Apoyo en diseño y construcción de la planta de tratamiento de aguas residuales industriales de Humax Pharmaceutical.

Any Sánchez Callejas

Informe de práctica presentado para optar al título de Ingeniera Sanitaria

Modalidad de Práctica

Semestre de Industria

Asesor

Darío Naranjo Fernández, Doctor (PhD) Ingeniería Hidráulica y Saneamiento

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Sanitaria

Medellín, Antioquia, Colombia

2025

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA
1803

Cita	(Sánchez Callejas, 2025)
Referencia **Estilo APA 7 (2020)**	Sánchez Callejas, A. (2025). *Apoyo en diseño y construcción de la planta de tratamiento de aguas residuales industriales de Humax Pharmaceutical.* [Informe de práctica]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: http://bibliotecadigital.udea.edu.co

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

A mis padres, quienes han sido el pilar más importante en mi vida y en la construcción de este sueño. Gracias por enseñarme, desde pequeña, el valor de la honestidad, la disciplina y la responsabilidad, principios que hoy se reflejan en mi manera de ser y en mi formación como profesional. Este logro no es solo mío, también es de ustedes, porque cada esfuerzo, cada consejo y cada sacrificio han sido la base sobre la cual camino. Mi gratitud y amor hacia ustedes es infinito, y dedico este trabajo como muestra de que todo lo que soy y lo que seré, tiene sus raíces en lo que me han enseñado.

Agradecimientos

A Adriana Zapata y Juan David Gallego, por el apoyo constante a lo largo de mi formación universitaria. Durante el tiempo que trabajé con ustedes recibí no solo la flexibilidad necesaria y apoyo incondicional para continuar mis estudios, sino también valiosas enseñanzas que aportaron a mi desarrollo académico y especialmente en lo personal.

Al profesor Darío Naranjo Fernández, por su paciencia, profesionalismo y disposición constante para orientar con dedicación. Su manera de enseñar, siempre desinteresada y generosa, es un ejemplo inspirador de que el conocimiento se enriquece cuando se comparte.

Tabla de contenido

Resumen 9
Abstract 10
1. Introducción 11
2. Objetivos 13
2.1. Objetivo general 13
2.2. Objetivos específicos 13
3. Marco teórico 14
3.1. Coagulación 16
3.2. Floculación 16
3.3. Sedimentación 17
3.4. Filtración en lecho mixto 17
3.5. Adsorción con carbón activado granular (CAG) 18
3.6. Procesos de Oxidación Avanzada (POA) 18
4. Metodología 22
4.1. Caudales de dosificación, consumos de insumos químicos y selección de bombas 22
4.2. Floculador hidráulico en línea 23
4.3. Elaboración del diagrama de proceso e instrumentación (P&ID) 26
4.4. Selección de motobombas 26
4.5. Tubería perforada para distribución en tanque de oxidación avanzada 28
4.6. Diseño del sistema de aireación en el tanque de homogenización 31
5. Análisis de resultados 33
5.1. Caudales de dosificación, consumos de insumos químicos y selección de bombas 33
5.2. Floculador hidráulico en línea 35
5.3. Elaboración del diagrama de proceso e instrumentación (P&ID) 36
5.4. Selección de motobombas 38
5.5. Tubería perforada para distribución en tanque de oxidación avanzada 39
5.6. Diseño del sistema de aireación en el tanque de homogenización 41
6. Conclusiones y recomendaciones 43

6.1. Conclusiones 43
6.2. Recomendaciones 44
7. Referencias 45
8. Anexos fotográficos 46

Lista de tablas

Tabla 1. Resumen y comparación de agentes procesos de oxidación. 20
Tabla 2. Resultados de caudales de dosificación y consumos de químicos. 33
Tabla 3. Parámetros hidráulicos de diseño por tramo del floculador. 35
Tabla 4. Selección de motobombas para diferentes escenarios de la PTARI. 38
Tabla 5. Parámetros geométricos del sistema de distribución. 40
Tabla 6. Resultados hidráulicos para caudal de recirculación de 5 m^3/h. 41
Tabla 7. Resultados hidráulicos para caudal acumulado de 25 m^3/h. 41
Tabla 8. Resultados para el suministro de aire. 42

Lista de figuras

Figura 1. Opciones principales para el vertimiento de efluentes industriales. 15
Figura 2. Formas más usadas de tubos en sedimentación de alta tasa. 18
Figura 3. Mecanismo de degradación de contaminantes en un catalizador de dióxido de titanio soportado por CAG. 21
Figura 4. Punto de operación para dosificación de PAC, floculante y peróxido de hidrogeno. ... 34
Figura 5. Vista general del floculador. 36
Figura 6. Diagrama de proceso e instrumentación (P&ID) de la PTARI. 37
Figura 7. Curva de operación para AL RED 620-4. 39
Figura 8. Curva de operación para NGA 3A PRO. 39
Figura 9. Curva de operación para AL RED 600. 40
Figura 10. Esquema de distribución del sistema de aireación. 42

Siglas, acrónimos y abreviaturas

CAG	Carbón activado granular
PAC	Policloruro de aluminio
POA	Procesos de Oxidación Avanzada
PTARI	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales
TRH	Tiempo de Retención Hidráulico
RAS	Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (Colombia)

Resumen

El presente informe describe las actividades desarrolladas durante la práctica profesional en Ingeniería Sanitaria, realizadas en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales (PTARI) para la multinacional Humax Pharmaceutical, ubicada en el municipio de La Estrella, Antioquia. El objetivo principal fue apoyar el diseño y la construcción de la PTARI, la cual, al inicio del periodo de práctica, presentaba un avance físico aproximado del 30% y requería el desarrollo de diseños complementarios para alcanzar su operatividad.

Las actividades incluyeron: la determinación de dosis y caudales de insumos químicos, la selección y validación de bombas dosificadoras y motobombas centrífugas; el diseño y construcción de un floculador hidráulico en línea para el proceso de floculación, con planos elaborados en AutoCAD y supervisión en obra; la elaboración del diagrama de procesos e instrumentación (P&ID); y el diseño y construcción de una tubería perforada para el sistema de recirculación en la etapa de oxidación avanzada.

Al cierre del periodo de práctica, las actividades ejecutadas permitieron alcanzar aproximadamente el 70% de avance en la construcción e implementación de la PTARI, entregando los diseños, planos y cálculos técnicos correspondientes para la continuación del proyecto.

Palabras clave: PTARI, oxidación avanzada, diseño hidráulico, ozono, residuos farmacéuticos.

Abstract

This report describes the activities carried out during the professional internship in Sanitary Engineering, conducted at the Industrial Wastewater Treatment Plant (IWTP) for the multinational company Humax Pharmaceutical, located in the municipality of La Estrella, Antioquia. The main objective was to support the design and construction of the IWTP, which, at the beginning of the internship period, had an approximate physical progress of 30% and required the development of complementary designs to achieve operational readiness.

The activities included: determining the dosage and flow rates of chemical inputs; selecting and validating dosing pumps and centrifugal pumps; designing and constructing an in-line hydraulic flocculator for the flocculation process, with plans developed in AutoCAD and on-site supervision; preparing the process and instrumentation diagram (P&ID); and designing and constructing a perforated pipe for the recirculation system in the advanced oxidation stage.

By the end of the internship period, the executed activities allowed the project to reach approximately 70% completion in the construction and implementation of the IWTP, delivering the corresponding designs, drawings, and technical calculations for the continuation of the project.

Keywords: IWTP, advanced oxidation, hydraulic design, ozone, pharmaceutical waste.

1. Introducción

En Colombia, al igual que en muchos países, se ha replanteado la práctica generalizada de combinar los vertimientos industriales con las aguas residuales domésticas dentro de un mismo sistema de tratamiento. Esto en parte, se debe a que los residuos industriales pueden contener compuestos con efectos tóxicos que pueden generar reacciones indeseadas incluso en concentraciones muy bajas, afectando la eficiencia del tratamiento convencional y representando un riesgo para la salud humana y el ambiente.

Como referencia internacional, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US-EPA, s.f.) ha identificado más de 120 contaminantes prioritarios, entre ellos compuestos orgánicos volátiles, pesticidas, metales pesados y subproductos industriales, caracterizados por su toxicidad aguda, mutagenicidad, teratogenicidad o carcinogenicidad, lo que ha llevado a regular estrictamente su vertimiento desde fuentes industriales.

Entre estos contaminantes, los productos farmacéuticos destacan por su complejidad estructural, su resistencia a la degradación biológica y su potencial impacto sobre la salud humana y la vida acuática, incluso en concentraciones muy bajas. Su origen está asociado tanto al consumo humano como a los procesos industriales de fabricación y limpieza en laboratorios y plantas productoras. (Jaimes Urbina & Vera Solano, 2020).

Las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales (PTARI) son sistemas diseñadas específicamente para remover, transformar o reducir la concentración de contaminantes provenientes de procesos productivos, mediante operaciones fisicoquímicas, biológicas o tecnologías avanzadas. A diferencia de las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas, las PTARI suelen operar con caudales más bajos en comparación con los sistemas municipales, pero con mayor carga contaminante y es común que implementen soluciones más eficientes, compactas o innovadoras, adaptadas a las características particulares del vertimiento industrial. (Metcalf & Eddy, 2014).

Dichos sistemas responden al cumplimiento normativo ambiental vigente en el país, como la Resolución 0631 de 2015 (MADS, 2015), que regula los límites máximos permisibles para vertimientos puntuales en cuerpos de agua y alcantarillado.

