



Trabajo Final

Carrera de Ingeniería Química

**Mejoras en una planta de
tratamiento de efluentes de una
industria papelera del NOA**

Alumno: Orden Luis Alfredo
Tutor: Mg. Ing. Sáez Silvia Graciela

2025



Trabajo Final de la carrera de Ingeniería Química presentada a la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología de la Universidad Nacional de Tucumán, Argentina, como requisito final para obtener el título de **Ingeniero Químico**.

Trabajo Final evaluado por el tribunal integrado por:

- Dr. Ricardo Ferrari
- Dr. Carolina Saracho Bottero
- Dr. Humberto Heluane

y presentado oralmente en el día de la fecha.

San Miguel de Tucumán, 07 de octubre de 2025.

Dr. Ricardo Ferrari

Dr. Carolina Saracho
Bottero

Dr. Humberto Heluane

RESUMEN

La escasez y contaminación del agua representan uno de los mayores desafíos para la salud pública y la sostenibilidad industrial. En regiones como el NOA, donde el recurso hídrico se ve sometido a estrés por la demanda agrícola y productiva, asegurar su uso eficiente y el cumplimiento de estándares de vertido es imperativo.

Este trabajo se orienta a la optimización integral del tratamiento primario de efluentes en una planta papelera de reciclado de fibras exógenas, aplicando criterios de mejora de procesos, para maximizar la eficiencia hidráulica, minimizar la huella hídrica y reforzar la sostenibilidad operativa.

En planta se recopilaban y analizaban datos fisicoquímicos (sólidos sedimentables, DQO, DBO₅, pH, conductividad y oxígeno disuelto), que, junto con registros operativos y observaciones directas de campo, permitieron identificar in situ las ineficiencias en el proceso, como falta de control de caudal, en la separación de sólidos y en la dinámica de sedimentación primaria. Este diagnóstico técnico sirvió de base para proponer soluciones de ingeniería que elevan la remoción de contaminantes por encima del 70 %, optimizan el consumo energético y garantizan la capacidad de adaptación del sistema ante variaciones de carga contaminante.

Para optimizar la gestión del agua y extender la vida útil de los equipos, se propuso un conjunto de mejoras que fortalecen el control del caudal, automatizan el pretratamiento de sólidos y potencian la sedimentación primaria. La implementación de estas soluciones proyecta aumentos significativos en la remoción de contaminantes, superiores al 70 % para sólidos suspendidos y al 75 % para arenas, garantizando además continuidad de operación mediante configuraciones en paralelo.

El análisis económico estima una inversión total de \$ 302 millones, concentrada en estructuras de sedimentación y equipos de pretratamiento, con beneficios operativos y ambientales que justifican la obra. Estos aportes posicionan a la planta como un referente de eficiencia hídrica y se alinean con las metas 6.3 y 6.5 del Objetivo N° 6 de Desarrollo Sostenible de la ONU, fomentando un uso responsable y sostenible del agua.

Palabras clave: tratamiento primario; aguas residuales; industria papelera; eficiencia hídrica; sostenibilidad.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que hicieron posible la realización de este trabajo final. Su apoyo profesional, sus consejos y su acompañamiento en cada etapa del proyecto fueron fundamentales para superar los desafíos técnicos y académicos. Sin su generosidad y colaboración, este trabajo no habría alcanzado el nivel de rigor y calidad que hoy presenta.

A mis padres, Luis y Mirta, a mis hermanas, por su apoyo incondicional en todos estos años de estudio, este trabajo y el título es sin duda, gracias a ellos, fruto de su entrega y sacrificio, siempre estaré agradecido por ello, mi gratitud es tan inmensa que ninguna palabra bastaría para honrar su entrega y cariño infinitos.

A mi tutora, Ing. Silvia Sáez, por aceptar ser mi tutora, por su guía y ayuda en esta etapa final de mi carrera.

A las diferentes personas que están y estuvieron en este camino, a mi novia, Mariana, a mis compañeros de facultad, a mis amigos, a los profesores, a mis compañeros de planta, a todos ellos muchas gracias, fueron un apoyo y parte muy importante también en mi camino.

INDICE

PRÓLOGO	5
CAPITULO 1	
MARCO TEÓRICO	6
1.1 INTRODUCCION.....	6
1.2. El Agua en Argentina y Tucumán.....	7
1.3. Metas de desarrollo sostenible (ONU).....	8
1.4. Objetivo General.....	9
1.5. Objetivos Específicos.....	9
1.6. Organización del trabajo	9
CAPITULO 2	
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	11
2.1. Origen de las aguas residuales	11
2.2. Caracterización de las aguas residuales	11
2.2.1 Muestreo para los análisis de efluentes	13
2.2.2 Parámetros analizados en planta.....	14
2.2.3. Medición de solidos totales.....	14
2.2.4 Medición de pH	16
2.2.5 Medición de conductividad eléctrica.....	18
2.2.6 Medición de oxígeno disuelto	19
2.2.7 Demanda química de oxígeno (DQO).....	20
2.2.8 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO).....	25
2.3 Resultados y discusión de la caracterización de las aguas residuales.....	31
2.4 Tratamiento primario de efluentes	35
2.4.1 Desbaste o cribado	37
2.4.2 Desarenado	37
2.4.3 Sedimentación en aguas residuales	38
CAPITULO 3	
INDUSTRIA BAJO ESTUDIO	41
3.1 La empresa	41
3.2. Proceso productivo de fabricación de papel	41

3.3. Tratamiento de Efluentes en planta.....	48
3.4 Situación del tratamiento primario de efluentes en la actualidad	54
CAPITULO 4	
DISEÑO Y PROPUESTA DE MEJORAS	60
4.1 Objetivos	60
4.2 Medición de caudal	61
4.3 Desbaste	66
4.4 Desarenado	75
4.5 Decantación	80
4.6 Resultados	85
CAPITULO 5	
ESTIMACION DE COSTOS.....	86
5.1 Tratamiento de efluentes en la actualidad	86
5.2 Costos en el tratamiento de efluentes primario.....	86
5.3 Análisis de los costos estimados.....	88
CAPITULO 6	
CONCLUSIONES	90
6.1.1 Canal Parshall	90
6.1.2 Reja automática.....	90
6.1.3 Cañería para lavado	90
6.1.4 Desarenador	90
6.1.5 Decantador Circulares	91
6.2 Conclusiones.....	91
6.3 Perspectiva a futuro.....	92
Referencias	93
ANEXOS	96
Anexo A: Valores permitidos para el vuelco de efluentes líquidos	96
Anexo B: Resultados de parámetros fisicoquímicos en planta	100
Anexo C: Fichas técnicas y especificaciones de equipos	101

PRÓLOGO

En las últimas décadas, la creciente preocupación por la preservación ambiental y la sostenibilidad ha llevado a replantear los procesos industriales tradicionales. En la industria papelera, donde el elevado consumo de agua y energía y la complejidad de los efluentes son desafíos permanentes; el presente trabajo se enfoca en identificar y optimizar operaciones unitarias clave para reducir la carga contaminante, disminuir el uso energético y garantizar la calidad del agua para un posible reúso. Mi motivación nace de una vocación constante por mejorar cada detalle de los sistemas que diseño, convencido de que la optimización técnica genera beneficios tangibles tanto para la industria como para el entorno.

El estudio introduce una metodología de diagnóstico ajustada a condiciones reales de planta, propone ajustes operativos para incrementar la remoción de contaminantes, evalúa indicadores de calidad de efluente, y ofrece una guía práctica de implementación. La tesina se organiza en seis capítulos: el primero establece los objetivos; el segundo describe las características del efluente y el sistema de tratamiento; el tercero detalla la industria y sus ineficiencias; en el cuarto se propone el diseño y analiza los resultados operativos y de calidad de agua; el quinto evalúa los costos; y el sexto presenta conclusiones, recomendaciones y una hoja de ruta para futuras mejoras.

Confío en que los hallazgos aquí planteados no solo constituyan un referente técnico y estratégico para proyectos de gestión ambiental y optimización de procesos industriales, sino que también inspiren a la adopción de prácticas de ingeniería sostenible capaces de transformar realidades productivas y proteger los recursos hídricos en el largo plazo.

CAPITULO 1

MARCO TEÓRICO

1.1 INTRODUCCION

El agua es sin duda un recurso indispensable para la vida en la tierra y para el desarrollo de todas las sociedades, su importancia abarca numerosos aspectos que van desde supervivencia humana, ecosistemas y agricultura, hasta, motor del desarrollo social y económico, como salud pública, industria, generación de energía, transporte y recreación.

El agua es el recurso más valioso y utilizado en diversos procesos industriales. Desde la manufactura hasta la generación de energía.

Sin embargo, el inestable estrés hídrico global, junto con las normativas ambientales más estrictas, ha impulsado a las industrias a reconsiderar como gestionan y utilizan el agua en sus operaciones.

La eficiencia en el uso del agua no solo reduce los costos operativos, sino que también contribuye a la sostenibilidad a largo plazo de las empresas, al minimizar su impacto ambiental.

A medida que los recursos hídricos se vuelven más escasos y los costos asociados a su uso aumentan, las industrias deben lidiar con la presión de cumplir con las regulaciones ambientales más estrictas y adoptar prácticas más responsables.

Uno de los principales desafíos que enfrentan las industrias en la gestión del agua es la creciente escasez de agua dulce. Según la ONU (UNESCO & World Water Assessment Programme, 2019), más de 2000 millones de personas viven en países que experimentan estrés hídrico, y esto afecta directamente a las industrias que dependen del agua para sus procesos. Las industrias que operan en áreas con escasez de agua no solo enfrentan aumentos en los costos de adquisición, sino también en el tratamiento y la eliminación segura de las aguas residuales. Esto hace que la necesidad de optimizar el consumo de agua sea una prioridad, tanto desde el punto de vista financiero como ambiental.

Otro desafío importante es la contaminación que resulta del uso industrial del agua. Los efluentes industriales, que a menudo contienen productos químicos tóxicos, metales pesados y otros contaminantes, representan una amenaza para el medio ambiente si no se tratan adecuadamente antes de ser liberados en los cuerpos de agua.

Las industrias deben enfrentar el reto de implementar sistemas de tratamientos de aguas residuales efectivos para cumplir con normativas medioambientales, lo que implica una inversión considerable en tecnologías y procesos. La contaminación del agua también conlleva el riesgo de sanciones y multas si las empresas no cumplen con los estándares de calidad exigidos por las leyes locales e internacionales (Innovación en Ingeniería, 2025).

Las operaciones unitarias del tratamiento primario, que comprenden la remoción de sólidos flotantes, arenas y elementos sedimentables, constituyen la primera barrera de

defensa ambiental. Mejorar esta etapa, mediante la implementación de tecnologías como rejas automáticas, desarenadores y decantadores eficientes, permite reducir significativamente la carga contaminante que ingresa al tratamiento secundario, evitando obstrucciones, disminuyendo la necesidad de energía, y aumentando la vida útil de los equipos.

Por lo tanto, fortalecer el tratamiento primario de efluentes no es solo una cuestión técnica: es una respuesta directa a los desafíos actuales del uso industrial del agua, a las demandas de sostenibilidad que plantea el contexto global (UNESCO & World Water Assessment Programme, 2019), y a las oportunidades de reconvertir procesos productivos bajo los principios de la economía circular y la responsabilidad ambiental empresarial.

1.2. El Agua en Argentina y Tucumán

El agua en Argentina es un recurso clave que influye en la vida cotidiana, la economía y el medio ambiente. El país cuenta con una gran diversidad de fuentes hídricas, desde los glaciares patagónicos hasta los ríos y humedales del litoral. Sin embargo, se enfrenta a desafíos como la contaminación, el acceso desigual y el impacto del cambio climático. (Infobae, 2025).

En Argentina, la industria representa aproximadamente el 7% del consumo total de agua, mientras que la agricultura lidera con un 80% y los hogares consumen un 13% (Departamento General de Irrigación, 2025).

Ahora bien, para que las oportunidades se consoliden y generen desarrollo genuino se necesita planificación y articulación. En primer lugar, cada provincia debe reconocer y poner en valor su propia identidad hídrica, saber de dónde proviene el agua, como se utiliza, que riesgos enfrenta y que potencial tiene. En segundo lugar, es clave promover una mirada regional: las cuencas hídricas no respetan límites políticos y la gestión compartida del recurso exige cooperación entre provincias. Es indispensable fortalecer la coordinación federal para realizar obras de infraestructuras necesarias, desde plantas potabilizadoras hasta sistemas de riego y drenaje, que garanticen el acceso al agua segura, la prevención de desastres y el uso sostenible del recurso (Infobae, 2025).

Con respecto al estado del agua en la provincia de Tucumán, los recursos hídricos de la provincia se dividen en globalmente en superficiales y subterráneos. Los superficiales son los ríos, arroyos y lagos naturales. Tucumán tiene una red hidrográfica extensa y bien distribuida. Los subterráneos son los acuíferos existentes en los suelos, a diferentes profundidades, y provienen de la infiltración de aguas superficiales. En consecuencia, están íntimamente vinculados (Adler F., 2022, p.1).

En la provincia es clásica la percepción generalizada en la población de que “En Tucumán el agua sobra”. Ello es ya historia antigua. Si bien su red hidrográfica y la abundancia de agua subterránea alcanzaban sobradamente para la población y la actividad económica hasta los años 50 del siglo pasado, el crecimiento demográfico, las migraciones campo-ciudad, los nuevos cultivos, el surgimiento de algunas nuevas industrias, la contaminación, la baja eficiencia general de los usos del agua y las pérdidas descontroladas fueron tensando cada vez más el aprovechamiento de los recursos hídricos (Adler F., 2022, p.2)

La disponibilidad hídrica suele comúnmente evaluarse mediante el denominado “indicador de tensión hídrica” de Falkenmark, propuesto por esta experta sueca en 1989 (Falkenmark *et al.*, 1989). La autora propone tomar una disponibilidad de 1.700 (m³ /año/hab.) como el umbral por sobre el cual las carencias de agua para una sociedad

sólo ocurren ocasionalmente y en modo aislado. Por debajo de ese nivel de disponibilidad, la escasez de agua toma diversos niveles de severidad. Por debajo de 1.700 (m³ /año/hab.), el “estrés hídrico” aparece como regular, por debajo de 1.000 m³ /año/hab. la escasez de agua es un limitante al desarrollo económico y afecta la salud humana y el bienestar de la sociedad y bajo de 500 (m³ /año/hab.) se tiene una gran restricción a la vida humana (Adler F., 2022, pp. 2-3).

Atendiendo solamente al indicador mencionado, y teniendo en cuenta que por formar parte de una cuenca interprovincial (Salí-Dulce) con Santiago del Estero y Córdoba, por el Tratado de río Salí-Dulce del año 1965 Tucumán no tiene derecho a emplear todo el recurso hídrico sino hasta un 32% de su volumen anual (el 47% para Santiago del Estero y el 21% para Córdoba). Con su población actual resultaría en un indicador bastante inferior a 800 (m³ /año/hab.), lo que plantea una situación crítica que desmiente el concepto mencionado de que “el agua sobra”. (Adler F., 2022, p.3).

En la provincia las actividades sucro-alcoholera (caña de azúcar + ingenios + destilerías de bioetanol) y la citrícola, constituyen las agro-industrias integradas que no solo aportan una parte sustancial al PBI, sino que son las que mayor empleo generan, tanto en forma directa como a través de las actividades subsidiarias (Adler F., 2022, p.16).

En el contexto de la cuenca centro-sur del río Salí, donde la disponibilidad hídrica se concentra principalmente en fuentes subterráneas y en la red hidrográfica regional, resulta imprescindible hacer eficiente el tratamiento de efluentes industriales como parte de una gestión responsable del recurso. Esta zona, considerada estratégica para el desarrollo de actividades productivas por su infraestructura y servicios básicos, enfrenta el desafío de abastecerse mediante sistemas de autoabastecimiento o redes públicas que requieren mejoras en conducción y administración (Adler F., 2022, p. 19). En ese marco, optimizar el tratamiento de efluentes no solo permite preservar la calidad de las fuentes de agua, sino también reducir la presión sobre acuíferos vulnerables, garantizar el cumplimiento de normativas ambientales y facilitar la reutilización del agua tratada en procesos industriales. La eficiencia en esta etapa contribuye directamente a la sostenibilidad del sistema hídrico regional, al equilibrio entre oferta y demanda, y al fortalecimiento de un modelo de desarrollo industrial compatible con la protección de los ecosistemas acuáticos.

1.3. Metas de desarrollo sostenible (ONU)

El Objetivo de Desarrollo Sostenible Número 6: AGUA LIMPA Y SANEAMIENTO (ODS 6), de la ONU busca garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible, así como el acceso universal al saneamiento para 2030. Este objetivo es crucial porque el agua potable y el saneamiento son esenciales para la salud, el bienestar y el desarrollo sostenible.

Algunos desafíos clave que enfrenta el mundo en relación con el agua incluyen:

- Escasez hídrica: La demanda de agua ha superado el crecimiento poblacional, y la mitad de la población mundial sufre escasez grave al menos un mes al año.
- Contaminación: La degradación de ecosistemas hídricos y la contaminación del agua afectan la calidad del recurso y la salud de millones de personas.
- Acceso desigual: En 2022, 2.200 millones de personas no tenían acceso a agua potable gestionada de manera segura, y 3.500 millones carecían de saneamiento adecuado.

Para abordar estos problemas, la ONU promueve inversiones en infraestructura, protección de ecosistemas hídricos y educación sobre higiene. Además, el agua es clave para lograr otros Objetivos de Desarrollo Sostenible, como la reducción de la pobreza y la seguridad alimentaria (Naciones Unidas, 2025).

En un contexto global marcado por el estrés hídrico, la escasez de agua dulce y la necesidad de adoptar prácticas industriales más responsables, este trabajo se alinea con los principios establecidos por los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente el ODS 6 (Agua limpia y saneamiento), el ODS 9 (Industria, innovación e infraestructura) y el ODS 12 (Producción y consumo responsables).

Argentina es uno de los países integrante de UN que suscribió el acuerdo, por lo que está obligada a cumplir con los objetivos. El presente trabajo propone alternativas superadoras al tratamiento que actualmente se realiza en la planta para cumplir con este Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS).

Se busca no solo mejorar el desempeño operativo de la planta, sino también contribuir a la protección de los recursos hídricos regionales y al desarrollo de una industria más eficiente, resiliente y comprometida con la sostenibilidad.

1.4. Objetivo General

El objetivo general de este trabajo es hacer un uso sostenible del agua en la planta industrial, mediante la mejora integral del sistema de tratamiento primario de efluentes.

Esta mejora busca reducir la carga contaminante del efluente líquido que ingresa al tratamiento secundario, optimizando la eficiencia de las operaciones unitarias involucradas en el tratamiento primario.

1.5. Objetivos Específicos

Los objetivos específicos de este trabajo se orientan a mejorar el tratamiento primario de efluentes mediante un enfoque técnico que combina diagnóstico, rediseño y propuesta de soluciones adaptadas a las necesidades reales de la planta. Para ello, se establecen las siguientes metas:

1. Analizar el estado actual de los equipos existentes en el tratamiento primario, evaluando su rendimiento, eficiencia operativa y grado de adecuación a las condiciones de carga y caudal presentes en la planta.
2. Identificar limitaciones técnicas y operativas en las unidades ya instaladas, como rejillas, desarenadores y clarificadores, que afecten la remoción de sólidos gruesos, sedimentables y flotantes.
3. Diseñar nuevos equipos que respondan a los requerimientos específicos del proceso, incluyendo mejoras en la automatización, accesibilidad para mantenimiento y capacidad de remoción.
4. Proponer modificaciones estructurales y funcionales a los equipos existentes, con el objetivo de optimizar su desempeño, reducir la carga contaminante que ingresa al tratamiento secundario y mejorar la continuidad operativa.

1.6. Organización del trabajo

El presente trabajo se estructura en capítulos que permiten abordar de manera progresiva y sistemática el estudio del tratamiento de efluentes industriales, con especial énfasis en el proceso primario aplicado en una planta papelera.

En el primer capítulo se establece el marco introductorio, donde se contextualiza la problemática del agua en Argentina y en la provincia de Tucumán, se vincula el estudio con los objetivos de desarrollo sostenible propuestos por la ONU, y se definen tanto el objetivo general como los objetivos específicos que guían el desarrollo del trabajo.

Los capítulos que siguen se presentan en un orden que permite comprender paso a paso el tema tratado, desde los aspectos generales hasta el análisis específico del caso industrial.

En primer lugar, se presenta un análisis teórico del tratamiento de aguas residuales, abordando los fundamentos del proceso, el origen y caracterización de los efluentes, y los parámetros físico-químicos relevantes para su evaluación. Se describen las principales operaciones unitarias que conforman el tratamiento primario, tales como el desbaste, el desarenado y la sedimentación, integrando resultados obtenidos en planta y su discusión técnica.

A continuación, se introduce el estudio de caso correspondiente a la industria papelera bajo análisis. Se describe el proceso productivo actual, el sistema de tratamiento de efluentes implementado, y se realiza una evaluación detallada de las condiciones operativas, identificando las principales deficiencias en la gestión de los residuos líquidos. Este diagnóstico permite focalizar en los problemas específicos que afectan la eficiencia del tratamiento primario.

Sobre la base del análisis realizado, se desarrollan propuestas de mejora orientadas a optimizar el desempeño del sistema. Se plantean rediseños de equipos y ajustes en las etapas del proceso, con el objetivo de resolver las limitaciones detectadas y cumplir con los estándares ambientales vigentes. Finalmente, se presenta una estimación de costos asociada a las soluciones propuestas, permitiendo evaluar su viabilidad técnica y económica.

El trabajo concluye con una síntesis de los resultados obtenidos, las conclusiones generales del estudio y una perspectiva a futuro sobre la gestión de efluentes en el contexto industrial abordado. Se incluyen además los anexos técnicos y la bibliografía consultada, que complementan y respaldan el desarrollo del proyecto.

CAPITULO 2

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

2.1. Origen de las aguas residuales

Toda comunidad genera residuos tanto sólidos como líquidos. La fracción líquida de los mismos se denomina aguas residuales, que es esencialmente el agua que se desecha, por ejemplo, una planta, luego de ser empleada en los diferentes usos de la misma.

Podemos definir el agua residual como la combinación de los residuos líquidos, o aguas portadoras de residuos, procedentes tanto de residencias como instituciones públicas y establecimientos industriales y comerciales, a los que pueden agregarse, eventualmente, aguas subterráneas, superficiales y pluviales (Metcalf & Eddy, 1995, p.1).

Entender el origen es clave para diseñar procesos adecuados de depuración y es importante porque:

- Determina el tipo de tratamiento necesario: No es lo mismo tratar aguas con carga orgánica que con metales pesados.
- Permite diseñar sistemas eficientes: Como rejillas, desarenadores, clarificadores o tratamientos biológicos.
- Ayuda a cumplir normativas ambientales: Cada tipo de efluente tiene límites específicos de descarga.
- Contribuye a la sostenibilidad: Al facilitar la reutilización del agua tratada en riego, procesos industriales o recarga de acuíferos.

2.2. Caracterización de las aguas residuales

La caracterización de efluentes provenientes de cualquiera de los orígenes ya mencionados, es fundamental, ya que con esos datos se puede definir los procesos y operaciones más adecuados para el efluente a tratar.

Con respecto a este tema hay que tener en cuenta que los líquidos residuales son inestables en el transcurso del tiempo. Sus complejos componentes químicos tanto orgánicos como inorgánicos son afectados por el accionar de las bacterias en busca de alimento y se opera una descomposición en complejos más simples, con abundante desprendimiento de gases. El proceso de descomposición es favorecido por los medios alcalinos y por temperaturas templadas y es retardado por los medios ácidos y temperaturas bajas. Cabe aclarar que la inestabilidad es directamente proporcional a la concentración de los efluentes ya que, al aumentar la dilución por el agregado de agua, se disminuye la actividad bacteriana, pues le es más difícil encontrar sustancias que la alimenten (Orellana J., 2005, p.1).

Metcalf y Eddy (1995) nos menciona que los estudios de caracterización de aguas residuales están encaminados a determinar las características físicas, química y biológicas del agua residual y sus concentraciones respectivas y segundo los medios óptimos para reducir las concentraciones de contaminantes.

Contaminantes de interés en el tratamiento del agua residual y su razón de importancia:

Contaminantes	Razón de la importancia
Sólidos en suspensión	Los sólidos en suspensión pueden dar lugar al desarrollo de depósitos de fango y de condiciones anaerobias cuando se vierte agua residual sin tratar al entorno acuático.
Materia orgánica biodegradable	Compuesta principalmente por proteínas, carbohidratos, grasas animales, la cual se mide, en la mayoría de las ocasiones en función de la DBO (demanda bioquímica de oxígeno) y de la DQO (demanda química de oxígeno). Si se descargan al entorno sin tratar su estabilización biológica puede llevar al agotamiento de los recursos naturales de oxígeno y al desarrollo de condiciones sépticas.
Patógenos	Pueden transmitirse enfermedades contagiosas por medio de los organismos patógenos presentes en el agua residual.
Nutrientes	Tanto el nitrógeno como el fósforo, junto con el carbono, son nutrientes esenciales para el crecimiento. Cuando se vierten al entorno acuático, estos nutrientes pueden favorecer el crecimiento de una vida acuática no deseada. Cuando se vierten al terreno en cantidades excesivas, también pueden provocar la contaminación del agua subterránea.
Contaminantes prioritarios	Son compuestos orgánicos o inorgánicos determinados en base a su carcinogenicidad, mutagenicidad, teratogenicidad o toxicidad aguda conocida o sospechada. Muchos de estos compuestos se hallan presentes en el agua residual.
Metales pesados	Los metales pesados son, frecuentemente, añadidos al agua residual en el curso de ciertas actividades comerciales e industriales, y puede ser necesario eliminarlos si se pretende reutilizar el agua residual.
Materia orgánica refractaria	Esta materia orgánica tiende a resistir los métodos convencionales de tratamiento. Por ejemplo, los agentes tensioactivos, los fenoles y los pesticidas agrícolas.
Sólidos inorgánicos disueltos	Los constituyentes inorgánicos tales como el calcio, sodio y los sulfatos se añaden al agua de suministro como consecuencia del uso del agua, y es posible que se deban eliminar si se va a reutilizar el agua residual.

(Metcalf & Eddy, 1995, p.56).

2.2.1 Muestreo para los análisis de efluentes

Para la caracterización surge la necesidad de realizar los análisis del efluente a los fines de obtener su composición y esto nos lleva a tratar los principios básicos de la toma de muestras o muestreo de los efluentes, para poder realizar la determinación con la necesaria rigurosidad. Los aspectos a destacar en el muestreo son:

- Lugares de muestreo
- Duración del muestreo
- Tipo de muestras
- Preservación de las muestras
- Volumen de las muestras

Lugares de muestreo

Es de gran importancia la elección del lugar o lugares de extracción de las muestras de manera tal que las mismas sean representativas del efluente que deseamos estudiar. En general debemos seleccionar un punto en donde se produzca la menor separación posible de los sólidos en suspensión que contenga el efluente. Para ello suelen elegirse puntos debajo de vertederos, aforadores de caudal, etc. Si ellos no existieran, se buscará el punto en donde se produzca la menor sedimentación posible, generalmente a la salida más cercana al generador del efluente.

Duración del muestreo

Para determinar la duración de la extracción de muestras debemos tener en cuenta la complejidad del proceso industrial o comercial. Cuando las variaciones de caudal, concentración o composición del mismo, sean muy altas, para poder tener resultados confiables, es necesario extender la extracción de muestras a por lo menos 2 semanas, mientras que en otros casos puede ser suficiente una semana. Se deberá considerar también la existencia de procesos o cambios de procesos estacionales, por lo que la duración de la extracción de muestras puede ser aún más extensa a los fines de incorporar dichos procesos.

Tipo de muestras

Hay que tener en cuenta que las muestras siempre representan la composición del efluente en el momento que se toman. Si se desea realizar un control más preciso se deberá establecer un plan de monitoreo extendido en el tiempo. En general las muestras son de tres tipos:

- Puntuales: La representatividad de una muestra puntual es de valor muy limitado, pero puede ser usada en el seguimiento de las características rápidamente cambiantes del efluente. Las series de muestras puntuales son útiles para apreciar las variaciones de parámetros tales como pH, gases disueltos, etc. Las muestras puntuales analizadas in situ son esenciales para las determinaciones de oxígeno disuelto, temperatura, demanda de cloro y cloro residual.
- Compuestas: Estas muestras indican las condiciones medias y dan resultados que son útiles para estimar las cantidades de materiales descargados a lo largo de un periodo prolongado.
- Compuesta compensada: Esta muestra es similar a la anterior, pero en este caso el volumen de la muestra será proporcional al caudal del efluente que circula en el momento de la extracción.

