



“OPTIMIZACIÓN Y AUTOMATIZACIÓN DE PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LAVANDERÍA”

TESIS

Para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS (ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE)

Presenta:

Daniel Miranda Cruz

Matricula:

2213801115

Correo de contacto:

damicmail@gmail.com

Director:

Dra. Judith María de Lourdes Cardoso Martínez

Jurado

Presidente: Dr. Oscar Armando Monroy Hermosillo

Secretario: Dr. Antonio Zoilo Marquez Garcia

Vocal: Dr. Mario Alberto Vazquez Peña

Iztapalapa, Ciudad de México, a 15 de agosto del 2025

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	1
---------------------	----------

ABSTRACT	2
-----------------------	----------

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN.....	3
--------------------------------------	----------

CAPITULO 2: JUSTIFICACIÓN	8
--	----------

2.1	Antecedentes	9
2.2	Planteamiento del problema.	13
2.3	Causas del problema	14
2.4	Consecuencias del problema	14
2.5	Aportes esperados	15
2.6	Objetivos	16
2.6.1	General	16
2.6.2	Específicos.....	16
2.7	Hipótesis	16

CAPÍTULO 3: MARCO TEÓRICO.....	17
---------------------------------------	-----------

3.1	Mecanismo de detergencia	18
3.2	Tratamiento de aguas residuales	19
3.2.1	Sedimentador	20
3.2.2	Coagulación-floculación	20
3.2.2.1	Prueba de jarras	22
3.2.3	Adsorción-filtración	23
3.2.3.1	Carbón activado	24
3.2.3.2	Zeolita.....	25
3.2.4	Radiación ultravioleta	26
3.3	Normativa sobre tratamiento	27
3.4	Automatización	28
3.4.1	Nivel de automatización.....	29
3.4.2	PLC - Controlador Lógico Programable	30
3.4.3	HMI - Interfaz Humano Maquina	31
3.4.4	Programación	31
3.4.5	Entradas y salidas	32

CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA.....	33
-------------------------------------	-----------

4.1	Planta de tratamiento	34
4.1.1	Influente.....	34
4.1.2	Lavado de ropa	34
4.1.3	Tratamiento preliminar	37
4.1.4	Tratamiento primario.....	38
4.1.5	Prueba de jarras.....	41
4.1.6	Tratamiento terciario	43
4.1.7	Efluente	44
4.1.8	Medición de parámetros	44
4.2	Instrumentación de control	47
4.2.1	Elección de hardware.....	50
4.2.1.1	PLC.....	50
4.2.1.2	Módulos expansión.....	50

4.2.1.3	HMI.....	51
4.2.1.4	Fuente alimentación.....	52
4.2.1.5	Contactores.....	52
4.2.1.6	Sensor de nivel	53
4.2.1.7	Botonera.....	54
4.2.1.8	Software y programación	55
4.2.1.9	Cableado	56
4.2.1.10	Conexión PLC y HMI.....	57
4.2.1.11	Conexión de botonera	59
4.2.1.12	Conexión de contactores.....	59
4.2.1.13	Conexión de sensores de nivel	60
4.2.1.14	Simulación.....	61

CAPÍTULO 5: RESULTADOS Y DISCUSIONES..... 62

5.1	Tipo de detergente.....	63
5.2	Dosis de coagulante y floculante	64
5.3	Mediciones individuales.....	66
5.3.1	pH.....	66
5.3.2	Sólidos Disueltos Totales	68
5.3.3	Demanda Química de Oxígeno	70
5.3.4	Turbidez.....	72
5.4	Eficiencia de tratamiento	74
5.4.1	Grado de contaminación del agua	74
5.4.2	Grado de depuración del agua.....	75
5.5	Comparación entre parámetros.....	75
5.5.1	pH y Turbidez	76
5.5.2	pH y Sólidos Disueltos Totales	76
5.5.3	pH y Demanda Química de Oxígeno	77
5.5.4	Demanda Química de Oxígeno y Turbidez	78
5.5.5	Demanda Química de Oxígeno y Sólidos Disueltos Totales	79
5.5.6	Turbidez y Sólidos Disueltos Totales	80
5.6	Cinética de sedimentación	81
5.7	Programación de PLC.....	82
5.8	Programación de pantalla HMI	88

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... 95

6.1	Conclusiones.....	96
6.2	Recomendaciones	97

BIBLIOGRAFÍA..... 99

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Establecimientos ubicados en la Ciudad de México durante el año 2017.....	5
Tabla 2	Normativa referente al agua en México.....	27

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Mecanismo de detergencia.	18
Figura 2 Mecanismo de coagulación-floculación.	21
Figura 3 Equipo para prueba de jarras.	22
Figura 4 Filtro para adsorción.	23
Figura 5 Carbón activado.	25
Figura 6 Zeolita.	26
Figura 7 Lámpara de luz ultravioleta.	27
Figura 8 Niveles de automatización.	30
Figura 9 Esquema general de planta de tratamiento.	35
Figura 10 Proceso de lavado.	36
Figura 11 Proceso de secado de ropa.	36
Figura 12 Recibimiento de agua gris.	37
Figura 13 Llenado de tolva para floculación.	38
Figura 14 Formación de flóculos en la tolva.	39
Figura 15 Separación manual de flóculos.	40
Figura 16 Elaboración de prueba de jarras.	42
Figura 17 Filtros y luz UV.	43
Figura 18 Tanque para agua tratada.	44
Figura 19 Multiparámetro HI98194.	45
Figura 20 Turbidímetro T100.	45
Figura 21 Multiparámetro COD HI83399 y termo reactor HI 839800.	46
Figura 22 Esquema general de procesos.	48
Figura 23 Diagrama de flujo de planta de tratamiento.	49
Figura 24 PLC S7-1200 1214 DC/DC/RELÉ.	50
Figura 25 Módulo de expansión SM 1221.	51
Figura 26 HMI TP700 CONFORT.	51
Figura 27 Fuente de alimentación 78.2E.	52
Figura 28 Contactor DIL M12-10.	53
Figura 29 Sensor de nivel tipo c.	53
Figura 30 Pulsador M22-DR y Contacto M22-KC.	54
Figura 31 Botonera M22-I6.	54
Figura 32 Software TIA Portal V16.	55
Figura 33 Lenguaje de programación escalera.	56
Figura 34 Conexión de PLC y HMI.	57
Figura 35 Esquema del cableado general.	58
Figura 36 Conexión botonera.	59
Figura 37 Conexión contactor.	60
Figura 38 Conexión sensor nivel.	60
Figura 39 Programación y simulación HMI.	61
Figura 40 Variación del pH por el detergente.	63
Figura 41 Variación de la Turbidez por el detergente.	64
Figura 42 Dosis óptima de floculante.	65
Figura 43 Valores de pH al final de cada tratamiento.	67
Figura 44 Valores de pH durante en cada etapa de tratamiento.	67
Figura 45 Valores de TDS al final de cada tratamiento.	69

Figura 46 Valores de TDS durante cada etapa de tratamiento.	69
Figura 47 Valores de DQO al final de cada tratamiento.	71
Figura 48 Valores de DQO durante cada etapa de tratamiento.	71
Figura 49 Valores de Turbidez al final de cada tratamiento	73
Figura 50 Valores de Turbidez durante cada etapa de tratamiento.	73
Figura 51 Grado de contaminación del agua	74
Figura 52 Grado de depuración del agua.	75
Figura 53 Comparación de pH y Turbiedad durante el tratamiento.	76
Figura 54 Comparación de pH y TDS durante el tratamiento.	77
Figura 55 Comparación de pH y DQO durante el tratamiento	78
Figura 56 Comparación de Turbidez y DQO durante el tratamiento.	79
Figura 57 Comparación DQO y TDS durante el tratamiento	80
Figura 58 Comparación de Turbidez y TDS durante el tratamiento.	80
Figura 59 Cinética de sedimentación.	81
Figura 60 PLC: entradas y salidas.	82
Figura 61 Network 1: programa general PLC	84
Figura 62 Network 2: eventos de llenado	86
Figura 63 Network 3: eventos coagulación - floculación	87
Figura 64 Network 4: encendido de lámpara.	87
Figura 65 Configuración de pantallas en HMI	88
Figura 66 Pantalla 1: página principal	89
Figura 67 Pantalla 2: información general.....	90
Figura 68 Pantalla 3: instrucciones	90
Figura 69 Pantalla 4: planta de tratamiento.	91
Figura 70 Pantalla 5: tratamiento preliminar	92
Figura 71 Pantalla 6: tratamiento primario	93
Figura 72 Pantalla 7: tratamiento terciario.	94

RESUMEN

Para cubrir la necesidad de desarrollar tecnologías responsables con la sociedad y el medio ambiente esta investigación ofrece una alternativa de tratamiento de aguas residuales de lavandería. Se desarrolla un prototipo escalable de planta de tratamiento en donde se consiguió tratar y reutilizar el agua residual de lavado hasta en tres ocasiones. Con ayuda de un biopolímero derivado de la quitina y una sal inorgánica a base de hierro se trató el agua residual con un proceso fisicoquímico de coagulación-floculación y sedimentación. Acompañando el proceso con una etapa de desinfección que incluye filtro de zeolita, carbón activado y lámpara UV se obtuvo agua para reúso en el lavado de ropa. Se utilizó una lavadora comercial donde se lavó en 16 ocasiones diferentes tipos de ropa. Para el lavado inicial se utilizó agua potable y los siguientes lavados fueron con agua tratada. Se realizaron tres tratamientos a un mismo volumen de agua y se obtuvo en promedio un 95% de remoción de sólidos suspendidos logrando una recuperación del 82% de agua de manera directa. La cinética de sedimentación mostró que en 12 minutos se clarifican 820 litros de agua floculada. Los parámetros que se analizaron durante cada etapa de tratamiento fueron el pH, TDS, DQO y turbidez.

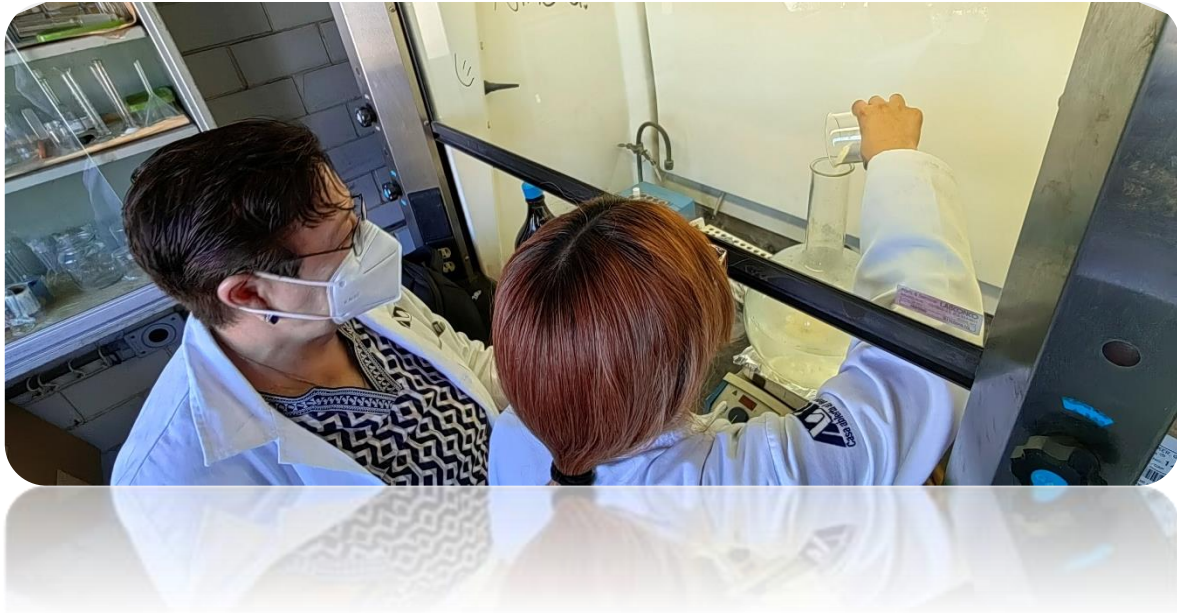
Con el objetivo de optimizar la operación de la planta de tratamiento y reducir la carga física y sensorial sobre el personal, se implementó un sistema de automatización basado en un PLC y una pantalla HMI. Esta integración permite supervisar y controlar en tiempo real cada etapa del proceso. A través de la instrumentación con pulsadores, sensores de nivel y contactores, se configuró un programa automático que gestiona el encendido y apagado de bombas, así como la emisión de alertas. El sistema permite operar tanto de forma automática como manual, mediante una botonera o incluso directamente desde la pantalla HMI.

ABSTRACT

To address the need to develop socially and environmentally responsible technologies, this research offers an alternative for treating laundry wastewater. A scalable prototype treatment plant was developed that successfully treated and reused laundry wastewater up to three times. Using a chitin-derived biopolymer and an iron-based inorganic salt, the wastewater was treated with a physicochemical coagulation-flocculation and sedimentation process. Disinfection with a zeolite filter, activated carbon, and a UV lamp was used to obtain water for reuse in laundry. A commercial washing machine was used to wash different types of clothing 16 times. Potable water was used for the initial wash, and subsequent washes were performed with treated water. Three treatments were performed with the same volume of water, achieving an average of 95% removal of suspended solids and a direct recovery of 82% of the water. Sedimentation kinetics showed that 820 liters of flocculated water were clarified in 12 minutes. The parameters analyzed during each treatment stage were pH, TDS, COD, and turbidity.

To optimize the operation of the treatment plant and reduce the physical and sensory burden on personnel, an automation system based on a PLC and an HMI display was implemented. This integration allows for real-time monitoring and control of each stage of the process. Through instrumentation with pushbuttons, level sensors, and contactors, an automatic program was configured to manage pump on and off, as well as the issuance of alerts. The system can be operated both automatically and manually, using a keypad or even directly from the HMI display.

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN



El incremento en la población es el principal estresante del ciclo hidrológico afectando directamente a la cantidad disponible de agua dulce en los cuerpos de agua y muy alarmantemente a los cuerpos subterráneos. Los problemas actuales a los que se enfrenta la sociedad con la disponibilidad de agua ya no se limitan únicamente a un tema de cantidad de agua, lamentablemente ya son también un tema de calidad de agua que cada vez va empeorando. Las actividades antropogénicas están afectando indirectamente la calidad del agua, pero en muchas otras ocasiones no se es consciente de las afectaciones y el impacto que producen los desechos, pero no se hace algo al respecto.

En México, la industria de lavanderías ha aumentado más del 100% en 18 años, al pasar de 19,158 establecimientos en 2003 a 40,194 en 2021, este incremento significativo también representa un aumento considerable en la demanda de agua requerida para las actividades de lavado. La industria de lavanderías presentó otro indicador de crecimiento al pasar de 3.7 millones de pesos constantes (sin incluir el efecto de la inflación) en el 2003 a 7.5 mil millones de pesos constantes en 2019, representando un incremento promedio anual de 4.6 por ciento. Un aspecto para destacar es que a pesar de que 2020 fue un año difícil por la severa caída de la producción por cuestiones de la pandemia de COVID-19, para el año 2021 las empresas continuaron creciendo. Las cinco entidades federativas más importantes por el número de establecimiento de lavanderías y tintorerías son la Ciudad de México, Estado de México, Jalisco, Veracruz y Puebla que suman el 49.9% del total nacional. (INEGI, 2022)

A nivel nacional el consumo de agua cada año por parte de la industria es del 4.8% (4.7 mil hm³) con relación al volumen de agua total (89.80 miles de hm³) utilizado en el país. (CONAGUA, 2024) Este porcentaje representa un incremento del 38.81% respecto en el volumen utilizado en el año 2012. (CONAGUA, 2022) Se debe entender que todo el volumen descargado de aguas residuales provenientes de usos no municipales (incluyendo la industria) es de 226.21 m³/s, de los cuales reciben tratamiento de algún tipo únicamente el 25.66% del volumen (58.11 m³/s). (CONAGUA, 2023)

La Ciudad de México (CDMX) tiene un suministro total de agua potable de 29.3 m³/s al día; el 43% proviene de 478 pozos activos y del Sistema Lerma-Cutzamala 43% del consumo total, 27% del Sistema Cutzamala y 16% del Sistema Lerma respectivamente

(SACMEX, 2023). El Sistema Lerma-Cutzamala representa volúmenes de importación que ya están viviendo una amenaza por las bajas precipitaciones. El agua subterránea que se obtiene por medio de los pozos activos padece una sobre explotación que se refleja en las profundidades cada vez mayores de extracción para obtener el recurso.

La manera en que se interactúa con el recurso hídrico en la Ciudad de México todavía representa un reto por la falta de información clara, precisa y confiable. La ausencia de una estadística oficial pertinente son las carencias que se tienen en la mayoría de los estados del país. Para tratar de tener información que pueda reflejar la situación con el agua después de ser utilizada, al menos en el año 2017 en la CDMX se emitieron dos documentos: un registro de descargas y un reporte de plantas de tratamiento. En la Tabla 1 se presenta a manera de resumen información relevante publicada por la Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México.

Tabla 1 Establecimientos ubicados en la Ciudad de México durante el año 2017

		REGISTRO DE DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES DE LA CIUDAD DE MÉXICO 2017				REPORTE DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES 2017		
TIPO/USO		NUMERO DE ESTABLECIMIENTOS FIJOS REGISTRADOS	CONSUMO DE AGUA [hm ³ /año]	NUMERO DE DESCARGAS AGUA RESIDUAL	VOLUMEN DESCARGA [L/s]	NUMERO DE PLANTAS DE TRATAMIENTO	TRATAMIENTO DE AGUA [L/s]	VOLUMEN REUSO [L/s]
INDUSTRIAL:	Elaboración de cerveza, fabricación de cartón, elaboración de botanas, fabricación de jabones y detergentes, elaboración de lácteos y sus derivados.	1074	4.08	1396	-	88	224.1	91.5
	COMERCIO: Tiendas de autoservicio y centros comerciales.	960	2.82	1094	-	37	21.3	9.8
	SERVICIO: Clubes y centros deportivos, centros recreativos, alquiler de oficinas y locales comerciales.	4064	18.37	4606	-	148	213.2	95.8
TOTAL		6098	25.27	7096	1101.0	273	458.6	197.1

Nota: La información corresponde a 6,098 establecimientos registrados en la Licencia Ambiental Única de la CDMX y es publicada por la Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México.

Trabajando un poco con la información publicada en la Tabla 1, resalta de manera preocupante y alarmantemente que del volumen de descarga de agua residual (1,101 L/s) únicamente recibe tratamiento el 41.65% (458.6 L/s). También se debe poner mucha atención a la cantidad de plantas de tratamiento existentes (273 plantas) respecto al número de

establecimientos (6,098 establecimientos) registrados por que únicamente el 4.47% trata sus aguas residuales. Las estrategias para fomentar el reúso del agua no han tenido éxito; del volumen tratado (458 L/s) únicamente el 42.97% (197.1 L/s) son reutilizadas por que existe todavía una barrera cultural e incluso ideológica para su empleo.

Dados los antecedentes se plantea ofrecer una alternativa de reúso de agua residual producto de las actividades de lavado con ayuda de un proceso fisicoquímico llamado coagulación-floculación-sedimentación (C-F-S), acompañado de un tratamiento de desinfección apoyado de un conjunto de filtros y utilizando UV para dejar el agua tratada en calidad aceptable para poder reutilizarla; respetando la NOM-003-ECOL-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público.

Para caracterizar el agua tratada se desarrolla también un monitoreo de los principales parámetros fisicoquímicos de calidad de agua: pH, Sólidos Disueltos Totales (TDS), Turbidez y Demanda Química de Oxígeno (DQO). Se espera poder seguir reutilizando la misma agua tratada hasta llegar a un punto crítico, en donde ya no se pudiera utilizar, y destinarla para otra actividad que precise de agua de menor calidad como el riego, lavado de autos o incluso descargar al mismo alcantarillado; siempre cumpliendo con la NOM-002-ECOL-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.

La necesidad de conseguir un desarrollo urbano sostenible va de la mano con la preocupación respecto al uso del agua exigiendo a la sociedad la existencia de una gestión sostenible que cuente con soluciones reales y eficientes, principalmente en los procesos de potabilización de agua y tratamiento de aguas residuales. La mayoría de las plantas de tratamiento de agua ejecutan sus actividades de control de forma manual, lo cual aumenta los costos de operación y da lugar a errores humanos. La automatización de cualquier proceso tiene como finalidad disminuir los costos de operación y mejorar los estándares de calidad en el producto final; lamentablemente es poco el desarrollo que se ha logrado en la automatización de los procesos de tratamiento de aguas. La mayoría de las plantas cuenta con algún grado de automatización con un controlador lógico programable (PLC) sencillo para operaciones pequeñas e instrumentos de medición, pero no se realiza una supervisión ni

almacenamiento de las variables del proceso, perdiéndose toda esta información (Mena Martínez et al., 2020).

Una de las desventajas de las plantas de tratamiento de aguas residuales es la necesidad de personal calificado, por lo que también se diseña un sistema de control automático de procesos mediante un PLC. Este tipo de tecnologías pueden controlar y monitorear el curso del proceso de tratamiento de aguas residuales en tiempo real, facilitando y reduciendo considerablemente las exigencias en los operadores. Para conseguir la tecnificación en la planta de tratamiento se diseñó una interfaz para monitorear niveles y controlar los motores de la planta, entre otras condiciones de campo sin tener que estar directamente en la planta de tratamiento. De manera sistemática, esta investigación instrumenta diversos dispositivos, sensores, controladores, Interfaces Hombre Máquina, todos ellos orientados al desarrollo de la industria de tratamiento de aguas residuales provenientes de lavandería. Resaltando la ventaja de esta tecnología al poder ser implementada en otros sistemas de tratamiento para negocios que consumen mucha agua como son: autolavados, restaurantes, sistemas de riego, etc.

CAPITULO 2: JUSTIFICACIÓN



2.1 Antecedentes

Para poder abordar esta investigación fue necesario seguir dos caminos que parecieran ser diferentes, pero al final convergen en un fin común: uno es el tratamiento de aguas residuales de lavandería y el segundo es la automatización con controladores lógicos programables. En la actualidad hasta donde sabemos, no hay informes en la literatura sobre la aplicación de un proceso combinado de este tipo para el tratamiento de aguas residuales de lavanderías industriales. Las investigaciones sobre tratamiento existentes se basan en propuestas de tratamiento de las aguas de lavandería a nivel laboratorio y posterior escalamiento, mientras que las investigaciones de automatización se basan únicamente en la instrumentación.

Para comprender el tratamiento de aguas residuales de lavandería debemos saber la forma en que funciona el proceso de lavado. Cada molécula de detergente tiene una parte formada por una cadena hidrocarbonada de naturaleza hidrofóbica que repele el agua; y una pequeña cabeza polar cargada negativamente de naturaleza hidrofílica que se disuelve en el agua. La parte hidrofílica es atraída por las moléculas de agua mientras que la hidrofóbica es repelida por el agua quedando atraída por la suciedad y con el tiempo, más y más moléculas de detergente se acumulan alrededor de la suciedad, formándose una micela. Una vez que la suciedad es removida de las prendas el resultado es agua residual con alto contenido de partículas finas en suspensión llamadas coloides que difícilmente pueden sedimentar. La estabilidad de los coloides es proporcionada por las cargas electrostáticas que poseen en la superficie, generalmente negativas, que actúa de forma repulsiva cuando se aproximan entre sí, impidiendo la aglomeración para una posible sedimentación posterior. El proceso de Coagulación-Floculación tiene la función de desestabilizar a los sólidos suspendidos en el agua e inducir el agrupamiento de partículas finas. En el primer paso, la coagulación, se desestabilizan los coloides por neutralización de sus cargas. Posteriormente, en la floculación, se forman como resultado de la adherencia entre partículas coaguladas aglomerados de mayor tamaño, con volumen y peso suficiente para que puedan sedimentar.

Es importante conocer el origen de las aguas residuales porque son la base para el diseño y monitoreo de plantas de tratamiento. Lamentablemente con mucha frecuencia las comunidades rurales, hoteles y gasolineras en zona de carretera no cuentan con servicio de

alcantarillado haciendo obligatorio utilizar plantas de tratamiento. Tratar de monitorear el funcionamiento correcto en la depuración de sus aguas residuales no es tarea sencilla. Para hacer la tarea de supervisión se implementó en China un sistema de control automático basado en PLC para realizar tareas desatendidas, a distancia y automáticas. Consiguieron la operación automática del proceso con 4 controladores en una planta de tratamiento existente con capacidad de 500 m³/d. Se instrumentó una laguna de oxidación, unos discos biológicos giratorios y lecho filtrante biológico; Realizando la función de control remoto automático y control de funciones desatendidas por el operador, lo que mejoró suficientemente el nivel de tratamiento y gestión de aguas residuales en las zonas rurales (Yang et al., 2015).

La India es un país que tiene mucha presencia cuando se habla de temas de automatización de procesos en plantas de tratamiento ya que en ocasiones algunas instituciones ya cuentan con su propia planta de tratamiento. La preocupación es automatizar sus propios procesos de depuración sin intervenir con el diseño. En 2016 comprobaron que el módulo de control puede funcionar satisfactoriamente y que el proceso se puede operar en modo automático de acuerdo con la filosofía de depuración. Implementaron supervisión, control y adquisición de datos (SCADA) con HMI y PLC en una planta de tratamiento. Los componentes principales fueron unas rejillas para detener basuras mayores. Un tratamiento biológico con dos reactores uno anaerobio y otro aerobio. Para finalizar la depuración terminan con un filtro de arena antracita y uno de carbón activado. Los resultados que arrojaron los sensores fueron: reducción de demanda química de oxígeno de 1,000 ppm a valores menores de 100 ppm y el pH se logró mantenerlo sin variaciones importantes (Rachana R., 2016). Para el año 2017 lograron mejorar la productividad de una planta de potabilización implementando el uso de PLC y SCADA. El agua purificada obtenida se destinaba en función del pH para fines domésticos o agrícolas y así limitar la escasez de agua ya que se puede lograr un uso eficiente del líquido. La automatización se realizó en tres tanques, en el primero se realizaba un filtrado y sedimentación; en el segundo se llevaba a cabo la cloración y en el tercero una oxidación. El desarrollo de esta tecnología reveló el estado de operación del proceso, permitiendo monitorear y rectificar los errores si los hubiera de forma inmediata (Hiray et al., 2017).

En Brasil para el año 2019 algunos investigadores se enfocaron en estudiar el efluente de una lavandería industrial a nivel laboratorio con un tiempo de contacto requerido de 10

horas. La propuesta iniciaba en una etapa primera de coagulación, floculación y sedimentación. Una segunda etapa de adsorción con carbón activado y reforzando con una tercera etapa con una microfiltración por membranas. Lo que resultó en una eficiencia de eliminación del 80% para Demanda Química de Oxígeno, 92.9% para tensioactivos y 99,4% para turbidez. (Kuo Huang et al., 2019). En el mismo año en Ecuador, se intentaba conseguir alternativas nuevas para el coagulante-floculante más utilizado: el sulfato de aluminio (alumbre). Las principales desventajas del uso de alumbre es la presencia de aluminio residual en el agua que se ha asociado con trastornos en la salud de los consumidores. Por tanto, se plantea la posibilidad de reemplazar el sulfato de aluminio con biopolímeros no tóxicos un derivado del quitosano. Se encontró que el biopolímero en concentraciones de 8 ppm ocasiona un 19,7% de disminución en la turbidez del agua cruda; a esta misma concentración, el sulfato de aluminio incrementaba la turbidez del 19,3%. Pero el aspecto más importante es que se puede sustituir el producto químico por un producto natural, que se obtiene de los residuos de la producción camaronera nacional. (Rosero & Suárez Heredia, 2019). En Perú, enfocaron la investigación de tratamiento de las aguas residuales de las lavanderías de centros de salud, por las consecuencias que puede generar la presencia de contaminantes importantes derivados del uso de biosanitarios, citotóxicos, restos de heces. La investigación realizada persiguió reducir los contaminantes y parámetros fisicoquímicos principales, para ello se realizaron 20 ensayos con la muestra en cada ensayo de 20 litros de agua residual de lavandería. Mediante la tecnología la oxidación fotocatalítica con dióxido de titanio (TiO_2) y Luz Ultravioleta (UV) los resultados obtenidos están relacionados con la concentración del TiO_2 y el tiempo de recirculación de dos horas. Se encontró una máxima eficiencia de mejoramiento en la calidad de las aguas residuales respecto al DQO del 34.21% sin la presencia de H_2O_2 (peróxido de hidrógeno) y una máxima del 35.27% con presencia de H_2O_2 (Tolentino Castillo et al., 2019).

