

Diseño, construcción y automatización de un prototipo para el tratamiento de aguas grises provenientes de lavadoras

Design, construction and automation of a prototype for the treatment of gray water from washing machines

S. I. Palomino-Resendiz ^{a,*}, M. Gómez-Álvarez ^a, F. E. Hernández-Sotelo ^a, E. Meza-Sánchez ^a,
D. Peña-Benítez ^a, R. L. Palomino-Resendiz ^b

^aInstituto Politécnico Nacional - ESIME Zacatenco. Unidad Profesional Adolfo López Mateos. Av. Luis Enrique Erro S/N, Gustavo A. Madero, Zacatenco, 07738, Ciudad de México, México.

^bInstituto Politécnico Nacional - CMP+L. Av. Acueducto S/N, 07340, Ciudad de México, México.

Resumen

La gestión eficiente del agua es un reto clave ante el aumento de la demanda y la reducción de los recursos hídricos. Una estrategia relevante es el tratamiento y reúso de aguas grises provenientes de actividades domésticas, como el lavado de ropa. Sin embargo, los tratamientos convencionales requieren espacio, instrumentación y condiciones controladas, lo que puede dificultar su aplicación y generar problemas si se gestionan de forma inadecuada. Por ello, este trabajo propone el diseño y desarrollo de un prototipo de bajo costo, compacto y fácil de usar para el tratamiento de aguas grises de lavadoras, basado en principios de diseño mecatrónico. La propuesta se valida mediante pruebas experimentales con diferentes concentraciones de detergente y niveles de suciedad, permitiendo evaluar su desempeño y plantear conclusiones y líneas de trabajo futuro.

Palabras Clave: Tratamiento de aguas grises, Control y Automatización, Gestión eficiente de recursos

Abstract

Efficient water management is a key challenge in the face of increasing demand and dwindling water resources. One relevant strategy is the treatment and reuse of greywater from domestic activities, such as laundry. However, conventional treatments require space, instrumentation, and controlled conditions, which can hinder their implementation and lead to problems if managed improperly. Therefore, this work proposes the design and development of a low-cost, compact, and user-friendly prototype for treating greywater from washing machines, based on mechatronic design principles. The proposal is validated through experimental tests with different detergent concentrations and soiling levels, allowing for the evaluation of its performance and the formulation of conclusions and directions for future work.

Keywords: Greywater treatment; Control and automation; Efficient resource management

1. Introducción

En las últimas décadas, han emergido diversos desafíos relacionados con la escasez de los recursos hídricos. Lo anterior, como resultado de los efectos asociados a la mala gestión y distribución del agua, el cambio climático, la urbanización y la contaminación desmedida (Peña Ramírez, 2012). Por ello, ante este panorama, surge la necesidad de encontrar soluciones sostenibles que permitan gestionar y distribuir de manera eficiente

los recursos hídricos disponibles. Esto, con especial énfasis en reducir la demanda sobre los suministros de agua potable. A nivel mundial, algunas organizaciones han realizado múltiples esfuerzos para hacer frente a esta problemática. Entre los ejemplos más sobresalientes destaca lo propuesto por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) en la denominada **Agenda 2030 de desarrollo sostenible**, cuyo sexto objetivo se centra en garantizar la disponibilidad, gestión y saneamiento del agua

*Autor para correspondencia: spalominor@ipn.mx

Correo electrónico: spalominor@ipn.mx (Sergio Isai Palomino-Resendiz), mgomeza@ipn.mx (Miriam Gómez-Álvarez), fernandezs1702@alumno.ipn.mx (Fabián Eduardo Hernández-Sotelo), emezas1600@alumno.ipn.mx (Emiliano Meza-Sánchez), dpenab2000@alumno.ipn.mx (Diego Peña-Benítez), tpalominor@ipn.mx (Roberto Luis Palomino-Resendiz).

Historial del manuscrito: recibido el 16/07/2025, última versión-revisada recibida el 13/12/2025, aceptado el 12/12/2025, publicado el 25/03/2026. **DOI:** <https://doi.org/10.29057/icbi.v14iEspecial.15533>



(ONU, 2025). En otras palabras, sus fines resaltan la necesidad de mejorar la calidad del agua mediante la reducción de la contaminación, la minimización del vertido de químicos peligrosos y especialmente, el aumento del reciclaje y la reutilización segura del agua; ya que como se mencionó en la Conferencia de la ONU sobre el Agua en 2023 (ONU, 2023), el tratamiento de aguas grises puede proveer un recurso incalculable, capaz de mitigar los efectos del uso desmedido del agua proveniente de fuentes limpias, mismas que comunmente se destinan a tareas (domésticas o industriales) que no comprometen la salud (DERYSOL, 2025).

Las aguas grises corresponden a la solución que resulta de la combinación de detergentes, componentes orgánicos y agua. Esto, por la realización de actividades como ducha, limpieza general de inmuebles, vehículos o vajillas, lavado de ropa, riego de plantas, entre otros ejemplos (Edwin *et al.*, 2014). Es decir, que el agua no ha sido sometida a agentes químicos o contaminantes de alto riesgo. Además, su contenido fecal es mínimo o nulo, siendo lo anterior, uno de los principales indicadores que permiten diferenciarla de las denominadas aguas residuales. Por lo que, ante su parcial o total limpieza puede ser utilizada nuevamente en tareas domésticas de limpieza general, uso en la descarga para limpieza del sanitario, o bien ser empleada en tareas de limpieza o enfriamiento de equipos involucrados en procesos productivos (Raček, 2020; Li *et al.*, 2009).

En la literatura se han reportado metodologías para realizar el tratamiento de las aguas grises y se clasifican principalmente como tratamientos fisicoquímicos, biológicos, o bien una combinación de ambos (Boyjoo *et al.*, 2013; Li *et al.*, 2009). Aunque, se debe tomar en cuenta que dicha clasificación, se complementa con una subclasificación que hace mención y/o descripción del tipo de filtro que se emplea, el proceso específico que se realiza, la tecnología o instrumentos involucrados, el tipo de fuente energética (y su procedencia) que alimenta a los sistemas, entre otras cosas (Ghunmi *et al.*, 2011). También, toma gran relevancia el contexto normativo de cada lugar, pues según las leyes y procedimientos que los rigen, se aportan factores significativos que definen los procesos de diseño, fabricación, puesta en marcha y mantenimiento de los sistemas de tratamiento. Además, no debe perderse de vista el contexto social y económico de lugar, así como el conocimiento técnico de las personas que pretenden usar este tipo de sistemas, ya que eso influye en la capacidad de tratamiento de agua del sistema, y a su vez se especifican las habilidades de los potenciales operadores (Gobierno de México, 2007; Ramalho, 2021; Rojas, 2002).

En trabajos como (Leal *et al.*, 2010), (Nasr *et al.*, 2016), (Vinitha *et al.*, 2018) o (Mustafa *et al.*, 2025), se reportan sistemas de tratamiento que son asistidos por técnicas y/o tecnologías avanzadas con resultados sobresalientes. Es fácil notar, en cada alternativa la importancia, certeza y rentabilidad de este tipo de propuestas. Sin embargo, difícilmente pueden llevarse a la realidad por la complejidad, costos e idealización de los escenarios e instrumentación que requieren para funcionar de forma adecuada. Por ello, trabajos como (Anaya Meléndez *et al.*, 2022), (Sierra Mesa, 2007) o (Salazar Pérez y Parra Duarte, 2019) en los que se muestran sistemas simples, prácticos y económicos; toman mayor relevancia, pues a pesar de que en alguna de sus partes existe cierta informalidad en su diseño, todos cuentan

con la capacidad de ser adoptados fácilmente en los hogares. Esto, teniendo en cuenta que es en ese medio donde se genera la mayor cantidad de aguas grises, hasta 128 litros por cada habitante (en zonas urbanas), cada día. Lo que corresponde a la conversión del 60 al 80 % del total de agua limpia utilizada (Edwin *et al.*, 2014; Célere, 2025).

