

**Sistema automatizado de abastecimiento y potabilización de agua para comunidades
rurales en Manga Vieja, Yumbo**

Robin Hernán Pantoja Gaviria

Director

Oscar Camilo Fuentes Amin

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD
Escuela de Ciencias Básicas Tecnología e Ingeniería ECBTI
Tecnología en Automatización Electrónica Industrial

2026

Dedicatoria

Este trabajo de grado está dedicado en primer lugar a Dios, por brindarme la vida, la fortaleza y la sabiduría necesarias para culminar esta etapa de formación académica.

A mi familia, por su apoyo incondicional, su paciencia y su confianza en cada uno de los pasos que he dado a lo largo de este proceso. Su acompañamiento ha sido fundamental para superar los desafíos y mantener la motivación durante el desarrollo de este proyecto.

Dedico también este trabajo a todas las comunidades rurales que enfrentan diariamente dificultades para acceder a agua potable, especialmente a los habitantes de la vereda Manga Vieja, quienes inspiran la búsqueda de soluciones tecnológicas que contribuyan a mejorar su calidad de vida.

Agradecimientos

Expreso mi más sincero agradecimiento a la Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD y a la Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería (ECBTI) por brindarme la oportunidad de formarme profesionalmente y desarrollar este proyecto de investigación.

A mi asesor de trabajo de grado, Oscar Camilo Fuentes Amin, por su orientación, acompañamiento y valiosos aportes durante el desarrollo de este proyecto, los cuales fueron fundamentales para fortalecer el enfoque técnico y académico de la investigación.

A los docentes que hicieron parte de mi proceso formativo en el programa de Tecnología en Automatización Electrónica Industrial, quienes con sus conocimientos y experiencias contribuyeron significativamente a mi crecimiento académico y profesional.

Asimismo, agradezco a los habitantes de la vereda Manga Vieja por compartir su realidad y permitir que este proyecto se inspirara en sus necesidades, aportando así al desarrollo de propuestas orientadas a mejorar el acceso al agua potable en comunidades rurales.

Finalmente, agradezco a todas aquellas personas que, de una u otra manera, brindaron su apoyo, motivación y confianza durante este proceso, haciendo posible la culminación de esta importante etapa de mi vida académica.

Resumen

El abastecimiento de agua en la vereda Manga Vieja se sostiene a partir de fuentes diversas, entre ellas aljibes, nacederos y captación en el río, lo que genera diferencias en calidad, caudal y esfuerzo operativo que afectan la vida cotidiana de las familias. El proyecto analiza estas condiciones y documenta la infraestructura existente, las prácticas de bombeo y los métodos de desinfección utilizados actualmente, con el fin de construir una línea base que permita orientar mejoras. A partir de este diagnóstico se diseña un prototipo que integra presurización básica, control automatizado y tratamiento simple, buscando estabilizar el suministro y reducir riesgos hidráulicos y sanitarios. El estudio propone una ruta gradual de actualización tecnológica que respete la capacidad de gestión comunitaria y facilite procesos de transición hacia sistemas más seguros, eficientes y sostenibles.

Palabras Clave: agua, bombeo, presurización, cloración, prototipo.

Abstract

Water supply in the Manga Viejas village relies on diverse sources, including household cisterns, natural springs, and river intake, creating variations in quality, flow and operational effort that shape daily practices. This project examines these conditions and documents existing infrastructure, pumping routines and household disinfection methods in order to establish a technical baseline that guides system improvements. Based on this analysis, a prototype integrating basic pressurization, automated control and simple treatment modules is designed to stabilize supply and reduce hydraulic and sanitary risks. The study proposes a gradual technological upgrade pathway that aligns with community management capacities and supports a transition toward safer, more efficient, and sustainable water systems.

Keywords: water, pumping, pressure, chlorination, prototype.

Tabla de Contenido

Introducción	13
Propuesta de Investigación	16
Planteamiento del Problema	16
Pregunta de Investigación.....	19
Justificación	19
Objetivos	22
Objetivo General.....	22
Objetivos Específicos	22
Estado del Arte.....	23
Marco Contextual.....	30
Contexto Geográfico.....	30
Contexto Social y Demográfico	30
Contexto Ambiental.....	31
Contexto Técnico.....	31
Contexto Económico	31
Importancia del Contexto para el Proyecto	32
Marco Teórico.....	33
Sistema Hidroneumático.....	33
Potabilización del Agua.....	35
Sostenibilidad y Gestión Comunitaria	35
Tecnologías Apropriadas para el Desarrollo Rural.....	37
Marco Conceptual.....	39

Acueductos Rurales	39
Naturaleza y Función	39
Relación con el Territorio	39
Fuentes de Agua	39
Aljibes y Abastecimiento Doméstico	39
Nacederos y Comportamiento Estacional	40
Captación Superficial en Ríos	40
Sistemas Hidroneumáticos	41
Regulación de Presión en Redes de Abastecimiento	41
Control Automatizado del Sistema de Abastecimiento	41
Automatización Aplicada al Agua Rural	41
Control Electrónico y Operación Segura	41
Estandarización y Facilidad de Uso	42
Potabilización del Agua	42
Procesos de Filtración	42
Desinfección y Control Sanitario	42
Gestión Comunitaria del Agua	43
Participación Comunitaria en la Gestión del Sistema	43
Capacitación y Apropiación Tecnológica	43
Sostenibilidad Operativa del Sistema	43
Autonomía Energética y Ambiental	44
Sostenibilidad Técnica y Operativa	44
Adecuación Tecnológica	44

Mantenimiento y Vida Útil.....	44
Distribución Domiciliaria del Agua	45
Condiciones de la Red	45
Equidad y Seguridad Sanitaria.....	45
Estandarización de la Infraestructura	45
Componentes Hidráulicos.....	45
Protocolos de Operación.....	46
Marco Normativo.....	47
Metodología	49
Tipo de Investigación	49
Enfoque de Investigación	49
Diseño de Investigación.....	50
Población y Muestra	51
Fuentes de Información y Métodos	51
Fases del Desarrollo.....	53
Fase de Exploración y Diagnóstico Comunitario	54
Fase de Caracterización Técnica e Infraestructura Existente	54
Fase de Diseño Conceptual y Selección de Componentes	54
Fase de Construcción del Prototipo	55
Fase de Análisis de Costos y Viabilidad Económica.....	55
Listado de Componentes del Sistema.....	55
Costo del Prototipo	57
Estimación de Implementación Real (Escalabilidad).....	57

Análisis de Viabilidad	57
Resultados y Discusiones.....	59
Diagnóstico de la Situación	59
Línea Base Técnica del Sistema de Abastecimiento de Agua – Vereda Manga Vieja.....	59
Fuentes y Esquemas de Captación.....	59
Equipos de Bombeo y Modo de Operación.....	60
Desinfección y Potabilización en el Punto de Uso.....	61
Restricciones Hidráulicas y Operativas.....	62
Requerimientos Mínimos de Control y Seguridad (situación actual).....	63
Conclusión Técnica de la Línea Base.....	64
Contexto Real de la Comunidad	64
Objetivo de la Fase.....	65
Actores y Sitios Para Releva.....	66
Instrumentos de Levantamiento.....	67
Preguntas Clave en Campo.....	67
Mapa del Proceso.....	68
Problemas Típicos Observados.....	70
Trabajo Exploratorio sobre la Tecnología Existente	71
Tecnologías Disponibles Hoy y Rutas de Actualización.....	71
Hoja de Ruta de Mejoras (Gradual).....	72
Modelación del Prototipo	73
Modelado del Sistema Hidráulico	75
Cálculo de Caudal del Sistema	77

	10
Cálculo de Presión Estimada	78
Modelado Eléctrico del Sistema (Proteus)	79
Diseño de PCB (EAGLE).....	81
Diagrama de Bloques del Sistema	82
Lógica de Control	84
Construcción y Validación del Prototipo Automatizado	88
Construcción del Sistema Hidráulico a Escala	89
Construcción del Sistema Electrónico de Control	91
Integración del Sistema Completo.....	95
Prueba Experimental de Funcionamiento	95
Procedimiento	96
Evaluación del Desempeño del Prototipo.....	97
Indicadores Cuantitativos de Validación	98
Discusión.....	101
Conclusiones	105
Recomendaciones	107
Trabajos Futuros	109
Referencias.....	110

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Matriz de Análisis de las Fuentes del Estado del Arte</i>	23
Tabla 2 <i>Fuentes de Información y Métodos</i>	52
Tabla 3 <i>Costos del Prototipo</i>	56
Tabla 4 <i>Distribución Funcional de Bombas y Sensores</i>	77
Tabla 5 <i>Resultados de Caudal Experimental</i>	78
Tabla 6 <i>Resultados de Prueba Experimental</i>	96
Tabla 7 <i>Fuentes de Información y Métodos</i>	98

Lista de Figuras

Figura 1 <i>Mapa de Procesos</i>	69
Figura 2 <i>Diagrama Hidráulico del Sistema Automatizado</i>	76
Figura 3 <i>Diagrama Esquemático del Sistema en Proteus</i>	80
Figura 4 <i>Diseño de PCB del Sistema de Control</i>	81
Figura 5 <i>Diagrama de Bloques del Sistema Automatizado</i>	83
Figura 6 <i>Diagrama de Flujo del Algoritmo de Control</i>	85
Figura 7 <i>Vista General del Prototipo Hidráulico a Escala</i>	90
Figura 8 <i>Detalle de Tanques y Sensores de Nivel Instalados</i>	91
Figura 9 <i>PCB Fabricada del Sistema de Control</i>	93
Figura 10 <i>Integración del Tablero Electrónico al Prototipo Hidráulico</i>	94

Introducción

El acceso seguro al agua en zonas rurales continúa siendo un desafío que combina factores técnicos, sociales y ambientales, lo que obliga a pensar en soluciones apropiadas que se adapten a las condiciones particulares de cada comunidad, por lo que la vereda Manga Vieja representa un escenario pertinente para examinar estas dinámicas. Las prácticas actuales de abastecimiento muestran una dependencia directa de sistemas domésticos que requieren esfuerzo constante, lo que hace necesario comprender cómo funcionan y cuáles son sus limitaciones, con el fin de orientar propuestas que apoyen la seguridad hídrica de las familias.

Comprender este contexto implica reconocer la diversidad de fuentes utilizadas por la comunidad y los retos asociados a su manejo cotidiano, ya que las variaciones en caudal, presión y calidad del agua afectan la continuidad del suministro y la capacidad de las familias para gestionar el recurso, y este panorama hace evidente la importancia de explorar alternativas que ofrezcan mayor estabilidad operativa. Analizar estas condiciones permitió identificar puntos críticos que influyen en la seguridad sanitaria, lo que motivó la necesidad de diseñar una propuesta que dialogue con las posibilidades reales del territorio.

La investigación se desarrolló con la intención de caracterizar de manera detallada el sistema actual de abastecimiento y comprender cómo las prácticas locales definen su funcionamiento, lo que sirvió como base para orientar el diseño de un prototipo que pudiera responder a estas restricciones. Esta aproximación privilegia la relación entre el diagnóstico y la propuesta técnica, ya que el conocimiento del territorio es indispensable para tomar decisiones que respondan a las necesidades observadas y a las expectativas de la comunidad, lo que otorga sentido y pertinencia al proceso investigativo.

En este escenario, el diseño de un prototipo de abastecimiento y potabilización surge como una alternativa que permite explorar, en condiciones controladas, la integración de automatización básica, presurización y pretratamiento, de manera que su funcionamiento pueda evaluarse sin los riesgos y variaciones que acompañan las pruebas en campo. Este enfoque permite analizar el comportamiento del sistema de manera progresiva y comprender cuáles elementos son ajustables, replicables o escalables, lo que constituye un aporte para comunidades que enfrentan condiciones hidráulicas cambiantes.

La revisión de antecedentes ofreció un soporte conceptual fundamental para orientar el diseño del prototipo, ya que permitió conocer experiencias similares en contextos rurales de diferentes países y reconocer elementos comunes como la importancia del control de la presión, la eficiencia de los procesos de desinfección y la necesidad de tecnologías accesibles que puedan ser gestionadas por las comunidades. Este ejercicio ayudó a visualizar rutas posibles y a reflexionar sobre las decisiones técnicas más adecuadas para la vereda, tomando en cuenta sus condiciones y capacidades.

El proceso metodológico se estructuró a partir de un enfoque aplicado que buscó articular diagnóstico, diseño y experimentación, de modo que cada etapa aportara información clave para la siguiente, y esta secuencia permitió construir un prototipo coherente con las realidades del territorio. La combinación de observación directa, análisis técnico y pruebas controladas otorgó solidez al proceso y permitió valorar la pertinencia de las decisiones tomadas, lo que da consistencia a los resultados obtenidos.

Los hallazgos del proyecto mostraron que la integración de sensores, controles simples, filtración previa y mecanismos de presurización puede mejorar la estabilidad del flujo y reducir esfuerzos operativos, siempre que se mantenga la simplicidad del diseño y se aseguren materiales

accesibles para la comunidad. Este resultado permitió reflexionar sobre la relación entre automatización y sostenibilidad comunitaria, ya que cualquier mejora tecnológica debe estar acompañada por capacidades locales de mantenimiento y prácticas domésticas acordes con los lineamientos sanitarios.

El trabajo se plantea como un punto de partida para la exploración de soluciones apropiadas de abastecimiento en zonas rurales, y si bien el prototipo constituye un avance significativo, su alcance requiere ampliaciones futuras que evalúen su comportamiento a mayor escala, así como su capacidad de adaptación ante las condiciones reales de la vereda. Esta introducción delimita los elementos que guiaron la investigación y abre paso al desarrollo del documento, que integra el diagnóstico, los fundamentos conceptuales, la metodología, los resultados obtenidos y las reflexiones que orientan las conclusiones y recomendaciones finales.

Propuesta de Investigación

Planteamiento del Problema

El acceso a agua potable segura es un derecho humano fundamental reconocido por organismos internacionales como la Organización de las Naciones Unidas (ONU), que lo ha incluido como una meta prioritaria dentro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), específicamente en el ODS 6: Agua limpia y saneamiento (ONU, 2015). No obstante, en zonas rurales de países como Colombia, este derecho sigue siendo vulnerado, dejando a millones de personas expuestas a fuentes hídricas contaminadas o a la completa escasez del recurso.

La vereda Manga Vieja, ubicada en el municipio de Yumbo, departamento del Valle del Cauca, representa un ejemplo claro de esta problemática. Esta comunidad carece de infraestructura adecuada para el almacenamiento, tratamiento y distribución del agua, lo que obliga a sus habitantes a depender de un nacedero natural. Dicho afluente, además de ser insuficiente para cubrir las necesidades básicas de todas las viviendas, ha sido contaminado por residuos orgánicos provenientes de corrales de cerdos y otros focos de polución cercanos.

Esta situación ha derivado en un aumento de enfermedades hídricas en la población, afectando especialmente a niños, adultos mayores y personas con enfermedades crónicas. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), el consumo de agua contaminada puede provocar enfermedades como diarreas, cólera, disentería y fiebre tifoidea, siendo una de las principales causas de muerte en menores de cinco años en países en desarrollo (OMS, 2023).

Además del impacto en la salud pública, la deficiencia en el acceso al agua potable genera repercusiones económicas y sociales importantes. Los hogares deben destinar tiempo y recursos para recolectar agua manualmente o comprarla por medios alternativos como carrotanques, lo cual encarece el costo del recurso y profundiza la desigualdad social. Esta

situación también limita el funcionamiento adecuado de instituciones educativas y microemprendimientos locales (Martínez & Gómez, 2019).

La falta de un sistema de distribución adecuado también genera conflictos comunitarios por el uso del agua, especialmente durante temporadas secas, en las que la demanda supera con creces la disponibilidad. Esta tensión social evidencia la urgencia de soluciones integrales que no solo resuelvan el problema técnico, sino que promuevan el manejo equitativo y sostenible del recurso.

A pesar de los múltiples intentos gubernamentales por cerrar esta brecha, la cobertura de agua potable en zonas rurales sigue siendo baja en comparación con áreas urbanas. De acuerdo con el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), cerca del 25% de la población rural colombiana carece de acceso a agua potable con condiciones seguras (DANE, 2022). Esta cifra demuestra una deuda estructural con las comunidades más vulnerables del país.

En este contexto, se hace necesario replantear los modelos convencionales de distribución de agua e incorporar soluciones tecnológicas apropiadas, de bajo costo, sostenibles y escalables. Una de las alternativas más prometedoras se centra en los sistemas hidroneumáticos automatizados, los cuales permiten mantener una presión constante de agua, distribuyéndola eficientemente desde un tanque central hacia diferentes puntos de consumo mediante sensores, bombas y válvulas electrónicas (López et al., 2021).

La automatización de estos sistemas, basada en microcontroladores como Arduino o ESP32, permite controlar el llenado, distribución y monitoreo del agua en tiempo real, reduciendo pérdidas y asegurando el abastecimiento constante. Esto resulta especialmente útil en comunidades donde el servicio de agua es intermitente o inexistente, como ocurre en Manga Vieja.

Complementariamente, el sistema debe incluir mecanismos de potabilización del agua. Los métodos más accesibles en contextos rurales son la filtración con carbón activado, la cloración controlada y, en algunos casos, la luz ultravioleta (UV), dependiendo de los recursos disponibles. Estas tecnologías, aunque básicas, pueden reducir significativamente los contaminantes físicos, químicos y biológicos presentes en el agua (Rodríguez et al., 2020).

Sin embargo, cualquier solución técnica que se lleve a cabo debe ir acompañada de un proceso de formación y apropiación comunitaria. La sostenibilidad de estos proyectos depende en gran medida de la participación de la comunidad en el mantenimiento, uso responsable y gestión del sistema. La creación de comités comunitarios y la realización de talleres de capacitación son claves para garantizar la durabilidad del proyecto (Alvarado, 2018).

En el caso específico de Manga Vieja, los habitantes han manifestado su disposición a participar en procesos de organización y capacitación, pero requieren acompañamiento técnico y recursos para llevar a cabo las soluciones propuestas. Este escenario ofrece una oportunidad ideal para diseñar un modelo piloto de abastecimiento y potabilización automatizada que pueda ser replicado en otras zonas rurales del país.

A nivel ambiental, los sensores de nivel y controladores automáticos contribuyen al uso racional del recurso hídrico, evitando el desperdicio por sobrellenado o fugas. Este tipo de tecnología también puede integrarse con fuentes de energía renovable, como paneles solares, aumentando su autosuficiencia y reduciendo su huella ecológica (López et al., 2021).

Además, desde una perspectiva educativa, el proyecto se convierte en una herramienta de formación técnica y ciudadana, donde la comunidad no solo accede a un servicio básico, sino que también se capacita en tecnologías aplicadas, gestión ambiental y sostenibilidad, fortaleciendo el tejido social y la resiliencia comunitaria.

La vereda Manga Vieja, por tanto, se convierte en un caso representativo de una problemática estructural que requiere atención inmediata. El diseño de un sistema hidroneumático automatizado para el abastecimiento y potabilización de agua potable no solo responde a una necesidad técnica, sino que propone una solución integral que involucra factores sanitarios, económicos, sociales, ambientales y tecnológicos.

Pregunta de Investigación

A partir del análisis de la problemática, se puede hacer la siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo diseñar un prototipo de sistema automatizado de abastecimiento y potabilización de agua potable en la vereda Manga Vieja que garantice el acceso equitativo, la calidad sanitaria y la sostenibilidad comunitaria del recurso hídrico?

Justificación

El acceso al agua potable es un pilar esencial para el desarrollo humano, la salud pública y el bienestar colectivo. En la actualidad, diversas comunidades rurales en Colombia aún enfrentan limitaciones críticas para acceder a este recurso básico, lo que amplía las brechas sociales y sanitarias existentes. La vereda Manga Vieja, en el municipio de Yumbo (Valle del Cauca), representa un caso concreto de esta realidad. La ausencia de un sistema de abastecimiento y potabilización adecuado no solo compromete la salud de sus habitantes, sino que obstaculiza el desarrollo económico y educativo de la zona.

Diseñar un prototipo de sistema automatizado de abastecimiento y potabilización de agua en esta comunidad es una propuesta necesaria y pertinente. Este proyecto busca resolver una problemática estructural mediante la incorporación de tecnologías accesibles como sistemas hidroneumáticos, sensores de nivel, controladores programables (por ejemplo, Arduino o

ESP32), y métodos de filtración y desinfección. La automatización del sistema no solo garantiza una distribución más eficiente, sino que también minimiza el desperdicio, reduce el esfuerzo humano requerido para la recolección y optimiza el uso energético del sistema (López et al., 2021).

