	1503012328	2025-10-23 08:02:00	21.07	0
390	1503010150	2025-10-23 16:00:00	169.54	0
391	1503012328	2025-10-23 16:02:00	335.40	0
392	1503010150	2025-10-24 00:00:00	219.40	0
393	1503012328	2025-10-24 00:02:00	12.90	0
394	1503010150	2025-10-24 08:00:00	69.06	0
395	1503012328	2025-10-24 08:02:00	35.01	0
396	1503010150	2025-10-24 16:00:00	502.93	0
397	1503012328	2025-10-24 16:02:00	92.43	0
398	1503010150	2025-10-25 00:00:00	49.93	0
399	1503012328	2025-10-25 00:02:00	20.49	0
400	1503010150	2025-10-25 08:00:00	45.47	0

Nota: Autoría propia, 2025.

La Figura 126 muestra las facturas generadas por el sistema, evidenciando que los registros han sido almacenados correctamente en la base de datos y se encuentran disponibles para su consulta y gestión dentro de la plataforma.

Figura 126.

Facturas de Consumo de Agua Potable

Result Grid | Filter Rows: 1503012328 | Edit: | Export/Import: | Wrap Cell Content:

id_factura	fecha_emision	fecha_vencimiento	periodo	cedula	dev_id	consumo_m3	consumo_m3_ad	tarifa_base	tarifa_ad_por_m3	valor_usd	valor_ad_usd	otros_cargos	total
6	2025-09-01 12:38:38	2025-10-01	2025-09	1705568887	1503012328	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	2025-10-01 01:00:00	2025-11-01	2025-09	1705568887	1503012328	9.15	0.00	3.00	0.15	3.00	0.00	0.00	3.00
14	2025-11-01 01:00:00	2025-12-01	2025-10	1705568887	1503012328	7.08	0.00	3.00	0.15	3.00	0.00	0.00	3.00
18	2025-12-01 01:00:00	2026-01-01	2025-11	1705568887	1503012328	7.23	0.00	3.00	0.15	3.00	0.00	0.00	3.00
▸▸	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL

Nota: Autoría propia, 2025.

4.5.7. Pruebas de control actuador

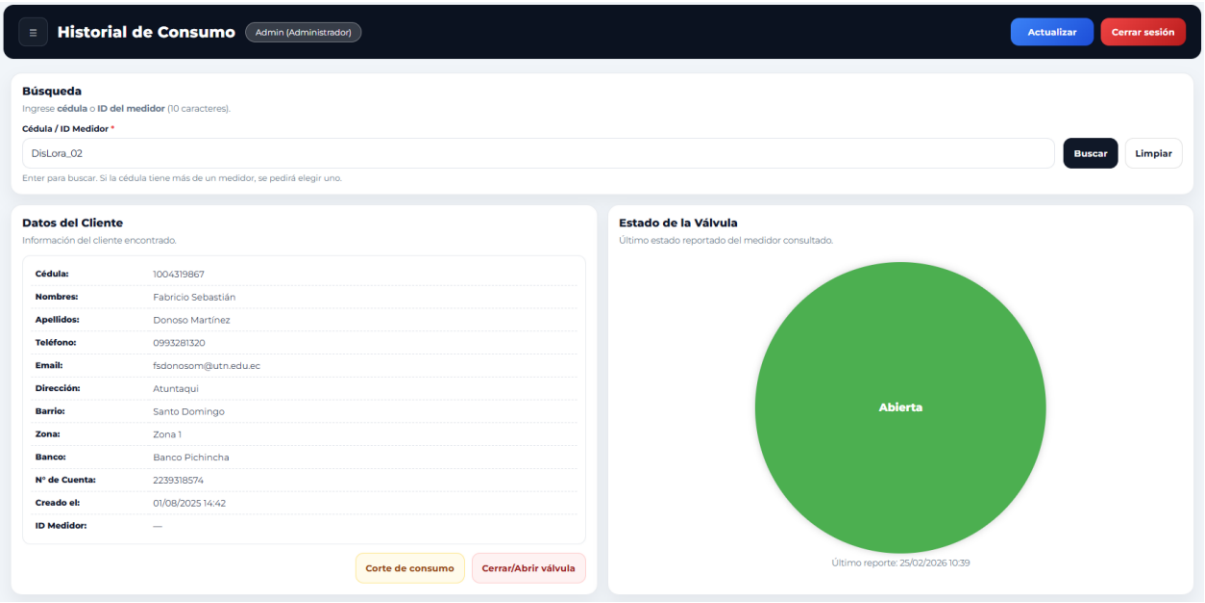
En este apartado se presentan las pruebas correspondientes al actuador del sistema, encargado de gestionar el corte y reconexión del servicio de agua potable. La electroválvula implementada es de tipo normalmente abierta, lo que significa que, en condiciones normales,

permite el paso del agua. Durante las pruebas se verifica el accionamiento del actuador para realizar el corte del suministro. De igual manera, se evalúa su desactivación para restablecer el flujo de agua, validando así su funcionamiento dentro del esquema de control remoto del sistema.

La Figura 127 muestra la electroválvula en estado abierto, lo cual puede verificarse a través del dashboard del sistema. En la interfaz se dispone de una sección específica que indica el estado del actuador; cuando la electroválvula se encuentra abierta, el indicador se visualiza en color verde, permitiendo identificar de manera clara su condición operativa.

Figura 127.

Electroválvula en estado abierto

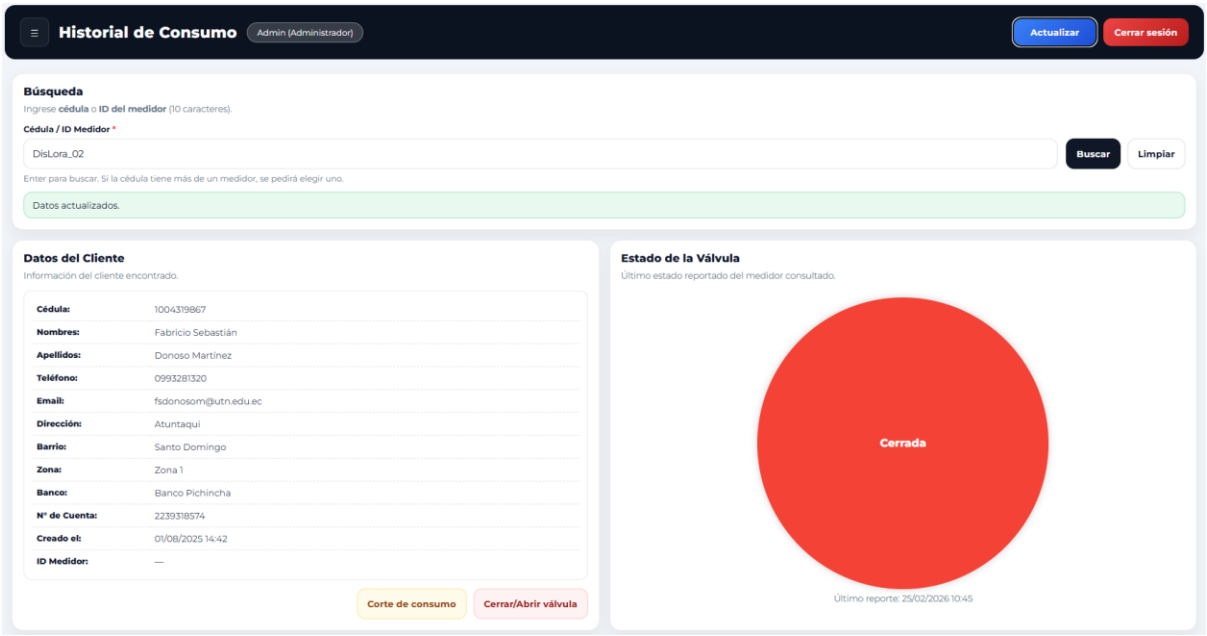


Nota: Autoría propia, 2025.

La Figura 128 muestra la activación de la electroválvula en estado cerrado. En el dashboard, cuando la electroválvula se encuentra energizada e impide el flujo de agua, el indicador cambia a color rojo, permitiendo identificar visualmente que el servicio ha sido suspendido.

Figura 128.

Electroválvula en estado cerrado



Nota: Autoría propia, 2025.

A continuación, se presenta en la Tabla 47 el registro de activación y desactivación de la electroválvula durante las pruebas realizadas. Con el propósito de validar su funcionamiento y confiabilidad, el actuador fue accionado en diez ocasiones, verificando en cada ciclo la respuesta adecuada del sistema tanto en el cierre como en la reconexión del servicio de agua potable

Tabla 47.

Pruebas de electroválvula

Operación	Número de pruebas	Margen de error
Activación	10	0
Desactivación	10	0

Nota: Elaborado por propio autor, 2025.

4.5.8. Evaluación energética del sistema auto-energizable

En este apartado se analiza el comportamiento energético del nodo sensor a partir de la configuración implementada, considerando su consumo y demanda energética diaria. Así mismo, se evalúa la capacidad de suministro del sistema fotovoltaico, junto con la autonomía observada y estimada del nodo en ausencia de radiación solar. También se evalúa el efecto de la activación de la electroválvula sobre el tiempo de funcionamiento del sistema. Finalmente, se analiza el comportamiento del prototipo ante la disminución del voltaje de la batería, con el propósito de determinar las condiciones en las que el sistema mantiene su operatividad.

4.5.8.1. Consumo eléctrico del nodo sensor sin activación de la electroválvula.

Para evaluar el comportamiento energético del sistema en su condición normal de operación, se realizó una medición experimental del consumo eléctrico del nodo sensor con la electroválvula desactivada. Esta condición representa el estado base de funcionamiento del prototipo, en el cual permanecen activos los módulos de procesamiento, temporización, censado y comunicación, sin demanda energética asociada al accionamiento del actuador.

La medición registrada con el multímetro registró una corriente de 58,5mA, correspondiente al consumo total del nodo en operación base. Considerando una tensión nominal de alimentación de 12V, la potencia consumida se calcula a partir de la Ecuación 19.

Ecuación 19.

Potencia eléctrica consumida

$$P = V * I$$

Aplicando valores tenemos:

$$P = 12(V) * 0{,}0585(A)$$

$$P = 0{,}702(W)$$

La potencia eléctrica demandada por el nodo sensor en ausencia de activación de la electroválvula es de 0.702W. Este resultado indica que el sistema presenta un consumo bajo

durante su funcionamiento normal, lo cual es favorable para su implementación en sistemas de alimentación autónomos. A partir de este valor, y mediante la Ecuación 20 es posible estimar la energía consumida durante un día de operación continua. Considerando un periodo de 24 horas.

Ecuación 20.

Energía diaria consumida

$$E = P * t$$

Aplicando valores tenemos:

$$E = 0{,}702(W) * 24(h)$$

$$E = 16{,}848(Wh)$$

El nodo sensor requiere aproximadamente 16,85Wh/día en condición base sin accionamiento de la electroválvula. Este valor sirve como referencia para el análisis de autonomía del sistema y para su comparación con la capacidad de generación del sistema fotovoltaico.

4.5.8.2. Consumo eléctrico del sistema con activación de la electroválvula.

Para analizar cómo la etapa de actuación influye en el consumo energético del sistema, se midió experimentalmente la corriente del nodo sensor mientras la electroválvula estaba activada. Esta situación representa un estado de mayor demanda, ya que, además del consumo base del nodo, se suma la energía requerida por el actuador que controla el flujo de agua.

La medición realizada con el multímetro indicó una corriente total de 0,45A cuando la electroválvula se encontraba activada. Considerando la tensión nominal de alimentación del sistema, igual a 12V, la potencia total consumida se calcula a partir de la Ecuación 26.

Ecuación 21.

Potencia total consumida durante la activación de la electroválvula

$$P = V * I$$

Aplicando valores tenemos:

$$P = 12(V) * 0{,}45(A)$$

$$P = 5{,}4(W)$$

La potencia total demandada por el sistema durante la activación de la electroválvula es de 5.4W, evidenciando un incremento considerable respecto al consumo en operación base. Para estimar específicamente la contribución de la electroválvula, se calculó la diferencia entre la corriente medida con la válvula activada y la corriente del estado base aplicando la Ecuación 22.

Ecuación 22.

Corriente asociada a la electroválvula

$$I_{valvula} = I_{total} - I_{base}$$

Aplicando valores tenemos:

$$I_{valvula} = 0{,}45(A) - 0{,}0585(A)$$

$$I_{valvula} = 0{,}3915(A)$$

La corriente adicional asociada a la activación de la electroválvula es de 0,3915A o 391,5mA. La potencia consumida específicamente por este actuador se calcula aplicando la Ecuación 23.

Ecuación 23.

Potencia de la electroválvula

$$P_{valvula} = V * I_{valvula}$$

Aplicando valores tenemos:

$$P_{valvula} = 12(V) * 0{,}3915(A)$$

$$P_{valvula} = 4{,}698(W)$$

La electroválvula demanda aproximadamente 4,70W, mientras que el resto del sistema mantiene el consumo base previamente determinado. Este resultado indica que el incremento energético más significativo del prototipo ocurre durante la fase de actuación.

Cabe destacar que esta condición corresponde a un estado puntual de funcionamiento, dado que la electroválvula no permanece activada de forma continua durante la operación normal. Por ello, aunque su potencia es considerablemente mayor que la del nodo en reposo, su impacto sobre el consumo diario depende directamente del tiempo acumulado de activación.

4.5.8.3. Comparación del consumo en los diferentes estados de operación.

A partir de las mediciones experimentales del nodo sensor, se compara el consumo eléctrico del sistema en condición base con el consumo durante la activación de la electroválvula. Esta comparación se muestra en la Tabla 48 y permite evaluar la variación de corriente y potencia entre ambos estados, así como cuantificar el impacto energético generado por la etapa de actuación.

Tabla 48.

Consumo eléctrico del sistema según su estado de operación

Estado de operación del Nodo Sensor / Análisis Energético	Sin activación de la electroválvula	Con activación de la electroválvula	Consumo adicional de la electroválvula
Corriente (mA)	58,5mA	450mA	+391,5mA
Potencia (W)	0,702W	5,40W	+4,698W

Nota: Elaborado por propio autor, 2025.

A partir de los resultados mostrados en la Tabla 48, se observa que el nodo sensor presenta un consumo reducido durante su operación base, con una corriente de 58,5mA y una potencia de 0,702W. Cuando la electroválvula es activada, la corriente total del sistema aumenta a 450mA, con una potencia de 5,40W. Esto indica que la etapa de actuación incrementa la demanda del sistema en 391,5mA y 4,698W respecto al estado base.

En consecuencia, se determina que la operación normal del nodo mantiene un requerimiento energético bajo, mientras que la activación de la electroválvula representa la condición de mayor exigencia eléctrica dentro del prototipo

4.5.8.4. Estimación de la potencia y energía diaria requerida por el sistema.

Para estimar la energía diaria requerida por el sistema, se consideraron los dos estados de operación previamente evaluados, el funcionamiento base del nodo sensor, con una potencia total de 0,702W, y la operación del sistema con activación de la electroválvula, con una potencia total de 5,40W. A partir de estos valores, se calculó la energía demandada para tiempos de operación de 6h, 12h y 24h, permitiendo así analizar el comportamiento energético del prototipo en escenarios de uso más realistas y comparar el efecto que produce la activación de la electroválvula sobre el requerimiento total de energía, como se muestra en la Tabla 49.

Tabla 49.

Energía requerida por el sistema según el tiempo de operación

Estado del sistema	Potencia	Energía en 6h	Energía en 12h	Energía en 24h
Sin activación de la electroválvula	0,702W	4,21Wh	8,42Wh	16,85Wh
Con activación de la electroválvula	5,40W	32,40Wh	64,80Wh	129,60Wh

Nota: Elaborado por propio autor, 2025.

Como se observa en la Tabla, aunque la electroválvula presenta una potencia considerablemente mayor, su efecto sobre la energía diaria total depende directamente del tiempo durante el cual permanece activada.

4.5.8.5. Energía diaria suministrada por el sistema fotovoltaico.

Con el fin de contrastar la demanda energética del nodo sensor con la capacidad de generación del sistema de alimentación, se estimó la energía diaria suministrada por el sistema fotovoltaico a partir de la potencia nominal del panel solar y de la hora solar pico (HSP) correspondiente al sector de Imantag, parroquia de Cotacachi.

Considerando el potencial solar reportado para Cotacachi, se adoptó un valor representativo de 4 horas sol pico por día para el análisis energético. En consecuencia, para el panel fotovoltaico de 120W, la energía diaria teórica suministrada por el sistema se calcula mediante la Ecuación 24.

Ecuación 24.

Energía diaria teórica suministrada

$$E_{fv} = P_{panel} * HSP * \eta$$

Aplicando valores tenemos:

$$E_{fv} = 120(W) * 4 * 0{,}75$$

$$E_{fv} = 360(Wh)$$

Considerando una eficiencia del 75% para representar de manera más realista las pérdidas asociadas al sistema fotovoltaico, el panel solar de 120 W puede suministrar aproximadamente 360Wh/día. Este valor continúa siendo ampliamente superior a la energía requerida por el nodo sensor en operación base, estimada en 16,848Wh/día, e igualmente superior a la demanda del sistema en escenarios de mayor consumo.

4.5.8.6. Autonomía del sistema en ausencia de aporte solar.

Con el fin de evaluar la capacidad de respaldo energético del prototipo en condiciones sin generación fotovoltaica, se analizó la autonomía del sistema considerando únicamente la energía almacenada en la batería. Para ello, se tomó como referencia la operación base del nodo sensor, en la cual se registró una corriente de 58,5mA y una potencia de 0,702W, así como la batería implementada en el sistema, de 12V y 50Ah de capacidad.

En términos de almacenamiento energético, la batería implementada posee una energía nominal almacenada, la cual se calcula a partir de la Ecuación 25.

Ecuación 25.

Energía nominal almacenada

$$E_{nom} = V * I$$

Aplicando valores tenemos:

$$E_{nom} = 12(V) * 50(Ah)$$

$$E_{nom} = 600(Wh)$$

La batería presenta una energía nominal de 600Wh, la cual actúa como reserva para mantener la operación del nodo en periodos sin aporte del panel solar. No obstante, para el análisis de autonomía se consideró una profundidad de descarga (DoD) conservadora del 50%, con el fin de representar una condición de operación más realista y adecuada para este tipo de baterías. En consecuencia, la energía útil estimada del sistema de almacenamiento se calcula a partir de la Ecuación 26.

Ecuación 26.

Energía útil almacenada

$$E_{util} = E_{nom} * DoD$$

Aplicando valores tenemos:

$$E_{util} = 600(Wh) * 0{,}5$$

$$E_{util} = 300(Wh)$$

A partir de este valor y de la potencia consumida por el nodo sensor en operación base, la autonomía estimada del sistema en ausencia de aporte solar se calcula mediante la Ecuación 27.

Ecuación 27.

Autonomía del sistema en ausencia de aporte solar

$$t = \frac{E_{util}}{P}$$

Aplicando valores tenemos:

$$t = \frac{300(Wh)}{0{,}702(W)}$$

$$t = 427{,}35(h)$$

Expresando en días, se obtiene:

$$t = \frac{427{,}35(h)}{24(h)}$$

$$t = 17{,}81\ días$$

Por tanto, la autonomía estimada del sistema en condición base y sin aporte solar es de aproximadamente 18 días, considerando una profundidad de descarga del 50%. Durante la prueba experimental realizada únicamente con alimentación de la batería, el sistema permaneció en funcionamiento durante 10 días continuos, partiendo de un voltaje inicial de 12,8V y finalizando con un voltaje de 12,4V. El valor inicial es consistente con el comportamiento de una batería AGM completamente cargada, mientras que el voltaje final de 12,4 V corresponde aproximadamente al 50% de su capacidad de carga. Este resultado es relevante, ya que para este tipo de baterías se recomienda evitar descargas por debajo de valores cercanos a 11,8V, con el fin de preservar su vida útil. En este contexto, se evidencia que el sistema operó dentro de un rango seguro durante todo el periodo de evaluación.

4.5.8.7. Autonomía estimada bajo activación continua de la electroválvula.

Con el fin de analizar el comportamiento energético del sistema bajo una condición más crítica de funcionamiento, se estimó la autonomía del prototipo suponiendo una activación continua de la electroválvula. Esta condición representa el escenario de mayor demanda eléctrica del sistema, ya que incorpora de forma permanente el consumo del actuador al consumo base del nodo sensor. Aunque esta situación no corresponde al modo normal de operación del prototipo, su evaluación permite establecer un límite de referencia para el análisis de autonomía en condiciones de alta exigencia energética.

De acuerdo con los resultados obtenidos previamente, la potencia total del sistema con la electroválvula activada fue de 5,4W. Tomando como referencia la energía útil disponible de la batería, estimada en 300Wh al considerar una profundidad de descarga del 50%, la autonomía del sistema en este escenario se calcula mediante la Ecuación 27.