A pesar de los estragos de la pandemia de COVID-19, en México para el año 2021 se revisaba la instrumentación presente en una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) situada en el municipio de Tlalnepantla de Baz. El objetivo era sugerir los cambios pertinentes en caso de necesitarlos, para que se optimice el proceso y se puedan operar los procesos de depuración de manera autónoma. La investigación inició como parte de la realización de prácticas profesionales en la PTAR ubicada en Tlalnepantla de Baz y culminó

como un trabajo para la obtención de grado académico. Aquí se observó la deficiencia en la instrumentación utilizada en las instalaciones, sin embargo, por cuestiones de confidencialidad fue negada mucha información que pudiera permitir la realización de un trabajo más amplio y completo (Gasca Santoyo & Vallejo García, 2021).

En el año 2023, en Perú se evaluó la efectividad del filtro de grava, sulfato de aluminio y carbón activado en la eliminación de detergentes de aguas residuales urbanas de la ciudad de Cajamarca. Los investigadores realizaron la caracterización del agua residual urbana y el monitoreo para pH y turbidez. La muestra fue obtenida de una lavadora industrial. Concluyendo que el filtro de grava, sulfato de aluminio y carbón activado, es efectivo para eliminar el 98,51% de la turbidez. El diseño experimental estuvo compuesto por: 1,000 ml de aguas residuales doméstica, 1,000 ml de agua residual domestica con filtro de grava y carbón activado, 1,000 ml de agua residual domestica con filtro de grava, sulfato de aluminio y carbón activado (Vera-Zelada et al., 2023).

El uso de aguas grises como fuente alternativa de energía y agua reduce el consumo de muchos recursos resultando una herramienta eficaz para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU. Lamentablemente las tendencias en las investigaciones sobre recuperación y reciclaje de aguas grises indica que se trata de campos en desarrollo con una escasa cooperación entre diferentes universidades, especialmente en el campo de la recuperación de energía de aguas grises. También existen lagunas de investigación importantes que requieren atención inmediata que se traduce en un área de oportunidad para futuras investigaciones. La mayoría de las investigaciones de aguas residuales grises presentan una tendencia a centrarse en su calidad y opciones de tratamiento, lamentablemente las cuestiones técnicas, hidráulicas, políticas o sociales suelen pasar a un segundo plano. También hay que señalar que la mayoría de los artículos de revisión sobre este tema se publicaron hace varios años, por lo tanto, no se tienen los últimos resultados de investigación ni los desarrollos más recientes. Las investigaciones realizadas en el ámbito del reciclaje de aguas grises son considerablemente mayores que el de las investigaciones sobre recuperación energética de aguas grises. Muchas investigaciones se desarrollan principalmente en países de América del Norte y Europa con un enfoque al aprovechamiento energético, estas regiones se preocupan más en la protección del medio ambiente y los aspectos climáticos. Por otro

lado, las investigaciones sobre las oportunidades de ahorro de agua se llevan a cabo en países más pobres, incluidos los que sufren escasez de agua (Kordana-Obuch et al., 2023).

2.2 Planteamiento del problema.

En el año 2021 en México se tenían registradas más de 40 mil lavanderías que año con año crecen a una tasa del 4.6%, incluso con la pandemia de COVID-19 esta industria no dejó de crecer. La falta de información precisa y confiable sobre el consumo de agua real en estos establecimientos obliga a desarrollar investigación para poder dimensionar el impacto que se tiene sobre la presión hídrica. En este sentido una maquina lavadora sencilla con capacidad de 20 kg, en promedio consume 160 litros de agua en su ciclo completo de lavado y enjuague utilizando 45 minutos. Estos datos para una lavandería pequeña situada en cualquier esquina en un barrio popular con horario estimado de operación de 8:00 am a 08:00 pm sería capaz de realizar hasta 16 ciclos de lavado al día por lavadora. Visto de otra manera, una sola lavadora de 20 kg en una lavandería en 12 horas de trabajo puede consumir hasta 2,560 litros diarios. Pero una lavandería chica en promedio cuenta dentro de sus instalaciones con al menos 4 máquinas semejantes, lo que representaría un consumo hasta 10,240 litros de agua al día.

La cantidad de 3,809 plantas de tratamiento de aguas residuales industriales en el país apenas alcanza la capacidad para sanear el 25.66% ($58.11 \text{ m}^3/\text{s}$) del total ($226.21 \text{ m}^3/\text{s}$) que se generan el país. En la mayoría de los casos las plantas operan con tecnología obsoleta y carece de recursos para un mantenimiento adecuado. Estamos en un punto crítico por las decisiones y acciones que se tomen sobre temas de saneamiento de agua que marcarán la disponibilidad en los próximos años. La normativa sobre agua vigente en el país representa un avance para reducir el deterioro de ríos, lagos y acuíferos. Pero para su aplicación se requerirá de una mejora de las plantas de tratamiento existentes y la instrumentación de nuevas tecnologías en las próximas a construir. Con la transformación digital, el sector de tratamiento de aguas residuales se verá obligado a tecnificarse para abordar de manera más eficiente y sostenible los desafíos asociados con la gestión de aguas residuales.

Con todo este panorama se deja claro que urge atender el estrago por el que los entes gubernamentales e industriales están atravesando: Bajo Volumen de Tratamiento.

2.3 Causas del problema

Para atender las causas y conseguir aumentar los volúmenes de tratamiento de aguas residuales en la industria se debe entender que es un problema multifactorial que involucra una fuerte inversión de adquisición inicial, personal calificado para el diseño de la planta, personal capacitado para la operación de la planta, infraestructura para las instalaciones, disposición de los tomadores de decisión, percepción social en el reúso de agua, entre otras muchas cosas. Por esta razón se carece de plantas de tratamiento en óptimas condiciones para poder depurar las aguas, en muchos casos las plantas que operan están mal diseñadas. Por ello en esta investigación serán atendidas un par de causas: diseño de planta de tratamiento de aguas residuales con una tecnología sustentable automatizada factible para ser utilizada aún en negocios pequeños.

2.4 Consecuencias del problema

La consecuencia directa que afronta la población en la actualidad es la baja disponibilidad en los volúmenes de agua para consumo humano, sumado a una mala calidad en el poco suministro del vital líquido disponible.

Cuando no se atiende el bajo porcentaje de tratamiento de las aguas residuales, la industria de lavado ocasiona un incremento de nutrientes en los cuerpos de agua produciendo un aumento importante de algas y de malos olores por la aportación de grandes cantidades de fósforo, hierro y nitrógeno. La descarga de detergentes forma en los cuerpos de agua una película en la superficie que disminuye el intercambio de oxígeno con la atmósfera afectando a todo tipo de organismos acuáticos. Las afectaciones de los detergentes y otros surfactantes se han encontrado en el suelo e incluso en aguas subterráneas.

El rezago tecnológico ocasiona que las decisiones que se toman de manera errónea o que no se toman pueden hacer que se sufran las consecuencias por muchos años. Sumado a la super especialización que se vive, urge se instrumenten tecnologías de vanguardia para reducir las exigencias al personal. A pesar de que México ocupa el sitio 16 como economía en el mundo, es lamentable que no figure en la lista de los primeros 20 países del índice global de innovación. Por eso urge estar a la altura del avance tecnológico.

Es evidente el hecho de no atenderse las causas sufriremos más el problema de abastecimiento, principalmente porque se está empleando agua potable en las actividades de lavado. Pero también las plantas depuradoras no tienen personal calificado especializado dando como resultado que sean mal operadas. Estos factores hacen que exista una disminución considerable en los volúmenes disponibles para abastecimiento público urbano.

2.5 Aportes esperados

Esta investigación busca generar una propuesta técnica replicable que permita comprender y aplicar la instrumentación de una planta de tratamiento de aguas residuales generadas en lavanderías y otros negocios con alto consumo hídrico. Se plantea el diseño de un sistema compacto, eficiente y automatizado, capaz de operar con mínima intervención humana y sin requerir personal altamente especializado, lo cual facilita su implementación en contextos comerciales reales.

Asimismo, se espera identificar con precisión los procesos unitarios que conforman el tren de tratamiento, con el objetivo de establecer un esquema de automatización adaptable, que optimice la operación, reduzca costos y asegure la calidad del agua tratada para su posible reúso, contribuyendo así a una gestión más eficiente y sostenible del recurso hídrico en el sector servicios e industrial.

2.6 Objetivos

2.6.1 General

Optimizar y automatizar una planta de tratamiento de aguas residuales de lavandería con la calidad necesaria para su reúso.

2.6.2 Específicos

1. Optimizar las operaciones unitarias que conformarán el tren de tratamiento.
2. Evaluar los parámetros en cada etapa del tratamiento.
3. Calcular el porcentaje de remoción en cada tratamiento.
4. Reutilizar el agua tratada nuevamente en el lavado.
5. Elegir un controlador lógico programable para automatizar los procesos unitarios.
6. Establecer un diagrama de flujo general de las operaciones unitarias a realizar en una planta de tratamiento.
7. Instrumentar un programa de control para monitoreo de planta de tratamiento.

2.7 Hipótesis

1. La combinación de un proceso fisicoquímico de coagulación-floculación-, seguido de un tratamiento terciario con zeolita, carbón activado y radiación UV, permite reducir los niveles de pH, turbidez, TDS y DQO en el agua residual de lavandería, hasta niveles que cumplen con la NOM-003-SEMARNAT-1997 para su reúso.
2. Es posible reutilizar el agua tratada al menos en tres ciclos de lavado sin pérdida significativa en la calidad del agua, logrando una remoción superior al 90% de sólidos suspendidos y una recuperación mayor al 80% del volumen tratado.
3. La automatización del proceso mediante un PLC, sensores de nivel, pulsadores, contactores y una interfaz HMI, permite operar la planta de tratamiento con mínima intervención humana, asegurando un control eficiente, seguro y replicable para otros negocios con alto consumo hídrico.

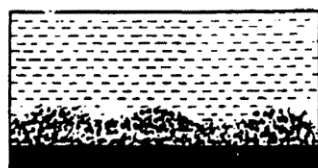
CAPÍTULO 3: MARCO TEÓRICO



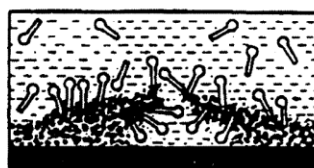
3.1 Mecanismo de detergencia

Conocer la forma en que trabaja un detergente para realizar su acción limpiadora es de gran ayuda para poder identificar el tipo de contaminante que se pretende remover del agua una vez afectada la calidad por el mismo proceso de lavado. Algunos investigadores especializados en problemas de fisicoquímica interfacial opinan que debe considerarse utópica la pretensión de elaborar una teoría general de la detergencia. Lo más conveniente es considerar como específico y aislado cada tipo de problema deterativo, estudiando separadamente la perspectiva técnica, sanitaria, energética, económica y ecológica de cada uno en cada uno de los estudios. Al momento de remover la suciedad de las prendas se han identificado tres elementos esenciales que intervienen en el proceso deterativo: El primero es el material sólido que ha de limpiarse (ropa), al cual se le designa como sustrato. El segundo componente son las materias extrañas unidas al sustrato que han de eliminarse durante el proceso deterativo, la suciedad. El tercer elemento es el medio que se utiliza para separar la suciedad de la ropa. Casi siempre este medio, llamado baño de lavado o simplemente baño, está formado por una o varias fases líquidas, a las cuales se incorpora, en la mayoría de los casos son disoluciones acuosas de un detergente (Gómez Herrera, 1996).

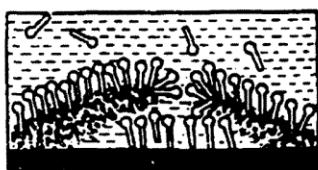
Figura 1 Mecanismo de detergencia.



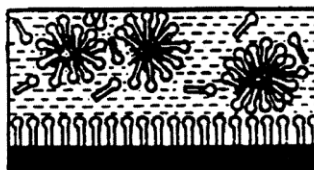
Sustrato sucio en
contacto con agua



El baño moja la suciedad



El baño moja el sustrato y
separa la suciedad



El baño evita la redeposición

Cada molécula de detergente se compone de 2 partes: una formada por una cadena hidrocarbonada de naturaleza hidrofóbica que repele el agua y una pequeña cabeza polar cargada negativamente de naturaleza hidrofílica que se disuelve en el agua. El proceso de limpieza de una superficie consta de tres fases, humectación, emulsión y enjuague. La parte hidrofílica es atraída por las moléculas de agua mientras que la hidrofóbica es repelida por el agua, pero atraída por la suciedad. Cuando las moléculas de detergente entran en contacto con la suciedad, la parte no polar de dichas moléculas queda atraída por la suciedad y con el tiempo, más y más moléculas de detergente se acumulan alrededor de la suciedad, formándose una micela. Al agitar el agua, estas micelas acaban desprendiéndose de la superficie de la ropa y pasan a la solución por la carga de las cabezas de las moléculas de detergente, el exterior de la micela está también cargada y como todas estas micelas tienen la misma carga, se repelen entre sí y permanecen suspendidas en el agua eliminadas cuando se enjuaga la ropa y se drena el agua. Después de repetidos enjuagues, las micelas han desaparecido y la ropa queda limpia.

3.2 Tratamiento de aguas residuales

Las aguas residuales son aquellas que por influencia de actividades antropogénicas cambiaron su calidad original y precisan de un mejoramiento en sus condiciones físicas, químicas y microbiológicas. Para garantizar la disposición de agua de buena calidad se utilizan las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR). Aquí se debe asegurar el mejoramiento del agua residual para poder verterla a cuerpos de agua naturales, en el alcantarillado o incluso para reúso en las actividades cotidianas e industriales como en lavanderías, autolavados y sistemas de riego.

En el tratamiento de aguas residuales se pueden identificar algunos procesos u operaciones unitarias empleadas que se han desarrollado y que a la fecha continúan en mejoramiento para incrementar la eficiencia de remoción de contaminantes: el primario, el secundario y el terciario. En el tratamiento primario se agrupan las operaciones del tipo físico para eliminar sólidos en suspensión y materiales flotantes, en el tratamiento secundario los procesos biológicos de asimilación de la materia orgánica y el tratamiento terciario o tratamiento avanzado se ha aplicado a las operaciones y procesos utilizados para eliminar contaminantes no

removidos por el tratamiento primario o secundario (Vanegas Forero, 2019). En muchos casos se puede agregar un cuarto tratamiento denominado tratamiento preliminar o pretratamiento que cumple la función de protección eliminando los sólidos grandes y arenas que pudiera afectar o intervenir en el tratamiento siguiente.

Uno de los aspectos más desafiantes al momento de diseñar una planta de tratamiento es conocer los distintos tipos de tratamiento de agua para poder determinar aquellos procesos que formaran parte del tren de tratamiento que se seguirá para lograr el mejoramiento de la calidad de los efluentes. También es importante tener conocimientos técnicos y experiencias prácticas que sustentaran la selección y análisis de los procesos de tratamiento. (CONAGUA, 2019)

3.2.1 Sedimentador

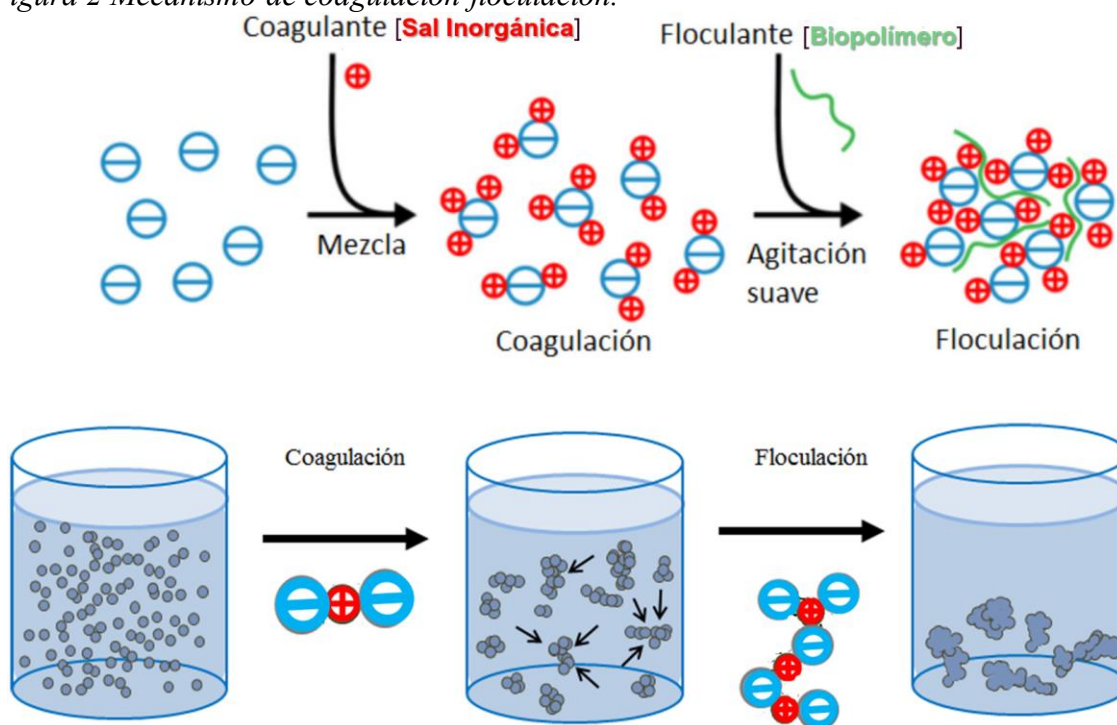
La sedimentación es un proceso muy importante en el tratamiento de aguas que siempre está presente durante todas las etapas de tratamiento y no necesariamente va después de un tratamiento específico. Esta operación unitaria física aprovecha la fuerza de la gravedad para separar los sólidos en suspensión más densos que el agua y depositarlos en el fondo del sedimentador. La sedimentación será más eficaz en presencia de tamaños y densidades de partículas grandes, que garantizan la existencia de velocidades mayores de sedimentación (Rodríguez Fernández-Alba et al., 2006).

3.2.2 Coagulación-floculación

El agua residual industrial producto de las actividades de lavado son conocidas como aguas grises formada por materia en suspensión de partículas de muy pequeño tamaño (10^{-6} – 10^{-9} m) llamadas coloides. La principal característica de las suspensiones coloidales es que suelen ser muy estables por las interacciones eléctricas entre partículas provocando una velocidad de sedimentación extremadamente lenta por lo que haría inviable un tratamiento mecánico clásico (Rodríguez Fernández-Alba et al., 2006).

La coagulación-floculación es un proceso importante en el tratamiento de agua residual al ser una operación directa que se caracteriza por un diseño simple que mejora la eficiencia de remoción con un bajo consumo energético (Najlae Zaki et al., 2023). La duración de la reacción es muy rápida y puede tomar décimas de segundo en donde se llevan a cabo dos procesos, uno químico (coagulación) y uno físico (floculación).

Figura 2 Mecanismo de coagulación-floculación.



La coagulación es el proceso de neutralizar la carga eléctrica en las partículas suspendidas en el agua mediante la adición de productos químicos consiguiendo que las partículas se aglomeren formando flóculos que son partículas más grandes y pesadas. La floculación se lleva a cabo con una agitación lenta posterior a la coagulación para favorecer el crecimiento del flóculo y facilitar así la operación de sedimentación. Los aspectos importantes para que se realice un proceso exitoso y con una alta eficiencia son: elegir la dosis óptima de coagulante y floculante, las propiedades de los flóculos formados, la velocidad y tipo de agitación, temperatura y el pH al cual se llevará a cabo el proceso (Mejía-Marchena et al., 2023).

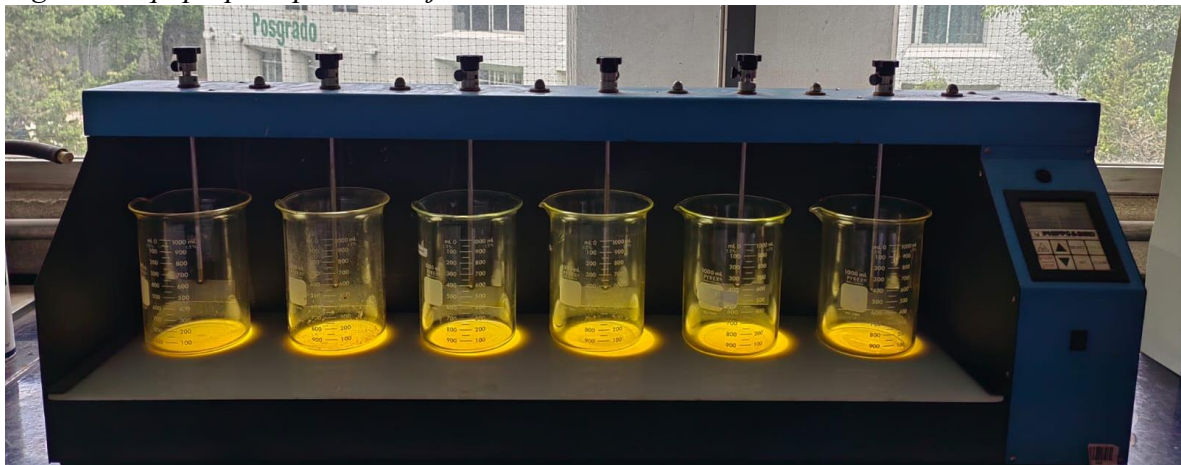
3.2.2.1 Prueba de jarras

Para el diseño de un proceso de coagulación-floculación es necesario determinar la dosis óptima de coagulante a utilizar, de no respetarla, el resultado es la modificación a una turbidez elevada. Agregar una cantidad pobre de coagulante genera una baja neutralización en la carga de los coloides, generando micro flóculos. La utilización de una dosis elevada de coagulante podría llevar un cambio en la carga de la partícula formando flóculos livianos con baja posibilidad de sedimentar. (Jiménez Andrango & Medina de la Torre, 2017)

La prueba de jarras, comúnmente denominada “jar-test” es la técnica más extensamente usada donde se simulan a nivel de laboratorio los procesos de coagulación, floculación y sedimentación. (Lorenzo-Acosta, 2006). Con esta técnica se determinan el tipo de coagulante, la dosis óptima de coagulante, el pH óptimo para el tratamiento, el tiempo de retención y la velocidad de agitación que asegure una buena mezcla y un buen contacto entre las partículas en el proceso de floculación.

El equipo para pruebas de jarras se compone de varios ejes con una paleta en la base y están conectados a un motor eléctrico que los hace girar simultáneamente y son los responsables de agitar la muestra. Puede ser modificada la velocidad de agitación (RPM) de las paletas al igual que el tiempo deseado de funcionamiento. Los valores obtenidos en estas pruebas pueden ser utilizados para el escalamiento robusto al nivel deseado.

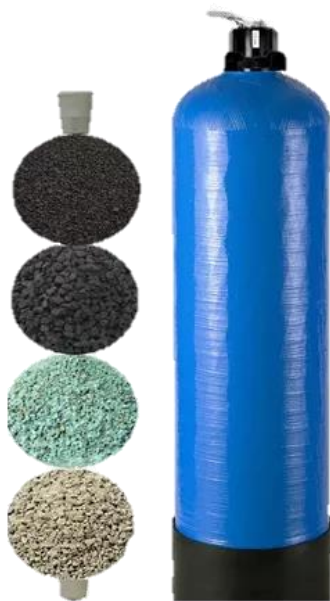
Figura 3 Equipo para prueba de jarras.



3.2.3 Adsorción-filtración

En el tratamiento de aguas residuales, la adsorción es considerada un tratamiento avanzado que se emplea en el tratamiento terciario; consiste en la adsorción de sustancias que están disueltas en el agua a la superficie de un sólido. Al ser un fenómeno que ocurre en la superficie mientras mayor área superficial disponible tenga un sólido, podrá ser mejor adsorbente (Rodríguez Fernández-Alba et al., 2006).

Figura 4 Filtro para adsorción.



Este proceso de adsorción es uno de los más popularmente aceptados por su versatilidad, conveniencia y sencillez para eliminar diversos contaminantes presentes en agua. Se puede identificar dos tipos de adsorbentes: los convencionales y los no-convencionales. Un material adsorbente convencional puede ser natural o sintético cuando requiere de un tratamiento para su activación y así poder ser reutilizado, después de usarse estos materiales tienen la cualidad de poder ser regenerados, ejemplo de éstos son: el carbón activo, las arcillas, las membranas poliméricas etc. Los adsorbentes no-convencionales son materiales alternos como los biopolímeros o desechos agrícolas y no necesariamente deben recibir un tratamiento previo para activarse y mejorar su capacidad de adsorción. En el

proceso de adsorción se debe identificar a la sustancia que se adsorbe conocida como adsorbato y el material que se utiliza para su adsorción es el adsorbente o sustrato. Es importante que durante el proceso de remoción las moléculas no se transformen o degraden generando compuestos más reactivos y tóxicos que el compuesto original (Valladares-Cisneros et al., 2016).

La inversión económica a la hora de la elección del adsorbente es un factor importante al momento de elegir este tipo de tratamiento. Alternativas al carbón activo son las zeolitas o arcillas, pero también existen los denominados adsorbentes de bajo costo, procedentes en su mayor parte de residuos sólidos orgánicos (Rodríguez Fernández-Alba et al., 2006).

3.2.3.1 Carbón activado

El adsorbente más utilizado y amigable con el medio ambiente en el tratamiento de aguas es el carbón activado. Teniendo el éxito de su uso en su propio origen, logrando encontrarse de diferentes procedencias como: cascara de coco, coque, turba, carbón de madera, bagazo de caña de azúcar y cáscara de arroz; todos ampliamente empleados para la retención de contaminantes con resultados exitosos (Ramírez Franco et al., 2013). Comercialmente se puede encontrar en diferentes presentaciones: carbón activado granular, las fibras de carbón activado, las telas de carbón activado y los nanotubos de carbón activado (Moreno Santos et al., 2021).

Sin embargo, el alto costo de producción del carbono activado limita su aplicación en el tratamiento de aguas residuales; así mismo, la fuerte retención que tiene hace difícil su regeneración; estos son algunos de los aspectos que impiden su aplicación a gran escala. Por ello, existe una creciente necesidad en la búsqueda de adsorbentes de bajo costo, renovables, preferentemente naturales y disponibles localmente para la remoción de los contaminantes (Valladares-Cisneros, et al., 2016).

Figura 5 Carbón activado.



3.2.3.2 Zeolita

Las zeolitas también han sido utilizadas como material filtrante, ya que son minerales de aluminosilicatos con características porosas que poseen alta capacidad de intercambio catiónico y altas características adsorbentes tanto externa como internamente además tienen una afinidad fuerte hacia cationes y solo una pequeña afinidad hacia aniones o moléculas orgánicas. así como propiedades de tamiz molecular (Carreño-Mendoza et al., 2018).

Se tiene experiencias previas con zeolitas naturales en la eficiencia en la remoción de fosfatos, sulfatos, y cloruros en los sistemas de filtración también se pueden alcanzar niveles de purificación de aguas bastante notables con la eliminación de metales pesados como plomo, arsénico, níquel, cobre, y otros contaminantes. La zeolita es más eficiente en el filtrado respecto a la arena o incluso al carbón activado ya que puede capturar partículas contaminantes de hasta 4 micras requiriendo menos mantenimiento resultando en agua descontaminada a menor costo (Guerrero Alcívar et al., 2018). Utilizar este tipo de adsorbente tiene algunas ventajas significativas: reduce la acidez del agua, requiere menor cantidad de producto respecto a otros materiales, como la arena sílice, para mantener su desempeño solo requiere de un retro lavado y posee una capacidad de flujo superior a la de los medios filtrantes convencionales. Estas propiedades permiten que las posibilidades de aplicación sean en filtros para sedimentos, filtración a nivel industrial, filtros de lecho profundo y especialmente como tratamiento terciario en el tratamiento de aguas residuales (Pillajo Kashijint & Veintimilla Celi, 2020).

Figura 6 Zeolita.