En términos sanitarios, este proyecto contribuirá significativamente a reducir la prevalencia de enfermedades gastrointestinales causadas por el consumo de agua contaminada. La Organización Mundial de la Salud (2023) ha señalado que el acceso a fuentes seguras de agua puede reducir hasta un 40% la incidencia de enfermedades transmitidas por el agua. Esto es especialmente crítico en comunidades con alta presencia de niños y adultos mayores, quienes son más susceptibles a enfermedades hídricas (Rodríguez et al., 2020).

Desde el punto de vista social, la propuesta fortalece el empoderamiento comunitario. La creación de comités locales encargados del mantenimiento del sistema, junto con la capacitación en su operación y cuidado, fomenta la participación de la comunidad. Este enfoque participativo no solo asegura el funcionamiento sostenible del sistema, sino que también fortalece los lazos comunitarios y promueve la apropiación tecnológica (Alvarado, 2018).

Además, este proyecto está completamente alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por la ONU. En particular, responde de forma directa al ODS 6: Agua limpia y saneamiento, cuyo objetivo es garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua para todos. Asimismo, contribuye de manera transversal al ODS 3: Salud y bienestar, y al ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles, al mejorar las condiciones básicas de vida de una población vulnerable (ONU, 2015).

La viabilidad técnica del proyecto también representa un punto fuerte. Los sistemas propuestos pueden desarrollarse con bajo presupuesto y utilizar tecnologías de código abierto,

permitiendo escalabilidad y adaptabilidad a otros contextos rurales. Incluso puede integrarse energía renovable (paneles solares) para fortalecer su autonomía energética y reducir el impacto ambiental.

Económicamente, este tipo de iniciativas representa un ahorro importante para las familias. Al contar con una fuente estable de agua potable, se elimina la necesidad de comprar agua embotellada o transportada, lo que representa un gasto mensual considerable para muchas familias rurales. Además, mejora las condiciones para el desarrollo de pequeños negocios, escuelas y comedores comunitarios, que requieren agua en condiciones sanitarias adecuadas para operar.

Desde la perspectiva educativa y tecnológica, el proyecto también actúa como un catalizador de innovación, ya que su diseño permite a estudiantes, técnicos y miembros de la comunidad aprender sobre automatización, sostenibilidad, electrónica básica y sistemas hidráulicos, generando transferencia de conocimiento y oportunidades futuras de empleo o emprendimiento.

En resumen, este proyecto no solo es técnicamente factible y económicamente viable, sino también socialmente justo y ambientalmente sostenible. Su impacto se extiende más allá de la solución puntual al problema del agua, al convertirse en un modelo replicable de desarrollo comunitario basado en tecnologías apropiadas. Por estas razones, su ejecución es no solo justificada, sino urgente y estratégicamente necesaria.

Objetivos

Objetivo General

Diseñar un prototipo de sistema automatizado para el abastecimiento y la potabilización de agua potable destinado a la vereda Manga Vieja, municipio de Yumbo, validado en condiciones controladas y fundamentado en criterios de acceso equitativo, calidad sanitaria y sostenibilidad comunitaria.

Objetivos Específicos

Caracterizar las condiciones sociodemográficas, ambientales y de acceso al agua en la vereda Manga Vieja para identificar los requerimientos técnicos del sistema propuesto.

Modelar el sistema de captación, almacenamiento, distribución y potabilización mediante planos, diagramas y simulaciones que definan su funcionamiento conceptual y su viabilidad técnica en condiciones controladas.

Construir un prototipo a escala del sistema automatizado para evaluar su operación básica y validar su desempeño en un entorno experimental.

Estado del Arte

El estado del arte permite acercarse de manera más comprensiva a los avances recientes sobre abastecimiento y potabilización de agua en zonas rurales, lo que abre un panorama amplio sobre tecnologías accesibles y enfoques comunitarios que han guiado investigaciones afines. A partir del análisis de diversas fuentes académicas se revisan prototipos, sistemas de tratamiento de bajo costo, modelos de automatización y experiencias de gestión rural del agua, lo que ayuda a reconocer tendencias, limitaciones y oportunidades técnicas pertinentes para el diseño del prototipo planteado; la matriz siguiente reúne los aportes centrales de cada estudio considerado.

Tabla 1

Matriz de Análisis de las Fuentes del Estado del Arte

Autor	Título	Fuente	Resumen	Conclusiones	Relevancia
Hincapi é et al. (2025)	Automated household- based water disinfection system for rural communities: Field trials and community appropriation	Water Research	Presenta la implementació n y evaluación de sistemas automatizados de desinfección con UVC en comunidades rurales de Colombia y México,	La automatización mejora la calidad microbiológica del agua, pero requiere acompañamient o comunitario para evitar Re- contaminación y	Aporta referentes técnicos y sociales para el componente de potabilización del prototipo orientado a contextos rurales.

Autor	Título	Fuente	Resumen	Conclusiones	Relevancia
			integrando	asegurar	
			participación	mantenimiento.	
			comunitaria.		
Lindt & Royero (2025)	How representative of community-based water organizations navigate gaps in Colombia's national drinking water co-production strategy	Wáter Alternatives	Examina cómo las organizaciones comunitarias de agua gestionan desafíos legales, técnicos y administrativo s en zonas rurales colombianas.	El éxito de los sistemas depende de la gestión comunitaria, su autonomía y su capacidad de adaptación frente a vacíos institucionales.	Resalta que el diseño del prototipo debe ser compatible con la gobernanza local y la sostenibilidad comunitaria.
Ramos-Parra et al. (2025)	Risk assessment of the drinking water supply and implementatio	Journal of Water and Health	Evalúa riesgos microbiológicos y químicos en sistemas rurales, aplicando	La identificación de puntos críticos permite priorizar acciones de	Ofrece criterios para orientar el diseño del prototipo hacia la prevención

Autor	Título	Fuente	Resumen	Conclusiones	Relevancia
	n of water safety plans in rural communities of Boyacá, Colombia		fases de Water Safety Plans.	control sanitario, especialmente en captación y tratamiento.	de riesgos en abastecimiento rural.
Crider et al. (2022)	Evaluation of system-level, passive chlorination in gravity-fed piped water systems in rural Nepal	Environment al Science & Technology	Evalúa la cloración pasiva en sistemas alimentados por gravedad, analizando cloro residual, calidad microbiológica y variabilidad hidráulica.	La cloración pasiva puede ser efectiva si se adapta a condiciones hidráulicas locales y se mantiene una operación adecuada.	Es útil para seleccionar tecnologías simples de desinfección aplicables al prototipo.
Mamua d et al. (2022)	Development of a low-cost dispenser-type	Cleaner and Responsible Consumption	Presenta un sistema de filtración de	Los filtros reducen turbidez y	Aporta ideas para integrar tecnologías de

Autor	Título	Fuente	Resumen	Conclusiones	Relevancia
	water filtration system		bajo costo construido con materiales locales, evaluado en laboratorio.	microorganismo s, demostrando viabilidad para contextos de bajos ingresos.	filtración accesibles en el prototipo.
Mamed e et al. (2023)	A prototype for an intelligent water management system for household use	Sensors	Desarrolla un prototipo basado en IoT para monitorear consumo, presión y fugas en redes domésticas.	Demuestra que la automatización mejora la eficiencia del uso del agua y permite detectar fallas operativas.	Útil para el componente de sensores y control del prototipo hidroneumático.
Laauwe n et al. (2024)	Reinforcing feedbacks for sustainable implementatio n of rural water treatment	International Journal of Hygiene and Environment al Health	Analiza factores que afectan la sostenibilidad de sistemas de tratamiento rural mediante	La sostenibilidad depende del equilibrio entre diseño técnico, gestión comunitaria y	Orienta la necesidad de considerar factores sociotécnicos desde la etapa

Autor	Título	Fuente	Resumen	Conclusiones	Relevancia
			entrevistas a actores clave.	apoyo institucional.	de diseño del prototipo.

Las investigaciones recientes sobre agua potable en comunidades rurales muestran un interés creciente por integrar tecnologías apropiadas con procesos de participación comunitaria, lo que evidencia la necesidad de soluciones que dialoguen con las condiciones sociales y ambientales de cada territorio. Los estudios consultados indican que los sistemas automatizados pueden mejorar la calidad del agua siempre que se adapten a los contextos locales y se implementen con criterios de accesibilidad, lo que permite reconocer un marco conceptual útil para orientar el diseño del prototipo dirigido a la vereda Manga Vieja.

A partir de esta revisión, diversos trabajos abordan la automatización del tratamiento del agua como un camino para aumentar la eficiencia del proceso y disminuir riesgos asociados a la calidad del recurso, lo que invita a valorar su pertinencia en entornos rurales. Hincapié et al. (2025) señalan que los sistemas automatizados de desinfección reducen la presencia de microorganismos patógenos, aunque requieren acompañamiento comunitario para evitar Recontaminación y asegurar el mantenimiento, de modo que estos hallazgos aportan criterios centrales para definir el componente de potabilización del prototipo.

En cuanto a la gestión del agua, la literatura destaca que la organización comunitaria influye de manera decisiva en la continuidad de los sistemas de abastecimiento, ya que las tecnologías requieren arreglos sociales estables para funcionar adecuadamente. Lindt y Royero (2025) explican que los acueductos rurales en Colombia operan bajo estructuras comunitarias que conviven con vacíos institucionales, recursos limitados y desafíos técnicos, por lo que esta

perspectiva resulta esencial para garantizar que el prototipo sea coherente con las capacidades de operación y toma de decisiones presentes en comunidades como Manga Vieja.

Otra línea de investigación analiza la evaluación de riesgos como una herramienta para comprender las fallas recurrentes de los sistemas rurales y orientar intervenciones más precisas, lo que permite organizar las mejoras según su impacto en la calidad del agua. Ramos-Parra et al. (2025) indican que la aplicación de Planes de Seguridad del Agua facilita la identificación de puntos críticos y prioriza acciones de control, de manera que estas conclusiones impulsan la necesidad de un diseño que incorpore criterios de prevención desde la captación hasta el tratamiento inicial del recurso.

Respecto a las tecnologías de potabilización, varios estudios destacan la utilidad de alternativas de bajo costo y sencillo mantenimiento que pueden adaptarse a comunidades con infraestructura limitada, lo que abre un abanico de posibilidades técnicas. Crider et al. (2022) observan que la cloración pasiva mantiene niveles adecuados de desinfección si se ajusta a las variaciones hidráulicas del sistema, mientras que Mamuad et al. (2022) muestran que los filtros artesanales reducen turbidez y microorganismos, por lo que ambas propuestas ofrecen elementos valiosos para seleccionar las técnicas de tratamiento del prototipo.

En el campo de la automatización, las investigaciones recientes muestran que la incorporación de sensores y sistemas de monitoreo mejora la eficiencia del uso del agua y favorece un control más detallado de la operación, lo que abre oportunidades para fortalecer la propuesta técnica. Mamede et al. (2023) registran que un sistema inteligente permite detectar fugas, regular presión y optimizar el consumo, y Laauwen et al. (2024) añaden que la sostenibilidad tecnológica depende del equilibrio entre diseño técnico, capacidades comunitarias

y apoyo institucional, por lo que estos aportes refuerzan la pertinencia de un modelo adaptable para la vereda Manga Vieja.

Marco Contextual

El marco contextual permite ubicar espacial, social, económico y ambientalmente el problema de investigación. En este caso, se enfoca en la vereda Manga Vieja, localizada en el municipio de Yumbo, departamento del Valle del Cauca, Colombia. Esta comunidad rural enfrenta limitaciones estructurales en el acceso a servicios básicos, particularmente en lo relacionado con el abastecimiento de agua potable.

Contexto Geográfico

Manga Vieja es una vereda ubicada en zona rural del municipio de Yumbo, en la región suroccidental de Colombia. Geográficamente, hace parte del sistema montañoso de la cordillera Occidental, y se caracteriza por su clima templado-húmedo y una topografía irregular. Estas condiciones influyen en la captación, almacenamiento y distribución del recurso hídrico, dificultando el acceso a redes convencionales de acueducto y alcantarillado. Aunque cuenta con nacederos y fuentes hídricas superficiales, estos recursos no han sido tecnificados ni protegidos adecuadamente.

Contexto Social y Demográfico

La comunidad está compuesta principalmente por familias campesinas de bajos recursos, que viven en condiciones de vulnerabilidad. La población incluye una alta proporción de adultos mayores, mujeres cabeza de hogar, y niños, lo cual incrementa la necesidad de contar con servicios básicos adecuados. La dinámica social se basa en relaciones de vecindad, cooperación y participación comunitaria, pero también enfrenta desafíos como la falta de organización formal para la gestión de servicios públicos.

Contexto Ambiental

Uno de los principales problemas que enfrenta Manga Vieja es la contaminación de sus fuentes hídricas. En la zona existen actividades agropecuarias, especialmente cría de cerdos y ganado, cuyos residuos son vertidos de forma inadecuada cerca de los nacedores. Esto ha generado altos niveles de contaminación microbiológica del agua, como lo evidencian los reportes informales de enfermedades gastrointestinales frecuentes en la comunidad. Además, la deforestación y el uso inapropiado del suelo han reducido la capacidad de recarga hídrica natural en la zona.

Contexto Técnico

Actualmente, la vereda no cuenta con infraestructura formal de acueducto. Las viviendas dependen de la recolección manual del agua, almacenamiento en tanques improvisados y, en algunos casos, abastecimiento esporádico por carrotanques. No existe un sistema centralizado ni automatizado para el manejo del agua, lo que se traduce en una distribución desigual, pérdidas por fugas y almacenamiento en condiciones insalubres. Tampoco hay un sistema de tratamiento previo al consumo, lo que expone a la población a riesgos sanitarios constantes.

Contexto Económico

La economía de Manga Vieja se basa en la agricultura de subsistencia, pequeños cultivos, crianza de animales y oficios informales. Esta condición limita la capacidad de inversión de las familias para acceder a soluciones tecnológicas individuales, lo que refuerza la necesidad de implementar un modelo colectivo y comunitario para la gestión del agua. Aunque los ingresos son limitados, la comunidad ha demostrado disposición para participar activamente en proyectos que mejoren su calidad de vida.

Importancia del Contexto para el Proyecto

Comprender el contexto de Manga Vieja es clave para diseñar una solución viable y sostenible. El diseño de un prototipo automatizado de abastecimiento y potabilización, adaptado a las condiciones geográficas, técnicas y sociales del entorno, no solo contribuirá a mejorar la calidad de vida de los habitantes, sino que también servirá como modelo replicable para otras comunidades rurales con problemáticas similares. El enfoque participativo y el uso de tecnologías de bajo costo y fácil mantenimiento son factores esenciales para el éxito de este tipo de iniciativas.

Marco Teórico

El marco teórico proporciona los fundamentos conceptuales y técnicos que respaldan el diseño de un prototipo automatizado de abastecimiento y potabilización de agua en contextos rurales como el de la vereda Manga Vieja. Se abordan a continuación los componentes tecnológicos, sanitarios y sociales que sustentan esta propuesta.

Sistema Hidroneumático

El sistema hidroneumático se comprende como una alternativa tecnológica orientada a sostener condiciones estables de presión dentro de redes de distribución de agua, lo que adquiere especial relevancia en territorios donde la irregularidad del relieve y la intermitencia del suministro dificultan la continuidad del servicio, de manera que su incorporación permite analizar respuestas técnicas viables frente a escenarios rurales con limitaciones estructurales. Desde una lectura hidráulica, su funcionamiento se explica a partir de la interacción coordinada entre una bomba eléctrica, un tanque presurizado y un mecanismo de control que regula los rangos de presión, lo que posibilita un comportamiento más uniforme del flujo y favorece la eficiencia del sistema en contextos donde las soluciones convencionales resultan insuficientes, tal como lo plantean Patiño et al. (2021).

En este marco, la comprensión del sistema hidroneumático también invita a considerar la manera en que la energía y el agua se articulan en un mismo proceso, dado que la presión generada depende tanto de la capacidad del equipo como de las condiciones físicas de la red, lo que conduce a reconocer la importancia de un dimensionamiento adecuado para evitar pérdidas o sobrecargas. A partir de esta relación, se observa que el equilibrio entre los componentes permite reducir fluctuaciones que afectan la distribución, al tiempo que contribuye a prolongar la vida útil de los equipos, aspecto que ha sido abordado por Patiño et al. (2021) al señalar que la

estabilidad operativa constituye un factor determinante en la sostenibilidad de estos sistemas en entornos de baja infraestructura.

Por otra parte, la evolución reciente de los sistemas hidráulicos ha incorporado avances en automatización que transforman la manera en que se gestionan los procesos de abastecimiento, lo que abre posibilidades para reducir la dependencia de la operación manual y mejorar la capacidad de respuesta frente a cambios en la demanda. En este sentido, la integración de microcontroladores y dispositivos electrónicos permite supervisar variables como el nivel del agua, la presión y el caudal en tiempo real, lo que facilita la toma de decisiones dentro del sistema y favorece una operación más precisa, como lo exponen López et al. (2021), quienes destacan el papel de estas tecnologías en la optimización del control hidráulico en contextos de recursos limitados.

A medida que estas herramientas se incorporan en escenarios rurales, se hace evidente que su valor no radica únicamente en la sofisticación tecnológica, sino en su capacidad para adaptarse a condiciones específicas del territorio, lo que implica seleccionar componentes accesibles y de fácil mantenimiento. En este contexto, plataformas como Arduino o ESP32 se han consolidado como opciones viables debido a su bajo costo y versatilidad, lo que permite implementar sistemas de monitoreo y control que responden a necesidades concretas sin requerir infraestructuras complejas, tal como lo señalan López et al. (2021) al referirse a la pertinencia de estas tecnologías en proyectos comunitarios.

En este horizonte, la articulación entre sistemas hidroneumáticos y automatización configura un enfoque tecnológico que dialoga con las realidades de comunidades rurales, en la medida en que combina eficiencia operativa, sostenibilidad y accesibilidad, lo que permite construir soluciones que se ajustan a las capacidades locales y a las dinámicas de uso del agua.

Esta integración favorece una gestión más equilibrada del recurso, al reducir pérdidas, optimizar el consumo energético y facilitar el mantenimiento preventivo, elementos que contribuyen a fortalecer la autonomía comunitaria y a consolidar procesos de apropiación tecnológica que resultan clave para la permanencia de este tipo de iniciativas en el tiempo.

Potabilización del Agua

El tratamiento del agua para consumo humano es un proceso que busca eliminar contaminantes físicos, químicos y biológicos para cumplir con las normas de calidad sanitaria. En Colombia, la Resolución 2115 de 2007 establece los parámetros que deben cumplirse, incluyendo la reducción de bacterias coliformes, turbidez y pH dentro de rangos seguros.

Entre los métodos de potabilización aplicables en zonas rurales destacan:

Filtración: uso de materiales como arena, grava o carbón activado para retener partículas sólidas.

Cloración: adición controlada de hipoclorito de sodio para eliminar microorganismos patógenos.

Luz ultravioleta (UV): desinfección avanzada que elimina bacterias y virus, aunque requiere energía constante y mantenimiento técnico (OMS, 2023).

La elección de los métodos dependerá de la calidad del agua fuente, la disponibilidad de materiales y los conocimientos técnicos de la comunidad.

Sostenibilidad y Gestión Comunitaria

La sostenibilidad de los sistemas de abastecimiento de agua en contextos rurales se entiende como un proceso que articula dimensiones técnicas, sociales y organizativas, lo que implica reconocer que la permanencia de estas soluciones no depende únicamente de su diseño tecnológico, sino de la capacidad de las comunidades para apropiarse de su funcionamiento y

sostenerlo en el tiempo; en este sentido, diversos estudios han mostrado que la participación activa de la población en la toma de decisiones fortalece la continuidad operativa y reduce el abandono de las infraestructuras, lo que sitúa a la gestión comunitaria como un eje central en la consolidación de sistemas rurales de agua (Alvarado, 2018).

Desde esta perspectiva, la gestión comunitaria se configura como un proceso colectivo en el que convergen prácticas de organización, acuerdos sociales y mecanismos de corresponsabilidad, elementos que permiten distribuir funciones relacionadas con el uso, mantenimiento y vigilancia del sistema, de modo que su funcionamiento no recaiga en actores externos; esta dinámica favorece la construcción de capacidades locales y promueve una relación más consciente con el recurso hídrico, lo que ha sido documentado por Alvarado (2018), quien destaca que la apropiación social de la tecnología incide directamente en su sostenibilidad y en la resiliencia de las comunidades frente a fallas o limitaciones técnicas.

De manera complementaria, la literatura especializada resalta la importancia de procesos formativos orientados a fortalecer la cultura del agua y el mantenimiento preventivo, lo que permite que los usuarios comprendan el funcionamiento básico del sistema y participen activamente en su cuidado; en este marco, la capacitación no se limita a la transmisión de conocimientos técnicos, sino que se vincula con la construcción de hábitos colectivos que favorecen el uso responsable del recurso y la detección temprana de problemas, lo que contribuye a reducir costos de reparación y a prolongar la vida útil de los componentes, tal como lo plantean Starkl et al. (2018).