La empresa Humax Pharmaceutical, dedicada a la fabricación de medicamentos de alto costo, ha iniciado la implementación de una PTARI, con el fin de mitigar los impactos derivados de sus procesos productivos y cumplir con la legislación ambiental vigente en el país. Esta PTARI incorpora una línea de tratamiento basada en procesos fisicoquímicos y de oxidación química avanzada, orientada a la eliminación de contaminantes farmacéuticos resistentes. La complejidad técnica de esta solución se convierte en una oportunidad académica y profesional valiosa para el área de la Ingeniería Sanitaria.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Brindar acompañamiento técnico en diseño y construcción de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales (PTARI) de Humax Pharmaceutical, con el fin de contribuir al cumplimiento de la normativa ambiental vigente para vertimientos puntuales de agua residual.

2.2. Objetivos específicos

- Verificar y ajustar parámetros hidráulicos de diseño en las diferentes unidades de tratamiento de la PTARI.
- Evaluar y optimizar las concentraciones de los reactivos químicos empleados en el sistema de oxidación avanzada, según la carga contaminante esperada.
- Acompañar técnicamente las actividades de implementación en obra, asegurando la correcta instalación y funcionalidad de los componentes del sistema.

3. Marco teórico

Las aguas residuales son, básicamente, la fracción líquida de los residuos que resultan por parte de las diferentes actividades humanas y que presentan una carga contaminante suficiente para requerir tratamiento antes de su disposición final en cuerpos de agua receptores, suelo o bien sea para reúso. Estas aguas pueden contener sólidos en suspensión, materia orgánica biodegradable, microorganismos patógenos, compuestos químicos y otros contaminantes que si no se tratan y se permite su acumulación pueden volverse sépticas, afectando tanto a la salud pública como al equilibrio de los ecosistemas acuáticos. Por esta razón, estas aguas residuales requieren ser recolectadas, tratadas y dispuestas adecuadamente.

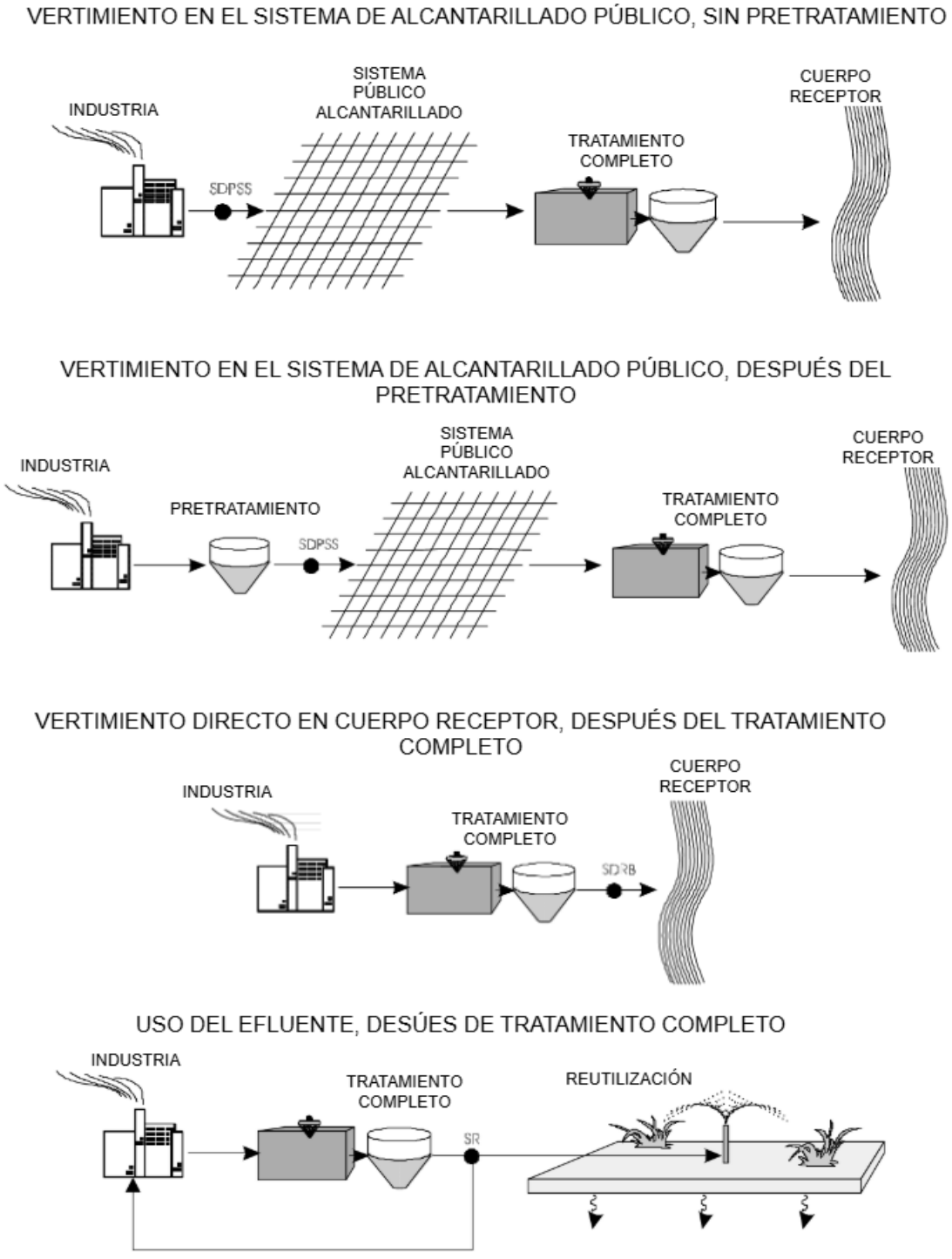
Según Von Sperling (2015), una clasificación común distingue entre aguas residuales domésticas e industriales. Las primeras provienen de viviendas y actividades de saneamiento básico, presentando características relativamente homogéneas y una mayor proporción de materia orgánica biodegradable; por esta razón, los sistemas de tratamiento convencionales (como lodos activados, lagunas o filtros percoladores) suelen ser efectivos para este tipo de aguas.

Por otro lado, las aguas residuales industriales presentan una composición mucho más variable, determinada, por supuesto, por el proceso productivo específico. Pueden contener compuestos tóxicos, persistentes, metales pesados, aceites, solventes o contaminantes emergentes que no son tratados adecuadamente en sistemas convencionales. Incluso en concentraciones bajas, muchos de estos contaminantes pueden interferir con procesos biológicos y representar riesgos ambientales o sanitarios significativos.

Existen variadas opciones para la gestión de los efluentes industriales, como descarga directa al cuerpo receptor después de un tratamiento completo, vertimiento en el sistema de alcantarillado público sin o con pretratamiento, o su reúso, tal y como se muestra en la Figura 1. La elección del esquema más adecuado debe considerar tanto la naturaleza de los contaminantes presentes como las capacidades del sistema receptor.

Aunque el vertimiento al alcantarillado público es una alternativa económica, implica riesgos operativos, sanitarios y ambientales cuando los efluentes contienen sustancias tóxicas o de difícil biodegradación. Como señala Von Sperling (2015), este tipo de sustancias interfieren

Figura 1.
Opciones principales para el vertimiento de efluentes industriales.



Fuente: adaptado de Von Sperling,2007.

con el tratamiento biológico convencional, pueden generar toxicidad en los lodos, e inclusive persistir en el efluente final. Además, el control y monitoreo de los vertimientos industriales por parte de las entidades públicas se convierte en un reto técnico y logístico muy grande, dado el carácter heterogéneo y cambiante de los residuos generados por las distintas industrias a escala nacional.

En consecuencia, la decisión más segura es realizar el tratamiento completo en la propia industria, con el fin de garantizar el cumplimiento de los límites permisibles antes del vertimiento. Esta es precisamente la estrategia adoptada por la empresa Humax Pharmaceutical, la cual implementa un sistema de tratamiento fisicoquímico y avanzado que permite la remoción de los contaminantes en cada una de sus etapas, antes de su descarga al cuerpo de agua receptor.

3.1. Coagulación

La coagulación, en combinación con la floculación, tiene como objetivo transformar las partículas suspendidas y coloidales en flóculos de un tamaño suficiente para que luego puedan ser removidas por sedimentación, flotación o filtración. El proceso consiste en agregar un producto químico orgánico o inorgánico (coagulante) como el sulfato de aluminio, que desestabiliza dichas partículas, permitiendo que las fuerzas atractivas como las de Van der Waals predominen sobre las repulsivas y una vez esto suceda las partículas podrán acercarse y aglomerarse entre sí. (Davis, 2010).

Si bien la coagulación por sí sola no logra una remoción significativa de contaminantes en la PTARI de Humax Pharmaceutical, cumple un papel importante en las etapas posteriores de tratamiento que requieren una calidad de agua menos turbia.

3.2. Floculación

Las partículas pequeñas y previamente desestabilizadas por la coagulación comienzan a agruparse mediante colisiones, con moléculas del fluido en el que se encuentran, para formar flóculos más grandes y sedimentables. La eficiencia de este proceso llamado floculación depende en gran medida del gradiente de velocidad (G) y del tiempo de mezcla, para esto el gradiente

debe ser suficiente para mantener las partículas en contacto, pero no tan elevado como para romper los flóculos formados. (Davis, 2010).