Preservación de las muestras

De igual importancia que la extracción de muestras, es la conservación de las mismas desde el momento que son tomadas hasta el momento de su análisis. Esto se funda en el carácter heterogéneo de los efluentes industriales y comerciales que los transforman en relativamente inestables cambiando rápidamente su composición en función de las sustancias que contienen, su concentración y reacciones químicas posible entre ellas.

Volumen de las muestras

Deberá tenerse en cuenta que el volumen de muestra extraídas sea suficiente como para realizar todas las determinaciones que sean necesarias. Es común extraer una mayor cantidad de muestras por si eventualmente se desea realizar determinaciones analíticas que inicialmente no fueron previstas o para control de análisis. Un litro es el volumen mínimo práctico de muestra. En términos generales puede decirse que es aconsejable la extracción de 2 a 4 litros de muestra.

2.2.2 Parámetros analizados en planta

Los efluentes contienen gran variedad de componentes y contaminantes, de todos los componentes y contaminantes que puede contener el agua residual ya mencionados, vamos a centrarnos en las determinaciones específicas realizadas en nuestro caso, para el tratamiento de efluente originados en la industria papelera, estos parámetros son:

- Sólidos totales
- pH
- Conductividad
- Temperatura
- DQO (Demanda química de oxígeno)
- DBO₅ (Demanda bioquímica de oxígeno)
- OD (Oxígeno disuelto)

Para el presente trabajo estos parámetros fueron analizados atendiendo a la necesidad de realizar un seguimiento de los valores, desde la entrada a planta de tratamiento hasta su vuelco final que se realiza al arroyo Calimayo. Se debe cumplir con la normativa vigente para el vertido a cuerpos de agua (SEMA 030).

A continuación, se describirá cada uno de estos análisis particularizándolos para nuestro caso de estudio.

2.2.3. Medición de sólidos totales

La característica física más importante del agua residual es el contenido total de sólidos, término que engloba la materia en suspensión, la materia sedimentable, la materia coloidal y la materia disuelta (Metcalf & Eddy, 1995, p. 59)

El nivel de sólidos presentes en el agua residual influye directamente en la cantidad de lodo generado durante el tratamiento. Estos sólidos se clasifican en varias categorías:

- Sólidos totales: Representan el residuo que queda tras evaporar y secar el agua entre 103 °C y 105 °C.
- Sólidos sedimentables: Son aquellos que se depositan al fondo del cono Imhoff en una hora; indican la fracción removible por sedimentación simple (expresados en mL/L).
- Sólidos disueltos y suspendidos: Los disueltos (menores a 1.2 µm) requieren procesos como oxidación biológica o coagulación para su remoción. Los suspendidos (mayores a 1.2 µm) son la diferencia entre sólidos totales y disueltos.

- Sólidos volátiles: Constituyen la parte orgánica que se pierde por calcinación a 550 ± 50 °C; son clave en el manejo de lodos activados y digeridos.
- Sólidos fijos: Son los residuos inorgánicos o minerales remanentes tras la calcinación.

Conocer y diferenciar estas fracciones es esencial para diseñar procesos de tratamiento adecuados, optimizar la operación de plantas y cumplir con criterios ambientales en la disposición de efluentes.

Sólidos Totales en planta de tratamientos de efluentes de papelera

En el contexto específico de nuestra planta, el monitoreo de sólidos en el efluente se centra principalmente en la determinación de sólidos sedimentables (SS), a partir de muestras tomadas en distintos puntos del proceso de tratamiento. Las demás determinaciones, como sólidos volátiles, sólidos fijos, sólidos solubles en éter (SSE), sólidos sedimentables y, por extensión, sólidos totales, son realizadas por laboratorios externos, en nuestro caso por el Laboratorio de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC), con una frecuencia de una a dos veces por mes, según la necesidad de contar con datos adicionales que permitan verificar el cumplimiento de los valores establecidos por la normativa vigente.

Cabe destacar que el control de estos parámetros, especialmente los sólidos solubles, es fundamental para asegurar que el efluente tratado cumpla con los límites legales antes de su descarga al cuerpo receptor, en este caso el arroyo Calimayo. Los resultados obtenidos de estos análisis pueden consultarse en el Anexo B.

Las muestras son recolectadas en 3 puntos, el primer punto es en el canal de entrada a planta de tratamiento, el segundo punto es en la entrada al clarificador y el tercero es a la salida del clarificador, todos estos puntos pertenecientes al tratamiento primario de efluentes.

El primer punto de muestreo, sobre el canal de entrada a planta, es realizado porque con estos valores se toma conocimiento de la carga de sólidos sedimentables que ingresa al proceso.

Una vez realizada la toma de muestra, el operario procede de forma inmediata a trasladarla al laboratorio de planta, donde se encuentran dispuestos los conos Imhoff, instrumentos específicamente diseñados para la determinación de sólidos sedimentables en muestras líquidas. Estos conos, fabricados en vidrio transparente (o de plástico en nuestro caso) y con forma cónica, permiten observar y cuantificar el volumen de sólidos que se depositan por gravedad en el fondo del recipiente, generalmente después de un período de sedimentación de una hora.

El procedimiento consiste en verter cuidadosamente la muestra de efluente líquido dentro del cono, asegurando que se complete exactamente 1 litro de volumen, tal como lo establece el protocolo estándar para este tipo de análisis. Esta precisión es fundamental, ya que la lectura del volumen de sólidos sedimentados se realiza directamente en mililitros (mL) sobre la escala graduada del cono, lo que permite una interpretación directa del resultado en relación al volumen total de muestra. Este proceso puede observarse en las Figuras 2.1 y 2.2, donde se ilustran tanto el llenado como la disposición de los conos en el laboratorio.



Figura 2.1: Conos Imhoff usados para realizar ensayo de Solidos Sedimentables (SS)



Figura 2.2: Conos Imhoff con efluente liquido usados para realizar ensayo de Solidos Sedimentables (SS)

Luego pasados 10 minutos se realiza lectura de los sólidos depositados en el cono y a continuación pasados 120 minutos se realiza la segunda lectura del mismo, recordar que dichas lecturas están en unidades de mL/L.

2.2.4 Medición de pH

El pH es una variable fisicoquímica fundamental en el tratamiento de aguas residuales, ya que condiciona múltiples procesos tanto físico-químicos como biológicos. Técnicamente, el pH se define como el logaritmo negativo de la concentración molar de iones hidrógeno (H^+) en una solución acuosa. Esta medida permite evaluar el grado de acidez o alcalinidad del agua, siendo un parámetro crítico para la eficiencia de los tratamientos y la protección del medio ambiente.

En el contexto de tratamientos biológicos, un pH inferior a 6 puede favorecer el desarrollo de hongos en detrimento de las bacterias, lo cual altera la dinámica microbiana deseada para la degradación de materia orgánica. Por otro lado, el poder bactericida del cloro se ve incrementado en medios ácidos, debido a la predominancia del ácido hipocloroso (HClO), la forma más activa del cloro como desinfectante.

En condiciones alcalinas, el comportamiento del nitrógeno amoniacal también se modifica: a pH elevados (10.5–11.5), predomina la forma gaseosa no iónica (NH_3), que es tóxica para organismos acuáticos, pero puede ser removida eficientemente mediante procesos de aireación forzada.

El rango de pH considerado adecuado para la mayoría de los procesos de tratamiento y para la preservación de la vida biológica acuática se encuentra generalmente entre 6.5 y 8.5, aunque puede variar según el tipo de tratamiento y los objetivos específicos. En la provincia de Tucumán, la normativa vigente establece que el pH del efluente tratado debe mantenerse entre 6 y 9, con el fin de proteger tanto la salud humana como los ecosistemas acuáticos. Para más detalles sobre esta regulación, se remite al Anexo A.

Además, el pH desempeña un papel determinante en los procesos de coagulación y floculación, utilizados para la remoción de partículas suspendidas. Durante la coagulación, el pH influye directamente en la carga eléctrica de las partículas, afectando su capacidad de agregación. En medios ácidos, las partículas tienden a adquirir carga positiva, mientras que en medios básicos predominan las cargas negativas. La neutralización de estas cargas es esencial para la formación de coágulos estables.

Los rangos óptimos de pH para la floculación varían según el tipo de agente floculante utilizado, aunque en general se sitúan entre 6 y 9. Es importante considerar que cada floculante posee un rango específico de pH en el cual su eficiencia es máxima (Influencia del pH en coagulación y floculación, 2025).

Determinación de pH en efluente realizadas en planta

La determinación en planta de pH se efectúa, una vez por turno de operarios, es decir 3 veces por día, en la descarga final del efluente tratado en cuerpo de agua, y en el ingreso a planta, más precisamente la muestra se recolecta en el canal de ingreso de efluente, antes de llegar a la primera reja, la muestra se analiza conjuntamente con el análisis de sólidos sedimentables (SS) explicado anteriormente. La medición analítica de este parámetro se realiza inmediatamente después de la recolección de muestra, a fin de evitar degradación de la muestra.

El pH-metro usado es el Testo 206 de procedencia alemana (Figura 2.3), el cual además de ser un instrumento para medir pH también mide temperatura, necesaria para su corrección automática. El mismo, consta de un módulo central, con pilas recargables, un TopSafe que es una especie de plástico que recubre el módulo para su protección contra salpicaduras, rasguños y golpes, el módulo posee una sonda de inmersión con un electrodo de pH de vidrio con sensor de temperatura, el cual además posee un capuchón de almacenamiento con gel electrolito, el cual, tiene la ventaja de una vez realizada la medición y limpieza correspondiente del electrodo, se coloca el capuchón, el cual entra a presión, manteniendo hidratado el electrodo para evitar su deterioro. Sus especificaciones técnicas del equipo se encuentran en el Anexo C.



Figura 2.3: pH-Metro Testo 206 recopilada de Manual de Instrucciones del pH metro

Las muestras tomadas en estos dos puntos, obedecen, en primer lugar, para la detección temprana de desviación del parámetro, por fuera del rango impuesto por ley, el cual va desde 6 a 9 unidades de pH (ver Anexo A), y además favorecer un pH óptimo o cercano a él, para favorecer la precipitación de lodos en la operación del clarificador en el tratamiento primario y el correcto funcionamiento del tratamiento secundario subsiguiente.

2.2.5 Medición de conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica es una propiedad fisicoquímica que refleja la capacidad del agua para conducir corriente eléctrica, directamente relacionada con la concentración de iones disueltos en el medio acuoso. En el contexto del tratamiento de aguas residuales, este parámetro adquiere relevancia tanto por su implicancia en la calidad del efluente como por su impacto ambiental.

Una conductividad elevada indica una alta carga iónica, lo cual puede afectar negativamente los procesos biológicos de depuración, interferir en la eficiencia de tratamientos físico-químicos y comprometer la calidad del agua vertida en cuerpos receptores. Por ello, reducir la conductividad constituye un paso esencial para minimizar los efectos adversos sobre los ecosistemas acuáticos y cumplir con los estándares regulatorios.

El monitoreo continuo de la conductividad permite evaluar la eficiencia del tratamiento y detectar posibles desviaciones en la composición del efluente. Este control es especialmente importante en sistemas que reciben aportes industriales, donde la variabilidad en la carga iónica puede ser significativa. Según Vitaqua (2025), mantener la conductividad dentro de rangos aceptables es clave para garantizar que el agua tratada cumpla con las normativas vigentes y sea apta para su disposición final o reutilización.

Si el agua tiene alta conductividad, significa que tiene un alto contenido de sales, ácidos y bases disueltos. Esto puede ser señal de una posible contaminación por factores humanos, como la descarga de efluentes industriales o aguas residuales sin tratamiento, o también por factores naturales, como la disolución de minerales del suelo o rocas.

La presencia excesiva de iones en el agua no solo compromete la calidad del efluente tratado, sino que también puede afectar negativamente los procesos de tratamiento biológico y físico-químico, además de representar un riesgo para los cuerpos receptores y los usos posteriores del agua. Por ello, la reducción de la conductividad es una etapa crítica en el diseño y operación de sistemas de tratamiento de aguas residuales.

Entre los métodos más utilizados para disminuir la conductividad se destacan: Tratamientos de membrana como ósmosis inversa, Resinas de intercambio iónico, Electrodialisis, destilación y dilución.

Puede ser necesario combinar varios de estos métodos para alcanzar los niveles deseados de conductividad. La elección del método o combinación adecuada variará en función del volumen de agua, el tipo y la concentración de las sales presentes y la conductividad objetivo, entre otros factores (Instituto del Agua, 2025).

Determinación de Conductividad en efluente realizada en planta

Las determinaciones químicas de conductividad realizadas en planta, son periódicas, realizándose 1 ensayo por turno de operadores, es decir, 3 ensayos de determinación por día.

Las muestras son tomadas regularmente en un solo punto, el cual corresponde al canal de ingreso a planta, la muestra recolectada es usada además para la determinación de sólidos sedimentables, pH y oxígeno disuelto (OD) y en la descarga a arroyo Calimayo.

El equipo usado para esta determinación (y también para la determinación de oxígeno disuelto) es el Hach HQ 440d multi (Figura 2.4), el cual está conectado directamente a corriente alterna 220v de red eléctrica de planta, teniendo además la posibilidad de usar pilas. El equipo de medición de laboratorio de la serie HQd se usan con sondas digitales intelliCAL™ para medir los parámetros de conductividad y oxígeno disuelto en las muestras líquidas de efluentes recolectadas. Las descripciones técnicas del equipo se encuentran en el Anexo C. La calibración de dicho dispositivo se realiza una vez por semana, con solución brindada por el fabricante, con conductividad constante de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.



Figura 2.4: Equipo Hach HQ 440d multi donde se observa sondas de medición de Conductividad, sonda de Temperatura y sonda de Oxígeno Disuelto

En eventuales casos se toma muestras puntuales en otros puntos, como ser salida de líquido sobrenadante clarificado en la salida del clarifloculador de planta, cuando se observa desviaciones (valores mayores a 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$), se realiza una muestra y luego, se toman 2 o 3 muestras sucesivas, cada 1 hora. Esto ayuda a tomar decisiones correctivas tempranas como por ejemplo diluir, recirculando agua clarificada.

2.2.6 Medición de oxígeno disuelto

El oxígeno disuelto (OD) es uno de los parámetros más críticos en la evaluación de la calidad del agua, especialmente en lo que respecta a la capacidad de los cuerpos

receptores para sostener vida acuática aerobia y llevar a cabo procesos de autodepuración natural.

El oxígeno es un gas de baja solubilidad en el agua, cuya concentración varía en función de la temperatura y la presión atmosférica y es requerido para la vida acuática aerobia. La solubilidad del oxígeno atmosférico en aguas dulces oscila entre 7 mg/L a 35°C y 14.6 mg/L a 0°C para presión atmosférica de una atmosfera, lo que evidencia una disminución significativa de la disponibilidad de oxígeno con el aumento de la temperatura

Por estas razones, el tratamiento adecuado de las aguas residuales antes de su disposición en ríos, arroyos o embalses es indispensable para preservar la calidad del agua y evitar impactos ecológicos negativos. Tal como señala Rojas (2004, p. 64), la baja disponibilidad de oxígeno disuelto limita la capacidad de autodepuración de los cuerpos de agua, haciendo imprescindible la intervención mediante tecnologías de tratamiento que reduzcan la carga orgánica y favorezcan la reoxigenación.

Debido a que la velocidad de las reacciones bioquímicas que consumen oxígeno aumenta con la temperatura, los niveles de oxígeno disuelto tienden a ser más críticos en las épocas invernales. El problema se agrava en los meses de invierno, donde el caudal de los cursos de agua es generalmente menor, razón por la cual la cantidad total de oxígeno disponible es también menor. Dado que evita la formación de olores desagradables en las aguas residuales, es deseable y conveniente disponer de cantidades suficientes de oxígeno disuelto (Metcalf & Eddy, 1995, p.102).

La medición regular de OD en aguas residuales es vital. Además, puede ser un indicador clave de la eficacia de un sistema de tratamiento de agua residual, ya que niveles adecuados de OD pueden sugerir que la descomposición de contaminantes está ocurriendo de manera efectiva. Un nivel bajo de OD puede indicar un problema con el tratamiento de aguas residuales, como una sobrecarga de contaminantes orgánicos o problemas con el sistema de aireación.

Determinación de oxígeno disuelto (OD) en efluente realizada en planta

Las determinaciones analíticas de oxígeno disuelto en planta de tratamiento de efluentes, son periódicas, ya que se analiza las muestras recolectadas por el operador, 1 vez por turno, es decir, 3 veces por día, en dos puntos de muestreo, en el canal de ingreso a planta, y sobre el vuelco final al arroyo Calimayo.

Dicha determinación, se realiza con el mismo equipo antes mencionado para la determinación conjunta de conductividad, dicho equipo es el Hach HQ 440d multi (Figura 2.4).

2.2.7 Demanda química de oxígeno (DQO)

La DQO o demanda química de oxígeno es un índice indispensable en el análisis y tratamiento de las aguas residuales. Representa una medición cuantitativa de la cantidad total de oxígeno requerido para oxidar completamente todas las sustancias orgánicas e inorgánicas presentes en un líquido, en este caso, las aguas residuales (Instituto del Agua, 2025)

La materia orgánica presente en las aguas residuales, ya sea de origen animal o vegetal, está compuesta principalmente por elementos como carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O) y nitrógeno (N). Estos elementos se combinan para formar distintos grupos de compuestos, entre los que se destacan los hidratos de carbono, proteínas, aceites y grasas, así como los productos derivados de su descomposición.

Estos compuestos representan una carga contaminante significativa, ya que su degradación por acción microbiana requiere oxígeno disuelto. De hecho, si se conoce

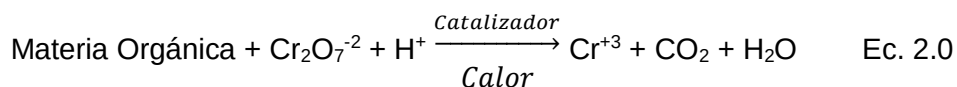
la fórmula química de la materia orgánica involucrada, es posible calcular la demanda teórica de oxígeno necesaria para su oxidación completa, lo que permite estimar con mayor precisión el impacto que dicha carga puede tener sobre los cuerpos receptores (Metcalf & Eddy, 1995, p. 94).

La demanda teórica de oxígeno (DTO) corresponde a la cantidad estequiométrica de oxígeno requerida para oxidar completamente un determinado compuesto. Normalmente se expresa en mg de oxígeno requerido por litro de solución (mg/L), es un valor calculado y solo puede evaluarse si se dispone de un análisis químico completo del agua residual, lo cual no es normalmente el caso. En consecuencia, su utilización es muy limitada (Ramalho, 1996, p. 28).

El ensayo de DQO se emplea para medir el contenido de materia orgánica tanto de las aguas naturales como las residuales. En el ensayo, se emplea un agente químico fuertemente oxidante en medio ácido para la determinación del equivalente de oxígeno de la materia orgánica que puede oxidarse. El dicromato potásico proporciona excelentes resultados en este sentido. El ensayo debe hacerse a elevadas temperaturas (Metcalf & Eddy, 1995, p. 93).

Teniendo en cuenta que la oxidación que se lleva a cabo en un laboratorio de ensayos o de análisis de DQO no se corresponde con la estequiométrica, el valor de la DQO no debe esperarse que sea igual al de la DTO. Los análisis normalizados para determinaciones de la DQO dan valores que varían entre el 80 y el 85% de la DTO, dependiendo de la composición química del agua residual que se está ensayando (Ramalho, 1996, p. 29).

La reacción principal puede representarse mediante la Ec. (2.0):



La DQO es útil como parámetro de concentración orgánica en aguas residuales industriales o municipales tóxicas a la vida biológica y se puede realizar en solo 3 horas.

Reducir la demanda química de oxígeno (DQO) en aguas residuales es fundamental para minimizar el impacto ambiental de los desechos industriales y domésticos.

Mencionamos algunas estrategias para eliminar la materia orgánica:

1. Tratamiento primario: Esta etapa involucra la remoción de sólidos suspendidos y sedimentables en el agua residual. Esto se logra mediante procesos de sedimentación y flotación. Los sólidos removidos durante esta fase a menudo contribuyen a la DQO total.
2. Tratamiento secundario: Es donde ocurre la degradación de la materia orgánica disuelta. Normalmente, este proceso se lleva a cabo a través de la oxidación biológica utilizando bacterias aeróbicas.
3. Tratamiento terciario: Esencialmente, se emplea para la remoción de nutrientes como nitrógeno y fósforo. En algunos casos, también puede incluir tratamientos avanzados para remover compuestos orgánicos específicos que aún quedan.
4. Adsorción con carbón activado: Este proceso consiste en hacer pasar el agua residual a través de una cama de carbón activado. Los contaminantes orgánicos en el agua se adhieren a la superficie del carbón, reduciendo así la DQO.
5. Procesos de oxidación avanzada (POA): Los POA son una serie de técnicas de tratamiento que incluyen ozonización, fotocatálisis y oxidación con peróxido de hidrógeno, que oxidan los compuestos orgánicos y reducen la DQO.

6. Tratamiento con resinas de intercambio iónico: Este método es particularmente útil para tratar aguas con alta concentración de iones metálicos.

Un alto valor de DQO significa que se requiere una gran cantidad de oxígeno para descomponer estos compuestos, pudiendo generar un impacto negativo en la calidad del agua y en la vida acuática. La falta de oxígeno en el agua puede llevar a la muerte de los organismos que viven en ella.

Determinación de demanda química de oxígeno (DQO) en efluente realizada en planta

Los ensayos de determinación analítica de la DQO en planta de tratamiento, es tal vez, uno de los más importantes, ya que, con él se establece, primeramente, el funcionamiento del tratamiento primario, a su vez que denota un aumento en el efluente líquido de materia orgánica susceptible a oxidarse además de brindar información de la contaminación presente y cumplir con los valores exigidos por legislación vigente, el cual es de 250 mg/L como máximo (Ver Anexo A de legislación vigente) RES. SEMA030.

Las muestras se recolectan, periódicamente, una vez por turno del operador, es decir, 3 muestras por día. Los puntos de recolección son el canal de entrada a planta de tratamiento de efluentes, a la entrada y salida del clarificador, sobre el líquido sobrenadante y en el vuelco final.

Los equipos usados en planta son un espectrofotómetro Hach DR600 (Figura 2.5), el cual cuenta con distintos programas de ensayos disponibles, en particular, cuenta con dos análisis de DQO programados, uno DQO RB que es para ensayos de DQO de 0 a 150 mg/L a una longitud de onda de 440 nm y se emplea para detectar el dicromato de potasio ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) en su estado oxidado (color naranja). Y otro programa de DQO RA que es para muestras que contengan carga orgánica que genere más de 150 mg/L usando una longitud de onda de 620 nm y se usa para medir el ion crómico (Cr^{3+}), que se forma tras la reducción del dicromato (color verde) durante la reacción. En laboratorio de planta, se usa siempre la función DQO RA salvo muy pocas excepciones. Se dispone especificaciones técnicas del equipo en Anexo C.



Figura 2.5: Espectrofotómetro Hach DR 6000 usado para ensayo de DQO

Complementariamente, se utiliza un digestor Hach DRB 200 (Figura 2.6), el instrumento tiene un bloque calefactor que aumenta la temperatura de las soluciones de cubetas de muestra redondas hasta alcanzar una temperatura especificada durante un periodo de tiempo especificado. El DRB200 tiene seis programas de temperatura guardados, y tres programas de temperatura configurados por el usuario y guardados. Y cumple la función de conducir la reacción redox manteniendo calefaccionado el vial a una temperatura constante por el tiempo requerido. En la Figura 2.11 se puede observar un ejemplo los resultados de un análisis de una muestra mostrado por el equipo.



Figura 2.6: Digestor Hach DRB 200

Además, se cuenta con una pipeta automática (Figura 2.7) de 200 μ l de capacidad, conjuntamente con un balón de vidrio de 400 ml que contiene agua destilada.



Figura 2.7: Pipeta Automática de 200 μ L de capacidad

Se utilizaron viales prellenados con una solución de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) y ácido sulfúrico (H_2SO_4) (Figura 2.8 y Figura 2.10) para la determinación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) en aguas residuales, conforme al método Hach 6000, aprobado por la USEPA.

Este procedimiento se basa en la norma ISO 15705 y es equivalente a los métodos EPA 410.4 y APHA 5220 D. La digestión térmica de las muestras se realizó utilizando el reactor Hach DRB 200, cuya ficha técnica se presenta en el Anexo C.

Los viales utilizados cuentan con su correspondiente hoja de seguridad (Figura 2.9).



Figura 2.8: Foto de viales prellenados para análisis de DQO recopilada de manual Hach (s.f.)

2.2. Elementos de la etiqueta

Etiquetado según el Reglamento (CE) N° 1272/2008 [CLP]

Pictogramas de peligro (CLP)



Palabra de advertencia (CLP)

Contiene

Indicaciones de peligro (CLP)

Consejos de prudencia (CLP)

- : Peligro
- : Ácido sulfúrico; ácido dicromico (potasio dicromato/ácido sulfúrico); Sulfato de mercurio
- : H290 - Puede ser corrosivo para los metales.
- H302 - Nocivo en caso de ingestión.
- H332 - Nocivo en caso de inhalación.
- H314 - Provoca quemaduras graves en la piel y lesiones oculares graves.
- H340 - Puede provocar defectos genéticos.
- H350i - Puede provocar cáncer por inhalación.
- H360 - Puede perjudicar la fertilidad o dañar al feto.
- H410 - Muy tóxico para los organismos acuáticos, con efectos nocivos duraderos.
- : P301+P312 - EN CASO DE INGESTIÓN: Llamar a un CENTRO DE INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA o a un médico si se encuentra mal.
- P301+P330+P331 - EN CASO DE INGESTIÓN: Enjuagarse la boca. NO provocar el vómito.
- P303+P361+P353 - EN CASO DE CONTACTO CON LA PIEL (o el pelo): Quitarse inmediatamente las prendas contaminadas. Aclararse la piel con agua o ducharse.
- P304+P340 - EN CASO DE INHALACIÓN: Transportar a la víctima al exterior y mantenerla en reposo en una posición confortable para respirar.
- P305+P351+P338 - EN CASO DE CONTACTO CON LOS OJOS: Aclarar cuidadosamente con agua durante varios minutos. Quitar las lentes de contacto, si lleva y resulta fácil. Seguir aclarando.
- P308+P313 - EN CASO DE exposición manifiesta o presunta: Consultar a un médico.

Figura 2.9: Ficha de seguridad etiquetado de viales recopilada de manual de Hach (s.f.)



Figura 2.10: A la derecha vial con muestra patrón blanco, a la izquierda vial con muestra de efluente

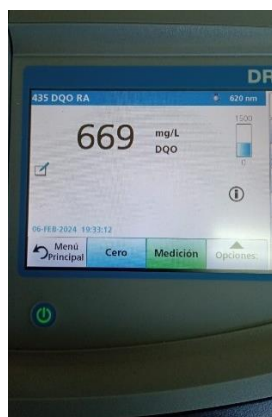


Figura 2.11: Resultado de análisis de muestra mostrado por equipo Hach DR 6000

2.2.8 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) se usa como medida de la cantidad de oxígeno requerido para la oxidación de la materia orgánica biodegradable presente en la muestra de agua y como resultado de la acción de oxidación bioquímica aerobia. La demanda de oxígeno de las aguas residuales es resultado de tres tipos de materiales: (1) materiales orgánicos carbónicos, utilizables como fuente de alimentación por organismos aerobios, (2) nitrógeno oxidable, derivado de la presencia de nitritos, amoníaco, y en general compuestos orgánicos nitrogenados que sirven como alimentación para bacterias específicas (Nitrosomonas y Nitrobacter). Este tipo de oxidación es la nitrificación y (3) compuestos químicos reductores (ion ferroso, sulfitos, sulfuros, que se oxidan por oxígeno disuelto) (Ramalho, 1996, p.34).

El parámetro de contaminación orgánica más ampliamente empleado, aplicable tanto a aguas residuales como a aguas superficiales, es la DBO a 5 días (DBO_5). La determinación del mismo está relacionada con la medición del oxígeno disuelto que consumen los microorganismos en el proceso de oxidación bioquímica de la materia orgánica. (Metcalf & Eddy, 1995, p.80).

El periodo de incubación es, normalmente, de 5 días a 20°C, aunque también se pueden adoptar diferentes periodos de tiempo y temperaturas. También se suelen emplear periodos más largos (normalmente 7 días), para acomodarse a los turnos de trabajo de la planta (Metcalf & Eddy, 1995, p.81).

Ramalho (1996, p.35) conjuntamente especifica que el pH de la solución de la botella debe ser cercano a 7 (neutro).

El cociente DBO_5/DQO de un agua residual es un indicador importante en el análisis del agua. Este cociente representa la relación entre la Demanda Bioquímica de Oxígeno a 5 días (DBO_5) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO).