En específico, del total de agua gris que se produce en cada hogar, solo el 27 % puede ser tratada fácilmente, ya que es el resultado de actividades de lavado de ropa y puede captarse sin modificar estructuralmente las viviendas. Además, esta actividad no supone riesgos sanitarios por almacenamiento como en el caso de agua perteneciente a actividades de aseo personal, limpieza de utensilios de cocina y/o descarga sanitaria (Edwin *et al.*, 2014; Actualidad-Sanitaria, 2024; Instituto del Agua, 2024). Es decir, agua que puede contener materia orgánica en gran cantidad o materia fecal. Por ello, en términos prácticos, es fácil notar que la mayor parte de los sistemas reportados se vinculan con el tratamiento de agua gris proveniente de centros de lavado. Además, en estas tareas se considera que el agua cuenta con características similares (debido a las tecnologías y filtros que se disponen) que se ajustan a un volumen constante, que es determinado por la capacidad del centro de lavado. En otras palabras, el grado de complejidad del tratamiento se reduce y simplifica (Ho *et al.*, 2021).

Lo anterior, se verifica en (Mejía Estévez y Urcuango Conumba, 2019), (Gallegos *et al.*, 2024), (Suárez Meneses, 2021), (Umul, 2023) o (Benavente Morales, 2023); ejemplos que presentan alternativas de tratamientos de aguas grises provenientes de lavadoras, cuyos componentes emplean sistemas simples que se asisten de técnicas y/o tecnologías diseñadas bajo principios sostenibles. Donde, sin importar el caso, es evidente que su objetivo principal resalta la magnitud de sus alcances de implementación, ya que están dirigidos mayormente a zonas urbanas convencionales, o bien zonas rurales. En estos procesos, se identifican 3 etapas fundamentales: 1) Filtrado inicial, 2) Tratamiento, 3) Filtrado final y 4) Almacenamiento. En específico, en el filtrado inicial el objetivo se enfoca en retirar materia sólida como cabello, grasa, arena u otros residuos, así como realizar la decantación de sólidos pesados y flotantes. Por otra parte, en el tratamiento se introduce el mecanismo fisicoquímico, biológico o ambos, con la búsqueda de la reducción y separación de materia orgánica o compuestos químicos. También, en esta etapa existe la posibilidad de integrar procesos auxiliares asociados al acondicionamiento, desinfección y/o post-filtrado (como lo que supone la etapa de filtrado final) del agua tratada para ser transferida a un contenedor de almacenamiento.

En los sistemas mencionados, así como algunos otros (ver también (Cantor Castro, 2019), (Victoriano, 2023) o (Pérez, 2017)), puede identificarse que las propuestas se centran en el cumplimiento de su objetivo principal, es decir, el tratamiento del agua. Esto, asumiendo que el sistema y la tecnología que se dispone realizan las tareas involucradas de forma automática. No obstante, eso no ocurre todas las veces, y se torna como un factor crucial del diseño, que puede comprometer la rentabilidad. Eso, motiva a que trabajos como (Pineda Herrera, 2024), (Rincón *et al.*, 2022) o (Ibarra *et al.*, 2022) presenten esquemas que se asisten de sistemas de monitoreo y/o clasificación basado procesamiento clásico de señales, lógica difusa o inteligencia artificial (mediante redes neuronales) con el objetivo

de aumentar las capacidades de control y/o gestión del funcionamiento. Sin embargo, a pesar de ello, no existe un procedimiento o metodología clara que determine las capacidades de los elementos de composición del sistema resultante, criterios de selección, diseño integral, automatización, entre otras cosas; cabe aclarar, que esto no minimiza o demerita los resultados favorables de cada propuesta en términos del grado de limpieza del agua. Es decir, en cada opción se garantiza el cumplimiento del objetivo principal. Lo que ha llevado a convertir algunas opciones, en procesos estandarizados a los que se puede recurrir como una guía para llevar a cabo el proceso de tratamiento (Gobierno de México, 2007).

Por lo anterior y considerando que en México 2 de cada 3 hogares cuentan con un centro lavado propio (INEGI, 2021), en este trabajo se presenta una propuesta de diseño y automatización de un sistema de tratamiento de aguas grises provenientes de lavadoras. Donde, el tratamiento se ajusta a las recomendaciones de normativas y/o regulaciones vigentes. Específicamente, a través de la realización de un proceso fisicoquímico en el que se emplean filtros de sedimentos, un floculante y peróxido de hidrógeno. Lo anterior, con el objetivo de obtener agua que pueda emplearse en tareas de limpieza de sanitarios o pisos. Además, este trabajo pretende contribuir en la generación de bases que sustenten una metodología formal para el diseño de este tipo de sistemas. Esto, a través de seguimiento de los principios y filosofías de diseño de sistemas mecatrónicos como los que establece la norma VDI-2206 (Gausemeier y Moehring, 2002), o bien, esquemas similares de integración reportados en (Palomino-Resendiz *et al.*, 2023), en los que se ponderan criterios como facilidad de construcción, configuración, operación, mantenimiento, modularidad, bajo costo económico, entre otros.

Entonces, el resultado permitirá presentar al sistema como un prototipo capaz de escalarse e integrarse fácilmente a hogares localizados principalmente en zonas urbanas convencionales. Para validar numéricamente la propuesta se realizará el seguimiento de una metodología experimental que consta de pruebas y análisis de desempeño del sistema ante el tratamiento de aguas grises con diferentes concentraciones de suciedad. Esto, como resultado del lavado de diferentes tipos de ropa y sus combinaciones.

El resto del trabajo se divide de la siguiente forma: Sección 2, se presenta la definición y análisis de requerimientos y diseño del sistema. Sección 3, muestra la descripción del prototipo, el algoritmo de funcionamiento, y su integración y validación. Sección 4, brinda un análisis numérico, interpretación y discusión del desempeño del prototipo. Y, finalmente, se brindan conclusiones y trabajo a futuro.

2. Requerimientos y diseño del sistema

Para llevar a cabo la definición de requerimientos y el diseño del sistema, se siguieron los principios que rigen las fases con el mismo nombre de la norma VDI-2206 (para mayor detalle consulte (Gausemeier y Moehring, 2002)). Esto, en el entendido de que en la primera fase se busca la definición clara de la tarea u objetivo principal, así como la medida para su evaluación. Es decir, contar con la capacidad de tasar el éxito de la propuesta. Y, en la segunda fase a partir de los requerimientos,

el trabajo se enfoca en definir un concepto solución que describa las características físicas y lógicas esenciales del futuro producto.

2.1. Requerimientos

Para este caso de estudio, se establece como objetivo principal que el sistema debe ser capaz de tratar aguas grises provenientes de lavadoras, de modo que el resultado sea una solución utilizable en tareas de limpieza de sanitarios y/o lavado de pisos. De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana (NOM) 127-SSA1-2021, el agua potable, siendo el parámetro de referencia y la condición en que se distribuye en los hogares; debe satisfacer el cumplimiento riguroso de diferentes especificaciones sanitarias (consultar (NOM-127-SSA1-2021, 2022)). Sin embargo, teniendo en cuenta las futuras aplicaciones de la solución esperada, el problema se reduce al cumplimiento del valor permisible de algunos aspectos fundamentales como: 1) pH, 2) Sólidos Totales Disueltos (STD) y 3) Turbidez. Esto, debido a su relevancia práctica, su facilidad de medición, y su alineación con los procesos estándar involucrados en el tratamiento de aguas grises. Es decir, floculación, desinfección y sedimentación. Es evidente que otras variables relacionadas con la presencia de metales pesados, compuestos orgánicos volátiles, compuestos radiactivos, contaminantes emergentes, etcétera, se excluyen, dada la procedencia del agua gris. Además, es importante mencionar que, el objetivo debe llevarse bajo el seguimiento de las recomendaciones, normas y regulaciones vigentes. Por esta razón, como otro requerimiento, se establece que el sistema debe cumplir y desarrollar de forma secuencial las etapas de filtrado inicial, tratamiento, filtrado final y almacenamiento.