Aplicando valores tenemos:

$$t = \frac{300(Wh)}{5{,}4(W)}$$

$$t = 55{,}56(h)$$

Expresando en días, se obtiene:

$$t = \frac{55{,}56(h)}{24(h)}$$

$$t = 2{,}31\ días$$

La autonomía estimada del sistema bajo activación continua de la electroválvula es de aproximadamente 2 días, considerando una condición conservadora de descarga útil de la batería. Este resultado evidencia una reducción significativa respecto a la autonomía obtenida en operación base, lo cual confirma que la etapa de actuación constituye el estado de mayor exigencia energética dentro del prototipo.

No obstante, es importante señalar que esta estimación corresponde a un escenario teórico extremo, ya que en la operación real del sistema la electroválvula no permanece energizada de manera continua. En consecuencia, la autonomía práctica del prototipo será mayor que la calculada y dependerá del tiempo efectivo de activación del actuador. Aun así, este análisis permite demostrar que, incluso bajo una condición de consumo máximo sostenido, el sistema mantiene una autonomía cercana a dos días.

4.5.8.8. Comportamiento funcional del sistema ante la disminución del voltaje.

Con el propósito de analizar la respuesta operativa del prototipo frente a la disminución del voltaje de alimentación, se realizaron pruebas de funcionamiento bajo distintos niveles de

carga en la batería. A partir de estas pruebas se observó que, cuando el voltaje desciende por debajo de 12V, la electroválvula deja de activarse, mientras que el nodo sensor continúa operando con normalidad. Esto permite identificar dos niveles de funcionamiento: uno asociado a las funciones electrónicas del sistema, que se mantienen a menor voltaje, y otro correspondiente a la etapa de actuación, que requiere un voltaje mínimo de 12V.

En este sentido, la disminución del voltaje no genera una interrupción total del sistema, sino una pérdida parcial de funcionalidad limitada a la electroválvula. Por tanto, el umbral de 12V se establece como condición mínima para la operación del control del actuador, evidenciando que la etapa de actuación es la primera en verse afectada ante la reducción de la energía disponible en la batería.

4.5.8.9. Análisis de la viabilidad energética del sistema auto-energizable.

Los resultados obtenidos muestran que el sistema presenta una condición energética favorable para operar de manera autónoma. En operación base, el nodo sensor registró un consumo de 58,5mA y una potencia de 0,702W, lo que equivale a una demanda aproximada de 16,848Wh/día. Frente a este requerimiento, el sistema fotovoltaico implementado puede suministrar alrededor de 360Wh/día, considerando un panel de 120W, 4 horas sol pico y una eficiencia del 75%. Esto indica que la energía generada es suficiente para alimentar el sistema y recargar la batería.

En cuanto al almacenamiento, la batería AGM de 12V y 50Ah proporciona una energía nominal de 600Wh y una energía útil estimada de 300Wh, considerando una profundidad de descarga del 50%. Con estos valores, la autonomía teórica del sistema en operación base fue de 18 días. Además, en la prueba experimental sin aporte solar, el sistema se mantuvo funcionando durante más de 10 días, lo que confirma que el nodo puede seguir operando por varios días solo con la energía almacenada.

Por otro lado, cuando la electroválvula permanece activada de forma continua, la autonomía estimada se reduce a 2 días, lo que confirma que esta etapa representa la condición de mayor consumo del sistema. A esto se suma que, de acuerdo con las pruebas realizadas, la electroválvula solo se activa correctamente cuando el voltaje de alimentación es mayor o igual a 12V. Si el voltaje baja de ese valor, el resto del sistema continúa funcionando, pero ya no se garantiza la actuación de la válvula.

Estos resultados permiten afirmar que el prototipo sí es energéticamente viable como sistema auto-energizable. El bajo consumo del nodo, la capacidad de generación del panel solar, el respaldo de la batería y la autonomía observada en las pruebas demuestran que la propuesta puede mantener sus funciones principales de monitoreo y transmisión, y también su capacidad de actuación mientras el nivel de voltaje sea adecuado.

4.6. Análisis de precisión del sensor de flujo

En esta sección se presentan los resultados estadísticos obtenidos a partir de las mediciones del sensor de flujo. Se calcula indicadores como el error promedio absoluto, la media, la mediana, el error máximo y mínimo, la varianza, la desviación estándar y el intervalo de confianza, con el fin de evaluar la precisión y consistencia de las mediciones en los diferentes rangos de operación.

Media: representa el valor promedio de todos los errores registrados durante las mediciones. Este indicador permite determinar si el sensor tiende a sobreestimar o subestimar el volumen real. La media se calcula mediante la Ecuación 28.

Ecuación 28.

Media aritmética

$$\tilde{x} = \frac{\sum x_i}{n}$$

Donde:

$\boldsymbol{x_i}$**:** representa cada valor de error registrado

$\boldsymbol{n}$**:** es el número total de mediciones

Aplicando valores tenemos:

$$\tilde{x} = \frac{\begin{array}{c}0.3 + 0.3 + 0.1 + 0.2 - 0.2 + 0.4 - 0.5 - 0.3 + 0.3 - 0.4 \\ + 0.5 + 0.1 + 0.2 + 0.3 - 0.3 + 0.4 - 0.5 + 0.3 - 0.2 + 0.1 \\ - 0.5 - 0.4 + 0.2 + 0.3 - 0.2 + 0.5 - 0.3 + 0.1 + 0.3 - 0.4\end{array}}{30}$$

$$\tilde{x} = \frac{0.63}{30}$$

$$\tilde{x} = 0.02\%$$

El valor promedio obtenido de 0.02% indica que el sensor presenta un comportamiento prácticamente equilibrado, con una ligera tendencia a sobreestimar el volumen medido. Sin embargo, este sesgo es extremadamente pequeño y despreciable en términos prácticos.

Mediana: corresponde al valor central del conjunto de datos cuando estos se ordenan de menor a mayor. Este indicador es útil para identificar el valor representativo de las mediciones cuando existen posibles valores extremos. La mediana se calcula mediante la Ecuación 29.

Ecuación 29.

Mediana

$$Me = \frac{x_{\frac{n}{2}} + x_{\frac{n}{2}+1}}{2}$$

Donde:

$\boldsymbol{n}$**:** número total de datos

$\boldsymbol{x_i}$**:** valor en la posición i, con los datos ordenados de menor a mayor

Por lo tanto, para calcular la mediana primero debemos ordenar los datos de menor a mayor, como se muestra a continuación:

$$-0.5, -0.5, -0.5, -0.4, -0.4, -0.4, -0.3, -0.3, -0.3, -0.2, -0.2, -0.2,$$

$$0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.2, 0.2, 0.2, 0.3, 0.3, 0.3, 0.3, 0.3, 0.3, 0.3, 0.4, 0.4, 0.5, 0.5$$

Aplicamos la ecuación:

$$Me = \frac{0.1 + 0.1}{2}$$

$$Me = 0.1\%$$

El valor de la mediana obtenida confirma que la mayoría de las mediciones presentan un error muy cercano a cero, lo que evidencia que el sensor mantiene un comportamiento estable y consistente en la estimación del volumen.

Varianza: mide la dispersión de los datos respecto a la media, permitiendo cuantificar qué tan alejadas se encuentran las mediciones individuales del valor promedio. La varianza se calcula mediante la Ecuación 30.

Ecuación 30.

Varianza

$$\sigma^2 = \frac{\sum(x_i - \tilde{x})^2}{n}$$

Aplicando la ecuación tenemos:

$$\sigma^2 = \frac{3.22}{30}$$

$$\sigma^2 \cong 0.11$$

El valor relativamente bajo de varianza indica que los errores de medición presentan poca dispersión, lo que significa que las mediciones del sensor son relativamente consistentes entre sí.

Desviación estándar: mide la dispersión de un conjunto de datos respecto a su media. Indica qué tan agrupados o dispersos están los valores respecto al promedio. La desviación estándar se calcula mediante la Ecuación 31.

Ecuación 31.

Desviación estándar

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2}$$

Aplicando la ecuación tenemos:

$$\sigma = \sqrt{0.11}$$

$$\sigma \cong 0.33$$

Esto significa que la mayoría de las mediciones del sensor se encuentran aproximadamente dentro de ±0.38% alrededor del valor promedio, lo cual evidencia una buena estabilidad en la medición del volumen.

Intervalo de confianza: permite estimar el rango dentro del cual se encuentra el error promedio real del sensor con una probabilidad del 95 %. El intervalo de confianza se calcula mediante la Ecuación 32.

Ecuación 32.

Intervalo de confianza

$$IC = \tilde{x} \pm Z\frac{s}{\sqrt{n}}$$

Donde:

$\boldsymbol{Z}$**:** 1.96 para un nivel de confianza del 95 %.

$\boldsymbol{s}$**:** es la desviación estándar.

$\boldsymbol{n}$**:** es el número de mediciones.

Aplicando la ecuación tenemos:

$$IC = 0.02 \pm 1.96\frac{0.38}{\sqrt{30}}$$

$$IC = 0.02 \pm 0.12$$

Este resultado indica que el error promedio real del sensor se encuentra dentro de un rango muy cercano a cero, lo que indica alta confiabilidad del sensor para medir el volumen de agua en las condiciones evaluadas.

El error promedio absoluto es de aproximadamente 0.30%, lo que indica que, en términos generales, las mediciones del sensor se desvían muy poco del valor de referencia. Este

valor refleja la magnitud típica de las desviaciones y demuestra que, independientemente de si se sobreestima o subestima, el sensor mantiene un nivel de precisión alto y consistente.

El error máximo absoluto registrado es de 0.50%, correspondiente a la mayor desviación del sensor respecto al medidor de referencia. Este valor representa el límite máximo de dispersión observado, indicando que incluso en la medición más extrema, la variabilidad se mantiene relativamente baja y adecuada para aplicaciones de control de flujo.

El error mínimo absoluto es de 0.10%, indicando la medición más cercana al valor real de referencia. Este valor refleja la capacidad del sensor para ofrecer mediciones muy precisas en condiciones ideales, y evidencia que algunas lecturas pueden estar prácticamente sin desviación, reforzando la confiabilidad del instrumento.

De manera complementaria, los mismos indicadores estadísticos, serán calculados de forma individual para cada uno de los tres rangos operativos: bajo, medio y alto. Este análisis permitirá evaluar el desempeño del sensor en condiciones específicas de flujo, identificar posibles variaciones propias de cada rango y verificar la consistencia y confiabilidad de las mediciones a lo largo de todo el intervalo de operación. La Tabla 50, presenta un resumen de los resultados estadísticos obtenidos en los tres rangos de operación y el general.

Tabla 50.

Resumen estadístico

Rango de Caudal / Análisis Estadístico	Bajo	Medio	Alto	General
Error promedio	0,30	0,29	0,32	0,30
Error máximo	0,50	0,50	0,50	0,50
Error mínimo	0,10	0,10	0,10	0,10
Media	0,02	0,09	-0,14	0,02
Mediana	0,15	0,15	-0,25	0,10
Varianza	0,10	0,09	0,10	0,11
Desviación estándar	0,32	0,31	0,31	0,33
Intervalo de confianza	0,02 ±0,23 [-0,21, 0,25]	0,09 ±0,22 [-0,13, 0,31]	-0,14 ±0,22 [-0,36, 0,08]	0,02 ±0,12 [-0,10, 0,14]

Nota: Elaborado por propio autor, 2025.

4.7. Socialización del sistema

El sistema fue socializado con la Junta Administradora de Agua Potable de la comunidad, donde se explicó de manera general su operatividad, los módulos principales que lo conforman y el impacto que puede generar en la gestión del servicio de agua potable, como se muestra en la Figura 129. A su vez, se realizó una encuesta de evaluación de usabilidad y funcionalidad del sistema propuesto. El **Anexo 13:** *Formato de encuesta de evaluación de usabilidad y funcionalidad del sistema propuesto* muestra el formato de la encuesta aplicada, mientras que el **Anexo 14:** *Encuesta de evaluación de usabilidad y funcionalidad del sistema propuesto*, presenta la encuesta realizada a miembros de la Junta.

Figura 129.

Socialización del sistema



Nota: Autoría propia, 2025.

En la Figura 130 se presenta el nodo Sensor instalado al presidente de la Junta Administradora de Agua Potable, evidenciando la participación y supervisión durante la implementación del sistema.

Figura 130.

Presentación del nodo Sensor



Nota: Autoría propia, 2025.

4.8. Análisis Costo/Beneficio

El desarrollo del sistema auto-energizable de medición y envío inalámbrico del consumo del agua potable involucra la adquisición de diversos componentes de hardware necesarios para la implementación de los nodos y la infraestructura del sistema. Así mismo, fue necesario contratar servicios en la nube para alojar, procesar y gestionar la información generada. Estos elementos representan la inversión inicial requerida para el desarrollo del proyecto.

4.8.1. Costo de Hardware

Este apartado presenta los componentes de hardware necesarios para la implementación del nodo Sensor, la fuente de alimentación auto-energizable y el nodo Gateway. A continuación, se presentan tablas con los componentes correspondientes para cada parte del sistema y su valor de mercado.

En la Tabla 51 se presentan los componentes correspondientes al nodo Sensor, junto con su valor de mercado.

Tabla 51.

Costo de Hardware de nodo Sensor

Componente	**Cantidad**	**Valor Unitario**	**Valor Total**
Esp32 LoRa Heltec	1	$60,00	$60,00
Electroválvula NA	1	$23,70	$23,70
Sensor de Flujo de Agua YF-201	1	$13,00	$13,00
Módulo de Tiempo RTC DS1307	1	$ 8,00	$ 8,00
Módulo Relé 1 Canal	1	$ 2,00	$ 2,00
Resistencia 10K	1	$ 0,10	$ 0,10
Transistor 2N3904	1	$ 0,15	$ 0,15
Convertidor Voltaje DC-DC LM2596	1	$ 3,00	$ 3,00
Jumpers Macho - Hembra	10	$ 0,10	$ 1,00
Baquelita	1	$ 3,00	$ 3,00
Header Hembra	1	$ 0,40	$ 0,40
Bornera 2 Vías	1	$ 0,25	$ 0,25
Bornera 3 Vías	2	$ 0,50	$ 1,00
Conectores Eléctricos	2	$ 0,20	$ 0,40
Case	1	$20,00	$20,00
Total			**$136,00**

Nota: Elaborado por propio autor, 2025.

En la Tabla 52 se presentan los componentes correspondientes a la fuente de alimentación auto-energizable, junto con su valor de mercado.

Tabla 52.

Costo de Hardware de fuente de alimentación auto-energizable

Componente	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total
Panel Solar 120W	1	$80,00	$80,00
Controlador de Carga 20A	1	$15,00	$15,00
Batería 50AH	1	$100,00	$100,00
Conectores MC4	1	$ 5,00	$ 5,00
Cable 14AWG (m)	10	$ 0,80	$ 8,00
Conectores Eléctricos	8	$ 0,35	$ 2,80
Case	1	$ 3,00	$ 3,00
Estructura	1	$10,00	$10,00
Pernos	8	$ 0,50	$ 4,00
Total			**$227,80**

Nota: Elaborado por propio autor, 2025.

En la Tabla 53 se presentan los componentes correspondientes al nodo Gateway, junto con su valor de mercado.

Tabla 53.

Costo de Hardware de nodo Gateway

Componente	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total
Esp32 LoRa Heltec	1	$60,00	$60,00
Fuente de Alimentación 5V	1	$ 2,50	$ 2,50
Cable 12AWG (m)	6	$ 0,65	$ 3,90
Conectores Eléctricos	2	$ 0,20	$ 0,40
Case	1	$ 3,00	$ 3,00
Total			**$69.80**

Nota: Elaborado por propio autor, 2025.

4.8.2. Costo de Software

Este apartado presenta los recursos de software y servicios tecnológicos requeridos para la implementación del sistema, junto con sus costos asociados, Es importante resaltar que se empleó principalmente software libre o versiones gratuitas de prueba, por lo que no se incurrió en gastos de licencias. En la Tabla 54, se presenta el presupuesto correspondiente al software.

Tabla 54.

Costo de Software para el sistema

Software	Descripción	Valor
IDE Arduino	Herramienta utilizada para el desarrollo, compilación y carga del código en los microcontroladores de los nodos Sensor y Gateway.	$0,00
Radio Mobile	Software empleado para la simulación y análisis del enlace inalámbrico entre el nodo Sensor y el Gateway.	$0,00
Fritzing	Herramienta utilizada para el diseño de los diagramas de conexión eléctrica.	$0,00
SolidWorks	Software de modelado 3D empleado para el diseño del case de protección de los nodos.	$0,00
Fusion 360	Software utilizado para el diseño de la placa electrónica (PCB) del sistema.	$0,00
Google Cloud	Servicio en la nube utilizado para el alojamiento y gestión de la plataforma del sistema, permitiendo el procesamiento, almacenamiento y acceso remoto a los datos transmitidos por los nodos.	$180,00
Total		**$180,00**

Nota: Elaborado por propio autor, 2025.

4.8.3. Costo de Ingeniería

Dado que la Junta Administradora de Agua Potable de la comunidad no cuenta con información referencial sobre los costos asociados al desarrollo e implementación de un sistema auto-energizable de medición y transmisión inalámbrica de consumo de agua potable,

se ha considerado estimar los costos de ingeniería correspondiente al diseño, programación, integración e implementación del sistema. Haciendo referencia únicamente a la implementación de un nodo Sensor y un nodo Gateway como prototipo funcional, no contemplando el despliegue total del sistema a gran escala.

Se tomó como referencia la jornada laboral estándar en Ecuador, correspondiente a 8 horas diarias durante los 5 días a la semana, con el fin de estimar de manera realista el esfuerzo técnico invertido en el desarrollo del proyecto. Así mismo, se consideró como base el Salario Básico Unificado vigente en el país, el cual, según el (Ministerio del Trabajo, 2025), corresponde a $482.00.

La Tabla 55, presenta el costo de ingeniería estimado para el desarrollo e implementación del sistema auto-energizable de medición y transmisión inalámbrica de consumo de agua potable.

Tabla 55.

Costo de Ingeniería

Descripción	**# Días**	**Costo**
Diseño de case de nodos	2	$15,00
Simulación de enlace de comunicación inalámbrica	1	$10,00
Implementación de componentes de cada nodo	1	$10,00
Programación en Arduino	8	$250,00
Instalación de Plataforma de gestión de datos	5	$100,00
Programación de sitio web	10	$120,00
Instalación del sistema	1	$30,00
Mantenimiento del sistema	2	$50,00
Total		**$585,00**

Nota: Elaborado por propio autor, 2025.

4.8.4. Costo General del Sistema

La Tabla 56 presenta el costo general estimado del sistema, desglosando los valores correspondientes al hardware, software y costos de ingeniería asociados al desarrollo e implementación.

Tabla 56.

Costo general del sistema

Tipo de Costo	Costo de Mercado	Costo Actual
Costo Hardware	$433,60	$433,60
Costo Software	$180,00	$180,00
Costo Ingeniería	$585,00	$ 0,00
Total	**$1.198,60**	**$613.60**

Nota: Elaborado por propio autor, 2025.

A su vez, la vida útil del prototipo está determinada por la interacción de sus componentes y las condiciones reales de operación, tales como humedad, temperatura, calidad del agua, ciclos de conmutación y régimen energético. Dado que cada componente electrónico presenta mecanismos de degradación diferenciados, se presenta la información mediante la Tabla 57, con el fin de facilitar una apreciación clara de la durabilidad estimada de los principales elementos que conforman el sistema.

Es importante resaltar que componentes electrónicos como el microcontrolador y los módulos RTC, tienden a presentar una mayor vida útil debido a la ausencia de desgaste mecánico directo, siendo su degradación principalmente influenciada por factores ambientales y eléctricos. En contraste, los elementos con interacción física o sometidos a condiciones operativas exigentes, como el sensor de flujo, la electroválvula y el sistema de almacenamiento energético, presentan una vida útil más limitada, asociada a fenómenos de desgaste, fatiga y ciclos de operación.

Tabla 57.

Ciclo de vida de trabajo de los componentes electrónicos del prototipo

Componente	Vida útil estimada	Condiciones de operación (según su datasheet)
ESP32 LoRa	≥ 5 años	<85°C, operación continua
RTC DS1307	≥ 5 años	<70°C, operación en baja potencia
Sensor de flujo YF-S201	~ 3 años	<80°C, agua limpia, presión ≤ 1.75 MPa, desgaste por turbina
Electroválvula 12 V	~ 3 años	<80°C, 500.000 ciclos de conmutación
Batería AGM 12 V	~ 3 años	20°C–25°C óptimo, descarga cíclica, degradación por profundidad de descarga.
Controlador de carga	≥ 5 años	<50°C, operación continua en sistema fotovoltaico
Panel fotovoltaico	≥ 20 años	<85°C, degradación <0.5% anual, exposición solar directa

Nota: Los valores de vida útil y condiciones de operación han sido obtenidos a partir de los datasheets de los fabricantes y especificaciones técnicas estándar de cada componente. Elaborado por propio autor, 2025.