Es común emplear productos químicos que ayudan a fortalecer la estructura del flóculo; en la PTARI de Humax Pharmaceutical se optó por el uso de un floculante iónico altamente soluble en agua a base de poliacrilamida con el fin de optimizar el proceso.

3.3. Sedimentación

Después de los procesos de coagulación y floculación, el agua es conducida a la unidad de sedimentación, donde los flóculos que se formaron se separan por acción de la gravedad, formando en el fondo del tanque un lodo que es removido periódicamente, mientras que el agua clarificada continúa su paso hacia los procesos siguientes. Este proceso depende de factores como el Tiempo de Retención Hidráulico (TRH) y la velocidad ascensional.

Sedimentación de alta tasa

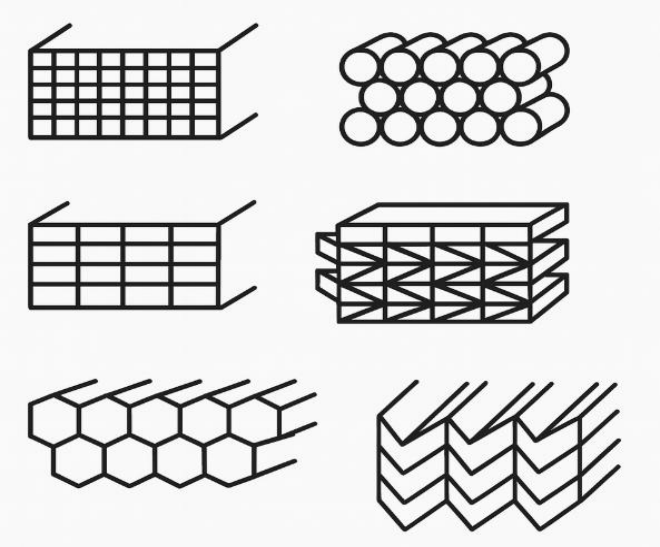
En espacios reducidos, como en el caso de Humax Pharmaceutical, resulta viable y apropiado implementar un tipo de sedimentación denominado sedimentación de alta tasa, la cual se basa en el uso de placas paralelas inclinadas. En este caso particular, dichas placas adoptan una configuración de celdas hexagonales, como se observa en la Figura 2, con el propósito de aumentar el área efectiva de sedimentación, permitiendo que los flóculos sedimenten en tiempos más cortos. (Montiel Palma, 2001).

3.4. Filtración en lecho mixto

Permite la separación del material particulado y coloidal remanente, mediante un proceso físico que se presenta cuando el agua fluye a través del lecho filtrante, que en este caso es una doble capa de arena y antracita, quedando atrapados en los poros de estos materiales. Esta unidad requiere limpieza periódica por medio del retrolavado para mantener su eficiencia.

Figura 2.

Formas más usadas de tubos en sedimentación de alta tasa.



Fuente: adaptado de Montiel Palma, 2001.

3.5. Adsorción con carbón activado granular (CAG)

Después de la etapa de filtración con arena y antracita, el agua pasa a través de un segundo filtro, pero esta vez constituido por carbón activado granular (CAG). Esto da paso a un proceso fisicoquímico llamado adsorción, donde las moléculas presentes son retenidas en los poros de este material debido a las fuerzas de valencia o condensación molecular. Según Eckenfelder (2009), este tipo de adsorbente es altamente eficaz en cuanto a la eliminación de compuestos orgánicos como Demanda Química de Oxígeno (DQO), color, fenoles y otros subproductos que pueden estar presentes en aguas residuales industriales, especialmente en aquellas generadas por la industria farmacéutica.

3.6. Procesos de Oxidación Avanzada (POA)

Luego del paso del agua residual a través de los filtros mixtos y del CAG, esta ingresa a un tanque de oxidación avanzada. Desde allí, el flujo es extraído mediante una motobomba, que

impulsa el agua a través de un sistema secuencial en el que se dosifican los principales agentes oxidantes: primero se inyecta peróxido de hidrógeno (H_2O_2), seguido de ozono (O_3), y posteriormente se expone a radiación ultravioleta (UV). Finalmente, el agua pasa por un filtro de CAG impregnado con dióxido de titanio (TiO_2), que actúa como catalizador. El agua tratada retorna al tanque de oxidación para completar múltiples ciclos, incrementando así la eficiencia del proceso y asegurando una mayor remoción de contaminantes persistentes.

Los procesos de oxidación química consisten en la aplicación de un agente oxidante para transformar los contaminantes orgánicos presentes en el agua residual, ya sea en dióxido de carbono y agua o en compuestos menos nocivos. Mientras tanto, los Procesos de Oxidación Avanzada (POA) se diferencian de la oxidación química convencional por su capacidad de generar radicales hidroxilo (•OH), especies altamente reactivas y no selectivas que atacan una amplia gama de compuestos orgánicos, incluso aquellos recalcitrantes o tóxicos. Estas tecnologías emergieron en los años 90 como alternativas efectivas para el tratamiento de residuos industriales peligrosos, lixiviados, lodos y afluentes terciarios. (WEF, 2018).

La generación de radicales puede lograrse mediante combinaciones de agentes oxidantes (peróxido de hidrógeno, ozono), radiación ultravioleta y catalizadores como el dióxido de titanio, mostrados en la Tabla 1. Estos procesos no producen sólidos como subproductos, lo que representa una ventaja frente a otros tratamientos, aunque, tiene una gran limitante y es el alto costo energético y químico.

Dióxido de titanio como catalizador, usando carbón activado como soporte

Como se mencionó, una de las fases del POA en la PTARI es el paso del agua a través de un filtro de CAG impregnado con dióxido de titanio. El dióxido de titanio es uno de los catalizadores más utilizados en los POA, debido a su alta estabilidad química, bajo costo y capacidad para absorber radiación ultravioleta (UV), lo que permite la generación de radicales hidroxilo. El CAG actúa no solo como medio adsorbente sino también como soporte estructural del catalizador.

Esta configuración permite que los contaminantes sean primero adsorbidos en la superficie porosa del CAG, acercándolos a los sitios activos del dióxido de titanio, donde ocurre

la degradación. Así, se mejora la transferencia de especies reactivas y se optimiza la eficiencia del proceso al favorecer la difusión de contaminantes y su contacto con los radicales generados sobre la superficie catalítica irradiada, lo cual se representa en la Figura 3.

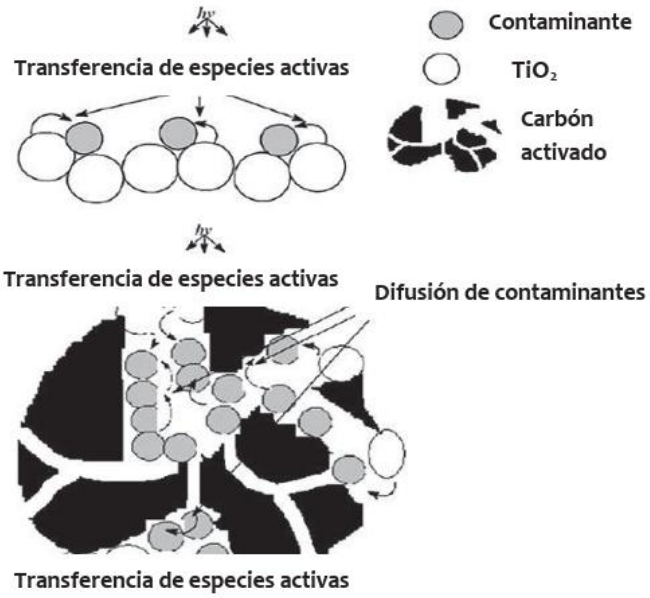
Tabla 1.
Resumen y comparación de agentes procesos de oxidación.

Agente o proceso de oxidación	Compuestos orgánicos tratados	Ventajas	Desventajas
Peróxido de hidrógeno (H_2O_2)	Aldehídos, aminas	Fácil de transportar, almacenar y aplicar. Efectividad comprobada. Se descompone en oxígeno.	Número limitado de compuestos tratados sin catalizador.
Ozono (O_3)	Colorantes, tintes, fenoles y compuestos fenólicos	Tiempo de contacto corto. Se descompone en oxígeno. Alta efectividad comprobada para convertir materiales orgánicos refractarios en compuestos biodegradables.	Requiere equipo costoso para su generación *in situ*. Alto consumo energético.
Oxidación UV	Solventes clorados, explosivos (p. ej., DNT y TNT), hidrocarburos (benceno, tolueno, etilbenceno, xilenos), pesticidas, PCB	Genera radicales hidroxilo. Trata una amplia variedad de compuestos orgánicos.	Limitada por la transmisividad UV del agua residual. El equipo puede ser costoso y requerir mucho espacio.

Fuente: elaborado a partir de WEF (2008).

Figura 3.

Mecanismo de degradación de contaminantes en un catalizador de dióxido de titanio soportado por CAG.



4. Metodología

El desarrollo de la práctica profesional se realizó bajo un enfoque cuantitativo, dado que las decisiones de diseño, selección y validación de equipos se basaron en cálculos hidráulicos, balances de masa y criterios normativos. Adicionalmente, se incorporó un componente cualitativo, al ser necesario corroborar en campo la disposición real de equipos y tuberías, ajustar diseños y actualizar la documentación técnica de la PTARI.