Con fines de aportar mayor información a los requerimientos, de modo que se beneficie el proceso de desarrollo del concepto solución, se propuso conocer y/o estimar las condiciones y características del agua gris a tratar. Esto, bajo la definición de un escenario de trabajo. Por ejemplo, se sabe que una lavadora doméstica, consume un promedio de 40 a 70 litros de agua por cada 5 a 7 Kg de ropa (ENIK, 2025). Lo anterior, en función del tipo de lavadora y las prendas, así como su grado de suciedad. Por lo tanto, como punto de partida, se establece que el sistema debe ser capaz de tratar un total de 55 litros de aguas grises, que es un valor promedio relacionado con 6 Kilogramos de ropa, mismos que se asume, corresponden al total de prendas que puede utilizar una persona cada semana. Cabe aclarar que, esto solo es una estimación, y es claro que puede variar según la edad y necesidades de cada persona, por lo que, para este valor propuesto solo se toman en cuenta prendas básicas de uso cotidiano de una persona adulta de talla promedio (DREAN, 2025).

Luego, para establecer un valor real de los parámetros de agua gris (o bien, punto de partida) y continuar con la definición de las características y capacidades del sistema, se realizó la caracterización de soluciones obtenidas por el lavado de diferentes tipos de ropa, como: interior, pantalones de mezclilla, camisetas, camisas de color, ropa de cama y sus combinaciones habituales. Por ejemplo, ropa interior y camisetas, pantalones de mezclilla y camisas de color, ropa de cama y ropa interior, pantalones de mezclilla y camisetas. Esto, sin rebasar el peso establecido. Donde, en cada caso se utilizó el mismo tipo de detergente (de adquisición comercial), en una cantidad de 100

gramos (valor sugerido en la etiqueta). En la Tabla 1, se muestran los resultados de cada ciclo de lavado y al final de cada columna su valor promedio.

Tabla 1: Valores de turbidez, pH y TDS de ciclos de lavado.

Ciclo de lavado	Turbidez [NTU]	pH	TDS [ppm]
1	1667	9.12	1071
2	1569	9.17	979
3	1655	9.45	1023
4	1792	8.7	1124
5	1380	8.85	899
6	1943	8.94	1156
7	1857	9.36	996
8	1921	8.6	752
9	1757	9.89	927
10	1539	8.75	845
Promedio	1708	9.08	977.2

Para las mediciones contenidas en la Tabla 1, se utilizó el sensor de turbidez modelo SEN0189, el sensor de pH modelo PH-4502C y para STD el sensor modelo SEN024. Los cuales, se eligieron mediante el seguimiento de los principios de selección de componentes que establece la metodología reportada en (Palomino-Resendiz *et al.*, 2023). Esto, bajo la realización de tareas de comparación y análisis de cumplimiento de los requerimientos y características que determina el caso de estudio aplicado a las opciones de instrumentos que se encuentran disponibles de forma comercial. Además, también se toman en cuenta criterios como bajo costo, fácil acceso, configuración simple, compatibilidad con sistemas de procesamiento de gama baja, conexiones simples, confiabilidad, entre otras cosas. Es importante decir que, para cada uno de los sensores fue indispensable realizar un proceso de calibración, mismo que se ajusta a las recomendaciones del fabricante. Para mayor detalle, consultar Apéndice A, Apéndice B y Apéndice C, respectivamente.

2.2. Diseño del sistema

Una vez definidos los requerimientos y las características del volumen de agua a tratar, se procede con la formalización y descripción del diseño del sistema. En la Figura 1 se presenta un esquema general de la secuencia de eventos implicados en el tratamiento. No obstante, es claro que para llevar a cabo los pasos correspondientes en cada etapa, es indispensable contar con la instrumentación adecuada, así como el sistema de gestión y control que gobierne las tareas involucradas. Por ello, en la Figura 2 se muestra un Diagrama de tuberías e instrumentación (DTI) del sistema asociado al concepto solución. En el, se especifica de manera general los componentes y su configuración que garantizan las condiciones de operación y desarrollo de cada etapa. Todos, bajo el esquema de funcionamiento de un lazo de control de flujo que gobierna la transferencia del agua gris desde su origen hasta el punto de almacenamiento. Aunque, cabe aclarar que este se asiste de otros sistemas de control que están relacionados con cada etapa. En específico, la etapa de filtrado inicial se compone de un filtro de discos y otro de tipo carbón activado. Luego, en la etapa de tratamiento, se tiene planeada la dosificación de un floculante y peróxido de hidrógeno,

ya que ambos son productos de adquisición comercial y se emplean comúnmente en las tareas de tratamiento de aguas grises. Posteriormente, en el filtrado final, se tiene otro filtro de tipo carbón activado que beneficia el proceso de limpieza de la solución mientras se transfiere al punto final de almacenamiento. En la Tabla 2, se especifica el significado de cada etiqueta (también conocido como TAG) empleada en el DTI.

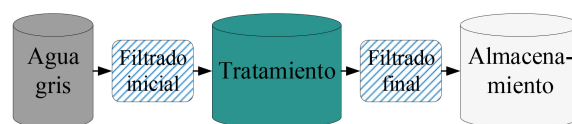


Figura 1: Esquema general de tratamiento de agua gris.

Tabla 2: Descripción de TAG para DTI.

TAG	Descripción
T-1	Tanque de tratamiento
T-2	Tanque de almacenamiento
F-1	Filtro de discos
F-2	Filtro de sedimentos
F-3	Filtro de carbón activado
XV-1A, XV-1B, XV-1C, XV-1D	Válvula solenoide
LT-1A, LT-1A	Transmisor de nivel
AT-1-A	Transmisor de pH
AT-1-B	Transmisor de turbidez
AT-1-C	Transmisor de STD
B-1, B-2	Bomba peristáltica
B-3	Bomba
FIC-100	Controlador de flujo

Otra forma de comprender el diseño del sistema, es a través del conocimiento de la filosofía de operación del concepto solución obtenido. Es decir, la explicación clara y detalla de los eventos y tareas que deben ocurrir para realizar el tratamiento del agua gris. Esto, en consideración de los instrumentos y la configuración que conservan. Lo anterior, se enlista de la siguiente forma:

- 1.- Se habilita la alimentación general de agua gris, así como el suministro eléctrico para cada componente del sistema. En este paso, se debe verificar bajo alguna rutina que todos los componentes se encuentren en línea y disponibles para sus funciones.
- 2.- Se verifica el nivel actual de T-1, y en caso de contar con condiciones adecuadas se procede con su llenado. Esto, bajo la apertura de la válvula V-1, que se localiza antes de F-1 y F-2. Por lo que, mientras el agua gris llega a T-1 esta se filtra. Además, es evidente que V-2 y V-3, siendo válvulas asociadas a tareas de desfogue, así como V-4 (válvula que impide la salida del contenido de T-1 a T-2 antes de tiempo) deben estar cerradas.
- 3.- Se cierra V-1 y se realizan mediciones iniciales del pH, turbidez y STD. Luego, se realiza la dosificación y mezclado del floculante. Lo primero, mediante un esquema de control de flujo que gobierna B-1 (localizada en el DTI a la derecha del motor del agitador) y lo segundo a