La DBO_5 mide la cantidad de oxígeno necesaria para la descomposición biológica de materia orgánica en un periodo de 5 días. Mientras que la DQO representa la cantidad de oxígeno requerido para oxidar completamente la materia orgánica, tanto biodegradable como no biodegradable.

Por otra parte, el cociente DBO_5/DQO da una idea sobre la biodegradabilidad de la materia orgánica presente en el agua residual. Si este valor se acerca a 1, significa que gran parte de la materia orgánica es biodegradable. Por el contrario, si el cociente es bajo, significa que la mayor parte de la materia orgánica no es fácilmente biodegradable.

Según Química Cygnus (2025), existen diversas técnicas para reducir los niveles de DBO y DQO en aguas residuales, las cuales son:

1. Tratamiento Biológico

El tratamiento biológico es uno de los métodos más efectivos para reducir DBO y DQO. Incluye procesos aeróbicos y anaeróbicos que utilizan microorganismos para descomponer la materia orgánica.

- Lodos Activados: Un proceso aeróbico donde las aguas residuales se mezclan con lodos que contienen microorganismos, los cuales descomponen la materia orgánica.
- Filtros Biológicos: Utilizan medios de soporte donde se desarrollan biofilms de microorganismos que oxidan la materia orgánica.
- Digestión Anaeróbica: Un proceso en ausencia de oxígeno que descompone la materia orgánica, produciendo biogás como subproducto.

2. Tratamiento Físico-Químico

El tratamiento físico-químico es otra técnica esencial para reducir DQO y, en menor medida, DBO.

- Coagulación y Floculación: Añadir coagulantes y floculantes para agrupar partículas suspendidas y coloides, que luego son removidos mediante sedimentación o flotación.
- Oxidación Química: Utiliza agentes oxidantes como el ozono, el cloro o el peróxido de hidrógeno para oxidar la materia orgánica y reducir la DQO.
- Filtración Avanzada: Sistemas de filtración como membranas de ultrafiltración y nanofiltración pueden remover una amplia gama de contaminantes orgánicos.

3. Tratamiento Avanzado

Para cumplir con los estándares más estrictos, las plantas de tratamiento pueden recurrir a tecnologías avanzadas.

- Procesos de Oxidación Avanzada (AOPs): Combinan oxidantes fuertes con luz UV o catalizadores para generar radicales hidroxilo, que son altamente efectivos en la descomposición de contaminantes orgánicos.
- Biofiltros de Lecho Móvil (MBBR): Utilizan portadores móviles que soportan una biomasa densa de microorganismos, optimizando la descomposición de la materia orgánica.

Para la determinación de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) se utilizan dos métodos, el método clásico, aprobado por normativa EPA es el método por dilución. Y el otro método, corresponde a los métodos manométricos para la determinación de DBO. La exactitud del método manométrico se considera comparable a la del método de dilución (Ramalho, 1996, pp. 42-43).

Cuando se trabaja con muestras de aguas residuales que presentan altas demandas de oxígeno disuelto (OD), es necesario aplicar una dilución previa antes de realizar el ensayo de Demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco días (DBO₅). Esta práctica responde a una razón técnica fundamental: si la carga orgánica de la muestra es

demasiado elevada, puede consumir la totalidad del oxígeno disponible en el frasco de incubación antes de que transcurra el período de cinco días, lo que impide obtener una lectura precisa y confiable del parámetro.

En el contexto operativo de plantas de tratamiento de aguas residuales, el método manométrico se ha consolidado como una herramienta eficaz para evaluar y cuantificar la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) de manera práctica y confiable, sin necesidad de recurrir a reactivos peligrosos como el mercurio, tradicionalmente utilizado en otros sistemas de medición.

La tecnología utilizada en planta para este fin es mediante los sistemas OxiTop®-C se pueden ejecutar cómodamente las mediciones, libre de mercurio, de respiración necesarias para la biodegradación anaeróbica y aeróbica con una evaluación excepcional mediante el método manométrico que es el usado en planta.

Las ventajas de OxiTop® son sencillo manejo, mejor control, muestras sin dilución, memoria no volátil de los valores medidos y libre de sustancias contaminantes, a lo cual se añaden rangos de medición de hasta 4000 mg/L DBO. Los valores pueden leerse directamente como la DBO en mg/l, puesto que la conversión de la presión medida se realiza automáticamente.

La medición con OxiTop® consiste en una medición de presión en un sistema cerrado: los microorganismos que se encuentran en la muestra consumen oxígeno y generan CO₂. El CO₂ se absorbe con NaOH. Creando una presión negativa que puede leerse directamente como valor de medición en forma de DBO en mg/l. Con los volúmenes de muestras empleados se regula cuánto oxígeno está disponible con lo cual se puede realizar una determinación completa de la DBO. Mediante los diferentes volúmenes empleados se pueden medir rangos de hasta 4.000 mg/l. Los cabezales de OxiTop® (verdes y amarillos para diferenciar la entrada y la salida) disponen de una función de temperatura automática: si la temperatura de la muestra sigue estando fría, se demora automáticamente el inicio de la medición hasta alcanzar una temperatura constante, por lo menos durante 1 hora. Junto al almacenamiento automático de 5 valores de medición (1 valor cada día) se pueden leer manualmente otros valores en ese período o después de 5 días; de esa forma los valores de control o las mediciones pueden seguirse durante un período más extenso (I.C.T, S.L., s.f.). En la Figura 2.12 se puede observar los datos técnicos de botella y del Cabezal Oxitop.



	OxiTop® IS 6/ IS 12
Accesorios	
Recipiente con conexión de cabezal medidor	Frasco ambar 510 ml con carcasa de goma
Número	6 / 12
Cabezales medidores	OxiTop®
Plataforma de agitación	IS 6/IS 12
Controlador	—
Software + Cable	—
Absorbente de CO ₂	●
Inhibidor de nitrificación	●
Matraces aforados de expansión	164 / 432 ml
Barras agitadoras	6/12
Distanciador de barras agitadoras	●
Bloques de diagrama	●

Figura 2.12: Datos técnicos de botella/Cabezal Oxitop recopilado de (I.C.T, S.L., s.f.)

Los agitadores IS 6 e IS 12 han sido desarrollados especialmente para la medición de DBO con el sistema OxiTop®. La regulación de la velocidad controlada por el software evita el bloqueo o la suspensión de la barra agitadora magnética. El número de revoluciones se ha elegido de modo que se garantice un óptimo intercambio de gases con la muestra. El agitador no se desgasta y no necesita mantenimiento alguno puesto que carece de elementos móviles. En la Figura 2.13 se pueden observar los datos técnicos de Agitador Oxitop.

Datos técnicos			
	IS 6	IS 12	IS 6-Var
Número de puntos de agitación	6	12	6
Número de resoluciones del punto de agitación	ejecutado por el programa 180 ... 450 min ⁻¹		
Temperatura ambiente	Almacenamiento -25 °C ... +65 °C Operación: +5 °C ... +40 °C		
Dimensiones (Altura x A x L en mm)	67 x 265 x 181	67 x 350 x 266	67 x 265 x 181

Figura 2.13: Datos técnicos de Agitador Oxitop recopilado de (I.C.T, S.L., s.f.).

La incubadora con sistema térmico de circulación forzada de aire – 20 ± 0,5 °C La cámara de incubación OxiTop® Box es un modelo de mesa con puerta abatible transparente y puede ser cargada con un máximo de plazas de medición OxiTop® o un máximo de 20 frascos de Karlsruhe. La caja está fabricada de materiales no sujetos a la corrosión, y la unidad de refrigeración es libre de CFC. El ventilador de corriente transversal asegura la distribución uniforme de la temperatura. La incubadora tiene una función de descongelación automática con evaporación del agua de condensación. (I.C.T, S.L., s.f.). En la Figura 2.14 se puede observar la cámara de incubación OxiTop® con sistema térmico de circulación forzada de aire.

Datos técnicos	
Control de temperatura	20 °C ±0,5 K
Temperatura ambiente	Almacenamiento: -25 °C ... +50 °C Operación: +10 °C ... +32 °C
Consumo de potencia	200 W
Dimensiones	375 x 425 x 600 mm (Altura x A x L)
Peso aprox.	30 kg

Figura 2.14: Cámara de incubación OxiTop® con sistema térmico de circulación forzada de aire recopilado (I.C.T, S.L., s.f.).

Determinación de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) en efluente realizada en planta

Los ensayos de determinación analítica de la demanda bioquímica de oxígeno realizadas en el laboratorio, son llevadas a cabo sobre muestras recolectadas solo en descarga final del efluente líquido a arroyo Calimayo, una vez por turno de operadores, es decir, 3 veces por día con el fin de realizar seguimiento para que el efluente final cumpla con requisitos vigentes por legislación actual y eventualmente en canal de ingreso a planta.

Para realizar el ensayo, se miden con una probeta graduada, un volumen, que depende de la estimación de la DBO que tendría la muestra, esta estimación de volumen obedece a lo expuesto por la Figura 2.21.

BSB / BOD / DBO (mg/l)	VOLUME (ml)	FACTOR
0 - 40	432	1
0 - 80	365	2
0 - 200	250	5
0 - 400	164	10
0 - 800	97	20
0 - 2000	43,5	50

Figura 2.15: Volumen a medir según estimación de DBO en muestra

El volumen a medir, en consecuencia, depende de los parámetros de DBO, pero al no tener el parámetro hasta después de 5 días, nos basamos en los valores puntuales de DQO medidos para la misma muestra, el volumen medido es de 432 ml en la mayoría de los casos, y de 365 ml en algunos casos puntuales, cuando hay desviación de los parámetros por excesiva carga orgánica en el efluente. Esta disminución de volumen, viene acompañada con un factor, el cual, sirve para multiplicar la medición final de DBO para obtener el resultado final.

Una vez realizada la medición de volumen, se procede a llenar la respectiva botella ámbar de 510 ml, depositar en ella, un buzo de agitación magnética para luego poner un tapón de goma, con 2 o 3 lentejuelas de NaOH (hidróxido de sodio) y tapar dicho frasco con cabezal de OxiTop® (Figuras 2.16 y 2.17).



Figura 2.16: Frascos ámbar con cabezal de OxiTop® y además frasco con NaOH



Figura 2.17: Cabezal oxitop usado para determinación de DBO_5

Es importante, etiquetar las botellas con el día en que se realizó el análisis, ya que recién al quinto día se realiza la lectura ya que de lo contrario puede ocasionar mezcla de muestras, teniendo en cuenta que todos los días se hacen ensayos y son muchos frascos a gestionar.

Una vez tapada la botella, se reinicia la programación del cabezal apretando simultáneamente ambos botones S y M lo cual borra los parámetros almacenados en su memoria para quedar listo para realizar las mediciones. Luego se depositan las botellas en la caja termostatzada, Box Oxitop (Figura 2.18), se chequea que el buzo gire correctamente para asegurar mezclado de muestra y que esté funcionando el termostato del mismo.



Figura 2.18: Oxitop Box para mantener termostatzada muestra de DBO

Una vez pasados los 5 días, se separa la botella correspondiente, y se mide la DBO_5 mediante una lectura directa de la indicación del cabezal, el botón izquierdo, S, muestra la suma de los cinco días recorridos y el botón de la derecha, M, muestra la lectura de DBO particularmente en cada día.

En el caso de haber tomado un volumen menor de 432 ml de muestra, la medición no es directa, ya que, al valor de la suma de los 5 días informadas por el cabezal, se le debe multiplicar por dicho factor de dilución.

2.3 Resultados y discusión de la caracterización de las aguas residuales bajo estudio

Con el objetivo de ilustrar las variaciones observadas en los parámetros fisicoquímicos monitoreados en planta, se han seleccionado los resultados correspondientes al mes de abril de 2024. Este período resulta particularmente representativo debido a la presencia de desviaciones significativas en múltiples variables, lo que permite analizar las posibles interrelaciones entre ellas y su impacto en el comportamiento del sistema.

Los registros diarios de los ensayos realizados en planta, vinculados a los parámetros de control establecidos, se encuentran sistematizados en las Tablas B.1 y B.2, incluidas en el Anexo B. Dichas tablas reúnen los datos obtenidos durante todo el período de evaluación, permitiendo una lectura comparativa y cronológica de los resultados.

El valor promedio mensual de los parámetros analizados se resume en la Tabla 2.1, la cual sintetiza los resultados más relevantes para el análisis técnico del comportamiento del sistema durante dicho mes.

Tabla 2.1: Parámetros físico químicos promedios correspondientes al mes de abril del 2024

Solidos Sedimentables (SS) [mL/L]	
Entrada a planta	438
Entrada a Clarificador	375
Salida del Clarificador	0.1

pH [unidades]	
Entrada a planta	6.1
Descarga final a arroyo	6.6

Conductividad eléctrica [μ S/L]	
Entrada a planta	1036
Descarga a arroyo	707

Oxígeno disuelto (OD) [mg/L]	
Entrada a planta	1.7
Descarga final a arroyo	4.5

Demanda Química de Oxígeno (DQO) [mg/L]	
Entrada a planta	1519
Entada al Clarificador	1378
Salida del Clarificador	373
Descarga final a arroyo	111

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅) [mg/L]	
Entrada a planta	938
Descarga final a arroyo	75

Analizando los datos de los promedios mensuales recopilados, se obtiene que:

- 1) Todos los datos de las determinaciones realizadas en descarga a Calimayo, salvo el valor de DBO₅, están dentro de los valores estipulados por legislación vigente.
- 2) Analizando la relación de DBO₅ con DQO tenemos que:

DBO_5/DQO (para entrada a planta) = 0.618

DBO_5/DQO (para descarga en Calimayo) = 0.674

Por lo tanto, se concluye que gran parte de la materia susceptible a oxidarse en el líquido efluente es biodegradable, lo cual es consistente, ya que el líquido está constituido

mayormente por fibras y otros compuestos orgánicos provenientes de las pérdidas del proceso de fabricación de cartón.

- 3) La eficiencia en remoción de Sólidos Sedimentables (SS) en el tratamiento primario es prácticamente del 100%, es decir todo sólido suspendido decanta en el clarificador, además se ve que los procesos anteriores al clarificador, si bien se realiza remoción de sólidos en desbaste y arenas en la operación unitaria de desarenado, esto implica solo una reducción del 14.4 % del total de los sólidos disueltos que entran a la planta de tratamiento de efluentes.
- 4) Con respecto a los parámetros obtenidos DQO se obtiene que en el tratamiento primario se reduce un 75.4% de materia orgánica capaz de producir oxidación.

Influencia de los Sólidos Sedimentables (SS) en la Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Como se observa en la Figura 2.19, existe una correlación directa entre los sólidos sedimentables (SS) y los valores de DQO. Cuando los SS superan los 800 mL/L, se registra un aumento significativo en la DQO, mientras que por debajo de los 200 mL/L, los valores de DQO disminuyen exponencialmente. Este comportamiento se explica por la presencia de pulpa de cartón en el efluente, proveniente de pérdidas y tareas de limpieza en etapas previas del proceso. Dicha pulpa está compuesta principalmente por materia orgánica oxidable, lo que contribuye directamente al incremento de la DQO.



Figura 2.19: Influencia de los Sólidos Sedimentables (SS) en la Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Influencia de los Sólidos Sedimentables (SS) en el Oxígeno Disuelto (OD) en entrada a planta

Si analizamos la Figura 2.20 contrariamente al análisis realizado anteriormente, un aumento de los sólidos sedimentables es inversamente proporcional al oxígeno disuelto, lo cual es explicado, porque la presencia de materia orgánica genera que los microorganismos, al usarlo como sustrato, consumen oxígeno en el proceso, disminuyendo su valor en el efluente.

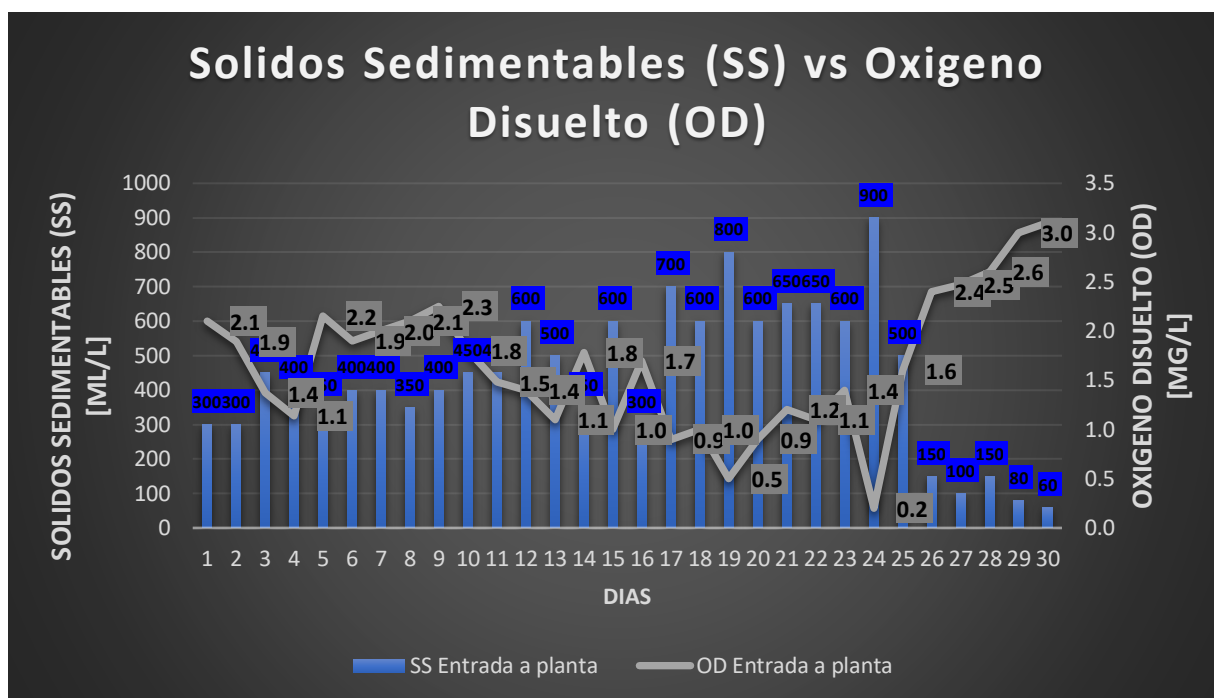


Figura 2.20: Influencia de los Sólidos Sedimentables (SS) en el Oxígeno Disuelto (OD)

Influencia del pH en la entrada en la DQO y los SS en la salida del clarificador

Los valores de pH en el ingreso al tratamiento de efluentes tienen un impacto directo sobre la eficiencia del clarificador. Tal como se observa en la Figura 2.21, en un rango de pH entre 5.5 y 7, no se registran sólidos sedimentables (SS) en el líquido clarificado, lo que se traduce en bajos valores de DQO. En el gráfico, los valores de SS se ubican en la base, con casi todos cercanos a 0.1 mL/L, lo que dificulta su visualización. Solo en dos fechas (días 19 y 24) se registran valores de SS de 50 mL/L, pero debido al cambio de escala, estos puntos resultan poco notorios. Al incrementarse el pH a valores entre 7.5 y 8, se evidencia una mayor presencia de SS en el sobrenadante, correspondientes a los días ya mencionados, con un valor de SS de 50 mL/L, acompañada de un aumento de la DQO y una disminución del rendimiento del clarificador.

Este comportamiento puede explicarse por la menor eficiencia de sedimentación a pH elevados: tal como muestra la Figura 2.22 parte de los sólidos permanece en suspensión y se incorpora al líquido clarificado. Esto no solo compromete la calidad del efluente, sino que también implica una sobrecarga de SS al tratamiento secundario, pudiendo generar interferencias operativas.

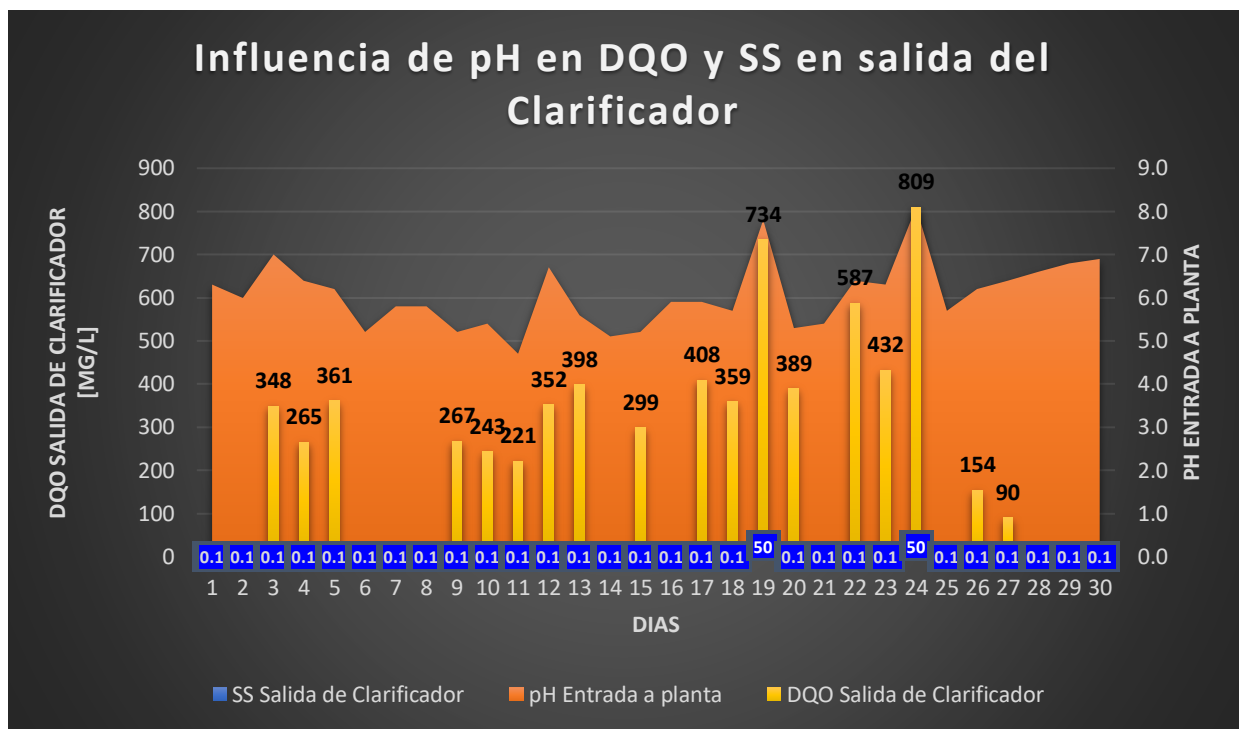


Figura 2.21: Influencia del pH en la entrada en la DQO y los SS en la salida del clarificador



Figura 2.22: Flotación de sólidos en Clarificador a causa de aumento de pH

2.4 Tratamiento primario de efluentes

El tratamiento primario de efluentes es la primera etapa en el proceso de depuración de aguas residuales, y su función principal es remover los contaminantes físicos más evidentes antes de que el agua pase a tratamientos más complejos

Los términos pre- tratamiento y tratamiento primario se refieren a las operaciones unitarias físicas, mientras que el termino tratamiento secundario se refiere a los procesos unitarios químicos o biológicos y el nombre de tratamiento terciario o avanzado a la combinación de los tres.

El pre-tratamiento de las aguas residuales se define como el proceso de eliminación de los constituyentes de las aguas residuales cuya presencia puede provocar problemas de mantenimiento y funcionamiento de los diferentes procesos, operaciones y sistemas auxiliares. Como ejemplos podemos citar el desbaste para la eliminación de sólidos gruesos, la flotación para la eliminación de grasas y aceites y el desarenado para la eliminación de la materia en suspensión gruesa que pueda causar obstrucciones en los equipos y un desgaste excesivo de los mismos (Metcalf & Eddy, 1995, pp. 143-145).

En esta etapa el propósito es reducir la carga contaminante del agua residual mediante la eliminación de:

- Sólidos gruesos y suspendidos
- Arenas y partículas pesadas
- Parte de la materia orgánica sedimentable

Esto permite proteger las unidades posteriores (como los reactores biológicos) y mejorar la eficiencia global del sistema.

Los principales procesos involucrados son (Figura 2.23):

Pre Tratamiento:

- Cribado: Rejillas retienen objetos grandes como ramas, plásticos, trapos o residuos sólidos flotantes, donde existe dos tipos:
 1. Desbaste Grueso: Reja de limpieza manual donde se retiene partículas mayores a 25 mm
 2. Desbaste Fino: Reja de limpieza mecánica donde se retienen partículas de tamaño entre 5 y 25 mm
- Desarenadores: Separan partículas pesadas como arena, grava o fragmentos minerales por sedimentación rápida.

Decantación:

- Sedimentadores primarios (clarificadores) Permiten que los sólidos más finos se depositen en el fondo por acción de la gravedad. También remueven parte de la materia orgánica.



Figura 2.23: Diagrama de flujo de tratamiento primario de efluentes

La eficiencia típica del tratamiento primario es:

- Sólidos suspendidos totales (SST): 50–70% de remoción
- Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO): 25–40%
- Grasas y aceites: hasta 80%

Fuente: CIE - Centro de Información Educativa. (s.f.). *Introducción a los tratamientos de efluentes líquidos: Parte 3 - Tratamiento primario*. Ministerio de Educación.

2.4.1 Desbaste o cribado

El cribado, también llamado desbrozo, se emplea para la reducción de sólidos en suspensión de tamaños distintos.

El proceso se realiza mediante rejillas, cribas o tamices, que interceptan materiales como:

- Plásticos, ramas, trapos, piedras
- Residuos flotantes o en suspensión de gran tamaño

Estas estructuras pueden clasificarse según el tamaño de sus aberturas:

- Rejas gruesas: 4 a 10 cm
- Rejas medias: 1 a 4 cm
- Rejas finas o tamices: menos de 5 mm

En sistemas más avanzados, se utilizan cribas automáticas rotativas o incluso trituradores, que desgarran los sólidos para facilitar su eliminación posterior

Los objetivos principales son:

- Proteger bombas, válvulas y tuberías
- Evitar obstrucciones y atascos
- Mejorar la eficiencia de la sedimentación
- Reducir olores y acumulación de residuos

La limpieza puede ser manual o mecánica, y los residuos recolectados se eliminan mediante:

- Incineración
- Digestión anaerobia
- Disposición en rellenos sanitarios

(Universidad Nacional Autónoma de México [UNAM], 2025)

Rojas (2004) nos comenta, además, que las partículas suspendidas mayores de 0.64 cm pueden removerse más económicamente mediante cribado que por cualquier otra operación unitaria.

La criba puede ser de cualquier material agujereado ordenadamente, por ejemplo, una plancha o lamina metálica, de madera, o de concreto, con agujeros redondos, cuadrados o de cualquier forma geométrica. También puede construirse una criba con una celosía fija o emparrillado de barras o varillas de hierro o acero.

En el tratamiento de aguas residuales se usan rejillas gruesas, principalmente de barras o varillas de acero (Rojas, 2004, p. 287).

2.4.2 Desarenado

Los desarenadores, en tratamiento de aguas residuales, se usan para remover arena, grava, partículas u otro material sólido pesado que tenga velocidad de asentamiento o peso específico bastante mayor que el de los sólidos orgánicos degradables de las aguas residuales.

Los desarenadores protegen al equipo mecánico del desgaste anormal y reducen la formación de depósitos pesados en tuberías, canales y conductos. Además, minimizan

la frecuencia de limpieza requerida de los digestores, en aquellos casos en que se presenta una acumulación excesiva de arena en dichas unidades.

Los desarenadores pueden localizarse antes de todas las demás unidades de tratamiento, si con ello se facilita la operación de las demás etapas del proceso. Sin embargo, la instalación de rejillas, antes del desarenador, también facilita la remoción de arena y la limpieza de los canales de desarenado.

Los desarenadores pueden ser del tipo de limpieza mecánica o de limpieza manual (J. Rojas, 2004, pp. 293-294).

Existen tres tipos generales de desarenadores: de flujo horizontal, de diseño rectangular o cuadrado; aireados, y de vórtice. En el primero de ellos, el agua circula a través del elemento en dirección horizontal y la velocidad de circulación se controla por la propia geometría de la unidad, con compuertas de distribución especiales, y mediante la adopción de vertederos de secciones especiales a la salida del canal. El desarenador aireado consiste en un tanque de aireación de flujo helicoidal en el que se induce una velocidad en espiral que se controla por la propia geometría del tanque y por la cantidad de aire suministrada a la unidad. El desarenador de vórtice consiste en un tanque cilíndrico en el que el agua entra siguiendo una dirección de flujo tangencial creando un flujo en vórtice; las fuerzas centrífugas y gravitatorias son las responsables de la separación de las arenas (Metcalf & Eddy, 1995, p.522).