3.2.4 Radiación ultravioleta

En este caso la desinfección se realiza mediante un equipo UV que proporciona una desinfección inmediata, siendo un proceso que está ganando terreno debido principalmente a que desinfecta el agua sin la necesidad de almacenar o manejar reactivos químicos peligrosos. También por su corto tiempo de contacto que va de los segundos o minutos, reduciendo el tamaño de los tanques de tratamiento y con ello el costo de operación. El efecto germicida de la radiación UV se vincula a la energía asociada a la longitud de onda o frecuencia de la luz UV que es capaz de producir daños fotoquímicos en los ácidos nucleicos de los microorganismos. Se ha podido demostrar que una longitud de onda alrededor de 265 nm tiene un efecto de inactivación de organismos relativamente mayores comparados a otras longitudes de onda (Rossel Bernedo et al., 2020). Todos los patógenos que son conducidos por el agua pueden sufrir inactivación mediante rayos ultravioleta siempre y cuando estén el suficiente tiempo expuestas a la radiación. Algunos microorganismos muestran diferente sensibilidad a la radiación UV, por ejemplo, las esporas bacterianas y los virus tienen una resistencia relativamente alta mientras que la mayoría de las bacterias sufren inactivación con dosis más bajas de UV. (Ramírez-Revilla, 2021)

Esta unidad de tratamiento se realiza en línea, utilizando la misma conducción de tuberías efectuando la desinfección de forma instantánea sin la necesidad de depósitos adicionales. Un requisito para el correcto funcionamiento del equipo precisa de un sistema previo que pueda eliminar sólidos suspendidos y asegurar una transmisión adecuada de la radiación ultravioleta en el flujo de agua.

Figura 7 Lámpara de luz ultravioleta.



3.3 Normativa sobre tratamiento

Siempre que se hable de tratamiento de aguas residuales los encargados de la operación no solo deben lidiar con obtener altos porcentajes de remoción en los contaminantes, también deben cumplir normas específicas de calidad. Es importante identificar el destino que se le da a un efluente, por ejemplo: si el agua ya tratada se descargará en un río, directamente hacia la red de drenaje o la opción de reúso para distintos fines. Saber cuál será el destino del efluente tratado definirá el nivel o grado de remoción de los contaminantes por eso en la Tabla 2 se muestran las Normas Oficiales Mexicanas relacionadas con el tratamiento de las aguas residuales vigentes en el país.

Tabla 2 Normativa referente al agua en México

No.	Nombre
1	NOM-001-SEMARNAT-2021. Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales y bienes nacionales.
2	NOM-002-SEMARNAT-1996. Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.
3	NOM-003-SEMARNAT-1997. Límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público.
4	NOM-004-SEMARNAT-2002. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes en lodos y biosólidos para su aprovechamiento y disposición final.
5	NOM-014-CONAGUA-2003. Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada.
6	NOM-015-CONAGUA-2007. características y especificaciones de las obras y del agua para infiltración artificial a acuíferos.

3.4 Automatización

La necesidad de conseguir un desarrollo urbano sostenible va de la mano con la preocupación respecto al uso del agua exigiendo a la sociedad la existencia de una gestión sostenible que cuente con soluciones reales y eficientes principalmente en los procesos de potabilización de agua y tratamiento de aguas residuales. La mayoría de las plantas de tratamiento de agua ejecutan sus actividades de control de forma manual, lo cual aumenta los costos de operación y da lugar a errores humanos. La automatización tiene como finalidad disminuir los costos de operación y mejorar la calidad del producto final; sin embargo, aún es limitada en los procesos de tratamiento de aguas. La mayoría de las plantas cuenta con algún grado de automatización con PLC sencillos para operaciones pequeñas e instrumentos de medición, pero no se realiza una supervisión ni almacenamiento de las variables del proceso, perdiéndose toda esta información (Mena Martínez et al., 2020).

Las actuales preocupaciones económicas y medioambientales exigen que las empresas adopten un enfoque realista en materia de productividad, de mejora en la calidad del producto, reduciendo el tiempo de producción y costo de operación. Gracias a la automatización se puede aprovechar al máximo los activos en un proceso productivo como son la materia prima, el tiempo y mano de obra, todo esto con la ayuda de programadores lógicos para automatizar la operación y limitar la participación humana (Hiray et al., 2017).

En los procesos industriales existen muchas tareas de producción que se repiten constantemente, al momento de ceder las rutinas de producción por parte de los operadores a elementos tecnológicos es cuando se presenta la automatización (Aguilera Martínez, 2002)

Antes de hablar de automatización es conveniente diferenciar la mecanización y la automatización. La primera emplea maquinaria para ayudar a los operadores a reducir las necesidades de fuerza en el trabajo realizado, mientras que la automatización reduce en gran medida las necesidades sensoriales y mentales de los operadores (Rachana R., 2016). La automatización se puede caracterizar como el uso de métodos lógicos para automatizar la operación y el control de hardware, procesos o sistemas, con el objetivo de limitar la participación humana.

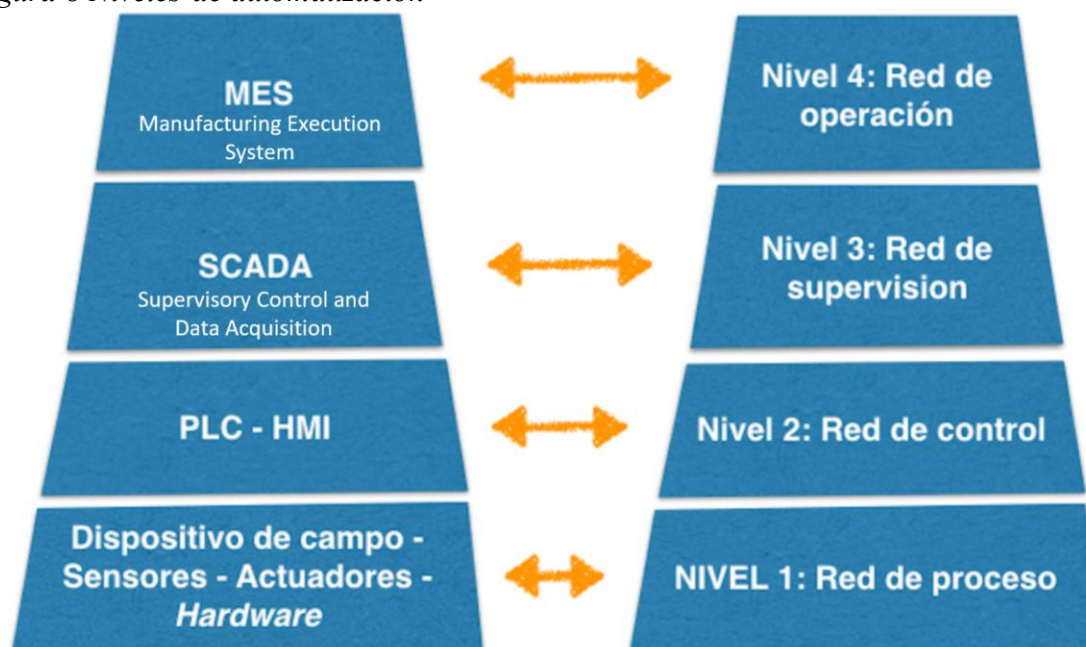
En todo proceso de tecnificación es importante tener en claro las metas que se quieren conseguir con la implementación de alguna tecnología, de este modo, los alcances principales que se quieren lograr en el proceso de automatización quedan a disposición del programador. De manera general los principales beneficios se reflejan en la productividad, reduciendo los costos y mejorando la calidad del producto final, también se busca mejorar las condiciones de trabajo del personal, suprimiendo los trabajos pesados o rutinarios para que el operador no requiera ser especialista y pueda ejecutar los procesos (Hiray et al., 2017).

3.4.1 Nivel de automatización

En todos los proyectos de automatización de los procesos es importante saber los límites o alcances que se quieren conseguir, lo que genera que cada proyecto sea diferente según las necesidades de cada empresa. Para saber el alcance que puede lograr un proyecto de automatización existe una estructura piramidal jerarquizada que define los niveles de automatización (García Moreno, 2020).

El Nivel 0 se identifica por el desempeño de las actividades elementales del proceso, En este nivel se adquieren los datos de campo con ayuda de dispositivos de medición (sensores) de variables de interés en la planta de producción, también permiten el control de las máquinas y equipos de producción. El Nivel 1 permite a los operadores controlar todas las variables con ayuda de controladores procesando la información recabada por el nivel anterior, permitiendo realizar consignas previamente programadas. El Nivel 2 tiene por objeto la supervisión con equipos destinados a controlar la secuencia para que el proceso por ningún motivo se detenga, aquí se monitorea el Nivel 1 y Nivel 2 a través de interfaces de usuario y se almacenan en bases de datos que serán transferidas al Nivel 3. En el tercer nivel se realizan las actividades de planificación de todo el proceso. Aquí se llevan a cabo las compras de materia prima, gestión de calidad, programación de mantenimientos, etc. proporcionando panorama completo y en tiempo real. El nivel 4 proporciona información a los responsables de todos los niveles de la pirámide, aquí se gestiona y se desarrolla todas las actividades relacionadas con el proyecto. (García Moreno, 2020)

Figura 8 Niveles de automatización



3.4.2 PLC - Controlador Lógico Programable

A fines de los años 70 a parecieron los PLC o Controladores Lógicos Programables, desde entonces están siendo utilizados con gran aceptación en todas las áreas industriales debido al alto grado de confiabilidad y por el gran tiempo de vida llegando a superar 100.000 horas de trabajo, a las facilidades de autodiagnóstico, detección de fallas en tiempo real y precios de adquisición cada vez menores. (Aguilera Martínez, 2002)

El Controlador Lógico Programable juega un papel importante en los procesos industriales mejorando el grado de automatización y reduciendo considerablemente la carga de trabajo del operador. Si se emplea un PLC se tendrán muchas ventajas en comparación al control manual tradicional, dejando descubierto la instrumentación de tecnología moderna adaptada al proceso, equipo y gestión. Promoviendo enormemente el progreso científico de la industria y las obvias consecuencias sociales y beneficios económicos. (Zhu & Qiu, 2017)

El PLC es una máquina versátil que puede ser instruida para funcionar mediante programación en escalera, programación de texto estructurado y/o programación de diagrama de bloques. Otra ventaja importante para destacar es que puede ser reprogramada las veces

que sea necesario, las conexiones pueden ser las mismas, pero la respuesta o instrucciones pueden cambiar según los requisitos del proceso (Mena Martínez et al., 2020).

3.4.3 HMI - Interfaz Humano Maquina

El estado del proceso en un entorno industrial puede mostrarse en una pantalla HMI, aquí el usuario puede ver en tiempo real lo que está sucediendo en cada una de las etapas del programa. El HMI es el dispositivo encargo de realizar la vinculación o interacción de los operadores con los equipos a través de una pantalla previamente programada (Arbeláez Hoyos & Gonzalo Yepes, 2019)

El intercambio de información que permite la pantalla con el usuario es a través vistas esquemáticas y geográficas del estado de la planta o proceso, muestra lo que está ocurriendo en cada etapa del proceso. Otra función es la notificación eventos o alarmas, notifica si existe alguna falla en algún motor, o si el nivel de un tanque ha llegado al máximo, etc. A demás permite la configuración y control de dispositivos actuadores en el proceso industrial, muestra de ello es poder encender o apagar motores desde la pantalla o definir el nivel mínimo en un tanque (Kvist & Vikstrand, 2022)

3.4.4 Programación

Los lenguajes de programación permiten introducir en un PLC todas las instrucciones y datos necesarios para gobernar y controlar una máquina o proceso. El *IEC 61131-3* es la estandarización de los lenguajes de programación usados en la automatización industrial. Existen diferentes lenguajes de programación y están divididos de manera básica en escritos como texto estructurado y visuales como diagrama de tipo escalera. El tipo de lenguaje a utilizar esta determinado por la destreza del programador pudiendo incluso combinar lenguajes de programación dentro de un mismo programa. (Arbeláez Hoyos & Gonzalo Yepes, 2019) El lenguaje de programación más utilizado por su fácil comprensión es la programación lógica de escalera conocida por la forma de construcción de su esquema que se asemeja a una escalera. Un programa es un conjunto de instrucciones o preposiciones bien

definidas que le dicen lo que tiene que hacer el procesador interno del PLC, cada instrucción le indica qué operación realizará cuando haya recibido información de los sensores o entradas (Molina Cruz et al., 2019).

3.4.5 Entradas y salidas

Expresado de otra manera más sencilla, el PLC se conecta con el mundo exterior con ayuda de sensores, conocidos también como entradas y sirven para detectar las variables externas que serán utilizadas por el programa para desarrollar una tarea. Algunos ejemplos de variables que pueden medir los sensores son: temperatura, presión, caudal, etc. Una vez procesada la variable de entrada del sensor, el PLC ejecuta un programa realizando una tarea o respuesta, dicha actividad lo realiza mediante los actuadores o salidas, pudiendo ser motores, lámparas, alarmas etc. (Molina Cruz et al., 2019). El sistema comprende los módulos de interfaz de un PLC, responsables de conectar el equipo con el entorno.

CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA



4.1 Planta de tratamiento

La Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa (UAMI) cuenta con un prototipo de planta de tratamiento de aguas grises proveniente de una lavadora que fue utilizada para el desarrollo de esta investigación. Dicho prototipo tiene como finalidad realizar investigación correspondiente en temas enfocados en el tratamiento de aguas grises con fines de reúso de agua y funge como promotor e incubador de tecnologías sustentables que ayuden a combatir problemas relacionados con el agua. Los componentes con los que cuenta la planta de tratamiento se describen a continuación y se muestran en la Figura 9.

4.1.1 Influyente

El flujo de entrada del agua residual en una planta de tratamiento es conocido como influente, específicamente para este proyecto, el influente será toda el agua residual proveniente de la única lavadora automática (A) con capacidad de 20 kg con la que se dispone.

4.1.2 Lavado de ropa

La primera actividad es el lavado; para esto se cuenta con una lavadora de ropa comercial con capacidad de 20 kg donde se efectuará el lavado, el enjuague y centrifugado. El secado de la ropa se llevará a cabo con un tendedero exterior al aire libre con ayuda de los rayos del sol.

Se implementó una metodología para el lavado de ropa para minimizar factores que pudieran afectar los resultados. Se ocuparon cargas medidas de 7 kg de ropa, para cada carga se ocuparon 150 ml de jabón líquido comercial y 100 ml de suavizante, las cantidades son las recomendadas por el fabricante. La ropa para lavar será muy variada con esto se pretende simular a una lavandería, entre las prendas se contará con playeras, jeans, batas de laboratorio y cobijas.

INFLUENTE

LAUNDRY

TRATAMIENTO PRELIMINAR

CÁMARA DE ESTABILIZACIÓN

Se consigue que decanten pelusas, tierra y basuras, también funciona como regulador de caudal u homogeneizador al recolectar toda el agua de lavado.

TRATAMIENTO PRIMARIO

CÁMARA DE COAGULACIÓN FLOCULACIÓN

Se utiliza una sal de hierro y un biopolímero como coagulante y floculante. Se consigue la remoción de partículas de muy pequeño tamaño ($10^{-6} - 10^{-9}$ m) llamadas coloides.

TRATAMIENTO TERCIARIO

CÁMARA DE DESINFECCIÓN

Con ayuda de Zeolita, Carbón Activado y Luz U.V. se eliminan contaminantes remanentes específicos, color, olor y/o patógenos.

EFLUENTE

Agua tratada disponible para reúso o descarga

SIMBOLOGÍA

- A** Lavadora capacidad 20 kg
- B** Tanque 1 Sedimentador Preliminar
- C** Tanque 2 Tolla
- D** Tanque 3 Sedimentador Primario
- E** Filtro de Zeolita
- F** Filtro de Carbón Activado
- G** Lámpara Luz U.V.
- H** Tanque 4 Reservorio Agua Tratada

Se usará el mismo ciclo preprogramado de la lavadora para todas las prendas. El ciclo completo tiene una duración de 37 minutos en los que se realiza de manera automática el lavado, enjuague y centrifugado. El equipo utiliza agua fría y el volumen total de agua en este ciclo de lavado es de 160 l. Al finalizar el ciclo de lavado, el agua generada en este proceso se acumula en el tanque 1, para su posterior tratamiento y la ropa para su secado se colocará en tenderos al aire libre para que con ayuda del sol se sequen por completo. Para la primera carga de lavadora se ocupará agua de red pública hasta alcanzar la capacidad de 820 litros (capacidad de tolva) para poder hacer el primer tratamiento, en las cargas posteriores se utilizará agua tratada.

Figura 10 Proceso de lavado



Figura 11 Proceso de secado de ropa



4.1.3 Tratamiento preliminar

El agua gris producto del desagüe del ciclo de lavado, enjuague y centrifugado es recolectado en un tinaco (B) horizontal de 500 l, dicho tinaco será denominado Tanque 1 (Ver Figura 12) cumpliendo la función de pretratamiento. En este sedimentador preliminar se busca conseguir que decanten la pelusa, tierra y microfibras que pudieran estar suspendidas en el agua residual. También trabajará como regulador de caudal u homogeneizador (estabilizador) amortiguando las variaciones en la calidad del influente debido al lavado de diferentes prendas obteniendo agua residual con calidad aproximadamente constante. El tratamiento preliminar termina cuando el Tanque 1 alcanza su capacidad de almacenamiento máxima y el producto es transportado con ayuda de una bomba sumergible hacia la cámara de coagulación-floculación donde iniciará el tratamiento primario.

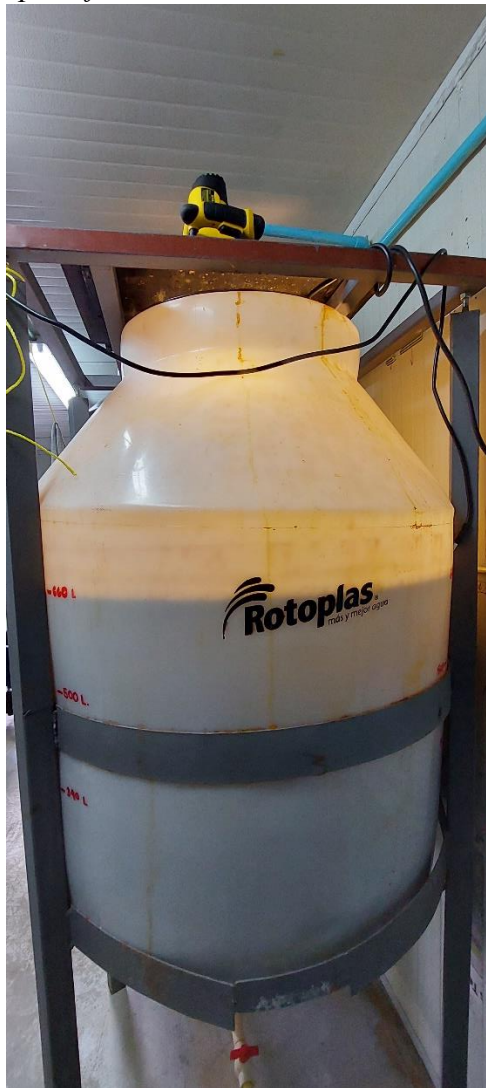
Figura 12 Recibimiento de agua gris



4.1.4 Tratamiento primario

En la cámara de coagulación-floculación (Ver Figura 13) se realizará el tratamiento primario y consta de una tolva (€) con capacidad de 1,000 litros que será denominada Tanque 2, un mezclador eléctrico de aguas residuales, un separador manual de lodos y un tanque (Đ) horizontal de 500 l que sirve como sedimentador clarificador primario denominado Tanque 3. La tolva se operará por seguridad a una capacidad de 820 l dejando una superficie libre que permita al fluido no derramarse al momento de la mezcla.

Figura 13 Llenado de tolva para floculación



Una vez alcanzado el volumen de operación en el Tanque 2, el primer paso es determinar la dosis optima de coagulante y floculante, por ello se realiza previamente la prueba de jarras. Una vez determinada la dosis optima se inicia la agitación o mezcla, este proceso se realiza por seis minutos en total. Durante este tiempo se siguen una serie de pasos cada dos minutos. Los primeros dos minutos la mezcla se homogeniza dentro de la tolva y la agitación se realiza sin adicionarle algún producto. Una vez pasado el minuto dos, se agrega el coagulante y la agitación continua por un par de minutos más permitiendo que el proceso de desestabilización de coloides se lleve en todo el volumen de agua. Pasado el minuto cuatro se agrega el biopolímero que funge como floculante permitiéndonos formar flóculos de mayor tamaño para que puedan sedimentar con mayor rapidez (Ver Figura 14). Llegado el minuto seis se da por terminada la operación de mezcla y se apaga el equipo permitiendo que sigan formándose lo flóculos y empiecen a sedimentar por la propia fuerza de gravedad.

Figura 14 Formación de flóculos en la tolva



Los flóculos formados en el proceso anterior continuarán sedimentándose hasta llegar a compactarse, por lo que es de gran ayuda monitorear el desarrollo y evolución de la sedimentación desde el momento de apagar el mezclador hasta alcanzar un punto en el que la sedimentación sea muy lenta que ya no se pueda apreciar. La separación de lodos (flóculos) se realiza (Ver Figura 15) por la parte inferior de la tolva, aquí se tienen dos válvulas manuales, la primera permite enviar por gravedad los lodos a un contenedor y así ponerlos a disposición. La segunda válvula enviará con ayuda de una bomba centrífuga el agua clarificada al Tanque 3 para alistarla y ser enviada al tratamiento terciario.

Figura 15 Separación manual de flóculos



4.1.5 Prueba de jarras

En esta prueba se determina la cantidad de coagulante y floculante ideal que se debe agregar en la tolva (Tanque 3) para que el proceso de coagulación-floculación se realice con una buena eficiencia en la remoción de sólidos suspendidos. El equipo de pruebas de jarras tiene 6 paletas metálicas planas unidas a un motor que permite el control de velocidad y tiempo de agitación. Esta práctica se basa en encontrar la dosis óptima. Para el caso estudiado se ocupará el siguiente procedimiento:

1. En un vaso de precipitado de 250 ml se agregó una muestra de agua gris, esta se mantendrá en agitación. Por medio de goteo se agregará el coagulante (solución de cloruro férrico) hasta observar la formación de aglomeraciones de partículas suspendidas (flóculos). Una vez formado los flóculos se agregará el biopolímero (floculante) sin detener la agitación, se agrega de la misma forma (por goteo) hasta apreciar el crecimiento de los flóculos, se detiene la agitación y se toma lectura del volumen ocupado en las jeringas. La dosis es el volumen en mililitros utilizado de coagulante y floculante para 250 ml.
2. Se realiza el escalamiento para 1,000 ml con ayuda de una relación de cantidades con proporcionalidad directa.
3. En el equipo de prueba de jarras, se llenan los seis vasos de un litro cada uno con agua residual de lavandería, uno de ellos se conservará como testigo. La prueba de dosificación se realiza dejando una variable fija: se mantiene constante la cantidad de coagulante para los 6 vasos y se cambia la cantidad de floculante, importante rotular los vasos con la dosis a probar. La manera de agregar los químicos sigue el siguiente orden.
4. Verificar que las paletas estén centradas en todos los vasos de un litro, encender la lámpara del equipo de pruebas, iniciar con una agitación rápida de 150 RPM por un minuto. Agregar la cantidad de floculante y continuar la agitación por otro minuto.

más. Pasado este tiempo reducir a agitación lenta de 25 RPM por un minuto más. Terminado el tiempo de agitación lenta se suspende el mezclado apagando el equipo, dejamos sedimentar por 10 minutos. En este paso se puede observar cómo se lleva a cabo el proceso de clarificación.

5. Al finalizar la prueba de jarras, de la parte superior se toma una muestra de cada vaso para medir la turbidez y poder determinar en cual muestra se logró disminuir en mayor cantidad la contaminación suspendida. La dosis óptima será la prueba que tenga mayor eficiencia en la remoción de turbidez.
6. Para realizar el escalamiento de la dosis optima se realiza una relación de cantidades con proporcionalidad directa, pero en esta ocasión para la capacidad del Tanque 3 (tolva) que es de 820 l.

Figura 16 Elaboración de prueba de jarras



4.1.6 Tratamiento terciario

Los componentes de este tratamiento son un par de filtros, uno de zeolita (E) y uno de carbón activado (F), ambos en forma granular y que se consiguen de forma comercial en tiendas espaciales para filtración de agua. Se tiene también una lámpara de radiación ultravioleta (G) con potencia de 55 watts que reforzará la desinfección. El final del tratamiento terciario llega cuando el agua después de pasar por los filtros y rayos UV es depositada en un reservorio (H) de 500 l que se denominará Tanque 4 (Ver Figura 9) siendo la última etapa del tratamiento. La diferencia de volúmenes entre el tanque 2 (820 l) y el tanque 3 (500 l) obliga a que la desinfección se realice en dos etapas, primero la capacidad total del tanque 3 y después los 320 l restantes.

La desinfección (Ver Figura 17) comienza cuando el agua clarificada procedente de la cámara de floculación llena el Tanque 3 a su máxima capacidad. Con ayuda de una bomba centrífuga se hace pasar por dos filtros, uno de zeolita natural y otro de carbón activado, aquí se realiza la desinfección por adsorción. Inmediatamente de pasar por los filtros el agua con la misma presión de la bomba atraviesa una lámpara de rayos UV eliminando patógenos que no pudieron ser retenidos por los filtros. La duración de este tratamiento es de 13 minutos, por lo que se puede decir que es una etapa de duración corta.

Figura 17 Filtros y luz UV



4.1.7 Efluente

El final del tratamiento terciario y del tratamiento en general llega cuando el agua es depositada en el Tanque 4 (Ver Figura 18) poniéndola a disposición para su reúso. Toda el agua tratada que ingreso a la planta y ha mejorado su calidad inicial se le conoce como efluente disponible para recibir otra oportunidad de uso o aplicación.

Figura 18 Tanque para agua tratada



4.1.8 Medición de parámetros

La toma de muestras para su análisis se obtendrá de puntos específicos durante el tratamiento. La primera muestra será obtenida de la red de agua potable para caracterizar la calidad con la que se comenzará a realizar la experimentación y tener referencia de las afectaciones. La segunda muestra se conseguirá en el sedimentador preliminar (Tanque 1) para saber cómo se modifica la calidad del agua después de las actividades de lavado de ropa. Una tercera muestra será obtenida en el Tanque 3 después de efectuarse el tratamiento primario de coagulación-floculación. Una última muestra será obtenida en el Tanque 4

después de pasar el agua por los filtros y el tratamiento con UV para poder determinar la calidad con la que el agua termina el tratamiento.

Para poder observar la calidad del agua y su variación a lo largo del tratamiento se realizarán dos tipos de mediciones, determinaciones en sitio (in situ) y en laboratorio. Los parámetros in situ medidos serán el pH y los Sólidos Disueltos Totales (TDS, por sus siglas en inglés) que serán determinados con la ayuda de un multiparámetro de la marca HANNA®INSTRUMENTS modelo HI98194 pH/EC/DO.

Figura 19 Multiparámetro HI98194



En laboratorio se medirá la Turbidez y la Demanda Química de Oxígeno (DQO). La determinación de la turbidez se realiza dentro de un periodo no mayor a 24 h y se utilizará un turbidímetro portátil marca OAKTON T100.

Figura 20 Turbidímetro T100



Para determinar la DQO de las muestras recolectadas, se utilizarán viales con reactivos para DQO de intervalo medio avalado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés), el equipo utilizado para determinar las lecturas de los valores de la DQO fueron un Fotómetro Multiparámetro con COD HI83399 y un Termo Reactor- HI 839800 COD REACTOR, ambos de la marca comercial de la compañía HANNA®INSTRUMENTS.

Figura 21 Multiparámetro COD HI83399 y termo reactor HI 839800



Para determinar los parámetros de pH y TDS se siguió la metodología establecida en la Norma Mexicana NMX-AA-008-SCFI-2016, la cual establece la metodología para la medición del pH en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.

Para determinar la turbidez se siguió la metodología establecida en la Norma Mexicana NMX-AA-038-SCFI-2001, la cual establece la Determinación de la turbiedad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.

Para determinar la DQO se tomó como referencia la norma NMX-AA-030/2-SCFI-2011, que establece la determinación de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba de tubo sellado a pequeña escala.