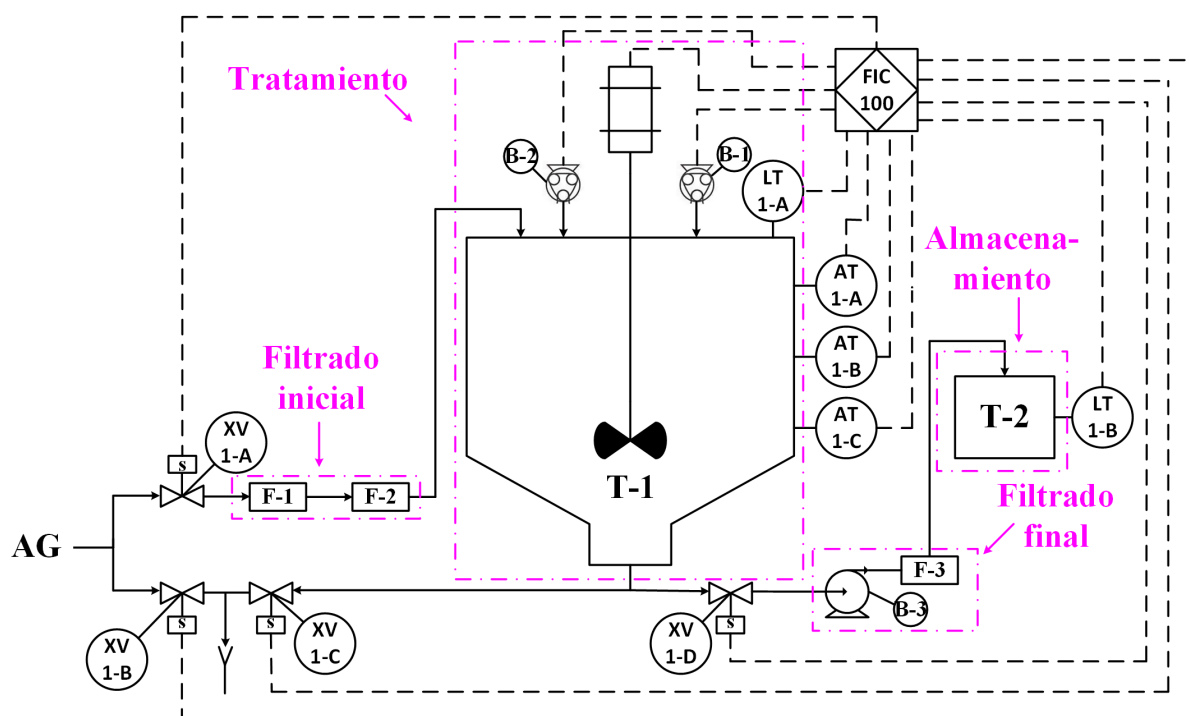


Figura 2: DTI de concepto solución.

través del encendido del agitador por un lapso específico de tiempo. Posteriormente, todo se inhabilita para dar paso a una fase de reposo que permite la aglutinación o formación de lodo con las partículas coloidales del agua gris.

- 4.- Se retiran los lodos de la solución actual a través de la apertura de V-2 por un lapso específico tiempo. Luego, una vez realizada la separación, se dosifica mediante un control de flujo en B-2 (localizada en el DTI a la izquierda del motor del agitador) el peróxido de hidrógeno. Posteriormente, se activa el agitador y nuevamente el sistema entra en reposo. Esto, para eliminar olores, reducir la carga orgánica y desinfectar el agua.
- 5.- Se realizan nuevas mediciones de pH, turbidez y TDS, y si los valores logran satisfacer el rango permisible (indicado por la NOM-127-SSA1-2021) se procede al almacenamiento. En caso contrario, se repite el proceso de tratamiento empleando una menor cantidad de floculante y peróxido de hidrógeno.
- 6.- Se da apertura a V-4, y se activa B-3 para transferir el contenido de T-1 a T-2 este lleno. Esto, sin perder de vista que el fluido pasa por F-3, desarrollando el segundo proceso de filtrado.

Es importante mencionar que, en el diseño del sistema se contó con el seguimiento de los principios de la fase correspondiente a la metodología VDI-2206. Y, para determinar los componentes se empleó el mismo procedimiento que dio lugar a la selección los sensores. Así, en el DTI, las válvulas que son idénticas y de tipo solenoide se identifican con el modelo FDP-270A. Las bombas de dosificación del floculante y peróxido de

hidrógeno son de tipo peristálticas modelo Grothen G328, ya que, para la cantidad de agua a tratar, su uso se reduce al manejo de cantidades muy bajas, que son alcanzables de forma práctica por goteo. La bomba para transferir el agua del tanque de tratamiento al de almacenamiento se identifica bajo su capacidad, que es de $800 \left[\frac{l}{h} \right]$ con una alimentación de $12 [V_{CD}]$. El agitador, se asiste de un motor de corriente directa modelo GM-751-60154. Toda la tubería es de CPVC y el microcontrolador un ATmega 2560. Y, los filtros que se emplean, dos son de tipo carbón activado modelo PP-CTO, uno al inicio del proceso y otro previo al tanque de almacenamiento, y como complemento del inicial uno de discos modelo LX2PC. Adicionalmente, con fines de monitoreo del nivel para asistir la toma de decisiones del proceso, se incluyeron en los tanques sensores de tipo ultrasónico modelo HC-SR04, y para fines de protección del ante derrames o condiciones de trabajo en vacío, interruptores de nivel. Finalmente, el floculante corresponde al concentrado de la marca @iPool con aplicaciones para limpieza de piscina y el peróxido de hidrógeno al 50 % disponible por @DOGO.

3. Descripción del prototipo: Algoritmo de funcionamiento y validación

Para construir el prototipo los esfuerzos se enfocaron en la generación de dos sistemas y su integración a través de un algoritmo general de funcionamiento. El primer sistema corresponde al contenido del DTI, mientras que el segundo, se refiere a un gabinete donde se localiza el microcontrolador, la etapa de potencia y una interfaz con fines de mando, configuración y monitoreo. Y, para validar el funcionamiento del sistema, se llevo a cabo el seguimiento de una metodología experimental que consta de la realización y análisis de desempeño del siste-

ma ante el tratamiento de aguas grises provenientes de ciclos de lavado convencionales.

3.1. Descripción del prototipo

En la Figura 3 se muestra el prototipo resultante y puede apreciarse un tanque extra, que es identificado con la letra A. Su función es la de suplir el origen del agua gris. En otras palabras, representa el contenedor de una lavadora. Por otra parte, es evidente que los tanques utilizados no corresponden con la capacidad inicial que fue estipulada (es decir, 55 litros) en la fase de definición de requerimientos y diseño del sistema. Esto, debido a que las instalaciones donde se construyó y opero el sistema cuentan con un espacio reducido y limitado. Específicamente, el Laboratorio de Sistemas Dinámicos, localizado en la Unidad ESIME Zacatenco del IPN. Además, también influye el reglamento interno del IPN, cuyos apartados limitan el manejo de energía, almacenamiento de contenedores de agua gris en espacios cerrados y/o el uso y manejo de productos químicos. Sin embargo, esto no afecta o modifica de manera significativa los resultados. En términos generales, solo representa un factor de escalamiento de 0.36 en el uso del floculante y el peróxido, ya que se reduce el tratamiento a un volumen de 20 litros. Y, respecto al resto de los componentes, no existe ningún cambio, ya que los valores siguen dentro de sus capacidades y rangos de funcionamiento.

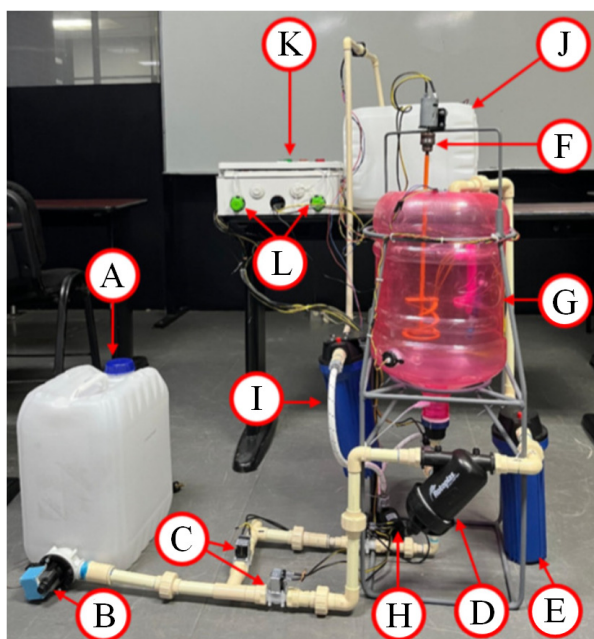


Figura 3: Sistema prototipo de tratamiento de aguas grises. En la Figura: A) Tanque de agua gris, B) Bomba de desagüe, C) Electroválvulas, D) Filtro de discos, E) Filtro de sedimentos, F) Motor con agitador, G) Tanque de tratamiento de agua, H) Bomba periférica, I) Filtro de carbón activado, J) Tanque de almacenamiento para agua tratada, K) Gabinete, L) Bombas peristálticas.