El carácter de la arena removida, en un desarenador para aguas residuales, dista mucho de lo que se puede considerar una arena limpia, porque la arena retirada incluye una gran cantidad de impurezas y de material orgánico putrescible. Por ello, si no se dispone rápidamente, se presentarán olores desagradables y el material atraerá insectos y roedores. Posiblemente, el método más económico de disposición sea en un relleno sanitario (J. Rojas. 2004, p. 295).

2.4.3 Sedimentación en aguas residuales

Los sedimentadores primarios, también llamados clarificadores primarios, son unidades fundamentales del tratamiento primario de aguas residuales. Su función principal es remover sólidos suspendidos y materia orgánica sedimentable mediante la acción de la gravedad.

Los sedimentadores primarios operan bajo el principio de sedimentación por gravedad: al reducir la velocidad del flujo, los sólidos suspendidos más densos se depositan en el fondo del tanque, mientras que las grasas y espumas flotan y se retiran en la superficie.

Los sedimentadores primarios operan bajo el principio de la ley de Stokes, que describe la velocidad de caída de partículas en un fluido. Esto permite calcular el tiempo de retención hidráulico necesario para que los sólidos sedimentables se depositen eficientemente.

El agua residual ingresa al sedimentador a baja velocidad, lo que permite que:

- Los sólidos más pesados se depositen en el fondo formando lodos.
- Las grasas y espumas floten en la superficie y sean retiradas con sistemas de rastrillos o skimmers.
- El agua clarificada salga por vertederos hacia el tratamiento secundario.

La estructura básica de un sedimentador primario es:

- Zona de entrada: desacelera el flujo para evitar turbulencias.
- Zona de sedimentación: permite que los sólidos más densos caigan al fondo.

- Zona de salida: el agua clarificada es recolectada cuidadosamente por vertederos.
- Sistema de recolección de lodos: rastrillos o mecanismos mecánicos que llevan el lodo hacia un pozo de bombeo.
- Retiro de flotantes: mecanismos superficiales como skimmers que eliminan grasas y espumas.

El agua residual ingresa al sedimentador a baja velocidad, lo que permite que:

- Los sólidos más pesados se depositen en el fondo formando lodos.
- Las grasas y espumas floten en la superficie y sean retiradas con sistemas de rastrillos o skimmers.
- El agua clarificada salga por vertederos hacia el tratamiento secundario.

Los tipos de decantadores típicos más usados en tratamiento de efluentes (Figura 2.24) son:

- Circulares: con entrada central y salida periférica; el lodo se rastrilla hacia el centro.
- Rectangulares: el flujo es horizontal; el lodo se empuja hacia un extremo.
- De flujo ascendente: menos comunes, el agua sube mientras los sólidos bajan

Los mecanismos de remoción que presentan son

- Rastrillos de fondo: recogen el lodo sedimentado y lo dirigen hacia un pozo de extracción.
- Skimmers superficiales: eliminan grasas, aceites y espumas flotantes.
- Vertederos perimetrales: permiten la salida uniforme del agua clarificada.

El mantenimiento y la operación de los mismos está dada por:

- Extracción de lodos: debe ser frecuente para evitar fermentación y malos olores.
- Control de espumas y flotantes: mediante skimmers o vertederos periféricos.
- Monitoreo: se recomienda medir SST, DBO y caudal de entrada/salida para evaluar el rendimiento.

Aunque los sedimentadores primarios son muy efectivos para sólidos sedimentables, no eliminan sólidos disueltos ni coloidales, por lo que requieren ser complementados con tratamiento secundario (biológico).

Fuente: Instituto del Agua. (s.f.). *Tratamiento primario de las aguas residuales: guía completa para un proceso efectivo y sostenible*.

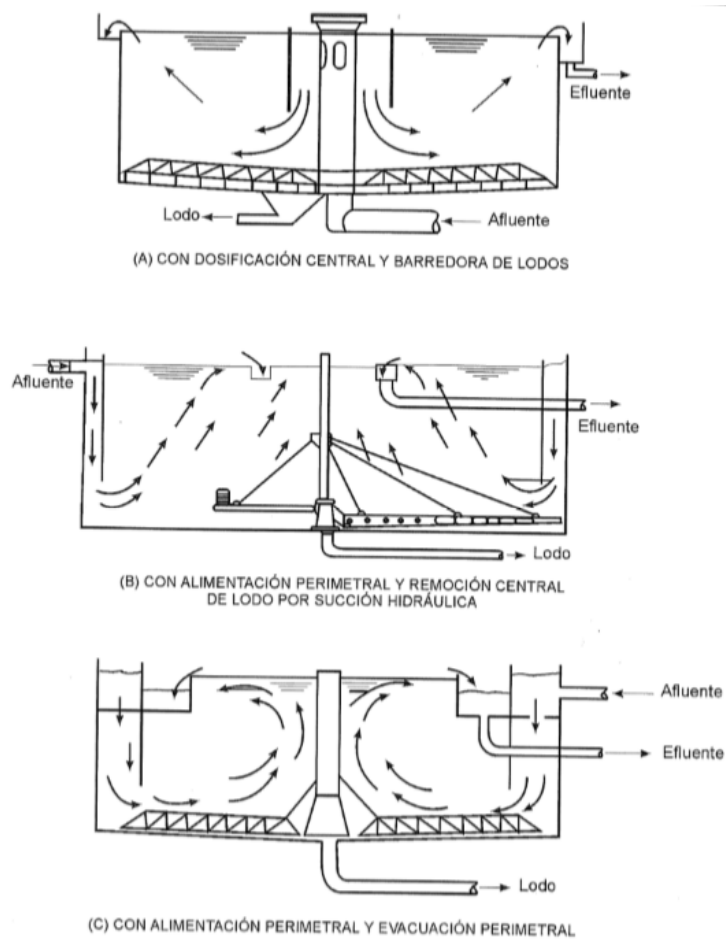


Figura 2.24: Decantadores Típicos recopilado de Rojas J., 2004, p. 638.

CAPITULO 3

INDUSTRIA BAJO ESTUDIO

3.1 La empresa

Originalmente, la planta fue diseñada para la fabricación de papel de diario a partir de bagazo de caña de azúcar, con una capacidad de producción de aproximadamente 330 toneladas por día. El proceso incluía una etapa de cocción alcalina con hidróxido de sodio, seguida de un blanqueo con hipoclorito de sodio, además de contar con sistemas de recuperación de químicos (tratamiento de licores negros) y recuperación de fibras provenientes de los efluentes de la máquina de papel.

Actualmente, la planta ha sido reconvertida y opera exclusivamente como una planta de reciclado, donde se procesa cartón recuperado para producir papel marrón para envoltura, cartón tipo liner y papel blanco tipo obra, utilizando únicamente fibras exógenas. Ya no se realiza el proceso químico de fabricación desde materia prima vegetal, lo que implica un cambio significativo en la naturaleza del efluente generado.

Las fibras exógenas en la industria papelera corresponden a materiales fibrosos recuperados post-consumo o post-industria, utilizados como sustituto parcial o total de la fibra virgen. Las usadas son el OCC (Old Corrugated Containers) y el DKL (cartón tipo Kraft o de alta resistencia), que aportan características mecánicas específicas al producto final. Estas fibras presentan una estructura lignocelulósica ya procesada, lo que permite su reincorporación mediante procesos de repulpado.

Las fibras exógenas se reciben en fardos, que luego se disuelven y acondicionan sus fibras, donde además se separan los desechos de estas, que van a la planta de tratamiento primario de efluentes para su separación y disposición final. Las aguas luego reciben un tratamiento secundario para lograr los parámetros de vertido que marca la ley (manual de tratamiento primario de planta).

3.2. Proceso productivo de fabricación de papel

En la actualidad la planta fabrica papel marrón para envoltura y blanco tipo obra para a partir de fibras exógenas únicamente. Las fibras exógenas se reciben en fardos, Figura 3.1, para luego disolverlas en pulpers y acondicionarlas.



Figura 3.1: Recepción de materia prima exógena y silo de almacenamiento de fibra de bagazo (Recopilada de información interna de planta)

Luego de ser disueltas y acondicionadas, la pasta, ingresa a la sección de máquina de papel, que consta de varias etapas, zona de formación, zona de prensas, secadores, y calandra, Figura 3.2

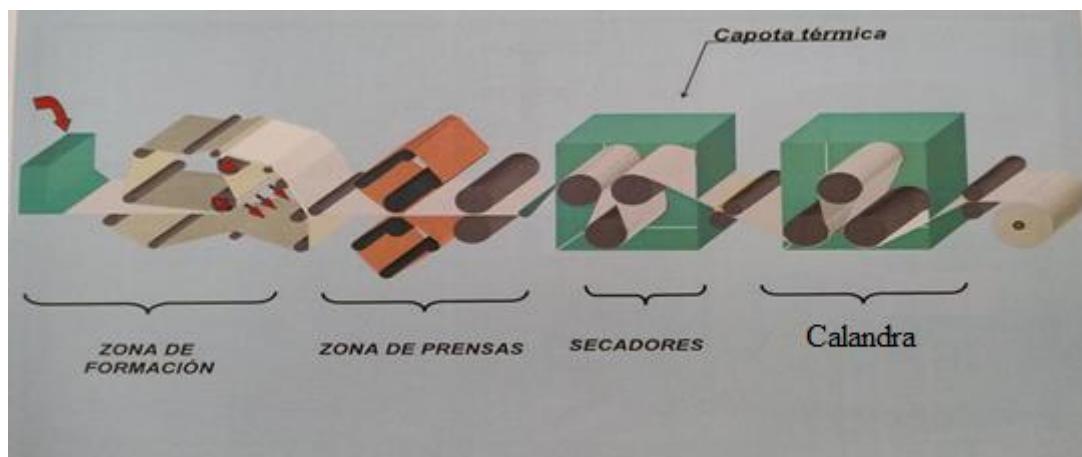


Figura 3.2: Máquina de papel (Recopilada de información interna de planta)

En la etapa de formación, se produce el acondicionamiento de la pasta de celulosa entrante (90% de agua) mediante telas filtrantes para lograr la consistencia deseada, Figura 3.3, 3.4 y 3.5.

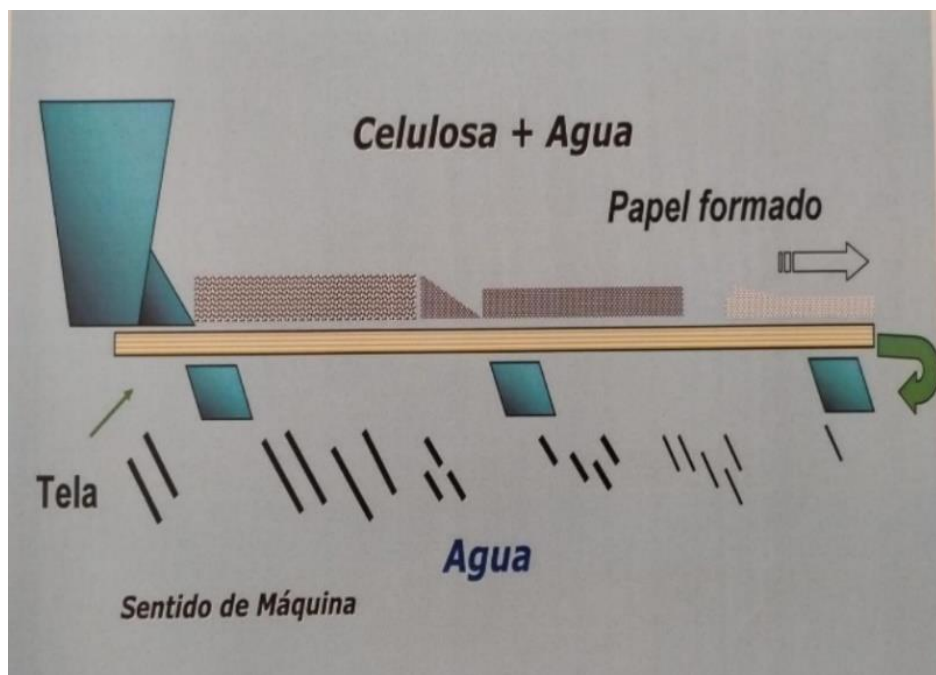


Figura 3.3: Zona de formación (Recopilada de información interna de planta)

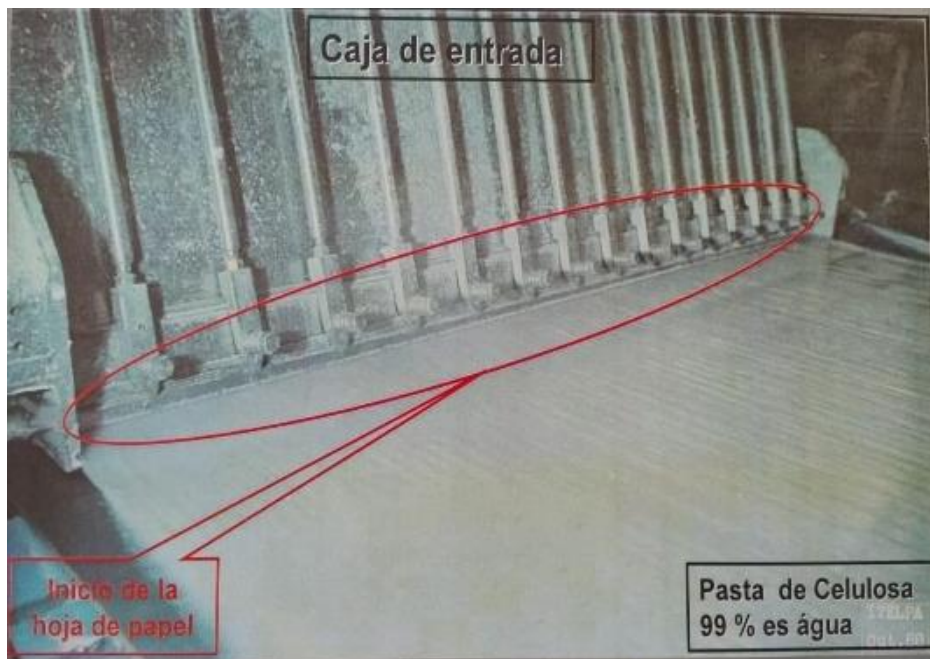


Figura 3.4: Zona de formación de papel (Recopilada de información interna de planta)



Figura 3.5: Zona de formación en máquina de papel (Recopilada de información interna de planta)

Luego dicha pasta, ingresa a la zona de prensas, donde la pasta es prensada, disminuyendo la humedad desde 78% hasta 56% de agua aproximadamente, mediante un NIP de hasta 120 kg/cm² y presión de vacío, Figura 3.6 y 3.7.



Figura 3.6: Zona de prensas en máquina de papel (Recopilada de información interna de planta)



Figura 3.7: Zona de prensas de máquina de papel (Recopilada de información interna de planta)

La próxima etapa constituye los secadores, donde se agota la humedad del papel, desde 56% hasta 6% aproximadamente, donde cada tándem de baterías de rodillos cilíndricos secadores, consta de una determinada temperatura, los cuales, con el pasar del papel en cada tándem, su temperatura aumenta hasta llegar a una de 250°C, Figura 3.8 y 3.9.

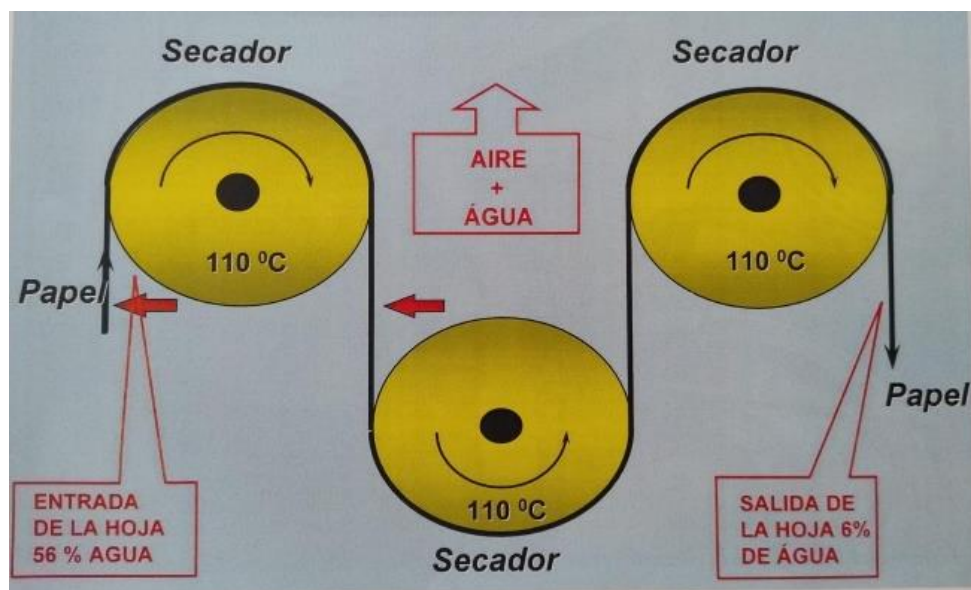


Figura 3.8: Zona de secadores en máquina de papel (Recopilada de información interna de planta)

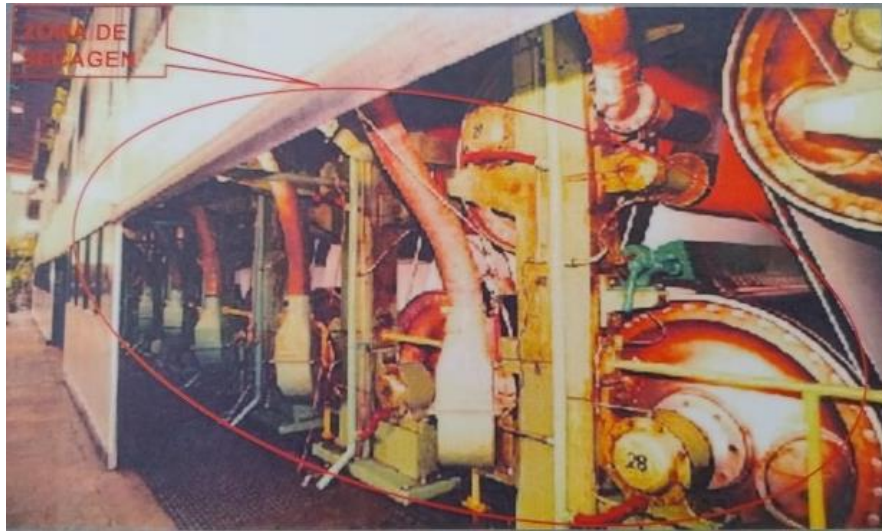


Figura 3.9: Zona de secadores en máquina de papel (Recopilada de información interna de planta)

Una vez el papel adquiere las condiciones físico mecánicas que se desea, ingresa en la etapa final de la máquina de papel, que consiste en la calandra y enrolladora, la calandra es el último rodillo, por donde pasa el papel, a fin de disminuir su temperatura y de acondicionarlo, mediante operadores para el ingreso a la enrolladora, la misma está compuesta por rodillos giratorios removibles, para una vez enrollado la cantidad deseada de papel, llamado POPE, este se retira para su posterior bobinado, y otro cilindro libre, ingrese en su lugar, para luego comenzar el enrollado nuevamente, en el nuevo cilindro, Figura 3.10 y 3.11.



Figura 3.10: Enrollado de papel en etapa final de máquina de papel (Recopilada de información interna de planta)

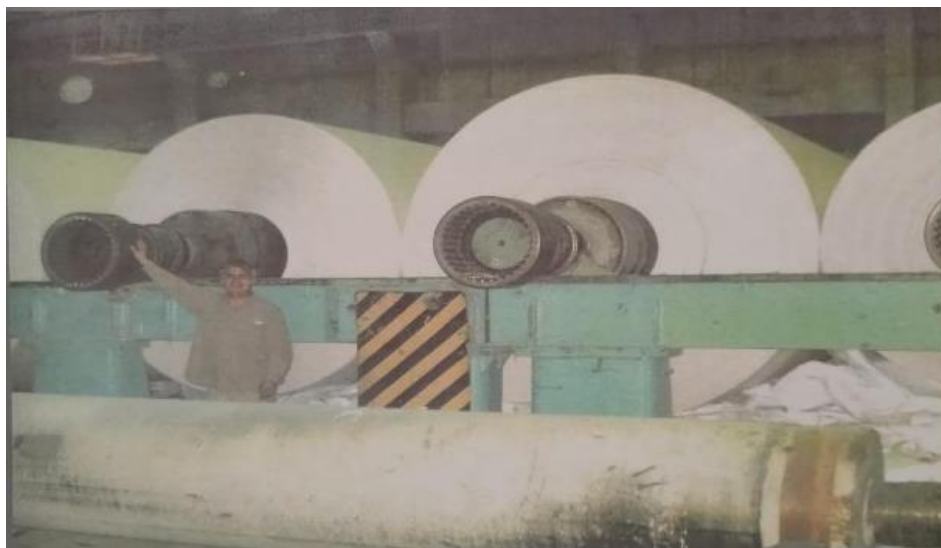


Figura 3.11: Disposición final de popes para ser bobinados (Recopilada de información interna de planta)

Una vez formado el POPE, éste es ingresado en la bobinadora, la cual tiene la función de formar bobinas, de largo y peso, según requiera el proceso, mediante cuchillas, Figura 3.12, 3.13 y 3.14.



Figura 3.12: Etapa final, bobinado (Recopilada de información interna de planta)



Figura 3.13: Etapa final bobinado (Recopilada de información interna de planta)



Figura 3.14: Bobinas de papel terminadas (Recopilada de información interna de planta)

Una vez formadas las bobinas, se las deposita en un almacén, para su expedición a clientes, Figura 3.15.



Figura 3.15: Expedición de bobinas a clientes (Recopilada de información interna de planta)

3.3. Tratamiento de Efluentes en planta

El tratamiento de efluentes en nuestro caso particular, de una industria papelera, está compuesto por un tratamiento primario y un tratamiento secundario de efluentes.

Los efluentes se generan en las diferentes áreas de procesos de fabricación del papel, todas estas áreas cuentan con canales de 1 metro de ancho y 1 metro de profundidad que recolectan los efluentes emitidos (Figura 3.16), en los cuales desembocan distintos tipos de desechos como pérdidas de pasta, químicos para el formado del papel, agua de limpieza, agua pluvial, plásticos, grasas y aceites de máquinas y equipos etc.



Figura 3.16: Canal para efluentes de planta

Estos líquidos efluentes viajan unos 200 metros aproximadamente, hasta llegar a la entrada de la planta de efluentes, donde inicia el tratamiento en sí.

Inicialmente los efluentes cuando llegan a PTE (planta de tratamiento de efluentes) pasan por un tramo recto de canal con baffles deflectores (Figura 3.18) por unos 5 metros para luego llegar a la primera operación unitaria del tratamiento, que es el desbaste. Aquí se realiza el primer punto de recolección de muestra para su análisis físico químico.



Figura 3.18: Canal de entrada a PTE y primera reja gruesa manual

La etapa de desbaste, consiste en la disposición de 2 rejas, la primera, como se puede ver en la Figura 3.18, es una reja gruesa de varillas metálicas de acero con abertura de 4 cm, la cual capta la mayoría de sólidos como ser maderas, telas, plásticos etc. estos sólidos se acumulan en la reja, y son retirados manualmente, por el operador cada cierto tiempo, mediante un rastrillo, cuyo extremo posee un peine con aberturas iguales a la reja, estos residuos son retirados y depositados en una hendidura de mampostería situada exactamente a contigua a las rejas, para luego ser retiradas y verterlas a su disposición final.

Una vez atravesada la primera reja, el canal se bifurca en dos, cada canal cuenta con su correspondiente compuerta tipo cuchilla accionada neumáticamente donde se puede bloquear el paso del efluente en alguno de los canales con el fin de realizar mantenimiento u otra acción de operación en planta, en cada uno de estos dos canales se dispone otra reja, de accionamiento mecánico, que consiste en un rastrillo, tipo peine accionado mecánicamente por un motor, el cual gira sobre la reja, de forma semicircular, con varillas de 3 cm de apertura, limpiando la reja en cada giro (Figura 3.19) y la Figura 3.20, que muestra el esquema técnico del dispositivo, detallando entre otras cosas, sus partes constitutivas, el mecanismo de accionamiento y la disposición del motor.



Figura 3.19: Montaje de reja mecánica

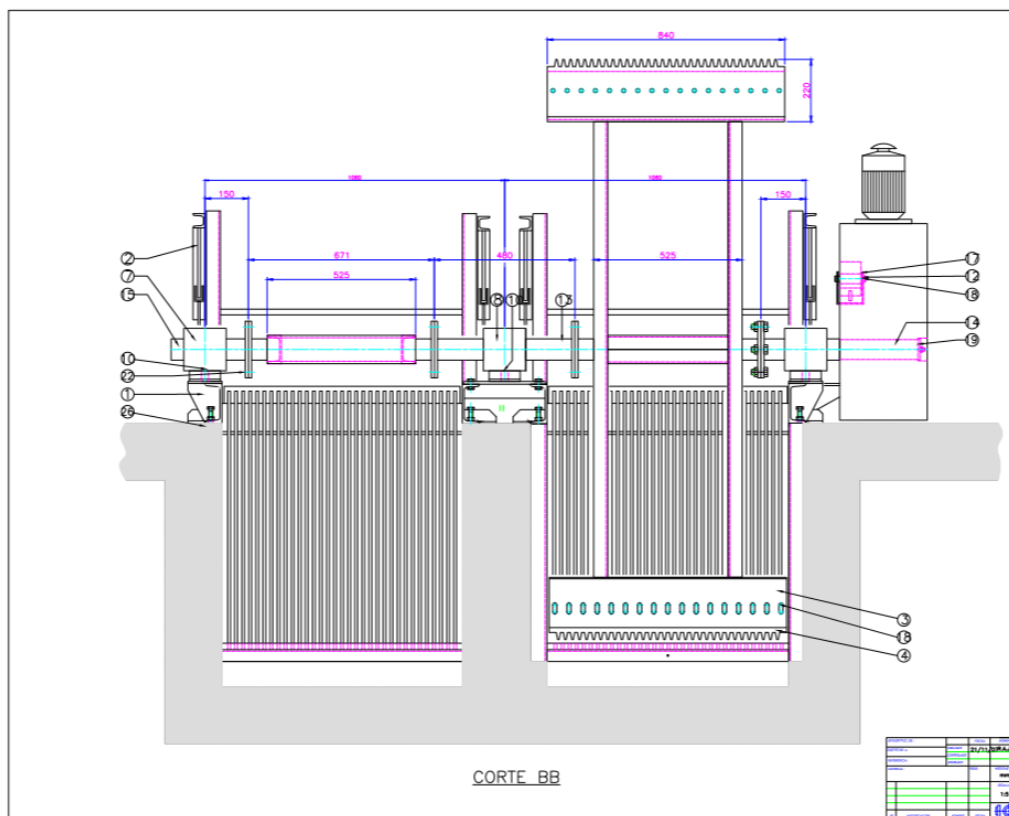


Figura 3.20: Plano de construcción de reja mecánica

Luego de pasar por esta etapa de desbaste, el efluente, ingresa a la operación unitaria de desarenado, el cual consiste en un equipo del tipo vórtice donde se extrae la arena y demás residuos depositados en un fondo cónico mediante la inyección neumática de aire comprimido en la base de un caño concéntrico para así, generar presión en el fondo

del cono e impulsar la arena y depositarla en un container perforado para su recolección y luego eventual disposición final (Figuras 3.21 y 3.22).

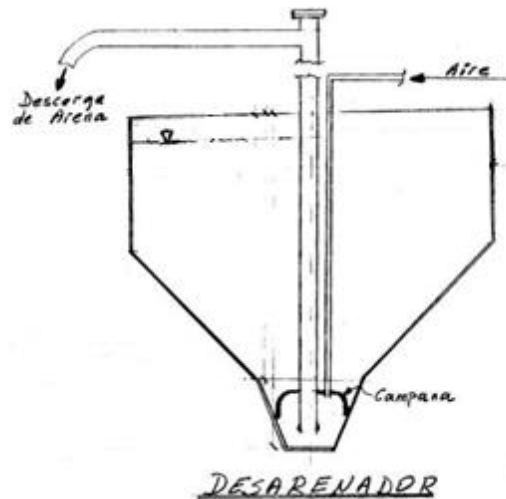


Figura 3.21: Diseño del desarenador tipo vórtice



Figura 3.22: Desarenador montado

Una vez finalizada la operación unitaria de desarenado sobre el efluente líquido, este se dirige a través del canal de efluentes, por aproximadamente 20 metros hacia la operación unitaria de decantación.

Antes del ingreso al decantador, se dispone una última reja fina manual, de abertura de 1 cm, con el fin de captar toda partícula sólida que pudiera escapar de los equipos anteriores, luego se dispone de 2 compuertas tipo cuchilla, con sus respectivas bifurcaciones, una bifurcación lleva el efluente directamente al canal de rebalse del clarificador, lo que brinda la posibilidad de saltar el proceso de decantación, y otra compuesta con su respectiva bifurcación para impedir el paso del efluente al equipo propiamente dicho.