A su vez, la incorporación de criterios de sostenibilidad ambiental amplía el alcance de estos sistemas al integrar soluciones que buscan reducir su impacto ecológico y mejorar su autonomía, lo que incluye el uso de energías renovables como paneles solares para alimentar

equipos de bombeo y control; esta estrategia permite disminuir la dependencia de fuentes energéticas convencionales y facilita la operación en territorios con acceso limitado a la red eléctrica, lo que refuerza la viabilidad de los sistemas en contextos rurales dispersos y contribuye a consolidar modelos de gestión más sostenibles en el largo plazo (Starkl et al., 2018).

En este escenario, la sostenibilidad se consolida como un concepto que trasciende la dimensión técnica para situarse en la intersección entre tecnología y organización social, lo que invita a comprender que el éxito de un sistema de agua depende de la manera en que se integran los saberes locales, las prácticas comunitarias y las soluciones tecnológicas; esta articulación permite construir procesos más estables y adaptativos, en los que la comunidad asume un rol activo en la gestión del recurso, fortaleciendo así la continuidad del servicio y la capacidad de respuesta frente a los desafíos propios del entorno rural.

Tecnologías Apropriadas para el Desarrollo Rural

El enfoque de tecnologías apropiadas se basa en adaptar soluciones técnicas al contexto local, considerando factores económicos, culturales y ambientales. En comunidades rurales, estas tecnologías deben ser de bajo costo, fáciles de operar, escalables y sostenibles. Ejemplos exitosos incluyen sistemas modulares de captación de agua de lluvia, filtros biosanitarios, bombas manuales y automatizaciones sencillas (UNICEF, 2021).

Aplicar este enfoque en Manga Vieja implica diseñar un sistema que pueda ser construido y mantenido con recursos locales, evitando depender exclusivamente de equipos industriales o profesionales externos.

El diseño de un prototipo de un sistema automatizado de abastecimiento y potabilización de agua en zonas rurales como Manga Vieja es técnicamente viable, sanitariamente necesaria y socialmente justa. La combinación de hidráulica, automatización, potabilización básica y gestión

comunitaria representa una alternativa eficaz para reducir la vulnerabilidad hídrica y mejorar la calidad de vida de la población rural. Este marco teórico sustenta la viabilidad del proyecto desde una perspectiva multidisciplinaria.

Marco Conceptual

Acueductos Rurales

Naturaleza y Función

Los acueductos rurales representan sistemas colectivos que integran captación, almacenamiento, tratamiento y distribución, y su desarrollo responde a dinámicas locales donde la tecnología se adapta a los recursos disponibles. Esta estructura adquiere sentido cuando se observa que su sostenibilidad descansa en la apropiación comunitaria y en la continuidad del mantenimiento, lo cual ha sido documentado en estudios sobre gestión hídrica en contextos vulnerables (Arias et al., 2020). Comprender este proceso permite articular las capacidades del territorio con una infraestructura pensada para resolver necesidades básicas.

Relación con el Territorio

La configuración de un acueducto rural implica reconocer las tensiones entre factores sociales, ambientales y técnicos, ya que la estabilidad del servicio depende de la forma como la comunidad organiza sus prácticas de uso del agua. Esta interacción se hace evidente cuando se analizan las condiciones del terreno, las distancias entre viviendas y la calidad variable de las fuentes disponibles, aspectos que influyen de manera significativa en la eficiencia del sistema (Arias et al., 2020). La gestión territorial se convierte así en un componente central del suministro.

Fuentes de Agua

Aljibes y Abastecimiento Doméstico

El aljibe constituye un método extendido en zonas rurales para almacenar agua proveniente de lluvias o recarga subterránea, aunque su utilidad depende de la calidad estructural del depósito y del manejo que realizan las familias. Su empleo exige una revisión cuidadosa de

riesgos sanitarios, en especial cuando no se aplican procesos de potabilización adecuados, lo que evidencia la necesidad de acompañar estas prácticas con educación comunitaria y controles de calidad básicos (Organización Mundial de la Salud, 2022). Este recurso continúa siendo fundamental para muchas viviendas dispersas.

Nacederos y Comportamiento Estacional

El nacedero corresponde a una fuente natural donde aflora agua subterránea, y su variación estacional obliga a considerar estrategias de protección y conducción que disminuyan la exposición a contaminantes. Este tipo de fuente suele sostener a comunidades pequeñas, aunque presenta desafíos derivados del caudal limitado y de la vulnerabilidad ante actividades agropecuarias cercanas (Organización Mundial de la Salud, 2022). La preservación del entorno inmediato se vuelve esencial para asegurar una oferta constante y segura para el consumo humano.

Captación Superficial en Ríos

La captación de ríos plantea retos particulares por la alta carga físico, química y microbiológica que estos cuerpos de agua pueden presentar. El tratamiento se vuelve indispensable para garantizar un suministro seguro, pues la variabilidad de la calidad exige procedimientos estables y monitoreados. Las recomendaciones internacionales subrayan la importancia de cloración controlada, filtración previa y supervisión comunitaria, ya que la exposición a patógenos aumenta en zonas con prácticas informales de almacenamiento (Organización Mundial de la Salud, 2022). Esta fuente requiere intervenciones más rigurosas que otras alternativas.

Sistemas Hidroneumáticos

Regulación de Presión en Redes de Abastecimiento

La regulación de presión se asume como una variable fundamental en el desempeño de los sistemas de abastecimiento de agua, en tanto define la capacidad de distribución equitativa del recurso entre los puntos de consumo, lo que resulta especialmente relevante en territorios con topografías irregulares. En el contexto del prototipo propuesto, esta variable se operacionaliza mediante la integración de un tanque presurizado y un sistema de bombeo que permiten mantener condiciones estables de flujo, lo que incide directamente en la continuidad del servicio y en la reducción de fallas operativas asociadas a variaciones bruscas de presión.

Control Automatizado del Sistema de Abastecimiento

El control automatizado se define como la variable encargada de gestionar el funcionamiento del sistema mediante la lectura y procesamiento de señales provenientes de sensores, lo que permite regular de manera autónoma procesos como el llenado, la activación de la bomba y la distribución del agua. En el prototipo, esta variable se materializa a través de microcontroladores, sensores de nivel y dispositivos de actuación como relés y válvulas, cuya interacción garantiza una operación más eficiente, segura y ajustada a las condiciones reales del entorno, lo que contribuye a disminuir la dependencia de la intervención manual y a fortalecer la sostenibilidad del sistema.

Automatización Aplicada al Agua Rural

Control Electrónico y Operación Segura

La automatización se ha convertido en una herramienta valiosa para mejorar la operación de los sistemas de agua, dado que reduce la dependencia de procedimientos manuales expuestos a errores y desgaste. El uso de microcontroladores, sensores de nivel y dispositivos de protección

eléctrica favorece una regulación más estable de la bomba y disminuye riesgos asociados con el manejo cotidiano del sistema (López et al., 2021). Estas innovaciones fortalecen la capacidad local para operar de manera más segura y continua.

Estandarización y Facilidad de Uso

Incorporar automatización implica simplificar el funcionamiento para que los usuarios puedan aprender con rapidez las acciones esenciales de operación y cuidado. La estandarización de acoples, válvulas y protocolos facilita esta integración, especialmente en comunidades con recursos limitados, pues reduce tiempos de reparación y evita improvisaciones que comprometan el servicio (López et al., 2021). Esta perspectiva combina tecnología accesible con prácticas comunitarias sostenibles.

Potabilización del Agua

Procesos de Filtración

La filtración desempeña un papel determinante en la reducción de turbidez y sedimentos, lo que mejora de inmediato la aceptabilidad del agua y facilita que la desinfección actúe con mayor eficacia. Los sistemas de filtración utilizados en entornos rurales suelen incluir materiales simples como arena, grava o carbón activado, cuya selección depende de la calidad inicial del recurso y de la disponibilidad local (Ministerio de Salud y Protección Social, 2007). Esta etapa prepara el agua para un tratamiento más riguroso.

Desinfección y Control Sanitario

La desinfección constituye el paso central para asegurar la eliminación de microorganismos patógenos, especialmente en comunidades que enfrentan contaminación fecal y variaciones en las fuentes naturales. La normativa colombiana establece parámetros para turbidez, cloro residual y ausencia de bacterias que orientan la implementación de procesos

seguros, en particular cuando se emplean sistemas de cloración que requieren dosificación precisa y tiempo adecuado de contacto (Ministerio de Salud y Protección Social, 2007). Esta práctica reduce riesgos sanitarios y fortalece la confianza comunitaria en el recurso disponible.

Gestión Comunitaria del Agua

Participación Comunitaria en la Gestión del Sistema

La participación comunitaria se define como la variable que describe el grado de involucramiento de los habitantes en las decisiones, operación y mantenimiento del sistema de abastecimiento de agua, lo que permite evaluar su incidencia en la sostenibilidad del prototipo propuesto; en este estudio, dicha variable se relaciona con la conformación de comités de agua, la distribución de responsabilidades y la toma de decisiones colectivas, elementos que configuran un entorno organizativo que favorece la continuidad del sistema y su adaptación a las condiciones del territorio.

Capacitación y Apropiación Tecnológica

La capacitación se concibe como una variable orientada a medir los procesos de formación que permiten a la comunidad comprender el funcionamiento del sistema y desarrollar habilidades para su operación básica, lo que incide directamente en la apropiación tecnológica; en el contexto del prototipo, esta variable se materializa en la implementación de estrategias pedagógicas que facilitan el uso adecuado de los componentes, promueven prácticas de mantenimiento preventivo y fortalecen la autonomía de los usuarios frente a la gestión del recurso hídrico.

Sostenibilidad Operativa del Sistema

La sostenibilidad operativa se entiende como la capacidad del sistema para mantenerse en funcionamiento continuo a partir de recursos disponibles localmente, lo que implica considerar

factores como el mantenimiento, la disponibilidad de repuestos y la facilidad de operación; en este sentido, esta variable se vincula con el diseño del prototipo en términos de simplicidad, accesibilidad de los componentes y compatibilidad con las capacidades técnicas de la comunidad, lo que permite evaluar su viabilidad en condiciones reales de uso.

Autonomía Energética y Ambiental

La autonomía energética se establece como una variable que refleja la capacidad del sistema para operar de manera independiente de fuentes externas de energía, lo que se relaciona con la posible integración de tecnologías como paneles solares; a su vez, esta variable se articula con la sostenibilidad ambiental al considerar el impacto del sistema sobre el entorno, promoviendo el uso eficiente de recursos y la reducción de la huella ecológica, lo que contribuye a consolidar una propuesta coherente con las condiciones ambientales del territorio.

Sostenibilidad Técnica y Operativa

Adecuación Tecnológica

La sostenibilidad requiere integrar diseños simples, materiales accesibles y procedimientos claros que permitan a la comunidad operar el sistema sin dependencia excesiva de asistencia especializada. UNICEF (2021) destaca la importancia de considerar la disponibilidad de repuestos, la capacidad de pago de las familias y los costos energéticos, aspectos que definen la permanencia del servicio en el tiempo. Este enfoque permite seleccionar soluciones que respondan al contexto real.

Mantenimiento y Vida Útil

El mantenimiento preventivo influye de manera directa en la durabilidad del sistema, por lo que conviene fomentar prácticas que integren revisiones periódicas y monitoreo básico del equipo. Las investigaciones sugieren que la adopción de rutinas simples, como la verificación del

estado de las tuberías o la limpieza de filtros, fortalece el desempeño del sistema y reduce la probabilidad de fallas prolongadas (UNICEF, 2021). Este componente contribuye a estabilizar la operación y proteger la inversión comunitaria.

Distribución Domiciliaria del Agua

Condiciones de la Red

La distribución hacia las viviendas demanda equilibrio entre presión, caudal y continuidad, ya que estos factores influyen en el acceso equitativo y en la percepción de calidad del servicio. Los estudios técnicos subrayan que una red con tuberías apropiadas, tanques intermedios y controles básicos contribuye a disminuir conflictos y a mejorar el rendimiento hidráulico en comunidades dispersas (Torres & Rojas, 2020). Este proceso define el punto final del sistema y constituye una etapa crítica del abastecimiento.

Equidad y Seguridad Sanitaria

La distribución equitativa requiere asegurar que todas las viviendas reciban agua en condiciones similares de cantidad y calidad, evitando prácticas como el acaparamiento o el uso inadecuado de tanques improvisados. Torres y Rojas (2020) señalan que la equidad en la provisión fortalece la cohesión social y reduce conductas que comprometan la seguridad sanitaria, especialmente en lugares donde el agua se almacena por periodos prolongados. La regulación comunitaria mantiene el equilibrio del sistema.

Estandarización de la Infraestructura

Componentes Hidráulicos

La estandarización facilita la compatibilidad entre tuberías, válvulas y acoples, y reduce pérdidas de agua, tiempos de reparación y riesgos por improvisación. Investigaciones sobre infraestructura rural demuestran que la unificación de materiales y diámetros mejora la eficiencia

del sistema y fortalece la capacidad local para realizar mantenimiento con recursos propios (García & Herrera, 2018). Esta práctica contribuye a estabilizar el funcionamiento en zonas con redes fragmentadas.

Protocolos de Operación

Estructurar procedimientos claros para el uso y cuidado de la infraestructura permite que la comunidad responda de manera coordinada ante fallas. La existencia de protocolos sencillos orienta acciones como la apertura de válvulas, el encendido de bombas y la aplicación de cloro, elementos que evitan daños y contribuyen a la sostenibilidad a largo plazo (García & Herrera, 2018). La estandarización se convierte en un recurso pedagógico para toda la comunidad.

Marco Normativo

La regulación del agua para consumo humano en Colombia se sustenta en un conjunto de normas que buscan garantizar condiciones mínimas de calidad, acceso y protección sanitaria, especialmente en territorios rurales donde las brechas en infraestructura suelen ser más evidentes. La Resolución 2115 de 2007, emitida por el Ministerio de Salud y Protección Social, establece los parámetros físicos, químicos y microbiológicos que debe cumplir el agua destinada al consumo, y define responsabilidades para los prestadores del servicio y para las entidades territoriales. Esta regulación se convierte en un referente central para evaluar riesgos y orientar decisiones técnicas dentro del proyecto.

La Resolución 2115 se articula con el Decreto 1575 de 2007, que conforma el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano, un instrumento que organiza procedimientos de vigilancia, responsabilidades administrativas y protocolos para la gestión sanitaria del servicio. Este decreto incorpora la figura del Plan de Gestión del Riesgo en Agua Potable, que invita a identificar vulnerabilidades desde la fuente hasta el usuario, y promueve decisiones integrales que consideren infraestructura, prácticas comunitarias y condiciones ambientales. Su enfoque preventivo resulta clave para proyectos en zonas rurales como Manga Vieja.

El marco normativo también integra criterios relacionados con la infraestructura y la operación de sistemas de bombeo y almacenamiento. El Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS 2016) aporta lineamientos sobre diseño, materiales y condiciones mínimas de construcción que buscan asegurar instalaciones seguras y accesibles. Este reglamento ofrece orientaciones que resultan pertinentes para evaluar la viabilidad de sistemas hidroneumáticos y para seleccionar componentes que respondan a la topografía, el

caudal disponible y las posibilidades de mantenimiento local, aspectos indispensables en comunidades con capacidades técnicas restringidas.

Otro componente normativo relevante es la Ley 142 de 1994, que regula los servicios públicos domiciliarios y enmarca la prestación del servicio de acueducto bajo principios de eficiencia, solidaridad y universalidad. Aunque muchas comunidades rurales no cuentan con empresas formales como prestadoras del servicio, esta ley sostiene criterios de responsabilidad social, continuidad y calidad que sirven como base para la organización comunitaria. Su lectura permite comprender las obligaciones que surgen en procesos de autogestión, especialmente cuando se conforman comités o juntas que asumen el manejo cotidiano del sistema.

Así, la normativa colombiana se complementa con directrices internacionales como las Guías de Calidad del Agua Potable de la Organización Mundial de la Salud (2022), que recomiendan parámetros de protección sanitaria y estrategias de tratamiento adaptadas a contextos con recursos limitados. Estas guías se han convertido en un referente técnico para proyectos rurales que requieren tomar decisiones sobre filtración, cloración y monitoreo básico. Su integración en el marco normativo local amplía el panorama para diseñar un sistema que responda a estándares reconocidos y a la vez conserve la sensibilidad cultural y ambiental del territorio.

Metodología

Tipo de Investigación

El proyecto se orienta desde un enfoque aplicado, dado que busca resolver una necesidad concreta de la comunidad mediante el diseño de un sistema automatizado de abastecimiento y potabilización de agua. Este tipo de estudios se centra en transformar una realidad específica a partir de fundamentos teóricos, diagnósticos rigurosos y procesos de validación contextual. Desde la perspectiva metodológica, corresponde a una investigación que integra reflexión conceptual, trabajo de campo y construcción tecnológica, elementos necesarios para comprender cómo interactúan los factores sociales, ambientales y técnicos en la vereda Manga Vieja.

La investigación aplicada se caracteriza por utilizar el conocimiento existente para intervenir situaciones reales y generar soluciones verificables, siempre vinculadas a un problema claramente identificado (Hernández Sampieri et al., 2014). Esta orientación resulta pertinente para comunidades rurales que requieren alternativas accesibles y sostenibles, ya que permite articular observación directa, análisis del entorno y diseño de prototipos ajustados a las condiciones locales. En este caso, la metodología busca fortalecer la toma de decisiones técnicas y promover procesos participativos que aseguren la apropiación comunitaria de los resultados.

Enfoque de Investigación

El estudio se desarrolla desde un enfoque mixto, entendido como una integración flexible de estrategias cualitativas y cuantitativas que permiten comprender la complejidad del acceso al agua en la vereda Manga Vieja. Este enfoque facilita recoger la experiencia cotidiana de las familias, observar la infraestructura disponible y analizar datos técnicos relacionados con caudales, presiones y calidad del agua. Según Hernández Sampieri et al. (2014), esta

combinación favorece interpretaciones más completas, ya que articula percepciones sociales con mediciones objetivas que respaldan las decisiones de diseño.

La elección del enfoque mixto responde a la intención de relacionar la dimensión humana del problema con los requerimientos técnicos del sistema propuesto, de modo que cada hallazgo contribuya a una comprensión más amplia del contexto local. El registro de testimonios, la elaboración de mapas de procesos y la evaluación de parámetros de potabilización se integran en una ruta metodológica que busca coherencia entre las voces de la comunidad y el desempeño del prototipo. Este equilibrio fortalece la validez del estudio y orienta soluciones que dialogan con la realidad territorial.

Diseño de Investigación

El diseño adoptado corresponde a un estudio de caso, ya que permite examinar de manera detallada las dinámicas sociales, técnicas y ambientales relacionadas con el abastecimiento de agua en la vereda Manga Vieja. Este diseño facilita comprender la interacción entre las prácticas comunitarias, la infraestructura disponible y los desafíos operativos que enfrenta la población, lo que resulta fundamental para proponer una solución ajustada al territorio. Hernández Sampieri et al. (2014) destacan que el estudio de caso permite analizar fenómenos reales en su propio contexto, favoreciendo interpretaciones más situadas.

La elección de este diseño responde a la necesidad de observar el sistema hídrico desde una mirada integral, en la que cada componente se interpreta como parte de un proceso amplio que involucra decisiones técnicas y comportamientos cotidianos. El trabajo de campo, la revisión documental y la evaluación del prototipo se articulan en una estrategia que busca captar matices difíciles de identificar mediante métodos aislados, de modo que el análisis final recoja la singularidad del caso y oriente futuras intervenciones en comunidades con condiciones similares.

Población y Muestra

La población del estudio está conformada por las familias de la vereda Manga Vieja, junto con los líderes comunitarios que han participado históricamente en la gestión del agua. Este grupo representa un escenario social diverso donde convergen prácticas de abastecimiento basadas en aljibes, nacederos y captaciones superficiales, lo cual permite observar distintas formas de relacionarse con el recurso. La elección de esta población responde a la necesidad de comprender cómo cada hogar enfrenta las limitaciones del sistema actual y cuáles son sus expectativas frente a una solución automatizada.

La muestra se seleccionó mediante un muestreo intencional, pues se buscó incluir viviendas que reflejaran la variedad de situaciones presentes en la comunidad, especialmente aquellas con mayores dificultades de acceso o con infraestructura más frágil. Esta decisión metodológica permite obtener información rica y contextualizada, ya que se privilegia la participación de hogares que experimentan de manera directa los problemas de calidad, disponibilidad y distribución del agua. Hernández Sampieri et al. (2014) señalan que este tipo de muestreo es pertinente cuando el objetivo es profundizar en realidades específicas y obtener datos que orienten decisiones de diseño.