El mantenimiento debe realizarse al menos dos veces al año, con el fin de garantizar su correcto funcionamiento y prolongar la vida útil de los componentes. Durante estas intervenciones se debe efectuar una inspección general del sistema, que incluya la limpieza del panel fotovoltaico para asegurar una adecuada captación de energía, la verificación de la transmisión de datos y la revisión completa del cableado y de los conectores. Así mismo, se recomienda realizar la limpieza del sensor de flujo para evitar afectaciones en la medición, ejecutar pruebas funcionales de la electroválvula para comprobar su correcta operación, verificar el estado de carga de la batería y comprobar el funcionamiento del módulo RTC.

4.8.5. Costo de despliegue total del sistema

Una vez establecido el presupuesto para la implementación del prototipo del sistema, resulta necesario estimar el costo que implicaría su despliegue a gran escala. Para ello, se

considera que la comunidad cuenta actualmente con 63 medidores registrados, lo que permite proyectar la inversión requerida para una implementación total.

Esta estimación incorpora además un 10% de margen destinado a cubrir posibles eventualidades o imprevistos técnicos que puedan surgir durante el proceso de instalación y puesta en funcionamiento. El presupuesto para el despliegue total del sistema se presenta en la Tabla 58 a continuación.

Tabla 58.

Costo de implementación total del sistema en la comunidad

Costo de Hardware			
Nodo Sensor			
Componente	**Cantidad**	**Valor Unitario**	**Valor Total**
Esp32 LoRa Heltec X90	63	$60,99	$1.829,70
Electroválvula NA	63	$18,00	$1.134,00
Sensor de Flujo de Agua YF-201	63	$6,00	$ 378,00
Módulo de Tiempo RTC DS1307	63	$ 3,00	$ 189,00
Módulo Relé 1 Canal	63	$ 2,00	$ 126,00
Resistencia 10K	63	$ 0,05	$ 3,15
Transistor 2N3904	63	$ 0,10	$ 6,30
Convertidor Voltaje DC-DC LM2596	63	$ 1,88	$ 118,44
Jumpers Macho - Hembra	630	$ 0,05	$ 31,50
Baquelita	63	$ 1,50	$ 94,50
Header Hembra	63	$ 0,25	$ 15,75
Bornera 2 Vías	163	$ 0,15	$ 24,45
Bornera 3 Vías	126	$ 0,25	$ 31,50
Conectores Eléctricos	126	$ 0,10	$ 12,60
Case	63	$15,00	$ 945,00
Total Nodo Sensor			**$4.939,89**

Fuente de alimentación auto-energizable			
Componente	**Cantidad**	**Valor Unitario**	**Valor Total**
Panel Solar 40W	63	$25,00	$1.575,00
Controlador de Carga 20A	63	$13,50	$ 850,50
Batería 25AH	63	$45,00	$2.835,00
Conectores MC4 X 100	63	$ 70,00	$ 70,00
Cable 14AWG (m)	60	$ 0,80	$ 48,00
Conectores Eléctricos	504	$ 0,15	$ 75,60
Case	63	$ 3,00	$ 189,00
Pernos	540	$ 0,25	$ 50,00
Total Fuente de alimentación auto-energizable			**$5693,10**

Nodo Gateway			
Componente	**Cantidad**	**Valor Unitario**	**Valor Total**
Esp32 LoRa Heltec x3	6	$60,99	$121.98
Fuente de Alimentación 5V	6	$ 2,00	$ 12,00
Cable 12AWG (m)	30	$ 0,65	$ 19,50
Conectores Eléctricos	12	$ 0,20	$ 2,40
Case	6	$ 3,00	$ 18,00
Total Nodo Gateway			**$173.88**

Costo de Software		
Software	**Descripción**	**Valor**
IDE Arduino	Herramienta utilizada para el desarrollo, compilación y carga del código en los microcontroladores de los nodos Sensor y Gateway.	$0,00
Radio Mobile	Software empleado para la simulación y análisis del enlace inalámbrico LoRa.	$0,00
Fritzing	Herramienta utilizada para el diseño de los diagramas de conexión eléctrica.	$0,00
SolidWorks	Software de modelado 3D empleado para el diseño del case de protección de los nodos.	$0,00
Fusion 360	Software utilizado para el diseño de la placa electrónica (PCB) del sistema.	$0,00

Google Cloud	Servicio en la nube utilizado para el alojamiento y gestión de la plataforma del sistema, permitiendo el procesamiento, almacenamiento y acceso remoto a los datos transmitidos por los nodos.	$180,00
Total Costo de Software		**$180,00**

Costo de Ingeniería

Descripción	**# Días**	**Costo**
Diseño de case de nodos	2	$ 10,00
Simulación de enlace de comunicación inalámbrica	1	$ 10,00
Implementación de componentes de cada nodo	10	$ 60,00
Programación en Arduino	8	$250,00
Instalación de Plataforma de gestión de datos	5	$100,00
Programación de sitio web	10	$120,00
Mantenimiento del sistema	2	$ 50,00
Total Costo de Ingeniería		**$600,00**

Mano de obra

Detalle	**Cantidad**	**Valor Unitario**	**Valor Total**
Instalación medidores electrónicos	63	$25,00	$1.575,00
Instalación Gateway	6	$25,00	$ 150,00
Total Mano de obra			**$1.725,00**
		Subtotal	$13.131,87
		Imprevistos 10%	$ 1.313,19
		Total	**$14.445,56**

Nota: Elaborado por propio autor, 2025.

La Tabla 58, presenta el costo total estimado para el despliegue completo del sistema propuesto en la comunidad, el valor por medidor es de aproximadamente 230 dólares. No obstante, es importante destacar que la implementación puede realizarse de manera progresiva, mediante un esquema por fases o sectores. Este enfoque permite distribuir la inversión inicial y ajustarla de acuerdo con las capacidades económicas y operativas de la Junta Administradora de Agua Potable, evitando la necesidad de realizar un desembolso total inmediato.

Este modelo escalonado, además, permite optimizar y automatizar procesos, realizar ajustes técnicos y fortalecer la aceptación del sistema entre los usuarios antes de su expansión total. En consecuencia, la implementación por fases convierte al sistema en una alternativa técnicamente viable y económicamente sostenible, alineada con un modelo de inversión progresiva y rentable para la comunidad.

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

Al finalizar el desarrollo e implementación del sistema auto-energizable de medición y envío inalámbrico del consumo de agua potable, se comprobó el funcionamiento conjunto de los elementos que conforman la propuesta, incluyendo el nodo sensor, el nodo gateway, la plataforma web de gestión y la base de datos. La integración de hardware y software permitió validar no solo la adquisición de datos, sino también su transmisión, almacenamiento, visualización y utilización para procesos administrativos como la facturación y el control del servicio, evidenciando que el sistema opera de manera integral bajo condiciones reales de uso.

Dado el historial de Ecuador en períodos de estiaje durante los cuales el país ha enfrentado racionamientos y emergencias eléctricas, el sistema auto-energizable de medición propuesto adquiere una relevancia aún mayor en la gestión comunitaria del agua potable. Ya que, al operar de manera independiente a la red eléctrica convencional, este sistema mantiene su funcionamiento incluso ante interrupciones del suministro eléctrico. Esta característica le confiere un alto valor práctico y estratégico frente a otros sistemas inteligentes de medición del consumo de agua potable, ya que garantiza la continuidad operativa en contextos de inestabilidad energética.

Durante las pruebas de comunicación inalámbrica se determinó que la tecnología LoRa constituye una alternativa adecuada para el contexto rural de aplicación del proyecto. Bajo la configuración evaluada de SF9 y 14 dBm, el enlace mostró un desempeño óptimo a 200m, alta confiabilidad a 400m y un comportamiento todavía funcional a 600m, mientras que a mayores distancias el sistema continuó operando, aunque con una disminución progresiva en la tasa de entrega de paquetes. Estos resultados permiten concluir que el sistema propuesto dispone de una capacidad de cobertura suficiente para escenarios comunitarios donde se requiere transmisión de datos a larga distancia.

La incorporación de AES-128 GCM en el enlace de comunicación LoRa incrementó la latencia media del enlace en aproximadamente 248–265ms en las distancias evaluadas y tendió a reducir la confiabilidad del sistema en los escenarios más exigentes, especialmente a 1000m, donde el PDR descendió de 84.80% a 67.30%. Este comportamiento evidencia que la inclusión de mecanismos criptográficos introduce una sobrecarga adicional en el proceso de transmisión y validación de tramas, la cual se vuelve más crítica a medida que disminuye el margen operativo del enlace. No obstante, el sistema mantuvo capacidad de comunicación funcional en todos los casos analizados, lo que demuestra que la implementación de AES-128 GCM es técnicamente viable.

El análisis estadístico realizado sobre las mediciones del sensor de flujo evidenció un comportamiento estable y consistente respecto al medidor mecánico de referencia. El error promedio absoluto obtenido fue aproximadamente de 0,30%, con un error máximo absoluto de 0,50% y un error mínimo absoluto de 0,10%, lo que demuestra que el sensor mantiene un nivel adecuado de precisión para la medición del volumen de agua potable.

La comparación entre la facturación generada por el sistema y la emitida por la Junta Administradora de Agua Potable mostró diferencias pequeñas en los dos domicilios evaluados. En el primer caso, los errores se ubicaron entre 1,55% y -3,13% lo que indica un ligero sesgo del sistema hacia la subestimación de consumo de agua potable, mientras que en el segundo se situaron entre 1,14% y 3,29% reflejando una leve tendencia hacia la sobrestimación, manteniéndose dentro de márgenes técnicamente aceptables para medidores en uso. Esto permite concluir que el sistema desarrollado mide el consumo con buena aproximación, y además puede servir como base válida para procesos de cálculo y generación de facturación en entornos comunitarios.

Las pruebas de funcionamiento de la plataforma web y de la base de datos confirmaron que el sistema permite gestionar adecuadamente el acceso de usuarios, la visualización de datos, el control de privilegios, el registro de clientes, medidores y gateways, así como el almacenamiento persistente de lecturas y facturas. De igual manera, el sistema de control remoto del actuador respondió satisfactoriamente durante las pruebas de activación y desactivación de la electroválvula, lo que demuestra que la propuesta no se limita al monitoreo del consumo, sino que incorpora capacidad efectiva de actuación sobre el servicio.

El análisis energético determinó que el nodo sensor presenta un consumo reducido en operación base, con una potencia de 0,702W y una demanda aproximada de 16,85Wh por día. Frente a ello, el sistema fotovoltaico implementado puede suministrar alrededor de 360Wh diarios, mientras que la batería proporciona una autonomía teórica de 17,81 días sin aporte solar y una autonomía experimental superior a 10 días en prueba real. Aunque la activación continua de la electroválvula reduce considerablemente la autonomía y su funcionamiento deja de estar garantizado por debajo de 12V, los resultados demuestran que el prototipo es energéticamente viable como sistema auto-energizable para aplicaciones de monitoreo y transmisión en campo.

En conjunto, el análisis de la vida útil de los componentes del prototipo evidencia que la durabilidad del sistema está condicionada tanto por la calidad de sus elementos como por las condiciones reales de operación. Mientras que los componentes electrónicos sin desgaste mecánico directo presentan una mayor estabilidad y prolongada vida útil, los elementos sometidos a interacción física y ciclos de trabajo intensivos requieren una mayor atención debido a su desgaste progresivo. No obstante, mediante la aplicación de un mantenimiento preventivo periódico, es posible mitigar estos efectos, garantizar el correcto funcionamiento del sistema y extender su tiempo de servicio.

Finalmente, el análisis económico mostró que, aunque el despliegue total del sistema en la comunidad representa una inversión importante, su implementación por fases constituye una estrategia técnicamente viable y económicamente sostenible. El costo estimado total para 63 medidores fue de 14.445,56 dólares, con un valor aproximado de 230 dólares por medidor, lo que sugiere que la adopción progresiva del sistema permitiría distribuir la inversión, optimizar ajustes técnicos en campo y favorecer la aceptación comunitaria antes de una expansión completa, no obstante, es importante considerar que estos valores pueden variar en el tiempo debido a fluctuaciones en los precios de los componentes electrónicos y materiales, lo cual podría influir en el costo final de implementación del sistema.

Recomendaciones

Para manipular los dispositivos que conforman el sistema, se debe realizar de manera cuidadosa y ordenada. Es importante des energizar el nodo sensor y el nodo gateway antes de efectuar cambios en las conexiones, en la alimentación o en los componentes electrónicos, con el fin de evitar daños en los microcontroladores, sensores y actuadores. Esta medida también contribuye a preservar la vida útil de los elementos implementados y a reducir gastos innecesarios por reposición de componentes.

Para realizar mejoras al sistema es recomendable optimizar los recursos económicos y técnicos, de manera que la propuesta mantenga su viabilidad para contextos comunitarios y rurales. Considerando que el despliegue total del sistema representa una inversión importante, resulta conveniente plantear implementaciones progresivas por fases, priorizando sectores estratégicos o usuarios piloto, con el propósito de facilitar la adopción del sistema y evaluar su comportamiento antes de una ampliación total.

Para garantizar que la comunicación inalámbrica se mantenga estable y funcional, es recomendable conservar una configuración LoRa acorde a las condiciones reales del entorno de instalación y evitar modificaciones innecesarias en parámetros críticos si no se dispone de una nueva validación experimental. Las pruebas desarrolladas evidenciaron que el enlace presenta mejor desempeño en escenarios de menor distancia y que su comportamiento se degrada progresivamente al aumentar la separación entre nodos, por lo que toda modificación debe ir acompañada de nuevas pruebas de cobertura y estabilidad del enlace.

Se recomienda establecer un mantenimiento preventivo del sistema al menos dos veces al año, con el fin de asegurar el funcionamiento adecuado de los nodos, de la plataforma y de la fuente de alimentación auto-energizable. Durante las revisiones es importante verificar el estado del sensor de flujo, la electroválvula, las conexiones eléctricas, el panel solar, la batería y los elementos de protección del sistema.

Para investigaciones futuras, conviene diseñar un mecanismo que permita retirar o reemplazar de forma más rápida y sencilla el sensor de flujo y la electroválvula en caso de daño o mantenimiento. En la configuración actual, esta intervención requiere desmontar la tubería, lo que dificulta el trabajo técnico y aumenta el tiempo de reparación. Por ello, sería conveniente incorporar un diseño modular o acoples desmontables que faciliten el acceso a estos componentes sin desarmar toda la instalación.

De igual manera, se recomienda proyectar una versión ampliada del sistema, en la que no solo se mantenga la medición y transmisión del consumo de agua potable, sino que también se incorporen nuevas funcionalidades orientadas al fortalecimiento operativo y tecnológico de la solución. Entre estas mejoras, resulta pertinente considerar la migración a esquema basado en LoRaWAN, lo que permitiría una mayor escalabilidad, mejor administración de nodos y una integración más robusta en entornos de monitoreo distribuidos. Así mismo, sería conveniente evaluar el uso de dispositivos y módulos de mayor robustez, capaces de ofrecer mejor estabilidad, resistencia y desempeño en condiciones reales de operación, sin comprometer la viabilidad técnica y económica del proyecto. Complementariamente, podrían integrarse alertas por bajo voltaje y estrategias de optimización energética para la electroválvula, con el fin de mejorar la autonomía y confiabilidad del sistema. En conjunto, estas mejoras permitirían consolidar la propuesta como una plataforma más completa, escalable y sostenible para apoyar la supervisión, el control y la toma de decisiones.

Bibliografía

Adel, I., & Al, A. (2006). WiFi Technology: Future Market Challenges and Opportunities. *Journal of Computer Science*, *2*. https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=037bc25eae361a0b0fd4c09cc653f43acdfe1791

Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones. (2022). *Reformas Normativas Para La Implementación Y Aplicación Del Nuevo Servicio De Conectividad De Internet De Los Objetos IoT*. 19–20. https://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/2023/05/informe_it-crds-gr-2022-046.pdf

Agencia de Regulación y Control del Agua. (2015). Reglamento Ley Recursos Hídricos Usos Y Aprovechamiento Del Agua. *Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua*. https://www.regulacionagua.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/07/Reglamento-LORHUyA.pdf

Amaya Amaya, J. (2010). *Sistemas de informacion gerenciales: hardware, software, redes, internet, diseno (2a. Ed.)*. Ecoe Ediciones. https://elibro.net/es/lc/utnorte/titulos/69112

Andre, H., Pratama, R. W., Utari, F. S., Oktapianus, Y. l., Yuliswar, T., Darmawan, Nirad, D. W. S., Vadreas, A. K., & Rahmadoni, J. (2022). LPWAN Communication in IoT Network for Electrical Energy Monitoring. *2022 International Symposium on Information Technology and Digital Innovation (ISITDI)*, 32–35. https://doi.org/10.1109/ISITDI55734.2022.9944470

Aragón, J., & Lita, M. (2024). *Proceso de medición del consumo de agua potable en la Comuna "San Luis de la Carbonería"*.

Basani, M. (2019, septiembre 26). *Tecnología e innovación para llevar agua y saneamiento a todos en América Latina y el Caribe*. https://blogs.iadb.org/agua/es/tecnologia-e-innovacion-para-llevar-agua-y-saneamiento-a-todos-en-america-latina-y-el-caribe/

Casilla Gutiérrez, J. (2014). Determinación del error de indicación en medidores de agua domiciliarios. *Instituto Boliviano de Metrología*. https://www.ibmetro.gob.bo/sites/default/files/2025-10/ERRORES%20DE%20INDICACI%C3%93N.pdf

CeDInt-UPM. (2017, septiembre 1). *Diseño, prototipado y validación de un dispositivo de medida de consumo eléctrico no intrusivo y autoalimentado con técnicas de captura de energía por inducción.*

Chico Ramírez, K. A. (2023). *Diseño E Implementación De Un Sistema Fotovoltaico En Una Residencia De Bajos Recursos Ubicada En La Comunidad Masa 1 Del Golfo De Guayaquil* [Universidad Politécnica Salesiana]. https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/24668

Comisión Nacional del Agua. (2015). Sistemas De Medición Del Agua: Producción, Operación y Consumo. *Manual De Agua Potable, Alcantarillado Y Saneamiento*, *9*, 19–36. https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro9.pdf

Conelec. (2008, marzo 12). *Atlas Solar del Ecuador*. 0–51. https://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/cg00041.pdf

Creus Solé, A. (2014). *Energias renovables*. Cano Pina. https://elibro.net/es/lc/utnorte/titulos/43075

Cuco Pardillos, S. (2021). *Sistemas aislados de generacion electrica con baterias. Caso practico: vivienda aislada con fotovoltaica*. Editorial de la Universidad Politecnica de Valencia. https://elibro.net/es/lc/utnorte/titulos/220142

Díaz Serrano, A. (2015). *Análisis de la técnica "Sleeping" para el ahorro de energía en redes definidas por Software*. http://dehesa.unex.es/handle/10662/3540

George Hardesty. (2024, julio 10). *LoRa: Red Inalámbrica de largo alcance para el Internet de las cosas (IOT): bandas de frecuencia y antenas.* Data-Alliance. https://www.data-

alliance.net/es/lora-red-inal%C3%A1mbrica-de-largo-alcance-para-el-internet-de-las-cosas-iot-bandas-de-frecuencia-y-antenas

Hemjal, A. (2019). *Sigfox Based IoT*. Faculty of Information Technology and Communication Sciences. https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/27666/Hemjal.pdf?sequence=4&isAllowed=y

INEC, Agencia de Regulación y Control del Agua, & Banco de Desarrollo Del Ecuador B.P. (2023). *Resumen Estadístico Gestión de Agua Potable y Saneamiento de GAD Municipales*. https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas_Ambientales/Municipios_2022/Agua_potable_alcantarillado/PRESENTACION_APA_2022_VFINAL.pdf

Midda, S., & Koner, R. (2023). Application of Low Cost Energy Efficient ZigBee Network Protocol To Develop A Cyber-Physical Intelligent System For Monitoring Mine Slope Health. *2022 OPJU International Technology Conference on Emerging Technologies for Sustainable Development (OTCON)*, 1–6. https://doi.org/10.1109/OTCON56053.2023.10113973

Ministerio del Trabajo. (2025). *Acuerdo Ministerial Nro. MDT-2025-195*. https://asobanca.org.ec/wp-content/uploads/2025/12/RO-MDT-2025-195.pdf

Moreno Munoz, A., & Corcoles Corcoles, S. (2018). *Arduino: curso practico*. RA-MA Editorial. https://elibro.net/es/lc/utnorte/titulos/106517

Ordonez Arias, J. A. (2007). *Los medidores de flujo (fluxometros): mecanica de fluidos e hidraulica de tuberias* (p. 29). El Cid Editor. https://elibro.net/es/lc/utnorte/titulos/34449

Rocabado Moreno, S. H., & Arias Figueroa, D. A. (2016). *Arquitectura y organizacion de la computadora: microprocesadores y programacion assembler*. D - Editorial de la Universidad Nacional de La Plata. https://elibro.net/es/lc/utnorte/titulos/77190

Salazar, C., Ramírez, A., & Ortíz, K. (2022). *Guía Técnica para la Gestión y Fortalecimiento de los Procesos Relacionados con los Sistemas de Micromedición en la Prestación del Servicio de Agua Potable brindado por los Prestadores Públicos y Comunitarios*. https://www.regulacionagua.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2023/01/Anexo-1-GUI%CC%81A-TE%CC%81CNICA-MICROMEDICIO%CC%81N.pdf

Sarath Kumar, R., Gokul Prasanth, M., Bharath Kumar, R., Abhishek, J., & Ajay, D. (2022). LPWAN for IoT. *2022 International Conference on Advanced Computing Technologies and Applications (ICACTA)*, 1–4. https://doi.org/10.1109/ICACTA54488.2022.9753563

Secretaría del Agua. (2024). *Secretaría del Agua, misión y visión*. https://www.gob.ec/senagua

Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo, S. (2017). *Plan Nacional para el Buen Vivir*. https://www.gobiernoelectronico.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/09/Plan-Nacional-para-el-Buen-Vivir-2017-2021.pdf

Semtech. (2025). *LoRs (PHY)*. Semtech Corporation. https://www.semtech.com/lora/what-is-lora

Serrano Perez, J., & Moreno Perez, J. C. (2015). *Fundamentos del hardware*. RA-MA Editorial. https://elibro.net/es/lc/utnorte/titulos/62457

Tomar, A. (2011). *Introduction to Zibgbee Technology* (Vol. 1). https://eclass.uoa.gr/modules/document/file.php/DI367/%CE%A5%CE%BB%CE%B9%CE%BA%CF%8C/introduction-to-zigbee-technology.pdf

Vargas Chacón, M. (2010, julio 30). *Modelo en Cascada y Modelo en V*. https://www.calameo.com/read/000359039f05cc9907e95

Vargas, L., Haas, J., & Reyes, L. (2020). *Generacion de energia electrica con fuentes renovables*. Editorial Universitaria de Chile. https://elibro.net/es/lc/utnorte/titulos/221694

Anexos

Anexo 1: *Certificado de auspicio otorgado por la J.A.A.P. para la aplicación del trabajo de grado en la Comuna San Luis de la Carbonería*

JUNTA AD DE AGUA PMINISTRADORA DE AGUA POTABLE
"SAN LUIS DE LA CARBONERIA"
Personería Jurídica I-APP062-2028 Imantag -Cotacachi-Imbabura

Ibarra, 3 de junio 2025

Certificado de auspicio.