El ingreso del efluente al clarificador (Figura 3.24), donde se realiza la segunda toma de muestra para realizar los ensayos físico químicos ya explicados en el capítulo 2, se

realiza por la base del mismo, para esto, el efluente circula por un canal de sección cuadrada de 1 metro de ancho por 1 metro de largo, y descendiendo 8 metros para poder dirigirse a la base del equipo.

La remoción de los barros se realiza mediante dos caños, denominados *purgas*, ubicados en el fondo del clarificador, los cuales comunican directamente con el pozo de bombeo de barros. Este sistema permite que, por acción de la presión isostática, la fosa se llene de barro, el cual es posteriormente captado por bombas de desplazamiento positivo helicoidales de tornillo tipo Moureax Degremont, encargadas de impulsar el lodo hacia las prensas desaguadoras, con el objetivo de reducir su contenido de humedad previo a la extracción y disposición final.

La Figura 3.24 representa el clarificador usado, incluyendo sus dimensiones generales, la disposición del pozo de bombeo de barros, las purgas, el canal de ingreso de efluente, así como las escaleras de acceso a las bombas. Además, se indica la presencia de una bomba auxiliar, instalada como refuerzo operativo para mejorar la eficiencia en la extracción de barros en caso de ser necesario.



Figura 3.23: Clarificador

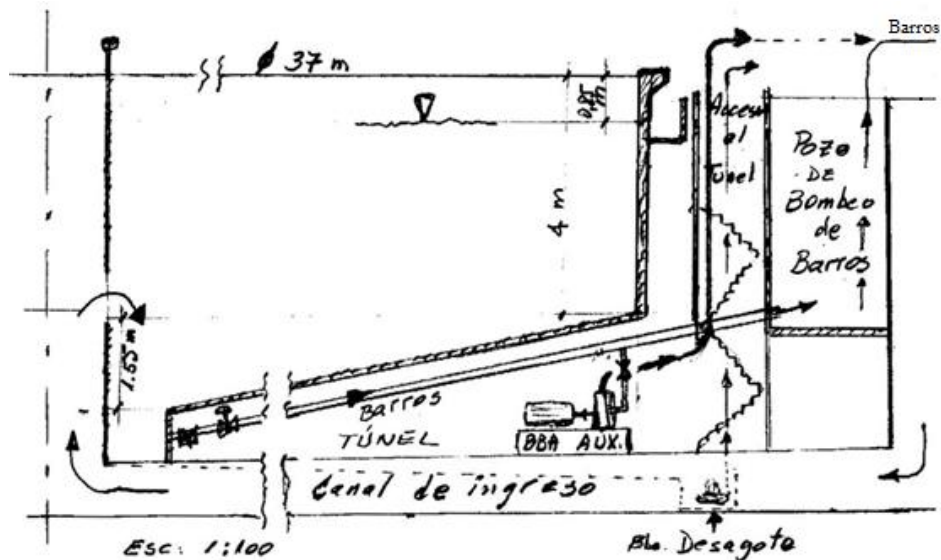


Figura 3.24: Dimensiones del clarificador

Por otra parte, el líquido sobrenadante, ya clarificado, es recolectado mediante rebalse en un canal que circunscribe al equipo Figura 3.25 para así, dirigirse mediante gravedad, hasta una pileta de transición, para luego, abandonar el tratamiento primario de efluentes, y dirigirse al tratamiento secundario, aquí es donde se realiza la tercera toma de muestras, que corresponde a la salida del clarificador, para mediante ensayos físico químicos poder averiguar el rendimiento del mismo.

El tratamiento secundario de efluentes, consta de grandes piletones, los cuales, los primeros realizan un tratamiento aeróbico sobre el efluente líquido, para luego pasar a un tratamiento facultativo del mismo, y así llegar a su descarga final sobre arroyo Calimayo, donde se toma la muestra final, para realizar los ensayos físico químicos correspondientes para así averiguar que el líquido efluente este en valores reglamentados por legislación vigente y el rendimiento de toda la planta de efluentes.

La Figura 3.26 presenta el plano general de la planta de tratamiento de efluentes, en el cual se visualiza la disposición completa de las unidades operativas. Además del esquema técnico, se indican los puntos de muestreo realizados durante el monitoreo, identificados numéricamente según su ubicación en el proceso: el punto 1 corresponde al ingreso de efluente crudo a planta, el punto 2 al ingreso al clarificador, el punto 3 a la salida del clarificador, y el punto 4 a la descarga final al arroyo receptor.



Figura 3.25: Recolección de líquido sobrenadante de clarificador por rebalse

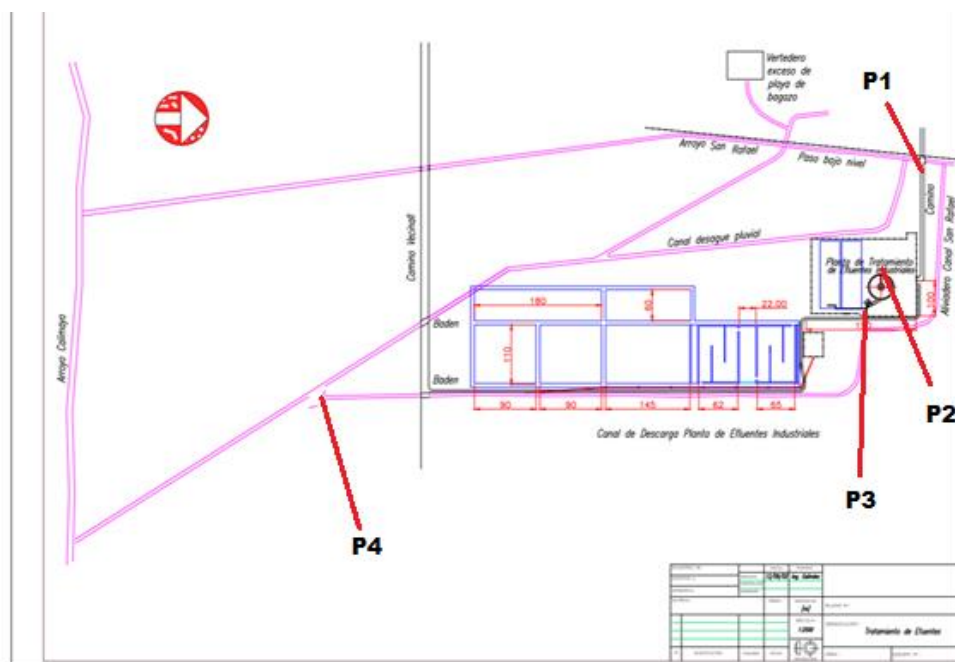


Figura 3.26: Croquis de planta de tratamiento de efluentes

3.4 Situación del tratamiento primario de efluentes en la actualidad

En esta sección se abordará la situación actual del tratamiento primario de efluentes, planteando en cada operación unitaria, aguas abajo del proceso, el mal funcionamiento de los equipos, su bajo rendimiento y otros problemas en la operación de la planta.

En el diagrama de flujo del proceso de tratamiento de planta (Figura 2.23), ya presentado en el capítulo anterior, se puede observar que no existe ningún equipo para medir el caudal de entrada al proceso, la falta de este equipo es crítica, ya que con los valores que aportaría la existencia de un equipo para medir caudal, se podría en primer lugar tener una certeza de que cantidad de efluente líquido se está tratando, y por consiguiente el rendimiento global del tratamiento. En segundo lugar, y no menos importante, poder estimar los flujos de líquido en todo el año, estudiar su estacionalidad, ciclicidad etc. y además saber que volumen de líquido se está tratando y aportando al cauce del arroyo, y conjuntamente poner en conocimiento a las autoridades medio ambientales municipales, provinciales y nacionales el valor de los caudales que se procesan por un determinado tiempo, y así, poder gestionar acciones para mejorar el uso del agua en toda la planta a fin de disminuir este recurso tan escaso en nuestro planeta.

Operación unitaria de desbaste

En planta existen 3 rejas instaladas en planta, 2 situadas justo después de entrar los canales transportadores de efluentes a dicha planta, la primera llamada reja gruesa, con remoción manual de los sólidos atrapados en las varillas, y la segunda, reja mediana o fina, la cual es de accionamiento mecánico y por último una reja fina ubicada en el canal justo antes del ingreso del efluente al clarificador.

Los problemas suscitados en dichas rejas son variados y obedecen a diferentes motivos, ellos son de naturaleza operacional y de diseño.

1- Taponamiento de reja gruesa y de reja mecánica:

En la Figura 3.27 y 3.28 se ilustra este problema, muy frecuente en planta. El motivo son pulsos de excesiva cantidad de plásticos y cartones sin pulpear originados por limpieza o perdidas aguas arriba del proceso, que supera ampliamente la capacidad del operador para su remoción, en el caso de reja gruesa manual y también en el caso de reja mecanizada. También se producen taponamientos en la reja fina en la entrada al clarificador (Figura 3.29) causada por el mismo motivo.



Figura 3.27: Taponamiento de reja gruesa de entrada



Figura 3.28: Reja mecánica colapsada por plásticos



Figura 3.29: Reja fina en canal de entrada al clarificador obstruida y desborde de canal

De estos taponamientos devienen, por un lado, el rebalse de los canales de entrada, lo cual produce contaminación en los alrededores de los canales, además de producirse pérdida de fibras que luego podrían ser recuperadas en el clarificador y por otro lado la sedimentación no deseada en el canal de arenas y el paso de grandes cantidades de plásticos al clarificador afectando su funcionamiento.

- 2- Otro problema presentado en esta operación unitaria es la deposición de arenas y otros sólidos justo antes de llegar a la primera reja gruesa manual (Figura 3.30) causada por diferentes motivos, el principal es cuando el caudal de ingreso baja muy por debajo del mínimo, lo que produce un descenso de la velocidad del líquido efluente y por consiguiente un descenso de la turbulencia a temperatura constante, el descenso del mismo es generado por una merma del efluente originado aguas arriba del proceso o por estacionalidad climática.



Figura 3.30: Deposición de arena en canal de entrada a PTE

Estas deposiciones son difíciles de eliminar, ya que adquieren una compactación sobre el fondo del canal debido al propio peso del efluente líquido que circula arriba de ella.

Operación unitaria de desarenado

La operación del equipo de desarenador existente en planta, tiene deficiencias, tanto en la parte operacional como en el diseño mismo del equipo.

Desde el punto de vista operacional, el equipo realiza descargas periódicamente cada cierto intervalo de tiempo, que es ajustado por el operador de planta, estas descargas caen en un contenedor perforado, dejando escurrir el líquido y reteniendo arenas y otros compuestos sólidos.

El equipo de desarenado presenta una descarga con composición irregular, caracterizada por una elevada proporción de líquidos y fibras exógenas (ver Figuras 3.31 y 3.32). Esto se debe, por un lado, a una deficiente sedimentación de arenas en el efluente; y por otro, a que el sistema de succión recoge simultáneamente líquidos con fibras útiles para reproceso que, en condiciones óptimas, deberían recuperarse como lodos en el clarificador.

El arrastre conjunto de fibras y arenas genera una mezcla con alta carga inorgánica, dificultando su separación y tornándola no apta para reincorporación industrial. En consecuencia, esta fracción es derivada a disposición final en vertedero, generando pérdidas operativas y económicas.

Adicionalmente, durante la descarga en el contenedor estacionado, se observa dispersión lateral del material, provocando acumulación en el piso y calles circundantes. El escurrimiento posterior ocasiona que parte de la arena retorne al proceso, comprometiendo la eficiencia del sistema. Las arenas sépticas acumuladas generan olores desagradables y proliferación de vectores, requiriendo tareas frecuentes de limpieza por parte del personal operativo.



Figura 3.31: Dispersión lateral del material expulsado del desarenador en las periferias del contenedor



Figura 3.32: Material expulsado del desarenador que contiene fibras y líquidos.

Desde el punto de vista del diseño, la precipitación de arenas es deficiente. Asimismo, el funcionamiento del equipo requiere aire comprimido que es provisto por la planta de producción de papel.

Operación unitaria de decantación

Durante condiciones normales de operación, el clarificador cumple adecuadamente su función, sin evidencias de mal funcionamiento según los ensayos de sólidos sedimentables (SS) y demanda química de oxígeno (DQO) realizados sobre el sobrenadante. Sin embargo, ante eventos de ingreso discontinuo con picos de alta carga de SS, principalmente fibras provenientes de procesos de lavado o pérdidas en la fabricación de papel y cartón, se pone en evidencia una limitación estructural del equipo.

Cuando estos picos se repiten con frecuencia, el clarificador no logra remover eficientemente los lodos generados, lo que provoca una acumulación progresiva en el fondo del equipo. Como se muestra en las Figuras 3.33 y 3.34, al alcanzarse niveles críticos de barro sedimentado, el puente barreador pierde capacidad de desplazamiento por el exceso de peso, impidiendo la remoción efectiva de los sólidos. Esto genera una sobrecarga interna que compromete el rendimiento global del sistema, obligando en ocasiones a desviar el ingreso hacia piletones de emergencia para evitar el colapso operacional.

Este comportamiento evidencia que la capacidad del clarificador existente resulta insuficiente para manejar las variaciones de carga propias del proceso. Por lo tanto, se recomienda la incorporación de una segunda unidad de clarificación en paralelo. Esta medida permitiría distribuir eficientemente la carga hidráulica, asegurar la continuidad del tratamiento durante tareas de mantenimiento o limpieza, y optimizar la confiabilidad operativa de la planta frente a contingencias



Figura 3.33: Nivel de clarificador casi al máximo de barros



Figura 3.34: Otro ángulo de clarificador en su cota máxima de barros

CAPITULO 4

DISEÑO Y PROPUESTA DE MEJORAS

4.1 Objetivos

En este capítulo nos centraremos en cumplir los objetivos propuestos de mejora de las distintas operaciones unitarias y sus problemáticas respectivas, ya expuestas en el Capítulo 3.

En orden decreciente desde aguas arriba del proceso hacia aguas abajo del mismo los problemas detectados son:

- 1- Acumulación de sólidos suspendidos en el canal de ingreso a planta
- 2- Acumulación de plásticos y otros materiales en rejillas de entrada a planta, las cuales pertenecen a la operación unitaria de Desbaste.
- 3- Operación del Decantador (Clarificador) con sobrecarga de lodos y deficiente remoción de sólidos sedimentables
- 4- Falta de medición de caudal

El diseño contempla cinco unidades funcionales que permiten resolver las deficiencias detectadas en la planta de tratamiento:

- Canal Parshall: incorporado para resolver la ausencia de medición de caudal. Permite un registro hidráulico continuo y confiable, indispensable para control de procesos.
- Reja automática de desbaste: con el objetivo de remover plásticos y sólidos gruesos acumulados, optimizando la operación unitaria de desbaste y reduciendo obstrucciones.
- Desarenador horizontal: diseñado para facilitar la sedimentación de arenas y materiales pesados presentes en el efluente. Previene el arrastre de sólidos hacia el decantador y reduce el desgaste mecánico en equipos posteriores.
- Sistema de lavado de canal de ingreso: cañería de limpieza automatizada para la remoción periódica de sólidos sedimentables acumulados en el canal de ingreso.
- Unidad de decantación primaria (clarificador): rediseño para enfrentar los problemas actuales de sobrecarga de lodos y deficiente remoción de sólidos sedimentables.

La Figura 4.1 presenta el diagrama de proceso propuesto para la planta de tratamiento, elaborado en base a las problemáticas operativas identificadas y las soluciones planteadas en este capítulo. El esquema refleja la incorporación secuencial de las cinco unidades funcionales diseñadas para optimizar el desempeño del sistema, desde el ingreso del efluente hasta su decantación primaria. Cada unidad responde a una necesidad específica previamente diagnosticada, y su integración permite una mejora sustancial en la eficiencia del tratamiento y en la confiabilidad operativa del conjunto.

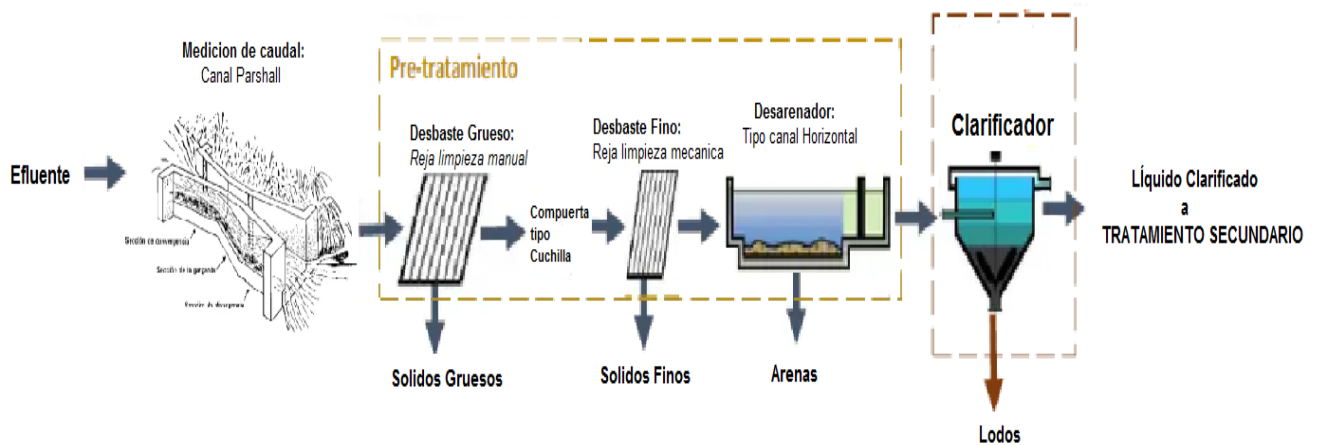


Figura 4.1: diagrama de proceso propuesto para la planta de tratamiento

4.2 Medición de caudal

El canal Parshall es uno de los dispositivos más utilizados para medir caudal en canales abiertos, especialmente en plantas de tratamiento de aguas residuales.

El canal está constituido por 4 secciones (Figura 4.2):

- 1) Canal de transferencia: Es el canal de entrada al equipo, cuyo piso está elevado respecto al fondo del canal.
- 2) Sección convergente: Donde se mantiene el nivel del fondo, es horizontal pero sus paredes van disminuyendo de sección.
- 3) Garganta: Donde se produce la máxima contracción lateral del flujo de fluido donde además la elevación del fondo desciende.
- 4) Sección divergente: Aquí es donde se produce una expansión lateral del fluido que circula, con un suave ascenso en altura del fondo.

Fundamentalmente el canal Parshall es una reducción que obliga al fluido a elevarse y luego volver a descender hasta la altura que tenía originalmente, la caída en el piso de la canaleta en la garganta, produce un fluido supercrítico y permite establecer una relación matemática entre la altura del líquido y el caudal circundante.

Estos equipos presentan baja pérdida de carga, alta capacidad para operar con precisión en un amplio rango de caudales, desde muy bajos hasta muy altos, evita acumulación en sedimentos (muy importante en nuestro caso, para evitar acumulación de arenas y lodos), no posee partes móviles por lo tanto requiere bajo mantenimiento y exactitud buena. (Cesca, 2020)

Una de las ventajas destacadas de las canaletas Parshall es su capacidad para operar en diferentes condiciones hidráulicas, como flujo libre y flujo sumergido. Estas condiciones se diferencian principalmente por el nivel del agua aguas abajo de la canaleta, que puede o no interferir en la velocidad del flujo.

Cuando ese nivel es elevado, como sucede en régimen de flujo sumergido, puede afectar la forma en que el agua se desplaza por la canaleta, disminuyendo su velocidad y alterando la medición.

Por eso, el diseño propuesto garantiza que el canal Parshall trabajará bajo régimen de flujo libre, evitando interferencias aguas abajo y asegurando lecturas confiables del caudal.

Según J. Rojas (2004), para evitar que el flujo se torne sumergido, es importante controlar la relación de sumergencia, definida como la proporción entre las alturas del agua en la sección convergente y en la garganta, medidas por piezómetros laterales. Mantener esta relación dentro de los valores recomendados asegura una medición confiable del caudal.

Las principales desventajas son que requiere condiciones hidráulicas específicas para garantizar precisión (flujo uniforme, sin turbulencias) y sensibilidad a la instalación (su construcción debe estar perfectamente nivelada y alineada).

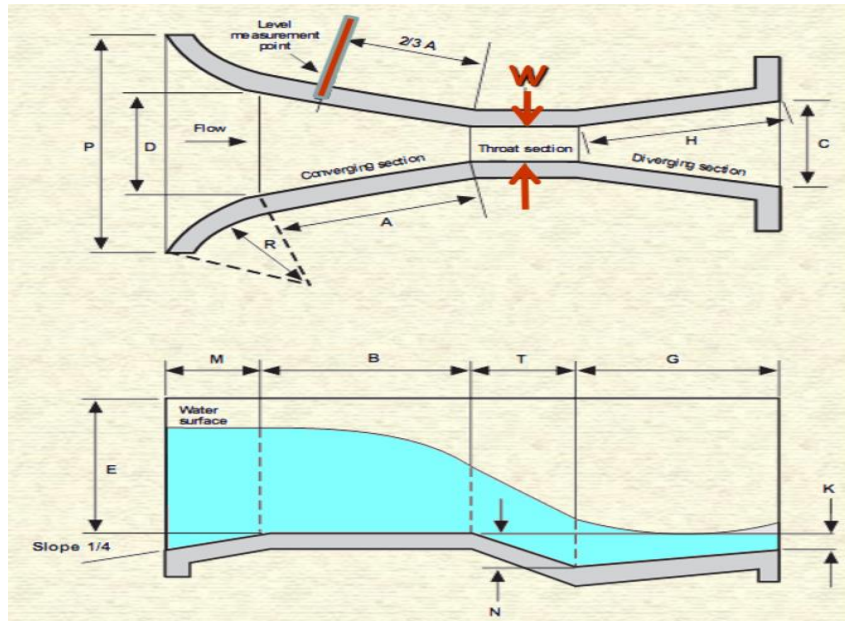


Figura 4.2: Secciones del canal Parshall recopilad. Apuntes de instrumentacion industrial de procesos, UNT. (Cesca, 2020)

Diseño de Canaleta Parshall

Se requiere diseñar una canaleta Parshall para aforar un caudal máximo de 1500 m³/h y con una profundidad de flujo aguas debajo de 80 cm, teniendo en cuenta que los canales ya existentes tienen 1 metro de profundidad, entonces se estima que funcionarían a un 80% de su altura máxima.

Según J. Rojas (2004), para canaletas con garganta menor a 0.30 m, se recomienda mantener una sumergencia mínima de 0.6, entendida como la relación entre los niveles de agua en la sección convergente y la garganta. Este valor asegura condiciones adecuadas de flujo para una medición precisa, por lo que en el diseño se adopta dicha proporción.

De la Tabla 4.3 como tenemos un caudal máximo de 1500 m³/h (416.66 L/s) se escoge una canaleta de garganta de 30.5 cm.

Se calcula la profundidad de líquido en contracción, H_a de la ecuación 4.1 correspondiente para una garganta de 30.5 cm:

$$Q = 0.690 \cdot H_a^{1.522} \quad (4.1)$$

Donde:

- H_a es la altura o profundidad de contracción [m]
- Q es el caudal circulante de fluido [m³/s]

Se determina la profundidad de contracción hidráulica (H_a) utilizando la ecuación 4.1, sustituyendo el valor de $Q=0,416 \text{ m}^3/\text{s}$, se obtiene:

$$H_{\text{contracción}} = H_a = \left(\frac{0,416}{0,690} \right)^{\frac{1}{1,522}} = 0,717 \text{ m} = 71,7 \text{ cm}$$

Tabla 4.3: Formulas para canaleta Parshall recopilada de J. Rojas (2004), p. 89.

Fórmulas para la canaleta Parshall		
Ancho de la garganta (cm)	Ecuación*	Capacidad (L/s)
2,5 (1")	$Q = 0,055 H_a^{1,5}$	0,3 – 5
5 (2")	$Q = 0,110 H_a^{1,5}$	0,6 – 13
7,6 (3")	$Q = 0,176 H_a^{1,547}$	0,8 – 55
15,2 (6")	$Q = 0,381 H_a^{1,58}$	1,5 – 110
22,9 (9")	$Q = 0,535 H_a^{1,53}$	2,5 – 250
30,5 (12")	$Q = 0,690 H_a^{1,522}$	3,1 – 455
45,7 (18")	$Q = 1,054 H_a^{1,538}$	4,3 – 700
61,0 (24")	$Q = 1,426 H_a^{1,55}$	12 – 950
91,4 (36")	$Q = 2,182 H_a^{1,566}$	17 – 1.400
121,9 (48")	$Q = 2,935 H_a^{1,578}$	37 – 1.900
152,4 (60")	$Q = 3,728 H_a^{1,587}$	60 – 2.400
182,8 (72")	$Q = 4,515 H_a^{1,595}$	70 – 2.900
213,4 (84")	$Q = 5,306 H_a^{1,601}$	115 – 3.450
243,8 (96")	$Q = 6,101 H_a^{1,606}$	130 – 3.950
305 (120")	$Q = 7,463 H_a^{1,5}$	250 – 5.660

* Q en m^3/s ; H_a en m.

Se calcula la altura de líquido en la garganta (H_b), que corresponde al nivel del agua en el punto más estrecho del canal (garganta), bajo una condición de sumergencia máxima del 60 %. Esta sumergencia se define como la relación entre:

- H_a : la profundidad de contracción, es decir, la altura del flujo justo antes de ingresar a la garganta, donde el canal se estrecha y el flujo se acelera.
- H_b : la altura del líquido dentro de la garganta, que representa el nivel del agua en ese punto de máxima aceleración.

La relación entre ambas se expresa como:

$$H_a/H_b = 0,60$$

Este valor de H_b representa la altura de líquido en la garganta y, bajo condiciones de sumergencia del 60 %, coincide con la altura del nivel aguas abajo en la zona de expansión del canal, donde se considera una profundidad total de líquido de 80 cm.

Por lo tanto, la elevación del nivel líquido respecto al fondo del canal será:

$$X = E_{\text{expansión}} - H_b = 80 \text{ cm} - 43,02 \text{ cm} = 36,98 \text{ cm} \approx 37 \text{ cm}$$

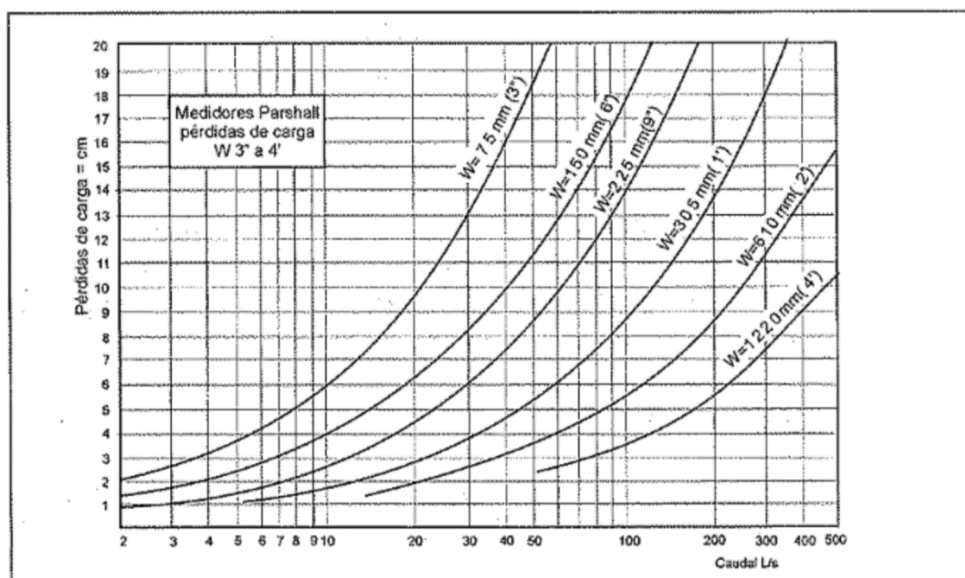


Figura 4.4: Perdidas de carga en canales Parshall recopilado de J. Rojas (2004) p. 91

Del diagrama de la Figura 4.4 para una garganta (W) de 30.5 cm y un caudal de 416.66 L/s obtenemos una pérdida de energía de 21.5 cm (0.215 m).

Por lo tanto, el diseño de la canaleta Parshall de $W = 30.5$ tendrá las dimensiones señaladas en la Tabla 4.5:

Tabla 4.5: Dimensiones de canaleta Parshall recopilada de J. Rojas (2004) p. 89.