Fuentes de Información y Métodos

La recolección de información se construyó desde una mirada cercana al territorio, de manera que cada fuente aportara una pieza distinta del panorama que rodea el acceso al agua en Manga Vieja. Esta elección permitió avanzar con un ritmo pausado y atento, en el que la voz de las familias, las particularidades de la infraestructura y las exigencias ambientales se entrelazaron para ofrecer un retrato más completo del sistema actual. Los métodos seleccionados respondieron a la necesidad de articular observación directa, diálogo con la comunidad y análisis

técnico, lo que abrió un espacio para comprender cómo se vive y se gestiona el agua en el día a día.

Tabla 2

Fuentes de Información y Métodos

Fuente de información	Método	Objetivo al que Aplica
Familias de la vereda Manga Vieja	Dialogo directo	Conocer prácticas domésticas de uso del agua, experiencias de acceso y percepciones sobre calidad, además de recoger expectativas frente al sistema automatizado propuesto.
Líderes comunitarios y custodios de equipos	Directo	Identificar formas de organización, responsabilidades en la gestión del agua y necesidades de formación para garantizar una operación segura y colaborativa.
Viviendas con aljibe, nacedero o captación del río	Observación directa y listas de verificación	Registrar condiciones reales de infraestructura, dinámicas de abastecimiento y particularidades del tratamiento doméstico que influyen en la disponibilidad del recurso.

Infraestructura hidráulica y eléctrica comunitaria	Registro fotográfico	Documentar recorridos del agua, puntos de bombeo, conexiones y situaciones que podrían afectar la continuidad del servicio.
Motobombas, tuberías, mangueras y acoples	Inventario técnico	Reconocer capacidades, límites y compatibilidades entre equipos, con el fin de orientar decisiones sobre el diseño del sistema automatizado.
Documentos institucionales y literatura especializada	Revisión documental	Construir un marco conceptual y técnico que permita fundamentar el proyecto y relacionarlo con experiencias similares.

Fases del Desarrollo

La elaboración del proyecto se organizó en una serie de fases que permitieron avanzar desde la comprensión inicial del territorio hasta la validación técnica del prototipo, cada una con un propósito específico y con una lógica que buscó sostener coherencia entre el conocimiento generado y las necesidades expresadas por la comunidad. Este recorrido metodológico se concibió como un proceso gradual, en el que la observación, el análisis y la experimentación dialogaron entre sí, de modo que cada avance aportara elementos concretos para las decisiones posteriores.

Fase de Exploración y Diagnóstico Comunitario

Esta fase se centró en reconocer cómo las familias acceden al agua y qué dificultades enfrentan en su vida cotidiana, lo que implicó recorrer la vereda, conversar con los habitantes y observar las prácticas asociadas al uso del recurso. La información recogida permitió identificar diferencias entre las viviendas con aljibe, las que dependen del nacedero y las que toman agua del río, y al mismo tiempo ofreció una mirada cercana sobre la organización comunitaria y las expectativas frente a posibles mejoras. Esta comprensión inicial orientó el enfoque posterior del diseño.

Fase de Caracterización Técnica e Infraestructura Existente

En este momento se realizó un análisis detallado de los equipos disponibles en la comunidad, del estado de las tuberías, de las conexiones eléctricas y de los puntos de bombeo, lo que ayudó a reconocer las limitaciones del sistema actual y las oportunidades para integrar tecnologías más seguras y eficientes. Los registros fotográficos, las mediciones de campo y el inventario de componentes permitieron construir una línea base sólida, con la que fue posible identificar los requerimientos mínimos que un sistema automatizado debía considerar para adecuarse al contexto local.

Fase de Diseño Conceptual y Selección de Componentes

Con los hallazgos previos se desarrolló una propuesta inicial del sistema, en la que se evaluaron opciones de bombeo, métodos de potabilización y mecanismos de control. Esta fase buscó articular los criterios de sostenibilidad técnica con la capacidad operativa de la comunidad, de forma que cada componente pudiera ser operado y mantenido sin depender de conocimientos especializados. La selección final consideró la presión necesaria, la variación del caudal, la

calidad del agua y la compatibilidad entre mangueras, válvulas y sensores, logrando una propuesta ajustada al territorio.

Fase de Construcción del Prototipo

El diseño conceptual se transformó en un prototipo a escala que permitió verificar el desempeño del sistema en condiciones controladas, lo que hizo posible evaluar la reacción de los sensores, el comportamiento de la bomba, la estabilidad de la presión y la efectividad del proceso de potabilización. Esta construcción se realizó de manera progresiva, ajustando las conexiones y los parámetros de control según el comportamiento observado, de modo que cada ensayo ofreciera información para perfeccionar el funcionamiento general del sistema.

Fase de Análisis de Costos y Viabilidad Económica

En proyectos de investigación aplicada, la viabilidad técnica debe complementarse con un análisis económico que permita evaluar la factibilidad real de implementación en el contexto estudiado. En este caso, se desarrolló una estimación de costos del prototipo automatizado de abastecimiento y potabilización de agua, considerando tanto su construcción a escala como su posible implementación en condiciones reales.

Listado de Componentes del Sistema

El sistema propuesto está compuesto por elementos hidráulicos, electrónicos y estructurales, entre los que se destacan:

Motobomba o bomba centrífuga

Tanque de almacenamiento

Sensores de nivel de agua

Microcontrolador (Arduino o ESP32)

Módulos de relé

Válvulas solenoides
 Tuberías y accesorios (PVC, mangueras, acoples)
 Filtros (arena, carbón activado)
 Sistema de cloración
 Fuente de alimentación
 Tablero eléctrico y protecciones

Costos Unitarios y Totales

Tabla 3

Costos del Prototipo

Componente	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total
Bomba de agua	1	250.000	250.000
Tanque 500L	1	300.000	300.000
Arduino/ESP32	1	50.000	50.000
Sensores de nivel	3	15.000	45.000
Relés	2	10.000	20.000
Válvulas solenoides	2	40.000	80.000
Tuberías y accesorios	-	-	150.000
Sistema de filtración	1	120.000	120.000
Sistema de cloración	1	30.000	30.000
Tablero eléctrico	1	100.000	100.000

Nota. Costo total estimado del prototipo: $\approx 1.145.000$ COP

Costo del Prototipo

El prototipo a escala desarrollado en laboratorio presenta un costo menor debido al uso de materiales reducidos y reutilizables. Se estima un valor aproximado entre \$300.000 y \$500.000, dependiendo de los componentes disponibles.

Estimación de Implementación Real (Escalabilidad)

Para una implementación en la vereda Manga Vieja, se deben considerar factores adicionales como:

Mayor capacidad de almacenamiento

Redes de distribución más extensas

Protección de infraestructura

Costos de instalación y mano de obra

Capacitación comunitaria

En este escenario, el costo por sistema comunitario puede oscilar entre \$2.000.000 y \$5.000.000, dependiendo del número de viviendas beneficiadas y la complejidad del terreno.

Análisis de Viabilidad

El sistema propuesto se considera económicamente viable debido a:

Uso de tecnologías de bajo costo

Componentes disponibles en el mercado local

Reducción de gastos familiares en compra de agua

Posibilidad de implementación gradual

Además, su diseño modular permite escalar el sistema progresivamente, facilitando su adopción por parte de la comunidad sin requerir grandes inversiones iniciales. En términos costo-

beneficio, la inversión se justifica por la mejora en la calidad de vida, la reducción de enfermedades hídricas y el fortalecimiento de la gestión comunitaria del recurso.

Resultados y Discusiones

Diagnóstico de la Situación

El diagnóstico evidenció que el acceso al agua en la vereda Manga Vieja depende de una infraestructura diversa y frágil, compuesta por aljibes, nacederos y captación en el río, lo que genera diferencias en disponibilidad y calidad que afectan las prácticas cotidianas de consumo. Las observaciones en campo mostraron fallas recurrentes en las líneas de conducción, variaciones en los modos de almacenamiento y una fuerte dependencia de motobombas portátiles, cuyas limitaciones se intensifican cuando la demanda aumenta. Este panorama permitió reconocer la necesidad de una solución que aportara estabilidad, protección sanitaria y facilidad operativa.

Línea Base Técnica del Sistema de Abastecimiento de Agua – Vereda Manga Vieja

Fuentes y Esquemas de Captación. La vereda Manga Vieja cuenta con tres formas de obtención de agua que reflejan la diversidad del territorio y las decisiones que las familias han tomado para asegurar su abastecimiento. El primer esquema corresponde a los aljibes domiciliarios, que funcionan como depósitos propios donde cada vivienda almacena el agua proveniente de escorrentía o de la recarga subterránea. En estos casos, la distribución depende del uso de una motobomba portátil que permite trasladar el agua hacia tanques o recipientes, lo que requiere al usuario conectar mangueras, encender el equipo y regular de manera manual los tiempos de operación, una práctica que demanda atención constante y que influye en la estabilidad del suministro.

El segundo esquema se basa en los nacederos, puntos donde el agua brota de manera natural y desciende por gravedad hacia los hogares que dependen de esta fuente. Su funcionamiento prescinde de equipos de bombeo y ofrece un caudal que suele mantenerse entre

niveles bajos y medios, aunque puede variar con la temporada y con la presencia de obstrucciones en el trayecto. Este tipo de captación presenta vulnerabilidades asociadas a la entrada de sólidos finos y material orgánico, además del riesgo de contaminación cuando la conducción no se encuentra protegida, lo que afecta la calidad del recurso y la continuidad del servicio.

El tercer esquema corresponde a la captación en el río, una alternativa utilizada por las viviendas que carecen de aljibe o de acceso al nacedero. El agua de esta fuente presenta una carga contaminante elevada tanto en términos fisicoquímicos como microbiológicos, razón por la cual las familias deben aplicar cloración antes de consumirla. Para trasladar el agua desde el río se emplean motobombas portátiles que llenan tanques u otros recipientes, un proceso que requiere esfuerzo físico y que se ve condicionado por las distancias, la calidad del cauce y la disponibilidad de energía para hacer funcionar el equipo. Este conjunto de prácticas evidencia la necesidad de un sistema más seguro y estable.

Equipos de Bombeo y Modo de Operación. El sistema de abastecimiento de la vereda depende de un parque de bombeo limitado, compuesto por una o dos motobombas portátiles que la comunidad comparte según la necesidad del día. Estas bombas se trasladan entre viviendas y puntos de captación, lo que implica conectarlas a las fuentes de energía disponibles y acoplar mangueras de distintas características, tarea que exige coordinación entre los usuarios y un esfuerzo adicional cuando las distancias son amplias o el terreno presenta dificultades. Esta dinámica refleja la importancia que tiene el equipo dentro de la vida cotidiana del abastecimiento.

El modo de operación es completamente manual, de modo que cada familia debe encender la motobomba, regular su funcionamiento y supervisarla mientras se llena un tanque o

se conduce el agua hacia un punto específico. Esta práctica implica un seguimiento continuo que se hace más exigente cuando varias viviendas requieren bombear en el mismo periodo, especialmente en jornadas de riego o en temporadas secas. La falta de capacidad para atender demandas simultáneas genera esperas prolongadas, movimientos constantes del equipo y ciclos repetidos de encendido y apagado, lo que acelera el desgaste y aumenta la probabilidad de fallas.

La infraestructura presenta además una marcada heterogeneidad en los diámetros y longitudes de las mangueras, así como en los tipos de acoples, situación que dificulta el armado rápido de las líneas de impulsión y aumenta las pérdidas por fricción que afectan el caudal disponible. Esta diversidad de materiales obliga a improvisar conexiones y ajustes que restan eficiencia al proceso y añaden riesgos operativos, ya que cualquier incompatibilidad puede retrasar el abastecimiento o comprometer la estabilidad de la bomba. Estas condiciones muestran la necesidad de un sistema más estandarizado y seguro para la comunidad.

Desinfección y Potabilización en el Punto de Uso. La desinfección del agua es una práctica cotidiana y obligatoria en todas las viviendas de la vereda, ya que las familias deben aplicar pastillas de cloro sin importar si el recurso proviene de un aljibe, del nacedero o del río. Esta medida surge como una respuesta preventiva frente a los riesgos microbiológicos presentes en las distintas fuentes, aunque su ejecución depende por completo del criterio de cada usuario. Este escenario refleja la importancia de fortalecer capacidades domésticas para asegurar que el tratamiento se realice de manera adecuada y sostenida.

El proceso presenta diversos riesgos asociados al manejo manual de la cloración, especialmente por la ausencia de una medición precisa del volumen tratado, lo que ocasiona dosis insuficientes o excesivas y afecta la seguridad sanitaria del consumo. A esto se suma la variabilidad del tiempo de contacto, ya que en muchos hogares el agua se utiliza de inmediato, lo

que limita la eficacia del desinfectante. En algunos casos tampoco existe un pretratamiento que retire sedimentos o partículas, situación que reduce el rendimiento del cloro y altera las características sensoriales del agua almacenada.

Restricciones Hidráulicas y Operativas. El sistema de abastecimiento presenta varias limitaciones que afectan su desempeño diario, especialmente por la naturaleza portátil de las motobombas que deben trasladarse entre distintos puntos de la vereda. Cada movimiento implica tiempos muertos asociados al transporte, la conexión y el cebado, lo que incrementa el desgaste del equipo y eleva la posibilidad de que opere en condiciones inadecuadas. Esta dinámica genera interrupciones que retrasan el flujo del agua y obligan a los usuarios a adaptar sus rutinas a las disponibilidades del equipo, lo que evidencia la fragilidad operativa del sistema actual.

La operación manual de las válvulas produce ajustes bruscos que generan golpes de ariete, una situación que se intensifica por la ausencia de elementos que suavicen los cambios de presión y que expone a la motobomba a ciclos frecuentes de encendido. Este “ciclado” disminuye la vida útil de los componentes y crea un vaivén en la estabilidad del caudal, especialmente en momentos de mayor demanda. Tales condiciones demuestran la necesidad de incorporar mecanismos que reduzcan estas tensiones y permitan una operación más estable y segura tanto para los equipos como para la red.

La calidad del afluente introduce desafíos adicionales, ya que el agua del río presenta una variabilidad considerable que exige tratamientos cuidadosos para garantizar condiciones mínimas de potabilidad. En periodos de mayor turbidez se requiere un pretratamiento que elimine sedimentos y facilite la acción del cloro, lo que demanda tiempo y atención por parte de las familias. Por su parte, el abastecimiento por gravedad desde los nacederos ofrece una alternativa energéticamente confiable, aunque el caudal y la presión son limitados, situación que

reduce la disponibilidad en horas pico y afecta de forma particular a las viviendas ubicadas en cotas más elevadas.

Requerimientos Mínimos de Control y Seguridad (situación actual). El sistema de abastecimiento requiere condiciones básicas de seguridad eléctrica que permitan reducir riesgos durante la operación cotidiana, en especial porque la motobomba se conecta en distintos puntos de la vereda. Resulta indispensable contar con interruptores automáticos o guardamotores, además de una adecuada puesta a tierra y protecciones diferenciales que actúen frente a fallas inesperadas. Estas medidas buscan ofrecer mayor estabilidad en el suministro y disminuir la exposición a accidentes, ya que la manipulación frecuente del equipo implica un contacto constante con instalaciones improvisadas o debilitadas por el uso.

En el ámbito hidráulico se necesitan elementos que aseguren un funcionamiento más confiable, entre ellos válvulas de retención en succión e impulsión cuando la configuración lo permita, ya que estas evitan el retroceso del agua y reducen esfuerzos innecesarios sobre la bomba. También son importantes las purgas y los filtros de sedimentos, que ayudan a mantener limpio el flujo y protegen al equipo de partículas que podrían afectar su desempeño. Incorporar estos componentes permitiría mejorar la eficiencia del sistema y contribuir a una desinfección más efectiva en los hogares.

La operación del sistema demanda protocolos sencillos que orienten a los usuarios en acciones básicas, como el cebado adecuado de la motobomba cuando sea necesario, el encendido y apagado en condiciones seguras y el registro de las horas de uso en cada punto de servicio. Estos elementos fortalecen la organización comunitaria, pues permiten priorizar el acceso y anticipar necesidades de mantenimiento. Contar con procedimientos claros favorece una relación

más cuidadosa con el equipo y reduce la probabilidad de fallas atribuibles a un manejo inadecuado.

En relación con la cloración, se requiere una guía de dosificación que responda al volumen de los recipientes que utilizan las familias, acompañado de una verificación periódica del cloro residual mediante tiras reactivas o equipos simples. Este control facilita respetar los tiempos de contacto necesarios para garantizar una desinfección adecuada, algo especialmente importante en un contexto donde el agua proviene de fuentes diversas y con niveles de riesgo distintos. Estas prácticas permiten que cada vivienda mantenga un estándar mínimo de seguridad sanitaria sin depender de equipos complejos.

Conclusión Técnica de la Línea Base. La línea base evidencia un sistema de abastecimiento fragmentado y manual, marcado por la coexistencia de aljibes, nacederos y captación en el río, además de una capacidad de bombeo que no alcanza a cubrir momentos de demanda elevada, especialmente cuando las viviendas requieren agua al mismo tiempo que los cultivos. La cloración se aplica de manera obligatoria, aunque con controles imprecisos que reducen su eficacia sanitaria. La falta de estandarización en mangueras y acoples, sumada a la ausencia de protecciones eléctricas e hidráulicas mínimas, incrementa pérdidas, riesgos y fallas prematuras. Estos hallazgos justifican avanzar hacia interfaces unificadas, pretratamientos simples, protocolos de cloración medible y formas básicas de presurización o mejoras por gravedad en los nacederos, con el fin de fortalecer la seguridad y la continuidad del servicio.

Contexto Real de la Comunidad

Las viviendas de la vereda acceden al agua a través de tres fuentes principales que revelan la diversidad del territorio, ya que algunas cuentan con aljibe propio, otras dependen del nacedero que brota en la peña y un tercer grupo obtiene el recurso del río, cuyo nivel de

contaminación exige el uso constante de pastillas de cloro. El bombeo se realiza con una o dos motobombas compartidas, trasladadas manualmente entre distintos puntos, lo que genera demoras y limita la atención simultánea de viviendas y cultivos. Esta operación expone varios riesgos, entre ellos conexiones improvisadas, golpes de ariete, marcha en seco y una marcada falta de estandarización en mangueras y acoples que afecta la seguridad y la eficiencia del sistema.

Objetivo de la Fase. El objetivo de esta fase consiste en construir un panorama claro del sistema actual de abastecimiento de agua en Manga Vieja, de modo que sea posible comprender cómo se obtiene el recurso, cómo se almacena y qué prácticas de tratamiento se realizan antes de su consumo. Este propósito permite reconocer dinámicas domésticas y comunitarias que influyen en la continuidad del servicio, y que muchas veces permanecen invisibles hasta que se analizan desde una mirada técnica vinculada a las experiencias cotidianas de los habitantes.

Además de caracterizar las prácticas domésticas, la fase busca identificar las tecnologías empleadas en el proceso, entre ellas motobombas, tuberías, conexiones eléctricas, métodos de presurización y rutinas de cloración, lo que permite evaluar su estado y su desempeño real en el territorio. Esta información es fundamental para establecer un diagnóstico que no se limite al funcionamiento aislado de los equipos, sino que considere las condiciones del entorno y la manera en que las familias interactúan con las herramientas disponibles.

Con esta evidencia se construye la línea base del proyecto, que sirve como punto de partida para orientar las decisiones técnicas y sociales en fases posteriores. La línea base no solo resume el estado actual, también permite identificar riesgos, oportunidades de mejora y elementos que requieren intervención prioritaria, como la estandarización de acoples, la necesidad de pretratamientos o la importancia de ajustar la cloración. Gracias a esta

documentación, el proyecto avanza con una comprensión más completa del sistema y con criterios sólidos para diseñar soluciones coherentes con la realidad local.

Actores y Sitios Para Relevar. El levantamiento de información involucra actores que representan diversas formas de acceso al agua, lo que permite observar cómo cada hogar enfrenta desafíos específicos. Las viviendas con aljibe ofrecen un punto de vista asociado al almacenamiento doméstico, mientras que aquellas que dependen del nacedero o del río muestran dinámicas marcadas por la disponibilidad variable, la distancia y las condiciones ambientales del trayecto. Esta diversidad enriquece el análisis y permite comprender con mayor amplitud las estrategias que la comunidad adopta para abastecerse.