Funcionario/a Universidad Técnica del Norte

De mis consideraciones:

La presente tiene la finalidad de extenderle el auspicio respectivo consistente en la colaboración práctica en los trabajos de investigación y asesorías técnicas, solicitado por Donoso_Martinez_Fabricio_Sebastian con cédula de identidad 1004319867 para aplicar en **TRABAJO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES** cuyo tema **es DISEÑO DE SISTEMA AUTO-ENERGIZABLE DE MEDICIÓN Y ENVÍO INALÁMBRICO DEL CONSUMO DEL AGUA POTABLE PARA LA JUNTA DE AGUA "SAN LUIS DE LA CARBONERÍA" ante lo cual en calidad de presidente auspicio para la investigación planteada.**

Seguros de aportar con la investigación, el peticionario puede hacer uso de la presente para los fines pertinentes.

Atentamente:

Dr. Rolando Lomas Tapia PhD.

PRESIDENTE

Correo electrónico: fundacionesedsocial9@gmail.com

Teléfono: 0988114923

Dirección: Comunidad San Luis de la Carbonería Casa Comunal Telef. 0988114923 mail: fundacionesedsocial9@gmail.com

Anexo 2: F*ormato de entrevista para el análisis de la situación actual en la Comuna*

Entrevista realizada a la Directiva de la Junta Administradora de Agua Potable "San Luis de la Carbonería"

Título

Proceso de gestión del agua potable en la Comuna San Luis de la Carbonería

Objetivo

La entrevista se realiza con el fin de comprender el proceso de gestión del agua potable llevado a cabo por la Junta Administradora de Agua de la Comuna San Luis de la Carbonería. La información obtenida servirá exclusivamente para el desarrollo del presente proyecto, permitiendo identificar las condiciones actuales del servicio, así como los aspectos técnicos y operativos relevantes para el diseño de un sistema automatizado de medición y control.

Entrevistador

- Fabricio Donoso, estudiante de la carrera de Telecomunicaciones en la Universidad Técnica del Norte

Fecha de la Entrevista: sábado 10, de mayo de 2025

1. **¿Cuántas viviendas están actualmente registradas en la comunidad?**

2. **¿Cuántos habitantes se estima que viven en total?**

3. **¿Cuántos medidores de agua existen actualmente?**

4. **¿Todas las viviendas cuentan con medidor individual de agua?**

5. **¿Desde qué fuente se obtiene el agua que se distribuye a la comunidad?**

6. **¿Qué tipo de infraestructura existe antes de que el agua llegue a las viviendas?**

7. **¿Con qué frecuencia se realizan mantenimientos en la red de distribución?**

8. **¿Qué tipo de medidores se utilizan actualmente?**

9. ¿En qué estado general se encuentran los medidores?

10. ¿Cómo se realiza actualmente la lectura de los medidores?

11. ¿Con qué frecuencia se realiza la medición del consumo?

12. ¿Cuánto tiempo demora el proceso completo de toma de lecturas?

13. ¿Quién es la persona encargada de realizar las mediciones?

14. ¿Cuál es el valor actual por metro cúbico de agua consumida?

15. ¿Cómo se lleva a cabo el proceso de facturación? ¿Se realiza manualmente o se usa alguna herramienta informática?

16. ¿Cómo se realiza el cobro del consumo de agua potable a los usuarios?

17. ¿Cuál es el plazo máximo de pago antes de proceder al corte del servicio?

18. ¿Han tenido problemas relacionados con errores de medición o facturación?

19. ¿Qué desafíos enfrentan actualmente en la gestión del sistema de agua potable?

20. ¿Considera que un sistema automatizado de medición y corte podría mejorar la gestión del servicio?

21. ¿La comunidad estaría dispuesta a implementar un sistema tecnológico de este tipo?

22. ¿Qué expectativas o sugerencias tendría respecto a un sistema automatizado?

23. ¿Se cuenta con respaldo de los registros históricos de consumo y pagos?

24. ¿Se han considerado anteriormente propuestas tecnológicas para mejorar el sistema?

25. ¿Hay algún tipo de subsidio o tarifa diferenciada para ciertos grupos de usuarios?

Estudiante
Sr. Fabricio Donoso

Director
MSc. Fabián Cuzme

Anexo 3: *Entrevistas realizadas a miembros de la J.A.A.P. San Luis de la Carbonería*

Entrevista realizada a la Directiva de la Junta Administradora de Agua Potable "San Luis de la Carbonería"

Título

Proceso de gestión del agua potable en la Comuna San Luis de la Carbonería

Objetivo

La entrevista se realiza con el fin de comprender el proceso de gestión del agua potable llevado a cabo por la Junta Administradora de Agua de la Comuna San Luis de la Carbonería. La información obtenida servirá exclusivamente para el desarrollo del presente proyecto, permitiendo identificar las condiciones actuales del servicio, así como los aspectos técnicos y operativos relevantes para el diseño de un sistema automatizado de medición y control.

Entrevistado

- Sr. Lisandro Acosta, tesorero de la Junta Administradora de Agua "San Luis de la Carbonería".

Entrevistador

- Fabricio Donoso, estudiante de la carrera de Telecomunicaciones en la Universidad Técnica del Norte

Fecha de la Entrevista: sábado 10, de mayo de 2025

1. **¿Cuántas viviendas están actualmente registradas en la comunidad?**

Según tengo conocimiento, actualmente contamos con un aproximado de sesenta y dos viviendas registradas como usuarios del servicio de agua potable.

2. **¿Cuántos habitantes residen actualmente en la comunidad?**

No dispongo de esa información con exactitud, ya que soy nuevo en la directiva y llevo aproximadamente cinco meses desempeñando el cargo, por lo que aún no cuento con un registro actualizado del total de habitantes.

3. **¿Cuántos medidores de agua existen actualmente?**

Actualmente contamos con un aproximado de sesenta y dos medidores.

4. **¿Todas las viviendas cuentan con medidor individual de agua?**

No, no todas las viviendas cuentan con medidor. Hay personas que utilizan agua de vertientes propias (ojos de agua) y no están conectadas al sistema comunal. No tengo el número exacto, pero no todas las viviendas registradas poseen medidor individual.

5. **¿Desde qué fuente se obtiene el agua que se distribuye a la comunidad?**

El agua proviene de una vertiente natural conocida como la fuente El Caballito.

6. **¿Qué tipo de infraestructura existe para el almacenamiento, tratamiento o purificación del agua antes de su distribución a las viviendas?**

Contamos con un tanque de almacenamiento, un sistema de filtrado, y se realiza un proceso de cloración manual, que está a cargo del operador del sistema.

7. **¿Con qué frecuencia se realizan mantenimientos en la red de distribución?**

El mantenimiento se realiza principalmente en el sistema de filtrado, y se lleva a cabo cada vez que se detectan residuos provenientes de la vertiente. Además, la cloración del agua se realiza dos veces por semana, de forma manual, por parte del operador encargado.

8. **¿Qué tipo de medidores se utilizan actualmente?**

Actualmente se utilizan medidores mecánicos para el registro del consumo de agua en las viviendas.

9. ¿En qué estado general se encuentran los medidores?

Todos los medidores se encuentran en buen estado y funcionando correctamente.

10. ¿Cómo se realiza actualmente la lectura de los medidores?

La lectura se realiza de forma manual cada mes. El operador es quien se encarga de recorrer las viviendas y registrar el consumo de agua de cada usuario directamente desde el medidor.

11. ¿Cuánto tiempo demora el proceso completo de toma de lecturas?

Al operador le toma aproximadamente una mañana completar todo el recorrido, más o menos unas cuatro o cinco horas.

12. ¿Quién es la persona encargada de realizar las mediciones?

El encargado de realizar las mediciones es el señor Jaime Ayala, quien actualmente desempeña el cargo de operador del sistema de agua potable.

13. ¿Cuál es el valor actual por metro cúbico de agua consumida?

El valor base es de tres dólares, y cubre hasta veinte metros cúbicos de consumo. Si un usuario supera ese límite, se le cobra un adicional de quince centavos por cada metro cúbico extra.

14. ¿Cómo se lleva a cabo el proceso de facturación? ¿Se realiza manualmente o se usa alguna herramienta informática?

El proceso de facturación se realiza de manera manual.

15. ¿Cómo se realiza el cobro del consumo de agua potable a los usuarios?

El tesorero es el encargado del cobro. Una vez que se obtiene la lectura del consumo de cada usuario, la información se pasa al computador para generar un documento impreso. Luego, se entrega una carta al usuario con el valor a pagar por el servicio.

16. ¿Cuál es el plazo máximo de pago antes de proceder al corte del servicio?

El corte del servicio se aplica si el usuario no realiza el pago durante tres meses consecutivos.

17. ¿Han existido problemas relacionados con errores de medición o facturación?

No, hasta el momento no hemos tenido inconvenientes. Somos una directiva nueva y llevamos aproximadamente cinco meses en funciones, y durante este tiempo no se ha presentado ningún problema relacionado con la medición o la facturación.

18. ¿Qué desafíos enfrentan actualmente en la gestión del sistema de agua potable?

Hasta el momento no se han presentado inconvenientes en la gestión del sistema.

19. ¿Considera que un sistema automatizado de medición y corte podría mejorar la gestión del servicio?

Sí, sería interesante actualizar el sistema con uno automatizado, ya que permitiría llevar un mejor registro del consumo.

20. ¿La comunidad estaría dispuesta a implementar un sistema tecnológico de este tipo?

Pienso que sí, si se trata de una mejora y representa un beneficio para todos los usuarios, la comunidad estaría de acuerdo en implementarlo.

21. ¿Qué expectativas o sugerencias tendría respecto a un sistema automatizado?

A nivel personal, considero que sería una propuesta interesante. Creo que con esto daríamos un paso adelante, ya que en las ciudades la mayoría de los procesos ya están automatizados. Sería muy positivo contar con algo similar en nuestra comunidad.

22. ¿Se cuenta con respaldos de los registros históricos de consumo y pagos?

Sí, al momento de imprimir la factura, se generan dos copias: una se entrega al usuario y la otra se archiva en las oficinas de la Junta de Agua.

23. ¿Se han considerado anteriormente propuestas tecnológicas para mejorar el sistema?

Que yo tenga conocimiento, no. Hasta el momento no se ha planteado ninguna propuesta tecnológica así para mejorar el sistema.

24. ¿Hay algún tipo de subsidio o tarifa diferenciada para ciertos grupos de usuarios?

Sí, el tema fue planteado en una reunión anterior. Se habló de la posibilidad de otorgar un descuento a personas con discapacidad o adultos mayores, aunque hasta el momento aún no se ha establecido formalmente esa medida.



Estudiante

Sr. Fabricio Donoso



Tesorero

Sr. Lisandro Acosta

Entrevista realizada a la Directiva de la Junta Administradora de Agua Potable "San Luis de la Carbonería"

Título

Proceso de gestión del agua potable en la Comuna San Luis de la Carbonería

Objetivo

La entrevista se realiza con el fin de comprender el proceso de gestión del agua potable llevado a cabo por la Junta Administradora de Agua de la Comuna San Luis de la Carbonería. La información obtenida servirá exclusivamente para el desarrollo del presente proyecto, permitiendo identificar las condiciones actuales del servicio, así como los aspectos técnicos y operativos relevantes para el diseño de un sistema automatizado de medición y control.

Entrevistado

- Sr. Miguel Liquinchano, secretario de la Junta Administradora de Agua "San Luis de la Carbonería".

Entrevistador

- Fabricio Donoso, estudiante de la carrera de Telecomunicaciones en la Universidad Técnica del Norte

Fecha de la Entrevista: sábado 10, de mayo de 2025

1. **¿Cuántas viviendas están actualmente registradas en la comunidad?**

   Aproximadamente sesenta y cuatro viviendas se encuentran registradas actualmente.

2. **¿Cuántos habitantes se estima que viven en total?**

   Actualmente residen alrededor de cuatrocientos setenta habitantes en la comunidad.

3. ¿Cuántos medidores de agua existen actualmente?

Actualmente tenemos como setenta y cuatro medidores instalados. Algunos están en funcionamiento en viviendas habitadas, mientras que otros están instalados en propiedades que por el momento no están en uso, pero ya cuentan con su medidor.

4. ¿Todas las viviendas cuentan con medidor individual de agua?

Sí, todas las viviendas cuentan con su respectivo medidor individual de agua.

5. ¿Desde qué fuente se obtiene el agua que se distribuye a la comunidad?

El agua se obtiene de una vertiente ubicada en el páramo, aproximadamente a tres kilómetros de distancia desde la comunidad.

6. ¿Qué tipo de infraestructura existe antes de que el agua llegue a las viviendas?

El sistema cuenta con tanques de reserva, desde donde el agua desciende por presión hacia las viviendas de la comunidad.

7. ¿Con qué frecuencia se realizan mantenimientos en la red de distribución?

La frecuencia varía, ya que en ocasiones las tuberías se tapan por residuos que descienden desde la vertiente. El operador es quien se encarga de realizar el mantenimiento, y se mantiene pendiente de cualquier inconveniente para actuar cuando sea necesario.

8. ¿Qué tipo de medidores se utilizan actualmente?

Actualmente se utilizan medidores mecánicos. Se ha considerado la posibilidad de cambiarlos, pero por ahora no se considera conveniente realizar esa modificación.

9. ¿En qué estado general se encuentran los medidores?

Los medidores se encuentran en perfectas condiciones y funcionan correctamente.

10. ¿Cómo se realiza actualmente la lectura de los medidores?

Contamos con un operador que se encarga de revisar uno por uno los medidores en cada vivienda para registrar el consumo de agua.

11. ¿Con qué frecuencia se realiza la medición del consumo?

La medición del consumo se realiza de forma mensual. Cada día ocho de cada mes, el operador realiza la lectura de todos los medidores instalados en la comunidad.

12. ¿Cuánto tiempo demora el proceso completo de toma de lecturas?

El proceso puede tomar prácticamente todo el día. El operador inicia alrededor de las seis de la mañana y, dependiendo de las condiciones, puede extenderse hasta las seis de la tarde, es decir, unas doce horas aproximadamente. Las lecturas se realizan a pie o en motocicleta, según la zona a la que deba desplazarse.

13. ¿Quién es la persona encargada de realizar las mediciones?

El responsable de realizar las mediciones es el señor Jaime Ayala, actual operador del sistema de agua potable.

14. ¿Cuál es el valor actual por metro cúbico de agua consumida?

Actualmente se cobra una tarifa base de tres dólares, que cubre hasta doce metros cúbicos de consumo. Si un usuario excede ese límite, se aplica un recargo de quince centavos por cada metro cúbico adicional, dependiendo del volumen total consumido.

15. ¿Cómo se lleva a cabo el proceso de facturación? ¿Se realiza manualmente o se usa alguna herramienta informática?

Actualmente, el proceso de facturación se realiza de manera manual, registrando toda la información en un cuaderno.

16. ¿Cómo se realiza el cobro del consumo de agua potable a los usuarios?

El pago se realiza de forma manual. Una vez que el usuario cancela el valor correspondiente, se coloca un sello de cancelación con el sello oficial de la Junta de Agua en la boleta o comprobante entregado. Una copia se queda con el usuario y otra en la Junta.

17. ¿Cuál es el plazo máximo de pago antes de proceder al corte del servicio?

Si un usuario no ha realizado el pago durante tres meses consecutivos, se emite una notificación formal sobre el retraso. A partir de esa notificación, se otorga un mes adicional de plazo. Si el pago no se realiza dentro de ese periodo, se procede con el corte del servicio. Para restablecerlo, el usuario debe cancelar un valor por reconexión, similar al que se cobra a un nuevo usuario.

18. ¿Han tenido problemas relacionados con errores de medición o facturación?

Sí, se han escuchado comentarios y quejas informales al respecto, pero hasta el momento no se ha presentado ninguna denuncia oficial.

19. ¿Qué desafíos enfrentan actualmente en la gestión del sistema de agua potable?

Uno de los principales desafíos es la falta de apoyo por parte del Ministerio, lo cual limita la capacidad para brindar un mejor servicio a los usuarios de la comunidad.

20. ¿Considera que un sistema automatizado de medición y corte podría mejorar la gestión del servicio?

Sí, considero que mejoraría el servicio prestado a la comunidad, facilitando el control y seguimiento del consumo de agua.

21. ¿La comunidad estaría dispuesta a implementar un sistema tecnológico de este tipo?

Sí, la comunidad ha mostrado interés y en varias ocasiones ha solicitado apoyo para mejorar el sistema, aunque hasta ahora no se ha recibido respuesta por parte de las autoridades correspondientes.

22. ¿Qué expectativas o sugerencias tendría respecto a un sistema automatizado?

Dependiendo de los costos que implique su implementación, ya que como comuna debemos analizar bien los recursos disponibles. Sin embargo, estaríamos dispuestos, siempre que exista un proyecto claro que respalde la propuesta.

23. ¿Se cuenta con respaldo de los registros históricos de consumo y pagos?

Sí, toda la documentación relacionada con el consumo y los pagos se encuentra debidamente respaldada y archivada en las oficinas de la Junta de Agua.

24. ¿Se han considerado anteriormente propuestas tecnológicas para mejorar el sistema?

La verdad, no. Hasta el momento no se ha planteado ninguna propuesta tecnológica para mejorar el sistema.

25. ¿Hay algún tipo de subsidio o tarifa diferenciada para ciertos grupos de usuarios?

No, actualmente no existe ningún tipo de subsidio o tarifa diferenciada. Todos los usuarios pagan por igual, sin importar su situación económica.

Estudiante
Sr. Fabricio Donoso

Secretario
Sr. Miguel Liquinchano

Entrevista realizada a la Directiva de la Junta Administradora de Agua Potable "San Luis de la Carbonería"

Título

Proceso de gestión del agua potable en la Comuna San Luis de la Carbonería

Objetivo

La entrevista se realiza con el fin de comprender el proceso de gestión del agua potable llevado a cabo por la Junta Administradora de Agua de la Comuna San Luis de la Carbonería. La información obtenida servirá exclusivamente para el desarrollo del presente proyecto, permitiendo identificar las condiciones actuales del servicio, así como los aspectos técnicos y operativos relevantes para el diseño de un sistema automatizado de medición y control.

Entrevistado

- Sr. Jaime Ayala, operador de la Junta Administradora de Agua "San Luis de la Carbonería".

Entrevistador

- Fabricio Donoso, estudiante de la carrera de Telecomunicaciones en la Universidad Técnica del Norte

Fecha de la Entrevista: sábado 10, de mayo de 2025

1. **¿Cuántas viviendas están actualmente registradas en la comunidad?**

En total hay aproximadamente ciento un viviendas, pero no todas cuentan con servicio de agua potable. Algunas personas que viven en las zonas bajas, como Santa Bárbara, reciben el servicio desde la comunidad vecina Quitumba Grande. Esto se debe a que, en el pasado, no contábamos con los recursos ni la aprobación para un proyecto de agua potable.

2. **¿Cuántos habitantes se estima que viven en total?**

El censo oficial lo maneja el cabildo, pero según mi estimación, deben vivir alrededor de ciento cincuenta personas en la comunidad.