Dimensiones de la canaleta Parshall														
W (cm)	A (cm)	B (cm)	C (cm)	D (cm)	E (cm)	F (cm)	G (cm)	K (cm)	N (cm)	R (cm)	M (cm)	P (cm)	X (cm)	Y (cm)
2,5	36,3	35,6	9,3	16,8	22,9	7,6	20,3	1,9	2,9	-	-	50,0	0,8	1,3
5,1	41,4	40,6	13,5	21,4	35,6	11,4	25,4	2,2	4,3	-	-	70,0	1,6	2,5
7,6	46,6	45,7	17,8	25,9	38,1	15,2	30,5	2,5	5,7	40,6	30,5	76,8	2,5	3,8
15,2	62,1	61,0	39,4	40,3	45,7	30,5	61,0	7,6	11,4	40,6	30,5	90,2	5,1	7,6
22,9	88,0	86,4	38,0	57,5	61,0	30,5	45,7	7,6	11,4	40,6	30,5	108,0	5,1	7,6
30,5	137,2	134,4	61,0	84,5	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9	50,8	38,1	149,2	5,1	7,6
45,7	144,9	142,0	76,2	102,6	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9	50,8	38,1	167,6	5,1	7,6
61,0	152,5	149,6	91,5	120,7	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9	50,8	38,1	185,4	5,1	7,6
91,5	167,7	164,5	122,0	157,2	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9	50,8	38,1	222,3	5,1	7,6
122,0	183,0	179,5	152,5	193,8	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9	61,0	45,7	271,1	5,1	7,6
152,5	198,3	194,1	183,0	230,3	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9	61,0	45,7	308,0	5,1	7,6
182,8	213,5	209,0	213,5	266,7	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9	61,0	45,7	344,2	5,1	7,6
213,5	228,8	224,0	244,0	303,0	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9	61,0	45,7	381,0	5,1	7,6
244,0	244,0	239,2	274,5	340,0	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9	61,0	45,7	417,2	5,1	7,6
305,0	274,5	427,0	366,0	475,9	122,0	91,5	183,0	15,3	34,3	-	-	-	30,5	22,9

Las dimensiones adoptadas se señalan en los esquemas de las Figuras 4.6 y 4.7:

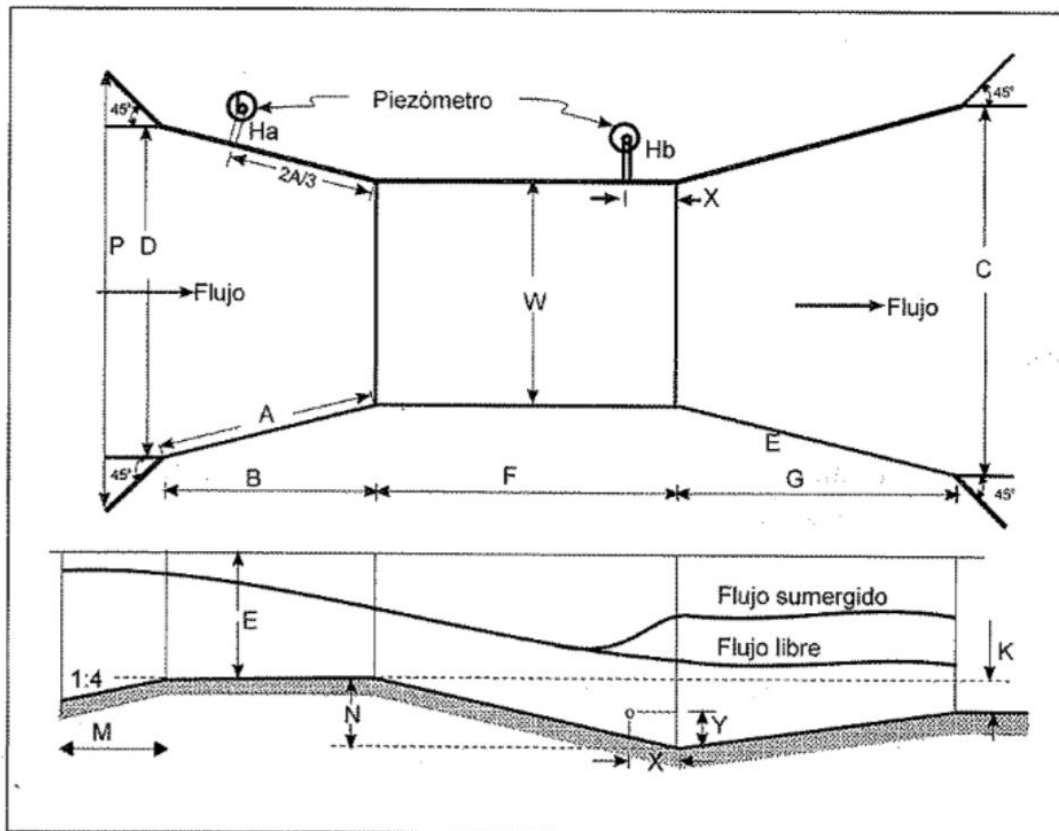


Figura 4.6: Configuración de canaleta Parshall recolectada de J. Rojas (2004) p. 88.

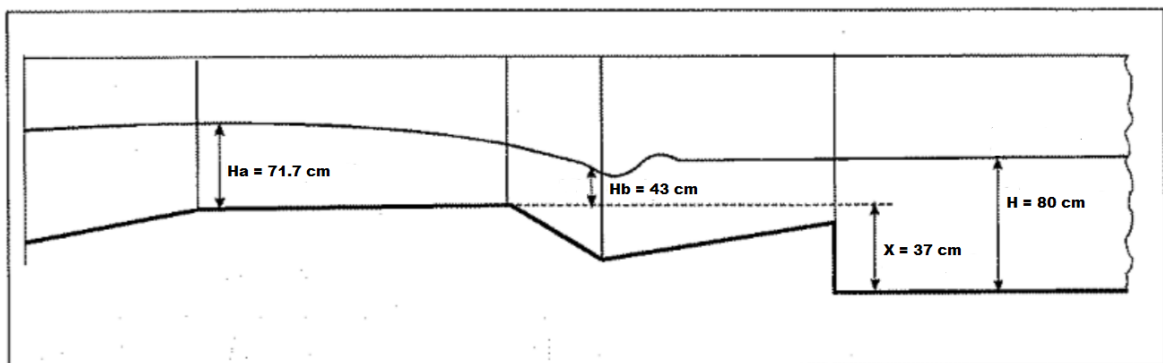


Figura 4.7: Parshall con alturas calculadas

Por lo tanto, la instalación del canal Parshall requerirá una ubicación espacial capaz de albergar un rectángulo de 325 cm de largo, 61 cm de ancho y una altura de 99.1 cm.

Para un óptimo funcionamiento del equipo, la ubicación tiene que ser después del tratamiento de desbaste y de desarenado, pero antes del clarificador, por lo que la ubicación final del equipo sería como se detalla en la Figura 4.8 la cual admite las medidas para su ubicación.

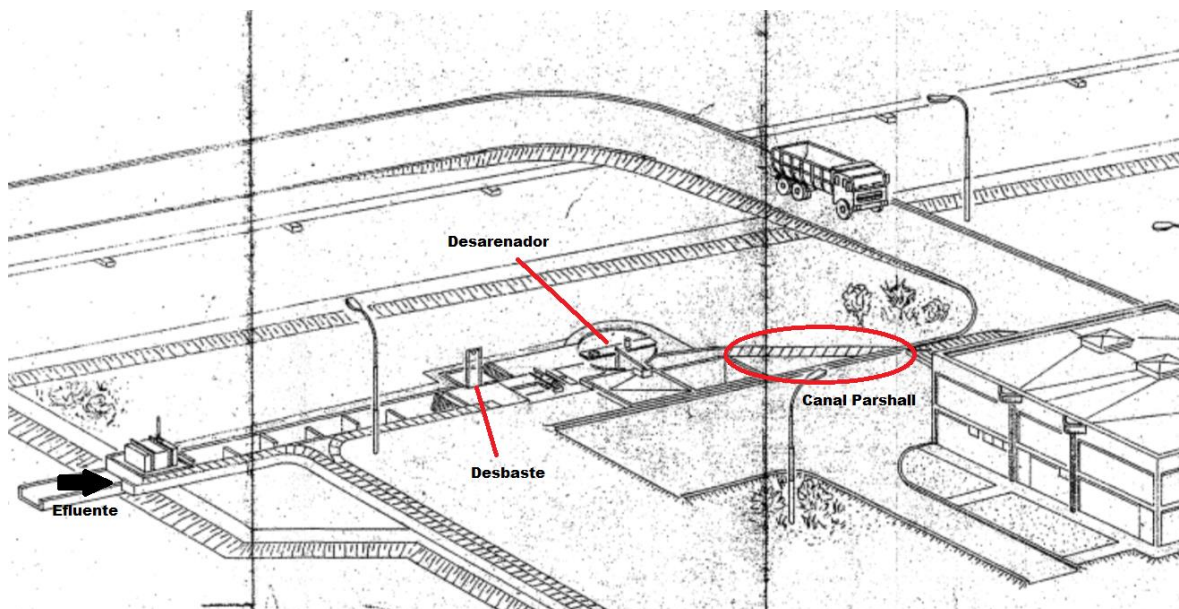


Figura 4.8: Ubicación de canal Parshall

Para construir un canal Parshall, se utilizan materiales que garantizan resistencia, durabilidad y precisión hidráulica, especialmente en ambientes húmedos o corrosivos como plantas de tratamiento de efluentes. La elección depende de las condiciones ambientales (humedad, temperatura, exposición a químicos), presupuesto disponible, tipo de instalación (fija, móvil, experimental), rango de caudales y precisión requerida.

En general se construyen de concreto armado el cual es robusto, resistente a cargas estructurales y es un material duradero.

En la actualidad, el acero inoxidable y el polipropileno son populares en la construcción de canales Parshall por su durabilidad y baja necesidad de mantenimiento. Son opciones alternativas al concreto armado. (Vassmetal S.R.L., 2025).

4.3 Desbaste

Primero nos enfocaremos al diseño en si mismo de las rejillas para desbaste grueso y mediano para luego ahondar en la solución a la deposición de arenas y barros en el canal de entrada, antes de la primera rejilla.

Se pretende usar las mismas aperturas entre varillas ya instaladas en planta y además usar las mismas medidas del canal, el cual es de sección cuadrada de 1 metro de ancho por 1 metro de largo.

El principal problema que se observó en esta etapa del tratamiento, es por un lado la alta carga de plásticos presentes en el efluente proveniente aguas arriba la cual se manifiesta por pulsos intermitentes y, por otro lado, la alta concentración de sólidos sedimentables (más de 800 mL/L) como así también retazos de maderas, cartón, hojas, etc.

Para un efluente de papelera con alta carga de sólidos sedimentables (hasta 900 mL/L) y presencia de plásticos y cartón, se requiere una rejilla automática robusta y de alta capacidad de remoción.

Tomando como caudal máximo de líquido efluente 1500 m³/h y las dimensiones ya existentes en el canal de ingreso a planta, desde SAVECO™ perteneciente a WAMGROUP se escoge rejilla automática tipo peine móvil o de cadenas con las siguientes características (Tabla 4.1):

Tabla 4.1: Características de reja automática de cadenas recopilada de manual técnico de SAVECOTM

Parámetro	Valor recomendado
Tipo de reja	Automática con peine móvil o cadenas con rastrillo
Separación entre barrotes	25 mm (desbaste medio)
Ancho de barras (Barrotes o soleras)	10 mm
Material	Acero inoxidable AISI 304 o 316
Ángulo de inclinación	75° (óptimo para limpieza y descarga)
Ancho útil	1000 mm (ajustado al canal)
Altura útil	1000 mm (puede extenderse si hay rebose)
Sistema de limpieza	Peines automáticos con rasqueta superior
Descarga	Elevada, a contenedor, tornillo o banda transportadora
Capacidad de caudal	Hasta 5000 m ³ /h
Instalación	En canal abierto preexistente, sin obra civil adicional, apoyado directamente sobre el canal
Altura total del equipo	2000 mm (incluye zona de descarga)

Se escogió esta clase de reja mecánica (Figura 4.9) porque presenta las ventajas de, Alta capacidad de remoción para sólidos gruesos y medianos, Autolimpieza eficiente mediante peines que recorren la reja (la automatización reduce riesgos laborales y asegura limpieza constante, incluso en turnos nocturnos o fines de semana), Adaptación perfecta al canal existente sin necesidad de obra civil adicional, Durabilidad en ambientes húmedos y corrosivos gracias al acero inoxidable (Se recomienda acero inoxidable AISI 304 o 316, por su alta resistencia a la corrosión en ambientes húmedos y con presencia de gases como H₂S).

Sin embargo, Metcalf & Eddy (2004) nos mencionan la principal desventaja de este tipo de rejas que consiste en que la mayoría de las rejas de accionamiento mediante cadenas presentan el problema de que las cadenas de transmisión están sumergidas, lo cual precisa de un seguimiento especial por parte de los operadores y mantenimiento recurrente. Otro inconveniente son el ajuste y separación de las pesadas cadenas de transmisión, y la necesidad de vaciar el canal para llevar a cabo la inspección y reparación de los componentes sumergidos.

Atento a esta última desventaja, se decide implementar la construcción de dos rejas automáticas a cadenas en dos canales, proyectando los dos canales ya existentes donde está montada la reja mecánica giratoria, aguas arriba del proceso a fin de ubicar las dos rejas automáticas en la entrada a planta, con el fin de usar un canal como by pass al momento de realizar el mantenimiento de alguna de estas rejas automáticas con cadenas.

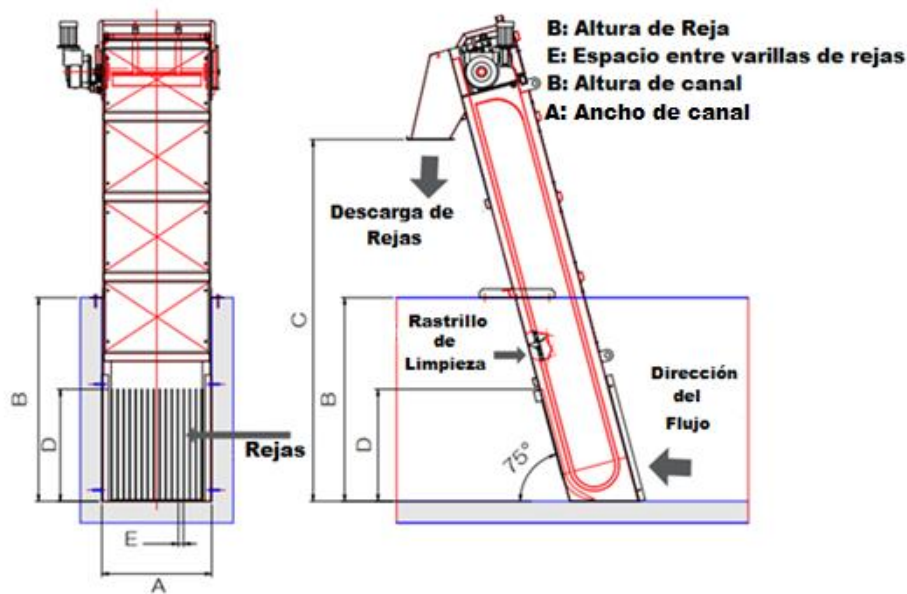


Figura 4.9: Reja automática a cadenas recopilada de manual técnico de SAVECO™

El funcionamiento de la reja automática sería el siguiente:

1. Captura de sólidos: El agua residual fluye a través de los barrotes verticales de la reja. Los sólidos más grandes (plásticos, cartón, maderas, etc.) quedan retenidos en la superficie de estos barrotes.
2. Elevación mediante cadenas: Un sistema de peines de limpieza acoplados a cadenas laterales se activa automáticamente (por temporizador o sensor de nivel). Estos peines se introducen entre los barrotes y ascienden arrastrando los sólidos retenidos.
3. Descarga de residuos: Al llegar a la parte superior, los peines pasan por una rasqueta fija que separa los sólidos del peine y los deposita en una bandeja de descarga, desde donde se envían a un contenedor, tornillo sinfín o cinta transportadora.
4. Retorno del peine: Las cadenas giran sobre ruedas dentadas y guías reforzadas, permitiendo que los peines regresen al fondo del canal para repetir el ciclo.

Para el cálculo de la pérdida de carga usamos la ecuación brindada por J. Rojas (2004) la cual es:

$$H = \frac{V^2 - v^2}{2g} \left(\frac{1}{0,7} \right) \quad (4.2)$$

Donde:

- H = pérdida de energía [m]
- V = velocidad de flujo a través de la rejilla [m/s]
- v = velocidad de aproximación de flujo [m/s]
- g = aceleración de la gravedad [m/s²]
- 0.7 = coeficiente empírico que incluye los efectos de la turbulencia y de las pérdidas por formación de remolinos

Se muestra en el croquis de la Figura 4.10, para un canal de 1 metro de ancho, apertura de 50 mm y ancho de barra de 10 mm (de acuerdo a lo adoptado):

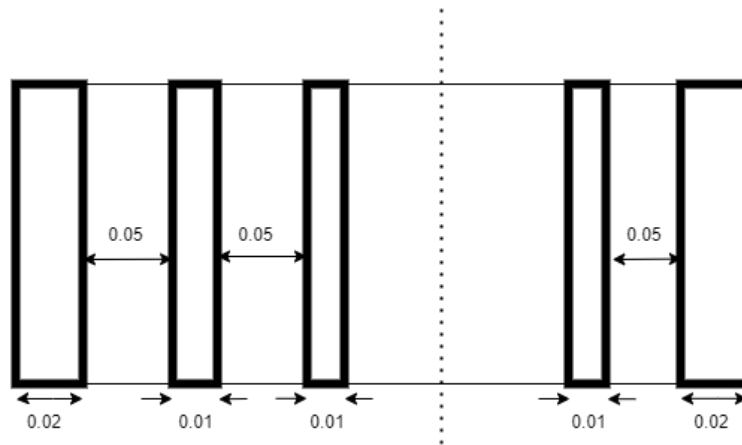


Figura 4.10: Croquis de dimensiones de reja automática

Se tiene 16 varillas de 0.01 m de ancho, y 2 varillas de 0.02 m de ancho en los bodes de la reja.

Por lo tanto, la sección de paso de líquido total, será 16 x 0.05 m x 1 m, que da como resultado 0.8 m².

Tomando un caudal de líquido efluente ingresante a planta de tratamiento de efluentes medio aproximado de 1200 m³/h, y considerando que la sección de paso a través del canal es de 1 m² nos queda que la velocidad de flujo de aproximación será:

$$v = \frac{Q_{aproximacion}}{S_{canal}} \quad (4.3)$$

donde:

- v = velocidad de aproximación [m/s]
- Q = caudal de líquido efluente [m³/s]
- S = sección de paso del canal [m²]

Reemplazando, en la ecuación 4.3:

$$v = \frac{0.3333 \text{ m}^3/\text{s}}{1 \text{ m}^2} = 0.333 \text{ m/s}$$

Respectivamente, la velocidad de flujo a través de la rejilla, V será:

$$V = \frac{Q_{aproximacion}}{S_{libre \text{ de paso entre varillas}}} = \frac{0.3333 \text{ m}^3/\text{s}}{0.8 \text{ m}^2} = 0.417 \text{ m/s} \quad (4.4)$$

donde:

- V = velocidad de líquido entre varillas [m/s]
- Q = caudal de líquido efluente [m³/s]
- S = sección de paso entre las varillas [m²]

Considerando una aceleración gravitacional de g = 9.8 m²/s, se procede al cálculo de la pérdida de carga utilizando la ecuación 4.3:

$$H = \frac{V^2 - v^2}{2g} \left(\frac{1}{0.7} \right) = \frac{0.417^2 - 0.333^2}{2 \times 9.8} \left(\frac{1}{0.7} \right) = 4.592 \times 10^{-3} \text{ m} = 0.004592 \text{ m} = 0.4592 \text{ cm}$$

Este valor de pérdida de carga calculado, corresponde a una situación ideal, donde no existe obstrucción al paso del líquido efluente.

Problema de deposición de arenas y barros en canal de entrada a planta

Tal como se detalló en el capítulo 3, la acumulación de barros y arenas en el canal de ingreso a la planta representa un problema operativo que debe ser resuelto. Esta deposición ocurre principalmente durante episodios de bajo caudal provenientes de aguas arriba. Al disminuir el caudal, la velocidad del efluente también se reduce, ya que la sección transversal del canal permanece constante. Esto provoca una caída en la turbulencia del flujo (menor número de Reynolds), lo que permite que la velocidad del líquido se acerque a la velocidad terminal de las partículas, favoreciendo su sedimentación prematura.

Durante las observaciones realizadas, se detectó que la acumulación de arenas y barros alcanza una altura promedio de 70 a 75 cm, dejando libre únicamente 25 a 30 cm para el paso del efluente. Este dato es relevante, ya que permite calcular la velocidad mínima que debe alcanzar el líquido para evitar nuevas deposiciones, considerando que el área de paso se reduce por los sedimentos acumulados.

Dado que el canal tiene una sección de 1 metro de ancho por 1 metro de alto, y el caudal mínimo histórico promedio es de 400 m³/h, se procede al siguiente análisis:

Caudal histórico:

$$Q_{\min} = 400 \text{ m}^3/\text{h} = 0.1111 \text{ m}^3/\text{s}$$

Área de paso con deposición de 75 cm:

$$S_{\text{sin deposición}} = 0.25 \text{ m} \times 1 \text{ m} = 0.25 \text{ m}^2$$

Por Ecuación 4.5 de continuidad:

$$Q_{\min} = \text{Velocidad de fluido (v)} \times \text{Área de paso (S)} \quad (4.5)$$

$$Q_{\min} = V_{\text{liq sin sedimentar}} \times S_{\text{sin deposición}} \quad (4.5)$$

Velocidad mínima necesaria para evitar sedimentación:

$$V_{\text{liq sin sedimentar}} = Q_{\min} / S_{\text{sin deposición}} = \frac{0.1111 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{0.25 \text{ m}^2} = 0.4444 \text{ m/s}$$

Esta velocidad representa el umbral mínimo que debe alcanzar el efluente para evitar la deposición de partículas en el canal, entonces, el caudal necesario será:

Sección del canal sin deposición, tomando operación del 40% de la altura del canal:

$$S_{\text{canal}} = 1 \text{ m} \times 0.3 \text{ m} = 0.3 \text{ m}^2$$

$$Q_{\min \text{ para deposición}} = V_{\text{liq sin sedimentar}} \times S_{\text{canal}} = 0.4444 \text{ m/s} \times 0.3 \text{ m}^2 = 0.1333 \text{ m}^3/\text{s} = 479.88 \text{ m}^3/\text{h}$$

Por lo tanto, el caudal mínimo necesario para evitar la deposición de arenas en el canal es de aproximadamente 480 m³/h.

Dado que resulta complejo controlar el caudal proveniente de aguas arriba, especialmente durante períodos de bajo aporte, se evalúan alternativas para complementar el caudal de ingreso y así evitar la precipitación de arenas en el canal.

Entre las opciones consideradas, se encuentra:

- Recircular agua tratada: consiste en redirigir una fracción del efluente clarificado, antes de su ingreso al tratamiento secundario, hacia el canal de entrada. Sin embargo, esta alternativa presenta desventajas operativas, ya que el clarificador

se encuentra a una distancia considerable del canal de ingreso, lo que implicaría costos elevados en cañerías, bombeo y obras complementarias.

- Utilizar agua de fábrica: proveniente de la red interna de distribución de la planta. Esta opción resulta más viable, ya que la bomba que alimenta el sistema se encuentra próxima al canal de ingreso, lo que facilita la instalación de una derivación directa mediante una cañería adicional.

Por lo tanto, se opta por diseñar una línea de descarga de agua de fábrica hacia el canal de ingreso, con el objetivo de alcanzar el caudal mínimo requerido en situaciones de bajo aporte desde aguas arriba, asegurando así condiciones hidráulicas que eviten la sedimentación prematura.

Primero vamos a calcular el requerimiento de caudal extra al caudal de efluente ingresante, que necesitara entregar dicha cañería para evitar sedimentación de arenas:

$$Q_{\text{cañería}} = Q_{\text{min para deposición}} - Q_{\text{min promedio}} = 480 \text{ m}^3/\text{h} - 400 \text{ m}^3/\text{h} = 80 \text{ m}^3/\text{h}$$

Para tal fin, se busca usar una bomba del tipo centrífuga, de agua de fábrica, situada en planta de tratamiento de efluentes.

Un esquema sintetizado del sistema a evaluar es el mostrado por la Figura 4.11, donde el punto A corresponde al nivel de cota de agua contenida en la represa, y el punto B es el punto de descarga de agua de fábrica del caño hacia el canal de entrada.

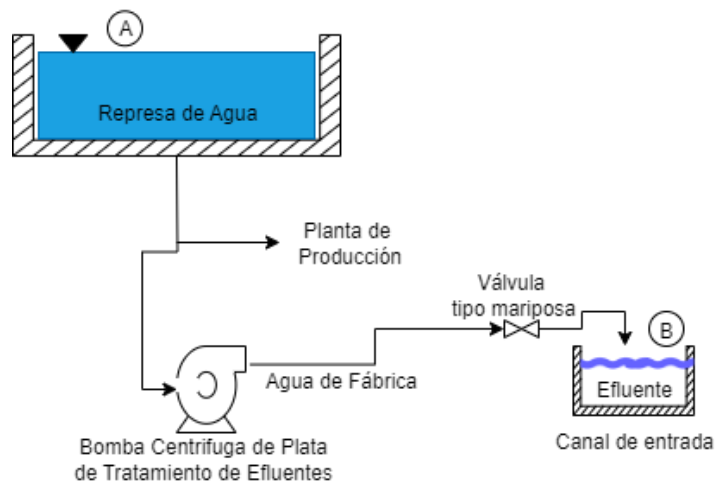


Figura 4.11: Esquema del sistema de cañería y bomba a analizar

En la Tabla 4.2 se muestran las características de la bomba ubicada en planta de tratamiento de efluentes, dicha bomba, es la única presente y es la encargada de la impulsión del agua a usar en la planta de tratamiento.

Tabla 4.2: Características de bomba para impulsión de agua de fabrica en planta de tratamiento de efluentes

Características de Bomba Centrífuga	
Modelo	3196 XLT
Tamaño	6 x 8 - 17
Diámetro de Impulsor	356 mm
Número de aspas	6
Altura requerida	40 m
Caudal requerido	350 m ³ /h

Presión requerida	30 bar
Motor de accionamiento	
Marca	Siemens
Modelo	ILA2-204
Potencia	75 kW (100 CV)
1/min	1280
frecuencia	50 Hz

Por lo tanto, como se puede ver en la Figura 4.9, nuestro nuevo sistema a diseñar, consta de, primeramente, asegurarnos que la bomba centrífuga ya instalada sea capaz de alcanzar los requerimientos de operación planteados, entonces:

Sistema anterior:

- Caudal requerido: 350 m³/h
- Altura requerida: $H_{\text{sistema anterior}} = 35 \text{ m}$
- Presión requerida: 2 bar

Nuevo sistema de cañería a instalar (Figura 4.9):

- Caudal requerido: 430 m³/h
- Altura requerida: Es lo que debemos calcular
- Presión requerida: 2 bar

Datos

Densidad de fluido, agua a 20°C, $\rho=1000 \text{ kg/m}^3$

Viscosidad del fluido agua a 20°C y presión atmosférica, $\mu=0,001 \text{ Pa.s}$

Para el tramo de cañería nuevo a agregar, el cual tendrá una longitud de cañería recta desde la salida de la bomba hasta llegar al canal de entrada de planta de efluentes de 120 metros, con 2 codos a 90° y una válvula tipo mariposa de 8', usaremos el mismo diámetro de salida de la bomba, que es de 8' acero al carbono comercial común, norma ASTM A53 / A106.

Para una cañería de 8 pulgadas Schedule 40, según Tenaris (2009) el diámetro interior estándar es de aproximadamente 7.981 pulgadas, lo que equivale a 202.7 mm (0.2027 m).