Los sitios de relevamiento incluyen puntos de toma tanto en el nacedero como en el río, además de las áreas destinadas al riego de cultivos, donde la demanda suele incrementarse y presionar la infraestructura existente. Estos espacios permiten observar variaciones en caudal, calidad del agua y esfuerzos necesarios para transportar el recurso hacia las viviendas o los cultivos. Cada sitio revela particularidades que influyen en la forma en que se organiza la comunidad y en los tiempos que deben invertir para asegurar su abastecimiento.

También se consideran actores con un rol operativo dentro del sistema, como los custodios de las motobombas y los líderes comunitarios que coordinan el uso del equipo y orientan decisiones sobre mantenimiento y prioridades. Su participación ofrece una comprensión más amplia de la gestión local, ya que conocen las fallas recurrentes, las tensiones en momentos de alta demanda y las dificultades derivadas de la falta de estandarización. Estos aportes fortalecen el análisis técnico y ayudan a proponer soluciones que no solo sean efectivas, sino también viables para la comunidad.

Instrumentos de Levantamiento. El levantamiento de información se apoyó en una lista de verificación que permitió observar las condiciones físicas de la infraestructura, incluyendo aljibes, tanques, elevaciones, diámetros de tubería, materiales y conexiones eléctricas. Este instrumento favoreció una mirada detallada que permitió identificar riesgos, puntos críticos y elementos que condicionan el desempeño de las motobombas, además de evaluar la presencia o ausencia de protecciones básicas. Esta observación directa ayuda a reconocer limitaciones que no siempre se evidencian en las conversaciones con los usuarios.

Las entrevistas semiestructuradas realizadas a hogares y líderes comunitarios complementaron la revisión técnica, ya que permitió comprender cómo se vive el acceso al agua y qué prácticas acompañan su uso y tratamiento. Los testimonios recogidos mostraron diferencias importantes entre las viviendas, tanto en disponibilidad como en la percepción del riesgo sanitario. Estas entrevistas también permitieron identificar estrategias informales de organización, tiempos de espera prolongados y prácticas de bombeo que afectan la continuidad del servicio, lo que aporta información clave para el diseño de mejoras.

El inventario de equipos y el registro fotográfico permitieron documentar marcas, potencias, tensiones, estados físicos y compatibilidades entre mangueras y acoples, además de elaborar croquis del recorrido del agua. Este conjunto de instrumentos permitió reconstruir, de manera clara, cómo se mueve el recurso desde cada fuente hasta los puntos de almacenamiento. Los flujogramas elaborados para aljibe, nacedero y toma en río con cloración permiten visualizar el proceso en forma ordenada, facilitando la identificación de fallas y la planificación de soluciones integrales.

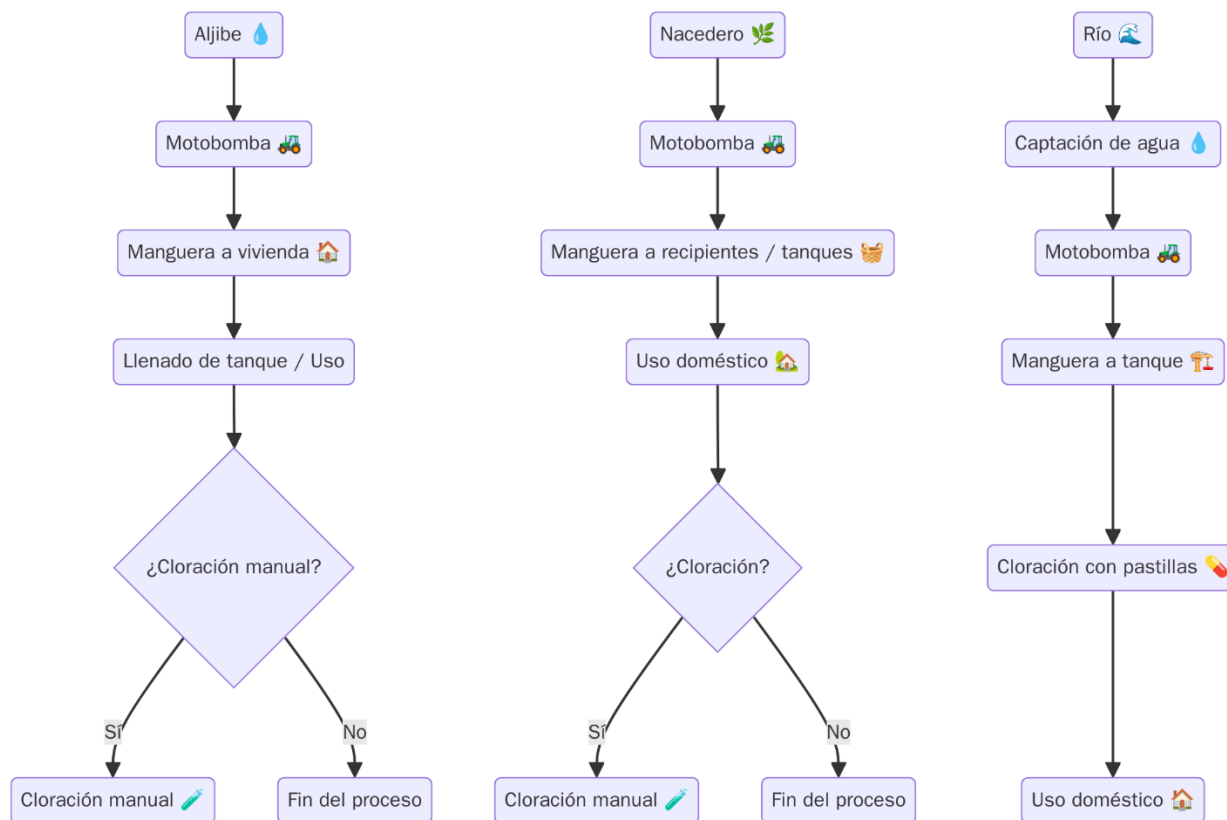
Preguntas Clave en Campo. Las preguntas formuladas en campo se orientaron a comprender la lógica completa del recorrido del agua, desde su punto de origen hasta el

momento en que llega a la vivienda o se utiliza en el cultivo. Indagar sobre el lugar exacto donde se toma el agua, las longitudes de manguera empleadas y las pendientes del terreno permitió caracterizar las pérdidas y esfuerzos asociados al transporte. Estos elementos ayudan a explicar por qué algunas viviendas experimentan menor caudal y cómo factores geográficos inciden en el rendimiento de las motobombas.

Las consultas sobre las motobombas, en particular su potencia, tensión y forma de encendido, permitieron identificar diferencias importantes entre los equipos disponibles y las condiciones de operación. Se exploró si existían mecanismos automatizados como presostatos o tanques presurizados, además de observar los procedimientos que cada familia aplica para encender y detener los equipos. Estas preguntas revelaron la ausencia de estandarización en el manejo y una dependencia fuerte del conocimiento acumulado por ciertos miembros de la comunidad.

La indagación sobre tratamientos aplicados permitió reconocer variaciones en la cantidad y la frecuencia con que se usa el cloro, así como la existencia o ausencia de filtros domésticos. Además, se exploraron las fallas más frecuentes, entre ellas baja presión, turbidez, averías eléctricas, fugas y tiempos prolongados de traslado. Para el caso del riego se identificaron necesidades específicas de caudal, horarios de uso y distancias a los cultivos, lo que permite comprender presiones adicionales al sistema y planificar soluciones que respondan tanto a la demanda doméstica como a la agrícola.

Mapa del Proceso. El siguiente es el proceso por medio del cual se muestran cada una de las etapas del proceso que se han desarrollado para construir de manera adecuada toda la fidelización del prototipo, con respecto a los requerimientos humanos y técnicos del mismo, y que se pusieron en marcha al momento de la construcción del prototipo.

Figura 1*Mapa de Procesos*

El mapa de proceso muestra tres rutas mediante las cuales las viviendas de la vereda acceden al agua y la preparan para su uso doméstico, cada una asociada a la fuente que abastece a la familia. En el caso del aljibe, el proceso inicia con la extracción mediante motobomba, que impulsa el agua a través de una manguera hasta la vivienda, donde se llena un tanque o se utiliza directamente. En este punto se define si la familia realiza cloración manual; cuando la respuesta es afirmativa se agrega el desinfectante y el proceso continúa, mientras que, si no se aplica, el flujo termina sin tratamiento adicional.

En el esquema del nacedero, el agua se obtiene del punto donde brota y posteriormente se impulsa con motobomba hacia recipientes o tanques domésticos, de modo que el recurso quede

disponible para las necesidades diarias. Luego del llenado se plantea la misma decisión respecto a la cloración, ya que las familias pueden aplicar el desinfectante o, en algunos casos, omitirlo, lo que genera una bifurcación en el proceso. Esta ruta evidencia el peso que tiene la decisión doméstica en la calidad final del agua y la necesidad de contar con criterios claros de desinfección.

El proceso asociado al río presenta una estructura más directa, pues la captación se realiza en la orilla, el agua se impulsa mediante una motobomba y, posteriormente, se traslada a un tanque donde se aplica cloración con pastillas. A diferencia de las otras fuentes, esta etapa es obligatoria debido a los niveles de contaminación presentes en el afluente, lo que hace indispensable un tratamiento previo al consumo. Una vez clorada, el agua se destina a los usos domésticos cotidianos, lo que cierra el recorrido dentro del sistema actual de abastecimiento.

Problemas Típicos Observados. El levantamiento de información permitió identificar dificultades recurrentes que afectan la continuidad y la calidad del abastecimiento, especialmente cuando varias viviendas requieren agua al mismo tiempo o cuando coincide la demanda doméstica con el riego de los cultivos. En estos momentos, la capacidad limitada del equipo provoca retrasos y obliga a establecer turnos que no siempre se cumplen, lo que genera tensiones dentro de la comunidad. Esta situación refleja la necesidad de una infraestructura más estable que responda a variaciones en el consumo sin recurrir a esfuerzos adicionales de coordinación.

Durante las observaciones también se evidenciaron dinámicas operativas que incrementan el desgaste de la infraestructura, en particular el encendido y apagado frecuente de las motobombas y los golpes de ariete generados por ajustes bruscos en las válvulas. Estas prácticas afectan la vida útil del equipo y reducen la calidad del flujo, lo que resulta más crítico en temporada seca, cuando el nacedero y el río presentan niveles bajos y se incrementa el riesgo

de marcha en seco. Estas condiciones exigen mecanismos que protejan el sistema y brinden mayor seguridad operativa.

Además, la falta de estandarización en acoples, diámetros de manguera y enchufes eléctricos genera incompatibilidades que dificultan el armado rápido de las líneas de impulsión y elevan la probabilidad de fallas o fugas. A esto se suma la cloración sin medición precisa, práctica que expone a riesgos de dosis insuficiente o excesiva y afecta la seguridad sanitaria del agua. Estas observaciones muestran la necesidad de avanzar hacia procedimientos más confiables y componentes compatibles que permitan mejorar la eficiencia del sistema y reducir la vulnerabilidad del abastecimiento en la vereda.

Trabajo Exploratorio sobre la Tecnología Existente

El trabajo exploratorio permitió revisar cómo funcionan actualmente los equipos que la comunidad utiliza para trasladar y distribuir el agua, lo que abrió un espacio para analizar sus fortalezas y debilidades en relación con un posible sistema automatizado. Las motobombas disponibles mostraron un desempeño aceptable en recorridos cortos, aunque su uso manual incrementa los riesgos de marcha en seco y acelera el desgaste. Este proceso de exploración también reveló la ausencia de protección eléctrica adecuada y la falta de estandarización en acoples y tuberías, aspectos que dificultan la integración de nuevas tecnologías.

Tecnologías Disponibles Hoy y Rutas de Actualización

El trabajo exploratorio permitió identificar un conjunto de tecnologías de bombeo que se encuentran disponibles en el mercado colombiano y que podrían adaptarse, con distintos niveles de complejidad, a las condiciones de la vereda. Se observó que las motobombas periféricas de 0,5 HP son económicas y útiles para distancias cortas, aunque sensibles a sólidos y poco adecuadas para demandas altas. Las bombas centrífugas de 1 HP ofrecen mejor caudal y se

ajustan a alturas moderadas, por lo que representan una alternativa intermedia para viviendas con recorridos más exigentes.

También se analizaron equipos con mayores capacidades operativas, como las bombas Autocebante tipo jet, que permiten aspiraciones de hasta ocho o nueve metros y soportan mezclas de aire y agua, una característica valiosa cuando el espejo de agua se encuentra bajo. De igual forma, las bombas sumergibles de cuatro pulgadas se presentan como una opción fiable para aljibes o pozos, ya que evitan el cebado y operan de manera silenciosa, aunque requieren una instalación cuidada y protecciones eléctricas que garanticen su funcionamiento seguro en el largo plazo.

En cuanto a la presurización, se identificaron dos rutas principales: la primera corresponde a los sistemas hidroneumáticos compuestos por bomba, tanque de diafragma y presostato, que ofrecen una solución económica y reducen los arranques frecuentes; la segunda incorpora variadores de frecuencia y sensores de presión, lo que permite mantener una presión constante y optimizar el consumo energético. Estas opciones pueden complementarse con elementos de control como flotadores, sensores de presión y protecciones contra marcha en seco, además de conectores rápidos y módulos que faciliten el cambio de puntos sin desarmar la instalación.

Hoja de Ruta de Mejoras (Gradual)

El análisis de la infraestructura y de las tecnologías disponibles permitió proponer una hoja de ruta gradual que facilite la transición hacia un sistema más estable y seguro. El primer paso consiste en estandarizar diámetros y acoples, además de etiquetar las mangueras e instalar válvulas de retención y purgas, lo que reduce pérdidas por fricción y mejora la eficiencia del

bombeo. Estos ajustes iniciales representan intervenciones de bajo costo que generan un impacto inmediato en la continuidad del servicio y en la organización del sistema comunitario.

El siguiente avance plantea la construcción de un equipo portátil que concentre la motobomba en un bastidor protegido, acompañado de un pequeño tanque presurizado y un presostato que disminuya los ciclos de encendido. Esta configuración aporta mayor estabilidad, reduce esfuerzos sobre la bomba y facilita el manejo por parte de las familias. A partir de esta base se sugiere incorporar protecciones contra marcha en seco y un tablero con interruptor automático o guardamotor, medidas que brindan seguridad eléctrica y protegen el equipo en condiciones variables de caudal.

La ruta culmina con mejoras orientadas a responder a demandas más exigentes, entre ellas la instalación de un variador de frecuencia para mantener presión constante en líneas largas o con consumos fluctuantes. En un escenario de mayor crecimiento, puede evaluarse la incorporación de una segunda bomba en paralelo con alternancia de operación, lo que permitiría atender picos de demanda y ofrecer respaldo en caso de fallas. Estas fases permiten avanzar con orden y realismo hacia un sistema que combine eficiencia técnica, facilidad operativa y sostenibilidad comunitaria.

Modelación del Prototipo

En cumplimiento del segundo objetivo específico, se realizó el modelado conceptual, hidráulico y electrónico del sistema automatizado de abastecimiento y potabilización de agua potable, con el propósito de definir su funcionamiento integral y evaluar su viabilidad técnica en condiciones controladas. Este proceso implicó la estructuración detallada de cada uno de los subsistemas que componen la propuesta, incluyendo la captación, el almacenamiento, la filtración, la distribución y el control automatizado. El modelado hidráulico permitió establecer

la secuencia de flujo, la ubicación estratégica de las motobombas y la disposición de los tanques intermedios, mientras que el modelado electrónico definió la arquitectura de control basada en microcontrolador, sensores de nivel y etapa de potencia. Asimismo, se integraron cálculos preliminares de caudal y presión, junto con simulaciones eléctricas, que permitieron anticipar el comportamiento operativo del sistema antes de su construcción física, garantizando coherencia técnica entre diseño y ejecución.

El modelado permitió estructurar el sistema en tres subsistemas principales:

Sistema hidráulico

Sistema electrónico de control

Subsistema lógico–funcional

Cada uno fue desarrollado mediante representaciones técnicas que garantizan coherencia entre diseño conceptual y construcción del prototipo. Estas representaciones incluyeron diagramas hidráulicos para visualizar el flujo del agua y la interacción entre tanques y motobombas; esquemas eléctricos detallados para definir la arquitectura de control basada en el microcontrolador y la etapa de potencia; diseño de la placa de circuito impreso (PCB) para materializar físicamente el sistema electrónico; y diagramas de bloques y de flujo para estructurar la lógica de operación automatizada. La integración de estos elementos permitió establecer correspondencia directa entre lo proyectado en la fase de modelado y lo implementado en el prototipo físico. De esta manera, se aseguró que cada componente diseñado tuviera una función claramente definida dentro del sistema global, reduciendo inconsistencias técnicas y fortaleciendo la validez metodológica del proyecto en su fase experimental, con la cual se pasaría en un momento dado, a construir el aspecto real.

Modelado del Sistema Hidráulico

El sistema hidráulico fue estructurado considerando el siguiente flujo continuo y jerarquizado del recurso hídrico, partiendo desde la captación hasta la distribución final en las viviendas. En primer lugar, el agua es conducida hacia el tanque principal de captación, donde se estabiliza el volumen inicial disponible. Posteriormente, el recurso es impulsado mediante tres motobombas hacia el tanque de alquiler, encargado de garantizar presión y almacenamiento preliminar. Desde allí, el agua es transferida a dos tanques de reserva intermedios, cada uno equipado con su respectiva motobomba para asegurar continuidad operativa. Luego, el flujo se dirige hacia el primer tanque de filtración, donde se realiza un proceso inicial de acondicionamiento, para posteriormente pasar al segundo tanque de filtración, etapa final antes de la distribución. Finalmente, tres motobombas independientes impulsan el agua tratada hacia las viviendas, asegurando abastecimiento equitativo y controlado en el sistema.

El sistema cuenta con:

Captación (tanque principal)

Tanque de alquiler (3 motobombas)

Dos tanques de reserva (2 motobombas)

Primer tanque de filtración (1 motobomba)

Segundo tanque de filtración (3 motobombas hacia viviendas)

Distribución domiciliaria

El modelo contempla un total de nueve (9) motobombas y ocho (8) sensores de nivel, distribuidos estratégicamente para garantizar control automatizado del abastecimiento en cada una de las etapas del sistema. Las motobombas fueron ubicadas de acuerdo con los puntos críticos de transferencia hidráulica, permitiendo impulsar el agua entre tanques de captación,

reserva y filtración, así como hacia la red de distribución domiciliaria. Por su parte, los sensores de nivel se instalaron en posiciones clave dentro de los tanques para detectar condiciones de nivel mínimo y máximo, asegurando activación y desactivación oportuna de las bombas correspondientes. Esta disposición permite supervisión continua del volumen almacenado, prevención de funcionamiento en seco y reducción de sobrellenado. La integración coordinada de sensores y motobombas fortalece la eficiencia operativa del sistema, optimiza el uso del recurso hídrico y proporciona una base técnica sólida para el control automatizado en condiciones experimentales controladas.