4.2 Instrumentación de control

Anteriormente se explicó de manera general las etapas que conforman el proceso de tratamiento desde la entrada de agua proveniente del proceso de lavado hasta finalizar el tratamiento al término del tratamiento terciario. A continuación, en la Figura 22 se muestra los procesos que son necesarios para que cada etapa pueda funcionar según lo proyectado y que garantizan la obtención de los resultados esperados. Operativamente en el Tanque 1 (B) se recibe el agua proveniente de la lavadora (A) una vez alcanzado el nivel máximo se envía el agua gris residual al Tanque 2 (C) con ayuda de una bomba sumergible (1) dando final al Tratamiento Preliminar. El tratamiento primario empieza una vez llegado el nivel máximo en la tolva, aquí se deben realizar de forma manual la prueba jarras resultando la dosis óptima de coagulante y floculante que será mezclada perfectamente con ayuda del mezclador eléctrico (2). La tolva cuenta con una lámpara led (3) que servirá para iluminar el interior de la cámara para que se pueda apreciar la formación de flóculos y dar seguimiento al proceso de sedimentación. Cuando todos los flóculos lograron sedimentar apreciándose perfectamente en el fondo de la tolva el siguiente paso es realizar una separación manual abriendo una válvula (4) situada en la parte inferior. Realizada la separación de lodos, ahora redirigiendo el flujo abriendo la válvula (5) se envía toda el agua clarificada al Tanque 3 con ayuda de una bomba horizontal tipo jet (6). El tratamiento terciario comienza cuando el Tanque 3 llega a su nivel máximo y el agua clarificada comienza la desinfección con ayuda de una segunda bomba horizontal tipo jet (8) se hace pasar todo el volumen a través de un Filtro de Zeolita (E), uno de Carbón Activado (F) y una Lámpara de Luz U.V. (G). Toda el agua desinfectada termina su tratamiento quedando a disposición en el Tanque 4 (H), aquí el agua tratada es empleada nuevamente en el lavado, con ayuda de un presurizador de paso (9) se incrementa la presión para que pueda trabajar de forma autónoma en función a la necesidad de la lavadora.

En la Figura 23 se muestra el diagrama de flujo que rige el proceso de tratamiento que se lleva a cabo durante todo el tratamiento.

Figura 22 Esquema general de procesos

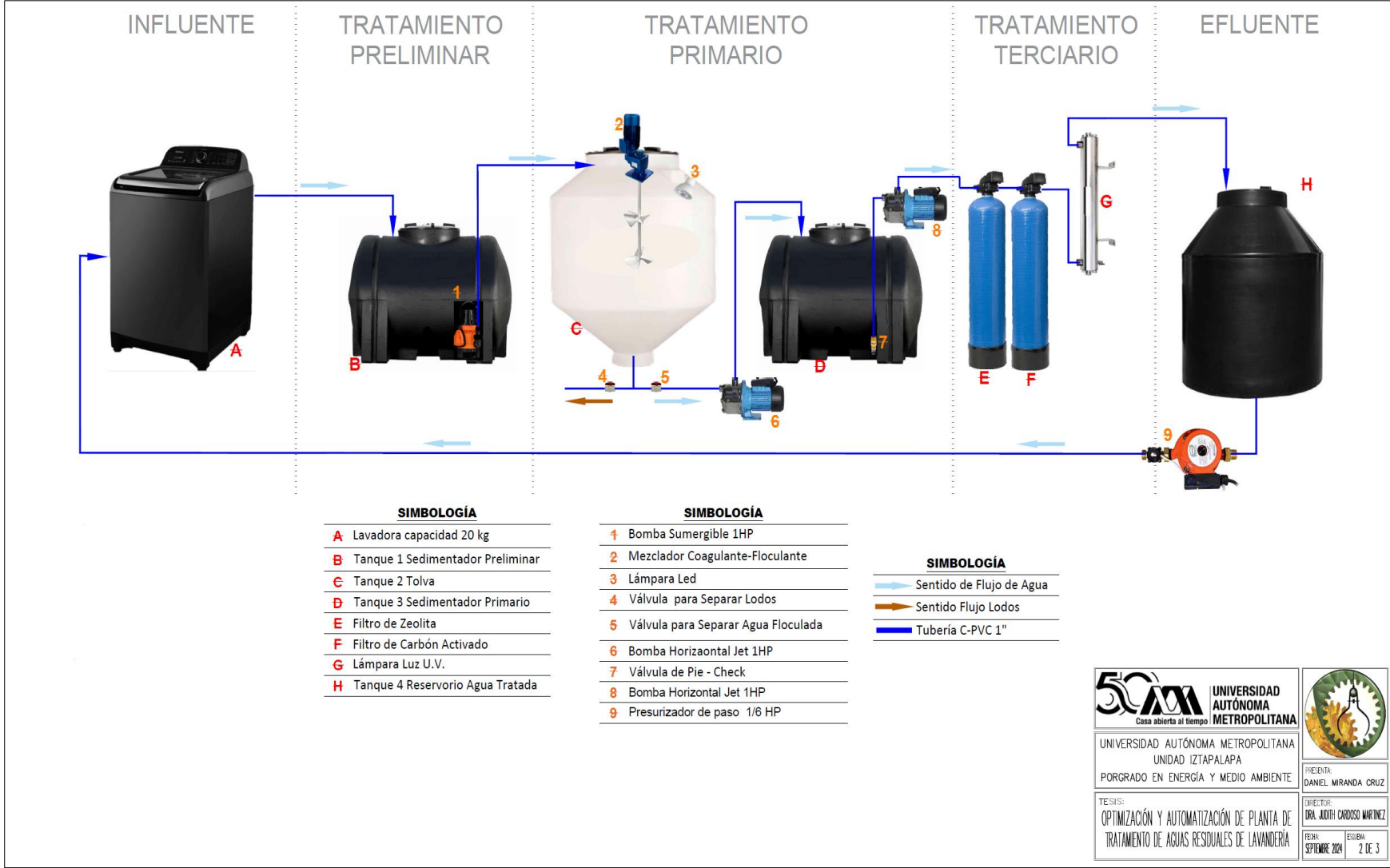
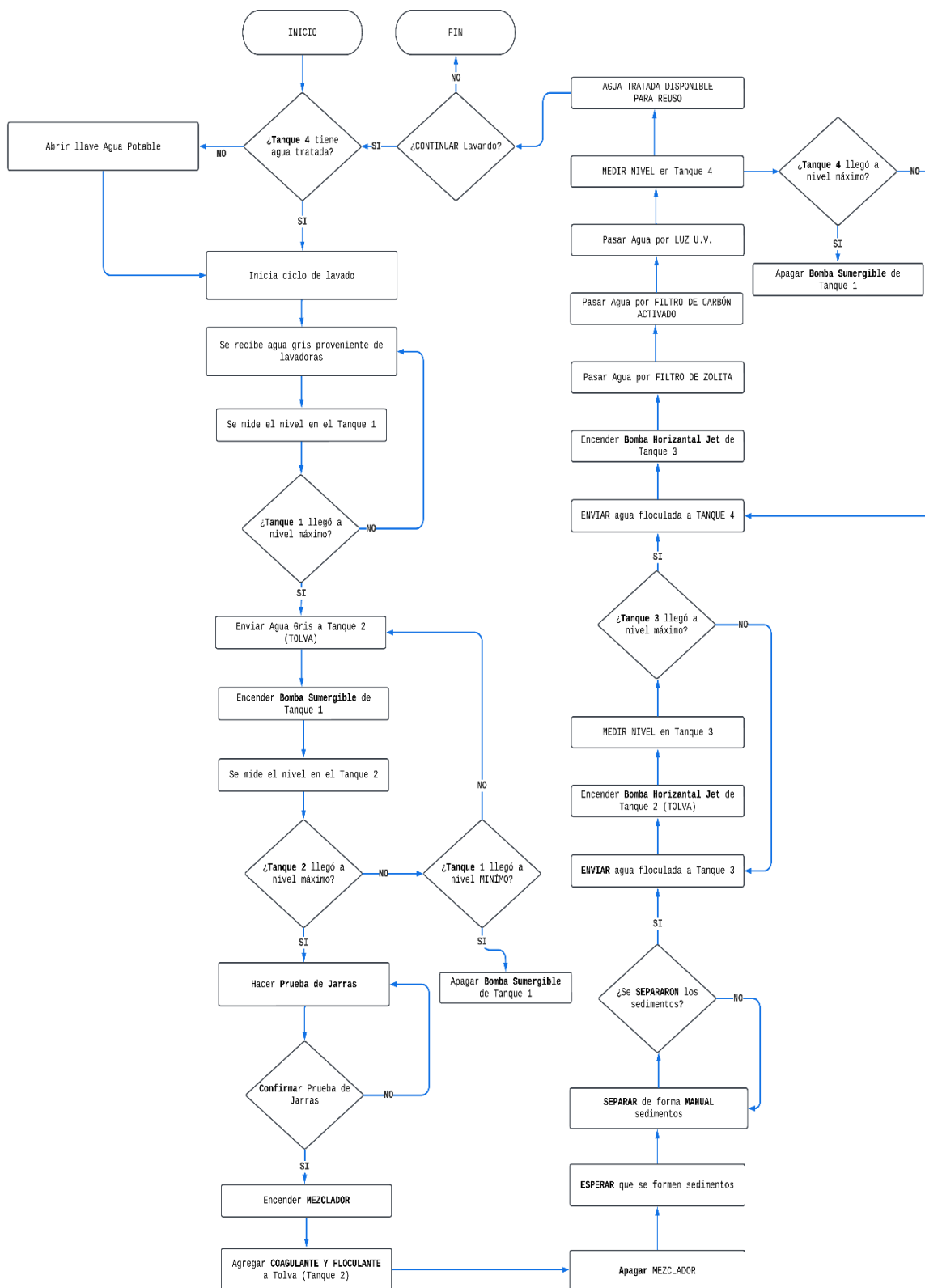


Figura 23 Diagrama de flujo de planta de tratamiento



4.2.1 Elección de hardware

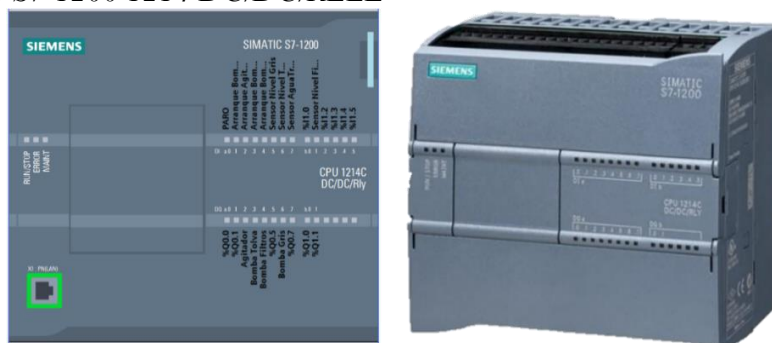
En los siguientes apartados se detallará toda la información respecto a los equipos utilizados y posteriormente se van a detallar sus características y especificaciones concretas.

4.2.1.1 PLC

En la automatización el PLC es el elemento encargado de ejecutar las órdenes previamente programadas en la planta, por esta razón importante tener en cuenta al momento de su elección las características como la CPU, la capacidad de memoria, el número de la entradas y salidas.

El controlador seleccionado para el desarrollo del proyecto es de la familia SIMATIC S7-1200 con una CPU de la serie 1214 DC/DC/RELÉ la cual posee un tamaño compacto que incluye 14 entradas digitales, 2 salidas analógicas y 10 salidas digitales. La alimentación para el dispositivo seleccionado obedece a un intervalo de 20.4 a 28.8 voltaje de corriente directa (VCD).

Figura 24 PLC S7-1200 1214 DC/DC/RELÉ



4.2.1.2 Módulos expansión

Los PLC ofrecen diversos módulos y placas de conexión para ampliar las capacidades de la CPU con entradas y salidas adicionales, los módulos de señales en el lado derecho de

la CPU. Para el proyecto se adicionó un módulo SM 1221 con capacidad de incrementar hasta en 8 entradas digitales con alimentación de 24 VCD.

Figura 25 Módulo de expansión SM 1221



4.2.1.3 HMI

El estado del proceso en tiempo real se puede visualizar mediante un panel gráfico llamado HMI, este componente ayuda a conseguir una comunicación entre el operador y el proceso de producción.

Gracias a las características particulares de los paneles SIMATIC Comfort Outdoor se utilizó un HMI modelo TP700 CONFORT dotado de una pantalla táctil de cristal y frontal de aluminio con recubrimiento de polvo, además es resistente a los rayos ultravioletas por esta razón son aptos para el uso en interiores o exteriores. Cuenta con una pantalla panorámica touch de 7" capaz de mostrar hasta 16 millones de colores y alimentación de 24 VCD.

Figura 26 HMI TP700 CONFORT



4.2.1.4 Fuente alimentación

Un PLC necesita ser dotado de energía eléctrica la fuente de alimentación es la encargada de suministrar el voltaje a todos los módulos que se conecten al PLC y este accesorio es importante gracias a su función de reducir y adaptar el voltaje de entrada al controlador. Para el desarrollo del proyecto la fuente elegida es de la marca FINDER modelo 78.2E. Permite una conexión de entrada de voltaje en corriente alterna de 110 hasta 240 VCA entregando un voltaje de salida que se puede regular de 24 hasta 28 VCD ideal para alimentar al PLC S7-1200 a demás cuenta con protección térmica con preaviso y alarma en caso de falla eléctrica.

Figura 27 Fuente de alimentación 78.2E



4.2.1.5 Contactores

Un PLC por sí solo es incapaz de encender un motor industrial por la diferencia de corriente de trabajo. Los contactores realizan la conexión y desconexión de sus contactos a través de una señal externa de menor voltaje, en otras palabras, permiten abrir o cerrar un circuito que trabaja con voltajes altos a partir de una señal de bajo voltaje recibida en su bobina interna. El contactor que se escoge para este proyecto es de la marca EATON modelo DIL M12-10, este dispositivo cuenta principalmente con una bobina de comunicación de 24 VCD que permitirá el enlace con el PLC. También cuenta con capacidad de conexión de motores de 3 polos de hasta 12 amperios de corriente en su trabajo, otro apoyo es la incorporación de un contacto auxiliar normalmente abierto.

Figura 28 Contactor DIL M12-10



4.2.1.6 Sensor de nivel

Un sensor de nivel del tipo interruptor de flotador es un instrumento que permite la detección del nivel del agua en un punto establecido, de esta manera el PLC puede saber si enciende o apaga una bomba en el traslado de volúmenes de un tanque a otro. El tipo de sensor de nivel que se utiliza se caracteriza por monitorear en un solo punto los niveles establecidos de los tanques, este tipo de sensor es conocido como interruptor de flotador de pico de pato de la marca WALFRONT modelo TIPO C. El sensor se eligió por su facilidad en la instalación y el material de fabricación en polipropileno que lo hacen ideal para usarse en lugares de alta temperatura, alta presión, resistencia a la corrosión y la oxidación. El voltaje de funcionamiento se maneja en un intervalo de 0-110 VCD ideal para comunicación con el PLC.

Figura 29 Sensor de nivel tipo c.



4.2.1.7 Botonera

Para poder operar de forma manual los componentes de la planta de tratamiento se utiliza un pulsador que tiene la función de actuador eléctrico en forma de botón que al ser presionado puede cerrar o abrir los circuitos eléctricos. El pulsador tiene dos componentes para poder operar correctamente uno es el botón o pulsador y el segundo es el contacto.

Para el desarrollo de este proyecto se eligieron botones pulsadores de la marca EATON modelo M22-DR-R de color rojo para representar el paro o apagado de equipos y además el modelo M22-DR-G en color verde para representar encendido.

El contacto auxiliar encargado de abrir o cerrar el circuito eléctrico serán de la marca EATON modelo M22-KC01 normalmente cerrado para el botón de paro y el modelo M22-KC10 normalmente abierto para los botones de encendido de equipos.

Figura 30 Pulsador M22-DR y Contacto M22-KC



La forma correcta de instalar los pulsadores es sobre una caja de montaje en superficie conocida habitualmente como botonera cuya función es servir de base para montar los pulsadores de manera fija y segura. El modelo utilizado para el proyecto es M22-I6 de la marca EATON.

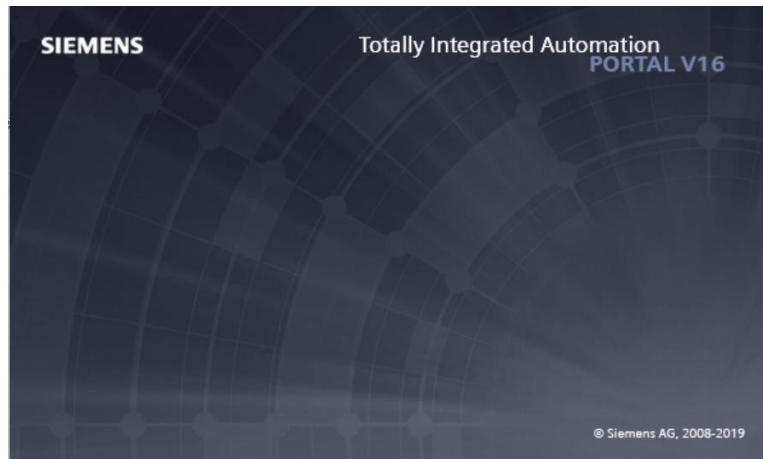
Figura 31 Botonera M22-I6



4.2.1.8 Software y programación

El Portal de Automatización Totalmente Integrada (TIA Portal, por sus siglas en inglés) es el software encargado de la programación de los PLC y HMI de la marca Siemens, TIA Portal es la evolución de lo que era STEP7. El software tiene una enorme ventaja para el programador porque permite desarrollar, editar y observar la lógica del programa necesaria para controlar la aplicación, incluyendo herramientas para gestionar y configurar todos los dispositivos del proyecto en tiempo real de los equipos.

Figura 32 Software TIA Portal V16

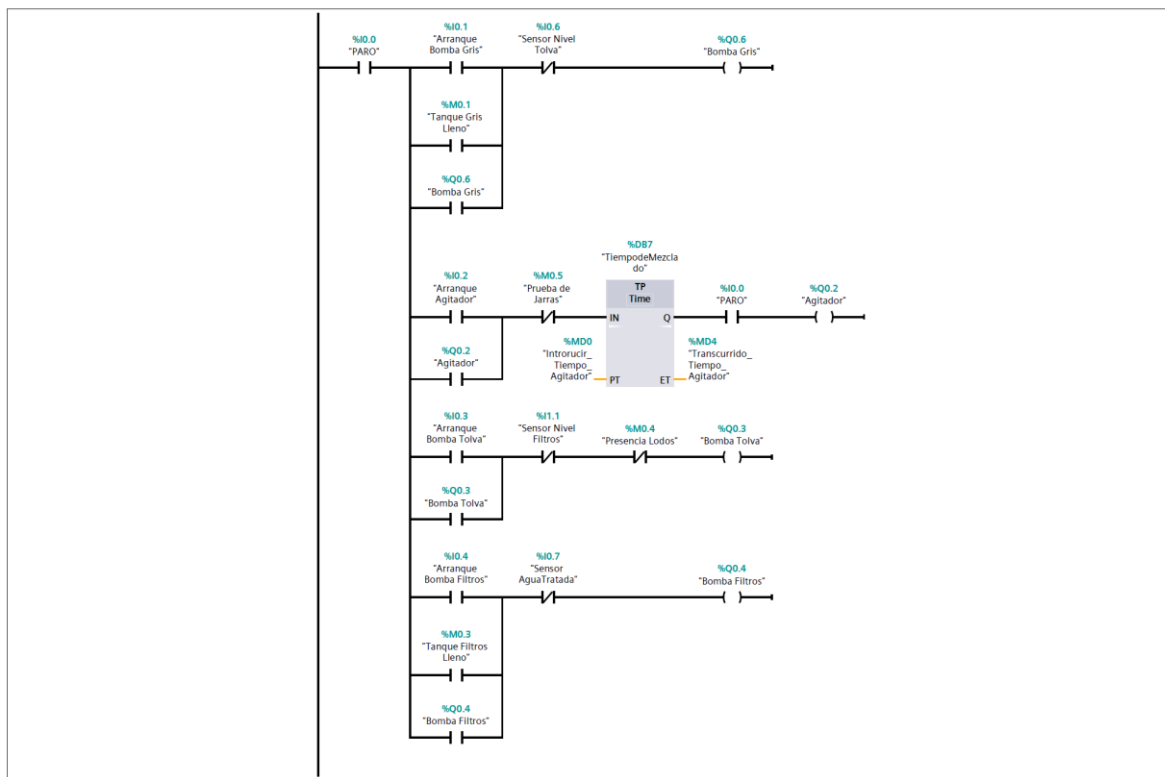


El sistema de TIA Portal proporciona lenguajes de programación estándar, que permiten desarrollar de forma cómoda y eficiente el programa de control. Para el desarrollo de este trabajo se emplea lenguaje de escalera o de contactos porque es un lenguaje gráfico que se basa en esquemas de contacto y es el más extendido en todos los lenguajes de programación. Los elementos de un esquema de circuitos son contactos o elementos normalmente cerrados o abiertos; ejemplo de ellos son las bobinas que al combinarse forman segmentos de un programa.

Figura 33 Lenguaje de programación escalera

Network 1:

Encendido Manual



4.2.1.9 Cableado

Al momento de realizar la conexión de un PLC es importante distinguir que hay dos tipos de conexión: lazo de corriente y lazo de comunicación. El primero tiene como objeto alimentar de energía eléctrica al autómata y al panel de control, para realizar este tipo de lazo se utiliza en la mayoría de los casos una fuente de alimentación que funge como regulador de voltaje. El enlace de comunicación se realiza con ayuda de un router, siendo éste mismo el medio que permitirá el intercambio de información entre el PLC, el HMI y la PC. En la Figura 35 se muestra el esquema de conexión general.

Para que el controlador pueda interactuar con variables del mundo real es necesario conectar sensores previamente calibrados conocidos como entradas; estas entradas pueden ser digitales (pulsador o sensor de nivel) o analógicas (sensor caudal, sensor pH). Todas las

entradas se conectan al PLC en la parte superior derecha, en la Figura 35 se muestra la forma de conexión.

Una vez que el PLC toma las lecturas debe realizar una acción previamente programada. Estas respuestas reciben el nombre de salidas que se conectan en la parte inferior del autómata. En este proyecto las salidas son del tipo digital y se basan en encender o apagar un motor o una lámpara, para esta acción se requiere de un contactor con bobina de 24VCD. En la Figura 35 se muestra la forma correcta de conectar salidas digitales.

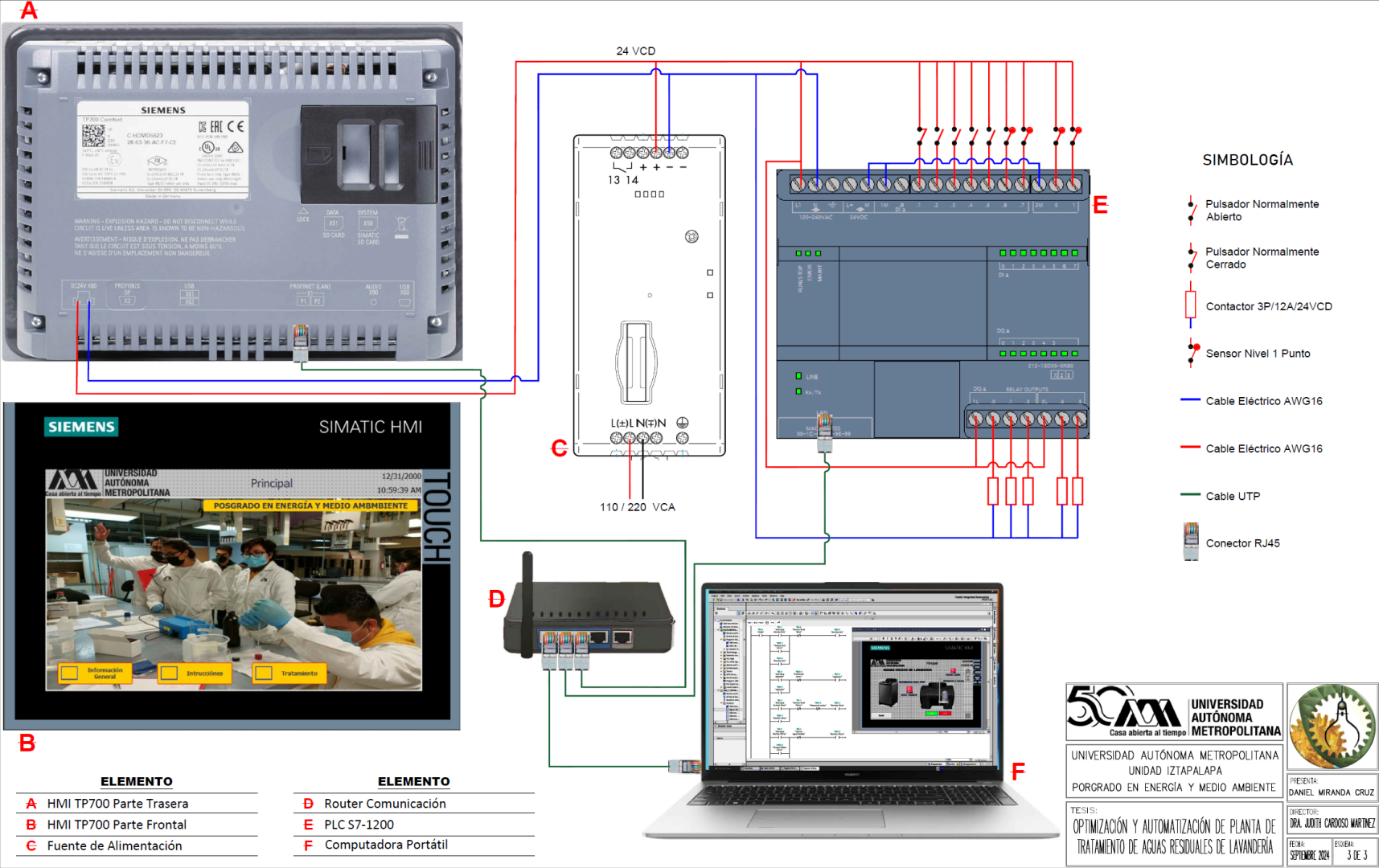
4.2.1.10 Conexión PLC y HMI

Para alimentar de energía la CPU se necesita la ayuda de una fuente de alimentación, la conexión se muestra en la Figura 34 dónde se presenta de forma general a continuación se muestra la conexión eléctrica ya en un dispositivo físico.

Figura 34 Conexión de PLC y HMI



Figura 35 Esquema del cableado general



4.2.1.11 Conexión de botonera

El proyecto contará con cuatro pulsadores verdes que serán implementados como botones de arranque para interactuar de forma manual y se instalará un pulsador de color rojo que será el paro general. La conexión se muestra en la Figura 35 en dónde se conecta un cable directo a la entrada del PLC y a un tornillo del contacto, esto se hace para cada pulsador. En el tornillo restante se conecta un cable común que comparten todos los tornillos entre sí y son la alimentación directa desde la fuente de alimentación. En la Figura 36 se muestra el armado de la botonera y conexión de los pulsadores.

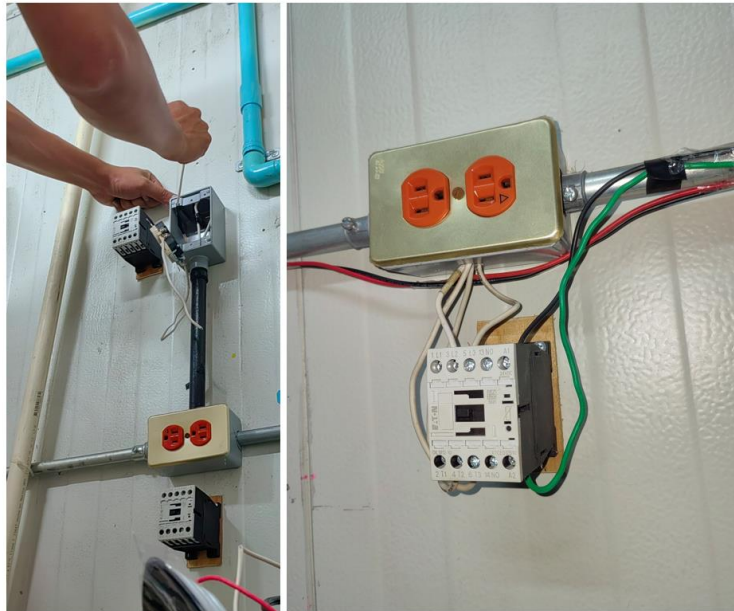
Figura 36 Conexión botonera



4.2.1.12 Conexión de contactores

Los contactores son los dispositivos que nos permiten activarlos con una señal de 24VCD emitida en respuesta por el PLC y poder accionar las bombas, el mezclador y la lampara cuyo voltaje es de 120VCD.