4.1. Caudales de dosificación, consumos de insumos químicos y selección de bombas

Se partió de las dosis óptimas entregadas por las pruebas de tratabilidad del agua residual industrial y se aplicaron balances de masa en estado estacionario, con el fin de determinar los caudales de dosificación y consumos diarios y mensuales de cada insumo. La Ecuación 1 se utilizó para todos los insumos, ajustando las conversiones de unidades según la presentación comercial del producto a usar.

$$Q_{dosis} = \frac{D \times Q \times 1000}{C}$$

Ecuación 1

Donde:

Q_{dosis}: caudal de dosificación (L/h)

D: dosis óptima (mg/L)

Q: caudal de diseño de la PTARI (m^3/h)

C: concentración de la solución madre (mg/L o % p/p)

A partir de los caudales estimados y corregidos, se revisaron las curvas características del fabricante para ubicar los puntos de operación dentro de la zona estable del equipo.

4.2. Floculador hidráulico en línea

Se aplicaron los criterios establecidos en el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS) 2017 (MVCT, 2017) y referencias de literatura técnica, evaluando parámetros como el TRH, gradiente de velocidad (G), etc. Inicialmente se supusieron valores para el diámetro de la tubería, el TRH y el número de codos en función de las características de cada segmento y del espacio disponible en la obra y con estos supuestos iniciales se verificó el cumplimiento de los intervalos. Luego, de forma inversa, se recalcularon las dimensiones y pérdidas hidráulicas con las ecuaciones mostradas a continuación. Las dimensiones finales, disposición y accesorios fueron plasmados en planos técnicos elaborados en AutoCAD.

La velocidad del flujo se calculó a partir del caudal de diseño y el área de la sección transversal de la tubería, como se muestra en la Ecuación 2.

$$v = \frac{Q_d}{A_s}$$

Ecuación 2

Donde:

v: velocidad del flujo (m/s)

Q_d: caudal de diseño (m^3/h)

A_S: área de sección transversal de la tubería (m^2)

La longitud específica de cada uno de los tres tramos, con diferente diámetro, se calculó a partir un tiempo de retención hidráulico supuesto (TRH), caudal de diseño y área de la sección transversal de la tubería, como se muestra en la Ecuación 3. La suma de estas longitudes específicas constituye la longitud total del floculador.

$$L_e = \frac{TRH \times Q_d}{A_s}$$

Ecuación 3

Donde:

L_e: longitud específica del tramo (m)

TRH: Tiempo de Retención Hidráulico (s)

Q_d: caudal de diseño (m^3/h)

A_S: área de sección transversal de la tubería (m^2)

Las pérdidas de energía por accesorios y fricción se estimaron con coeficientes típicos para PVC y codos estándar, y se sumaron para obtener la pérdida total del tramo, como se muestra en las Ecuaciones 4 a 8.

$$h_1 = \frac{K_c \times N_c \times v^2}{2g}$$

Ecuación 4

Donde:

h_1: pérdida por accesorios (m)

K_c: coeficiente por codos (3,5)

N_c: número de codos en el tramo

v: velocidad del flujo (m/s)

g: gravedad (9,81 m/ s^2)

$$h_2 = \left(\frac{n \times L_e}{P^{\frac{2}{3}}}\right)^2 \times \frac{v^2}{2g}$$

Ecuación 5

Donde:

h_2: pérdida por fricción (m)

n: coeficiente de Manning para PVC (0,009)

L_e: longitud específica del tramo (m)

P: perímetro mojado (m)

v: velocidad del flujo (m/s)

g: gravedad (9,81 m/ s^2)

$$h_t = h_1 + h_2$$

Ecuación 6

Donde:

h_1: pérdida por accesorios (m)

h_2: pérdida por fricción (m)

h_t: pérdida de carga total del tramo (m)

Cada tramo recto del floculador queda delimitado por codos de 90°; dos codos conforman un cambio de sentido del flujo en esta configuración "serpenteada". Así, el número de segmentos se determina a partir de la Ecuación 7. Definido esto, la longitud de cada segmento se obtiene dividiendo la longitud especifica de tramo entre el número de segmentos (Ecuación 8).

$$N_s = \frac{N_c}{2} + 1$$

Ecuación 7

Donde:

N_s: número de segmentos

N_c: número de codos en el tramo

$$L_s = \frac{L_e}{N_s}$$

Ecuación 8

Donde:

L_s: longitud total del segmento (m)

L_e: longitud específica del tramo (m)

N_s: número de tramos

Con lo anterior, se procede a determinar el gradiente de velocidad y se verifica que los valores estén dentro del intervalo recomendado, según la Ecuación 9.

$$G = \sqrt{\frac{h_t \times g}{v \times TRH}}$$

Ecuación 9

Donde:

G: gradiente de velocidad (L/s)

h_t: pérdida de carga total (m)

g: gravedad (9,81 m/ s^2)

v: viscosidad cinemática (m^2/s)

TRH: Tiempo de Retención Hidráulico (s)

4.3. Elaboración del diagrama de proceso e instrumentación (P&ID)

Para la elaboración del diagrama de procesos e instrumentación (P&ID), utilizando el *software* AutoCAD, se siguió un procedimiento sistemático que inició con la recopilación de la información técnica disponible, incluyendo el boceto inicial del sistema y la documentación de diseño preliminar. Adicionalmente, se hicieron visitas de campo para observar directamente la configuración real de la PTARI y verificar la ubicación, interconexión y estado de cada equipo.

4.4. Selección de motobombas

Para la selección de las motobombas requeridas en la PTARI, se hizo inicialmente el levantamiento del recorrido de tuberías y la determinación de la elevación geométrica en cada tramo de bombeo, con el fin de estimar las pérdidas de carga por fricción y accesorios.

Con estos valores, se calculó la altura manométrica total (Hm) para cada escenario operativo. Los puntos de operación se validaron sobre las curvas características de las diferentes motobombas, evaluando eficiencia, materiales de construcción y compatibilidad con el fluido a bombear, junto con la asesoría de los proveedores.

La pérdida de carga por fricción se calculó mediante la Ecuación 10 (ecuación de Darcy–Weisbach).

$$H_f = f \times \frac{L_T}{D} \times \frac{v^2}{2g}$$

Ecuación 10

Donde:

H_f: pérdida por fricción (m)

f: coeficiente de fricción de Darcy-Weisbach

L_T: longitud total de tubería (m)

D: diámetro interno de la tubería (m)

v: velocidad del flujo (m/s)

g: gravedad (9,81 m/ s^2)

Las pérdidas localizadas se estimaron por medio de la Ecuación 11.

$$H_a = K \times \frac{v^2}{2g}$$

Ecuación 11

Donde:

Ha: pérdida por accesorios (m)

K: coeficiente equivalente de pérdidas por accesorios

v: velocidad del flujo (m/s)

g: gravedad (9,81 m/ s^2)

En aquellos tramos que incluyen filtros, se incorporaron pérdidas adicionales debido a la resistencia hidráulica de estos equipos. Para los cálculos se emplearon valores sugeridos por el personal técnico de la empresa. La altura manométrica total se obtuvo sumando todas las pérdidas y elevación geométrica, como se observa en la Ecuación 12.

$$H_m = H_{Tf} + H_f \times H_a + H_g + F_s$$

Ecuación 12

Donde:

H_m: altura manométrica total (m)

H_{Tf}: pérdida total en filtros (m)

H_f: pérdida por fricción en tuberías (m)

H_a: pérdida por accesorios (m)

H_g: elevación geométrica (m)

F_s: factor de seguridad por colmatación de filtros (m)

4.5. Tubería perforada para distribución en tanque de oxidación avanzada

Para el dimensionamiento de la tubería perforada de distribución, se aplicó el método planteado por CEPIS, que obedece el modelo Hudson para canales de distribución o tuberías perforadas, el cual permite estimar el número de orificios, el caudal unitario por orificio, las velocidades en los orificios y en la tubería principal, así como las pérdidas de carga. A continuación, se presentan las ecuaciones usadas en esta etapa del desarrollo.

$$n_o = \frac{L_T - 2d_c}{S}$$

Ecuación 13

Donde:

n_o: número de orificios

L_T: longitud efectiva de la tubería (m)

d_c: distancia entre primer y último orificio al muro (m)

S: separación entre orificios (m)

$$Q_{oi} = \frac{Q_d}{n_o}$$

Ecuación 14

Donde:

Q_{oi}: caudal unitario por orificio (m^3/s)

Q_d: caudal de diseño (m^3/h)

n_o: número de orificios

El área y velocidad de orificio se calculan con la Ecuación 15.

$$A_o = \frac{\pi \times {D_o}^2}{4}, \qquad v_{oi} = \frac{Q_{oi}}{A_0}$$

Ecuación 15

Donde:

A_o: área de orifico (m^2)

D_o: diámetro de orificio (m)

v_{oi}: velocidad de flujo por orificio (m/s)

Q_{oi}: caudal unitario por orificio (m^3/s)

Para el caudal que todavía circula por la tubería principal justo después del orificio i, se tienen en cuenta las Ecuaciones 16 y 17.

$$v_{T,i} = \frac{Q_{T,i}}{A_T}$$

Ecuación 16

Donde:

$v_{T,i}$: velocidad en la tubería principal en la sección i (m/s)

$Q_{T,i}$: caudal de diseño menos el caudal que sale por el primer orificio (m^3/s)

A_T: área de la tubería (m^2)

$$Q_{T,i} = Q_{T,(i-1)} - Q_{oi}$$

Ecuación 17

Donde:

$Q_{T,i}$: caudal de diseño menos el caudal que sale por el primer orificio (m^3/s)

$Q_{T,(i-1)}$: caudal que llega desde la sección anterior (m^3/s)

Q_{oi}: caudal unitario por orificio (m^3/s)

Luego se hace uso del coeficiente de interacción orificio-tubería βi y la relación de las velocidades en la tubería principal después del orificio i y en el orificio i, con el fin de estimar la pérdida de carga localizada, por medio de la Ecuación 18.

$$\beta i = 1 + \theta + \varphi \left(\frac{v_{T,i}}{v_{oi}}\right)^2$$

Ecuación 18

Donde:

βi: interacción orificio-tubería en la sección i

θ y φ: valores fijos definidos en diseño

$v_{T,i}$: velocidad en la tubería principal en la sección i (m/s)

v_{oi}: velocidad de flujo por orificio (m/s)

Finalmente se calculan las pérdidas de carga por orificio i y la pérdida total a lo largo de la tubería mediante las Ecuaciones 19 y 20.

$$\Delta h_i = \beta i \times \frac{{v_{oi}}^2}{2g}$$

Ecuación 19

$$\Delta h_{total} = \sum_{i=1}^{no} \Delta h_i$$

Ecuación 20

Donde:

Δh_i: pérdida en la sección i (m)

βi: interacción orificio-tubería en la sección i

v_{oi}: velocidad de flujo por orificio (m/s)

g: gravedad (9,81 m/ s²)

Δh_{total}: pérdida total a lo largo de la tubería perforada (m)

4.6. Diseño del sistema de aireación en el tanque de homogenización

Se diseñó un sistema de aireación mediante difusores de burbuja gruesa instalados en el tanque de homogenización, con la finalidad asegurar una mezcla uniforme de caudales y concentraciones de contaminantes antes de los procesos de tratamiento posteriores. El caudal de aire necesario se calculó a partir de la relación entre la capacidad del tanque y el requerimiento de aire específico de la Ecuación 21.

$$Q_{a-r} = \frac{C_T}{R_a}$$

Ecuación 21

Donde:

Q_{a-r}: caudal de aire requerido (m³/h aire)

C_T: capacidad del tanque (m³/h agua)

R_a: requerimiento de aire (m³ aire/m³ agua)

Posteriormente, se determinó el número mínimo de difusores requeridos considerando la capacidad de suministro por cada difusor con la Ecuación 22.

$$N_d = \frac{Q_{a-r}}{Q_{difusor}}$$

Ecuación 22

Donde:

N_d: número de difusores necesarios

Q_{a-r}: caudal de aire requerido (m^3/h aire)

$Q_{difusor}$: caudal o capacidad de suministro por difusor (m^3/h aire)

5. Análisis de resultados

5.1. Caudales de dosificación, consumos de insumos químicos y selección de bombas

Se procedió al cálculo de los caudales de dosificación y consumos diarios y mensuales de los insumos químicos requeridos para el tratamiento, considerando un caudal de diseño de 5 m³/h o 40 m³/d, tomando por día el día de tratamiento compuesto por 8 h (operación de la PTARI). Los cálculos se realizaron para las formas comerciales disponibles. Para el caso de la coagulación, se optó preparar la solución *in situ*, desde PAC sólido comercial con un porcentaje de óxido de aluminio del 32%, buscando una solución al 8% a partir de este, agregando 250 g de PAC en 1 L de agua. La Tabla 2 resume todos los resultados obtenidos.

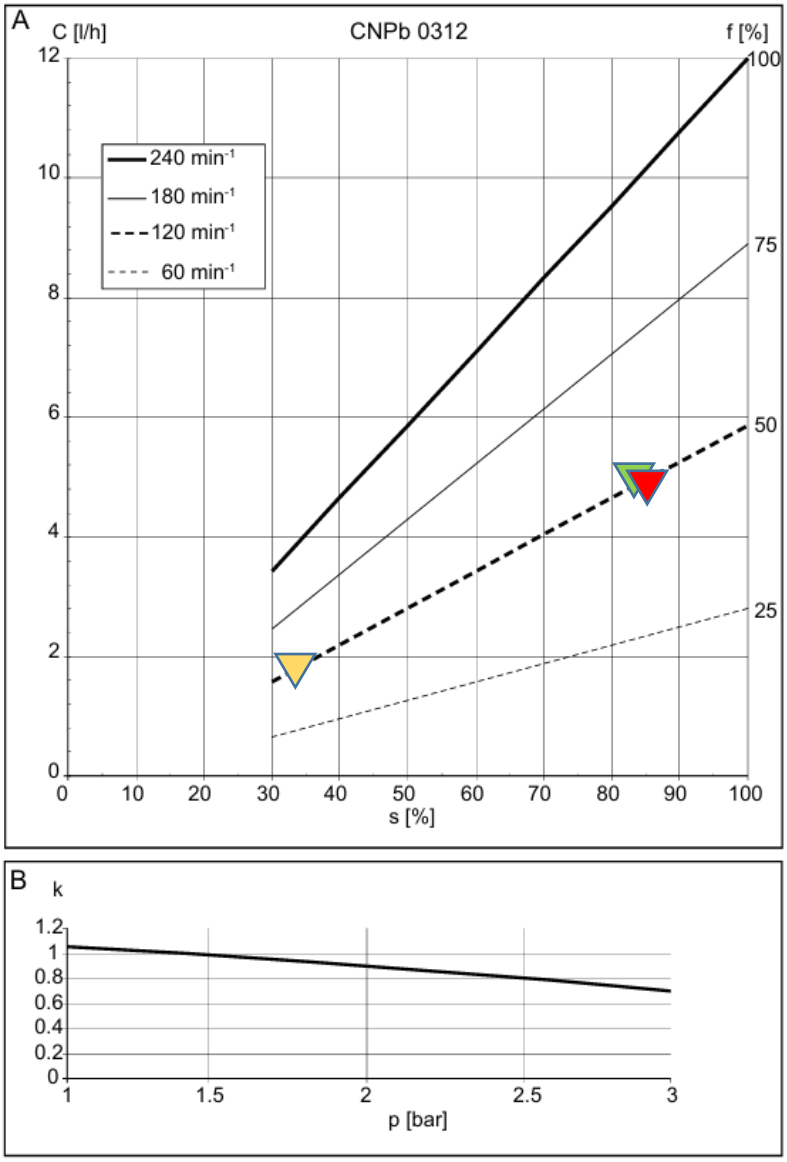
Tabla 2.
Resultados de caudales de dosificación y consumos de químicos.

Insumo químico	Presentación comercial	Solución preparada	Dosis óptima (mg/L)	Caudal de dosificación	Consumo diario	Consumo mensual
PAC (Policloruro de Aluminio)	Sólido 32% p/p	8% p/v	80	5,0 L/h	10 kg/día	300 kg/mes
Floculante DQFLOC-510	Cristales blancos	0,1% p/v	1	5,0 L/h	40 g/día	1.200 g/mes (1,2 kg)
Peróxido de hidrógeno	Solución 40% p/v	40% p/v	35	2,2 L/h	18 L/día	525 L/mes
Ozono	Gas	—	—	—	—	500 g O_3/h

Para la inyección de químicos al sistema se seleccionó una sola referencia de bomba dosificadora magnética de membrana, la cual cuenta con una capacidad mínima y máxima de 1.8 y 12 L/h, respectivamente. La validación se hizo mediante la revisión de las curvas de operación proporcionadas por el proveedor, ajustando cada punto de dosificación a una combinación sugerida de carrera (s%) y frecuencia (f%), que evitara imprecisiones o desgaste del equipo, como se muestra en las Figura 4.

Figura 4.

Punto de operación para dosificación de PAC, floculante y peróxido de hidrogeno.



El triángulo rojo indica el punto de dosificación para PAC (coagulante), el verde representa el floculante y el amarillo corresponde al peróxido de hidrógeno. Todos los puntos están graficados sobre la curva de operación al 50% de frecuencia (f) pero a distintas carreras (s).

5.2. Floculador hidráulico en línea

Como parte de los componentes clave de la PTARI, se diseñó un floculador hidráulico en línea o de tubos, conformado por siete tramos conectados mediante codos de 90°. El diseño se fundamentó en el cumplimiento de parámetros hidráulicos establecidos en el RAS 2017 (MVCT, 2017) y literatura, obteniendo velocidades entre 0,1 y 0,6 m/s, TRH dentro del intervalo de 2 a 5 min y gradientes de velocidad (G) entre 20 y 200 s^{-1}. Esta unidad como tantas del sistema de tratamiento, se diseñó para un caudal de 5 m^3/h y el resumen de sus principales características se encuentra en la Tabla 3.

Tabla 3.
Parámetros hidráulicos de diseño por tramo del floculador.