Por otra parte, en la Figura 4 se presenta la vista frontal del gabinete de control. En el que, se aprecian luces indicadoras (verde, ambar y rojo) asociadas al estado y/o funcionamiento del sistema, una pantalla y botones para arranque y paro. Luego, en la Figura 5 se tiene una vista del interior del gabinete. Donde, se observa claramente la etapa de potencia, las bombas

peristálticas, los módulos de acondicionamiento y procesamiento de señal de los sensores, y el microcontrolador.

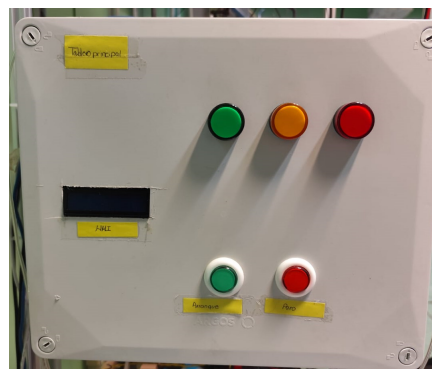


Figura 4: Vista frontal del gabinete del sistema de tratamiento de aguas grises.

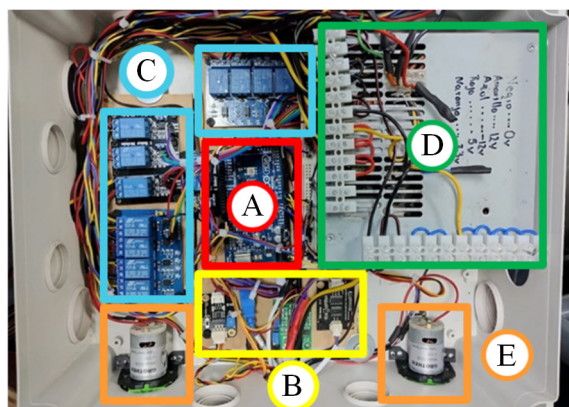


Figura 5: Vista interior del gabinete del sistema de tratamiento de aguas grises. En la Figura: A) Microprocesador ATmega2560, B) Módulos de sensores (TDS, pH, turbidez), C) Módulos de relevadores, D) Fuente de alimentación y E) Bombas peristálticas

Las tarjetas electrónicas y elementos de potencia que contiene el gabinete no cuentan con protección ante humedad o salpicaduras. Por esta razón, se tomaron medidas considerando su cercanía con las bombas persistentes. Lo anterior, a través de una instalación y distribución estratégica y el uso de carcasas selladas. Además, algunos cables fueron seleccionados con recubrimientos adecuados para ambientes potencialmente húmedos (categoría AD7). Así, se reduce el riesgo de cortocircuitos y en cuanto a los materiales estructurales del módulo, las bombas, filtros y conexiones hidráulicas, todos son resistentes a la corrosión, ya que se componen principalmente de plásticos de alta densidad y/o acero inoxidable. De ese modo, también se aseguran condiciones de durabilidad y funcionalidad a largo plazo.

3.2. Algoritmo de funcionamiento

En la Figura 6, se presenta un diagrama de flujo del algoritmo general de funcionamiento del sistema. Donde, se aprecia que todo inicia ante su arranque (por la presión del botón correspondiente localizado en el gabinete) y la ejecución de una rutina de revisión del estatus de sus componentes. Esto, a través de la realización de tareas simples con las que se verifica que existe una lectura lógica de los sensores. Además, de que las

bombas y válvulas responden a señales de activación y desactivación, ya que sus efectos modifican el valor del nivel de los tanques con los que están relacionados. Y, en caso de presentarse un falso positivo, el propio algoritmo está preparado para detectar las fallas e inducir al mantenimiento, ajuste y/o calibración. Como puede observarse, existen condicionales que limitan el número de veces en que se permite el desarrollo una tarea. Específicamente, este valor es 2 en cualquier caso, y se relaciona con el hecho de que una sola ejecución debería ser suficiente para completar el tratamiento del agua gris. En otras palabras, solo se permite que las etapas puedan ocurrir una vez más de ser necesario, pues en caso contrario, se asume un mal funcionamiento del sistema.

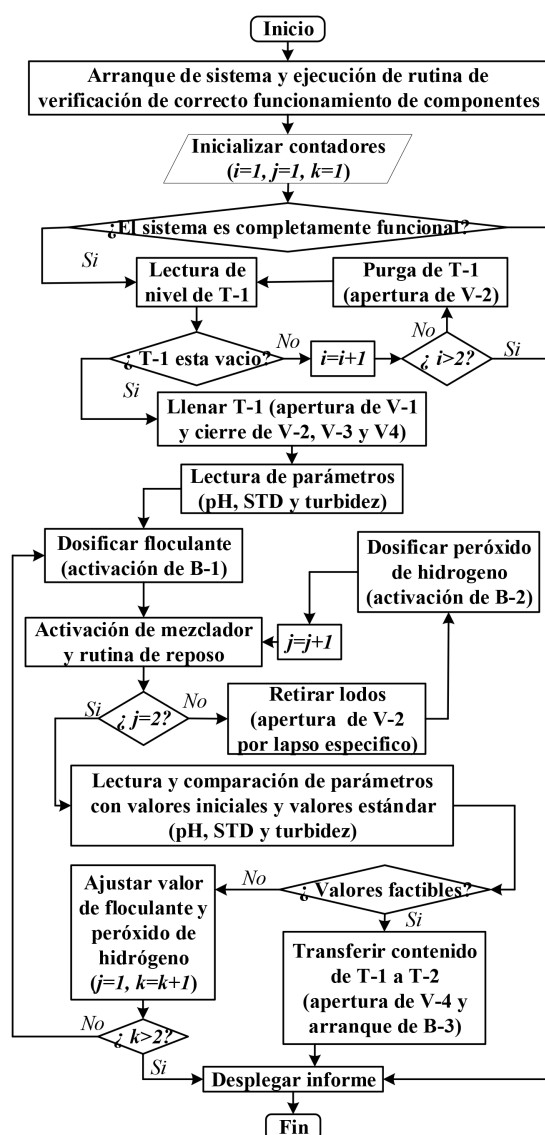


Figura 6: Diagrama de flujo de algoritmo general de funcionamiento del sistema.

Por otra parte, luego del arranque y verificación del sistema, se procede con el llenado de T-1. Para esto, además de que V-2 a V-4 se cierran, es importante mencionar que la apertura de V-1 se gobierna bajo un esquema de control de tipo On-Off, cuya forma viene dada en (1) y opera bajo una configuración de lazo cerrado con el sensor de nivel de T-1.

$$u(t) = \begin{cases} \text{On} & e > 0 \\ \text{Off} & e \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

con e como la señal de error que provoca la diferencia entre la referencia (o bien, punto de consigna) y la señal que se adquiere a través del sensor de nivel. Luego, una vez que se T-1 está lleno, y, en consecuencia, V-1 está cerrada, se procede con la lectura y generación de la base de datos del valor de los parámetros iniciales del agua gris. Posteriormente, se reafirma el estatus de cierre de las válvulas y se activa la dosificación del flocculante. En este caso, debido a que B-1 es de tipo peristáltica, es decir, que garantiza un flujo constante y regulado a su salida, se siguen las recomendaciones del fabricante para su funcionamiento bajo un esquema de control de tipo On-Off en lazo abierto. Donde, la cantidad de flujo deseado se logra transferir ante la garantía de su operación por un lapso específico de tiempo.