Figura 37 Conexión contactor



4.2.1.13 Conexión de sensores de nivel

Los sensores se instalan en el interior de los tanques y se encargan de monitorear cuando el nivel ha alcanzado el punto de monitoreo al cual fue instalado. El cableado se hace llegar hasta el PLC de la forma más discreta.

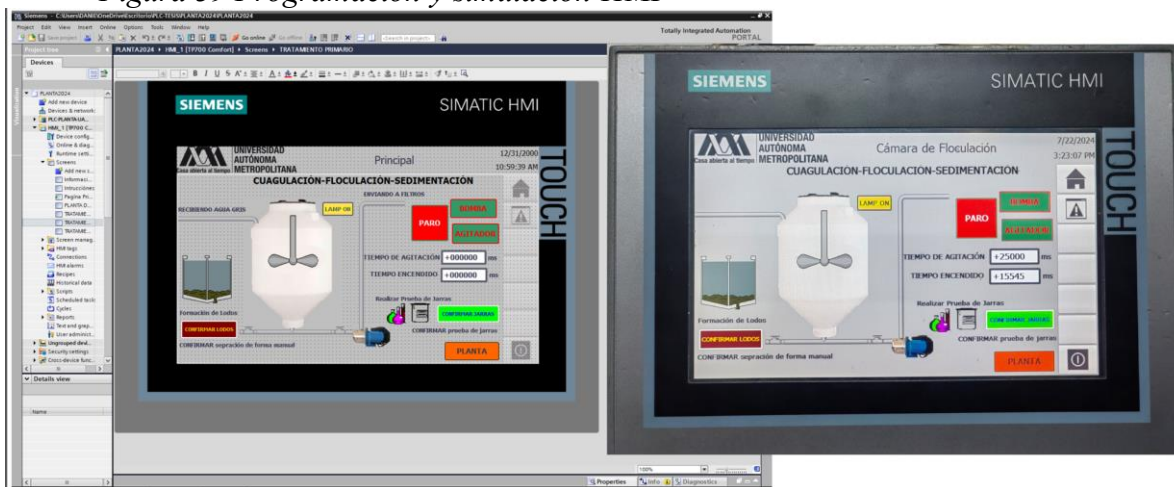
Figura 38 Conexión sensor nivel



4.2.1.14 Simulación

Una ventaja que tiene utilizar una aplicación de programación que permite configurar el PLC y HMI se refleja cuando llega el momento de inspeccionar si lo programado efectivamente responde como se espera. La simulación en tiempo real ayuda a detectar fallos en la respuesta y configuración de los equipos, por esta razón simular en un mismo programa permite ubicar exactamente el lugar o el punto específico del proyecto que no responde según la lógica de programación previamente configurada.

Figura 39 Programación y simulación HMI



Otra ventaja importante es que se puede diseñar la interfaz de acuerdo con las necesidades del proyecto, las opciones son ilimitadas y básicamente se puede llegar a ser tan preciso como la habilidad del programador. Puede crear un sinfín de pantallas, con innumerables objetos a los que se puede agregar animaciones o eventos de fácil configuración.

CAPÍTULO 5: RESULTADOS Y DISCUSIONES

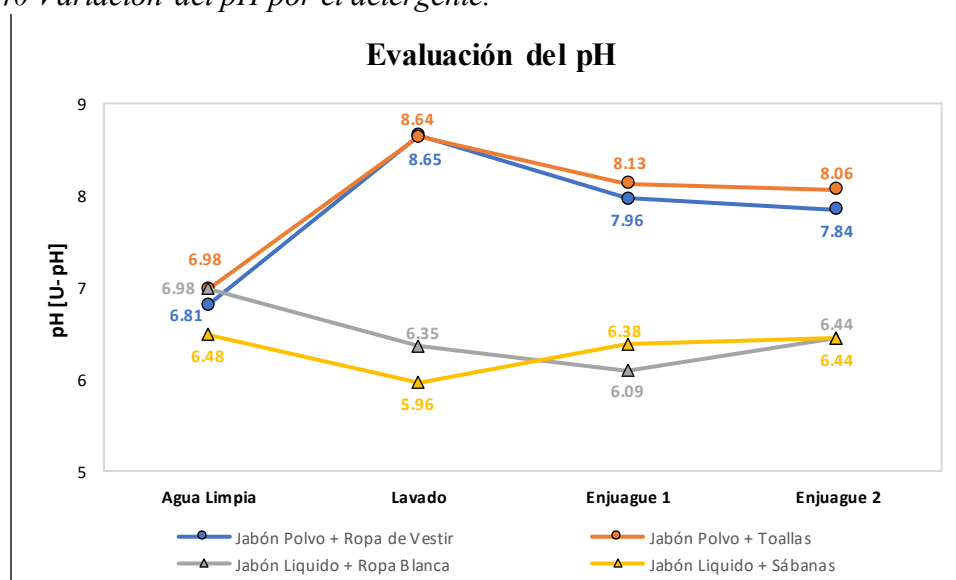


5.1 Tipo de detergente

El primer paso al momento de desarrollar la investigación fue definir qué tipo de detergente se emplearía para las actividades de lavado. Para tener el argumento en la elección del jabón, se compararon dos marcas comerciales fáciles de conseguir; Persil en presentación líquida y Ace en su versión en polvo. El resultado tras lavar prendas con estos tipos de detergente mostró que con los dos tipos de detergente las prendas quedaron impecables, pero al comparar las muestras de aguas residuales de cada uno de ellos, se encontró con afectaciones en la turbidez y pH.

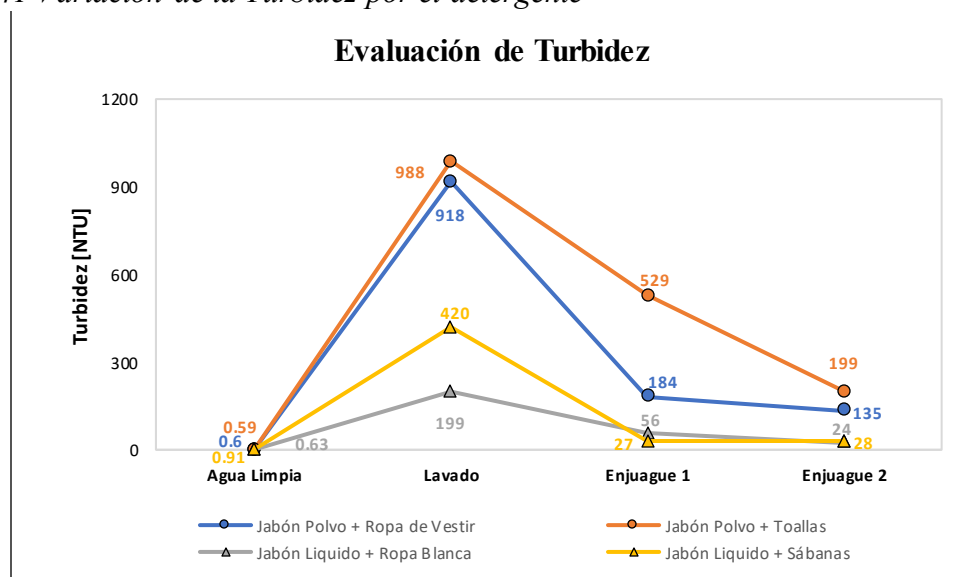
Las mediciones se realizaron con 4 diferentes tipos de prendas: Ropa Casual, Toallas, Cobijas y Blanca de Vestir. Durante el proceso de lavado se determinaron los valores pH y Turbidez en cada etapa de lavado: agua limpia (directa de la llave), en el agua gris de lavado (lavado), en el primer y segundo enjuague. En la Figura 40 se muestra las variaciones en el pH de cuatro tipos de ropa, en general el agua de lavado sube su pH alrededor de 2 unidades en los dos primeros casos donde se utilizó el detergente en polvo. El detergente líquido disminuye el pH en menos de una unidad. De acuerdo con los resultados mostrados, el uso de un detergente líquido no modifica apreciablemente los valores de pH en el agua para reciclar, además de que se requiere usar menos cantidad y ser biodegradable a acuerdo a la información del fabricante.

Figura 40 Variación del pH por el detergente.



En la Figura 41 se presenta el comportamiento de la turbidez en donde la variación disminuye casi un 50% con jabón líquido respecto al detergente en polvo, se adicionó el doble de cantidad de detergente en polvo, de acuerdo con indicaciones del fabricante. Es evidente que la turbidez se verá afectada por el tipo de ropa a lavar, pero las mediciones muestran que utilizar jabón en polvo eleva considerablemente los valores de turbidez al final del enjuague llegando a valores superiores a 100 NTU. En cambio, con el jabón líquido se tienen valores apenas por encima de las 20 NTU al final del lavado.

Figura 41 Variación de la Turbidez por el detergente



Con ayuda de estos resultados, el jabón que se empleará será el de marca comercial Persil en su presentación líquida. Con esta elección estamos garantizando que los valores de pH no se eleven demasiado y prevenir un tratamiento futuro para bajar el pH. También se garantiza que la turbidez al final del lavado no sea tan elevada evitando la utilización de dosis mayores de coagulante y floculante. En otras palabras, podemos decir que el tratamiento de aguas residuales de lavandería empieza desde la elección del tipo de detergente.

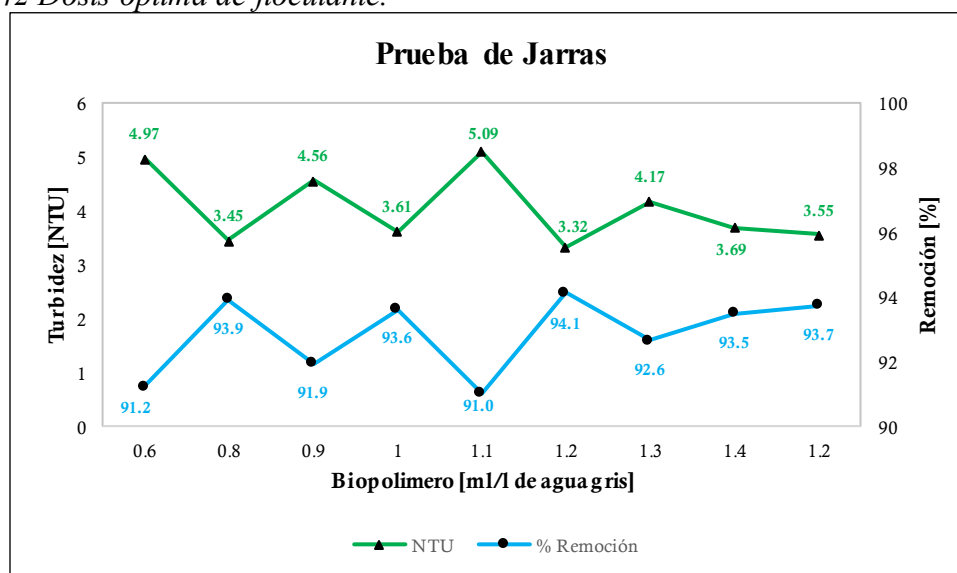
5.2 Dosis de coagulante y floculante

Para poder determinar que el tratamiento primario se realiza con la mayor eficiencia posible, primero se debe determinar la dosis óptima de coagulante y floculante que ofrezca los mayores porcentajes de remoción. Para determinar estos valores es necesario apoyarse en la prueba de jarras. En esta prueba por medio de goteo se encontró la cantidad de coagulante

de 0.8 ml de Cloruro Férrico (FeCl_3) en un litro de aguas grises se consigue desestabilizar los coloides y observar la formación de flóculos. El siguiente paso es ahora ir a la máquina de prueba de jarras. Aquí a todos los vasos de precipitados se le agregará 0.8 ml de coagulante y se harán combinaciones de biopolímero para encontrar la cantidad de floculante adecuada.

En la Figura 42 se observan los resultados (línea verde) en la reducción de turbidez en cada tratamiento y de color azul se puede apreciar los correspondientes porcentajes de remoción. La combinación adecuada siempre será la que arroje mayor eficiencia en la remoción. Siendo la combinación de 0.8 ml de FeCl_3 y 1.2 ml de biopolímero; esta combinación es la adecuada para conseguir una remoción del 94.1%.

Figura 42 Dosis óptima de floculante.



La combinación encontrada anteriormente es la necesaria para un litro de aguas residuales grises, para conseguir la cantidad a agregar a la Tolva (Tanque2) se realiza un escalamiento proporcional. La tolva tiene una capacidad de 1,000 litros, pero la operación se realiza a 820 litros por seguridad para no desbordar agua al momento de la agitación. La dosis final para el volumen de la tolva entonces quedaría con 656 ml de FeCl_3 de coagulante y 984 ml de biopolímero como floculante. La concentración de los productos que se emplean es: cloruro férrico al 40% como coagulante y un derivado de la quitina al 2% como floculante.

5.3 Mediciones individuales

Una vez realizadas las adaptaciones y modificaciones correspondientes en el prototipo de planta de tratamiento de la UAMI quedó adecuada para su correcta operación. Una parte importante para el desarrollo de esta investigación fue conseguir la ropa suficiente para poder realizar el lavado de manera continua y sin pausas. El muestreo realizado en cada etapa del tratamiento arrojó los resultados de las mediciones in situ (pH y TDS) y laboratorio (Turbidez y DQO) que se presentan a continuación.

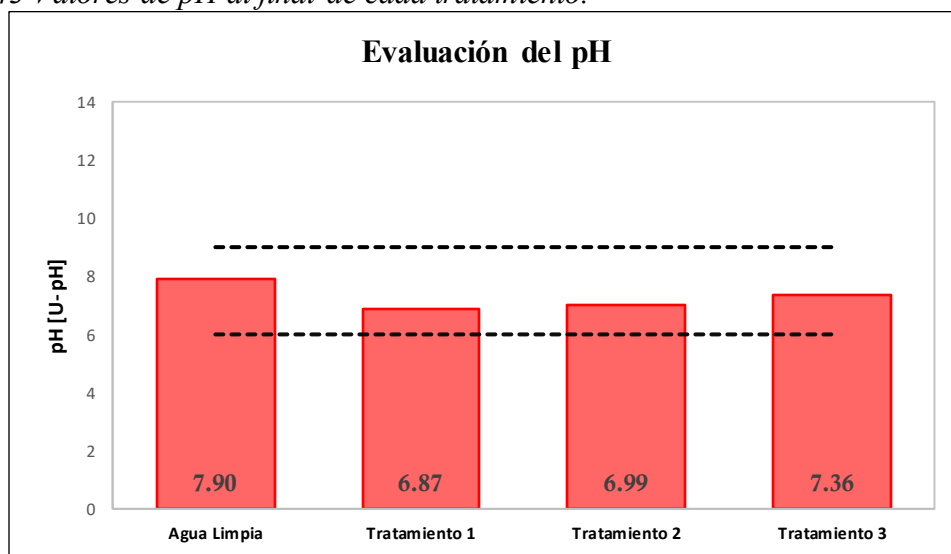
Los resultados se mostrarán primeramente de la forma tradicional, presentando los valores al inicio del tratamiento y una vez culminada la depuración para evaluar un antes y después. En un segundo intento de observación se presentarán los resultados, pero a lo largo de cada etapa del tratamiento para ver su comportamiento no solo al inicio y final si no también durante el tratamiento.

5.3.1 pH

El pH se mide en una escala de 0 a 14. Para el reúso de agua la norma vigente es la NOM-003-SEMARNAT-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. Pero los límites están referidos en la NOM-002-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado. Aquí se establece un intervalo permisible de 6 a 9 unidades de pH. Se determinó el pH en cada ocasión que se reusó el agua, cuyos resultados se muestran en la Figura 43.

Puede apreciarse en la Figura 43 que después de tres tratamientos o recirculaciones de agua gris, los valores de pH se mantienen dentro de la normatividad vigente siendo uno de los principales indicadores de la calidad. Este comportamiento demuestra que se tiene un tratamiento adecuado presentando una tendencia estable sin modificaciones importantes incluso a pesar de utilizar productos químicos durante la etapa de coagulación y floculación.

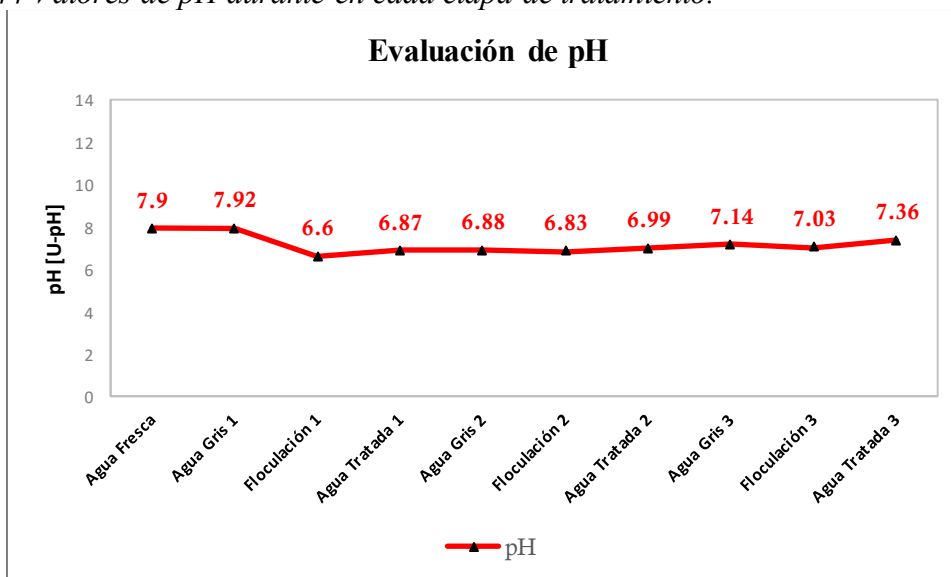
Figura 43 Valores de pH al final de cada tratamiento.



Nota: La línea negra punteada representa el valor máximo y mínimo permisible (9 y 6 U-pH) establecidos en la NOM-002-SEMARNAT-1996.

Analizando de forma meticulosa las variaciones, pero ahora durante cada etapa de tratamiento es muy evidente observar en la Figura 44 que el pH tiene muy pocas variaciones y se mantiene así en todas las etapas. Se aprecia también con estos resultados que en ningún momento se exceden los límites permitidos por la Norma, incluso el agua sin tratamiento (Gris 1, Gris 2 y Gris 3) se encuentra dentro de los niveles aceptables.

Figura 44 Valores de pH durante en cada etapa de tratamiento.



5.3.2 Sólidos Disueltos Totales

En México los Sólidos Disueltos Totales (TDS) son un indicador que no aparecen en alguna Norma sobre tratamiento de aguas residuales, pero si son un parámetro muy importante en la Norma de Agua potable. Es un parámetro que por la industria es muy apreciado puesto que existen dispositivos de medición económicos y al alcance de la cualquier persona, por esta razón es considerado en este trabajo.

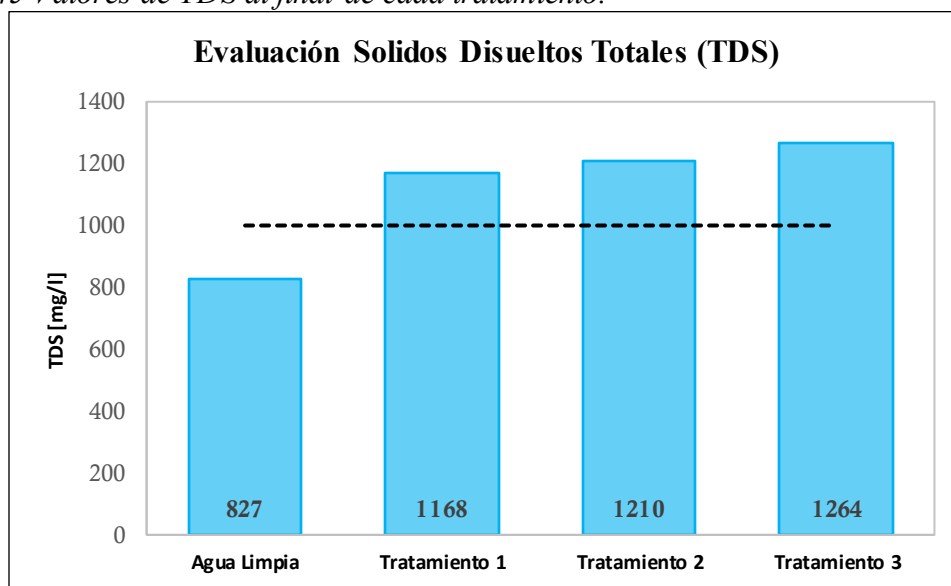
El parámetro TDS indica la suma de todos los minerales, metales y sales disueltas en el agua, este indicador funciona como un buen parámetro de la calidad del agua y es un valor utilizado para medir la concentración de muchos otros contaminantes disueltos en el agua. En la NOM-003-SEMARNAT-1997 no se establece específicamente el valor de Sólidos Disueltos Totales, pero con el apoyo de la NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua. Aquí se indica y establece el límite máximo permisible de 1,000 ppm o 1,000 mg/l en una muestra de agua.

La tendencia a incrementar (ver Figura 45) después de cada tratamiento se debe principalmente a la acumulación de contaminantes como el detergente y de los reactivos en el proceso de coagulación y floculación; es importante apreciar que los filtros tienen la capacidad de adsorber.

Es conveniente mencionar que el valor máximo que se presenta corresponde a agua potable e incluso con un tercer tratamiento o recirculación el valor obtenido de TDS de 1,264 mg/l y representa 26.4% de acumulación de sólidos disueltos en exceso según lo permitido por la norma para agua potable NOM-127-SSA1-2021.

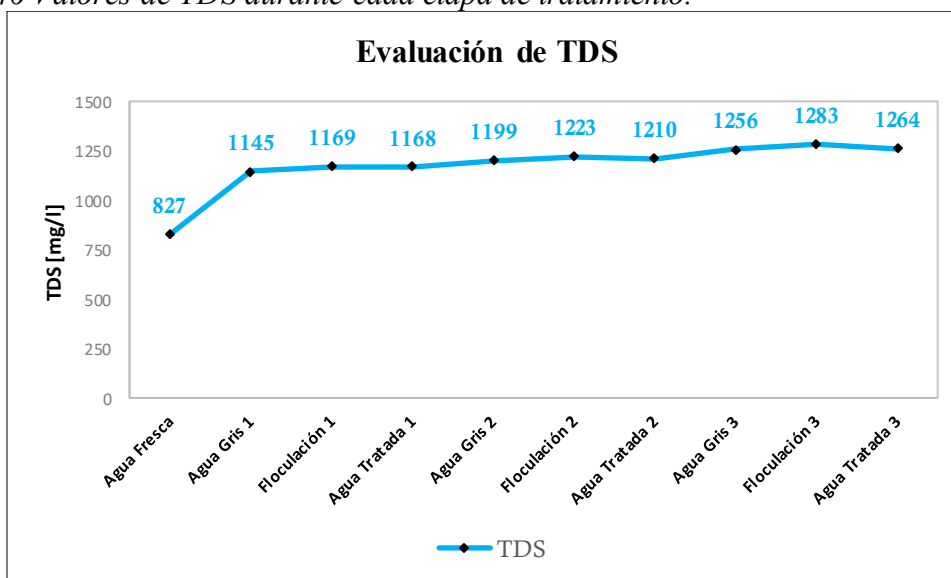
En la Figura 46 se puede apreciar que este valor incrementa de forma paulatina, pero en ninguna etapa se puede apreciar alguna disminución. Por esta razón precisa de primordial atención en el mejoramiento del tratamiento. Algunas alternativas son los tratamientos avanzados como la ozonificación que refuerzan la depuración de agua hasta alcanzar los resultados esperados.

Figura 45 Valores de TDS al final de cada tratamiento.



Nota: La línea negra punteada representa el valor máximo permisible (1,000 mg/l) establecidos en la NOM-127-SSA1-2021.

Figura 46 Valores de TDS durante cada etapa de tratamiento.



5.3.3 Demanda Química de Oxígeno

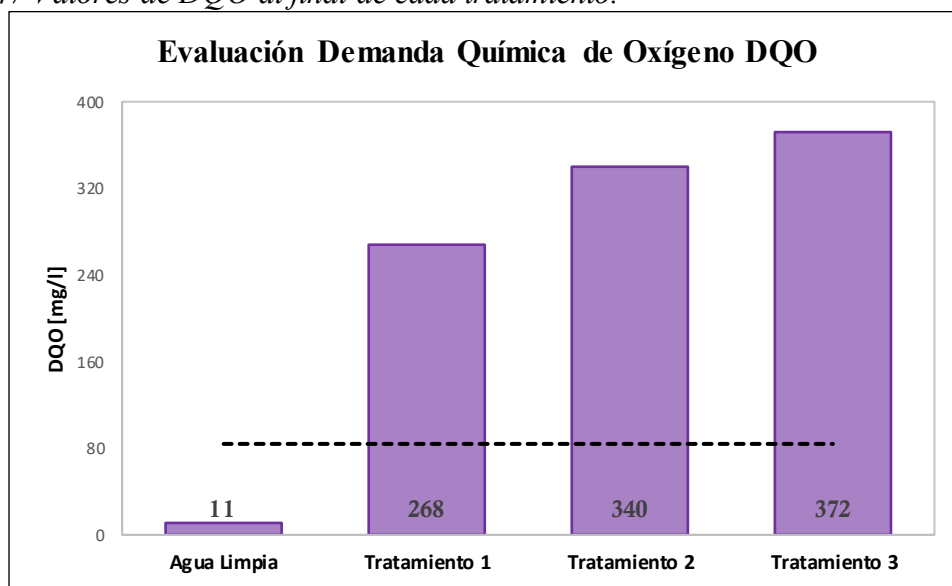
La Demanda Química de Oxígeno (DQO) conocida como la medida del oxígeno consumido por la oxidación de la materia orgánica e inorgánica presente en el agua, este parámetro se considera en la nueva actualización a la NOM-001-SEMARNAT-2021 y entró en vigor en marzo del 2023. Aquí se establece la DQO como nuevo indicador y se tomará como referencia la descarga de agua en el suelo con fines para riego en áreas verdes en donde el valor instantáneo como límite máximo permisible es de 84 mg/l. Para elegir dicho valor se analizó lo más próximo o parecido al reúso directo, porque en la Norma vigente no viene específicamente indicado algún valor para reúso en lavado.

La DQO es un valor que ha tomado mucha importancia al momento de caracterizar un agua, pero lamentablemente pocas normas consideran o establecen un límite máximo permisible. La DQO indica que se cuenta con una acumulación de materia orgánica e inorgánica, esto principalmente debido al incremento de los TDS que no pudieron ser removidos por el tren de filtración. De igual forma, el incremento (ver Figura 47) en la DQO confirma la necesidad de mejorar el proceso de tratamiento en primera instancia con la instrumentación de tratamientos avanzados complementario al existente en este prototipo.

Cuando se muestran los resultados de manera minuciosa en cada etapa del tratamiento como se aprecia en la Figura 48 los niveles de contaminación aumentan considerablemente después de la actividad de lavado. El aumento en la DQO se debe a la utilización de jabón principalmente a los tensoactivos, pero también se debe considerar a la suciedad misma que es removida de las prendas por el mismo lavado. La disminución en la DQO o al menos donde se presenta una reducción significativa es en el tratamiento primario, específicamente, en la cámara de coagulación y floculación, posteriormente existe otra reducción pequeña en la radiación UV, los filtros de carbón activado y zeolita.