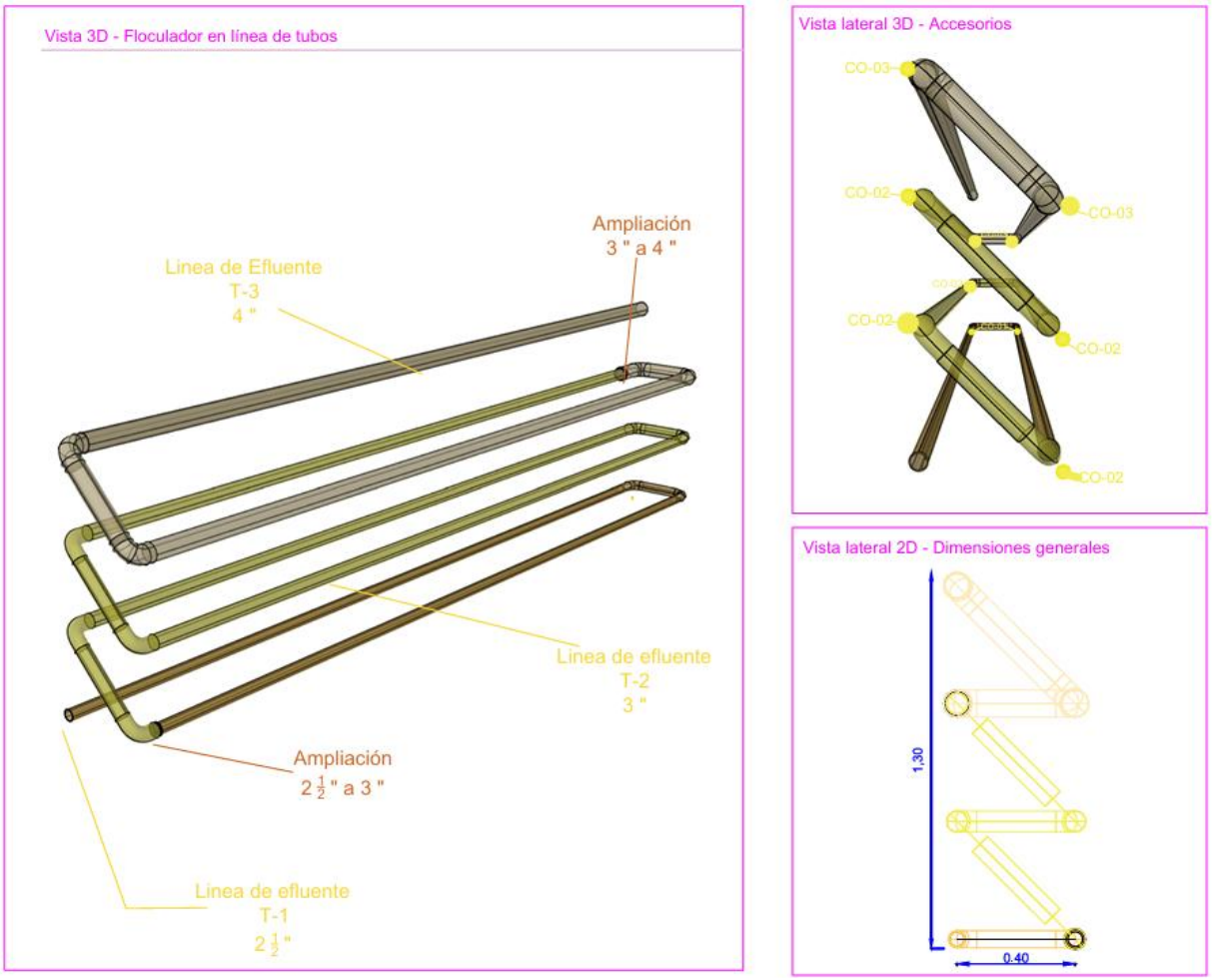
Floculador	Diámetro (in)	Longitud total (m)	N° de tramos	Longitud/tramo (m)	Gradiente (L/s)
Tramo 1	2,5	12	2	6	203,1
Tramo 2	3,0	18	3	6	123,9
Tramo 3	4,0	12	2	6	44,6

El gradiente de velocidad en el tramo 1 excede ligeramente el límite superior, sin embargo, esto se aceptó luego de evaluar múltiples configuraciones que no eran viables dadas las limitaciones físicas del espacio en obra; por lo demás se cumplen con los criterios de velocidad y TRH. Esta configuración con variaciones de diámetro (en aumento) y el gradiente de velocidad, se permite reducir progresivamente la intensidad de la mezcla, a fin de favorecer el crecimiento y estabilización de los flóculos. Cabe resaltar que, previo a esta estructura, se realiza la adición del floculante DQFLOC 510, con el objetivo de mejorar o acelerar la aglomeración de partículas.

El diseño final se representa en el plano mostrado en la Figura 5, que incluye representación 3D, detalles de accesorios y las dimensiones generales de la estructura instalada. El ángulo de inclinación en los segmentos que dan paso al ascenso del flujo, es de 45°.

Figura 5.

Vista general del floculador.



5.3. Elaboración del diagrama de proceso e instrumentación (P&ID)

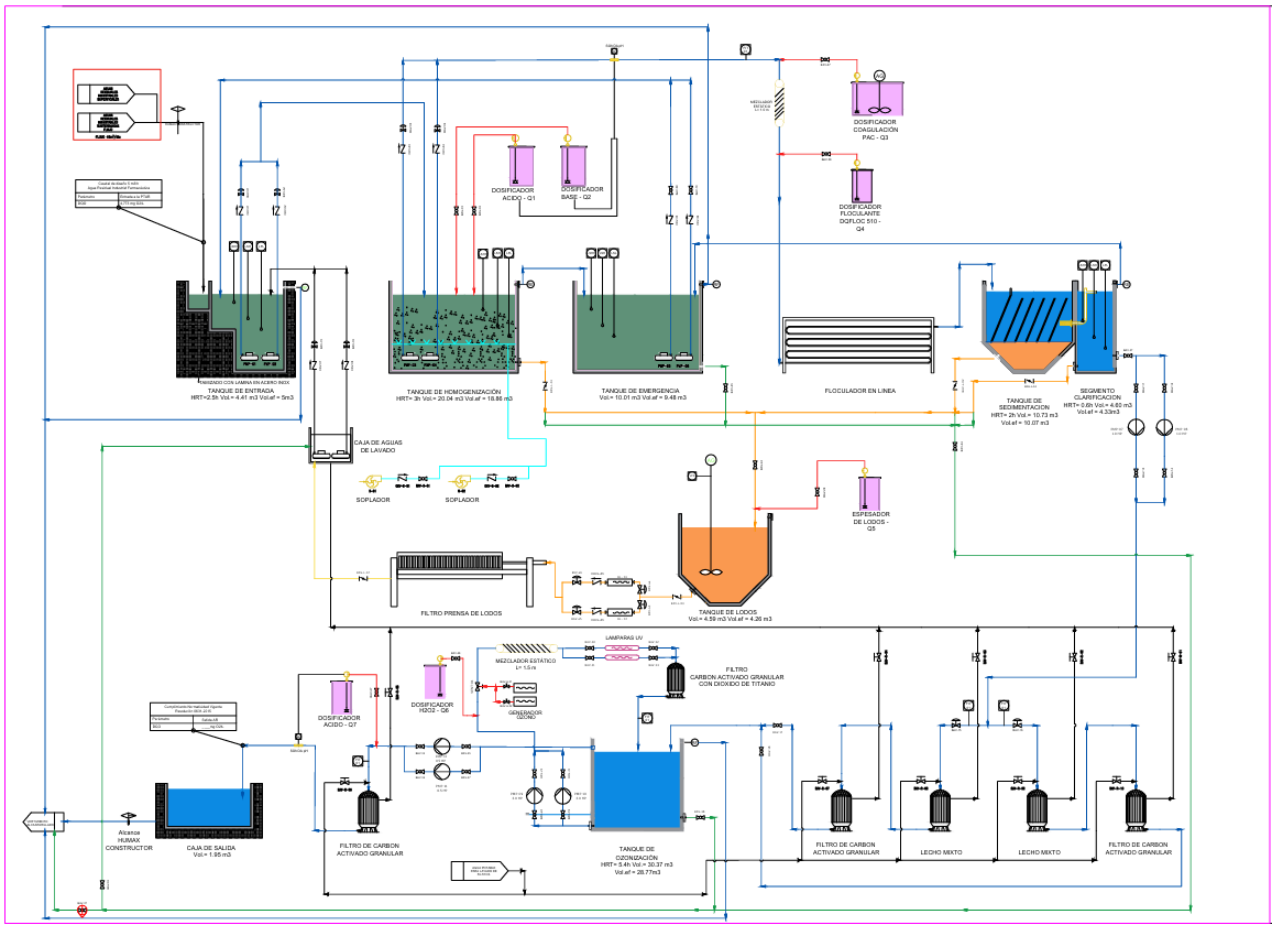
Como parte de los entregables técnicos, se elaboró el diagrama de proceso e instrumentación (P&ID, por sus siglas en inglés) de la PTARI. Aunque se partió de un boceto inicial, este resultaba incompleto ya que no reflejaba las condiciones reales en campo, por lo que fue necesario rediseñar gran parte del esquema, actualizar las conexiones, agregar equipos faltantes y verificar en obra cada uno de los elementos. La elaboración se realizó de manera

autónoma, a partir de observaciones directas en la PTARI y revisión técnica de la configuración del sistema.

El P&ID, como es su objetivo, incluye la representación de todas las unidades de tratamiento, equipos electromecánicos, líneas de conducción, válvulas, sensores, instrumentos de medición, bombas dosificadoras, línea de retrolavados, y tratamiento de lodos, entre otros. Este documento fue clave en los comités de revisión técnica, ya que permitió comunicar eficazmente el funcionamiento del sistema, validar decisiones de diseño y apoyar la planificación de la instalación. La Figura 6 muestra el diagrama consolidado del proceso.

Figura 6.