Realizando un balance de materia y energía, para el nuevo sistema planteado, entre los puntos A y B (Figura 4.9) tenemos:

$$\frac{P_B - P_A}{\rho \cdot g} + \frac{v_B^2 - v_A^2}{2 \cdot g} + Z_B - Z_A = H_{\text{bomba nuevo sistema}} - \frac{W_{\mu}}{g} \quad (4.6)$$

donde:

- P_A = Presión en el punto A = 1 atm = 101325 Pa
- P_B = Presión en el punto B = 2 bar = $2 \times 10^5 \text{ Pa}$
- ρ = Densidad de fluido, agua a 20°C, $\rho=1000 \text{ kg/m}^3$
- g = aceleración de la gravedad = 9.8 m/s^2
- v_B = velocidad del líquido en el punto B
- v_A = velocidad del líquido en el punto A = 0 m/s
- Z_B = Altura del punto B con respecto al nivel del suelo [m]
- Z_A = Altura del punto B con respecto al nivel del suelo [m]
- H = altura de la bomba centrífuga del sistema [m]

- $\frac{W_\mu}{g}$ = pérdidas de carga en el sistema [m]

La bomba se sitúa al mismo nivel que el tramo final de cañería, por lo tanto:

$$Z_B - Z_A = 0$$

En cuanto a las presiones,

Para las velocidades, tenemos que:

$$v_A = 0 \text{ m/s}$$

Calculando v_B para un caudal de 80 m³/h (0.0222 m³/s) y un diámetro interior de cañería de 0.2027 m:

Aplicando la ecuación de continuidad, Ecuación 4.5, que establece que el caudal o flujo volumétrico se relaciona con la velocidad del líquido y el área de paso mediante:

$$Q = v_B \cdot A \quad (4.5)$$

donde:

- Q = caudal volumétrico [m³/s]
- v_B = velocidad de líquido a la salida de la cañería, punto B [m/s]
- A = área o sección de paso del líquido [m²]

$$Q = v_B \cdot A = v_B \cdot \frac{\pi \cdot D_{\text{interior}}^2}{4} = v_B \cdot \frac{3.14 \cdot 0.2027^2}{4} = v_B \cdot 0.0323 \text{ m}^2$$

$$v_B = \frac{Q}{0.0323} = \frac{0.0222 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{0.0323 \text{ m}^2} = 0.6873 \text{ m/s}$$

En cuanto al cálculo de las pérdidas, W_μ tenemos:

$$W_\mu = \frac{1}{2} \cdot v_B^2 \cdot f \cdot \sum \left(\frac{L}{D} \right)_{\text{equivalente}} \quad (4.7)$$

donde:

- v_B = velocidad de líquido a la salida de la cañería, punto B [m/s]
- f = factor de fricción de Darcy
- $\sum \left(\frac{L}{D} \right)_{\text{equivalente}}$ = Es la suma de longitudes equivalentes de todos los accesorios del sistema

Para el cálculo del coeficiente de Darcy (f), calculamos el número de Reynolds:

$$N_{\text{Re}} = \frac{\rho \cdot v_B \cdot D_{\text{int}}}{\mu} \quad (4.8)$$

donde:

- ρ = Densidad de fluido, agua a 20°C, $\rho=1000 \text{ kg/m}^3$
- v_B = velocidad de líquido a la salida de la cañería, punto B [m/s]
- D_{int} = diámetro interno de cañería donde circula el líquido [m]
- μ = viscosidad del líquido a 20°C y $P_{\text{atm}} = 0.001 \text{ Pa.s}$

Para el cálculo del Numero de Reynolds usamos la ecuación 4.8:

$$N_{\text{Re}} = \frac{1000 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \cdot 0.6873 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0.2027 \text{ m}}{0.001 \text{ Pa.s}} = 139315.7 = 1.4 \times 10^5$$

Este valor indica que el flujo se encuentra en régimen turbulento, ya que supera ampliamente el umbral de $N_{\text{Re}} > 4000$, correspondiente a condiciones de alta velocidad y predominio de fuerzas inerciales sobre las viscosas.

Según el Gráfico A-21b de Crane Co. (1935), que presenta la rugosidad relativa de materiales de tuberías y su influencia en el factor de fricción para flujo turbulento, se adopta un valor de:

$$\epsilon/D=0,000225$$

Correspondiente a una tubería de diámetro nominal de 8 pulgadas fabricada en acero comercial. Utilizando el diagrama de Moody para la estimación del coeficiente de fricción en conductos con paredes lisas y rugosas, se obtiene un valor de:

$$f=0,0158 \text{ según White, M. (2008, p. 358)}$$

La longitud equivalente total del sistema se determina mediante la Ecuación 4.9, que considera tanto la longitud relativa de la cañería recta como la contribución de los diferentes accesorios

$$\sum \left(\frac{L}{D}\right)_{\text{equivalente}} = \left(\frac{L}{D}\right)_{\text{Cañería Recta}} + \left(\frac{L}{D}\right)_{\text{Codos } 90^\circ} + \left(\frac{L}{D}\right)_{\text{Expansión brusca}} + \left(\frac{L}{D}\right)_{\text{Válvula Mariposa}} \quad (4.9)$$

Para el cálculo de los términos correspondientes a los accesorios, se utilizaron los valores recomendados por Crane Co. (1935):

- Codos 90°
 $\left(\frac{L}{D}\right)_{\text{Codos } 90^\circ} = 30 \times 2 = 60$
- Expansión brusca
 $\left(\frac{L}{D}\right)_{\text{Expansión brusca}} = 70$
- Válvula mariposa
 $\left(\frac{L}{D}\right)_{\text{Válvula Mariposa}} = 45$

La longitud de cañería recta equivalente se calcula como:

$$\left(\frac{L}{D}\right)_{\text{Cañería Recta}} = \frac{120 \text{ m}}{0.2027 \text{ m}} = 592$$

Por lo tanto, de la ecuación 4.9, la longitud equivalente total del sistema es:

$$\sum \left(\frac{L}{D}\right)_{\text{equivalente}} = 592 + 60 + 70 + 45 = 767$$

Entonces, de la ecuación 4.7:

$$W_\mu = \frac{1}{2} \cdot v_B^2 \cdot f \cdot \sum \left(\frac{L}{D}\right)_{\text{equivalente}} = \frac{1}{2} \cdot 0.6873^2 \cdot 0.0158 \cdot 767 = 2.8623 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

Para expresar esta energía en términos de altura de pérdida de carga, se divide el resultado por la aceleración de la gravedad $g = 9.8 \text{ m}^2/\text{s}^2$:

$$\frac{W_\mu}{g} = 0.292 \text{ m}$$

Una vez determinados todos los términos involucrados en la Ecuación 4.6, se procede al cálculo de la altura requerida por la bomba en el nuevo sistema:

$$\begin{aligned} \frac{P_B - P_A}{\rho \cdot g} + \frac{v_B^2 - v_A^2}{2 \cdot g} + Z_B - Z_A + \frac{W_\mu}{g} &= H_{\text{bomba nuevo sistema}} \\ H_{\text{bomba nuevo sistema}} &= \frac{2.10^5 \text{ Pa} - 101325 \text{ Pa}}{1000 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \cdot 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} + \frac{0.6873^2 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} - 0}{2 \cdot 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} + 0.292 = 10.385 \text{ m} \end{aligned}$$

Dado que el sistema incorpora una nueva línea de impulsión de cañería, la altura total requerida por la bomba se obtiene como la suma de la altura previamente demandada por el sistema original y la altura adicional calculada para el nuevo tramo:

Por lo tanto, la bomba centrífuga necesitara una impulsión total de $H_{Total} = H_{sistema anterior} + H_{bomba nuevo sistema}$

$$H_{Total} = 35 \text{ m} + 10.385 \text{ m} = 45.4 \text{ m}$$

Esta altura total representa la carga manométrica que la bomba debe vencer para garantizar el funcionamiento adecuado del nuevo sistema.

Según Goulds Pumps (2009), GPM9: Manual de ingeniería de bombas. ITT Industries, se presenta en la Figura 4.12 la curva característica de la bomba seleccionada, la cual permite verificar si el equipo es capaz de operar dentro de los parámetros requeridos por el sistema.

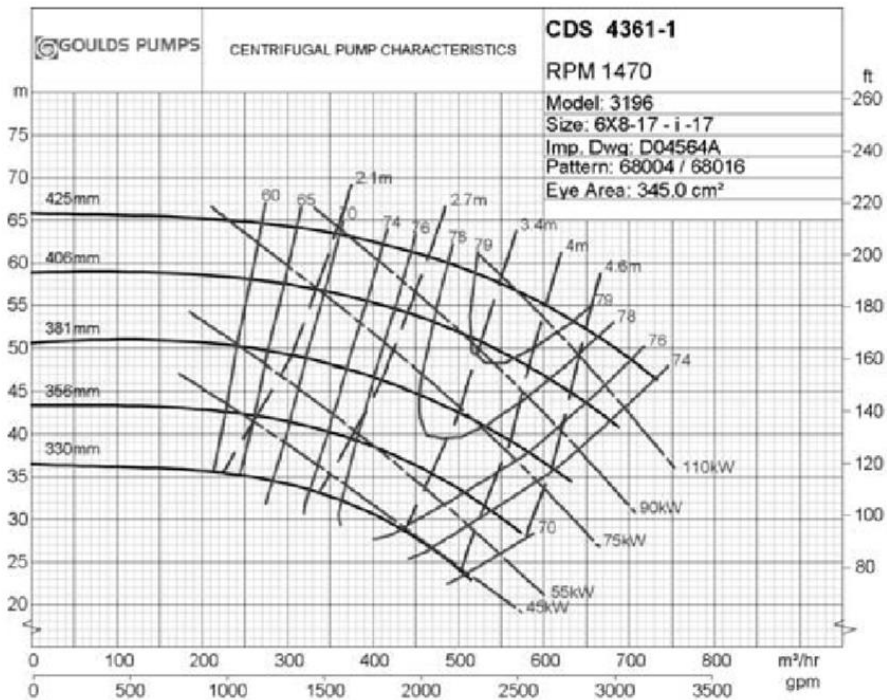


Figura 4.12: Curva característica de bomba 3196 6x8 - 17 (Goulds Pumps. (2009), p.6)

Del análisis de la curva característica de la bomba (Figura 4.12), se verifica que, para una altura de 45,4 m y un caudal de 430 m³/h, operando con un motor de 75 kW, a 50 Hz y 1500 rpm, la bomba seleccionada cumple con los requerimientos del nuevo sistema.

En consecuencia, se valida la viabilidad de implementar una línea de impulsión desde la planta hacia el canal de entrada, destinada a complementar el caudal mínimo proveniente de aguas arriba. Esta solución permite:

- Evitar la sedimentación de arenas y barros en condiciones de bajo flujo.
- Aumentar la velocidad del fluido, lo que incrementa el número de Reynolds, favoreciendo un régimen turbulento.
- Mejorar la eficiencia hidráulica del sistema y garantizar condiciones de autolimpieza en el canal
- Permite regular valores de conductividad eléctrica elevados, mediante dilución.

4.4 Desarenado

Para el diseño del equipo vamos a tener en consideraciones los siguientes parámetros:

- Caudal Máximo $1500 \text{ m}^3/\text{h} = 0.417 \text{ m}^3/\text{s}$
- ρ_s (densidad de solido) = $2650 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$
- ρ (densidad del líquido) = $1000 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$
- Temperatura de diseño: 18°C
- Diámetro de partícula para Arena fina: 0.1 mm (Cualla L.,1995)
- Considerando un 75% de remoción (eficiencia)

El desarenador planteado, es del tipo canal, de flujo horizontal cuyas dimensiones se pueden observar en la Figura 4.13; con operación de decantación solo por gravedad; sin adición de coagulantes ni floculantes.

El Equipo consta de 4 sectores fundamentalmente, los cuales son:

1. Zona I: Es la cámara de aquietamiento, donde entra el efluente y cumple la función de disipación de energía de velocidad, para lograr un flujo laminar.
2. Zona II: Es la entrada al desarenador, donde está ubicada un deflector que obliga a las líneas de flujo a descender y origina la precipitación de las arenas más gruesas
3. Zona III: Es la zona de sedimentación, donde sedimentan las partículas restantes, caracterizada por su profundidad H .
4. Zona V: Es la salida del sedimentador, constituida por un deflector y seguida por un vertedero.

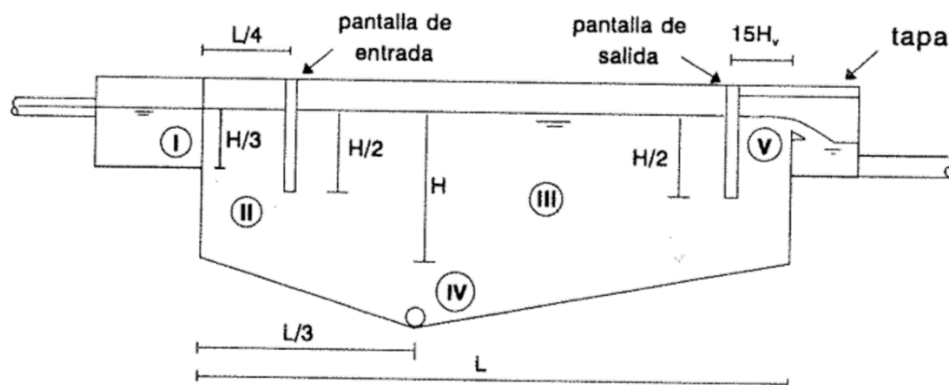


Figura 4.13: Dimensiones del desarenador (Cualla L. (1995), p. 155)

El fondo del equipo tendrá una inclinación de 10° hacia uno de sus bordes, a fin de realizar la remoción de las arenas depositadas mediante una cañería.

Para determinar la velocidad de sedimentación de la partícula, considerando flujo laminar, por ecuación de Stokes:

$$v_s = \frac{1}{18} \cdot \frac{g}{\mu} \cdot \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right) \cdot d^2 \quad (4.10)$$

Donde:

- v_s = velocidad de sedimentación de partícula de diámetro d [cm/s]
- μ = viscosidad cinemática del fluido [cm^2/s]
- g = aceleración de la gravedad = 981 cm/s^2
- ρ_s = densidad de la partícula solida = 2650 kg/m^3
- ρ = densidad del fluido = 1000 kg/m^3

Según Cualla L. (1995) para temperaturas de 18 °C la viscosidad cinemática es de 0.01059 cm²/s. Reemplazando los valores en la Ec. 4.10 queda:

$$v_s = \frac{1}{18} \cdot \frac{981}{0.01059} \cdot \left(\frac{2650 - 1000}{1000} \right) \cdot \left(\frac{0.1}{10} \right)^2 = 0.849 \text{ cm/s}$$

Para comprobar si esta velocidad de sedimentación está en régimen laminar se debe verificar que:

$$N_{Re} < 1$$

Haciendo el respectivo calculo:

$$N_{Re} = \frac{v_s \cdot d}{\mu} = \frac{0.849 \cdot 0.01}{0.01059} = 0.8$$

Entonces estamos trabajando con régimen laminar.

Ahora determinamos el número de Hazen. El número de Hazen se utiliza como factor de corrección para ajustar la velocidad de sedimentación teórica obtenida mediante la ley de Stokes, considerando las condiciones reales del flujo en el desarenador. Según Cualla (1995), esta ley se aplica bajo tres supuestos ideales: flujo uniforme, velocidad constante y partículas removidas al tocar el fondo. Sin embargo, en sistemas reales, estas condiciones no siempre se cumplen.

El parámetro n representa el grado de eficiencia hidráulica del desarenador, en función del diseño y comportamiento del deflector. Cualla (1995, Tabla 9.3) clasifica los deflectores como:

- Bueno: n = 3
- Regular: n = 2
- Deficiente: n = 1

Para una remoción del 75 % y un deflector calificado como “bueno” (n=3n = 3), se obtiene un número de Hazen igual a 3.

Dado que el efluente tratado no es agua limpia, no está en reposo, y las partículas de arena no son perfectamente esféricas, se requiere aplicar esta corrección para obtener la velocidad de sedimentación operativa efectiva, más representativa de las condiciones reales del sistema.

Ahora mediante el número de Hazen y la velocidad de sedimentación, se calcula la velocidad de sedimentación de operación efectiva.

$$w = \frac{v_s}{N^{\circ} \text{ Hazen}} \quad (4.11)$$

donde:

- W = velocidad de sedimentación de operación efectiva
- v_s = velocidad de sedimentación teórica
- N° de Hazen = 3

De la Ecuación 4.11:

$$w = \frac{0.849}{3} = 0.283 \text{ cm/s}$$

Para determinar el tiempo de retención hidráulico (θ), que es el tiempo que demora en caer la partícula hasta el fondo del desarenador:

$$\theta = \frac{H}{W} \quad (4.12)$$

donde:

- θ = tiempo de retención hidráulico [s]
- H = es la altura del desarenador
- W = velocidad de sedimentación de operación efectiva

Es recomendable que una altura entre 1,5 y 4,5 metros, por lo que se adopta una altura de 2 metros.

De la Ecuación 4.12:

$$\theta = \frac{200}{0.283} = 706.7 \text{ segundos} = 11.8 \text{ minutos}$$

El diseño del sistema de sedimentación contempla dos canales paralelos, dimensionados para operar en forma simultánea bajo condiciones de caudal máximo (0.417 m³/s). Por lo tanto, el caudal de diseño por canal se establece como:

$$Q_{\text{diseño}} = \frac{Q_{\text{max}}}{2} = \frac{0.417}{2} = 0.2085 \text{ m}^3/\text{s}$$

Este enfoque permite que, en caso de realizar tareas de mantenimiento en uno de los canales, el sistema pueda continuar operando con un solo canal sin exceder su capacidad de diseño, siempre que el caudal de operación en ese momento sea inferior o igual a $\frac{Q_{\text{max}}}{2}$.

Dado que el caudal máximo no representa una condición permanente, sino puntual, el sistema puede funcionar adecuadamente con un solo canal durante períodos de mantenimiento, seleccionando dichos períodos en función de caudales reducidos.

Para el dimensionamiento del volumen del tanque de sedimentación (V_{Tk}), se utiliza el caudal máximo de diseño (Q_{max}), el cual se divide entre dos para representar la operación simultánea de dos canales paralelos.

Este enfoque permite calcular el volumen bajo la condición más desfavorable de operación, es decir, cuando el sistema trabaja a plena capacidad. Aunque esta situación se presenta en forma ocasional, diseñar bajo este criterio garantiza que cada canal pueda operar de forma independiente sin comprometer la eficiencia del proceso, incluso en escenarios de máxima exigencia hidráulica.

El cálculo del volumen del tanque queda expresado en la Ecuación 4.13

$$V_{\text{Tk}} = \theta \cdot \frac{Q_{\text{max}}}{2} \quad (4.13)$$

donde:

- V_{Tk} = volumen del tanque diseñado [m³]
- θ = tiempo de retención hidráulico [s]
- $\frac{Q_{\text{max}}}{2}$ = caudal máximo de operación para cada canal

De la ecuación 4.13:

$$V_{\text{Tk}} = 706.7 \text{ s} \cdot 0.2085 \text{ m}^3/\text{s} = 147.35 \text{ m}^3$$

Ahora bien, el volumen del tanque también se expresa como:

$$V_{\text{Tk}} = L \cdot B \cdot H \quad (4.14)$$

Donde L es el largo, B el ancho y H la altura del tanque.

Con el fin de aproximarse lo más posible al flujo pistón, se recomienda un tanque rectangular con una relación de longitud a ancho (L/B) de 3/1 y hasta 5/1, en base a esto se adoptará una relación de L/B = 3. Reemplazando B en la expresión de la Ec. 4.14 queda:

$$V_{Tk} = 3 \cdot B \cdot H,$$

$$V_{Tk} = 3 B^2 \cdot H \quad (4.15)$$

Despejando B de la ecuación 4.15, tenemos:

$$B = \sqrt{\frac{V_{Tk}}{3 \cdot H}} = \sqrt{\frac{147.35}{3 \cdot 2}} = 4.95 \text{ m}$$

Adoptamos B = 5 m y por lo tanto L = 15 m

Para garantizar una operación eficiente del desarenador, es fundamental controlar la velocidad horizontal máxima del flujo ($v_{\text{max horizontal}}$) dentro del canal. Esta velocidad debe mantenerse por debajo de un umbral crítico para evitar la remoción de partículas sedimentables.

Se recomienda que:

$$V_{\text{max horizontal}} < 20 \cdot w$$

donde:

- $V_{\text{max horizontal}}$ = velocidad horizontal máxima del flujo en el canal [m/s]
- w = velocidad de sedimentación de operación efectiva [m/s]

Este criterio asegura que las partículas con velocidad de caída w tengan tiempo suficiente para sedimentarse antes de ser arrastradas por el flujo. A continuación, se realiza la verificación correspondiente para comprobar que se cumple esta condición de diseño.

La velocidad horizontal máxima del flujo en el canal se calcula a partir del caudal por canal (Q_{canal}) y las dimensiones transversales del canal (ancho B y altura H) mediante la siguiente expresión:

$$V_{\text{max horizontal}} = \frac{Q_{\text{canal}}}{B \cdot H} = \frac{0.2085}{5 \cdot 2} = 0.0285 \text{ m/s} = 2.85 \text{ cm/s}$$

Dado que $w = 0,283 \text{ cm/s}$, se tiene:

$$20 \cdot w = 5,66 \text{ cm/s}$$

Comparando ambos valores:

$$V_{\text{max horizontal}} = 2.85 \text{ cm/s} < 20 \cdot w = 5.66 \text{ cm/s}$$

Se verifica que se cumple el criterio de diseño, asegurando que las partículas con velocidad de caída w pueden sedimentarse eficazmente dentro del canal.

Otra verificación importante es comprobar que la velocidad máxima horizontal sea menor que la velocidad de arrastre de las partículas con el fin de evitar resuspensión del sedimento. Esto se hace con la expresión:

$$V_{\text{max horizontal}} < \sqrt{\frac{8 \cdot K \cdot g \cdot d \cdot (\rho_s - \rho)}{f \cdot \rho}} \quad (4.16)$$

donde:

- K = coeficiente de forma de la partícula (se adopta 0.04)
- g = aceleración de la gravedad (981cm/s²)
- d = diámetro de la partícula (0.01 cm)
- ρ_s = densidad de la partícula (2650 kg/m³)
- ρ = densidad del agua (1000 kg/m³)
- f = coeficiente de fricción (se adopta 0.03)

Se adopta para la verificación: k= 0.04 y f = 0.03

Sustituyendo los valores:

$$V_{\text{Critica}} = \sqrt{\frac{8 \cdot 0.04 \cdot 981 \cdot 0.01 \cdot (2650 - 1000)}{0.03 \cdot 1000}} = 13.139 \text{ cm/s}$$

Como $V_{\text{max horizontal}} < V_{\text{Critica}}$

Se concluye que la velocidad horizontal máxima es adecuadamente baja, lo que evita la resuspensión de las partículas y confirma la validez del diseño hidráulico del canal.

Una vez verificados los parámetros hidráulicos de diseño y sedimentación, es importante incorporar una estimación de las pérdidas de carga asociadas al paso del flujo por el desarenador.

De acuerdo con el *Estudio sobre pérdidas de carga en desarenadores rectangulares* elaborado por la Universidad Nacional del Sur (s.f., es decir, sin fecha de publicación), las pérdidas de carga típicas en este tipo de unidades oscilan entre 2 y 6 cm, variando según la geometría del sistema, la rugosidad interna y el régimen de flujo.

4.5 Decantación

Para el diseño del equipo clarificador, primeramente, se requiere del caudal ingresante, el cual, no es de 1500 m³/h ya que presenta perdidas desde que ingresa a planta, ya sea por el propio canal o por los diferentes equipos presentes antes de llegar a ingresar al equipo, por lo que se procede a calcular este caudal:

Datos del efluente liquido:

- Según Covalada Gavilan (2005) la densidad del efluente papelerero suele estar apenas por encima del agua, debido a la presencia de sólidos suspendidos, lignina, celulosa y compuestos orgánicos y su valor es de 1050 kg/m³
- Según Lozano Bravo (2005) la viscosidad varía según el tipo de proceso (pulpa mecánica, química o reciclado), la temperatura y la concentración de sólidos. Valores más altos se observan en efluentes con alto contenido de fibras y materia orgánica y tiene un valor de 1.15 cP (0.00115 Pa.s).

Haciendo un balance de materia y energía desde la entrada a planta (Punto A), hasta el ingreso al clarificador (Punto B), recordando que se trata de canales abiertos de 1 metro de ancho por 1 metro de alto, con una diferencia de alturas entre el punto A y el punto B de 26.8 cm

$$\frac{v_B^2 - v_A^2}{2 \cdot g} + Z_B - Z_A = - \frac{W_{\mu \text{ total}}}{g} \quad (4.17)$$

donde:

- v_B = velocidad de fluido en el punto B [m/s]
- v_A = velocidad del fluido en el punto A [m/s]
- Z_B = altura del punto B, con referencia el piso [m]
- Z_A = altura del punto A, con referencia el piso [m]

Tomando el caudal máximo de $Q_{\max}$ de 1500 m³/h y para una sección de paso en el canal, de 0.9 m² (90% altura del canal):

Por ecuación de continuidad

$$Q_{\max} = v_A \cdot S_{\text{canal}} \quad (4.18)$$

donde:

- $Q_{\max}$ = es el máximo caudal que transporta el canal [m³/s]
- S_{canal} = sección de pasaje del fluido sobre el canal [m²]

De la Ecuación 4.18 se obtiene:

$$v_A = \frac{Q_{\max}}{S_{\text{canal}}} = \frac{0.417 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{0.9 \text{ m}^2} = 0.417 \text{ m/s}$$

Para el cálculo de las pérdidas, se tiene una longitud recta de canal de 130 metros, entonces:

$$W_{\mu \text{ Total}} = W_{\mu \text{ Equipos}} + W_{\mu \text{ Canal}} = W_{\mu \text{ Equipos}} + \frac{1}{2} \cdot v_A^2 \cdot f \cdot \sum \left(\frac{L}{D} \right)_{\text{equivalente}} \quad \text{Ec. 4.19}$$

Para el cálculo del $D_{\text{equivalente}}$ para el caso de canales abiertos, suponiendo despreciable las pérdidas del líquido por fricción con el aire:

$$D_{\text{equivalente}} = 4 \cdot \frac{\text{Sección de pasaje del fluido}}{\text{Perímetro mojado}} = 4 \cdot \frac{1 \text{ m} \cdot 1 \text{ m}}{1 \text{ m} + 1 \text{ m} + 1 \text{ m}} = 1.33 \text{ m} \quad \text{Ec. 4.20}$$

$$\sum \left(\frac{L}{D} \right)_{\text{equivalente}} = \frac{130 \text{ m}}{1.33 \text{ m}} = 97.744$$

Verificamos el tipo de régimen calculando el número de Reynolds:

$$N_{\text{Re}} = \frac{\rho_{\text{Liq}} \cdot D \cdot v_A}{\mu} = \frac{1050 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \cdot 1.33 \text{ m} \cdot 0.417 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0.00115 \text{ Pa.s}} = 5 \times 10^5 \text{ (régimen turbulento)}$$

Para White, F. M. (2008) el factor de fricción de Darcy (f) puede estimarse usando la Ecuación 4.21:

$$f = \frac{0.25}{\left[\log_{10} \left(\frac{k/D}{3.7} + \frac{5.74}{N_{\text{Re}}^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (4.21)$$

Dónde:

- N_{Re} = número de Reynolds
- k = rugosidad absoluta ($\approx 0.003 \text{ m}$) para concreto rugoso

Reemplazando en la Ecuación 4.21, queda:

$$f = \frac{0.25}{\left[\log_{10} \left(\frac{0.003/1.33}{3.7} + \frac{5.74}{(5.10^5)^{0.9}} \right) \right]^2} = 0.02463$$

Una vez determinados todos los parámetros necesarios, velocidad del fluido en el punto A (v_A), factor de fricción de Darcy (f) y longitud equivalente $\sum \left(\frac{L}{D} \right)_{\text{equivalente}}$, se procede a reemplazarlos en la ecuación de pérdidas por fricción (Ecuación 4.19):

$$W_{\mu \text{ Canal}} = \frac{1}{2} \cdot v_A^2 \cdot f \cdot \sum \left(\frac{L}{D} \right)_{\text{equivalente}}$$

Sustituyendo los valores:

$$W_{\mu \text{ Canal}} = 0.5 \cdot (0.417)^2 \cdot 0.02463 \cdot 97.744 = 0.209 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

Este resultado representa la energía disipada por fricción en unidades de energía específica (m^2/s^2). Para expresar esta pérdida en términos de altura de carga (m), se divide por la aceleración de la gravedad ($9,8 \text{ m/s}^2$):

$$\frac{W_{\mu \text{ canal}}}{g} = 0.0213 \text{ m}$$

Se realiza el análisis de las pérdidas de energía por fricción considerando por separado los componentes del sistema:

- Pérdida en el canal:
 $W_{\mu \text{ canal}} = 0.0213 \text{ m}$
- Pérdidas en los equipos:
 $W_{\mu \text{ Equipos}} = W_{\mu \text{ Desbaste}} + W_{\mu \text{ Desarenador}} + W_{\mu \text{ Parshall}} = 0.03 \text{ m} + 0.215 \text{ m} = 0.245 \text{ m}$

Se desprecia la pérdida en el desbaste por ser un orden de magnitud menor respecto a las demás.