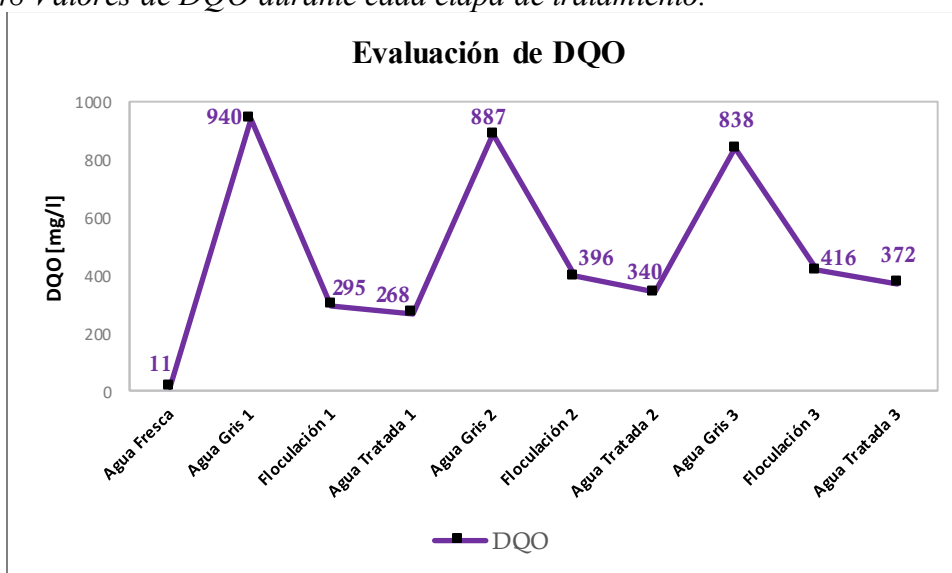
Con la ayuda de esta línea de tendencia, se pueden tomar mejores decisiones y determinar con mayores argumentos en que parte del tratamiento se precisa una modificación o mejoramiento. En primera instancia sería mejorar el tratamiento primario y reforzar con investigación para determinar si es posible lograr incrementar la eficiencia en la remoción de DQO.

Figura 47 Valores de DQO al final de cada tratamiento.



Nota: La línea negra punteada representa el valor máximo instantáneo (84 mg/l) establecido por la NOM-001-SEMARNAT-2021 cuando se descarga al suelo con fines para riego de áreas verdes.

Figura 48 Valores de DQO durante cada etapa de tratamiento.



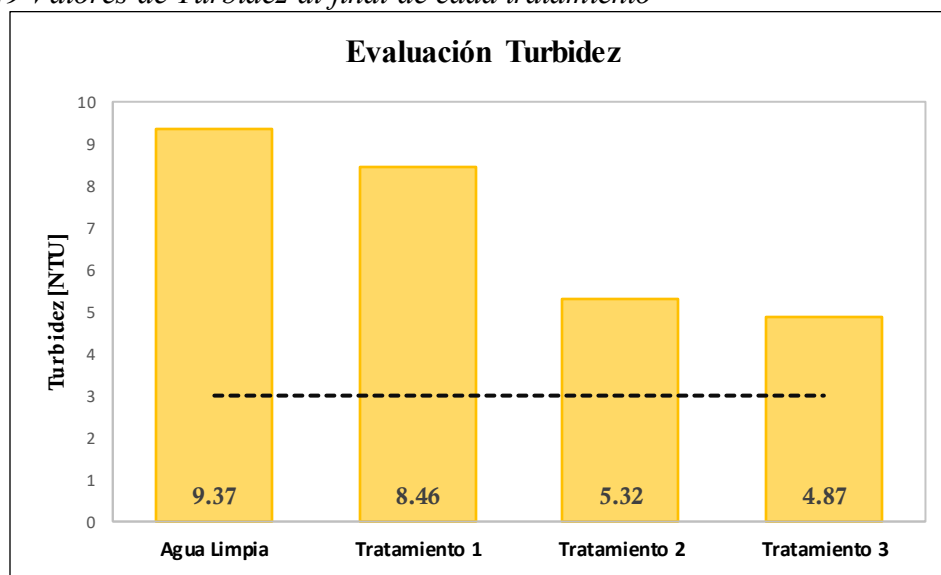
5.3.4 Turbidez

Es importante mencionar que la Turbidez es importante su utilización por ser un parámetro que se utiliza en diferentes investigaciones, representando un indicador muy popular al momento de evaluar el grado de depuración de las aguas residuales.

Al pasar un haz de luz a través de una muestra se origina que, la luz se disperse y se absorba en lugar de transmitirse en línea recta, se dice que existe presencia de material suspendido y coloidal que modifica la calidad estética del agua, esta afectación se conoce como turbidez. En la NOM-003-SEMARNAT-1997 no se establece específicamente el valor de turbidez, pero con el apoyo de la NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua. Aquí se indica y establece el límite máximo permisible de 4 Unidades Nefelométricas de Turbidez (NTU) pero hace mención que el límite permisible para turbiedad será de 3.0 NTU, a partir del segundo año posterior a la entrada en vigor de la Norma en cuestión.

La eficacia del tren de tratamiento queda al descubierto debido principalmente al mejoramiento de la turbidez del agua (ver Figura 49), el agua limpia es suministrada en la toma domiciliaria con un valor de 9.37 NTU. Con ayuda del tren de tratamiento se mejora la turbidez logrando bajar hasta 4.87 unidades consiguiendo que en el tercer tratamiento el valor se acerque a lo establecido por la NOM-127-SSA1-2021 que sugiere los límites para agua potable. También es de observancia que el agua suministrada por la red de distribución de agua potable no cumple los parámetros normativos para suministro de agua potable de buena calidad a la población, al menos en la zona de Iztapalapa

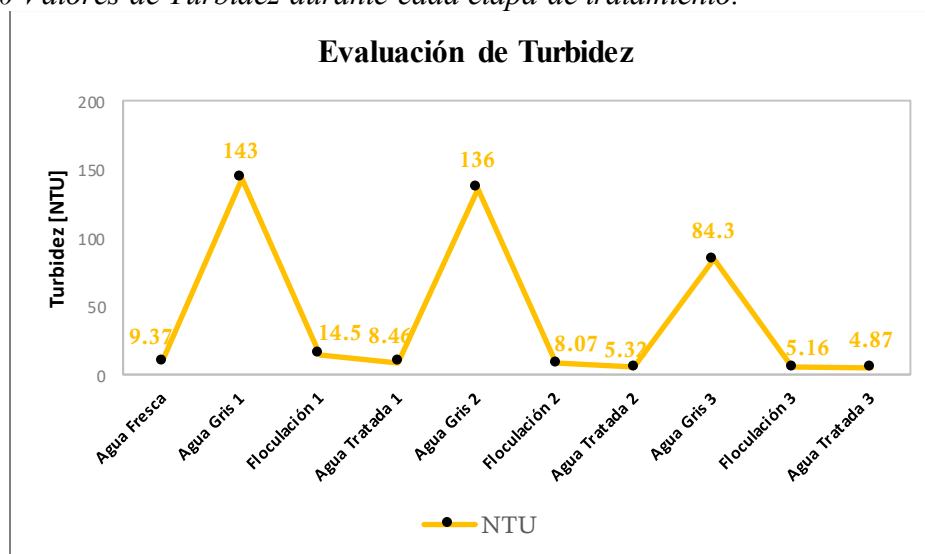
Figura 49 Valores de Turbidez al final de cada tratamiento



Nota: La línea negra representa el valor máximo permisible (3 NTU) establecidos en la NOM-127-SSA1-2021.

Las variaciones de turbidez en el agua se ven afectadas justamente después de las actividades de lavado (ver Figura 50) llegando hasta sus valores máximos justo en el tratamiento preliminar, específicamente en el tanque de estabilización. Al momento de la coagulación y floculación se aprecia una remoción de material suspendido muy significativa, y al momento de pasar por los filtros y lámpara U.V. la calidad se mejora aún más.

Figura 50 Valores de Turbidez durante cada etapa de tratamiento.



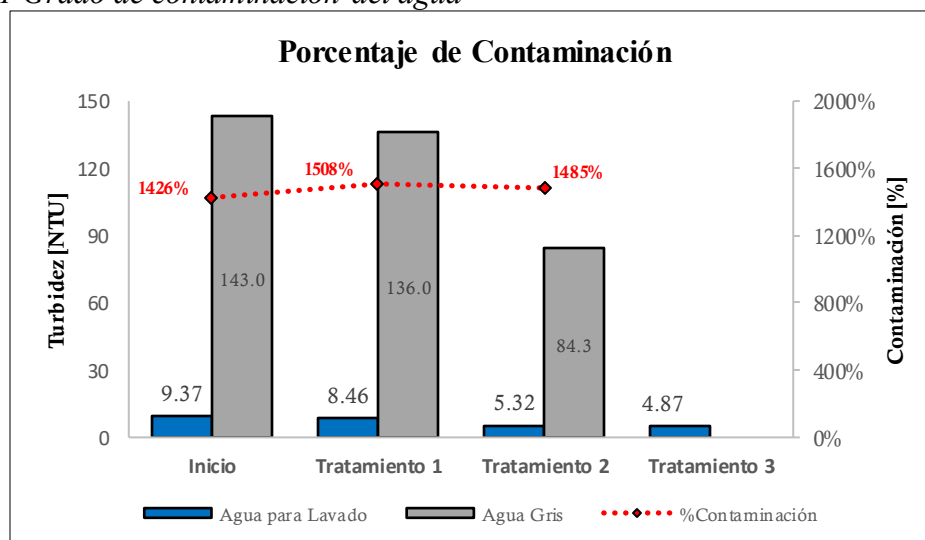
5.4 Eficiencia de tratamiento

Al inicio de la experimentación, las actividades de lavado se hicieron con agua limpia procedente del suministro de agua potable, una vez utilizada por la lavadora el agua cambia sus características al pasar de agua potable a agua gris. Dicha agua gris se sometió a un proceso de tratamiento en donde se pretende mejorar la calidad removiendo los contaminantes. Para determinar la concentración acumulada o removida basta con restar a la concentración inicial la concentración final y dividirla entre la concentración inicial para obtener de esta manera el porcentaje de concentración. Si el resultado es positivo se tendría una eliminación que se traduce en una depuración del agua, pero si se obtienen resultados negativos se tendría una acumulación y se interpreta como contaminación.

5.4.1 Grado de contaminación del agua

Con ayuda de los resultados de Turbidez medida en el Influyente y el Tratamiento Preliminar, antes de comenzar el lavado y después de terminado el lavado se procedió a calcular el porcentaje de acumulación. En la Figura 51 se muestra el grado de contaminación del agua antes y después de lavado resultando en promedio 1,472.77% la afectación en la calidad inicial. Esta información es verdaderamente alarmante porque demuestra que en caso de no recibir tratamiento el agua residual de lavandería sería vertida al alcantarillado con una calidad verdaderamente alarmante y preocupante.

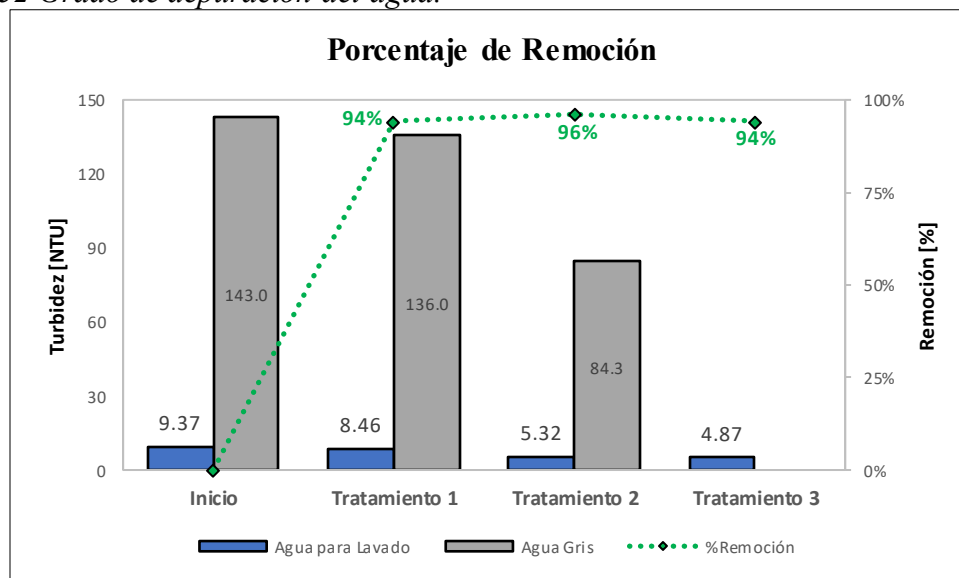
Figura 51 Grado de contaminación del agua



5.4.2 Grado de depuración del agua

Al momento de hablar de tratamiento uno de los aspectos más importantes es evaluar la cantidad de contaminantes que se remueven del agua a través del tren de tratamiento, por esta razón en la Figura 52 se muestra ahora los porcentajes de remoción o eliminación de solidos suspendidos. Estos resultados son tomados con ayuda de la turbidez y muestran que el tren de tratamiento empleado tiene una eficiencia promedio del 94.80%, un valor muy elevado y significativo que resalta las bondades de utilizar este tipo de tecnologías.

Figura 52 Grado de depuración del agua.



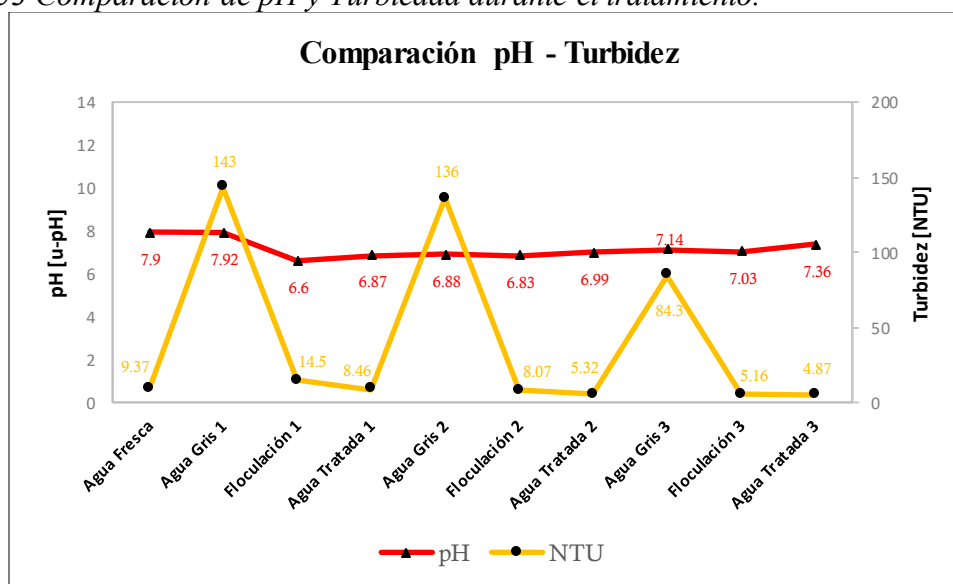
5.5 Comparación entre parámetros

Es importante también llevar un minucioso control y monitoreo del comportamiento de los parámetros dentro del proceso y observar cómo éstos evolucionan a través de cada etapa durante el tratamiento. Para analizar si existe alguna dependencia significada entre los parámetros se presentan las siguientes gráficas en donde se comparan los parámetros entre si durante todo el proceso de mejoramiento de calidad. Una herramienta de asociación que podemos utilizar para determinar qué tan fuerte es la relación entre dos variables es el Coeficiente de Correlación de Pearson. El coeficiente de correlación puede tomar un rango de valores de +1 a -1. Un valor de 0 indica que no hay asociación entre las dos variables. Un valor mayor que 0 indica una asociación positiva.

5.5.1 pH y Turbidez

En la Figura 53 puede observarse como el pH se mantiene sin cambios significativos durante el proceso de tratamiento, en cambio la turbidez como se explicó anteriormente presenta comportamientos muy variados, principalmente pasa de ser un agua limpia a un agua gris, un agua floculada a un agua tratada y así sucesivamente durante tres ocasiones que son el número total de recirculaciones. También es importante observar existe una correlación positiva baja con su coeficiente de correlación de 0.28 entre ambos parámetros durante el proceso de tratamiento.

Figura 53 Comparación de pH y Turbiedad durante el tratamiento.

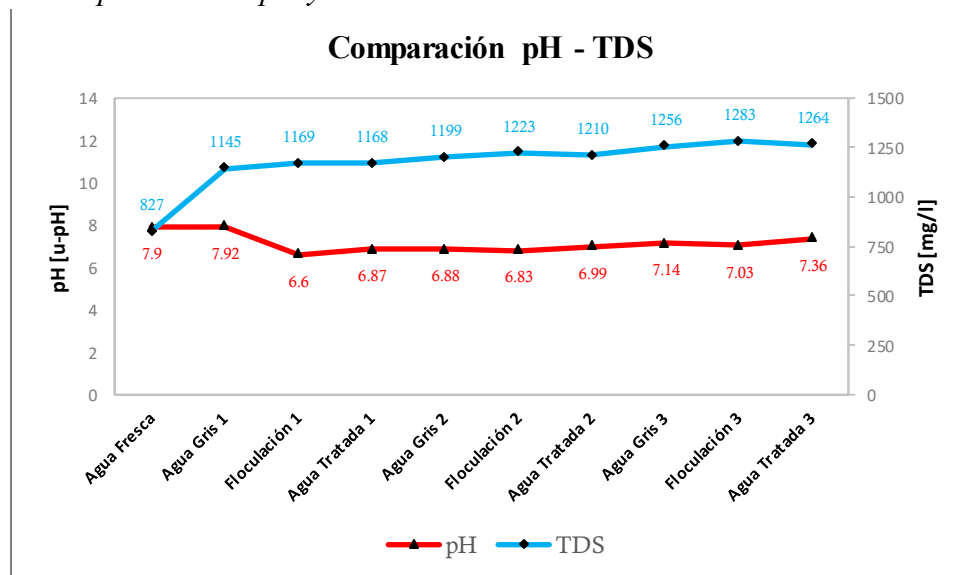


5.5.2 pH y Sólidos Disueltos Totales

En la Figura 54 se distingue a simple vista que no existe una dependencia entre el pH y los Sólidos Disueltos Totales a lo largo del tratamiento de agua con una correlación negativa baja de -0.57. Pero se puede observar la acumulación o incremento en los valores de TDS conforme el proceso va aumentando, una vez más confirma la necesidad de un mejoramiento en el tratamiento terciario de desinfección. Se puede observar también que al momento de pasar del proceso de floculación a agua tratada existe en los tres tratamientos una disminución

mínima de los TDS demostrando que el tren de filtración es muy eficiente removiendo sólidos suspendidos, pero no sólidos disueltos.

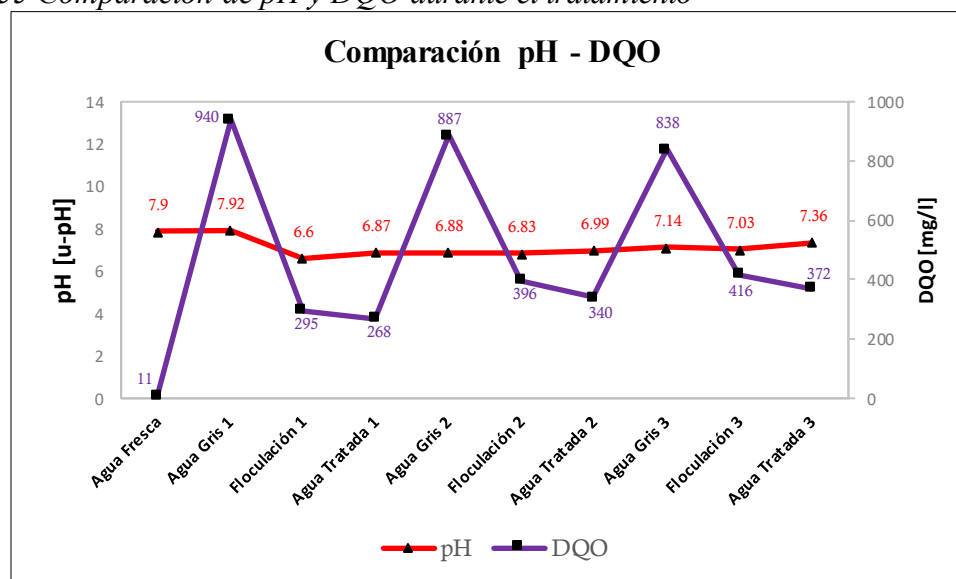
Figura 54 Comparación de pH y TDS durante el tratamiento.



5.5.3 pH y Demanda Química de Oxígeno

La DQO al parecer no presenta alguna significancia o dependencia con el pH teniendo una correlación positiva de 0.06 como valor en el coeficiente, en la Figura 55 puede observarse cómo fluctúan los valores con forme pasa alguna etapa específica dentro del tratamiento. Principalmente se aprecia el aumento en la concentración de DQO al llegar a la etapa de agua gris producto del lavado de la ropa lo que es evidente cuando se agrega al agua una dosis de detergente para el correcto lavado y toda la suciedad contenida en la ropa. Se aprecia que en el proceso de coagulación y floculación se reduce considerablemente la DQO, pero al pasar por el tren de filtración la remoción es muy baja.

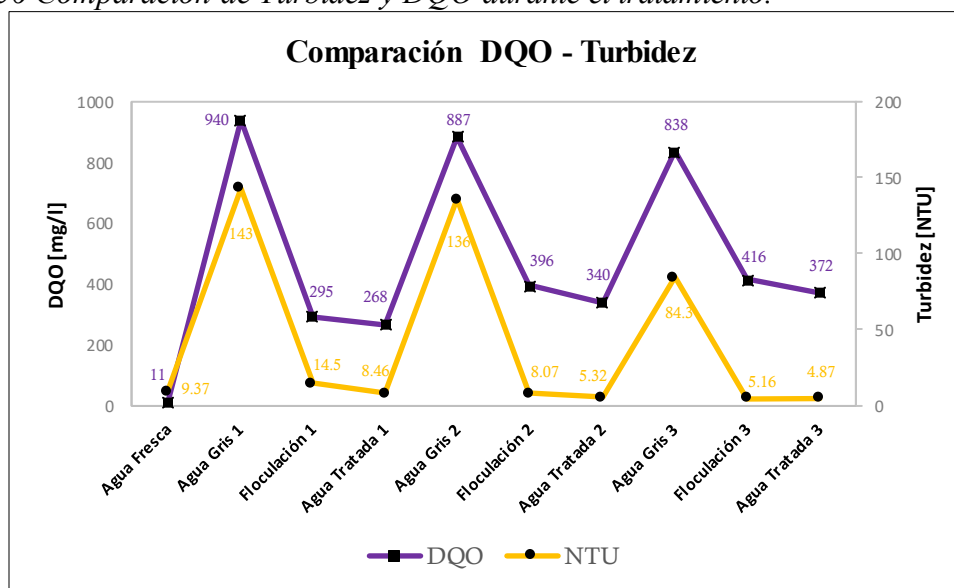
Figura 55 Comparación de pH y DQO durante el tratamiento



5.5.4 Demanda Química de Oxígeno y Turbidez

Los parámetros que presentan una correlación positiva muy fuerte son la DQO y la Turbidez con coeficiente de correlación de 0.90 en la Figura 56 se puede apreciar un comportamiento muy parecido y esto se debe principalmente a la contaminación que tiene presente al agua como los sólidos suspendidos más los sólidos disueltos. El proceso de coagulación y floculación es muy importante, ya que ayuda removiendo muchos contaminantes del agua principalmente la materia suspendida. De esta manera se reduce la contaminación suspendida bajando casi de la misma forma los dos parámetros.

Figura 56 Comparación de Turbidez y DQO durante el tratamiento.

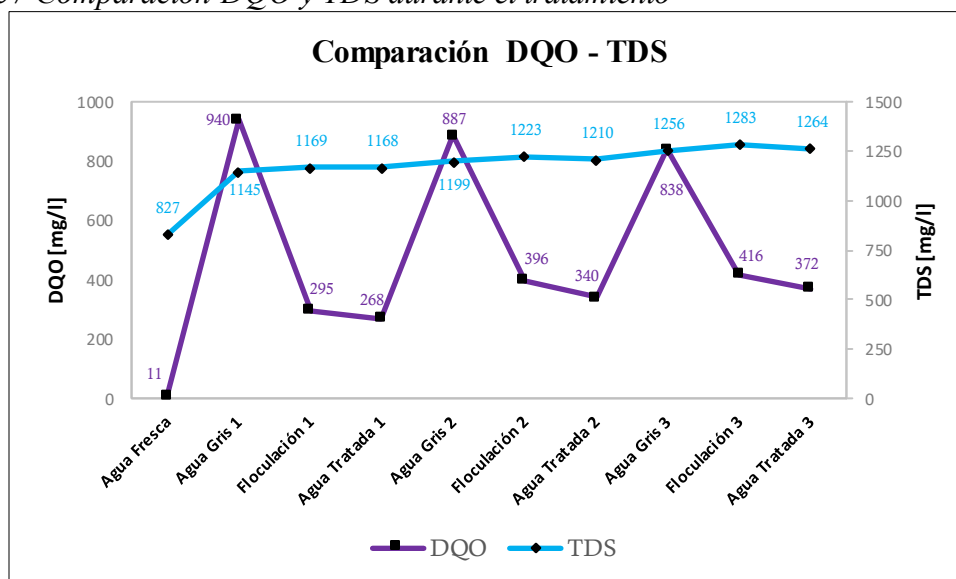


5.5.5 Demanda Química de Oxígeno y Sólidos Disueltos Totales

Los parámetros que presentan una acumulación al final de cada tratamiento son la DQO y TDS, al momento de analizarlos durante cada etapa y observar su evolución se puede apreciar que no existe alguna dependencia, y esto lo puede confirmar su coeficiente de correlación 0.46 que representa una baja relación positiva.

Visualmente en la Figura 57 se aprecia el comportamiento. Es importante observar que los dos parámetros cuando pasan de la cámara de floculación a la cámara de filtración, la TDS tiene una reducción pequeña y la DQO un poco más apreciable, esto puede dejar antecedente de que es en estos puntos donde se puede implementar una mejoría en el tren de tratamiento.

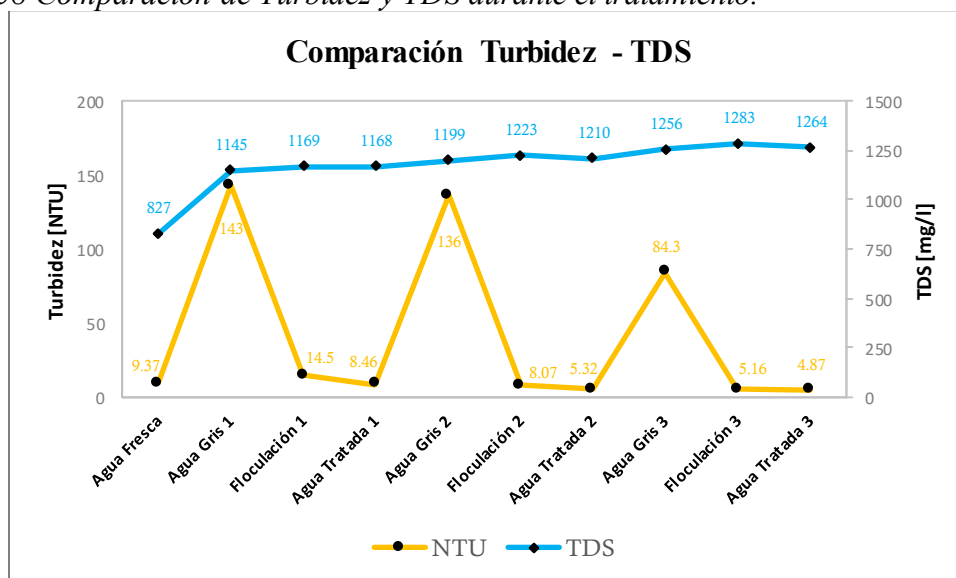
Figura 57 Comparación DQO y TDS durante el tratamiento



5.5.6 Turbidez y Sólidos Disueltos Totales

Con un coeficiente de correlación de 0.06 la relación entre estos parámetros es casi nula, la Turbidez se relaciona con material suspendido y la TDS trata de toda aquella materia que se encuentra disuelta. La Figura 58 muestra la tendencia entre ambos parámetros.