3. **¿Cuántos medidores de agua existen actualmente?**

Actualmente hay alrededor de sesenta y dos medidores instalados, pero ese número está aumentando progresivamente, ya que nuevas personas están comprando terrenos en la comunidad. Además, algunas propiedades se revenden, lo que hace que continúe incrementando la cantidad de usuarios que solicitan la instalación de medidores.

4. **¿Todas las viviendas cuentan con medidor individual de agua?**

Sí, cada vivienda cuenta con su propio medidor individual.

5. **¿Desde qué fuente se obtiene el agua que se distribuye a la comunidad?**

Actualmente, la comunidad tiene adjudicadas dos vertientes ubicadas en la parte alta, a las faldas del cerro. Desde esas fuentes se capta el agua que es conducida hasta la comunidad.

6. **¿Qué tipo de infraestructura existe antes de que el agua llegue a las viviendas?**

El sistema cuenta con tanques tanto en la zona de captación como en el área de tratamiento. Desde allí, el agua desciende por tuberías hasta llegar a las viviendas de la comunidad.

7. **¿Con qué frecuencia se realizan mantenimientos en la red de distribución?**

Las cajas de revisión se inspeccionan según su estado, mientras que el tanque de tratamiento se limpia una vez al mes, ya que con el tiempo se acumula tierra y sedimentos provenientes de la vertiente.

8. ¿Qué tipo de medidores se utilizan actualmente?

Actualmente se utilizan medidores mecánicos para registrar el consumo de agua en cada vivienda.

9. ¿En qué estado general se encuentran los medidores?

Los medidores fueron instalados hace aproximadamente ocho años, y hasta el momento todos funcionan correctamente. No se ha reportado ninguna falla en su funcionamiento en ninguna de las viviendas.

10. ¿Cómo se realiza actualmente la lectura de los medidores?

El secretario elabora una hoja con los nombres de todos los usuarios. Luego, a final de cada mes, el operador visita cada vivienda para tomar la lectura actual del medidor. Esta se compara con la lectura del mes anterior que ya está registrada, y con eso se calcula el consumo mensual de cada usuario.

11. ¿Cuánto tiempo demora el proceso completo de toma de lecturas?

El proceso toma aproximadamente tres horas. En las zonas accesibles se realiza a pie, y en las áreas más alejadas, el operador se moviliza en motocicleta para completar las lecturas.

12. ¿Quién es la persona encargada de realizar las mediciones?

Mi persona, Jaime Ayala, soy el encargado de realizar las lecturas, hacer instalaciones, mantenimiento y atender cualquier daño relacionado con el sistema de agua potable.

13. ¿Cuál es el valor actual por metro cúbico de agua consumida?

El consumo de hasta veinte metros cúbicos tiene una tarifa base de tres dólares. Si un usuario supera ese límite, se cobra un adicional de quince centavos por cada metro cúbico excedente.

14. ¿Cómo se lleva a cabo el proceso de facturación? ¿Se realiza manualmente o se usa alguna herramienta informática?

El proceso de facturación se realiza de forma completamente manual.

15. ¿Cuál es el plazo máximo de pago antes de proceder al corte del servicio?

Si una persona acumula tres meses de deuda, se le entrega una notificación formal. Esta notificación otorga un plazo adicional de un mes, si pasado ese tiempo no se realiza el pago, se procede con el corte del servicio.

16. ¿Cómo se realiza el corte del servicio si un usuario no ha pagado?

En la comunidad, el corte del servicio se realiza cerrando la tubería principal del usuario y colocando un tapón para bloquear el paso del agua.

17. ¿Han existido problemas relacionados con errores de medición o facturación?

En administraciones anteriores han existido algunas pequeñas fallas, principalmente por parte de tesorería. Sin embargo, en la administración actual, que es nueva, no se han presentado este tipo de inconvenientes hasta el momento.

18. ¿Qué desafíos enfrentan actualmente en la gestión del sistema de agua potable?

Hasta el momento no se han presentado mayores problemas, ya que la comunidad colabora activamente con la gestión del servicio.

19. ¿Considera que un sistema automatizado de medición y corte podría mejorar la gestión del servicio?

Aunque personalmente no tengo experiencia con ese tipo de sistemas, he escuchado que sí facilitan el trabajo del operador, especialmente al evitar recorrer casa por casa para tomar lecturas. Sí sería bueno actualizar el sistema para mejorar la eficiencia.

20. ¿La comunidad estaría dispuesta a implementar un sistema tecnológico de este tipo?

Yo creo que sí, la comunidad estaría abierta a la implementación de un sistema tecnológico, siempre que represente una mejora en el servicio.

21. ¿Se cuenta con respaldo de los registros históricos de consumo y pagos?

Sí, toda la información relacionada con el consumo y los pagos se encuentra debidamente archivada en las oficinas de la Junta de Agua.

22. ¿Se han considerado anteriormente propuestas tecnológicas para mejorar el sistema?

Sí, en su momento la directiva anterior comentó la posibilidad de implementar mejoras tecnológicas, pero finalmente no se llegó a concretar ninguna iniciativa.

23. ¿Hay algún tipo de subsidio o tarifa diferenciada para ciertos grupos de usuarios?

Sí, los comuneros que residen permanentemente en la comunidad tienen un acceso más flexible al servicio. En cambio, para las personas que vienen de fuera o adquieren propiedades, el costo suele ser un poco más elevado, especialmente si existen deudas pendientes de los propietarios anteriores o si no se ha actualizado correctamente la información del titular.



Estudiante

Sr. Fabricio Donoso



Operador

Sr. Jaime Ayala

Anexo 4: *Infraestructura de almacenamiento y sistema de filtrado de agua potable de la Comuna San Luis de la Carbonería*

Tanque de almacenamiento de agua potable

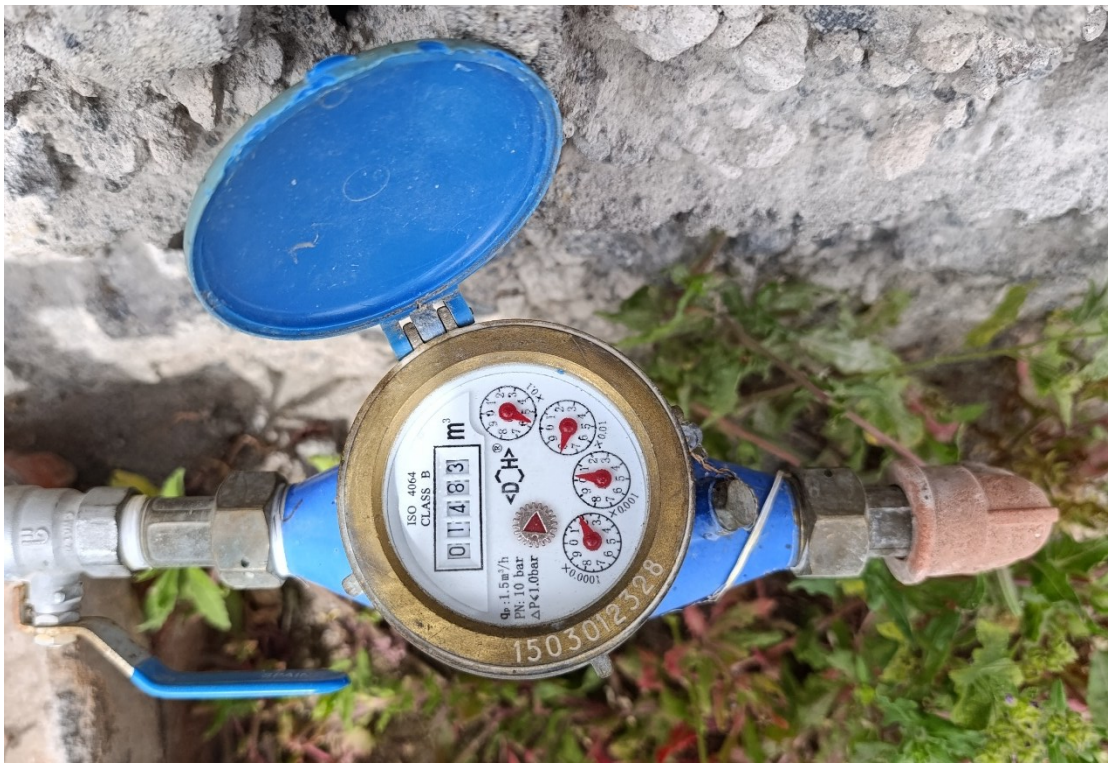


Sistema de Filtrado



Anexo 5: *Medidores mecánicos actualmente instalados en las viviendas de la Comuna San Luis de la Carbonería*

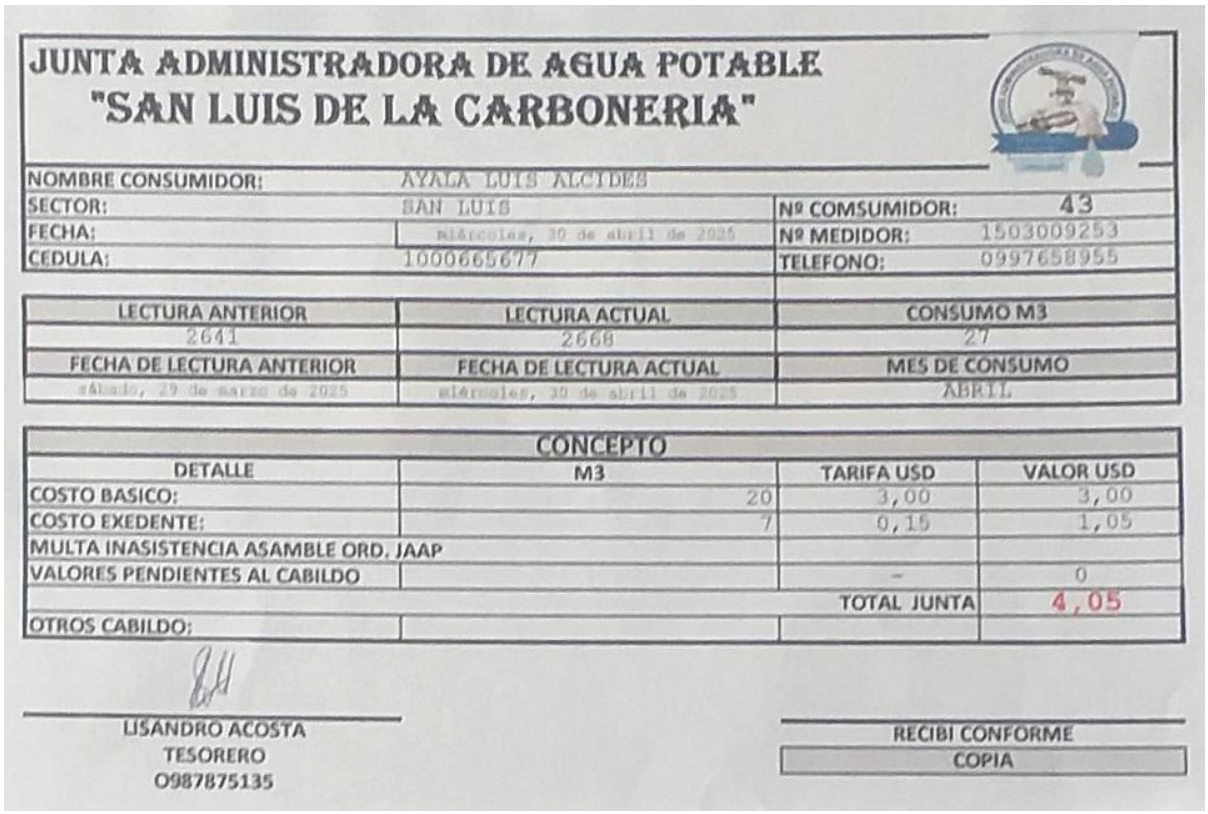




Anexo 6: *Formato de registro manual de lecturas de consumo de agua potable*

Nº CONSUMIDOR	Nº MEDIDOR	NOMBRE	FECHA LECTURA ANTERIOR	FECHA LECTURA ACTUAL
		MES DE CONSUMO: MAYO	Miercoles, 30/Abril/ 2025	
1	1503012327	CAJAS DE LA CRUZ JUAN	91	
2	S/M	VELASCO LARA CLEVER ROBERTO 1	0	
3	1503011464	VACA PROAÑO HUGO FERNANDO	872	
4	1312035513	GUANOLUISA AIMACAÑA MARÍA DOLORES	800	
5	21053077	PAREDES ANITA CECILIA	112	
6	1503011462	ARAGON PROAÑO SANTIAGO GERMAN 2	347	
7	1503012322	DIAGUILLO MARIA ROSARIO	1554	
8	1130006	CHAVEZ DIAGUILLO FAUSTO	18520	
9	1503012321	CHAVEZ DIAGUILLO JOSE ELIAS	534	
10	1601002079	RAMOS CHAVEZ JOSE ANDRES	517	
11	1503012323	CHAVEZ DIAGUILLO LUIS OSWALDO	555	
12	21053761	MANTILLA GLADYS ISABEL	25	
13	23004150	ROSERO CHANCHAY LUIS FELIPE	115	
14	19004175	ECHEVERRIA MARTÍNEZ JOSÉ VIDAL	179	
15	S/M	VELASCO LARA CLEVER ROBERTO 2	0	
16	1503010150	ARAGON PROAÑO JEANETTE GERMANIA	2349	
17	1503010146	AYALA TORRES CARLOS ALFONSO	809	
18	17743506	YEPEZ CRUZ ELIAS	952	
19	1503009251	MALDONADO MALES JOSE HUMBERTO	179	
20	S/M	MALDONADO MALES LUIS ALBERTO	0	
21	1503011466	CHAVEZ DIAGUILLO MARIA ISABEL	610	
22	S/M	RAMOS CARBAJAL DANIEL ANIBAL	0	
23	S/M	PATIÑO ARIAS ROBERTO	0	
24	1503011465	ARIAS PAUCAR ELVIA MARIA	80	
25	1503013455	LIQUINCHANO LITA OLGA MARLENE	7	
26	1503010147	DE LA CRUZ LITA MARIA ROSA	1321	
27	1503010145	AYALA DE LA CRUZ MARCO SAMUEL	27	
28	1503010148	LIQUINCHANO LITA VERONICA ALEXANDRA	314	
29	1503010142	LIQUINCHANO LITA BLANCA YOLANDA	2	
30	1503010141	TUQUERRES CABASCANGO ANITA MARIA	134	
31	1601002073	LITA JORGE VINICIO	63	
32	1503010149	LITA MONROY MARIA DOLORES	472	
33	1503010143	CHAVEZ MANUEL MESIAS	52	
34	1503009259	AYALA DE LA CRUZ GLADYS ESMERALDA	1512	
35	1503010144	LIQUICHANO LITA DIGNA MARIA	11	
			0	
36	180251056	LITA MONROY JOSE RAFAEL	808	
37	1503012328	LIQUINCHANO PERUGACHI SEGUNDO MANUE	1407	
38	1503012325	LITA MONROY JUAN MANUEL	2372	
39	9753497	ANGULO LOPEZ MARGARITA	16	
40	1503010558	MALDONADO SANY LUIS HUMBERTO	447	
41	1503009258	AYALA AYALA CLETO VINICIO	2607	
42	1503009253	AYALA LUIS ALCIDES	2668	
43	1503013460	JARAMILLO LOPEZ PAULA FERNANDA	207	
44	1503009257	LITA MONROY MANUEL MARIA	1198	
45	1503009254	AYALA RAMIREZ MARIA INES	1084	
46	1503009260	AYALA RAMIREZ EDUARDO JAVIER 1	2483	
47	1601001514	AYALA RAMIREZ EDUARDO JAVIER 2	323	

Anexo 7: *Comprobantes de facturación del consumo de agua potable emitidos por la J.A.A.P. San Luis de la Carbonería*



JUNTA ADMINISTRADORA DE AGUA POTABLE
"SAN LUIS DE LA CARBONERIA"

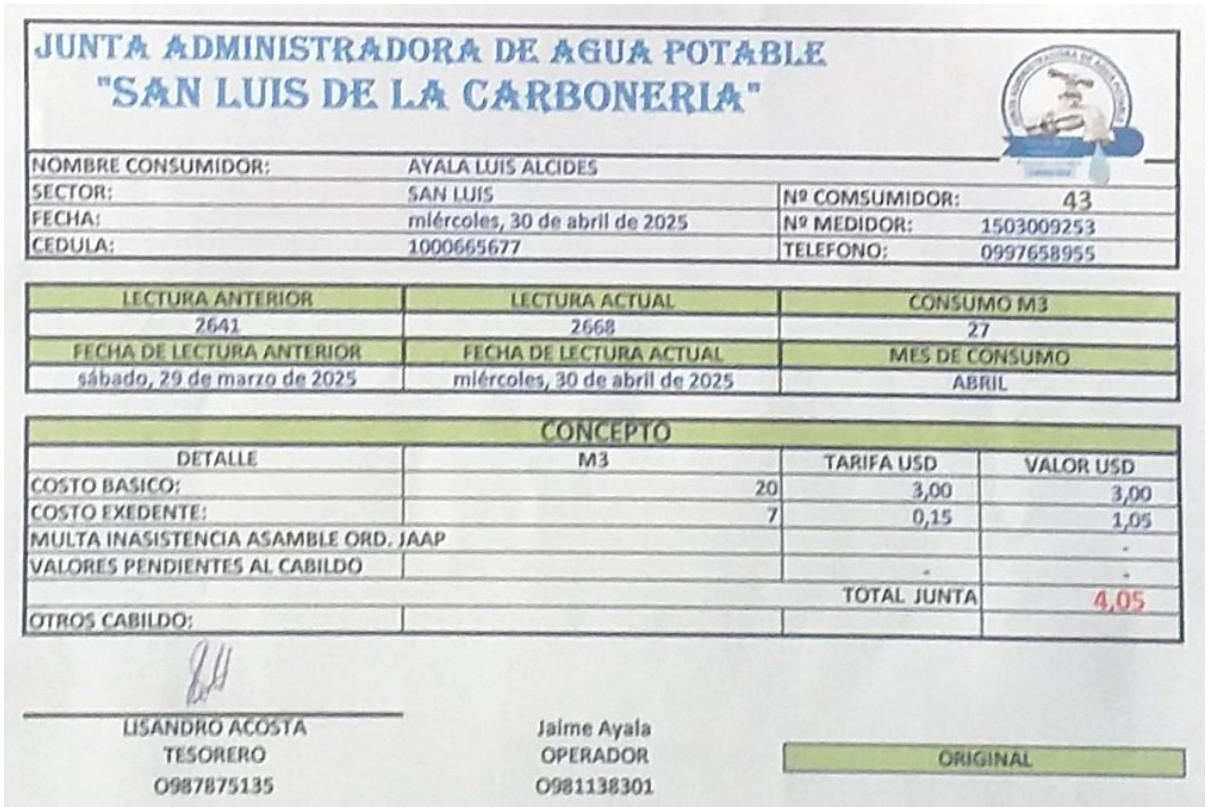
NOMBRE CONSUMIDOR:	AYALA LUIS ALCIDES		
SECTOR:	SAN LUIS	Nº COMSUMIDOR:	43
FECHA:	miércoles, 30 de abril de 2025	Nº MEDIDOR:	1503009253
CEDULA:	1000665677	TELEFONO:	0997658955

LECTURA ANTERIOR	LECTURA ACTUAL	CONSUMO M3
2641	2668	27
FECHA DE LECTURA ANTERIOR	FECHA DE LECTURA ACTUAL	MES DE CONSUMO
sábado, 29 de marzo de 2025	miércoles, 30 de abril de 2025	ABRIL

CONCEPTO			
DETALLE	M3	TARIFA USD	VALOR USD
COSTO BASICO:	20	3,00	3,00
COSTO EXEDENTE:	7	0,15	1,05
MULTA INASISTENCIA ASAMBLE ORD. JAAP			
VALORES PENDIENTES AL CABILDO		-	0
		TOTAL JUNTA	4,05
OTROS CABILDO:			

LISANDRO ACOSTA
TESORERO
0987875135

RECIBI CONFORME
COPIA



JUNTA ADMINISTRADORA DE AGUA POTABLE
"SAN LUIS DE LA CARBONERIA"

NOMBRE CONSUMIDOR:	AYALA LUIS ALCIDES		
SECTOR:	SAN LUIS	Nº COMSUMIDOR:	43
FECHA:	miércoles, 30 de abril de 2025	Nº MEDIDOR:	1503009253
CEDULA:	1000665677	TELEFONO:	0997658955

LECTURA ANTERIOR	LECTURA ACTUAL	CONSUMO M3
2641	2668	27
FECHA DE LECTURA ANTERIOR	FECHA DE LECTURA ACTUAL	MES DE CONSUMO
sábado, 29 de marzo de 2025	miércoles, 30 de abril de 2025	ABRIL

CONCEPTO			
DETALLE	M3	TARIFA USD	VALOR USD
COSTO BASICO:	20	3,00	3,00
COSTO EXEDENTE:	7	0,15	1,05
MULTA INASISTENCIA ASAMBLE ORD. JAAP			-
VALORES PENDIENTES AL CABILDO		-	-
		TOTAL JUNTA	4,05
OTROS CABILDO:			

LISANDRO ACOSTA
TESORERO
0987875135

Jaime Ayala
OPERADOR
0981138301

ORIGINAL

Anexo 8: *Matriz de revisión de trabajos relacionados*

Proyecto de titulación: Diseño de sistema auto-energizable de medición y envío inalámbrico del consumo del agua potable para la Junta de Agua “San Luis De La Carbonería”

Objetivo de análisis: Determinar la prioridad y aplicabilidad de los requerimientos identificados mediante trabajos relacionados, con el propósito de garantizar la operabilidad y asegurar el cumplimiento de los objetivos establecidos en el proyecto de investigación.