Figura 2

Diagrama Hidráulico del Sistema Automatizado

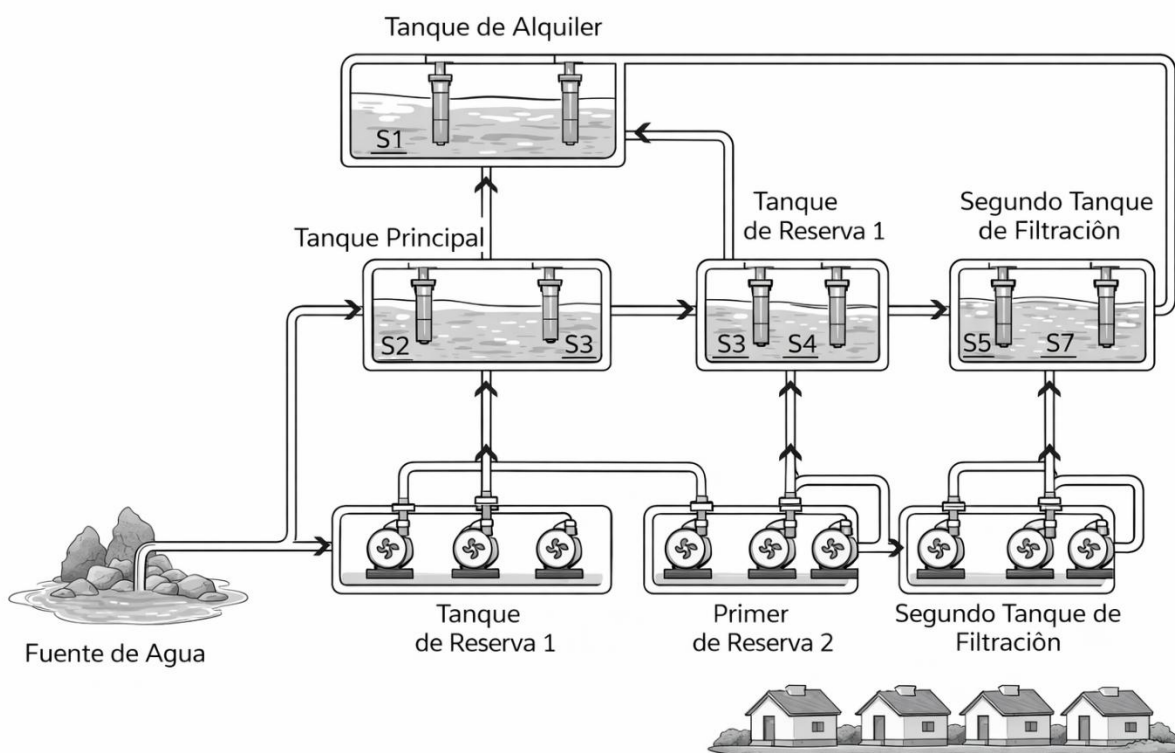


Tabla 4*Distribución Funcional de Bombas y Sensores*

Tanque	Cantidad de Sensores	Motobombas Asociadas	Función
Tanque de alquiler	1	3	Impulsión primaria
Tanque de reserva 1	1	1	Almacenamiento intermedio
Tanque de reserva 2	1	1	Almacenamiento intermedio
Filtración etapa 1	2	1	Filtrado inicial
Filtración etapa 2	2	3	Distribución final
Total	8	9	Sistema completo

Cálculo de Caudal del Sistema

El caudal teórico fue estimado con base en la capacidad nominal de las motobombas utilizadas. Se empleó la ecuación:

$$Q = V / t$$

Donde:

$$Q = \text{Caudal (L/s)}$$

$$V = \text{Volumen del tanque (L)}$$

$$t = \text{Tiempo de llenado (s)}$$

Para el tanque de reserva (capacidad 20 L a escala experimental):

Si el tiempo promedio de llenado fue 42 s:

$$Q = 20 / 42$$

$$Q = 0,476 \text{ L/s}$$

Esta relación permitió determinar la capacidad real de impulsión del sistema bajo condiciones experimentales controladas. Para ello, se midió el tiempo promedio necesario para llenar cada tanque desde un nivel mínimo hasta el nivel máximo operativo, registrando valores repetidos para reducir el error experimental. A partir de estos datos, se obtuvo un caudal promedio por motobomba, lo cual permitió verificar que la capacidad instalada es suficiente para garantizar la continuidad del abastecimiento entre etapas. Este análisis contribuye a validar la viabilidad hidráulica del diseño, asegurando que el sistema puede responder adecuadamente a la demanda prevista sin generar sobrecargas ni tiempos excesivos de operación.

Tabla 5

Resultados de Caudal Experimental

Tanque	Volumen (L)	Tiempo (s)	Caudal (L/s)
Reserva 1	20	42	0,476
Reserva 2	20	44	0,455
Filtración 1	15	38	0,395

Cálculo de Presión Estimada

La presión hidráulica se estimó mediante la ecuación fundamental de carga estática:

$$P = \rho \cdot g \cdot h$$

Donde:

$$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$h = \text{altura promedio del sistema (0,5 m a escala)}$

$$P = 1000 \times 9,81 \times 0,5$$

$$P = 4.905 \text{ Pa}$$

$$P \approx 0,049 \text{ bar}$$

Esta expresión permitió calcular la presión mínima requerida para garantizar el desplazamiento del agua entre las distintas etapas del sistema. Considerando la altura promedio del prototipo a escala, se determinó que la presión generada por las motobombas seleccionadas es suficiente para superar las pérdidas por elevación y mantener un flujo continuo. Este análisis resulta fundamental para verificar la viabilidad hidráulica del diseño, ya que asegura que el sistema puede operar sin generar insuficiencia de presión ni afectar la eficiencia del proceso de almacenamiento y distribución.

Modelado Eléctrico del Sistema (Proteus)

Se desarrolló el esquema eléctrico completo en entorno de simulación, incluyendo el microcontrolador Arduino Nano como unidad central de procesamiento, los reguladores de voltaje 7805 para estabilización de la alimentación a 5V, la etapa de potencia conformada por transistores TIP41C para el accionamiento de las nueve motobombas, resistencias de polarización, diodos de protección contra picos inductivos y conectores de entrada para los ocho sensores de nivel. Asimismo, se incorporaron fuentes de alimentación de 12V para la etapa de potencia y líneas independientes de 5V para el sistema lógico, garantizando aislamiento funcional entre control y carga. La simulación permitió verificar la correcta activación individual de cada bomba, el comportamiento ante señales simultáneas y la estabilidad del sistema bajo diferentes condiciones operativas, reduciendo riesgos de fallo antes de la implementación física del circuito.

Reguladores 7805

Arduino Nano

Etapas de potencia con TIP41C

Entradas para sensores

Salidas para 9 motobombas

Este modelado permitió verificar:

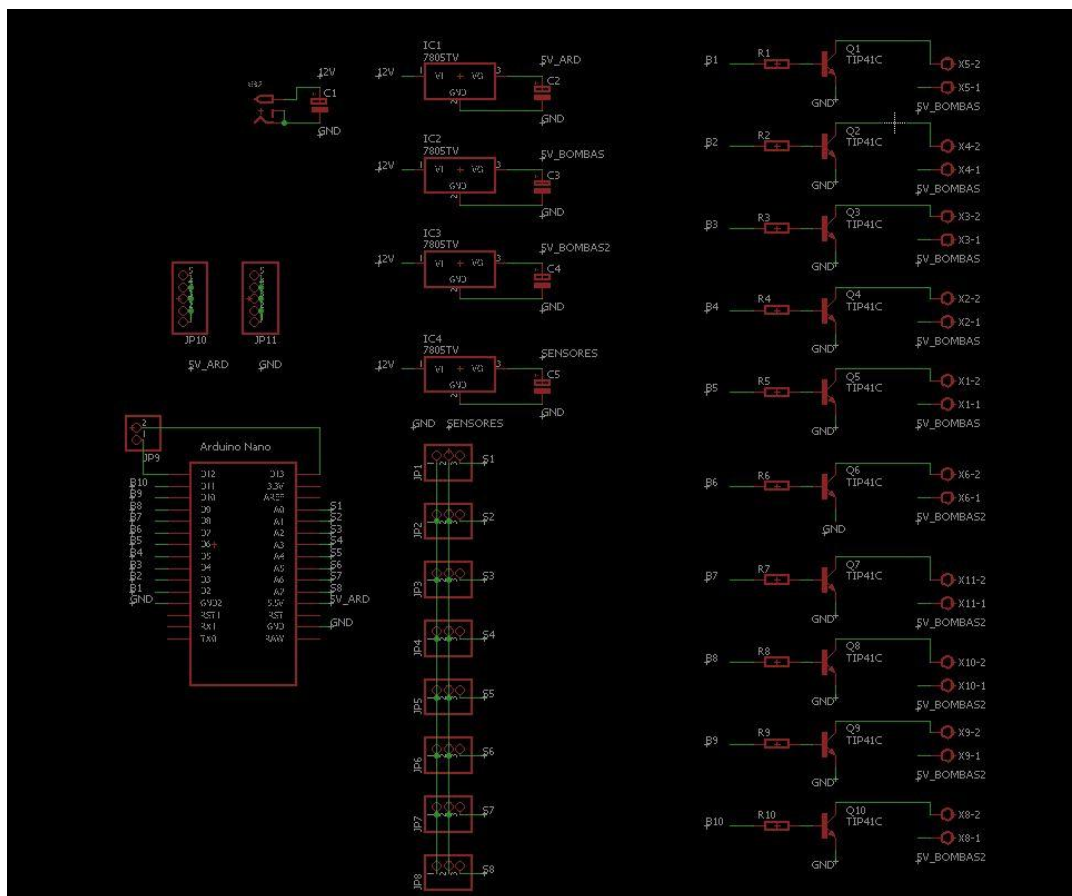
Correcta alimentación de 5V

Separación entre etapa de control y potencia

Capacidad de conmutación individual

Figura 3

Diagrama Esquemático del Sistema en Proteus

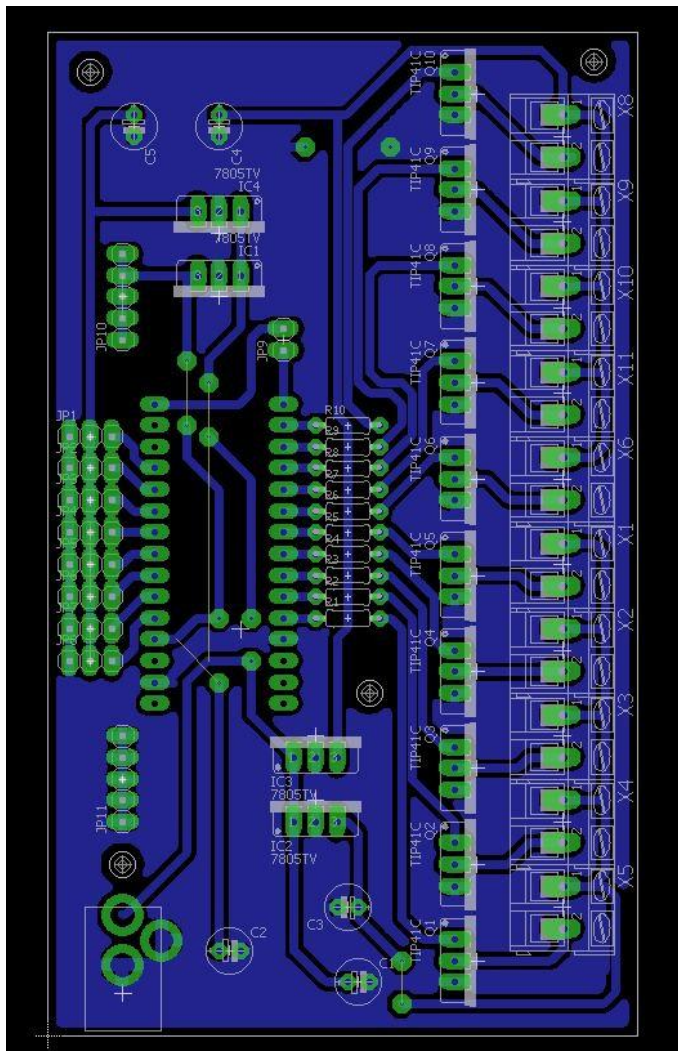


Diseño de PCB (EAGLE)

Posteriormente se diseñó la tarjeta de circuito impreso (PCB) con las siguientes características: distribución organizada de componentes electrónicos, separación física entre la etapa de control y la etapa de potencia, ruteo optimizado de pistas para minimizar interferencias y caída de tensión, y dimensionamiento adecuado del ancho de pista conforme a la corriente estimada de las motobombas.

Figura 4

Diseño de PCB del Sistema de Control



El diseño incluyó el encapsulado del Arduino Nano, reguladores de voltaje 7805 con capacitores de desacople, transistores TIP41C para conmutación de carga, resistencias de base y borneras independientes para conexión de sensores y motobombas. Se consideró además la implementación de planos de tierra y trayectorias cortas para señales lógicas, con el fin de mejorar la estabilidad eléctrica y reducir el ruido electromagnético. Este proceso permitió materializar físicamente el esquema previamente simulado, asegurando coherencia entre el diseño teórico y la construcción del sistema de control automatizado. Así, la tarjeta de circuito impreso (PCB) se construyó bajo las siguientes características:

Ruteo monocapa

Separación de pistas de potencia

Borneras independientes para cada bomba

Regulación distribuida de voltaje

Diagrama de Bloques del Sistema

La arquitectura funcional del sistema se diseñó mediante un diagrama de bloques que representa la interacción estructurada entre los diferentes subsistemas que componen la solución automatizada. Este diagrama permitió visualizar de manera simplificada y jerárquica la relación entre los sensores de nivel, la unidad de procesamiento basada en el microcontrolador Arduino Nano, la etapa de potencia encargada de la conmutación de las motobombas y el sistema hidráulico propiamente dicho. La representación por bloques facilitó la identificación del flujo de información (señales de control) y del flujo de energía (alimentación y accionamiento de bombas), evidenciando la separación funcional entre control lógico y carga eléctrica. Asimismo, el diagrama permitió establecer correspondencia directa entre entradas (sensores), procesamiento

(algoritmo de decisión) y salidas (activación de bombas), asegurando coherencia operativa y claridad metodológica en el diseño integral del sistema automatizado.

Se modeló la arquitectura funcional del sistema mediante un diagrama de bloques que representa:

Sensores → Arduino Nano

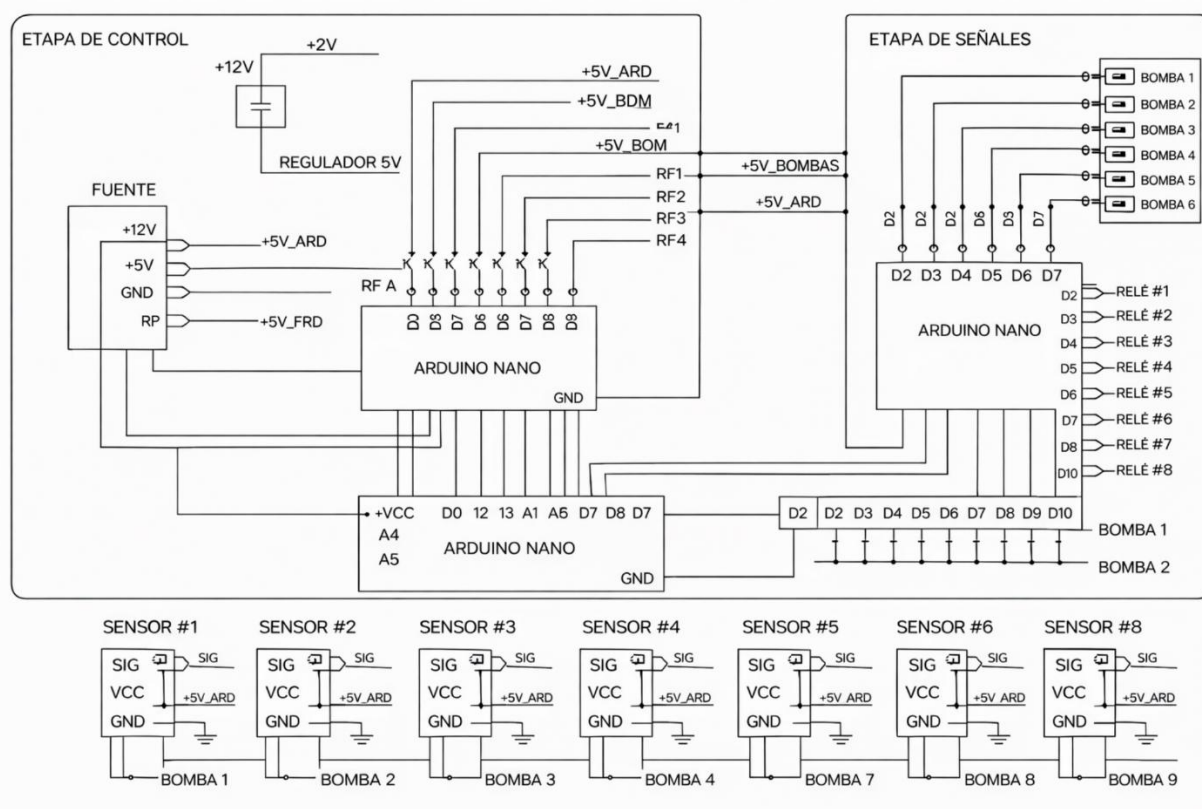
Arduino → Módulo de activación

Módulo → Motobombas

Motobombas → Sistema hidráulico

Figura 5

Diagrama de Bloques del Sistema Automatizado



Lógica de Control

El sistema fue modelado mediante un diagrama de flujo que establece la secuencia lógica de operación del control automatizado, definiendo claramente las etapas de supervisión, decisión y actuación dentro del proceso. El diagrama inicia con la lectura continua de los ocho sensores de nivel instalados en los diferentes tanques, seguido de la evaluación de condiciones de nivel mínimo. En caso de detectarse una señal de nivel bajo, el algoritmo activa la motobomba correspondiente e inicia un temporizador interno de seguridad. Posteriormente, el sistema verifica de manera constante si se ha alcanzado el nivel máximo o si el tiempo máximo de operación ha sido superado.

En cualquiera de estos dos escenarios, se procede a la desactivación automática de la bomba. Finalmente, el proceso retorna al inicio del ciclo, garantizando supervisión continua en tiempo real y asegurando una operación estable, segura y autónoma del sistema automatizado.

En el siguiente diagrama de flujo se establece:

Lectura de 8 sensores

Identificación de nivel bajo

Activación de bomba correspondiente

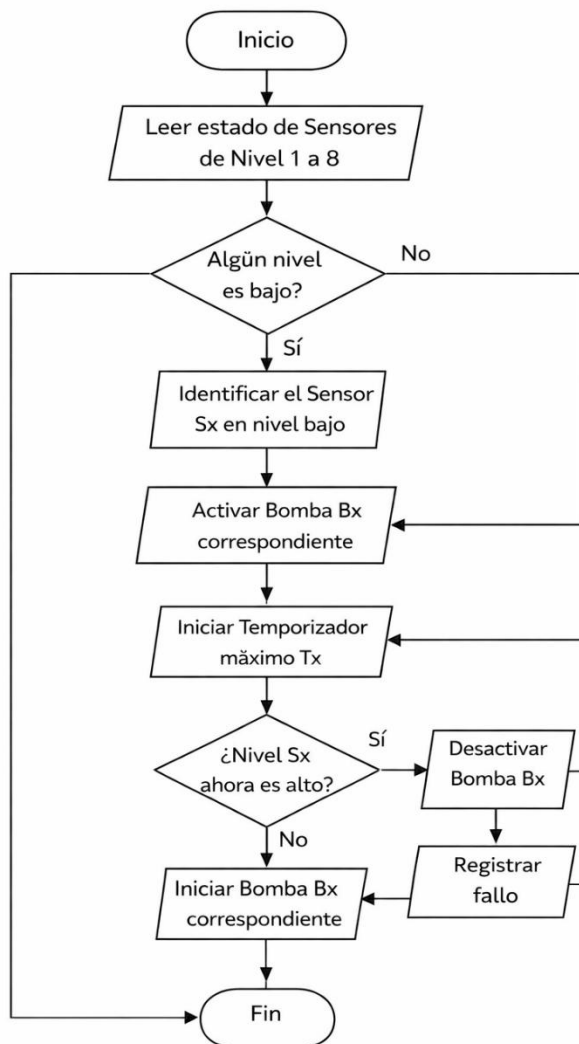
Temporización máxima

Verificación de nivel alto

Registro de fallo si aplica

Figura 6

Diagrama de Flujo del Algoritmo de Control



Bx: Bomba (Pump) 1 a 9

Sx: Sensor (Sensor) 1 a 8

Tx: Temporizador (Timer) 1 a 8

Tx: Temporizador (Timer) asociado a Bx

El modelado integral del sistema permitió verificar la coherencia existente entre el diseño hidráulico y el diseño electrónico propuesto. A través de la representación estructurada de ambos subsistemas, fue posible establecer una correspondencia directa entre el flujo físico del agua y el

sistema de control automatizado encargado de supervisar y accionar las motobombas. Esta articulación aseguró que cada etapa hidráulica contara con un respaldo lógico y eléctrico claramente definido. La integración de diagramas hidráulicos, esquemas eléctricos, diseño de PCB y diagramas de flujo permitió evidenciar que el sistema fue concebido de manera organizada y técnicamente consistente. De esta forma, se redujo la posibilidad de inconsistencias entre lo proyectado y lo implementado, garantizando que el funcionamiento esperado del sistema pudiera materializarse posteriormente en el prototipo físico sin contradicciones estructurales.

Asimismo, el modelado permitió confirmar la factibilidad técnica del control independiente de las nueve motobombas distribuidas en las diferentes etapas del sistema. Mediante la simulación del esquema eléctrico y la representación funcional por bloques, se comprobó que el microcontrolador seleccionado cuenta con la capacidad suficiente de entradas y salidas para gestionar los ocho sensores de nivel y las nueve salidas de potencia sin generar conflictos de programación o sobrecarga lógica. Este análisis demostró que cada tanque puede operar de forma autónoma, activando su respectiva bomba únicamente cuando las condiciones de nivel así lo requieran. La posibilidad de controlar cada etapa de manera independiente fortalece la eficiencia operativa del sistema y permite una distribución más equitativa del recurso hídrico, aspecto fundamental dentro del enfoque comunitario planteado en el proyecto.