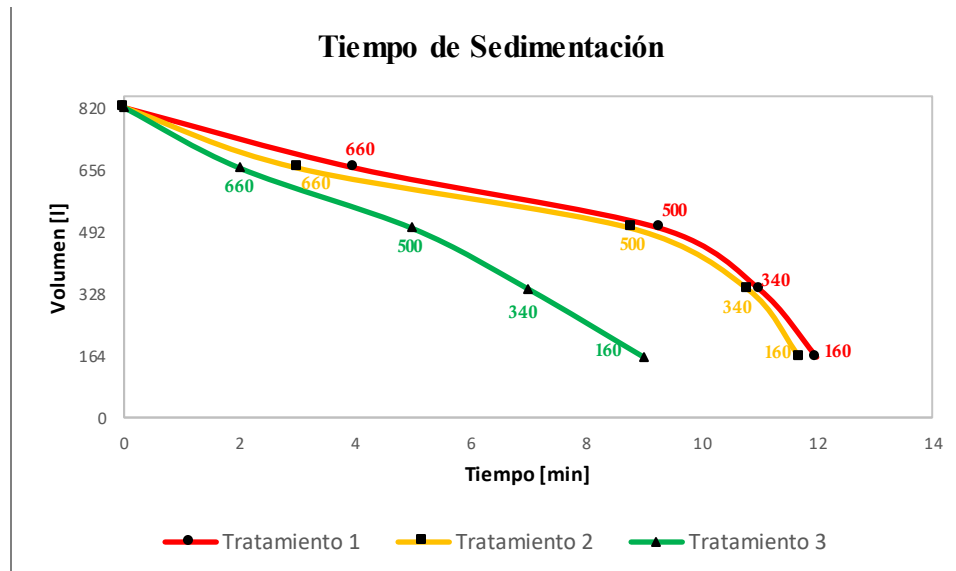
Figura 58 Comparación de Turbidez y TDS durante el tratamiento.



5.6 Cinética de sedimentación

Al momento de realizar un tratamiento de aguas, un factor importante es el tiempo que dura todo el proceso, principalmente el tiempo de sedimentación que puede llegar a durar segundos, minutos, horas o incluso días. Según el fin y las características de la planta de tratamiento la duración jugará un papel importante, para un proceso de recirculación en una lavandería tener tiempos rápidos es fundamental para no detener el proceso de lavado. A continuación, en la Figura 59 se presenta la curva de sedimentación donde se puede observar el volumen de lodos generados y el tiempo en que llega a concretarse la acumulación en el fondo de la tolva.

Figura 59 Cinética de sedimentación.



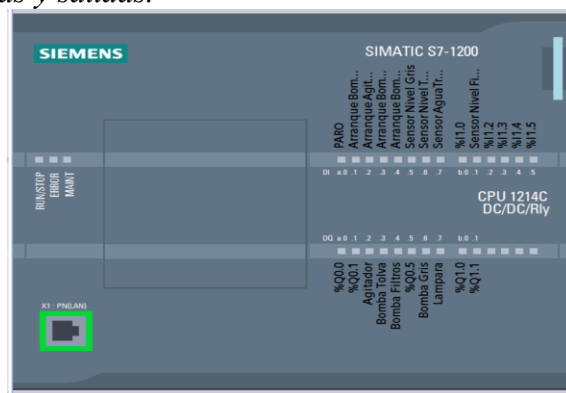
Cuando se realiza el primer tratamiento, el tiempo de sedimentación después de efectuado el proceso de coagulación y floculación es de 12 minutos de reposo, logrando acumular 160 litros de lodos que tienen que ser separados y puestos a disposición para poder continuar con el tratamiento. El segundo tratamiento muestra un comportamiento muy parecido a la curva de sedimentación del agua tratada por primera vez. En cambio, para la tercera cinética de sedimentación el tiempo bajó considerablemente en un 25% el tiempo de reposo, logrando disminuir a 9 minutos. La cinética que presenta la planta de tratamiento se

considera aceptable porque en 12 minutos se están clarificado 820 litros de agua floculada, lo cual indica un 82 % de recuperación de agua.

5.7 Programación de PLC

Ha llegado el momento de enfocar la atención en la elaboración del programa que será capaz de llevar a cabo el monitoreo, evaluación y ejecución de eventos. El PLC tiene una ventaja intrínseca sobre otros dispositivos de automatización y es que cuenta con el ciclo scan; esta herramienta permite leer constantemente las entradas (sensores) habilitadas, con esta información ejecuta la programación y modifica las salidas. En otras palabras, en un lapso de milisegundos evalúa los sensores, y realiza una acción en función de la programación previamente establecida. En la Figura 60 se muestran las entradas (parte superior derecha) y las salidas (parte inferior derecha). Para identificar una entrada de una salida el software tiene su nomenclatura única y una entrada se identifica con el símbolo de porcentaje acompañado de la letra I mayúscula y un subíndice que indica en qué bornes o tornillo se conectó físicamente. Ejemplo, el botón de PARO está conectado en el primer tornillo, para activarlo en el programa se indica que se conectó %I0.0, el sensor de nivel para el agua gris está conectado en %I0.5. Para las salidas o respuestas del PLC también se identifican de manera muy parecida, pero en lugar de usar una letra I latina se utiliza una letra Q mayúscula. Ejemplo; el agitador está conectado en el tornillo número dos de las salidas, el programa lo identificaría como %Q0.2 y la lámpara se conectó en el tornillo de salidas número siete en %Q0.7

Figura 60 PLC: entradas y salidas.



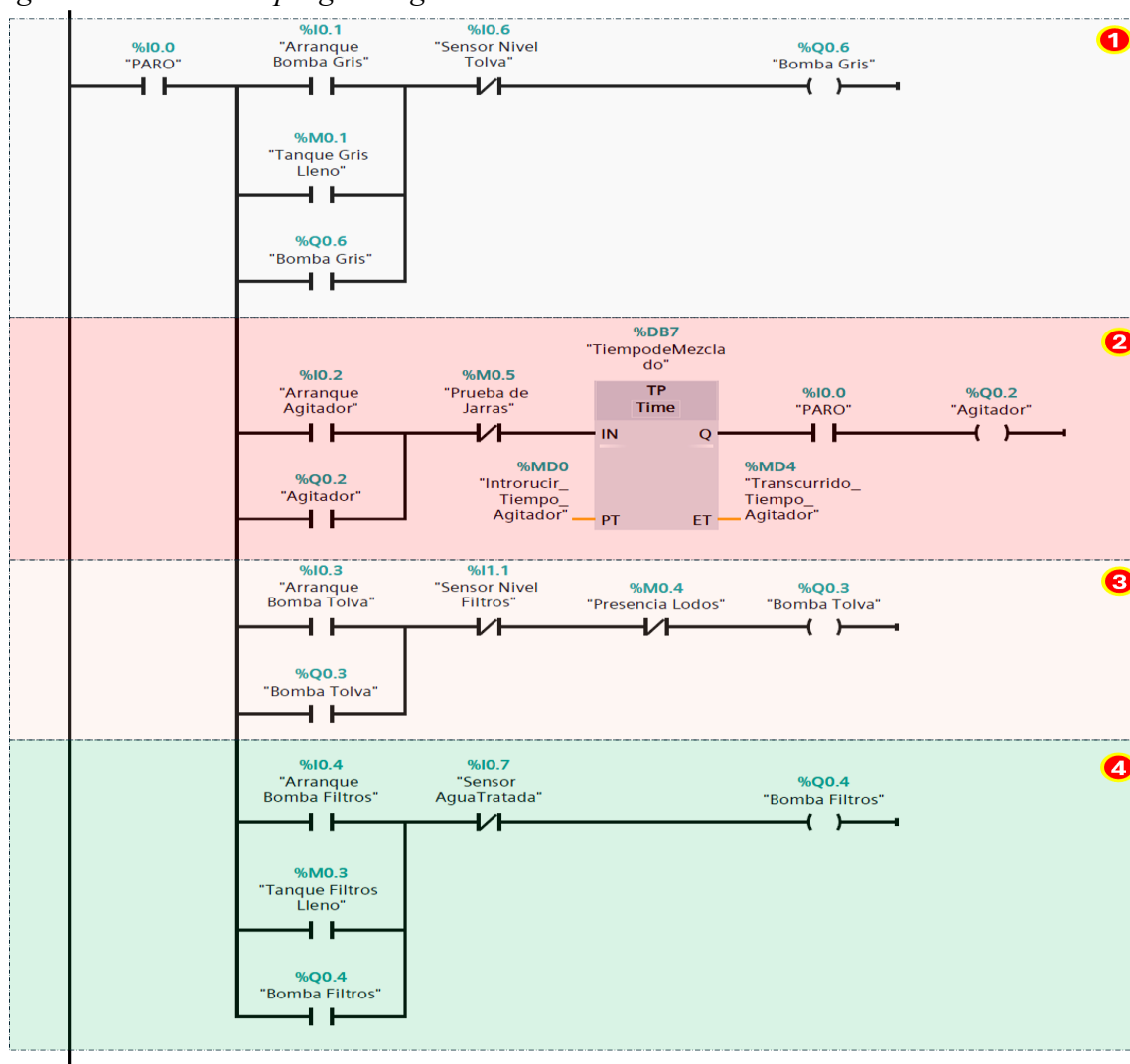
Para la programación del autómatas se utiliza un software de computadora que es proporcionado por el mismo fabricante de PLC, el programa general o programa completo se subdivide en network o segmentos, esta separación es de mucha utilidad para poder llevar un orden en la elaboración del algoritmo. Para el desarrollo del programa que gobernará la planta de tratamiento se cuenta con un programa general que se divide en cuatro segmentos, en el primero se muestra la ejecución manual y automática de la planta. En el segmento dos se podrá apreciar la habilitación de los sensores de nivel. En el segmento tres se desarrollarán las alarmas o alertas para la coagulación y floculación. En el último network se habilitará una lámpara que ayudará a observar el desarrollo de los procesos dentro de la Tolva.

En la Figura 61 se observa el espacio de programación correspondiente al automático y manual. Todo el programa se inicia con un botón (pulsador) de paro general que permitirá detener en caso de emergencia todo el proceso y estará conectado en la entrada física o tornillo denominado %I0.0.

En la sección 1 la programación da inicio con el encendido de la Bomba de Aguas Grises conectada en la salida %Q0.6 cuando llega a su nivel máximo el Tanque 1 que recibe las aguas provenientes de la lavadora dicho nivel máximo será explicado en el Network 2. Pero también puede ser encendida de forma manual con el botón de arranque conectado en la entrada física %I0.1. Una medida de seguridad para evitar el desbordamiento del agua en la Tolva es con ayuda del sensor de nivel instalado en la misma Tolva.

En la sección 2 para encender el mezclador o agitador conectado en la salida %Q0.2 primero es necesario confirmar que se realizaron las pruebas de jarras, después asignar tiempo por medio de pantalla HMI para establecer el tiempo de mezclado; este dato será almacenado en una memoria del PLC identificada como %MD0. Al oprimir el botón de arranque conectado en la entrada %I0.2 y se hayan cumplido las condiciones antes mencionadas el mezclador estará encendido el tiempo establecido por el usuario en la pantalla.

Figura 61 Network 1: programa general PLC



La sección 3 es la encargada de encender la Bomba de la Tolva conectada en la salida `%Q0.3` pero para poder encender primero se debe confirmar en la pantalla HMI que los lodos fueron separados de forma manual. El agua es transportada hasta el Tanque 4; aquí también se cuenta con un sensor de nivel conectado en la entrada `%I1.1` para proteger el desbordamiento.

En la sección 4 de la Figura 54 una vez recibida el agua procedente de la Tolva la Bomba de los Filtros conectada en la salida `%Q0.4` encenderá cuando el Tanque 3 presente su nivel máximo medido por el sensor; también puede ser activado de forma manual con el pulsador conectado en la entrada `%I0.4`. Toda el agua que pasa por los filtros se pone a disposición para reúso en el Tanque 4, aquí solo se monitorea que no desborde por eso el

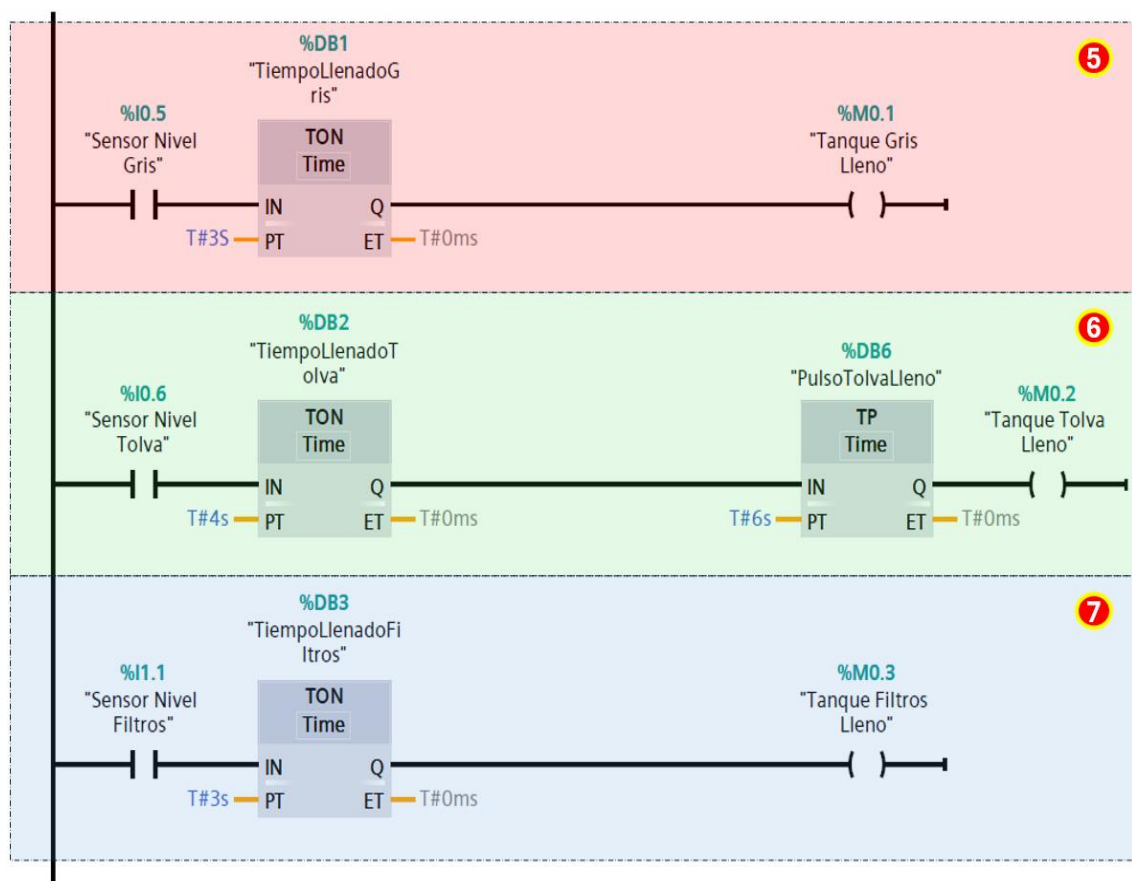
sensor de nivel conectado en la entrada %I0.7 apaga la Bomba de los Filtros cuando llegue a su máximo nivel.

En el Network 1 se detalló el funcionamiento manual y automático del programa que ejecutará constantemente el PLC, existen algunas condicionantes que deben cumplirse como medida de seguridad. En el Network 2 en la Figura 62 se muestran las condiciones para indicar que un tanque ha llegado a su nivel máximo.

El sensor de nivel en el Tanque 1 (aguas grises), Tolva (Tanque 2) y Tanque 3 (agua para filtros) son de un solo punto, con el movimiento del agua estarían encendiéndose y apagándose constantemente. Para asegurar que efectivamente ha llegado a nivel máximo, se condicionan con un retardo a la conexión y deben estar activos unos segundos en nivel máximo para considerarse que se han llenado. Para eso se utiliza un TON (Timer ON) que representa un retardo a la conexión, pasado un tiempo preestablecido se activará una salida, así para que el Tanque 1 se considere lleno debe estar activo el sensor de nivel al menos 3 segundos, para la Tolva el tiempo debe ser de 4 segundos, y para el tanque de filtros debe ser 3 segundos.

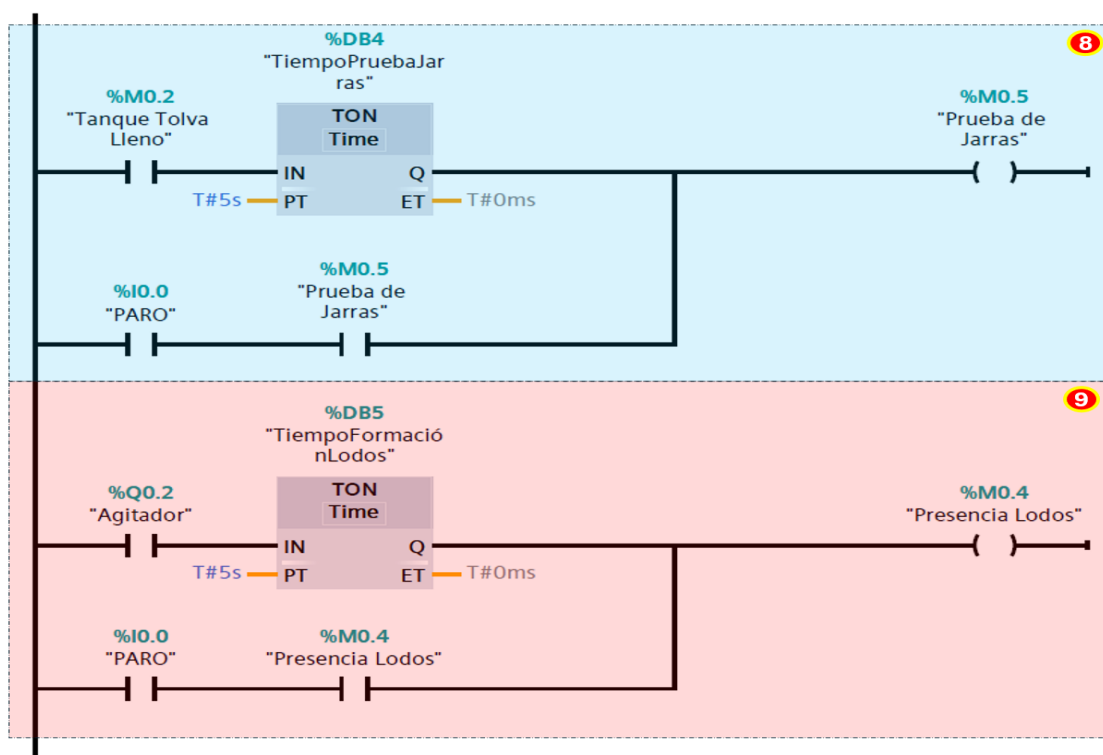
En el apartado 6 de Figura 62, en la Tolva a parte del TON se tiene otro temporizador adicional, este es del tipo TP (Timer Pulse) que significa temporizador de impulso, este temporizador permite mantener encendida una salida por un tiempo establecido y después la apaga. Es importante esta herramienta en la tolva, cuando esté trabajando el mezclador el sensor de nivel estará activándose y apagándose por la agitación del agua lo que provocaría inconsistencias en el proceso. La importancia de un TP radica en que no importa si se activa o desactiva el sensor de nivel, la salida (Tolva Llena) estará encendida solo el tiempo que la requerimos.

Figura 62 Network 2: eventos de llenado



En el Network 3 se detallan únicamente los eventos que se producen para llevar a cabo el tratamiento primario en la coagulación y floculación, estos eventos son la prueba de jarras y la separación de lodos, en la Figura 63 se muestra el programa realizado para estos eventos. En el apartado 8 una vez que la Tolva se encuentra llena pasados 5 segundos se activará un mensaje de alerta para “Prueba de Jarras” este mensaje aparecerá en la pantalla HMI y bloqueará la bomba y el agitador, hasta que se confirme la realización se podrá continuar con el proceso.

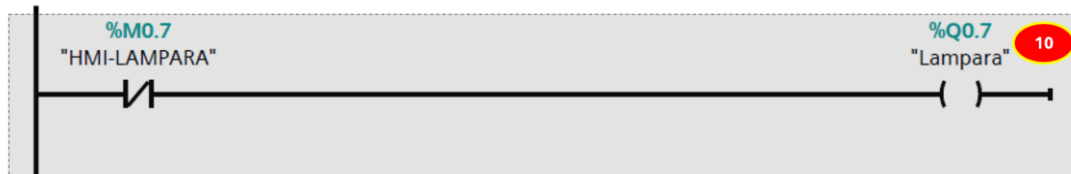
Figura 63 Network 3: eventos coagulación - floculación



En el apartado 9 de la Figura 63, se muestra una alerta por “Presencia de Lodos” dicha alarma será emitida una vez que se encienda el agitador y hayan transcurrido 5 segundos, de igual manera, en la pantalla HMI será notable la alerta y se debe confirmar para poder seguir con el proceso de tratamiento.

En la Figura 64 se muestra la configuración de una lámpara que nos permitirá observar y monitorear la evolución de los procesos dentro de la Tolva, está lámpara estará conectada en la salida %Q0.7 y será activada con ayuda de la pantalla.

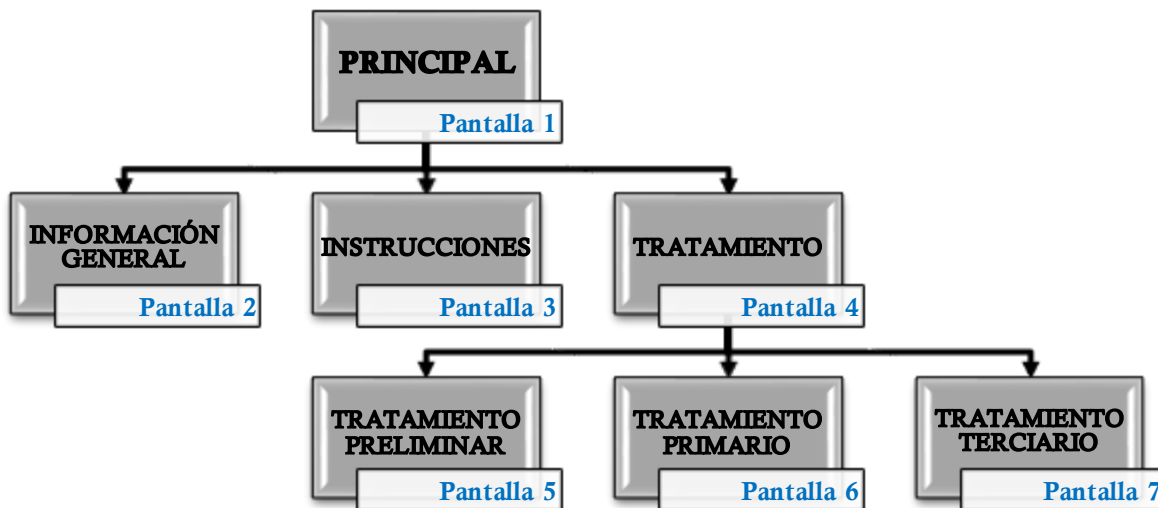
Figura 64 Network 4: encendido de lámpara.



5.8 Programación de pantalla HMI

En el apartado siguiente se explicará la manera en la que fue configurada la pantalla HMI, para poder configurar las funciones se necesita una programación orientada a objetos que precisarán de asignación de eventos o funciones específicas, por ejemplo, al oprimir un botón que cambie de página, o que se pueda introducir tiempo de encendido a través de un campo de datos en la pantalla. Para la configuración de la Planta de Tratamiento se utilizaron un total de 7 pantallas, en la Figura 58 se puede apreciar la distribución y jerarquía que tiene cada elemento.

Figura 65 Configuración de pantallas en HMI



Cuando se enciende la pantalla HMI, la pantalla principal que aparece corresponde a la portada del proyecto, ver Figura 66, aquí se encontrará una imagen de fondo que hace alusión al tema abordado. Se encontrarán 3 botones que fungen como menú y permitirán desplazarse o cambiar de pantalla. Al presionar el botón 1 la pantalla enviará a un esquema general de planta de tratamiento. El botón 2 al ser presionado enviará a un apartado donde se muestra la información general del proyecto y el botón 3 será quien muestre las instrucciones de funcionamiento en la operación del tratamiento.

Figura 66 Pantalla 1: página principal



En la pantalla principal cuando se presione el Botón 2 de información general el usuario será dirigido a una Pantalla 2 (ver Figura 67) en donde encontrará información que será una introducción a la tecnología. Cuando el usuario presione el Botón 3 será dirigido a la sección de instrucciones (ver Figura 68). Estas dos pantallas descritas solo son de carácter informativo, y cuentan respectivamente con un botón denominado HOME que al ser presionado conducirá al usuario a la página principal, básicamente cumple la función de “Atrás”.

Figura 67 Pantalla 2: información general



**UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
METROPOLITANA**

Principal

12/31/2000
10:59:39 AM

Este proyecto fue elaborado por **Daniel Miranda Cruz** estudiante del Posgrado en Energía y Medio Ambiente (PEMA) en la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa (UAMI). Corresponde al trabajo de tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias titulado **"Optimización y Automatización de Planta De Tratamiento de Aguas Residuales de Lavandería"** bajo la dirección y supervisión de la **Dra. Judith Cardoso Martínez**.

La automatización corresponde a la implementación de una herramienta que permita reducir las tareas rutinarias en el proceso de tratamiento de aguas residuales y que permitan incrementar la productividad reduciendo las actividades del personal encargado.

Esta tecnología cumple las tareas de monitoreo de niveles, emisión de alertas y mensajes, encendido y apagado de motores. Lo que permite reducir considerablemente las exigencias sensoriales y de supervisión del operador facilitando la responsabilidad de llevar a cabo de manera más sencilla la labor del tratamiento de aguas residuales.



1
HOME

Figura 68 Pantalla 3: instrucciones



**UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
METROPOLITANA**

Principal

12/31/2000
10:59:39 AM

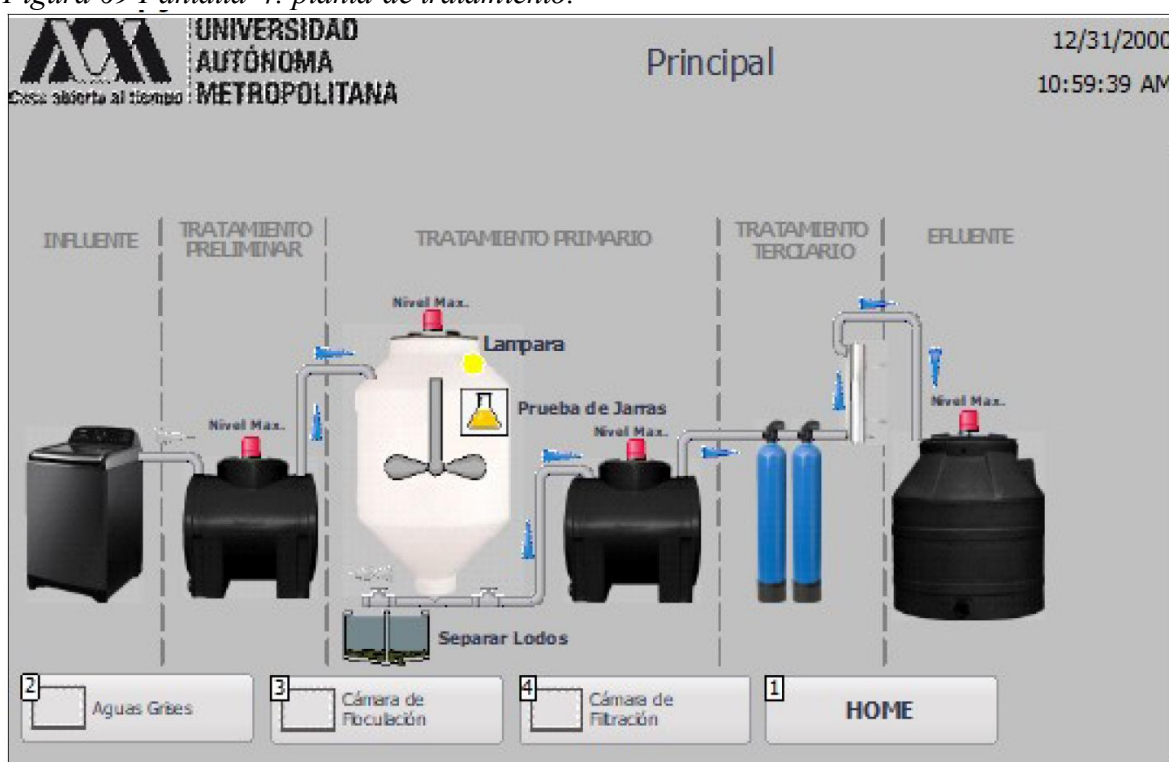
1. **LAVADO:** Se realiza para las primeras cargas con agua potable, hasta completar un tratamiento, posterior a esto los lavados son agua tratada que resulta del proceso de depuración.
2. **TANQUE 1:** Compone el tratamiento preliminar, aquí el agua gris será colectada hasta llegar al nivel máximo, una vez alcanzado será bombeado de forma automática o manual al Tanque 2 o Tolla para dar inicio al tratamiento primario.
3. **TOLVA:** Cuando se llega al nivel máximo, el sensor de nivel detendrá la bomba del Tanque 1, pasado algunos segundos se enviará una alerta llamada "Prueba de Jarras" indicando que se debe determinar la dosis a utilizar, se tiene que "Confirmar" en la pantalla para poder continuar con el mezclado.
4. **AGITADOR:** En la pantalla se debe introducir el tiempo de mezclado en mili segundos, una vez transcurrido el tiempo establecido se apagará automáticamente. En este proceso "Se generan lodos" que deben ser separado de forma manual con la valvula ubicada en la parte inferior, para poder continuar se debe "Confirmar Separación de Lodos" en la pantalla y poder encender la bomba que envía el agua al Tanque 3 culminando el tratamiento primario.
5. **Lampara:** Para observar los procesos al interior de la Tolla, se cuenta con una lampara que es encendida de forma manual con ayuda de la pantalla.
6. **FILTRACIÓN:** Al llegar el agua al Tanque 3 el sensor de nivel detendrá la bomba de la tolla para evitar desborde de agua. Aquí inicia el tratamiento terciario y consiste pasar el agua a través de un filtro de zeolita, uno de carbón activado y una lámpara UV para desinfectar el agua. El agua se envía al Tanque 4 que es el almacenamiento de agua tratada para reutilizarla nuevamente en el lavado de ropa. En este tanque se tiene un sensor de nivel que detendrá la bomba de los filtros en caso de llegar a su máximo nivel.