Fecha de realización: 19 de mayo de 2025

Trabajos relacionados:

1. “Diseño de una red LPWAN de medición del consumo de agua potable para la comunidad San Agustín de cajas perteneciente a la junta de agua Mojanda-Yanahurco”. Cuascota Méndez, 2023.
2. “Desarrollo de un sistema inteligente de medición y gestión del consumo de agua potable utilizando tecnología inalámbrica WI-SUN para la Junta de Aguas de la Comuna “Eloy Alfaro” Turucu de la parroquia San Francisco en la ciudad de Cotacachi”. Guevara Panamá, 2023.
3. “Diseño de un sistema inteligente de medición del consumo de agua potable, para la junta de agua “El Dique” de la parroquia de San Antonio de Ibarra”. Garrido Terán, 2021.
4. “Sistema de medidor inteligente de agua potable domiciliario para la junta administradora de agua “El Abra””. Farinango Tuquerres, 2018.
5. Diseño e implementación de un sistema de medición de consumo de energía eléctrica y agua potable remoto con interacción al usuario basado en el concepto “Internet de las Cosas”. Guacaneme Valbuena & Pardo Agueldo, 2016.

Requerimientos de Stakeholders			
Nro.	**Requerimiento**	**Descripción**	**Prioridad**
StRS1	Adquisición y almacenamiento de los datos del consumo de agua potable de forma automática.	La adquisición y almacenamiento automático de los datos de consumo constituye un requerimiento crítico, ya que permite sustituir procedimientos manuales de lectura y registro, los cuales suelen introducir errores operativos, retrasos en la consolidación de información y limitaciones en la trazabilidad del servicio. Esta necesidad ha sido abordada en sistemas de medición inteligente orientados a juntas de agua, donde la automatización del registro mejora la confiabilidad y disponibilidad de la información para la gestión técnica y administrativa del consumo (Cuascota Méndez, 2023).	**Alta**
StRS2	Comunicación inalámbrica para transmisión de datos entre el nodo sensor y el Gateway.	La comunicación inalámbrica entre el nodo sensor y el gateway se justifica por la necesidad de transmitir información de consumo sin depender de infraestructura cableada, lo cual resulta especialmente pertinente en entornos rurales o geográficamente dispersos. Este enfoque incrementa la factibilidad de despliegue, reduce la complejidad de instalación y favorece la escalabilidad del sistema en comunidades con limitaciones de infraestructura física (Guevara Panamá, 2023).	**Media**
StRS3	Operatividad continua las 24 horas del día.	La operatividad continua durante las 24 horas del día es indispensable para garantizar un monitoreo permanente del consumo y la disponibilidad ininterrumpida de datos actualizados. La continuidad de funcionamiento permite registrar eventos de consumo en cualquier instante, evitando vacíos de información que comprometan la supervisión del servicio y la posterior toma de decisiones técnicas o administrativas (Guacaneme Valbuena & Pardo Agueldo, 2016).	**Alta**
StRS4	Trabajar con bajo consumo energético.	El requerimiento de bajo consumo energético se justifica por la necesidad de maximizar la autonomía operativa del sistema, especialmente en aplicaciones distribuidas donde los nodos pueden depender de recursos energéticos limitados. La reducción del consumo contribuye a prolongar el tiempo de funcionamiento, disminuir la frecuencia de mantenimiento y mejorar la sostenibilidad técnica del sistema de medición remota (Cuascota Méndez, 2023).	**Media**
StRS5	Emplear energías alternativas para su autoabastecimiento.	El empleo de energías alternativas para el autoabastecimiento energético se fundamenta en la necesidad de reducir la dependencia de la red eléctrica convencional y asegurar la viabilidad del sistema en zonas con acceso energético limitado o inestable. La incorporación de una fuente renovable favorece la autonomía del nodo, mejora la resiliencia operativa y se alinea con criterios de sostenibilidad energética aplicables a sistemas electrónicos de monitoreo remoto (Creus Solé, 2014).	**Alta**
StRS6	Visualización del historial de consumo de agua potable por vivienda.	La visualización del historial de consumo por vivienda se justifica porque permite al personal responsable disponer de información consolidada y trazable sobre el comportamiento del consumo de agua potable por usuario. Esta funcionalidad facilita el seguimiento del servicio, la detección de variaciones inusuales y el soporte a procesos administrativos asociados al control del suministro y la facturación (Garrido Terán, 2021).	**Alta**

StRS7	Acceso mediante credenciales de inicio de sesión a plataforma de visualización del historial de consumo de agua potable.	El acceso mediante credenciales de autenticación se justifica por la necesidad de restringir el ingreso a la plataforma únicamente al personal autorizado, protegiendo la confidencialidad, integridad y disponibilidad de la información de consumo. La autenticación fortalece la seguridad del sistema y reduce el riesgo de accesos no autorizados a datos operativos y administrativos sensibles (Cuascota Méndez, 2023).	**Alta**
StRS8	Disponibilidad de datos recopilados del consumo de agua potable para revisión del personal autorizado.	La disponibilidad de los datos recopilados para revisión del personal autorizado se justifica porque la gestión del servicio de agua potable requiere información accesible, actualizada y verificable para ejecutar labores de supervisión, control y análisis. La disponibilidad oportuna de los datos permite respaldar decisiones operativas, identificar incidencias y mejorar el seguimiento del consumo por vivienda.	**Alta**
StRS9	Automatización del cálculo del valor mensual de facturación según el consumo.	La automatización del cálculo del valor mensual de facturación se justifica por la necesidad de transformar los datos medidos en información administrativa útil, reduciendo errores humanos en el cálculo manual, agilizando el proceso de facturación y fortaleciendo la consistencia entre el consumo registrado y el valor económico asociado al servicio prestado.	**Alta**
		Requerimientos del Sistema	
SyRS1	La tecnología de comunicación inalámbrica deberá permitir un alcance de transmisión adecuado para entornos rurales.	Este requerimiento depende directamente de **StRS2**, en el cual ya se justificó la necesidad de incorporar comunicación inalámbrica entre el nodo sensor y el gateway. En consecuencia, el alcance de transmisión adecuado para entornos rurales constituye una especificación técnica derivada de dicho requerimiento previamente fundamentado.	**Alta**
SyRS2	La tecnología de comunicación inalámbrica deberá operar con bajo consumo energético.	Este requerimiento depende de **StRS4**, por lo que su justificación ya fue establecida al definir la necesidad de bajo consumo energético como condición para asegurar mayor autonomía operativa del sistema.	**Media**
SyRS3	La fuente de energía primaria deberá ser capaz de energizar a todos componentes del nodo sensor.	La fuente de energía primaria debe ser capaz de energizar todos los componentes del nodo sensor, debido a que la funcionalidad integral del sistema depende del suministro estable de energía hacia los módulos de medición, procesamiento y transmisión. Este requerimiento asegura la continuidad funcional del nodo y evita fallos ocasionados por dimensionamientos energéticos insuficientes.	**Alta**
SyRS4	El nodo sensor deberá permanecer energizado de forma continua durante las 24 horas del día.	Este requerimiento depende de **StRS3**, donde ya se justificó la necesidad de operatividad continua durante las 24 horas del día para garantizar monitoreo permanente y disponibilidad constante de datos.	**Alta**
SyRS5	El nodo sensor deberá contar con una fuente de energía secundaria que garantice su operatividad.	La incorporación de una fuente de energía secundaria se justifica porque permite mantener la operatividad del nodo sensor ante interrupciones, fallos o ausencia temporal de la fuente primaria. Desde una perspectiva de confiabilidad funcional, esta redundancia energética reduce el riesgo de pérdida de datos y favorece la continuidad del monitoreo.	**Alta**
SyRS6	El nodo sensor deberá ser instalado en la red de distribución de agua domiciliaria.	La instalación del nodo sensor en la red de distribución domiciliaria se justifica porque permite medir el consumo en el punto real de uso, garantizando que la información capturada corresponda efectivamente al volumen consumido por cada vivienda.	**Media**

SyRS7	La electroválvula deberá ser controlada mediante un relé que permita su activación y desactivación.	El control de la electroválvula mediante un relé se justifica porque el microcontrolador, por sí solo, no está diseñado para manejar directamente las condiciones eléctricas requeridas por elementos de potencia. El relé actúa como una interfaz de conmutación que asegura el aislamiento y la activación confiable del actuador dentro de condiciones operativas seguras.	**Media**
SyRS8	La medición del consumo de agua potable se realizará mediante un sensor de flujo.	La medición del consumo mediante un sensor de flujo se justifica porque este dispositivo permite convertir el caudal circulante en señales cuantificables, posibilitando la estimación del volumen consumido y su posterior procesamiento digital. Su uso resulta coherente con sistemas de medición inteligente en los que la adquisición automática del consumo constituye la base del monitoreo y la facturación.	**Alta**
SyRS9	La suspensión del servicio de agua potable se realizará mediante la electroválvula.	Este requerimiento depende de **SyRS7**, ya que la ejecución de cortes del servicio mediante electroválvula presupone que el mecanismo de control eléctrico de dicha electroválvula ya ha sido técnicamente justificado.	**Alta**
SyRS10	El almacenamiento de datos recolectados deberá realizarse en la nube.	El almacenamiento de los datos en la nube se justifica porque proporciona disponibilidad remota, centralización de la información y reducción de la dependencia de infraestructura local dedicada. Además, favorece la escalabilidad del sistema, simplifica tareas de respaldo y facilita el acceso a los registros históricos desde la plataforma de gestión.	**Alta**
SyRS11	Los datos recolectados del sensor de flujo serán procesados para determinar las tarifas de facturación.	El procesamiento de los datos del sensor de flujo para determinar tarifas de facturación se justifica porque el sistema no solo debe medir, sino también transformar la información física en variables administrativas útiles para la gestión del servicio. La conversión del volumen consumido en un valor económico permite automatizar procesos y mantener coherencia entre medición y facturación.	**Alta**
SyRS12	El funcionamiento del sistema deberá ser de forma ininterrumpida las 24 horas del día.	Este requerimiento depende de **StRS3**, cuya justificación ya estableció la necesidad de funcionamiento ininterrumpido para asegurar monitoreo y registro continuo del consumo.	**Alta**
SyRS13	El dispositivo deberá contar con una fuente de energía primaria basada en energía renovable que permita la integración de una fuente secundaria que asegure la autonomía en ausencia de la fuente primaria.	Este requerimiento depende de **StRS5**, ya que la necesidad de una fuente primaria basada en energía renovable y su integración con una fuente secundaria ya fue justificada en el requerimiento de autoabastecimiento energético.	**Media**
SyRS14	Los cortes del servicio se efectuarán conforme a los plazos especificados por la Junta de Agua.	La ejecución de cortes del servicio conforme a los plazos definidos por la Junta de Agua se justifica porque el sistema debe responder a criterios operativos y administrativos propios de la entidad gestora. Esta funcionalidad permite vincular la infraestructura tecnológica con la normativa interna de prestación del servicio, optimizando la gestión de suspensiones sin requerir intervención presencial.	**Media**
SyRS15	La recopilación de datos se realizará conforme a los plazos especificados por la Junta de Agua.	La recopilación de datos conforme a plazos preestablecidos se justifica porque la recopilación de datos en plazos definidos permite optimizar el monitoreo, al equilibrar la frecuencia de muestreo y transmisión con el control operacional, la disponibilidad de información y el consumo energético del nodo sensor.	**Media**

SyRS16	El sistema deberá contar con una interfaz gráfica que permita visualizar el consumo de agua potable por usuario.	Este requerimiento depende de **StRS6**, en el que ya se justificó la necesidad de contar con mecanismos de visualización del historial de consumo por vivienda.	**Alta**
SyRS17	La interfaz deberá permitir la generación de reportes de consumo y facturación de agua potable.	La generación de reportes de consumo y facturación desde la interfaz se justifica porque la información medida debe presentarse en formatos útiles para consulta, análisis y soporte administrativo. La disponibilidad de reportes facilita la interpretación de datos históricos y el control documental de la gestión del servicio.	**Alta**
SyRS18	La interfaz deberá ser accesible desde cualquier navegador web.	La accesibilidad desde cualquier navegador web se justifica porque evita la dependencia de software propietario o instalaciones locales, favoreciendo la interoperabilidad y el acceso multiplataforma a la información del sistema. Este criterio mejora la usabilidad y la adopción operativa de la plataforma.	**Media**
SyRS19	El sistema deberá requerir autenticación de usuario para acceder a la plataforma de visualización y consumo de agua potable.	Este requerimiento depende de **StRS7**, en el cual ya se justificó la necesidad de autenticación para controlar el acceso a la plataforma y proteger la información del sistema.	**Alta**
SyRS20	El módulo sensor de flujo deberá ser calibrado antes de ser incorporado al sistema.	Este requerimiento depende de **SyRS8**, dado que la medición mediante sensor de flujo ya fue justificada previamente; por tanto, la calibración constituye una condición técnica derivada necesaria para asegurar la validez metrológica de dicho mecanismo de medición.	**Alta**
SyRS21	El nodo sensor deberá estar instalado cerca del medidor mecánico para comprobar la precisión de las mediciones.	Este requerimiento depende de **SyRS6**, porque la instalación del nodo en la red domiciliaria ya fue fundamentada y, en consecuencia, su ubicación próxima al medidor mecánico se entiende como una especificación derivada orientada a facilitar la verificación comparativa de la precisión del sistema.	**Alta**
SyRS22	El nodo sensor deberá estar protegido mediante case de protección contra factores ambientales.	La protección del nodo sensor mediante un case se justifica porque la instalación en campo lo expone a humedad, polvo, radiación solar, impactos y otros factores ambientales que pueden comprometer la integridad física de los componentes.	**Alta**

Requerimientos de Arquitectura

ArRS1	El microcontrolador deberá presentar características de bajo consumo energético.	Este requerimiento depende de **StRS4**, ya que la necesidad de bajo consumo energético ya fue justificada a nivel de stakeholders y aquí se traduce en un criterio específico de selección del microcontrolador.	**Media**
ArRS2	El microcontrolador deberá disponer de puertos digitales para controlar la electroválvula mediante el relé.	La disponibilidad de puertos digitales en el microcontrolador se justifica porque el control del relé requiere señales lógicas de conmutación que permitan activar o desactivar la electroválvula de forma programada. Este requerimiento garantiza la compatibilidad funcional entre la unidad de procesamiento y el subsistema de actuación.	**Alta**
ArRS3	El microcontrolador deberá ser compatible y capaz de operar utilizando la tecnología de comunicación inalámbrica elegida para el sistema.	La compatibilidad del microcontrolador con la tecnología inalámbrica seleccionada se justifica porque la arquitectura del sistema depende de una integración estable entre procesamiento local y transmisión de datos. La compatibilidad reduce riesgos de integración, simplifica el desarrollo y asegura la viabilidad técnica de la comunicación entre nodos.	**Alta**

ArRS4	La comunicación inalámbrica del microcontrolador deberá operar en un rango de frecuencias acorde a la normativa del país.	La operación de la comunicación inalámbrica en un rango de frecuencias acorde con la normativa nacional se justifica porque garantiza la legalidad del despliegue, minimiza interferencias con otros servicios y asegura que el sistema opere dentro de parámetros regulatorios aceptados en el país.	**Alta**
ArRS5	El microcontrolador deberá tener un costo accesible que permita la viabilidad económica del sistema.	El costo accesible del microcontrolador se justifica porque la viabilidad del proyecto no depende únicamente del desempeño técnico, sino también de la posibilidad de implementar una solución replicable y económicamente razonable para una junta de agua comunitaria.	**Media**
ArRS6	El microcontrolador deberá integrar un circuito de gestión de carga de baterías.	La integración de un circuito de gestión de carga de baterías se justifica porque la arquitectura energética del sistema requiere controlar adecuadamente los procesos de carga, protección y suministro de energía. Esto mejora la seguridad operativa, preserva la vida útil de la batería y garantiza estabilidad eléctrica del nodo sensor.	**Media**
ArRS7	El sensor de flujo y la electroválvula deberán tener dimensiones para acoplarse a una tubería ½ pulgada.	La compatibilidad dimensional del sensor de flujo y la electroválvula con tuberías de ½ pulgada se justifica porque permite su acoplamiento directo a la infraestructura domiciliaria objetivo, reduciendo adaptaciones mecánicas, simplificando la instalación y disminuyendo posibles puntos de fuga o incompatibilidad física.	**Alta**
ArRS8	Utilizar un IDE de programación compatible con el microcontrolador.	El uso de un IDE compatible con el microcontrolador se justifica porque asegura que el proceso de programación, compilación, depuración y carga del firmware pueda ejecutarse de forma confiable, reduciendo errores de desarrollo y garantizando soporte técnico adecuado para la plataforma seleccionada.	**Alta**
ArRS9	Software de curva de aprendizaje y adaptabilidad rápida.	La selección de software con curva de aprendizaje corta y rápida adaptabilidad se justifica porque facilita el desarrollo, mantenimiento y transferencia tecnológica del sistema. Este criterio es especialmente relevante en proyectos académicos o comunitarios donde la sostenibilidad del sistema depende también de su facilidad de administración.	**Alta**
ArRS10	Seleccionar librerías compatibles con el microcontrolador que garanticen su correcto funcionamiento e integración en el sistema.	La selección de librerías compatibles con el microcontrolador se justifica porque la integración funcional del sistema depende de que los dispositivos periféricos y módulos de comunicación puedan ser gestionados de forma estable por el entorno de desarrollo. La compatibilidad de librerías reduce fallos de implementación y mejora la robustez del software embebido.	**Alta**
ArRS11	La página web deberá realizarse utilizando una plataforma de código abierto.	El uso de una plataforma de código abierto para la página web se justifica porque reduce costos por licenciamiento, facilita la personalización del sistema y favorece el mantenimiento futuro mediante herramientas ampliamente disponibles y adaptables al contexto del proyecto.	**Media**
ArRS12	La plataforma de desarrollo deberá permitir la conexión e interacción con una base de datos para almacenar y consultar los datos de consumo de agua potable.	La capacidad de la plataforma de desarrollo para interactuar con una base de datos se justifica porque el sistema requiere almacenar, consultar y procesar información histórica de consumo para fines de visualización, seguimiento y facturación. Este requerimiento asegura la coherencia entre adquisición de datos y gestión informática del servicio.	**Alta**

ArRS13	El sistema debe ser de bajo costo.	Este requerimiento depende de **ArRS5**, por lo que su justificación ya fue establecida al definir que la viabilidad económica constituye un criterio esencial de selección tecnológica del sistema.	**Media**
ArRS14	El sistema debe ser de bajo consumo energético.	Este requerimiento depende de **StRS4**, ya que la necesidad de bajo consumo energético ya fue justificada previamente y aquí se expresa como criterio global de diseño arquitectónico.	**Media**
ArRS15	El nodo sensor deberá ser colocado en un lugar estratégico para una óptima comunicación con el gateway.	La ubicación estratégica del nodo sensor para optimizar la comunicación con el gateway se justifica porque el desempeño del enlace inalámbrico depende de condiciones físicas de instalación tales como distancia, obstáculos, orientación y exposición. Una ubicación técnicamente adecuada reduce pérdidas de datos y mejora la estabilidad de la transmisión.	**Media**
ArRS16	El nodo sensor deberá estar protegido de posibles daños externos.	Este requerimiento depende de **SyRS22**, en el cual ya fue justificada la necesidad de proteger físicamente el nodo sensor frente a factores ambientales y agentes externos.	**Alta**
ArRS17	La alimentación del nodo sensor deberá ser conmutada para un funcionamiento ininterrumpido.	La alimentación conmutada del nodo sensor se justifica porque permite alternar entre fuente primaria y fuente secundaria sin interrumpir el funcionamiento del sistema. Este criterio arquitectónico fortalece la continuidad operativa y reduce el riesgo de indisponibilidad ante eventos de falla energética.	**Alta**
ArRS18	Optimizar lo máximo posible el sistema para un bajo consumo energético.	La optimización integral del sistema para bajo consumo energético se justifica porque la eficiencia energética no depende únicamente del microcontrolador, sino de la interacción entre hardware, software, estrategia de transmisión y gestión de energía. Este requerimiento favorece una arquitectura sostenible y adecuada para nodos autónomos.	Media
ArRS19	La fuente principal de energía deberá ser de energía renovable, garantizando una fuente autorrenovable y limpia.	Este requerimiento depende de **StRS5**, cuya justificación ya estableció la necesidad de recurrir a fuentes energéticas renovables para el autoabastecimiento del sistema.	**Alta**
ArRS20	La fuente de energía secundaria deberá ser mediante el uso de baterías garantizando un funcionamiento ininterrumpido del sistema.	Este requerimiento depende de **SyRS5**, dado que la necesidad de una fuente de energía secundaria para garantizar la operatividad continua del nodo sensor ya fue previamente justificada.	**Alta**
ArRS21	La fuente de alimentación deberá operar en un rango de 5V a 12V para garantizar un funcionamiento seguro y estable del sistema.	El rango de alimentación de 5 V a 12 V se justifica porque permite asegurar compatibilidad con los distintos módulos electrónicos del sistema, así como estabilidad en la operación de sensores, actuadores y circuitos de control. La definición de este rango reduce riesgos de sobrevoltaje, subtensión e inestabilidad funcional.	**Media**

Estudiante
Sr. Fabricio Donoso

Director
MSc. Fabián Cuzme

Anexo 9: *Certificado de autorización para la instalación del prototipo del sistema de medición y transmisión inalámbrica del consumo de agua potable en la Comuna San Luis de la Carbonería*

JUNTA AD DE AGUA PMINISTRADORA DE AGUA POTABLE
"SAN LUIS DE LA CARBONERIA"
Personería Jurídica I-APP062-2028 Imantag -Cotacachi-Imbabura

Ibarra, 3 de junio 2025

Certificado de Autorización.