Diagrama de proceso e instrumentación (P&ID) de la PTARI.



5.4. Selección de motobombas

Las motobombas centrífugas seleccionadas para cada uno de los tres tramos que requerían bombeo se presentan en la Tabla 4. La validación de los puntos de operación (caudal y altura manométrica) se realizó utilizando las curvas características de cada bomba, en coordinación con los proveedores, asegurando que cumplieran con los requerimientos hidráulicos de cada escenario (Figuras 7 a 9).

Tabla 4.
Selección de motobombas para diferentes escenarios de la PTARI.

Proceso asociado	Bomba	Potencia	Caudal requerido (lpm)	Hm (m)	Observaciones técnicas
Clarificado → Filtros	AL RED 620-4	1 HP	83,3	21,1	Punto de operación eficiente dentro de la curva; caudal dividido para alimentar 4 filtros de Ø 36".
Recirculación Oxidación Avanzada	NGA 3A PRO	3 HP	416,7	21,2	Resistencia química. Sello y rodamientos grafito, cerámica y vitón. Cumple para caudal entre 5 y 25 m³/h.
Oxidación Avanzada → Cámara de salida	AL RED 600	0,5 HP	83,3	7,0	Punto de operación eficiente; bomba utilizada para descarga final del efluente tratado.

La bomba destinada al sistema de recirculación del tanque de oxidación avanzada, como se ha mencionado, debía operar con un caudal variable entre 5 y 25 m³/h, ya que el proceso contemplaba entre 1 y 5 ciclos de paso del agua por el sistema, dependiendo de la calidad del afluente.

Dado que en esta etapa se utilizan agentes oxidantes (peróxido de hidrógeno y ozono), se seleccionó una bomba con sello y rodamientos resistentes a este tipo de sustancias, compuesto por grafito, cerámica y vitón, lo cual garantiza compatibilidad química y una prolongación de la vida útil del equipo.

Figura 7.

Curva de operación para AL RED 620-4.

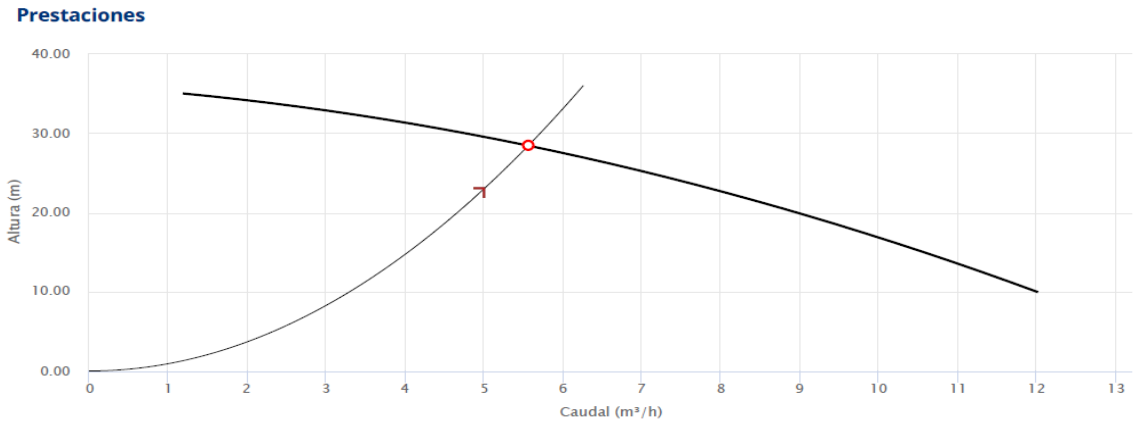
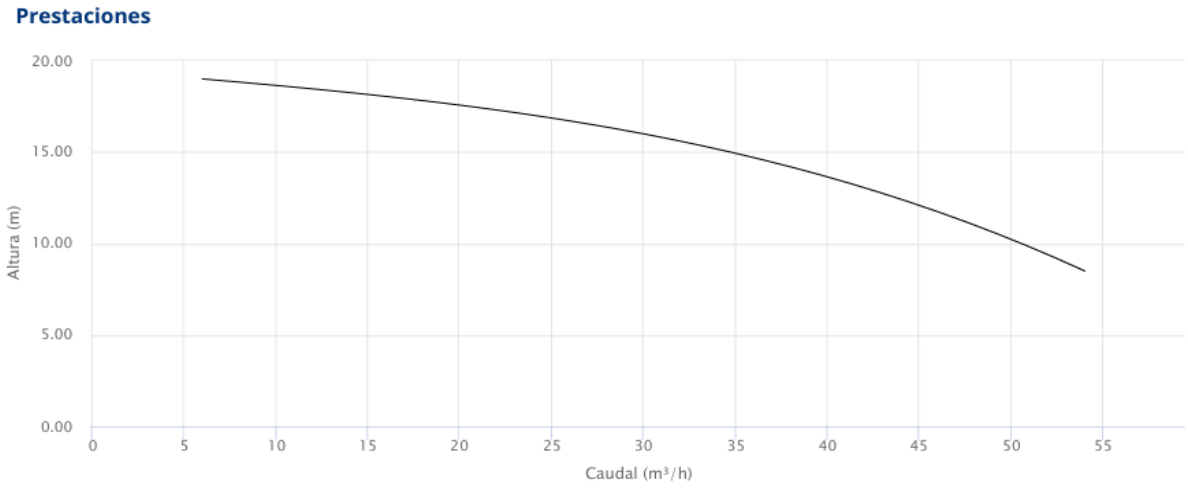


Figura 8.

Curva de operación para NGA 3A PRO.



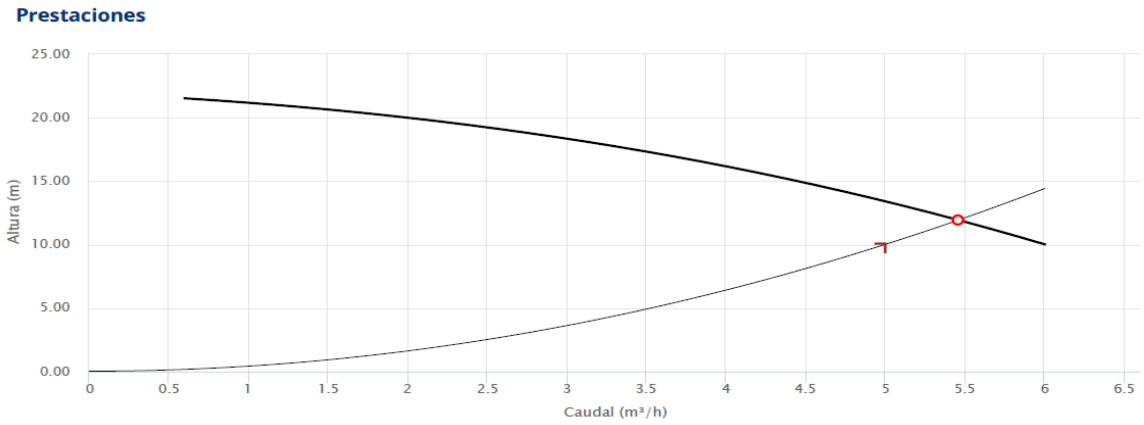
5.5. Tubería perforada para distribución en tanque de oxidación avanzada

Aunque el tanque dispuesto para este proceso tiene una longitud de 4,60 m, se definió una longitud útil de 3,80 m para la tubería, conservando una distancia prudente entre los extremos y los muros del tanque. Además, se evaluaron diferentes diámetros de tubería, de 2", 3" y 4", y

diferentes tamaños de orificios. Si bien algunas lograron una distribución más uniforme (con diferencias menores al 5% entre el primer y último orificio), generaban pérdidas de carga superiores a 10 m, y se descartó por las limitaciones operativas de la bomba.

Figura 9.

Curva de operación para AL RED 600.



Por lo anterior, se seleccionó una configuración con tubería de 4", orificios de 5/8” y una separación de 0,15 m entre ellos. Los resultados se presentan en las Tablas 5 a 7.

Tabla 5.

Parámetros geométricos del sistema de distribución.

Parámetro	Valor	Descripción
Longitud efectiva (L_T)	3,80 m	Longitud útil de la tubería dentro del tanque
Diámetro de tubería (D_T)	4 pulgadas (0,10 m)	Tubería seleccionada para reducir pérdidas
Diámetro de orificios (D_o)	5/8 pulgadas (0,015 m)	Tamaño de orificios uniformes
Separación entre orificios (S)	0,15 m	Espaciado regular entre orificios
Número de orificios (n_o)	24	Calculado con la fórmula de Hudson

Tabla 6.
Resultados hidráulicos para caudal de recirculación de 5 m³/h.

Parámetro	Valor	Descripción
Caudal de diseño (Q_D)	5 m³/h	Caudal de recirculación
Pérdida de carga total (Δh)	0,20 m	Diferencia entre primer y último orificio
Diferencia de caudal entre extremos	13,50%	Variación relativa entre orificios extremos

Tabla 7.
Resultados hidráulicos para caudal acumulado de 25 m³/h.

Parámetro	Valor	Descripción
Caudal de diseño (Q_D)	25 m³/h	Caudal de recirculación
Pérdida de carga total (Δh)	5,0 m	Diferencia entre primer y último orificio
Diferencia de caudal entre extremos	13,50%	Variación relativa entre orificios extremos

Como se observa en la Tabla 5, se requirieron 24 orificios para garantizar la uniformidad en la recirculación. Sin embargo, debido a la longitud limitante del tanque, se tomó la decisión de perforar 12 orificios a cada costado de la tubería, distribuidos simétricamente, y con un ángulo de separación de 90° entre sí con el fin de obtener una mejor distribución hidráulica.