En relación con el análisis hidráulico, los cálculos de caudal realizados evidenciaron que la capacidad nominal de las motobombas seleccionadas resulta adecuada para el abastecimiento local proyectado. A partir de la medición del tiempo de llenado y el volumen de los tanques a escala, se estimó un caudal suficiente para garantizar continuidad en el flujo sin generar tiempos excesivos de operación. Este resultado confirma que el sistema puede responder a la demanda prevista dentro del contexto experimental, manteniendo un equilibrio entre eficiencia energética

y desempeño hidráulico. La estimación del caudal permitió también validar que las bombas no se encuentran su dimensionadas ni sobredimensionadas para las condiciones del prototipo, asegurando una operación estable dentro de los parámetros de diseño establecidos previamente.

De igual manera, el cálculo de presión hidráulica permitió determinar que la altura de elevación entre tanques puede ser superada sin dificultad por las motobombas instaladas. Mediante la aplicación de la ecuación de presión estática, se verificó que la presión generada es suficiente para impulsar el agua entre las distintas etapas del sistema y garantizar su llegada a los puntos de distribución domiciliaria a escala. Este análisis resulta relevante, ya que confirma que el diseño no presenta limitaciones estructurales relacionadas con pérdidas de carga por elevación. La evaluación de presión contribuye, por tanto, a consolidar la viabilidad técnica del sistema, demostrando que la configuración propuesta puede mantener condiciones operativas adecuadas dentro del entorno experimental.

Por ello, la simulación eléctrica confirmó la estabilidad en la regulación de voltaje y la correcta activación de cargas inductivas representadas por las motobombas. La implementación de reguladores de tensión y la separación entre etapa lógica y etapa de potencia permitió garantizar un suministro estable al microcontrolador, evitando fluctuaciones que pudieran comprometer la operación del sistema. En conjunto, el modelado hidráulico, electrónico, lógico y físico mediante diseño de PCB demuestra que el proyecto no se limita a una propuesta conceptual, sino que cuenta con un fundamento técnico sólido respaldado por cálculos, simulaciones y representaciones estructuradas. Por tanto, se concluye que el Objetivo Específico 2 fue desarrollado satisfactoriamente, validando la coherencia y viabilidad del diseño integral del sistema automatizado.

Construcción y Validación del Prototipo Automatizado

En cumplimiento del tercer objetivo específico, se procedió a la construcción física del prototipo a escala del sistema automatizado de abastecimiento y potabilización de agua potable, con el propósito de evaluar su operación básica y validar su desempeño en un entorno experimental controlado. Esta fase representó la materialización del diseño previamente modelado, integrando el sistema hidráulico, el sistema electrónico y la lógica de control programada en el microcontrolador. La construcción incluyó la instalación de los tanques de captación, reserva y filtración, así como la incorporación de las nueve motobombas y los ocho sensores de nivel distribuidos estratégicamente. Asimismo, se ensambló la tarjeta de circuito impreso diseñada, conectando adecuadamente cada componente para asegurar coherencia entre el esquema eléctrico y la implementación física. El entorno experimental permitió simular condiciones reales de operación, facilitando la observación directa del comportamiento del sistema ante variaciones de nivel y activación automática de las bombas.

El prototipo fue desarrollado integrando el sistema hidráulico modelado, el sistema electrónico diseñado y la lógica de control previamente simulada, asegurando coherencia entre las diferentes etapas del proyecto. Esta integración permitió materializar en un entorno físico los principios técnicos establecidos durante la fase de diseño y simulación, garantizando que cada componente cumpliera la función prevista dentro del sistema global. El subsistema hidráulico fue ensamblado respetando la secuencia de captación, almacenamiento, filtración y distribución, mientras que el subsistema electrónico fue implementado mediante la PCB diseñada, incorporando el microcontrolador, la etapa de potencia y los sensores de nivel. Paralelamente, la lógica de control programada fue cargada en el Arduino, permitiendo la supervisión continua y la activación automatizada de las motobombas. Esta articulación entre hardware y software

permitió evaluar el comportamiento integral del sistema en condiciones experimentales controladas, validando su funcionamiento operativo.

Construcción del Sistema Hidráulico a Escala

El sistema fue implementado sobre una base estructural en madera, incorporando los siguientes componentes físicos: un tanque principal de captación, un tanque de alquiler equipado con tres motobombas, dos tanques de reserva intermedios con una motobomba cada uno, dos tanques destinados a las etapas de filtración y tres motobombas finales para la distribución hacia las viviendas. Asimismo, se instalaron ocho sensores de nivel ubicados estratégicamente en los diferentes tanques para permitir la supervisión continua del volumen almacenado. La estructura de madera proporcionó estabilidad mecánica y facilitó la organización espacial de los elementos hidráulicos y electrónicos, permitiendo visualizar claramente el flujo del agua y el funcionamiento del sistema. Las conexiones hidráulicas se realizaron mediante tubería flexible transparente, lo que posibilitó observar el comportamiento dinámico del flujo durante las pruebas experimentales. Esta configuración física permitió reproducir a escala las condiciones de operación previstas en el diseño conceptual.

El sistema fue implementado sobre una base estructural en madera, incorporando los siguientes componentes físicos:

Un tanque principal de captación.

Un tanque de alquiler con tres (3) motobombas.

Dos (2) tanques de reserva con una motobomba cada uno.

Dos (2) tanques de filtración.

Tres (3) motobombas finales para distribución domiciliaria.

Ocho (8) sensores de nivel distribuidos estratégicamente.

Sistema de tuberías flexibles interconectadas.

La disposición del sistema permitió simular el flujo progresivo del agua desde la captación hasta la distribución domiciliaria, reproduciendo de manera secuencial cada una de las etapas previstas en el diseño conceptual. Esta configuración facilitó la observación directa del comportamiento hidráulico en cada punto de transferencia, permitiendo identificar el paso del recurso hídrico desde el tanque principal hacia los tanques de reserva, posteriormente hacia las etapas de filtración y finalmente hacia las viviendas. La organización escalonada de los tanques y la ubicación estratégica de las motobombas posibilitaron evidenciar el funcionamiento por etapas y la activación automatizada conforme a los niveles detectados. Además, el uso de tuberías transparentes permitió verificar visualmente la continuidad del flujo y detectar posibles irregularidades durante las pruebas. De esta manera, el prototipo logró representar a escala el comportamiento real esperado del sistema de abastecimiento automatizado.

Figura 7

Vista General del Prototipo Hidráulico a Escala



Figura 8*Detalle de Tanques y Sensores de Nivel Instalados****Construcción del Sistema Electrónico de Control***

El sistema electrónico fue implementado mediante una tarjeta de circuito impreso (PCB) diseñada previamente en software especializado, lo cual permitió trasladar el esquema eléctrico simulado a una configuración física organizada y funcional. La PCB integró el microcontrolador Arduino Nano como unidad central de procesamiento, los reguladores de voltaje encargados de estabilizar la alimentación a 5V, y la etapa de potencia conformada por transistores destinados al accionamiento de las nueve motobombas. Asimismo, se incorporaron borneras para la conexión segura de los sensores de nivel y de las cargas inductivas, garantizando una distribución ordenada de las señales y de la alimentación. El diseño consideró la separación entre pistas de control y pistas de potencia, reduciendo posibles interferencias eléctricas. Esta implementación

permitió asegurar estabilidad operativa, facilitar el mantenimiento del sistema y consolidar la coherencia entre el diseño teórico y la construcción experimental del prototipo automatizado.

https://youtube.com/shorts/5faQtCfs7nM?si=6gasG_ALEkgrkS-w

La tarjeta integra:

Microcontrolador Arduino Nano.

Reguladores de voltaje 7805.

Transistores TIP41C para manejo de carga.

Borneras de conexión para motobombas.

Conectores de entrada para sensores.

Fuente de alimentación externa de 12 VDC.

La PCB fue fabricada y ensamblada manualmente, asegurando separación entre pistas de potencia y señales de control con el fin de minimizar interferencias eléctricas y garantizar estabilidad en la operación del sistema. Durante el proceso de fabricación se cuidó el trazado adecuado de las pistas, considerando el ancho necesario para soportar la corriente demandada por las motobombas, así como la correcta disposición de los componentes electrónicos.

El montaje incluyó la soldadura precisa de los transistores de potencia, reguladores de voltaje, resistencias, conectores y el encapsulado del microcontrolador, verificando continuidad y ausencia de cortocircuitos antes de su integración al prototipo. Esta separación funcional entre la etapa lógica y la etapa de potencia permitió proteger el microcontrolador de posibles variaciones o picos de corriente generados por las cargas inductivas. En consecuencia, la implementación física de la PCB consolidó la confiabilidad eléctrica del sistema automatizado.

Figura 9

PCB Fabricada del Sistema de Control

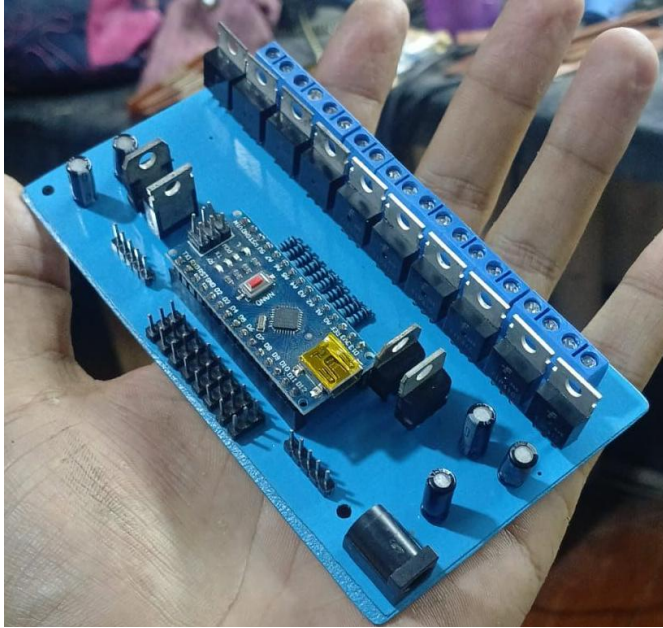
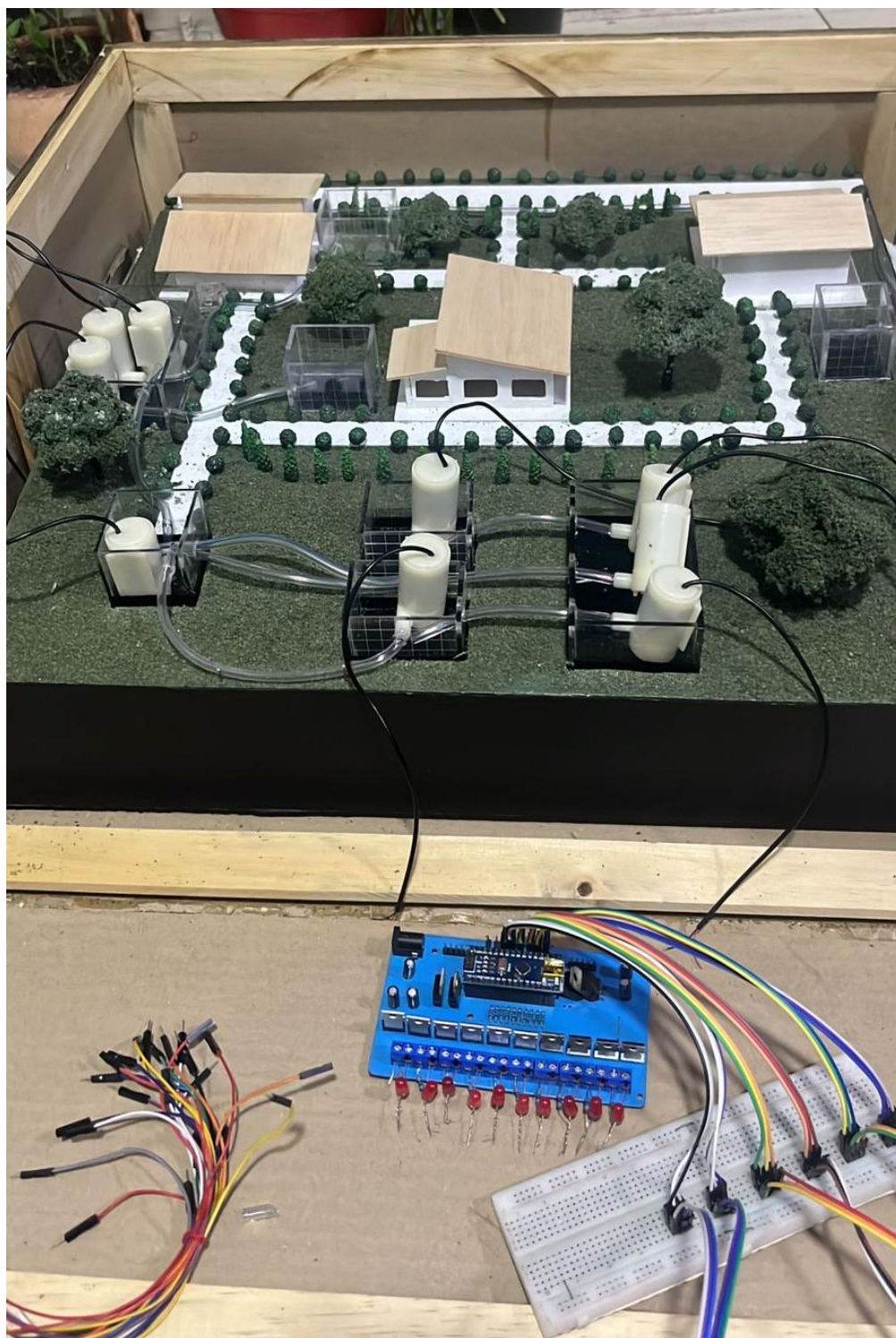


Figura 10

Integración del Tablero Electrónico al Prototipo Hidráulico



Integración del Sistema Completo

La integración consistió en:

Conexión de sensores de nivel a entradas digitales del Arduino.

Programación del algoritmo de control.

Conexión de salidas del Arduino a la etapa de potencia.

Verificación de activación independiente de cada motobomba.

Pruebas de continuidad y polaridad.

Se verificó que cada sensor activara únicamente la bomba correspondiente, conforme al diseño lógico establecido, garantizando así la independencia operativa entre las diferentes etapas del sistema. Para ello, se realizaron pruebas individuales en cada tanque, simulando condiciones de nivel mínimo y observando la respuesta del microcontrolador ante la señal recibida. Durante estas pruebas, se comprobó que la activación se producía exclusivamente en la motobomba asociada al sensor evaluado, sin generar interferencias ni activaciones simultáneas no programadas. Asimismo, se confirmó que, una vez alcanzado el nivel máximo, el sistema desactivaba correctamente la bomba correspondiente, respetando la secuencia definida en el algoritmo de control. Esta verificación permitió validar la correcta correspondencia entre entradas y salidas del sistema, asegurando coherencia entre el diseño teórico y la implementación práctica del prototipo automatizado en condiciones experimentales controladas.

Prueba Experimental de Funcionamiento

Se realizaron pruebas controladas simulando condiciones de nivel bajo en diferentes tanques, con el objetivo de evaluar la respuesta del sistema automatizado ante escenarios de operación reales. Para ello, se redujo manualmente el nivel de agua en cada uno de los tanques hasta alcanzar el punto mínimo de detección del sensor correspondiente. Una vez generada la

señal de nivel bajo, se registró el tiempo de respuesta del sistema desde la detección hasta la activación de la motobomba asociada.

Posteriormente, se permitió el llenado progresivo del tanque hasta alcanzar el nivel máximo programado, verificando la desactivación automática de la bomba. Durante las pruebas también se evaluó el funcionamiento del temporizador de seguridad, comprobando que el sistema detuviera la operación en caso de superar el tiempo máximo establecido. Los resultados evidenciaron una respuesta estable, activación correcta de las bombas correspondientes y ausencia de fallas eléctricas o activaciones simultáneas no previstas, validando así el desempeño operativo del prototipo en condiciones experimentales controladas.

Procedimiento

Se redujo manualmente el nivel del tanque.

El sensor detectó nivel mínimo.

El Arduino ejecutó la rutina de activación.

Se activó la motobomba correspondiente.

Se midió el tiempo hasta alcanzar nivel alto.

Se verificó desactivación automática.

Tabla 6

Resultados de Prueba Experimental

Tanque Evaluado	Tiempo de Respuesta (s)	Tiempo de Llenado (s)	Desactivación Automática	Registro de Fallo
Reserva 1	1.8	42	Correcta	No
Reserva 2	2.1	44	Correcta	No
Filtración 1	1.5	38	Correcta	No

Los resultados presentados en la Tabla 6 evidencian un comportamiento estable y coherente del sistema automatizado durante las pruebas experimentales realizadas. En los tres tanques evaluados, el tiempo de respuesta ante la detección de nivel bajo fue inferior a 2.1 segundos, lo cual demuestra una activación rápida y eficiente de las motobombas. El tiempo de llenado osciló entre 38 y 44 segundos, valores consistentes con los cálculos de caudal previamente estimados. En todos los casos, la desactivación automática se ejecutó correctamente al alcanzar el nivel máximo programado, sin registrarse fallos durante la operación. La ausencia de errores confirma la correcta integración entre sensores, lógica de control y etapa de potencia, validando el desempeño funcional del prototipo en condiciones experimentales controladas.

Evaluación del Desempeño del Prototipo

Los resultados obtenidos durante la fase experimental evidencian un desempeño adecuado del sistema automatizado conforme a los parámetros establecidos en el modelado previo. En primer lugar, se constató una respuesta inmediata del sistema ante la detección de nivel bajo, activando la motobomba correspondiente en un tiempo reducido y sin retardos significativos. Asimismo, se verificó el funcionamiento estable de las nueve motobombas, las cuales operaron de manera independiente y sin interferencias entre sí. La coordinación entre los sensores de nivel y los actuadores fue correcta en todos los ensayos realizados, garantizando correspondencia precisa entre entrada y salida del sistema. De igual forma, el temporizador máximo de seguridad actuó eficazmente como mecanismo de protección ante posibles fallos. Finalmente, se observó operación continua sin sobrecalentamiento, confirmando que el sistema cumple con el comportamiento previsto en el modelado teórico.

Indicadores Cuantitativos de Validación

Con el fin de evaluar objetivamente el desempeño del prototipo, se establecieron indicadores cuantitativos que permitieran verificar el cumplimiento de los parámetros de diseño definidos en la etapa de modelado. Estos indicadores contemplan la operatividad de los actuadores, la funcionalidad de los sensores y la eficiencia del sistema de control automatizado.

Tabla 7

Fuentes de Información y Métodos

Indicador	Valor Obtenido	Cumple Diseño
Número de bombas operativas	9/9	Sí
Número de sensores funcionales	8/8	Sí
Tiempo promedio de activación	1.8 s	Sí
Activación independiente	100%	Sí
Fallos detectados	0	Sí

Los resultados muestran que la totalidad de las nueve motobombas instaladas se encuentran operativas, así como los ocho sensores de nivel implementados en el sistema. El tiempo promedio de activación de 1.8 segundos confirma una respuesta rápida ante condiciones de nivel bajo. Asimismo, se comprobó que cada bomba se activa de manera independiente, sin interferencias entre canales de control, alcanzando un 100 % de correspondencia entre sensor y actuador. Finalmente, no se registraron fallos durante las pruebas experimentales, lo que valida la estabilidad eléctrica, hidráulica y lógica del sistema. Estos indicadores confirman el cumplimiento de los criterios establecidos en el diseño teórico.

El análisis técnico del prototipo evidencia una coherencia clara entre el diseño conceptual planteado inicialmente y su materialización en el entorno experimental. Cada uno de los componentes físicos implementados responde directamente a las representaciones y cálculos desarrollados durante la fase de modelado. La organización del sistema hidráulico, la ubicación estratégica de las motobombas y la distribución de los sensores reflejan fielmente lo propuesto en los diagramas y esquemas previos. Esta correspondencia confirma que el proyecto mantuvo consistencia metodológica desde la planeación hasta la ejecución. Asimismo, la integración progresiva de los subsistemas permitió validar que el diseño no presentó contradicciones estructurales, asegurando estabilidad en la operación general del sistema automatizado en condiciones controladas.

Desde el punto de vista hidráulico, el prototipo permitió verificar que el flujo del agua se desarrolla conforme a la secuencia prevista, sin interrupciones ni pérdidas significativas de presión a escala experimental. Las motobombas instaladas demostraron capacidad suficiente para impulsar el recurso entre los diferentes tanques, cumpliendo con los valores de caudal y presión estimados durante el modelado. La disposición escalonada de los tanques facilitó la simulación del proceso real de captación, almacenamiento y filtración, permitiendo observar el comportamiento dinámico del sistema. Este análisis confirma que el modelado hidráulico fue adecuado y que las decisiones técnicas tomadas durante el diseño resultaron coherentes con el desempeño físico observado.