Funcionario/a Universidad Técnica del Norte

De mis consideraciones:

La presente tiene la finalidad de extenderle un certificado solicitado por Donoso_Martinez_Fabricio_Sebastian con cédula de identidad 1004319867 para aplicar su **TRABAJO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES** cuyo tema **es DISEÑO DE SISTEMA AUTO-ENERGIZABLE DE MEDICIÓN Y ENVÍO INALÁMBRICO DEL CONSUMO DEL AGUA POTABLE PARA LA JUNTA DE AGUA "SAN LUIS DE LA CARBONERÍA" ante lo cual la Junta de Agua potable San Luis de la Carboneria en calidad de presidente autoriza el permiso para la investigación planteada.**

Seguros de aportar con la investigación, el peticionario puede hacer uso de la presente para los fines pertinentes.

Atentamente:

Dr. Rolando Lomas Tapia PhD.

PRESIDENTE

Correo electrónico: fundacionesedsocial9@gmail.com

Teléfono: 0988114923

Dirección: Comunidad San Luis de la Carbonería Casa Comunal Telef. 0988114923 mail: fundacionesedsocial9@gmail.com

Anexo 10: *Pruebas de cobertura de comunicación inalámbrica (LoRA)*

Distancia de prueba de cobertura de comunicación inalámbrica (LoRA): 1000m



Distancia de prueba de cobertura de comunicación inalámbrica (LoRA): 600m



Anexo 11: *Mediciones experimentales del sensor de flujo a diferentes caudales*

Mediciones con nivel de presión baja

Historial de Consumo

Registros recientes del medidor consultado.

748	DisLora_01	10/03/2026 10:09	9.96	0.00996
747	DisLora_01	10/03/2026 10:05	10.03	0.01003
746	DisLora_01	10/03/2026 10:01	9.97	0.00997
745	DisLora_01	10/03/2026 09:57	9.95	0.00995
744	DisLora_01	10/03/2026 09:53	10.04	0.01004
743	DisLora_01	10/03/2026 09:49	9.98	0.00998
742	DisLora_01	10/03/2026 09:45	10.02	0.01002
741	DisLora_01	10/03/2026 09:41	10.01	0.01001
740	DisLora_01	10/03/2026 09:37	10.03	0.01003
739	DisLora_01	10/03/2026 09:33	10.03	0.01003

Mediciones con nivel de presión medio

Historial de Consumo

Registros recientes del medidor consultado.

770	DisLora_01	11/03/2026 10:44	10.01	0.01001
769	DisLora_01	11/03/2026 10:42	9.98	0.00998
768	DisLora_01	11/03/2026 10:40	10.03	0.01003
767	DisLora_01	11/03/2026 10:38	9.95	0.00995
766	DisLora_01	11/03/2026 10:36	10.04	0.01004
765	DisLora_01	11/03/2026 10:34	9.97	0.00997
764	DisLora_01	11/03/2026 10:32	10.03	0.01003
763	DisLora_01	11/03/2026 10:30	10.02	0.01002
762	DisLora_01	11/03/2026 10:28	10.01	0.01001
761	DisLora_01	11/03/2026 10:26	10.05	0.01005

Mediciones con nivel de presión alta

Historial de Consumo

Registros recientes del medidor consultado.

792	DisLora_01	12/03/2026 10:00	9.96	0.00996
791	DisLora_01	12/03/2026 09:57	10.03	0.01003
790	DisLora_01	12/03/2026 09:55	10.01	0.01001
789	DisLora_01	12/03/2026 09:52	9.97	0.00997
788	DisLora_01	12/03/2026 09:50	10.05	0.01005
787	DisLora_01	12/03/2026 09:47	9.98	0.00998
786	DisLora_01	12/03/2026 09:45	10.03	0.01003
785	DisLora_01	12/03/2026 09:42	10.02	0.01002
784	DisLora_01	12/03/2026 09:40	9.96	0.00996
783	DisLora 01	12/03/2026 09:37	9.95	0.00995

Anexo 12: *Guía de uso de la plataforma web del sistema*

Guía de uso de la plataforma web del sistema

Manual operativo para administración, monitoreo y consulta

1. Introducción

La plataforma web del sistema permite consultar datos históricos, administrar usuarios y medidores, controlar elementos del sistema y gestionar procesos de facturación. Esta guía ha sido organizada con un enfoque de manual de usuario, priorizando claridad, secuencia operativa, criterios de validación y buenas prácticas de uso.

2. Objetivo

Establecer un procedimiento claro para el uso de la plataforma, describiendo la función de cada módulo, los parámetros mínimos que debe revisar el usuario y las recomendaciones que permiten una operación segura, ordenada y consistente.

3. Alcance y público objetivo

Esta guía está dirigida a administradores, operadores técnicos y personal autorizado que interactúan con la plataforma para la gestión del sistema. Incluye instrucciones generales de navegación y lineamientos prácticos para los módulos principales.

4. Parámetros previos de uso

Parámetros	Verificación requerida	Criterios recomendados
Acceso autorizado	Comprobar que el usuario disponga de credenciales válidas y activas, de acuerdo con el rol asignado dentro de la plataforma.	El usuario debe estar previamente registrado y autorizado por el administrador del sistema.
Conectividad	Verificar que exista conexión estable a la red y comunicación correcta con el servidor antes de iniciar operaciones.	La plataforma debe cargar y responder sin interrupciones durante la navegación.
Navegador web	Asegurar que se utilice un navegador compatible y actualizado para evitar errores de visualización o funcionamiento.	Utilizar Google Chrome, Microsoft Edge o un navegador equivalente en su versión más reciente.
Integridad de datos	Revisar que todos los campos obligatorios estén correctamente completados antes de guardar, editar o enviar información.	No deben existir campos vacíos, inconsistencias ni registros duplicados.
Rol de usuario	Validar que las funciones ejecutadas correspondan a los permisos definidos para el perfil del usuario.	Cada usuario debe operar únicamente dentro de las opciones habilitadas para su nivel de acceso.

5. Estructura general de navegación

La plataforma está compuesta por módulos funcionales accesibles desde el menú lateral. El usuario debe identificar su necesidad operativa antes de seleccionar el módulo correspondiente: consulta, administración, monitoreo o control.

Módulo	Finalidad principal	Tipo de acción
Inicio	Acceso general y visualización de información de la J.A.A.P.	Informativa
Historial de Consumo	Revisión de consumos registrados por medidor o usuario.	Consulta y control
Administrar Facturación	Gestión y consulta de procesos de cobro.	Administración
Administrar Gateway	Registro y actualización de información del nodo de enlace.	Administración
Administrar Clientes	Registro y actualización de información de usuarios.	Administración
Administrar Medidores	Gestión del inventario y estado de medidores.	Administración

Administrar Perfiles	Control de usuarios, roles y permisos.	Seguridad y administración
Monitoreo de Dispositivos	Visualización del estado de nodos sensores (medidores) del sistema.	Monitoreo

6. Inicio

El módulo Inicio funciona como pantalla principal de acceso a la plataforma. Desde esta vista el usuario identifica el estado general del sistema y navega hacia los módulos operativos habilitados por su rol.



Elementos principales de la pantalla.

- Menú lateral o barra de navegación para ingresar a los módulos.
- Identificación del usuario autenticado y cargo asignado.
- Botón de actualización para refrescar la información visible.
- Botón de cierre de sesión para finalizar la sesión de forma segura.

Procedimiento de uso.

1. Ingresar a la plataforma con usuario y contraseña.

2. Verificar que el nombre del usuario y las opciones visibles correspondan a su rol.

3. Seleccionar desde el menú lateral el módulo que se desea utilizar.

4. Usar la opción de actualizar cuando se requiera refrescar indicadores o sincronizar información.

Resultado esperado.

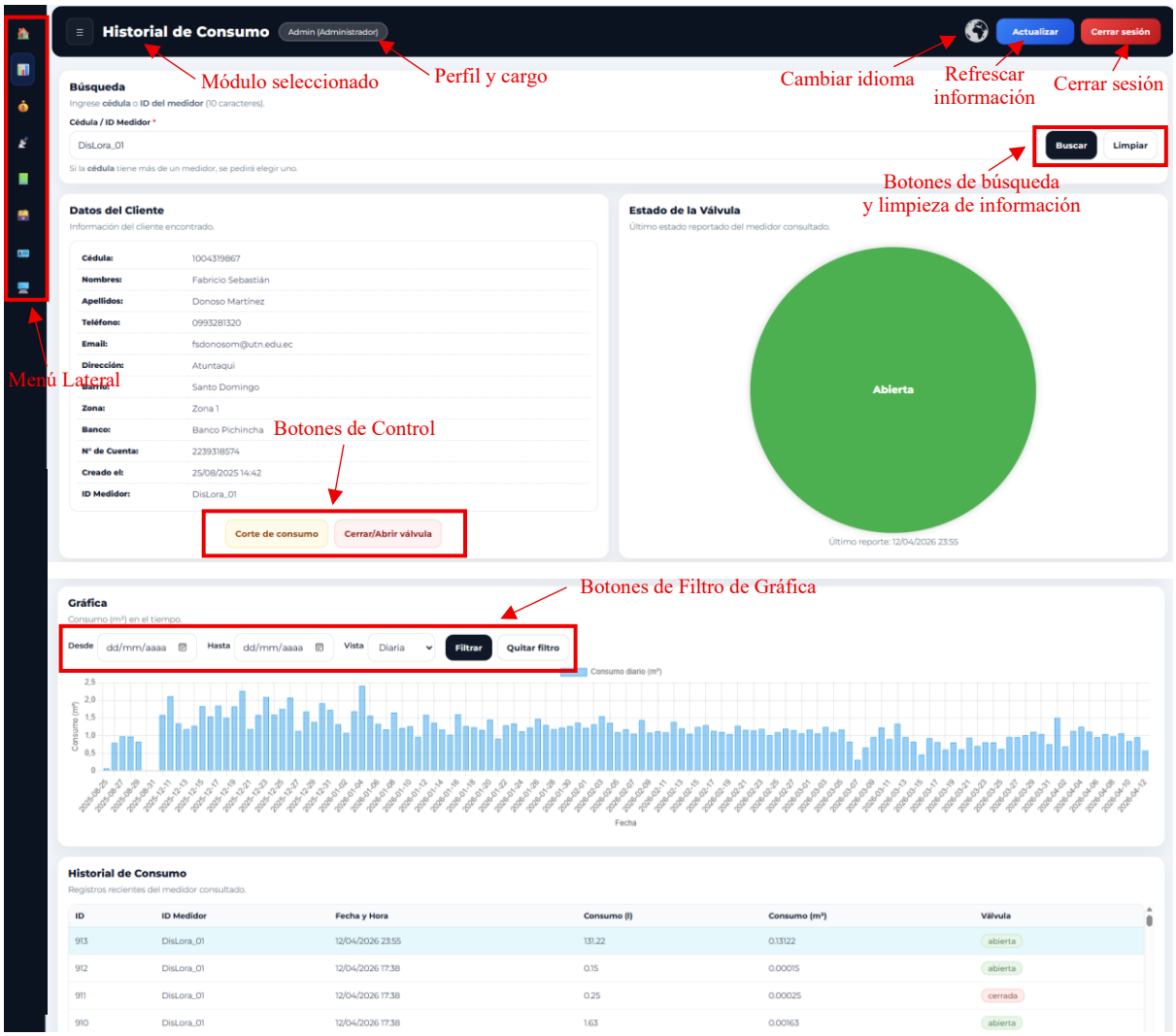
El usuario accede a una vista central desde la cual puede desplazarse hacia el resto de los módulos de la plataforma.

Observaciones.

- No compartir credenciales.
- Cerrar sesión al finalizar la jornada.

7. Historial de Consumo

Permite consultar los registros históricos de consumo asociados a medidores o usuarios, facilitando seguimiento, comparación y análisis.



Procedimiento de uso.

1. Ingresar al módulo Historial de Consumo desde el menú lateral.

2. En la sección de búsqueda, ingresar la cédula del cliente o el ID del medidor.

3. Presionar el botón Buscar para cargar la información asociada.

4. Si la cédula está vinculada a más de un medidor, seleccionar el dispositivo correspondiente.

5. Utilizar el botón Limpiar para borrar la consulta y reiniciar la pantalla si es necesario.

6. Verificar los datos del cliente y del medidor mostrados en pantalla.

7. Revisar el estado actual de la válvula para identificar si el servicio se encuentra habilitado o restringido.

8. Analizar la gráfica de consumo para identificar tendencias, picos o comportamientos anómalos.

9. Aplicar el botón Filtrar para ajustar la visualización de la gráfica según el rango o criterio disponible.

10. Revisar el historial de consumo para validar los registros detallados.

11. Utilizar el botón Corte de Consumo en caso de requerir un corte de consumo al momento.

12. Utilizar el botón Abrir/Cerrar Válvula para ejecutar acciones de control directo sobre el flujo de agua (según permisos).

Resultado esperado.

La plataforma muestra de forma integrada los datos del cliente, estado de la válvula, gráfica de consumo y registros históricos, permitiendo un análisis completo del comportamiento del servicio.

Información y acciones frecuentes.

Para la gestión del historial de consumo se dispone de las siguientes acciones:

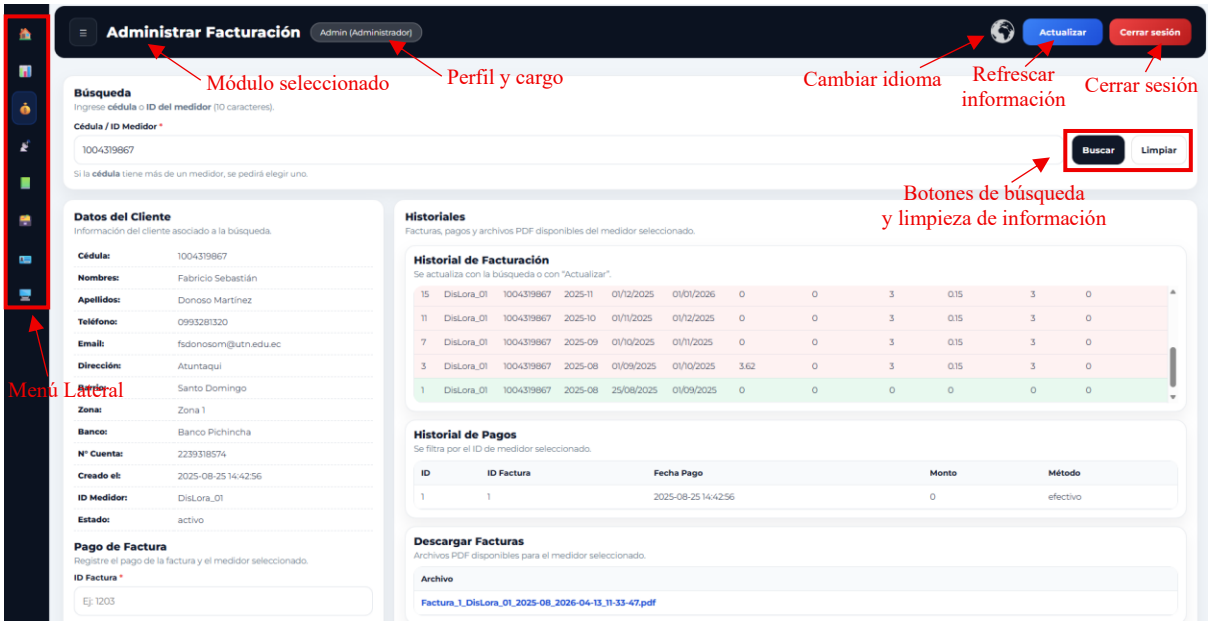
- **Botón Buscar:** Permite consultar la información del cliente o medidor ingresado.
- **Botón Limpiar:** Restablece la búsqueda y limpia los datos mostrados.
- **Botón Filtrar:** Permite ajustar la visualización de la gráfica según criterios como rango de datos o periodo.
- **Botón Corte de Consumo:** Permite ejecutar la suspensión del servicio para el medidor seleccionado.
- **Botón Abrir/Cerrar Válvula:** Permite habilitar o restringir el paso de agua según la acción seleccionada.

Observaciones.

La plataforma permite integrar información operativa y de consumo en un solo módulo, facilitando el análisis y la toma de decisiones. Se recomienda validar siempre el medidor seleccionado antes de ejecutar acciones de control, así como interpretar la gráfica en conjunto con el historial para asegurar una correcta lectura de los datos.

8. Administrar Facturación

Este módulo permite consultar información de facturación asociada a un cliente o medidor, revisar historiales de pago y acceder a documentos generados por el sistema.



Procedimiento de uso.

1. Ingresar al módulo Administrar Facturación desde el menú lateral.

2. En la sección de búsqueda, ingresar la cédula del cliente o el ID del medidor.

3. Presionar el botón Buscar para cargar la información asociada.

4. Si existe más de un medidor relacionado con el cliente, seleccionar el dispositivo correspondiente.

5. Verificar que los datos del cliente o medidor mostrados correspondan al registro correcto.

6. Revisar la sección Historial de Facturación del medidor.

7. Consultar la sección Historial de Pagos para validar los registros de cancelación o estado de las facturas.

8. Revisar la sección Descargar Facturas para visualizar o descargar los comprobantes generados en PDF.

9. Seleccionar la factura deseada y abrir o descargar el archivo correspondiente para su revisión o almacenamiento.

Resultado esperado.

La plataforma muestra de forma integrada la información del cliente o medidor, junto con el historial de facturación, pagos registrados y documentos PDF asociados, permitiendo una correcta validación económica del servicio.

Información y acciones frecuentes.

Para la gestión de la información en este módulo se dispone de las siguientes acciones:

- **Botón Buscar:** Permite consultar la información del cliente o medidor ingresado, cargando automáticamente las secciones de facturación, pagos y documentos.
- **Botón Limpiar:** Restablece los campos de búsqueda y limpia la información mostrada en pantalla.
- **Botón Facturación:** Permite generar una nueva factura para el medidor seleccionado, considerando el periodo actual y los datos de consumo registrados.
- **Botón Pagos:** Permite registrar o gestionar los pagos asociados a las facturas emitidas, actualizando su estado dentro del sistema.
- **Botón Exportar PDF:** Permite generar o descargar el comprobante de la factura en formato PDF para su revisión, almacenamiento o entrega al cliente.

Observaciones.

La plataforma permite consolidar la información económica de cada medidor, facilitando el control de facturación y pagos. Se recomienda verificar siempre que el medidor consultado sea el correcto, corroborar los valores de consumo por periodo y evitar la generación duplicada de facturas para un mismo intervalo de tiempo.

9. Administrar Gateway

Este módulo está orientado a la consulta y administración de la información del gateway que enlaza la red de nodos sensores con la infraestructura en la nube.



Procedimiento de uso.

1. Ingresar al módulo Administrar Gateway desde el menú lateral.
2. Consultar el listado o ficha del gateway registrado.
3. Seleccionar el registro correspondiente en caso de existir coincidencias.
4. Una vez seleccionada la coincidencia correcta, el sistema carga automáticamente la información del gateway.
5. Verificar o actualizar la información del dispositivo según sea necesario.

Registro de nuevos dispositivos Gateway.

En la sección de registro o edición se ingresan o actualizan los datos del gateway, tales como: identificador del dispositivo, estado, ubicación y parámetros de configuración. Antes de guardar, se debe validar que no existan registros duplicados y que los campos obligatorios estén correctamente completados.

Resultado esperado.

La información del gateway queda almacenada o actualizada correctamente en el sistema.

Información y acciones frecuentes.