5.6. Diseño del sistema de aireación en el tanque de homogenización

De acuerdo con los cálculos realizados (Tabla 8), el requerimiento mínimo era de dos difusores para cubrir el caudal de aire necesario. Sin embargo, por criterio técnico y operativo, se implementó un total de cinco difusores de burbuja gruesa, como se observa en la Figura 10. Esta decisión se basó en la experiencia del supervisor de obra, quien señaló la posibilidad de obstrucciones en algunos difusores debido a la naturaleza de las aguas residuales industriales.

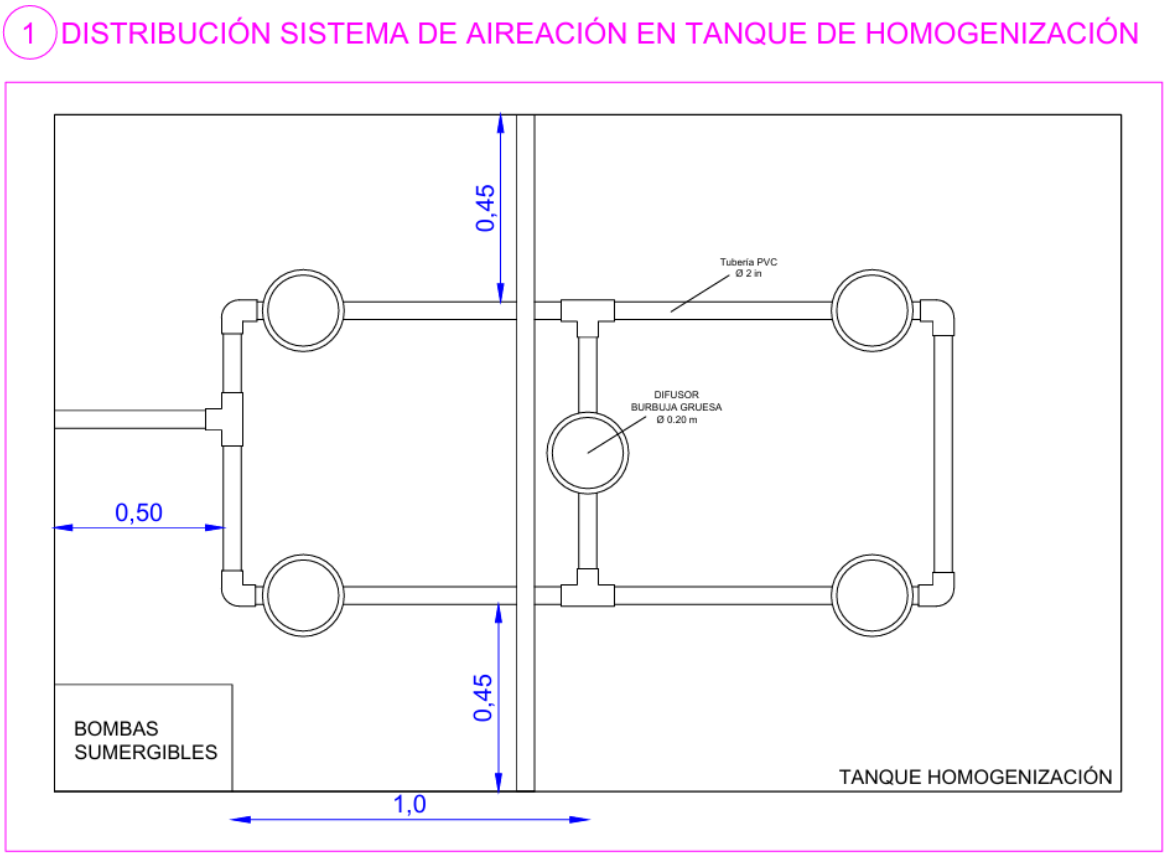
La distribución de aire desde los sopladores se realiza mediante tubería de PVC de 2 in.

Tabla 8.
Resultados para el suministro de aire.

Parámetro	Valor	Unidad
Capacidad tanque homogenización (C_T)	18	(m^3/h)
Requerimiento de aire (R_a)	0,15	(m^3 aire/m^3 agua)
Caudal de aire (Q_{a-r})	2,7	(m^3/h)
Caudal del difusor ($Q_{difusor}$)	1,5	(m^3/h aire)
Número de difusores (N_d)	2	-

Figura 10.

Esquema de distribución del sistema de aireación.



6. Conclusiones y recomendaciones

6.1. Conclusiones

- Más allá de los resultados técnicos, la práctica representó un espacio de crecimiento personal y profesional. La experiencia en obra, al asumir responsabilidades de dirección de actividades constructivas y coordinación de personal, permitió desarrollar habilidades de liderazgo, toma de decisiones y gestión del tiempo, además de enriquecer el aprendizaje con los saberes prácticos del personal de obra, que complementan la formación académica universitaria.
- La práctica profesional permitió apoyar de manera significativa la construcción de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales (PTARI) de Humax Pharmaceutical, logrando un avance aproximado del 70% del proyecto al finalizar el periodo.
- Durante la práctica se evaluó la preparación y dosificación del PAC (Policloruro de Aluminio) en estado sólido, lo cual afectó la concentración de la solución y el caudal de las bombas dosificadoras. Aunque es posible, se evidenció que la forma considerada en los cálculos no es la más disponible en el mercado, por lo que se contempla la opción de adquirir presentaciones más accesibles, como la líquida, que faciliten la operación y aseguren la calidad del proceso.
- El diseño y construcción del floculador hidráulico en línea, junto con el desarrollo de planos en AutoCAD y la supervisión en obra, contribuyeron al fortalecimiento del tren de tratamiento, asegurando condiciones de mezcla y retención hidráulica dentro de los parámetros normativos.
- La elaboración y actualización del diagrama de procesos e instrumentación (P&ID) permitió consolidar la configuración operativa de la PTARI, facilitando la identificación de equipos, conexiones y puntos de control necesarios para el proceso.
- El diseño de la tubería perforada para el sistema de recirculación en la etapa de oxidación avanzada permitió optimizar la distribución de caudal y minimizar las pérdidas de carga, aspecto crítico para no sobrecargar las bombas y garantizar la eficiencia del proceso.

6.2. Recomendaciones

- Realizar pruebas piloto de cada una de las unidades diseñadas (floculador, aireación, recirculación), con el fin de validar experimentalmente los supuestos de diseño y hacer ajustes de operación en campo.
- Resulta pertinente incorporar herramientas de modelación hidráulica y de simulación de procesos que permitan anticipar escenarios de expansión o modificaciones en la capacidad de tratamiento, considerando que en el futuro podrían integrarse nuevas líneas de producción o trasladarse operaciones adicionales a la planta actual.
- Documentar los avances constructivos y de operación en manuales complementarios que fortalezcan el sistema de gestión y permitan replicar las lecciones aprendidas en futuros proyectos de tratamiento de aguas residuales industriales.
- De manera complementaria, fue evidente que muchos ajustes debieron realizarse directamente en obra, lo cual, si bien permitió avanzar en el proyecto, también generó desafíos adicionales en términos de coordinación, tiempos y recursos; por lo que se recomienda que en futuros proyectos se fortalezcan las fases de planeación y diseño, de manera que la construcción se desarrolle con base en lineamientos claros y consensuados.

7. Referencias

Davis, M. L. (2010). Water and wastewater engineering: Design principles and practice. McGraw-Hill.

Eckenfelder, W. W., Ford, D. L., & Englande, A. J. (2009). *Industrial water quality* (4th ed.). McGraw-Hill.

Jaimes Urbina, J. A., & Vera Solano, J. A. (2020). Los contaminantes emergentes de las aguas residuales de la industria farmacéutica y su tratamiento por medio de la ozonización. *Informador Técnico*, *84*(2). https://doi.org/10.23850/22565035.2305

Metcalf, W., & Eddy, C. (2014). Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery (5th ed.). McGraw-Hill Education.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). (2015). Resolución 0630 del 17 de marzo de 2015. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Bogotá, Colombia.

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (MVCT). (2017). Resolución 0330 del 08 de junio de 2017, Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS). Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, Bogotá, Colombia.

Montiel Palma, S. (2001). Sedimentación de alta tasa en el tratamiento de aguas residuales de tipo doméstico [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. UNAM.

Von Sperling, M. (2015). Wastewater Characteristics, Treatment and Disposal. *Water Intelligence Online*, *6*(0). https://doi.org/10.2166/9781780402086.

Water Environment Federation (WEF). (2008). *Industrial wastewater management, treatment, and disposal* (3rd ed., Manual of Practice No. FD-3). Alexandria, VA: Water Environment Federation.

United States Environmental Protection Agency (US-EPA). (s.f.). Toxic and priority pollutants under the Clean Water Act. Recuperado de: https://www.epa.gov/eg/toxic-and-priority-pollutants-under-clean-water-act#modifications

8. Anexos fotográficos

Fotografía	Descripción
	Proceso constructivo del floculador hidráulico en línea en tubería de PVC.
	Instalación del sistema de aireación en el tanque de homogenización, conformado por difusores de burbuja gruesa.

	Instalación completa de filtros con su sistema hidráulico en tubería de PVC.