1
HOME

La sección que más uso tendrá será la Pantalla 4 (Ver Figura 69) aquí se mostrará el proceso completo de la planta de tratamiento; en esta sección se monitorea en tiempo real cualquier suceso que se esté llevando a cabo en el tratamiento. Para poder acceder será necesario en la pantalla principal accionar el botón correspondiente a tratamiento y de manera inmediata el usuario será dirigido al esquema general de planta de tratamiento. Esta sección es de carácter informativo ya que es el resultado de los procesos que se llevan a cabo en el tratamiento preliminar, el tratamiento primario y en el terciario. Los únicos objetos dinámicos son cuatro botones con lo que se podrá interactuar; el Botón 1 es el ya descrito botón de regreso que conducirá a la pantalla principal. El Botón 2 al ser accionado se encargará de dirigir al usuario al apartado de tratamiento preliminar, el Botón 3 conduce al tratamiento primario y el Botón 4 se encargará de trasladar al operador al tratamiento terciario.

Figura 69 Pantalla 4: planta de tratamiento.



Para interactuar con el tratamiento preliminar, el usuario precisa de acceder a la Pantalla 5 (ver Figura 70) en donde se encontrará con los elementos visuales que componen esta etapa de tratamiento como son el Tanque 1, una bomba y una lavadora. La bomba se accionará de manera automática al llegar al nivel máximo el Tanque 1, pero puede ser

accionada con el Botón 2 de manera manual cuando se considere necesario. El Botón 3 cumple la función de paro para la bomba si el operador lo considera necesario.

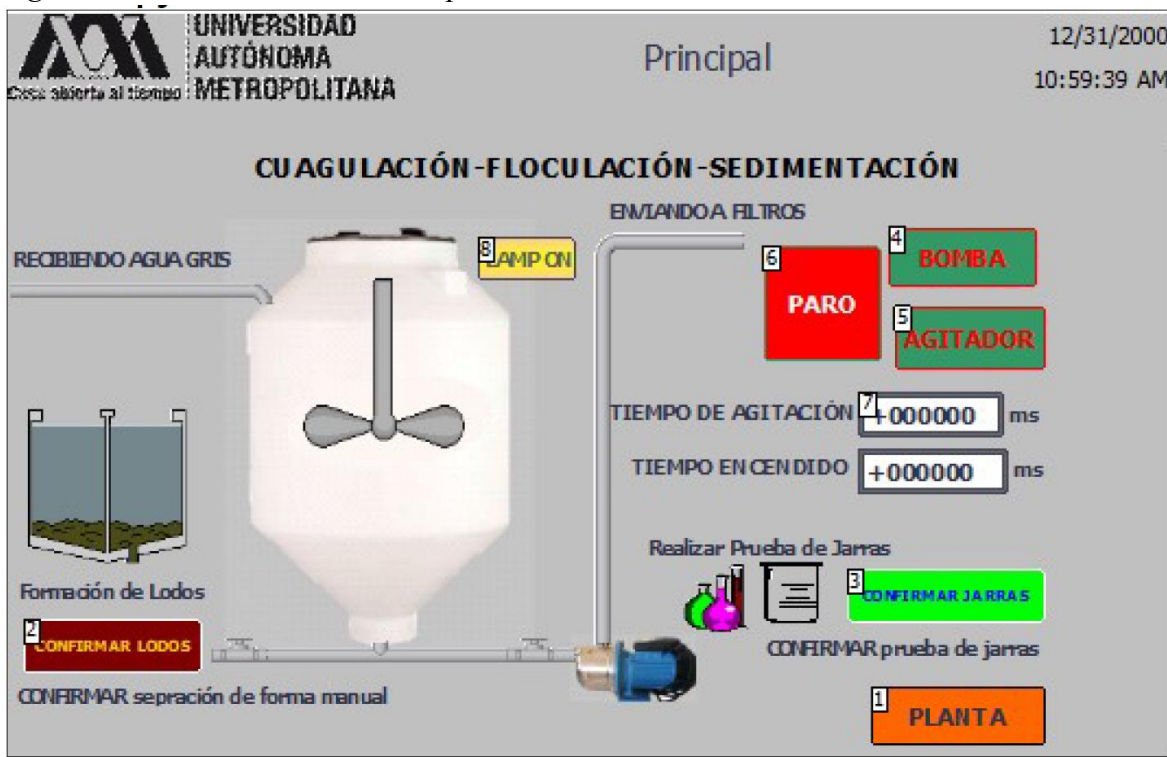
Figura 70 Pantalla 5: tratamiento preliminar



En la Pantalla 6 se observarán más elementos dinámicos en comparación con el resto de las ventanas, aquí el tratamiento primario requiere más elementos y procesos para su desarrollo, en la Figura 71 se pueden apreciar los componentes. El Botón 1 funciona como regreso a la planta de tratamiento que ilustra de manera general los procesos (Pantalla 4). El Botón 2 y 3 son elementos que estarán ocultos y se harán presentes cuando se tenga que confirmar la elaboración de prueba de jarras y la separación de lodos. El Botón 4 y 5 son elementos de arranque para la bomba y el agitador, respectivamente. La bomba ayudará a enviar el agua floculada al Tanque 3 antes de pasar a los filtros y el agitador ayudará a realizar el correcto mezclado del coagulante y floculante. Antes de que el agitador sea encendido el programa pedirá que se asigne un tiempo de agitación, este valor será introducido en el Campo 7 identificado con la leyenda “tiempo de agitación”. En caso de requerir que la bomba o el agitador se detengan se cuenta con el Botón 6 que permite ser un “stop” de emergencia si el operador así lo considera. En este proceso se cuenta con una lámpara en el interior de la

tolva para poder apreciar la evolución de las reacciones y formación de flóculos, dicho elemento puede ser encendido con el Botón 8.

Figura 71 Pantalla 6: tratamiento primario



La Pantalla 7 (ver Figura 72) representa la última etapa del tratamiento. Aquí se hace pasar el agua a través de un filtro de zeolita, un filtro de carbón activado y una lámpara de Luz U.V. terminando así el proceso de desinfección del agua. Para que el tratamiento comience es necesario que se encienda la bomba, puede ser de forma manual con el Botón 2 o de forma automática cuando el Tanque 3 llegue a su máximo nivel. Por seguridad se cuenta con un Botón 2 de PARO que detiene la bomba por alguna emergencia o también es interrumpida de forma automática cuando el Tanque 4 que almacenará toda el agua tratada llega a su nivel máximo.

Figura 72 Pantalla 7: tratamiento terciario.



CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES



6.1 Conclusiones

El tratamiento de aguas residuales de lavandería, mediante un proceso combinado de coagulación–floculación–sedimentación, seguido de filtración con zeolita y carbón activado, y desinfección con radiación UV, demostró una alta eficiencia en la remoción de contaminantes. Se alcanzaron niveles superiores al 90 % de reducción en turbidez permitiendo el reúso seguro del agua tratada en al menos tres ciclos de lavado consecutivos.

La implementación de un sistema automatizado de control, basado en tecnología PLC y una interfaz HMI, permitió optimizar las operaciones unitarias de la planta, simplificar la operación, reducir la intervención humana y habilitar el monitoreo en tiempo real de variables críticas. Esta automatización aseguró un control preciso, seguro y confiable del sistema, validando su factibilidad como una solución escalable.

El análisis de desempeño evidenció un ahorro hídrico significativo al reutilizar el efluente tratado, con una recuperación promedio del 82 % del volumen tratado. Esta eficiencia operativa posiciona al sistema como una estrategia efectiva frente a la creciente presión hídrica urbana e industrial, y como una alternativa tangible para reducir el consumo de agua en sectores con escasez.

El prototipo desarrollado puede adaptarse a otros sectores de alto consumo de agua como autolavados, restaurantes, sistemas de riego o unidades industriales, promoviendo el reúso responsable del recurso hídrico y contribuyendo a la sostenibilidad ambiental y económica del sector servicios. El diseño de un diagrama de flujo general y la selección de equipos accesibles permiten su implementación en pequeñas y medianas empresas, incluso en zonas rurales.

La hipótesis planteada se confirma al demostrar que tanto el proceso de tratamiento como la automatización resultan técnicas viables, escalables y replicables. El sistema presenta un alto potencial de impacto en zonas urbanas y rurales donde el acceso al agua es limitado y el tratamiento de efluentes resulta precario o inexistente, consolidándose como una solución innovadora para el manejo sustentable del recurso hídrico.

6.2 Recomendaciones

Para optimizar aún más la calidad del agua tratada y lograr una reducción significativa en los parámetros de Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Sólidos Disueltos Totales (TDS), se recomienda incorporar un tratamiento terciario avanzado basado en procesos de oxidación, como ozonización o ultrafiltración. La integración de estas tecnologías debe contemplar una adaptación cuidadosa al tren de tratamiento existente, seguida de pruebas de funcionamiento que validen su rendimiento en condiciones reales de operación.

Una vez consolidado el tren de tratamiento, se sugiere continuar con la recirculación del agua tratada y ampliar el número de ciclos de tratamiento analizados. En esta investigación se realizaron tres ciclos utilizando 16 cargas de lavado; sin embargo, futuras pruebas deberían considerar una mayor disponibilidad de ropa (o cargas equivalentes) para simular escenarios más exigentes, consolidar los datos y obtener resultados más robustos en términos de eficiencia y comportamiento hidráulico.

Desde la perspectiva de automatización, es recomendable integrar sensores químicos para el monitoreo de variables críticas como pH, turbidez y TDS, conectados a un sistema de control basado en PLC. Con los datos obtenidos, es posible configurar alertas en tiempo real que prevengan fallas o desviaciones, garantizando así la calidad del agua tratada. Se sugiere además avanzar hacia el control remoto mediante dispositivos móviles (celulares o tabletas), permitiendo operar la planta a distancia y optimizar la gestión operativa con menos requerimientos de personal.

A pesar de los logros obtenidos, esta investigación no abordó el componente económico del sistema propuesto. Por lo tanto, se considera prioritario en futuras etapas realizar una evaluación económica integral del proyecto. Esto implica cuantificar los costos de instalación, operación y mantenimiento, así como el análisis del retorno de inversión, considerando también escenarios de escalabilidad. Tal análisis permitirá validar la viabilidad financiera del sistema y fortalecer su propuesta de valor frente a inversionistas, instituciones o posibles usuarios comerciales.

Asimismo, se recomienda profundizar en el diseño de futuros sistemas desde una perspectiva técnico-económica. En este estudio, gran parte de las decisiones se tomaron con

base en la disponibilidad de equipos existentes y ajustes posteriores. Si bien esto permitió un desarrollo funcional, para garantizar la máxima eficiencia y sostenibilidad, se sugiere que cada componente del sistema sea seleccionado bajo criterios técnicos estandarizados, considerando variables como caudal, calidad del agua, eficiencia energética, compatibilidad entre procesos y facilidad de mantenimiento.

Por otro lado, se debe considerar el componente social como un factor clave para el éxito de la implementación de tecnologías de reúso de agua. En muchos contextos, incluida esta investigación, persisten barreras culturales y percepciones negativas sobre el uso de agua tratada, incluso si cumple con estándares de calidad. La aceptación social del agua residual tratada sigue siendo limitada por ideas arraigadas que asocian el reúso con insalubridad o riesgo. Por ello, se recomienda realizar campañas educativas, procesos participativos con los usuarios, y estrategias de comunicación científica que permitan informar, sensibilizar y cambiar la percepción social en torno al agua tratada. Este componente es esencial para lograr una transición efectiva hacia un modelo de economía circular del agua.

Finalmente, la tecnología desarrollada puede ser adaptada a nuevas unidades de negocio que demandan grandes volúmenes de agua, como autolavados, centros comerciales o complejos habitacionales. Su diseño modular y automatizado lo posiciona como una solución escalable, replicable y alineada con los objetivos de sostenibilidad hídrica, eficiencia operativa y responsabilidad ambiental.

Modelado predictivo de la DQO a partir de la turbidez en efluentes de lavandería: La alta correlación observada entre la turbidez y la demanda química de oxígeno en el efluente tratado (coeficiente de correlación ≈ 0.9) sugiere una oportunidad científica y tecnológica de gran valor: desarrollar un modelo predictivo que permita estimar la DQO a partir de la medición de turbidez. Dado que la DQO representa un parámetro clave para evaluar la carga orgánica en el agua y requiere métodos de laboratorio complejos, destructivos y lentos, contar con una estimación indirecta, rápida y confiable a través de sensores de turbidez puede optimizar significativamente los procesos de monitoreo y control en sistemas automatizados de tratamiento.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilera Martínez, P. (2002). *Programación de PLC'S [Tesis de Maestría]*. Universidad Autónoma de Nuevo León. Obtenido de <http://eprints.uanl.mx/id/eprint/919>
- Arbeláez Hoyos, D. M., & Gonzalo Yepes, J. (2019). *Diseño de un sistema de control automático para una planta de tratamiento de aguas residuales aplicado a una industria de templado y laminado de vidrio [Tesis de Licenciatura]*. Instituto Tecnológico Metropolitano. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.12622/415>
- Carreño-Mendoza, Á., Lucas-Vidal, L., Hurtado, E., Barrios-Maestre, R., & Silva-Acuña, R. (2018). Sistema de tratamiento de aguas superficiales para consumo humano en la Microcuenca del río Carrizal, Ecuador. *Revista Ciencia UNEMI*, 11(28), 76-87. doi:10.29076/issn.2528-7737vol11iss28.2018pp76-87p
- CONAGUA. (2019). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Introducción al tratamiento de aguas residuales municipales* (Vol. 25). Mexico, D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Obtenido de <https://www.gob.mx/conagua/documentos/biblioteca-digital-de-mapas>
- CONAGUA. (2022). *Numeragua Edición 2022*. Ciudad de México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Obtenido de https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/port_publicaciones.html
- CONAGUA. (2023). *Atlas del Agua en México 2023*. Ciudad de México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Obtenido de https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/port_publicaciones.html#:~:text=ATLAS%20DEL%20AGUA%20EN%20M%C3%89XICO%202023,-%C3%97&text=Colecci%C3%B3n%20de%20mapas%20que%20permiten,bienestar%20de%20la%20sociedad%20mexicana.

- CONAGUA. (2024). *Estadística del Agua en México 2023*. Ciudad de México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- García Moreno, E. (2020). *Automatización de Procesos Industriales, Robótica y Automática*. Valencia: Universitat Politècnica de Valencia.
- Gasca Santoyo, D., & Vallejo García, A. M. (2021). *Automatización de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales en el Municipio de Tlalnepantla de Baz [Tesis de Licenciatura]*. Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México. Obtenido de <https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/29491/1/TESIS%20DANIEL%20GASCA%20Y%20ALAN%20MISAELE%20VALLEJO%20%28Final%29%202021.pdf>
- Gómez Herrera, C. (1996). Detergency. Its main mechanisms. *Grasas y Aceites*, 46(6), 419-435. doi:<https://doi.org/10.3989/gya.1996.v47.i6.890>
- Guerrero Alcívar, M. S., Vázquez Pérez, A., & Rodríguez Gámez, M. (2018). La zeolita en la descontaminación de aguas residuales. *UNIVERSIDAD, CIENCIA y TECNOLOGÍA*, 2, 109-117. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/328052604_LA_ZEOLITA_EN_LA_DESCONTAMINACION_DE_AGUAS_RESIDUALES
- Hiray, A., Chinchkar, O., Butte, P., & Pyla, M. (2017). PLC and SCADA Based Sewage Water Treatment Plant. *International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering*, 5(5). doi:10.17148/IJREEICE.2017.5507
- INEGI. (2022). *Colección de estudios sectoriales y regionales. Conociendo la industria de Lavanderías y Tintorerías*. Aguascalientes. Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463905240>
- Infante Gil, S., & Zárate de Lara, G. P. (2012). *Métodos Estadísticos. Un enfoque Interdisciplinario*. Texcoco: Colegio de Postgraduados.
- Jiménez Andrango, T. C., & Medina de la Torre, J. T. (2017). *Influencia de la dilución del sulfato de aluminio en la eficiencia de la coagulación en la potabilización del agua*.

[Tesis de Licenciatura]. EPN, Quito. Obtenido de
<http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/18678>

- Kordana-Obuch, S., Starzec, M., Wojtón, M., & Sly, D. (2023). Greywater as a Future Sustainable Energy and Water Source: Bibliometric Mapping of Current Knowledge and Strategies. *Energies*, 16(2), 934-968. doi:<https://doi.org/10.3390/en16020934>
- Kuo Huang, A., Teresinha Veit, M., Trevisani Juchen, P., da Cunha Gonçalves, G., Moreno Palácio, S., & de Oliveira Cardoso, C. (2019). Sequential process of coagulation/flocculation/sedimentation- adsorption - microfiltration for laundry effluent treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(4). doi:<https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103226>
- Kvist, M., & Vikstrand, J. (2022). *A General SCADA Application for Water and Wastewater Treatment [Tesis de Maestría]*. Lund University. Obtenido de <https://lup.lub.lu.se/student-papers/search/publication/9089299>
- Lorenzo-Acosta, Y. (2006). Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación-floculación. *ICIDCA. Sobre los derivados de la caña de azúcar*, XL(2), 10-17. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223120664002>
- Mejía-Marchena, R., Maturana-Córdoba, A., Gómez-Cerón, D., Quintero-Monroy, C., Arismendy-Montes, L., & Cárdenas-Pérez, C. (2023). Industrial wastewater treatment technologies for reuse, recycle, and recovery: advantages, disadvantages, and gaps. *Environmental Technology Reviews*, 12(1), 205-250. doi:10.1080/21622515.2023.2198147
- Mena Martínez, A., Valle Cervantes, S., Rodríguez Rosales, M., Lucho Chigo, R., & Valencia Vázquez, R. (2020). Diseño de un sistema de monitoreo y control basado en PLC-HMI para una planta piloto tratadora de aguas residuales. *Multidisciplinas de la Ingeniería*, VIII(12), 29-39. Obtenido de <https://www.multidisciplinasdelaingenieria.com/Galeria.html>
- Molina Cruz, D. A., Cedeño Ferrin, J. A., Marcillo Parrales, K., Marcillo Parrales, A., Ortiz Hernandez, M., Mero Lino, E., & Merchán García, F. (2019). Módulo con

controladores lógicos programables para la enseñanza-aprendizaje de electrónica.
3ciencias . doi:<http://dx.doi.org/10.17993/IngyTec.2019.50>

Moreno Santos, A., Ríos Hurtado, J. C., & Flores Villaseñor, S. (2021). Carbón activado: generalidades y aplicaciones. *CienciAcierta*(66), 88-114. Obtenido de <http://www.cienciacierta.uadec.mx/2021/04/03/carbon-activado-generalidades-y-aplicaciones/>

Najlae Zaki, Nouhaila Hadoudi, Asmae Charki, Nihade Bensitel, Hossain El Ouarghi, Hassan Amhamdi, & M'hamed Ahari. (2023). Advancements in the chemical treatment of potable water and industrial wastewater using the coagulation–flocculation process. *Separation science and technology*. doi:10.1080/01496395.2023.2219381

Pillajo Kashijint, M. R., & Veintimilla Celi, A. F. (2020). *Diseño de un prototipo empleando zeolitas (Clinoptilolita) para reducir concentraciones de hierro y manganeso de aguas subterráneas para uso industrial [Tesis de Licenciatura]*. Universidad de Guayaquil. , Facultad de Ingeniería Química. Obtenido de <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/50301>

Rachana R., S. (2016). Automation of Sewage Treatment Plant using PLC & SCADA. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 5(11). doi:10.15662/IJAREEIE.2016.0511017

Ramírez Franco, J. H., Martínez Ávila, Ó. M., & Fernández Ospina, L. M. (2013). Removal of pollutants from industrial wastewater using activated carbon from pine pátula. *AVANCES Investigación en Ingeniería*, 10(1), 42–49. Obtenido de <https://revistas.unilibre.edu.co/index.php/avances/article/view/2725>

Ramírez-Revilla, S. A. (2021). Design and implementation of a water treatment system using ultraviolet radiation (UV) produced with photovoltaic energy. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 20(2), 863-873. doi:<https://doi.org/10.24275/rmiq/Ener2298>

Rodríguez Fernández-Alba, A., Letón García, P., Rosal García, R., Dorado Valiño, M., Villar Fernández, S., & Sanz García, J. M. (2006). *Tratamientos avanzados de*

aguas residuales industriales. Madrid: Fundación para el conocimiento madri+d CEIM. Obtenido de <http://www.madrid.org/bvirtual/BVCM001696.pdf>

Rosero, J. A., & Suárez Heredia, M. (2019). Efecto de la concentración de quitosano en la disminución de los sólidos suspendidos en el agua de ingreso a la planta de tratamiento de Bellavista. *FIGEMPA: Investigación Y Desarrollo*, 7(1), 19-24. doi:<https://doi.org/10.29166/revfig.v1i1.1330>

Rossel Bernedo, L. J., Rossel Bernedo, L. A., Ferro Mayhua, F., Ferro Gonzales, A. L., & Zapana Quispe, R. R. (2020). Radiación ultravioleta-c para desinfección bacteriana (coliformes totales y termotolerantes) en el tratamiento de agua potable. *Revista De Investigaciones Altoandinas-Journal of High Andean Research*, 22(1), 68-77. doi:<http://dx.doi.org/10.18271/ria.2020.537>

SACMEX. (2023). *Agua para todos, atención frente a la sequía*. Sistema de Aguas de la Ciudad de México. Obtenido de <https://www.sacmex.cdmx.gob.mx/comunicacion/nota/agua-para-todos>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2022). *NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación*. Recuperado el 15 de Julio de 2024, de https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022#gsc.tab=0

Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. (1998). *NOM-002-ECOL-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal*. Recuperado el 15 de Julio de 2024, de https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4881304&fecha=03/06/1998#gsc.tab=0

Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. (1998). *NOM-003-ECOL-1997, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público*. Recuperado el 16

de Julio de 2024, de <https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/3297/1/nom-003-semarnat-1997.pdf>

Secretaría de Salud. (2022,). *NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua*. DOF. Recuperado el 15 de Julio de 2024, de https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5650705&fecha=02/05/2022#gsc.tab=0

SEDEMA. (2017). *Registro de las Descargas de Aguas Residuales de la Ciudad de México 2017*. Ciudad de México: Secretaría de Medio Ambiente de la Ciudad de México. Obtenido de <https://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/media/DGEIRA/registrosambientales/RDAR/RDAR2017.pdf>

SEDEMA. (2018). *Reporte de las Plantas de Tratamiento de las Aguas Residuales 2017*. Ciudad de México: Secretaria del Medio Ambiente de la Ciudad de México. Obtenido de <https://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/media/DGEIRA/registrosambientales/RPTAR/ReportePTAR2018.pdf>

Sigalat Navarro, M. (2012). *Estudio del tratamiento físico-químico de las aguas residuales de una industria de procesado y congelado de verduras. [Tesis de Maestría]*. Universitat Politècnica de València. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10251/30140>

Tolentino Castillo, A., Benites Alfaro, E., & Cabrera Carranza, C. (2019). Aguas residuales de lavandería y su tratamiento por Oxidación fotocatalítica con dióxido de titanio (TiO₂) y luz ultra violeta (UV) en Instituto Nacional de Salud del Niño, San Borja-2017. *Revista Del Instituto De investigación De La Facultad De Minas, Metalurgia Y Ciencias Geográficas*, 22(43), 3-8. doi:<https://doi.org/10.15381/iigeo.v22i43.16680>

Valladares-Cisneros, M. G., Velario Cárdenas, C., De la Cruz Burelo, P., & Melgoza Alemán, R. M. (2016). Adsorbentes no-convencionales, alternativas sustentables

para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 16(31), 55-73. doi:10.22395/rium.v16n31a3

Vanegas Forero, Z. (2019). *Evaluación de un sistema de tratamiento para aguas residuales no domésticas en una lavandería industrial [Tesis de Maestría]*. Universidad de Manizales, Manizales, Colombia. Obtenido de <https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/handle/20.500.12746/4048>

Vera-Zelada, P., Vera-Zelada, L. A., Saucedo-Osorio, E. H., & Mamani-Arias, L. B. (2023). Efectividad de un filtro en la eliminación de detergentes de aguas residuales urbanas de Cajamarca, Perú. *Revista Amazónica De Ciencias Ambientales Y Ecológicas*, 2(2). doi:<https://doi.org/10.51252/reacae.v2i2.511>

Yang, W., Yumin, S., Jianlong, Z., & Yilin, F. (2015). Solution of Automatic Control System Based on PLC in Decentralized Wastewater Treatment. *Proceedings of the 4th International Conference on Information Technology and Management Innovation*, 235-239. doi:10.2991/icitmi-15.2015.41

Zhu, H., & Qiu, X. (2017). The application of PLC in sewage treatment. *Journal of Water Resource and Protection*, 9, 841-850. doi:10.4236/jwarp.2017.97056



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

ACTA DE EXAMEN DE GRADO

No. 00127

Matrícula: 2213801115

OPTIMIZACIÓN Y
AUTOMATIZACIÓN DE PLANTA DE
TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES DE LAVANDERÍA.

En la Ciudad de México, se presentaron a las 10:00 horas del día 15 del mes de agosto del año 2025 en la Unidad Iztapalapa de la Universidad Autónoma Metropolitana, los suscritos miembros del jurado:

DR. OSCAR ARMANDO MONROY HERMOSILLO
DR. MARIO ALBERTO VAZQUEZ PEÑA
DR. ANTONIO ZOILO MARQUEZ GARCIA

Bajo la Presidencia del primero y con carácter de Secretario el último, se reunieron para proceder al Examen de Grado cuya denominación aparece al margen, para la obtención del grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS (ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE)

DE: DANIEL MIRANDA CRUZ

y de acuerdo con el artículo 78 fracción III del Reglamento de Estudios Superiores de la Universidad Autónoma Metropolitana, los miembros del jurado resolvieron:

Aprobar

Acto continuo, el presidente del jurado comunicó al interesado el resultado de la evaluación y, en caso aprobatorio, le fue tomada la protesta.

REVISÓ

MTRA. ROSALBA SERRANO DE LA PAZ
DIRECTORA DE SISTEMAS ESCOLARES

DIRECTOR DE LA DIVISIÓN DE CBI

Román Linares Romero
DR. ROMAN LINARES ROMERO

PRESIDENTE

Oscar Armando Monroy
DR. OSCAR ARMANDO MONROY
HERMOSILLO

VOCAL

Mario Alberto Vazquez Peña
DR. MARIO ALBERTO VAZQUEZ PEÑA

SECRETARIO

Antonio Zoiло Marquez Garcia
DR. ANTONIO ZOILO MARQUEZ GARCIA