Posteriormente, se reafirma el estatus de cierre de las válvulas y se activa la dosificación del flocculante. En este caso, debido a que B-1 es de tipo peristáltica (es decir, que cuenta con un funcionamiento preciso debido a que permite el paso del fluido por goteo), se siguen las recomendaciones básicas del fabricante para su funcionamiento. Las cuales, se relacionan con la operación de un esquema de control de tipo On-Off en lazo abierto. En el que la cantidad de flujo deseada de flocculante se logra transferir ante la garantía de su operación por un lapso específico de tiempo. El proveedor del flocculante recomienda suministrar 1 ml por cada litro de agua (es decir, para el caso de estudio 20 ml), con un tiempo de reposo de 30 minutos a 1 hora (dependiendo las condiciones del agua). Por ello, si la capacidad de B-1 es de 80 ml/min, es evidente que el tiempo de operación se establece en 15 segundos. Luego, en el proceso de mezcla el agitador se activa por 1 minuto, mientras que el lapso de reposo consta de 1 hora. Lo anterior, con fines de homogeneizar la mezcla, y asegurar que el flocculante cuenta con el tiempo de actuación máximo recomendado.

A continuación, se retiran los lodos o aglutinado (cuya formación se da en el fondo del T-1) para proceder con la dosificación, mezcla y reposo de la solución con peróxido de hidrógeno. Lo anterior, a través de un esquema de control que gobierna la apertura de V-2 y cuya configuración es idéntica al lazo que a gobierna a V-1 en las tareas de llenado de T-1. En específico, el objetivo es retirar el 20 % del contenido del T-1. Donde, cabe aclarar que ese valor se eligió de forma heurística y experimental, al realizar de pruebas de funcionamiento del flocculante y analizar carteristas en las soluciones resultantes. De acuerdo con datos provistos por el fabricante del peróxido de hidrógeno, también se recomienda 1 ml por cada litro de agua y un tiempo de reposo de 30 minutos a 1 hora. Por ello, considerando el nuevo volumen se tiene que B-2 opera por 12 segundos y para la tarea de mezcla y reposo se repiten las mismas condiciones utilizadas con el flocculante.

Finalmente, se realiza una lectura de los parámetros de la solución resultante y se compara con los valores objetivo. Por ello, si las condiciones son factibles, se procede a la transferencia de la solución a T-2. Esto, bajo un esquema de control en lazo cerrado que gobierna B-3 y se asiste del sensor de nivel que instrumenta a T-2. Donde, la ley de control empleada es de tipo On-Off. Y, en caso contrario, se repite el proceso de trata-

miento con un ajuste de las cantidades de floculante y peróxido de hidrógeno. Lo anterior, en proporción a las necesidades que indican los valores obtenidos.

3.3. Integración: Experimentación y resultados

Para validar el prototipo se realizó una metodología experimental que consta del tratamiento individual de 5 muestras de aguas grises. Donde, cada muestra proviene del siguiente ciclo de lavado: 1) Limpieza de mezclilla, 2) Limpieza de playeras y/o camisas, 3) Limpieza de ropa de cama y/o ropa interior, 4) Limpieza de ropa interior sola y 5) Limpieza de playeras y calcetines. En la Tabla 3 se concentran los resultados, de modo que se puede comparar el estado inicial y el valor final, ya sea de forma individual, o bien como un promedio en la última fila.

Tabla 3: Resultados del proceso de tratamiento. En la Tabla, 1 corresponde a mezclilla, 2 a playeras

Muestra	pH		STD [ppm]		Turbidez [NTU]	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
1	8.85	6.92	934	234	1569	4
2	8.94	7.11	1068	302	1655	3
3	9.36	7.81	1168	338	1792	4
4	8.60	6.73	862	197	1380	2
5	9.89	8.01	1325	406	1943	4
Promedio	9.12	7.31	1071	295	1667	3.4

Con fines de visualización del sistema, en la Figura 7 se muestra al mismo en condiciones de operación. Las cuales, corresponden al desarrollo del tratamiento de aguas grises de una muestra, mientras que, en la Figura 8 se presenta el resultado de forma visual del agua obtenida de cada muestra luego del tratamiento. Adicionalmente, en la siguiente liga: [Sistema operando](#), se presenta un video en el que se puede apreciar el funcionamiento total del proceso de tratamiento de una de las muestras.

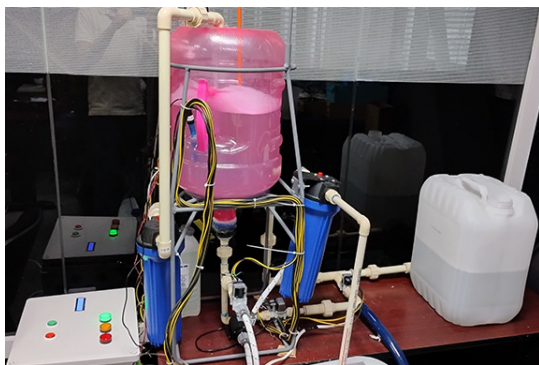


Figura 7: Ejemplo de sistema en estado de reposo durante operación y desarrollo de tarea de desinfección y clarificación por accionamiento y reacción del peróxido de hidrógeno.

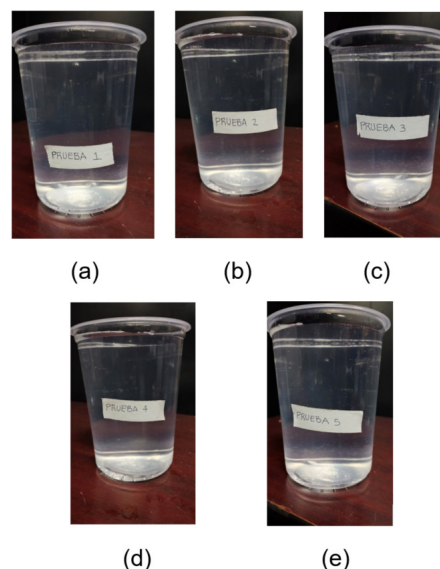


Figura 8: Resultados visuales del tratamiento de cada muestra. En la Figura, a, b, c, d y e corresponden con la muestra 1, 2, 3, 4 y 5, respectivamente

4. Análisis de resultados y discusión

De acuerdo con los resultados contenidos en la Tabla 3, es evidente que en cada uno de los parámetros se tiene una reducción significativa y cumplen de forma adecuada los objetivos de tratamiento que establece la NOM-127. Por ejemplo, en el caso de pH, del valor promedio inicial de las muestras respecto al valor final, el resultado registra aproximadamente una reducción del 20 %, con lo que se ronda un valor de 7.31, mismo que está dentro del rango permitido (es decir, 6.5 a 8.5). Por ello, se establece que este parámetro cumple dicho requerimiento satisfactoriamente. Lo anterior, inclusive tomando en cuenta el valor más alto registrado, que es de 8.01.

Por otra parte, en el caso de STD se tiene una reducción promedio aproximada de 72 %, asociado al valor de 295 ppm, el cual se ajusta al rango ideal de 0 a 300 ppm en el que se determinan algunas de las principales características del agua potable. Aunque, cabe mencionar que, dependiendo el origen del agua, la norma también establece un límite máximo de 1000 ppm para casos especiales. No obstante, vale la pena aclarar que, de acuerdo con las limitaciones del estudio y los objetivos del tratamiento, se sabe que la solución obtenida no es agua potable, y contar con este valor, solo garantiza que las aplicaciones de limpieza en que se verá aplicada la solución obtenida evite causar manchas, contar con residuos que provoquen otros efectos, o bien se afecte la eficacia de los productos de limpieza con los que pueda mezclarse.