Para gestionar la información de los registros se tiene las siguientes opciones:

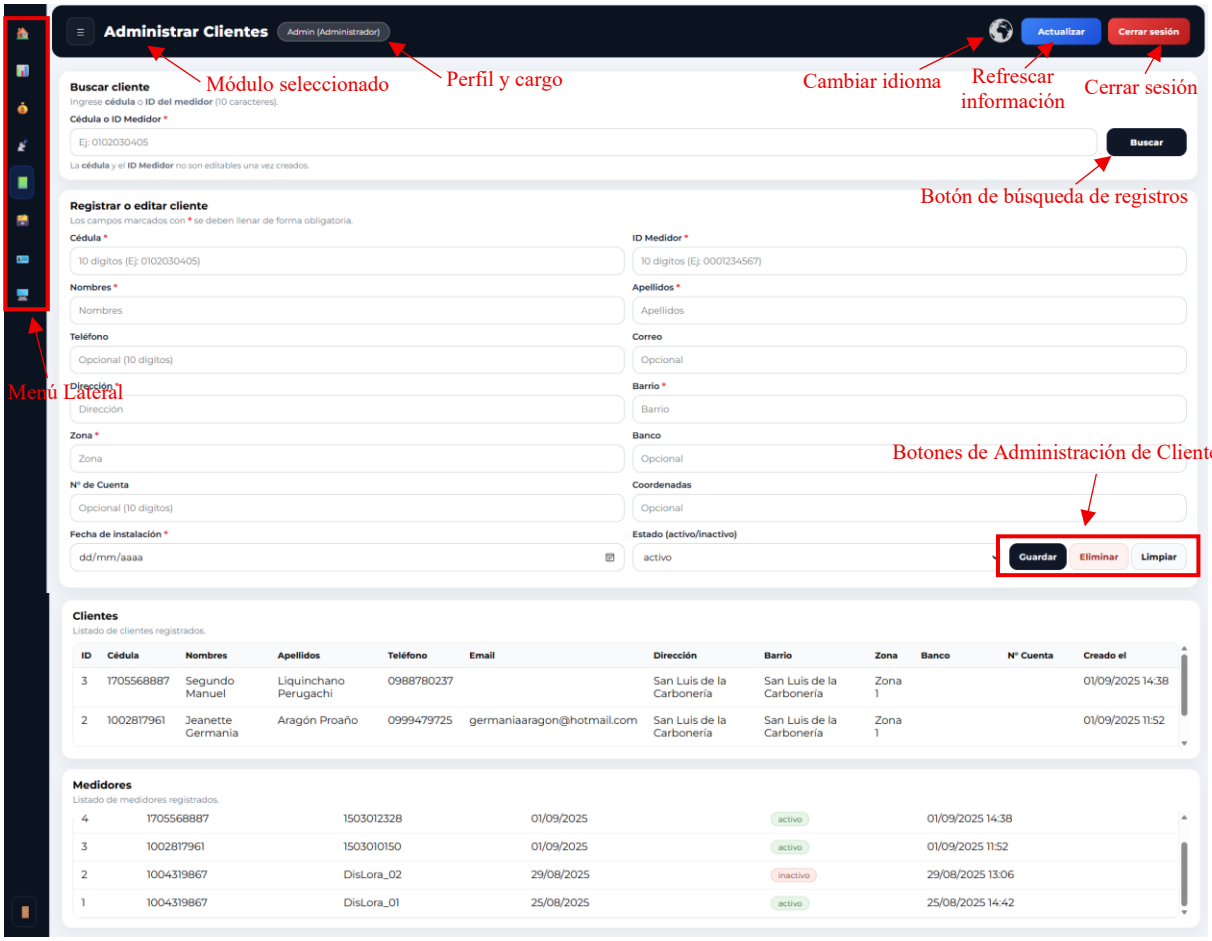
- **Botón Guardar:** Registra nuevos dispositivos gateway o guarda la actualización de un registro existente.
- **Botón Eliminar:** Elimina el registro del gateway seleccionado.
- **Botón Limpiar:** Limpia la información de la búsqueda activa.

Observaciones.

La plataforma permite, registrar nuevos dispositivos y editar registros existentes, facilitando la gestión del sistema.

10. Administrar Clientes

Este módulo concentra el registro, consulta, edición y control de la información asociada a los clientes y medidores del sistema.



Procedimiento de uso.

1. Ingresar al módulo Administrar Clientes desde el menú lateral.

2. Buscar mediante cédula o ID del medidor, si el registro ya existe.

3. Presionar el botón Buscar.

4. Si la cédula está asociada a más de un medidor, seleccionar el dispositivo correspondiente cuando el sistema lo solicite.

5. Una vez seleccionada la coincidencia correcta, el sistema carga automáticamente la información solicitada.

6. Verificar o actualiza la información de la búsqueda solicitada.

Registro de nuevos clientes.

En la sección *Registrar o editar cliente* se ingresan o actualizan los datos del cliente, campos habituales como: nombres, apellidos, cédula, contacto, dirección y otros datos administrativos.

Antes de guardar, validar que no existan duplicidades y que los campos obligatorios estén completos.

Resultado esperado.

La información del cliente queda almacenada o actualizada correctamente.

Información y acciones frecuentes.

Para gestionar la información de los registros se tiene las siguientes opciones:

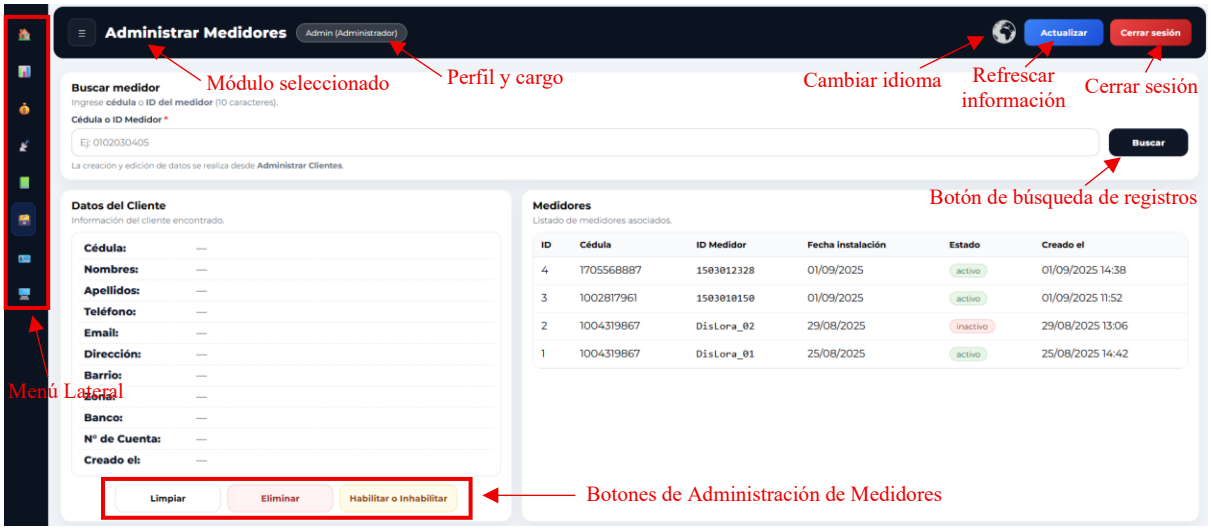
- **Botón Guardar:** Registra a nuevos clientes y medidores o guarda la actualización de la información del registro existente.
- **Botón Eliminar:** Elimina la información de cliente y su medidor registrado.
- **Botón Limpiar:** Limpia la información de la búsqueda activa.

Observaciones.

La plataforma mantiene una base de clientes consistente, vinculable con medidores, facturación y otros procesos administrativos del sistema.

11. Administrar Medidores

Este módulo permite gestionar la información técnica y administrativa de los medidores vinculados a los clientes del sistema.



Procedimiento de uso.

1. Ingresar al módulo Administrar Medidores desde el menú lateral.
2. Buscar mediante cédula o ID del medidor, si el registro ya existe.
3. Presionar el botón Buscar.

4. Si la cédula está asociada a más de un medidor, seleccionar el dispositivo correspondiente cuando el sistema lo solicite.

5. Una vez seleccionada la coincidencia correcta, el sistema carga automáticamente la información solicitada.

6. Verifica los datos del cliente asociado.

7. Revisar o modificar el estado del dispositivo.

Resultado esperado.

El medidor queda disponible para su seguimiento y gestión en la plataforma.

Información y acciones frecuentes.

Para gestionar la información de los registros se tiene las siguientes opciones:

- **Botón Limpiar:** Limpia la información de la búsqueda activa.
- **Botón Eliminar:** Elimina la información de cliente y su medidor registrado.
- **Botón Habilitar o Inhabilitar:** Cambia el estado del medidor (activo/inactivo).

Observaciones.

La plataforma permite, mediante el cambio de estado, identificar y filtrar fácilmente los medidores según su condición operativa, facilitando la gestión y consulta del sistema sin afectar el historial de datos registrado.

12. Administrar Perfiles

Este módulo se emplea para gestionar perfiles de acceso y permisos asociados a cada rol operativo. Garantizando que cada usuario acceda únicamente a las funciones necesarias para el cumplimiento de sus responsabilidades dentro de la plataforma.



Procedimiento de uso.

1. Acceder al módulo Administrar Perfiles desde el menú lateral.
2. Crear o seleccionar el perfil que se va a gestionar.
3. Asignar rol y permisos acordes a la función del usuario.
4. Modificar datos o privilegios solo si el usuario administrador así lo considera.
5. Guardar cambios y validar el acceso correspondiente.

Información y acciones frecuentes.

Cada usuario dispone de permisos ajustados a sus responsabilidades dentro del sistema, para actualizar los permisos o rol se tiene las siguientes opciones:

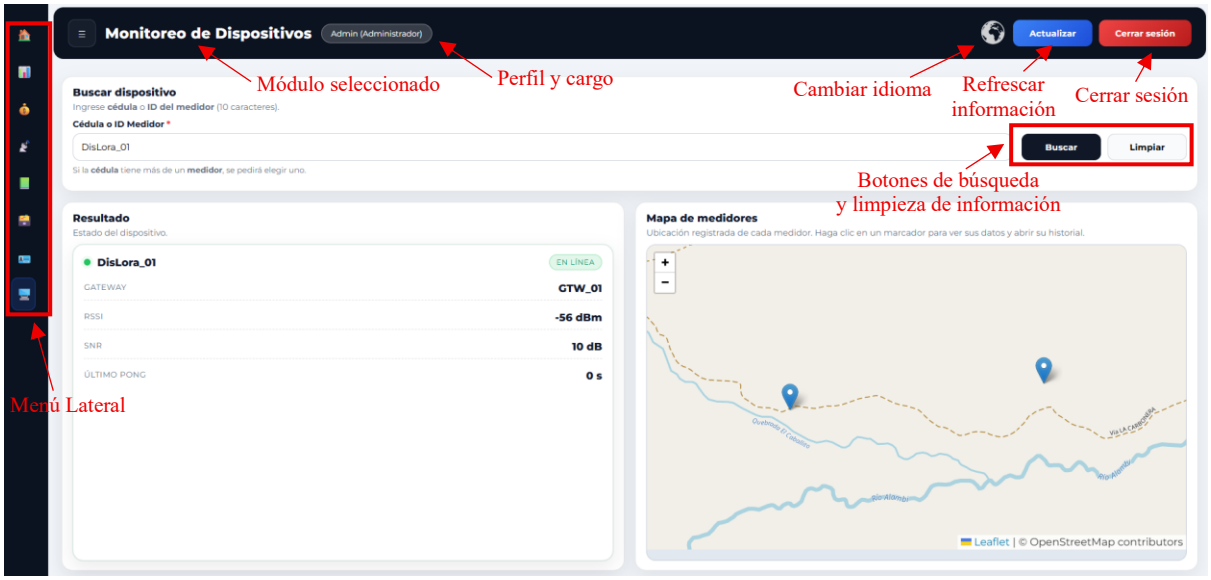
- **Botón Crear:** Registra a nuevos usuarios.
- **Botón Rol:** Cambio de rol o nivel de privilegio.
- **Botón Ventanas:** Asignación de módulos a los que puede acceder ese usuario.
- **Botón Clave:** Cambio de contraseña de usuario.
- **Botón Eliminar:** Elimina un usuario registrado.

Observaciones.

Cada usuario debe disponer solo de los permisos estrictamente necesarios para su trabajo.

13. Monitoreo de Dispositivos

Permite observar el estado y la ubicación de los dispositivos desplegados, facilitando el seguimiento operativo y la detección de incidencias.



Procedimiento de uso.

1. Ingresar al módulo Monitoreo de Dispositivos desde el menú lateral.

2. Buscar mediante cédula/ID del medidor, o seleccionar en el mapa el dispositivo a monitorear o consultar su historial de consumo.

3. Presionar el botón Buscar.

4. Si la cédula está asociada a más de un medidor, seleccionar el dispositivo correspondiente cuando el sistema lo solicite.

5. Observar indicadores de estado, comunicación o alertas.

Resultado esperado.

- Identificador del dispositivo.
- Estado operativo.
- Cliente relacionado.
- Ubicación.
- Última comunicación registrada.

Observaciones.

Esta vista es útil para identificar dispositivos activos, o sin comunicación reciente para intervención técnica.

14. Buenas prácticas de uso

- Verificar siempre la coincidencia entre cliente, medidor y datos cargados antes de ejecutar una acción crítica.
- Actualizar la pantalla cuando se sospeche que la información visible no corresponde al estado más reciente del sistema.
- Evitar registros duplicados mediante una revisión previa de los identificadores.
- Cerrar sesión al finalizar la operación, especialmente en equipos compartidos.
- Aplicar cambios administrativos únicamente desde perfiles autorizados.

15. Errores frecuentes y acciones recomendadas

Situación detectada	Posible causa	Acción recomendada
No se puede acceder al sistema	Credenciales inválidas o usuario no registrado	Verificar datos de acceso y estado del perfil.
No se muestran todas las opciones	Restricción por rol o permisos insuficientes	Confirmar el perfil asignado al usuario.
No aparecen registros en una consulta	Filtros mal definidos o ausencia de datos en el periodo	Verificar cédula, ID del medidor o filtros aplicados.
Información inconsistente	Registro incompleto o asociación incorrecta de datos	Corregir el registro y validar relaciones entre cliente, medidor y consumo.
Error al guardar datos	Campos obligatorios incompletos o inconsistencias	Revisar validaciones antes de guardar.
Medidor sin actualización reciente	Falla de comunicación o desconexión del gateway	Revisar conectividad, alimentación y estado del gateway.

16. Criterios de cierre de sesión y seguridad

Al finalizar la operación, el usuario debe cerrar la sesión, verificar que no queden procesos pendientes y evitar dejar abierta la plataforma en equipos compartidos. También se recomienda revisar periódicamente los perfiles habilitados y registrar cualquier comportamiento irregular observado durante el uso.

Anexo 13: *Formato de encuesta de evaluación de usabilidad y funcionalidad del sistema propuesto*

Encuesta de Evaluación de Usabilidad y Funcionamiento del Sistema

A continuación, se presentan una serie de afirmaciones relacionadas con el funcionamiento del sistema desarrollado.

Después de utilizar el sistema, marque con un círculo (O) el número que represente su nivel de acuerdo con cada afirmación.

Escala de valoración

Valor	Significado
1	Muy en desacuerdo
2	En desacuerdo
3	Neutral
4	De acuerdo
5	Muy de acuerdo

Funcionamiento del sistema

Nº	Pregunta	Valoración
1	El sistema muestra correctamente la información del consumo de agua.	1 2 3 4 5
2	La información que aparece en la plataforma es clara y fácil de entender.	1 2 3 4 5
3	El sistema permite consultar fácilmente los datos de consumo.	1 2 3 4 5

Velocidad y desempeño

Nº	Pregunta	Valoración
4	La plataforma carga rápidamente al momento de ingresar.	1 2 3 4 5
5	Las páginas del sistema responden rápidamente al utilizarlas.	1 2 3 4 5

Facilidad de uso

Nº	Pregunta	Valoración
6	La plataforma es fácil de usar.	1 2 3 4 5
7	Los botones y opciones del sistema son fáciles de entender.	1 2 3 4 5
8	La organización de la información en la pantalla es clara.	1 2 3 4 5
9	Me resultó sencillo encontrar la información que buscaba.	1 2 3 4 5
10	El diseño de la plataforma es agradable y ordenado.	1 2 3 4 5

Confiabilidad del sistema

Nº	Pregunta	Valoración
11	El sistema funcionó correctamente durante su uso.	1 2 3 4 5
12	La información mostrada en la plataforma parece confiable.	1 2 3 4 5
13	No se presentaron errores durante el uso del sistema.	1 2 3 4 5

Seguridad de acceso

Nº	Pregunta	Valoración
14	El sistema permite acceder de manera segura mediante usuario y contraseña.	1 2 3 4 5
15	El proceso de inicio de sesión es sencillo de realizar.	1 2 3 4 5

Visualización de Información

Nº	Pregunta	Valoración
16	El sistema muestra la información del consumo de agua de forma clara.	1 2 3 4 5
17	La plataforma permite comprender fácilmente los datos mostrados en las tablas y gráficas.	1 2 3 4 5
18	La información presentada en el sistema ayuda a conocer el estado del servicio de agua.	1 2 3 4 5
19	El sistema facilita la consulta de información cuando se necesita revisar datos de consumo o clientes.	1 2 3 4 5
20	Considera que el sistema puede apoyar la toma de decisiones en la gestión del servicio de agua.	1 2 3 4 5

Utilidad del sistema

Nº	Pregunta	Valoración
21	El sistema facilita la gestión de la información para la facturación del servicio de agua.	1 2 3 4 5
22	El sistema permite visualizar fácilmente la información de los medidores.	1 2 3 4 5
23	Considero que el sistema es útil para la gestión del servicio de agua.	1 2 3 4 5
24	El sistema permite gestionar adecuadamente la información de los clientes.	1 2 3 4 5
25	En general, considera que el sistema es fácil de utilizar.	1 2 3 4 5



Estudiante
Sr. Fabricio Donoso



Director
MSc. Fabián Cuzme

Anexo 14: *Encuesta de evaluación de usabilidad y funcionalidad del sistema propuesto*

Encuesta de Evaluación de Usabilidad y Funcionamiento del Sistema

A continuación, se presentan una serie de afirmaciones relacionadas con el funcionamiento del sistema desarrollado.

Después de utilizar el sistema, marque con un círculo (O) el número que represente su nivel de acuerdo con cada afirmación.

Escala de valoración

Valor	Significado
1	Muy en desacuerdo
2	En desacuerdo
3	Neutral
4	De acuerdo
5	Muy de acuerdo

Funcionamiento del sistema

Nº	Pregunta	Valoración
1	El sistema muestra correctamente la información del consumo de agua.	1 2 3 4 (5)
2	La información que aparece en la plataforma es clara y fácil de entender.	1 2 3 4 (5)
3	El sistema permite consultar fácilmente los datos de consumo.	1 2 3 4 (5)

Velocidad y desempeño

Nº	Pregunta	Valoración
4	La plataforma carga rápidamente al momento de ingresar.	1 2 3 4 (5)
5	Las páginas del sistema responden rápidamente al utilizarlas.	1 2 3 4 (5)

Facilidad de uso

Nº	Pregunta	Valoración
6	La plataforma es fácil de usar.	1 2 3 4 5
7	Los botones y opciones del sistema son fáciles de entender.	1 2 3 4 5
8	La organización de la información en la pantalla es clara.	1 2 3 4 5
9	Me resultó sencillo encontrar la información que buscaba.	1 2 3 4 5
10	El diseño de la plataforma es agradable y ordenado.	1 2 3 4 5

Confiabilidad del sistema

Nº	Pregunta	Valoración
11	El sistema funcionó correctamente durante su uso.	1 2 3 4 5
12	La información mostrada en la plataforma parece confiable.	1 2 3 4 5
13	No se presentaron errores durante el uso del sistema.	1 2 3 4 5

Seguridad de acceso

Nº	Pregunta	Valoración
14	El sistema permite acceder de manera segura mediante usuario y contraseña.	1 2 3 4 5
15	El proceso de inicio de sesión es sencillo de realizar.	1 2 3 4 5

Visualización de Información

Nº	Pregunta	Valoración
16	El sistema muestra la información del consumo de agua de forma clara.	1 2 3 4 5
17	La plataforma permite comprender fácilmente los datos mostrados en las tablas y gráficas.	1 2 3 4 5
18	La información presentada en el sistema ayuda a conocer el estado del servicio de agua.	1 2 3 4 5
19	El sistema facilita la consulta de información cuando se necesita revisar datos de consumo o clientes.	1 2 3 4 5
20	Considera que el sistema puede apoyar la toma de decisiones en la gestión del servicio de agua.	1 2 3 4 5

Utilidad del sistema

N°	Pregunta	Valoración
21	El sistema facilita la gestión de la información para la facturación del servicio de agua.	1 2 3 4 (5)
22	El sistema permite visualizar fácilmente la información de los medidores.	1 2 3 4 (5)
23	Considero que el sistema es útil para la gestión del servicio de agua.	1 2 3 4 (5)
24	El sistema permite gestionar adecuadamente la información de los clientes.	1 2 3 4 (5)
25	En general, considera que el sistema es fácil de utilizar.	1 2 3 4 (5)

Lizandro Acosta
Tesorero

Jaime Ayala
Operador