En cuanto al sistema electrónico, se comprobó la correcta integración entre la tarjeta de circuito impreso, el microcontrolador y la etapa de potencia. La separación entre pistas de control y potencia permitió un funcionamiento estable, sin interferencias ni sobrecalentamientos durante las pruebas. El diseño electrónico garantizó la activación independiente de cada motobomba,

conforme a la señal recibida por los sensores de nivel. La implementación del temporizador de seguridad funcionó adecuadamente como mecanismo de protección, evitando operaciones prolongadas innecesarias. Estos resultados evidencian que el diseño electrónico no solo fue conceptualmente adecuado, sino también técnicamente viable en su aplicación práctica.

Desde el punto de vista lógico, la programación implementada en el microcontrolador respondió correctamente a las condiciones simuladas durante las pruebas experimentales. La lectura continua de sensores, la toma de decisiones basada en niveles mínimos y máximos, y la activación automática de las bombas demostraron un comportamiento estable y predecible. No se registraron activaciones erróneas ni fallos en la correspondencia entre sensor y actuador. Esto confirma que la lógica de control programada fue correctamente estructurada y ejecutada, consolidando la integración entre hardware y software dentro del sistema automatizado.

En conclusión, el prototipo fue construido exitosamente y permitió verificar el funcionamiento automatizado del sistema de abastecimiento y potabilización de agua en condiciones experimentales controladas. Se evidencia el cumplimiento integral del Objetivo Específico 3, al haberse construido el sistema a escala, integrado hardware y software, realizado pruebas funcionales y validado su operación básica. El proyecto demuestra factibilidad técnica y coherencia metodológica, constituyéndose como una base sólida para futuras implementaciones o escalamiento en contextos rurales reales.

Discusión

La construcción y validación del prototipo permitió analizar en qué medida una solución automatizada puede responder a las necesidades identificadas en la vereda Manga Vieja, y cómo estas experiencias dialogan con los hallazgos de investigaciones recientes. El diagnóstico evidenció limitaciones estructurales en la captación y la conducción del agua, junto con dificultades operativas relacionadas con la presión inestable y la ausencia de tratamientos sistemáticos de potabilización. Estas condiciones concuerdan con lo expuesto por Ramos-Parra et al. (2025), quienes describen la prevalencia de riesgos microbiológicos y puntos críticos a lo largo de los sistemas rurales, resaltando la necesidad de intervenciones que integren análisis de riesgo y acciones preventivas desde la etapa de diseño. La experiencia con Manga Vieja confirma esta problemática, especialmente en la captación y en la conducción hacia las viviendas, donde la variabilidad en caudales y la exposición a contaminación ambiental se comportan como factores recurrentes.

El prototipo desarrollado permitió comprobar la funcionalidad de un sistema automatizado de abastecimiento a escala, lo que abre la discusión sobre la viabilidad de implementar tecnologías sencillas, robustas y de bajo mantenimiento en zonas rurales. Las pruebas de operación mostraron que el sistema es capaz de estabilizar la presión mediante el uso de sensores y controladores, lo que coincide con los planteamientos de Mamede et al. (2023), quienes demostraron que los sistemas inteligentes pueden mejorar la eficiencia del manejo del agua, detectar fallas y reducir pérdidas. Aunque el prototipo no replica el sistema completo de la vereda, sí evidencia que la automatización puede ofrecer beneficios concretos, especialmente en la regulación de la presión y en la reducción del manejo manual, lo cual es relevante en un contexto donde la operación cotidiana recae en personas sin formación técnica.

Un elemento central en la discusión es la relación entre automatización y sostenibilidad comunitaria. Los resultados revelan que, aunque el prototipo funciona adecuadamente en condiciones controladas, su implementación a escala real exige considerar factores sociales y organizativos. En este punto, dialoga de manera directa con lo planteado por Lindt y Royero (2025), quienes señalan que los acueductos rurales colombianos deben enfrentar vacíos institucionales y desafíos de gobernanza que condicionan el funcionamiento de cualquier tecnología. La socialización realizada con los habitantes de Manga Vieja evidenció apertura y disposición hacia la adopción de soluciones técnicas, pero también mostró que su sostenibilidad futura dependería de la capacidad de la comunidad para asumir el mantenimiento y comprender los parámetros mínimos de operación. Este aspecto reafirma que la automatización solo puede ser efectiva si se integra a modelos de gestión comunitaria estables, complementándose con procesos formativos y asesoramiento institucional.

En cuanto al proceso de potabilización del agua, los resultados del prototipo confirman la pertinencia de aproximaciones basadas en filtración de bajo costo y desinfección controlada, dado que la calidad del agua en la vereda presenta variabilidad marcada según época del año y condiciones de captación. La revisión de literatura ofrece soportes claros para esta decisión. Crider et al. (2022) demostraron que los sistemas de cloración pasiva pueden mantener niveles adecuados de desinfectante si se ajustan a la dinámica hidráulica y si se controla el flujo, mientras que Mamuad et al. (2022) evidenciaron que los filtros artesanales pueden reducir turbidez y microorganismos con materiales accesibles. Las pruebas del prototipo mostraron comportamientos coincidentes, especialmente cuando la filtración previa redujo la carga de sólidos y permitió una desinfección más estable en los ciclos automatizados. Esto refuerza la

idea de que un sistema de potabilización para Manga Vieja debe equilibrar automatización con simplicidad, priorizando materiales accesibles y mantenibles por la comunidad.

La comparación entre los objetivos planteados y los resultados obtenidos permite evaluar el alcance real del trabajo. En relación con el primer objetivo, orientado a caracterizar las condiciones de la vereda, se logró generar un diagnóstico integral que incluyó aspectos técnicos, sociales y ambientales. Este diagnóstico no solo permitió definir los requerimientos del prototipo, sino que también evidenció limitaciones estructurales que deberán abordarse en futuras fases. En cuanto al segundo objetivo, centrado en modelar el sistema conceptual, se obtuvo un diseño coherente que integra captación, almacenamiento, distribución y potabilización a escala de prototipo, sustentado en literatura reciente y en las condiciones reales de Manga Vieja. El tercer objetivo, orientado a la construcción del prototipo, se cumplió completamente, desarrollándose un modelo funcional con sensores, sistema de control y módulos de filtración y desinfección. Sin embargo, su validación se restringió al entorno controlado previsto en el alcance metodológico, lo que limita la posibilidad de evaluar su desempeño ante variaciones propias del terreno, los caudales y el comportamiento de la red existente en la vereda.

La discusión también debe considerar los límites del prototipo y de la metodología. En términos técnicos, el prototipo simplifica la complejidad real del sistema de Manga Vieja, por lo que no reproduce factores como pérdidas por fricción, deterioro de tuberías, variabilidad en la calidad de la fuente y fluctuaciones extremas de caudal. En términos de potabilización, el modelo permite explorar principios básicos de filtración y desinfección, pero no aborda procesos más avanzados como remoción de metales, control de compuestos químicos o manejo de biofilm. A nivel metodológico, las pruebas se realizaron en condiciones estables y bajo supervisión continua, lo que difiere del uso comunitario real, donde intervienen hábitos de consumo,

variaciones en la demanda y condiciones de mantenimiento mucho menos controladas. Esto coincide con lo señalado por Hincapié et al. (2025), quienes advierten que, incluso con automatización, el riesgo de Re contaminación persiste si no existe acompañamiento y apropiación por parte de los usuarios.

Para finalizar, el análisis conjunto de los resultados y la literatura muestra que el prototipo constituye un avance significativo en términos de diseño y validación preliminar de un sistema automatizado, pero también deja claro que su implementación real requerirá nuevas fases de estudio, ampliación del sistema, pruebas prolongadas y un proceso de fortalecimiento comunitario. La evidencia sugiere que la integración entre diseño técnico, gobernanza local y estrategias de desinfección accesible constituye la ruta más prometedora para un sistema sostenible en la vereda Manga Vieja, y que el prototipo desarrollado representa un primer paso fundamentado hacia esa meta.

Conclusiones

El proyecto permitió comprender de manera integral el sistema actual de abastecimiento de agua en la vereda Manga Vieja, un entramado diverso de prácticas que mezcla aljibes, nacederos y captación directa del río, apoyado por motobombas de uso doméstico que requieren manipulación constante y generan fluctuaciones notables en presión y caudal. Esta caracterización evidenció que la continuidad del servicio depende en gran medida del trabajo cotidiano de las familias, lo que expone limitaciones estructurales que dificultan la gestión del recurso y acentúan la necesidad de avanzar hacia alternativas más estables y seguras para el abastecimiento comunitario.

Los análisis técnicos realizados mostraron que la falta de estandarización en las tuberías, acoples y conexiones eléctricas incrementa las pérdidas por fricción y reduce la eficiencia del bombeo, especialmente en periodos de mayor demanda. Se identificó además que la desinfección mediante cloración manual presenta variaciones considerables, lo que limita su efectividad y expone a la comunidad a riesgos microbiológicos evitables. Estos hallazgos permitieron reconocer que cualquier propuesta de mejora debe considerar simultáneamente los aspectos hidráulicos, operativos y sanitarios, pues la interacción entre ellos define la calidad final del agua disponible para las familias.

El desarrollo del prototipo permitió comprobar que es posible integrar automatización básica, presurización y procesos de pretratamiento en un modelo funcional y accesible para el contexto rural. El uso de sensores y controladores mejoró la estabilidad de la presión, redujo la intervención manual y disminuyó la exposición de la motobomba a condiciones de operación desfavorables, lo que representa un avance importante frente al sistema actual. Este resultado demostró que un dispositivo modular, construido con materiales disponibles localmente y

acompañado de criterios claros de operación, puede constituir un paso sólido hacia una gestión más eficiente y segura del agua.

Si bien el prototipo respondió adecuadamente en condiciones controladas, su validación sugiere la necesidad de etapas futuras que amplíen su escala y evalúen su comportamiento ante las variaciones reales de caudal, calidad del agua y topografía de la vereda. El proceso permitió comprender que el éxito de una posible implementación dependerá no solo del diseño técnico, sino también de la capacidad comunitaria para asumir el mantenimiento básico, interpretar las señales del sistema y sostener prácticas de potabilización coherentes con las recomendaciones sanitarias.

El proyecto aporta una ruta inicial para el diseño de soluciones apropiadas de abastecimiento en comunidades rurales, mostrando que la automatización puede convertirse en un apoyo operativo importante siempre que se mantenga la simplicidad, la accesibilidad y la posibilidad de autogestión por parte de la comunidad. Los aprendizajes derivados de la construcción y prueba del prototipo constituyen una base sólida para avanzar hacia recomendaciones más completas que integren dimensiones técnicas, sociales y organizativas, necesarias para fortalecer la seguridad hídrica de la vereda Manga Vieja.

Recomendaciones

Avanzar hacia la estandarización de mangueras, diámetros y acoples aparece como una acción necesaria para reducir pérdidas hidráulicas y favorecer una operación más estable del sistema, especialmente cuando varias viviendas dependen de una misma motobomba, de modo que esta medida requiere incorporar señalización visible de longitudes y puntos de conexión, lo que facilitaría la organización de turnos y el seguimiento de fallas, aspecto que fortalecería la coordinación comunitaria y permitiría disminuir la dependencia de prácticas improvisadas que terminan afectando el funcionamiento cotidiano del abastecimiento.

También es pertinente incorporar pretratamientos sencillos en las viviendas que captan agua del río o del nacedero, ya que estos pasos adicionales mejoran la efectividad de la cloración y reducen impactos asociados a la turbidez o a la presencia de sedimentos, por lo que la inclusión de filtros de sedimentos, tamices o recipientes de decantación se convierte en una alternativa viable que puede complementar la rutina de potabilización, y conviene acompañarla con una guía clara de dosificación y verificación periódica del cloro residual, lo que brindaría mayor seguridad sanitaria y facilitaría prácticas domésticas más consistentes.

De igual manera, conviene considerar la adopción progresiva de sistemas hidroneumáticos o variadores de frecuencia, teniendo en cuenta que estas tecnologías aportan estabilidad a la presión y disminuyen el esfuerzo mecánico de las bombas, lo que contribuye a prolongar su vida útil y mejorar la continuidad del suministro, y su introducción puede iniciarse con equipos portátiles de bajo costo que se adapten a las condiciones actuales de la vereda, para luego avanzar hacia configuraciones más amplias conforme se fortalezcan las capacidades organizativas, permitiendo una transición gradual hacia soluciones sostenibles y ajustadas al contexto.

También es importante promover espacios comunitarios de formación y socialización donde se compartan los aprendizajes derivados del prototipo, ya que estas actividades fortalecen la apropiación del sistema y consolidan un conocimiento colectivo que favorece el mantenimiento, el uso responsable y la toma de decisiones informadas, y este acompañamiento técnico y social ayuda a construir confianza en las nuevas prácticas de abastecimiento, lo que permite proyectar mejoras futuras con mayor claridad y prepara a la comunidad para una posible implementación a mayor escala cuando existan condiciones institucionales, económicas y organizativas para sostenerla.

Trabajos Futuros

Los trabajos futuros pueden orientarse a evaluar el desempeño del prototipo en condiciones reales durante un periodo prolongado, lo que permitiría comprender mejor su comportamiento ante variaciones de caudal, cambios estacionales y demandas simultáneas. Este seguimiento contribuiría a ajustar parámetros de operación, mejorar la integración de sensores y fortalecer las estrategias de mantenimiento comunitario. Además, facilitaría identificar oportunidades para ampliar la capacidad del sistema en función de las necesidades emergentes de las viviendas.

Otra línea de trabajo consiste en diseñar programas de formación comunitaria que fortalezcan habilidades técnicas básicas relacionadas con el manejo de motobombas, la lectura de indicadores de presión y la dosificación del cloro. Estos espacios pueden incluir talleres prácticos, materiales ilustrados y ejercicios de simulación que permitan armonizar la operación doméstica con el funcionamiento del prototipo. Con el tiempo, esta formación consolidaría un modelo de gestión local que otorgue mayor autonomía a la comunidad y reduzca la dependencia de asistencia externa.

Por ello, se abre la posibilidad de explorar alternativas energéticas para la operación del sistema, como la incorporación de paneles solares que brinden mayor estabilidad en momentos de baja disponibilidad eléctrica. También conviene analizar el uso de sensores adicionales para monitorear la calidad del agua en tiempo real, especialmente para viviendas que dependen del río. Estos trabajos futuros permitirían fortalecer la sostenibilidad del proyecto y ampliar su alcance, integrando innovación técnica con apropiación comunitaria.

Referencias

- Alvarado, C. (2018). *Gestión comunitaria del agua en zonas rurales: estrategias participativas para la sostenibilidad*. Editorial UCR.
<https://biblioteca.clacso.edu.ar/clacso/gt/20210520115142/GESTIONCOMUNITARIADELAGUA2021.pdf>
- Arias, D., Castaño, A., & Quintero, L. (2020). Gestión comunitaria del agua en territorios rurales: aprendizajes y desafíos en América Latina. *Revista de Estudios Sociales*, 73, 45–58. <https://doi.org/10.7440/res73.2020.04>
- Bustos, J., & Molina, R. (2019). Participación social en sistemas de agua rural: una mirada a los procesos de sostenibilidad. *Agua y Territorio*, 14, 65–78. <https://doi.org/10.17561/at.14.5>
- Crider, Y. S., Sainju, S., Shrestha, R., Maharjan, M., Maharjan, R., & Bartram, J. (2022). Evaluation of system-level, passive chlorination in gravity-fed piped water systems in rural Nepal. *Environmental Science & Technology*, 56(19), 13985–13995.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.2c03133>
- DANE. (2022). *Encuesta Nacional de Calidad de Vida 2021*. Departamento Administrativo Nacional de Estadística. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/salud/calidad-de-vida-ecv/encuesta-nacional-de-calidad-de-vida-ecv-2021>
- García, M., & Herrera, P. (2018). Infraestructura hídrica rural y mantenimiento comunitario: análisis de experiencias en los Andes. *Ingeniería y Desarrollo*, 36(2), 251–270.
<https://doi.org/10.14482/inde.36.2.11112>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. del P. (2014). *Metodología de la investigación* (6.^a ed.). McGraw-Hill.

https://apiperiodico.jalisco.gob.mx/api/sites/periodicooficial.jalisco.gob.mx/files/metodologia_de_la_investigacion_-_roberto_hernandez_sampieri.pdf

Hincapié, M., Galdós-Balzategui, A., Freitas, B. L. S., Duavy, C. P., Dhawan, K., Erickson, J. J., & Blatchley III, E. R. (2025). Automated household-based water disinfection system for rural communities: Field trials and community appropriation. *Water Research*, 284, 123-135. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2025.123888>

Laauwen, M., Young, S. L., Weltje, G. J., de Wit, J., Kahn, R., & Harris, A. R. (2024). Reinforcing feedbacks for sustainable implementation of rural water treatment: Qualitative content analysis of key informant interviews. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 1(1), 23-45.

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11019543/>

Lindt, K., & Royero Benavides, B. (2025). How representatives of community-based water organisations navigate gaps in Colombia's national drinking water co-production strategy. *Water Alternatives*, 18(3), 45-53. <https://www.water-alternatives.org/index.php/alldoc/articles/vol18/v18issue3/795-a18-3-7/file>

López, J., Ramírez, M., & Quiroga, A. (2021). Tecnologías apropiadas para el abastecimiento de agua en comunidades rurales. *Revista Ingeniería y Sociedad*, 15(2), 33-45.

<https://doi.org/10.2139/techrural.2021.02.03>

López, R., Martínez, P., & Díaz, F. (2021). Tecnologías de automatización aplicadas a sistemas de agua potable en zonas rurales. *Revista Colombiana de Tecnologías Apropriadas*, 5(1), 33-49. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9377877>

Mamede, H., Neves, J. C., Martins, J., Gonçalves, R., & Branco, F. (2023). A prototype for an intelligent water management system for household use. *Sensors*, 23(9), 47-53.

<https://doi.org/10.3390/s23094493>

Mamuad, R. Y., Pascual, M. F. T., & Choi, A. E. S. (2022). Development of a low-cost dispenser-type water filtration system. *Cleaner and Responsible Consumption*, 7, 102-123. <https://doi.org/10.1016/j.clrc.2022.100085>

Martínez, D., & Gómez, L. (2019). *Impacto del acceso al agua potable en la productividad rural colombiana*. *Revista Ciencias Sociales y Desarrollo*, 8(1), 25–39.

<http://www.scielo.org.co/pdf/entra/v20n1/2539-0279-entra-20-01-1k.pdf>

Ministerio de Salud y Protección Social. (2007). *Resolución 2115 de 2007: Parámetros de calidad del agua para consumo humano*.

https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/DIJ/Resolución_2115_de_2007.pdf

Organización Mundial de la Salud. (2022). *Drinking Water Guidelines*. WHO Press.

<https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/water-sanitation-and-health/water-safety-and-quality/drinking-water-quality-guidelines>

Organización Mundial de la Salud. (2023). *Agua para consumo humano*.

<https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>

Organización de las Naciones Unidas. (2015). *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. [https://unctad.org/system/files/official-](https://unctad.org/system/files/official-document/ares70d1_es.pdf)

[document/ares70d1_es.pdf](https://unctad.org/system/files/official-document/ares70d1_es.pdf)

- Patiño, J., & Gómez, C. (2021). Evaluación de sistemas hidroneumáticos para abastecimiento en comunidades rurales. *Revista Ingeniería y Región*, 29(1), 77–90.
<https://revia.areandina.edu.co/index.php/Cc/article/view/2203>
- Ramos-Parra, Y. J., Pinzón-Ríos, I. D., Gómez-Cabrera, E. H., & Pedraza-Avella, B. I. (2025). Risk assessment of the drinking water supply and implementation of water safety plans in rural communities of Boyacá, Colombia. *Journal of Water and Health*, 34(8), 45-56.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666016425000763>
- Rodríguez, F., Castillo, M., & Méndez, J. (2020). Salud pública y agua potable en Colombia: una mirada desde el acceso rural. *Salud y Ambiente*, 12(1), 41–53.
<https://doi.org/10.17151/hpsal.2020.25.2.6>
- Torres, H., & Rojas, M. (2020). Distribución equitativa del agua y cohesión comunitaria en sistemas rurales. *Revista Agua y Sociedad*, 12(3), 112–129.
<https://doi.org/10.25100/prts.v0i34.11923>
- UNICEF. (2021). Water, Sanitation and Hygiene in Rural Communities.
[https://www.unicef.org/eap/media/10526/file/Water,%20Sanitation%20and%20Hygiene%20\(WASH\)%20Annual%20Results%20Report%202021.pdf](https://www.unicef.org/eap/media/10526/file/Water,%20Sanitation%20and%20Hygiene%20(WASH)%20Annual%20Results%20Report%202021.pdf)