Finalmente, en el caso de turbidez es donde se aprecia la mayor reducción, aproximadamente 99 % del valor promedio. Lo que da como resultado un valor de 3.4 [NTU] que está por debajo del límite máximo permitido (es decir, 5 [NTU]). Así, sé que considera que el agua resultante tiene la claridad y transparencia asociada al ideal apto para consumo humano. Lo cual, si bien no es fin del tratamiento, puede indicar que la solución obtenida cuenta con una baja presencia de contaminantes peligrosos, así como bacterias y/o parásitos. Por lo que, para los fines de limpieza, también aporta beneficios que se relacionan

con la disminución de contracción de enfermedades por su uso y/o contacto. Lo anterior, principalmente en las tareas de limpieza del sanitario.

5. Conclusiones

Bajo el seguimiento de los principios de las metodologías de diseño se logró el diseño, construcción y validación de un prototipo completamente funcional para la realización del tratamiento de aguas grises provenientes de lavadoras. Lo anterior, bajo la reducción del valor de tres parámetros específicos (pH, Sólidos Totales Disueltos y Turbidez) conforme lo permitido por la NOM-127. Además, se garantiza el cumplimiento de requerimientos y criterios principales definidos en el diseño del sistema, por lo que el sistema resultante es de bajo costo, fácil acceso, tiene una configuración simple, cuenta con compatibilidad con sistemas de procesamiento de gama baja, conexiones simples, confiabilidad, modularidad entre otras cosas.

Por otra parte, dadas las condiciones de diseño, el sistema es escalable, como se demostró durante su funcionamiento, por lo que, fácilmente puede ajustarse a nuevas necesidades, ya sea de menor o mayor capacidad en el tratamiento. No obstante, es claro que existen áreas de oportunidad para mejorar su diseño y/o el algoritmo de funcionamiento que lo gobierna. Por ello, se enlistan a continuación algunas propuestas de trabajo a futuro:

- Implementación de metodologías con enfoque concurrente que permitan el desarrollo de un concepto solución en el que se aborde en paralelo las diferentes etapas del proceso, ya que como puede observarse fácilmente en este caso de estudio, algunas tareas requieren de la garantía funcional u operacional de otras para dar paso la siguiente secuencia de eventos. Por ejemplo, la mezcla y reposo.
- Desarrollos de esquemas de control más sofisticados y/o con capacidades de adaptación para las diferentes tareas. De ese modo, los esfuerzos de control se ajustarán de una manera más eficiente a las necesidades, reduciendo las pérdidas de materia prima por el funcionamiento actual de tipo On-Off asociado la naturaleza que gobierna los elementos de composición del sistema.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Secretaría de Investigación y Posgrado del Instituto Politécnico Nacional bajo el proyecto SIP 20251300, La Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (CF-2023-I-1635) y el Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII) de México.

Referencias

Actualidad-Sanitaria (2024). (último acceso, 03/07/2025) <https://actualidadsanitaria.com/vida-saludable/agua-estancada-que-son-sus-peligros-para-la-salud/>.

Anaya Meléndez, F., Espinosa Descalzo, E. N., Loayza Pérez, J. E., Zamudio Castillo, R. A., y Yáñez López, M. A. (2022). Diseño de un sistema de tratamiento de aguas grises claras para reuso como agua de regadío. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 88(1):52–62.

Benavente Morales, A. E. (2023). Sistema hidráulico funcional para reutilización de aguas grises resultantes de máquinas de lavado en unidades residenciales, arequipa, Perú.

Boyjoo, Y., Pareek, V. K., y Ang, M. (2013). A review of greywater characteristics and treatment processes. *Water science and technology*, 67(7):1403–1424.

Cantor Castro, J. P. (2019). Evaluación de especies nativas y sustratos mejorados en paredes verdes para el tratamiento de aguas grises en la ciudad de Bogotá.

Célere, V. (2025). (último acceso, 03/07/2025) <https://www.viacelere.com/blog/reutilizacion-aguas-grises-en-el-hogar/>.

DERYSOL (2025). (último acceso, 03/07/2025) <https://market2b.mx/Portal/ComoVender/126/tratamiento-de-aguas-grises>.

DREAN (2025). (último acceso, 03/07/2025) <https://blog.drean.com.ar/como-calcular-el-peso-de-la-ropa/>.

Edwin, G. A., Gopalsamy, P., y Muthu, N. (2014). Characterization of domestic gray water from point source to determine the potential for urban residential reuse: a short review. *Applied Water Science*, 4:39–49.

ENIK (2025). (último acceso, 03/07/2025) <https://enik.es/cuantos-litros-de-agua-consume-una-lavadora-en-cada-lavado/>.

Gallegos, A. G., López, C. A. V., Ramírez, E. B. H., y Ruiz, C. B. G. (2024). El mucílago de nopal: un floculante natural para tratar aguas grises del hogar. *Cienciacierta*, 20(80 Especial):316–330.

Gausemeier, J. y Moehring, S. (2002). Vdi 2206-a new guideline for the design of mechatronic systems. *IFAC Proceedings Volumes*, 35(2):785–790.

Ghunmi, L. A., Zeeman, G., Fayyad, M., y van Lier, J. B. (2011). Grey water treatment systems: A review. *Critical reviews in environmental science and technology*, 41(7):657–698.

Gobierno de México, S. (2007). Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Públicos*.

Ho, K. C., Teow, Y. H., Sum, J. Y., Ng, Z. J., y Mohammad, A. W. (2021). Water pathways through the ages: Integrated laundry wastewater treatment for pollution prevention. *Science of the Total Environment*, 760:143966.

Ibarra, L. A. R., Castillo, P. A. H., Montelongo, S. A. S., y Vallejo, R. V. (2022). Monitoreo para sistema de clasificación de agua residual doméstica empleando node-red. *Revista ELECTRO*, 44(1):7–13c.

INEGI, G. d. M. (2021). (último acceso, 03/07/2025) <https://www.gob.mx/conuee/acciones-y-programas/servicios-energeticos-lavado-y-secado-de-ropa>.

Instituto del Agua, I. (2024). (último acceso, 03/07/2025) <https://institutodelagua.es/aguas-residuales/sistema-de-recoleccion-de-aguas-residuales>.

Leal, L. H., Temmink, H., Zeeman, G., y Buisman, C. J. (2010). Comparison of three systems for biological greywater treatment. *Water*, 2(2):155–169.

Li, F., Wichmann, K., y Otterpohl, R. (2009). Review of the technological approaches for grey water treatment and reuses. *Science of the total environment*, 407(11):3439–3449.

Mejía Estévez, I. G. y Urcuango Conumba, C. Y. (2019). Propuesta de tratamiento de aguas grises provenientes de duchas y lavabos para su reutilización en inodoros. B.S. thesis, Quito, 2019.

Mustafa, M., Epelle, E. I., Macfarlane, A., Cusack, M., Burns, A., y Yaseen, M. (2025). Innovative approaches to greywater micropollutant removal: AI-driven solutions and future outlook. *RSC advances*, 15(16):12125–12151.

Nasr, M., Ateia, M., y Hassan, K. (2016). Artificial intelligence for greywater treatment using electrocoagulation process. *Separation Science and Technology*, 51(1):96–105.

NOM-127-SSA1-2021, N. O. M. (2022). Norma oficial mexicana nom-127-ssa1-2021, agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua.

ONU (2023). (último acceso, 03/07/2025) <https://www.unwater.org/news/summary-proceedings-un-2023-water-conference>.

ONU (2025). (último acceso, 03/07/2025) <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/development-agenda/>.

Palomino-Resendiz, S. I., Ortiz-Martínez, F. A., Paramo-Ortega, I. V., González-Lira, J. M., y Flores-Hernández, D. A. (2023). Optimal selection of the control strategy for dual-axis solar tracking systems. *IEEE Access*, 11:56561–56573.

Peña Ramírez, J. (2012). Crisis del agua en monterrey, guadalajara, san luis potosí, león y la ciudad de méxico (1950-2010). *México, DF: UNAM-Universidad Intercultural*.

Pérez, J. A. M. (2017). Viabilidad financiera de un sistema hidrosanitario con reutilización de aguas grises en complejos multifamiliares en Portugal. Tesis de Máster, Universidade do Minho (Portugal).

Pineda Herrera, J. L. (2024). Diseño de un prototipo de sistema de tratamiento de aguas grises con monitoreo IoT (Internet de las cosas) con el propósito de mejorar las condiciones del agua para su reutilización.

- Raček, J. (2020). Gray water reuse in urban areas. *Management of Water Quality and Quantity*, pp. 195–217.
- Ramalho, R. S. (2021). *Tratamiento de aguas residuales*. Reverté.
- Rincón, D. C. D., Baquero, M. N. M., Baquero, J. E. M., y Umaña, L. A. R. (2022). Design of an automated system for water re-use from washing machine diseño de un sistema automatizado para reutilización del agua de lavadora.
- Rojas, R. (2002). Sistemas de tratamiento de aguas residuales. *Gestión integral de tratamiento de aguas residuales*, 1(1):8–15.
- Salazar Pérez, J. A. y Parra Duarte, J. S. (2019). Evaluación de la eficiencia técnica y económica de un sistema de recolección, tratamiento y reúso de aguas grises obtenidas del uso de la lavadora, para el conjunto multifamiliar icaro, tipo vivienda de interés social (vis), ubicado en la localidad de usme, bogotá.
- Sierra Mesa, J. F. (2007). Tratamiento y reutilización de aguas grises en proyectos de vivienda de interés social a partir de humedales artificiales.
- Suárez Meneses, P. J. (2021). Macizo-sistema de recuperación de aguas grises para uso doméstico.
- Umul, E. R. P. (2023). Evaluación de un sistema de tratamiento de agua gris domiciliar a base de filtros múltiples. *Agua, Saneamiento & Ambiente*, 18(2):ículo–e1521.
- Victoriano, A. J. B. (2023). *Análisis del Potencial de Reutilización de Aguas Grises Domésticas en Zonas Urbanas de Chile Como una Alternativa de Adaptación Frente a los Escenarios de Estrés Hídrico Nacional*. Tesis doctoral, Universidad de Concepción.
- Vinitha, E., Mansoor Ahammed, M., y Gaddekar, M. R. (2018). Chemical coagulation of greywater: modelling using artificial neural networks. *Water Science and Technology*, 2017(3):869–877.

Apéndice A. Ajuste y calibración de sensor de pH

El sensor de pH cuenta con un módulo externo que está directamente relacionado con las tareas de ajuste y calibración. Su objetivo, es la configuración de la posición de un potenciómetro que instrumenta al sensor. Lo anterior, mientras se realiza la lectura de soluciones de referencia (también conocidas como soluciones buffer), que se obtienen ante la mezcla con 250 ml de agua destilada. Lo anterior, considerando que el espacio donde se realiza cuenta con un ambiente controlado y una temperatura cercana a los 25 °C. En total, el fabricante provee 3 muestras y sus valores son 4.01, 6.86 y 9.18, respectivamente. En la Figura A.10 se muestra que la lectura de pH corresponde con el tipo de muestra.



Figura A.9: Ajuste y calibración de sensor de pH con soluciones de referencia.

Adicionalmente, es importante mencionar que el sensor de pH dispone de un módulo que sirve de interfaz para su conexión con el microcontrolador. De modo que, las lecturas se convierten parte una señal eléctrica que usualmente se analiza en su componente de voltaje, que está acotada en valores de 0 a 5, por el estándar de funcionamiento del microcontrolador. La cual, se construye conforme al tiempo de muestreo (en este caso 0.001

segundos). Por ello, es necesario generar un esquema de ajuste o escalamiento. En la Tabla A.4 se muestran los resultados en unidades de voltaje correspondientes a cada muestra. Donde, cabe mencionar que, por cada caso, el valor de voltaje es el promedio de 1000 lecturas. En la Figura A.10 se tiene una propuesta de ajuste, a través del uso de la herramienta polyfit de Matlab. Lo anterior, bajo el desarrollo de un esquema de regresión lineal simple sobre la curva obtenida. Lo anterior, también con fines de suaviza la evolución. Así, la forma final del valor efectivo (pH_{eff}) del sensor de pH viene dado como:

$$pH_{eff} = -9,6546 * ph_x + 40,539$$

con ph_x , provisto por la lectura del sensor empleando un puerto analógico del microcontrolador.

Tabla A.4: Valores promedio de voltaje respecto a muestras de pH.

Lectura promedio de sensor [V]	Valor muestra de pH
3.76	4.01
3.53	6.86
3.23	9.18

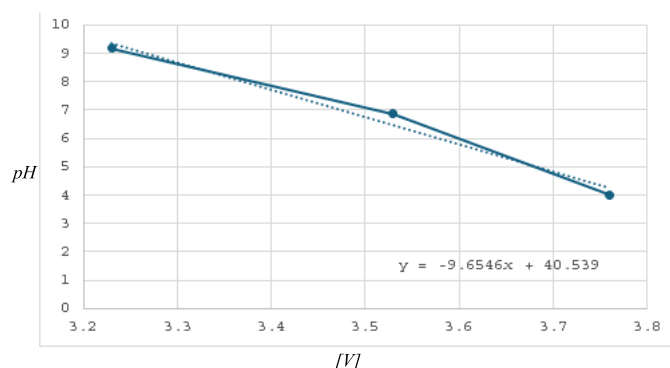


Figura A.10: Ajuste y calibración de sensor de pH con soluciones de referencia.

Apéndice B. Ajuste y calibración del sensor de STD

El sensor de STD, se calibra ante el uso de una solución de referencia (también conocida como solución buffer) que provee el fabricante, cuya composición es de 500 ppm para un volumen de 60 ml de agua destilada. Su configuración es simple, y solo consta de ajustar el valor de lectura conforme a lo esperado. Además, este modelo cuenta con librerías pre programadas para diversos microcontroladores. Por lo que, la adquisición y procesamiento de la señal se simplifica y no requiere de ningún procesamiento personalizado. En la Figura B.11 se muestra el sensor y su módulo de configuración.

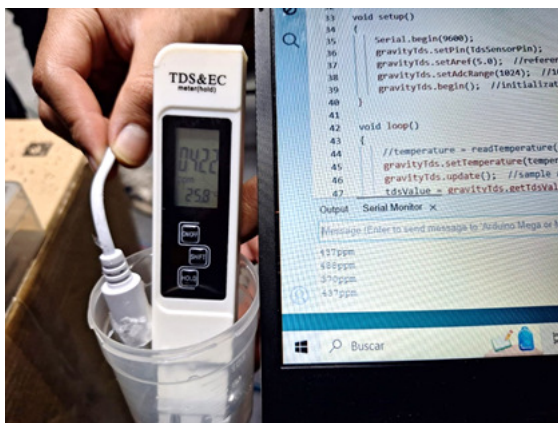


Figura B.11: Ajuste y calibración de sensor de STD.

Apéndice C. Ajuste y calibración del sensor de turbidez

El principio de funcionamiento del sensor de turbidez se basa en la medición directa de luz. Por ello, es evidente que, cuanto más limpia esté el agua, mayor será la cantidad de luz que llega al sensor, y viceversa, cuando el agua está más turbia o contaminada, se detecta menos luz. Por ello, para calibrar el sensor, y a su vez garantizar y homogeneizar las condiciones de funcionamiento, se recurrió al desarrollo de una configura-

ción que se ajusta a las recomendaciones del fabricante. Esto, a través de la integración de una lámpara (ver Figura C.12) y la normalización de la señal adquirida por el microcontrolador mediante la siguiente ecuación:

$$NTU_{eff} = -1120,4 * NTU_x^2 + 5742,3 * NTU_x - 4352,9$$

con NTU_x , provisto por la lectura del sensor empleando un puerto analógico del microcontrolador.



Figura C.12: Sensor de turbidez y lámpara.