- Pérdida total de energía:

$$W_{\mu \text{ Total}} = W_{\mu \text{ Equipos}} + W_{\mu \text{ Canal}} = 0.245 \text{ m} + 0.0213 \text{ m} \approx 0.27 \text{ m}$$

De la ecuación general del balance de energía entre los puntos A y B, ecuación 4.17:

Dado que:

- $Z_B - Z_A = -0.268 \text{ m}$
- $W_{\mu \text{ Total}} \approx 0.27 \text{ m}$
- $v_A = 0.417$

Se despeja la velocidad en el punto B:

$$v_B = 0.367 \text{ m/s}$$

Una vez determinada la velocidad del flujo en el punto B mediante el balance de energía, se procede a calcular el caudal que ingresa al decantador, utilizando la Ecuación 4.22, que relaciona la velocidad con el área de paso:

$$Q_{\text{Decantador}} = v_B \cdot S_{\text{canal}} \quad (4.22)$$

Sustituyendo los valores:

$$Q_{\text{Decantador}} = 0.367 \text{ m/s} \times 0.9 \text{ m}^2 = 0.3303 \text{ m}^3/\text{s} = 1189 \text{ m}^3/\text{h}$$

Los tanques sedimentadores se suelen dimensionar mediante la carga de superficie, expresada en $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}$ o en $\text{m}^2/\text{día}$ dependiendo del autor. Se define como la velocidad con la que el agua fluye por unidad de área superficial del tanque, y se utiliza para evaluar si las partículas suspendidas tienen tiempo suficiente para sedimentarse antes de que el agua salga del sistema y el valor de esta debe ser lo suficientemente pequeña para asegurar un correcto funcionamiento del equipo en caudales máximos.

Se diseñará un tanque circular como decantador (Figura 4.14), ya que para J. Rojas (2004) estos tanques son muy usados porque el barredor de fondo requiere menos partes móviles que el mecanismo de arrastre para sedimentadores rectangulares y porque los muros pueden ser más delgados que los rectangulares.

El agua residual ingresa por el centro del tanque a través de una columna vertical o cilindro deflector, que distribuye el flujo de manera uniforme y reduce la turbulencia inicial, en la zona central está dispuesta una campana circular para distribuir el flujo uniformemente, su diámetro suele variar entre el 15% y 20% del diámetro del tanque y una profundidad entre 1 y 2,5 metros (Metcalf & Eddy, 1995, p. 551).

Desde el centro, el agua se desplaza radialmente hacia la periferia, ascendiendo lentamente. Esta velocidad ascensional está controlada por la carga superficial, que debe mantenerse baja para permitir la sedimentación.

Las partículas más densas se asientan por gravedad hacia el fondo del tanque, donde una barredora rotatoria las dirige hacia una tolva central o solera de lodos, con forma de cono invertido con una pendiente aproximada de 1/12, para su extracción.

El agua tratada alcanza el borde del tanque y es recolectada por un vertedero perimetral dentado, que asegura una salida uniforme y evita la re-entrada de sólidos.

Los sólidos flotantes (espumas, grasas) son retenidos por pantallas deflectoras y extraídos mediante un desnatador acoplado al brazo de la barredora.

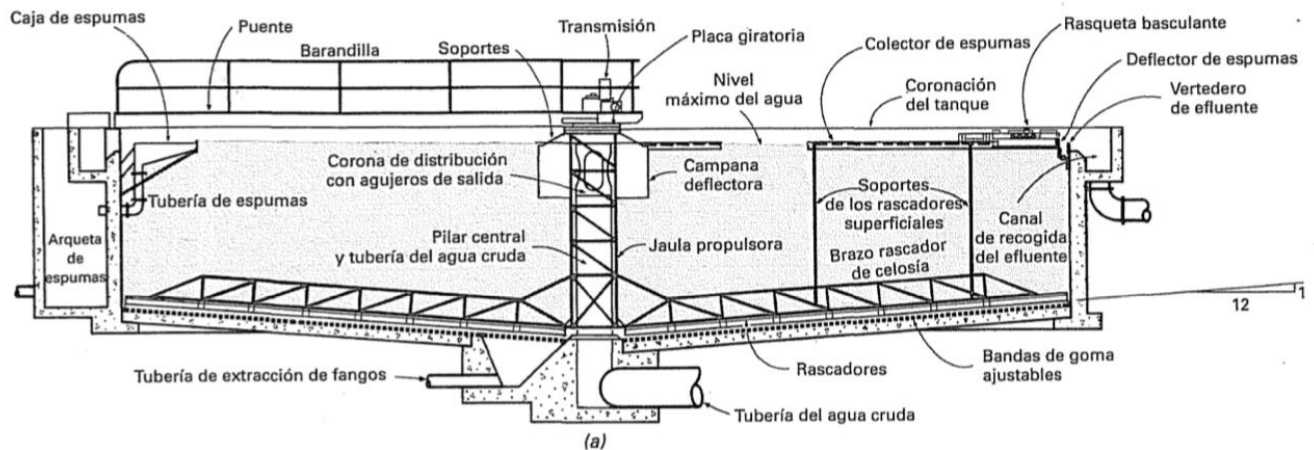


Figura 4.14: Tanque circular de sedimentación primaria con alimentación central [Metcalf y Eddy (1995)]

Los valores adoptados para el diseño fueron tomados de la *Tabla 22.1* incluida por Rojas (2004) donde se especifican estándares de diseño de sedimentadores primarios.

- Carga superficial [m/día] para caudal promedio: 25 m/día
- Carga superficial [m/día] para caudal máximo: 50 m/día
- Profundidad de tanque: 4 m
- Carga sobre el vertedero: 5 L/s.m
- Tiempo de retención: 2 horas
- % de remoción de SS: 50% - 70%
- % de remoción de DBO₅: 35% - 45%

Para un caudal promedio de 1200 m³/h (28800 m³/día) se calcula el área requerida:

$$A = \frac{28800 \frac{m^3}{día}}{25 \frac{m}{día}} = 1152 \text{ m}^2 \quad \text{Ec.4.23}$$

Para un caudal máximo de 1500 m³/h (36000 m³/día) se calcula el área requerida:

$$A = \frac{36000 \frac{m^3}{día}}{50 \frac{m}{día}} = 720 \text{ m}^2$$

Se adopta como área del sedimentador, la mayor área, es decir, 1152 m².

El diámetro del sedimentador será:

$$\varnothing = \sqrt{\frac{4 \cdot 1152}{\pi}} = 38,308 \text{ m} \approx 40 \text{ m} \quad (4.24)$$

Se adopta como profundidad del sedimentador 4 metros y una solera (cono) de altura de 1.75 metros.

Se propone la instalación de 2 sedimentadores circulares, en paralelo, donde el caudal se dividirá entre los dos tanques mediante una arqueta de reparto situada entre ellos, a fin de poder realizar mantenimiento de uno sin necesidad de parada de planta.

La longitud del vertedero perimetral para cada tanque será de:

$$L = \pi \cdot 20 \text{ m} = 62.8 \text{ m} \quad (4.25)$$

La carga de rebose sobre el vertedero que es el caudal por unidad de longitud del vertedero, y se utiliza como criterio de diseño para evitar turbulencias y asegurar una salida uniforme del agua clarificada.

$$CV = \frac{Q \left[\frac{L}{s} \right]}{\text{Perimetro [m]}} = \frac{333.33 \left[\frac{L}{s} \right]}{62.8 [m]} = 5.3 \text{ L/s.m} \quad (4.26)$$

Como la carga calculada es mayor a 5, se recalcula el diámetro del tanque:

Tomo carga superficial de 20 m/día entonces Área de tanque será de 1440 m²

Y por consiguiente el diámetro del tanque $\varnothing = 42.83 \text{ m} \approx 44 \text{ m}$

Ahora recalculando longitud del vertedero, $L = 69.08 \text{ m} \approx 70 \text{ m}$

Por último, la carga de rebose será $CV = 4.7 \text{ L/s.m}$ lo cual es menor a 5 y se comprueba salida sin turbulencias y uniforme.

La eficiencia en remoción de sólidos suspendidos se puede calcular como:

$$E = 0,955 \cdot e^{-\left(\frac{265}{S_0} + 0,0021 \cdot \frac{Q}{A}\right)} \quad (4.27)$$

donde:

- E = eficiencia fraccional del sedimentador primario
- S₀ = sólidos suspendidos en el afluente al equipo [mg/L]
- Q/A = carga superficial [m/día]

Dado que se recibe un promedio de 33 toneladas por día de sólidos suspendidos, equivalentes a:

$$\frac{33.000.000 \frac{mg}{\text{día}}}{86.400 \frac{s}{\text{día}}} = 381.944,44 \text{ mg/s}$$

y considerando un caudal de 333,333 L/s, se obtiene:

$$S_0 = \frac{381.944,44 \frac{mg}{s}}{333,333 \frac{L}{s}} = 1,1458 \text{ mg/L}$$

Sustituyendo en la ecuación 4.27:

$$E = 0,955 \cdot e^{-\left(\frac{265}{S_0} + 0,0021 \cdot \frac{Q}{A}\right)} = 0.7266 \approx 73\%$$

Por lo tanto, el sedimentador primario logra una remoción del 73% de los sólidos suspendidos bajo las condiciones operativas actuales.

En la Tabla 4.3 se muestran las dimensiones y características adoptadas finalmente del tanque sedimentador:

Tabla 4.3: Características del decantador primario diseñado

Numero de tanques	2
Diámetro de tanque	22 m
Altura de tanque	4 m
Altura de solera	1.75 m
Diámetro de campana deflectora	3.3 m
Altura de campana deflectora	2 m
Longitud de vertedero	70 m
Numero de brazos de barredor de fondo	2
Velocidad de barredor	0.03 r/min
% Remoción de SS	73 %
% Remoción de DBO ₅	35% - 45%

4.6 Resultados

Como parte del diagnóstico y mejora del sistema de tratamiento de efluentes, se desarrolló un conjunto de diseños hidráulicos y mecánicos orientados a optimizar cada operación unitaria del proceso: desde el ingreso y medición del caudal hasta la sedimentación. Los resultados obtenidos reflejan la posibilidad de brindar soluciones que no solo responden a necesidades detectadas en planta, sino que aportan ventajas operativas tangibles en términos de eficiencia, mantenimiento y continuidad de operación de la planta.

Mediante el análisis de datos fisicoquímicos relevados en campo se detectaron: presencia de plásticos flotantes y carga de arenas en todo el tratamiento y, a la salida del mismo, una alta concentración de sólidos sedimentables. Esto evidenció deficiencias en la operación de los equipos lo que justificó el diseño e integración de los siguientes componentes:

- Un canal Parshall, dimensionado para medir con precisión el caudal de ingreso, mejorando el control del proceso.
- Una reja automática a cadenas, diseñada para minimizar obstrucciones por residuos sólidos y facilitar el escurrimiento hacia las unidades posteriores.
- Una cañería de lavado hidráulico en el canal de entrada, que impide la sedimentación prematura de arenas antes del ingreso al desarenador.
- Un desarenador horizontal de fácil acceso, operación y mantenimiento, orientado a mejorar la separación de las partículas más densas y proteger equipos aguas abajo.
- Dos tanques clarificadores circulares con ingreso central, que permiten alternancia operativa durante tareas de limpieza o reparación, asegurando continuidad en la decantación de sólidos suspendidos.

Los resultados que se presentan a continuación responden a criterios técnicos de diseño proyectados según condiciones reales de operación, caudales específicos y requisitos estructurales de planta.

CAPITULO 5

ESTIMACION DE COSTOS

5.1 Tratamiento de efluentes en la actualidad

En el contexto actual, el tratamiento de efluentes constituye no solo una exigencia ambiental y legal, sino también un desafío económico para municipios, industrias y operadores sanitarios. Esto porque constituye una inversión estratégica que permite cumplir con la legislación ambiental vigente, proteger los recursos hídricos y evitar sanciones económicas, pero no genera ganancia para la empresa.

Según el Ministerio de Obras Públicas de Argentina (2023), la implementación de plantas de tratamiento en municipios y polos industriales ha demostrado ser una herramienta eficaz para reducir la contaminación hídrica y mejorar la calidad de vida de las comunidades.

La inversión en plantas de tratamiento ha cobrado protagonismo en los últimos años. Por ejemplo, A nivel nacional, el Sistema Riachuelo, considerado la obra de saneamiento más grande de América Latina, implicó una inversión de USD 1.200 millones, financiada por el Banco Mundial, con capacidad para tratar más de 2 millones de m³/día, según detalla AySA (2023) en su presentación institucional del proyecto.

La estimación de costos en proyectos de tratamiento de efluentes debe contemplar no solo la inversión de capital, sino también los costos operativos, de mantenimiento, repuestos, gestión de lodos y monitoreo ambiental. Además, se deben considerar los beneficios indirectos, como la reducción de multas, el cumplimiento normativo y la mejora en la calidad de vida de las comunidades, tal como lo plantea el Banco Mundial (2023) en su evaluación del impacto social y ambiental del Sistema Riachuelo.

5.2 Costos en el tratamiento de efluentes primario

Canal Parshall

La empresa Vassmetal S.R.L. ofrece una solución integral llave en mano para este tipo de canal, con experiencia en obras hidráulicas y fabricación de estructuras a medida. El canal Parshall diseñado cumple con los estándares de medición de caudal en canales abiertos, y su mantenimiento anual es accesible en relación con su vida útil proyectada (20 a 30 años).

Según Vassmetal S.R.L. (2025), la estimación de costos para inversión es de \$42.880.000, este presupuesto incluye diseño hidráulico, fabricación, instalación y puesta en marcha por Vassmetal S.R.L.

Estimación del costo de mantenimiento, también brindada por Vassmetal S.R.L. es de \$25.000 mensuales, el cual incluye limpieza técnica del canal, por lo cual, el costo anual de mantenimiento será de \$300.000.

Por lo tanto, se tiene un costo total estimado de \$43.180.000.

Reja automática a cadenas

- Costo de inversión:

Según el catálogo técnico de WPG SRL (2025), empresa especializada en equipamiento para pretratamiento de efluentes, una reja automática a cadenas con rastrillo, fabricada en acero inoxidable AISI 304 o 316, con 1 m de ancho útil y 2 m de altura total, instalada

directamente sobre un canal abierto preexistente, tiene un presupuesto de inversión estimado en \$ 9.130.000 lo cual incluye fabricación completa del equipo, materiales en acero inoxidable AISI 304 o 316, sistema de accionamiento automático por temporizador, instalación sobre canal existente (sin obra civil adicional) y transporte e montaje en planta.

- Costo de mantenimiento:

Según el catálogo técnico de WPG SRL (2025), el servicio de mantenimiento integral anual para una reja automática a cadenas con rastrillo instalada en canal abierto, fabricada en acero inoxidable AISI 304 o 316, tiene un presupuesto estimado de entre \$240.000 y \$290.000 (mantenimiento integral anual) para la región del NOA

- Costo de operación anual estimada:

Para un motor de 1.5 kW operando 4 horas por día, en un año, y según el cuadro tarifario vigente publicado por EDET S.A. (2025), el costo promedio para usuarios comerciales e industriales en Tucumán ronda los \$75 a \$90 AR/kWh por lo que se estima un costo de \$186.000 por año.

- Costo total estimado (Tabla 5.1):

Tabla 5.1: Costos para reja automática a cadenas

Concepto	Monto (AR\$)
Inversión inicial	\$9.130.000
Mantenimiento anual	\$260.000
Operación	\$186.000
Costo total estimado	\$9.576.000

Cañería para vertido de agua industrial en canal de entrada

En base al diseño realizado de una cañería de acero al carbono de 8" DN, norma ASTM A53/A106, con 120 metros de longitud, 2 codos a 90° y 1 válvula mariposa de 8", con instalación en planta tenemos:

- Costo de inversión:

Según el proveedor Tubos Connect (2025), el precio por metro de caño SCH 40 de 8" es de aproximadamente \$15.444,73 el metro, por lo que el costo total del material sería de \$1.853.368.

Para el costo de los codos de 90° de radio largo para soldar, de acero al carbono estándar (SCH 40), proveedor CB Accesorios para la Industria (2025) tiene un costo de \$311.188

Para el caso de válvula mariposa de 8" tipo wafer, de cuerpo hierro fundido y disco inoxidable, el costo es de \$622.250 según MercadoLibre (2025).

El montaje de cañería (soldadura, alineación, fijación), según los valores publicados por AAIERIC (2025) para trabajos de instalación de cañerías metálicas en superficie, el costo promedio de montaje se estima en \$3.800 por metro lineal, dando un total de \$456.000.

- Costo total estimado (Tabla 5.2):

Tabla 5.2: Costo total estimado para cañería de 8"

Concepto	Monto (AR\$)
Cañería de 8"	\$1.853.368
Codos de 90°	\$311.188

Válvula mariposa de 8"	\$622.250
Montaje	\$456.000
Costo total estimado	\$3.242.806

Desarenado: Desarenador tipo canal horizontal

Para la instalación y mantenimiento de dos desarenadores en paralelo tipo canal horizontal de construcción con hormigón armado, el proveedor que ofrece el servicio integral de obra y mantenimiento es Crear Construcciones y Mantenimientos SRL (2025), esta empresa ofrece servicios de obra civil llave en mano y mantenimiento técnico programado para infraestructura hidráulica. Con un costo total de inversión de \$85.660.000 que incluye excavación, encofrado y hormigonado, instalación de compuertas y canaletas, limpieza técnica, inspección estructural y reparación de juntas, contratos de mantenimiento anual.

Decantación: Dos clarificadores primarios

Para la estimación de costo de inversión, costo de mantenimiento y costo de operación, se recurre a la empresa Taersa S.A.

Taersa es una empresa argentina especializada en el diseño, construcción, provisión de equipos, operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de efluentes industriales y municipales. Ofrece soluciones llave en mano.

Según Taersa (2025), el costo de inversión total estimado es de \$159.800.000 que incluye excavación y fundación, construcción con hormigón armado de tanque circular, mano de obra especializada, puente giratorio mecanizado, sistema de vertedero perimetral.

El costo de mantenimiento mecánico, se lo deja a cargo de la empresa papelera, y el gasto operativo, según EDET, (2025) la tarifa para consumo eléctrico de comercios e industrias es de \$1.800 kW/h, y para un motor de accionamiento del puente barredor del clarificador de 2.2 kW, tenemos un coste anual de \$657.000.

Con un costo total estimado de \$160.457.000.

5.3 Análisis de los costos estimados

Realizando un análisis comparativo de las estimaciones de costes, tenemos la Tabla 5.3:

Tabla 5.3: Comparación de costos de los equipos diseñados

Componente	Costo estimado	Participación relativa (%)
Canal Parshall	\$43.180.000	14%
Reja automática	\$9.576.000	3%
Cañería de conducción	\$3.242.806	1%
Desarenador	\$85.660.000	28%
Dos decantadores circulares	\$160.457.000	52%
Total parcial estimado	\$302.115.806	100%

Los costos estimados en los sistemas de tratamiento de efluentes presentan una distribución heterogénea, en función del rol operativo que cumple cada unidad dentro del proceso hidráulico y sanitario. El peso económico se concentra principalmente en

las unidades de sedimentación, representadas por los dos clarificadores circulares ($\approx 52\%$) y los desarenadores ($\approx 28\%$), debido a su volumen, obra civil especializada y equipamiento electromecánico asociado.

Por su parte, unidades de control de caudal y protección como el canal Parshall ($\approx 14\%$), las rejas automáticas ($\approx 3\%$) y las cañerías de impulsión ($\approx 1\%$) reflejan costos proporcionales a su complejidad técnica y nivel de automatización, aunque su función resulta crítica para preservar el rendimiento global del sistema.

CAPITULO 6

CONCLUSIONES

6.1.1 Canal Parshall

Equipo diseñado: Canal Parshall con garganta de 30,5 cm.

Resultados esperados:

- Medición precisa del caudal instantáneo en condiciones de flujo libre.
- Mejora del control de operación en planta y trazabilidad de cargas contaminantes.
- Posibilidad de automatizar lecturas mediante sensores de nivel.
- Construcción estandarizada y posibilidad de mantenimiento prolongado a lo largo del tiempo de bajo costo.

6.1.2 Reja automática

Equipo diseñado: Reja tipo peine con rastrillo motorizado.

Resultados esperados:

- Remoción continua de residuos flotantes y sólidos plásticos.
- Reducción de obstrucciones en el canal de ingreso.
- Disminución de la necesidad de intervención manual y menor exposición del operador.

6.1.3 Cañería para lavado

Equipo diseñado: Cañería de 8" con válvula mariposa con descarga en canal de entrada

Resultados esperados:

- Evitar sedimentación de sólidos en canal de entrada para bajos caudales
- Disminución de la conductividad eléctrica en el canal de ingreso, por efecto de la dilución provocada por la apertura de la cañería de lavado hidráulico

6.1.4 Desarenador

Equipo diseñado: Canal desarenador tipo horizontal con deflector y caja de recolección.

Resultados esperados:

- Separación eficiente de partículas sedimentables por reducción de velocidad.
- Sistema de extracción simplificado para mantenimiento y operación.
- Reducción de abrasión en equipos posteriores y mejora en la vida útil de cañerías.

6.1.5 Decantador Circulares

Equipos diseñados: Dos clarificadores circulares en paralelo de 22 m de diámetro por 6 m de altura, con ingreso central de líquido efluente.

Resultados esperados:

- Alta eficiencia en la remoción de sólidos suspendidos (SS)
- Capacidad operativa continua: mientras uno funciona, el otro puede ser limpiado
- Mejora en la calidad del efluente decantado para tratamiento secundario

6.2 Conclusiones

Los resultados obtenidos a partir del diseño e integración de nuevos equipos (canal Parshall, reja automática, cañería de lavado, desarenador horizontal y clarificadores circulares) evidencian un salto cualitativo en la eficiencia operativa del sistema de tratamiento primario de efluentes. Estas mejoras responden directamente al objetivo general del trabajo: hacer sostenible el uso del agua en la planta industrial, cumpliendo con las normativas ambientales vigentes y optimizando el rendimiento del sistema desde sus etapas iniciales.

En el plano operativo, la incorporación de estos equipos permite proyectar una planta más flexible y eficiente frente a variaciones de carga contaminante. Estas mejoras permitirán fortalecer el control de caudal, optimizar la remoción de sólidos, reducir el desgaste de infraestructuras y asegurar continuidad en la decantación, todo con bajo requerimiento de mantenimiento cumpliendo los objetivos específicos propuestos.

Desde una mirada centrada en la sostenibilidad ambiental, el rediseño propuesto responde directamente al cumplimiento de metas vinculadas al Objetivo 6 de la ONU: Agua limpia y saneamiento, especialmente en sus apartados 6.3 (mejora de la calidad del agua) y 6.5 (gestión integrada de los recursos hídricos). La implementación de estos equipos contribuirá a disminuir la carga contaminante que ingresa al sistema, evitando acumulación de residuos sólidos y mejorando las condiciones para el tratamiento biológico o la disposición final del efluente.

Además, el impacto positivo trasciende el plano ambiental y técnico ya que se logrará:

- Uso eficiente del agua: al mejorar el control hidráulico y minimizar pérdidas por sedimentación prematura, se potencia la capacidad de reutilización del recurso tratado.
- Beneficio económico: se reducen costos de operación, mantenimiento correctivo y reposición de equipos, promoviendo una gestión más rentable para operadores públicos y privados.
- Aporte social: garantiza condiciones más seguras para los trabajadores, mejora la calidad del efluente descargado, y contribuye al bienestar general de comunidades dependientes de cuerpos receptores.
- Valor para inversores y gobiernos locales: demuestra viabilidad técnica, escalabilidad y alineación con políticas ambientales vigentes, facilitando la búsqueda de financiamiento y cumplimiento normativo.

En conjunto, el presente trabajo propone una solución aplicable y adaptable a distintas escalas, donde la ingeniería se pone al servicio del ambiente, de la eficiencia operativa

y de los principios de desarrollo sostenible y sobre todo busca conservar el recurso más importante para la vida, el agua.

6.3 Perspectiva a futuro

A partir de los resultados obtenidos y los diseños propuestos en este trabajo, se vislumbran múltiples oportunidades de mejora tanto en el proceso interno de la planta como en el enfoque general del tratamiento de efluentes.

Como operación aguas abajo a las mejoras propuestas, se encuentra el tratamiento secundario el cual podría beneficiarse de tecnologías de biorreactores compactos, sistemas modulares y automatización progresiva, que faciliten la operación continua y la adaptación a nuevas exigencias normativas.

En conclusión, el tratamiento de efluentes está transitando hacia un modelo más inteligente, adaptable y sostenible, donde el diseño técnico se convierte en una herramienta estratégica para cuidar el agua, proteger el ambiente y generar valor en múltiples dimensiones.

Referencias

Adler, F. (2022). **El agua en Tucumán: Recursos hídricos superficiales y subterráneos**. Editorial Científica del Norte.

AySA. (2023). *Inicio al proceso de puesta en marcha del Sistema Riachuelo*. https://www.aysa.com.ar/sistema_riachuelo/novedades/inicio_proceso_puesta_marcha_Sistema_Riachuelo Banco Mundial. (2023). *Navega a través de la mega obra de saneamiento del río Matanza Riachuelo*. <https://www.bancomundial.org/es/news/feature/2023/09/25/navega-a-traves-de-la-mega-obra-de-saneamiento-del-rio-matanza-riachuelo>

Banco Mundial. (2023). **Evaluación del impacto social y ambiental del Sistema Riachuelo: Etapa operativa**. AySA. https://aysa.com.ar/media-library/sustentabilidad/banco_mundial/EIA320_Emisario_Riachuelo_Etapa_Operativa.pdf

CB Accesorios para la Industria. (2025). *Codo radio largo 90° standard curva para soldar 8 pulgadas*. MercadoLibre. https://articulo.mercadolibre.com.ar/MLA-1391594166-codo-radio-largo-90-standard-curva-para-soldar-8-pulgadas-_JM

Cesca, M. R. (2020). **Apuntes de clase: Instrumentación industrial de procesos**. Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán. Material no publicado.

Covalada Gavilan, A. P. (2005). *Análisis físico y químico del afluente y efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales de la industria papelera: PROPAL-Planta II*. Universidad del Cauca.

Crear Construcciones y Mantenimientos SRL. (2025). *Servicios de obra civil y mantenimiento hidráulico*. <https://www.bing.com/search?q=Crear%20Construcciones%20y%20Mantenimientos>

Cualla López, R. A. (1995). **Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados**. Escuela Colombiana de Ingeniería.

Cualla, L. (1995). *Tratamiento de aguas residuales industriales*. Editorial Alfa.

Departamento General de Irrigación. (2025, junio 4). *Consumo de agua por sector en Argentina*. https://aguabook.irrigacion.gov.ar/319_0

EDET S.A. (2025). *Cuadro tarifario vigente – Costos del servicio de energía*. <https://www.edetsa.com/info/pwa/institucional/costos-del-servicio>

Falkenmark, M., Lundqvist, J., & Widstrand, C. (1989). *Macro-scale water scarcity requires micro-scale approaches: Aspects of vulnerability in semi-arid development*. *Natural Resources Forum*, 13(4), 258–267.

Goulds Pumps. (2009). **GPM9: Goulds pump manual**. ITT Corporation.

Hach. (2013). **DRB200: Manual del usuario (Edición 2, DOC022.97.80188)**. <https://www.manualslib.es/manual/249285/Hach-Drb-200.html>

Hach. (2017). **Manual del usuario: HQ440d, HQ430d, HQ411d (Edición 4, DOC022.92.80116)**. <https://www.manualslib.es/manual/68151/Hach-Hq440D.html>

- Hach. (2020). *DR6000: Manual del usuario (Edición 5, DOC022.92.90367)*. <https://www.manualslib.es/manual/49281/Hach-Dr-6000.html>
- Hach. (s.f.). *Viales de digestión para DQO, rango bajo – Paquete de 150*. Hach Latinoamérica. <https://latam.hach.com/viales-de-digestion-para-dqo-rango-bajo-paquete-de-150/product?id=54617177288>
- I.C.T, S.L. (s.f.). *WTW – Medición de DBO con sistema OxiTop®*. Instrumentación Científica Técnica. [Fuente consultada].
- Infobae. (2025, mayo 29). *Las provincias argentinas y el agua: identidades, características y oportunidades*. <https://www.infobae.com/opinion/2025/05/29/las-provincias-argentinas-y-el-agua-identidades-caracteristicas-y-oportunidades/>
- Innovación en Ingeniería. (2025, junio 3). *El uso del agua en la industria: Retos en la gestión*. <https://innovacioneningenieria.com/el-uso-del-agua-en-la-industria/>
- Instituto del Agua. (2025, junio 10). *Conductividad en aguas residuales: Guía completa para una gestión efectiva*. <https://institutodelagua.es/aguas-residuales/conductividad-en-aguas-residualesaguas-residuales/>
- Lozano Bravo, J. E. (2005). *Memoria técnica de la implementación del sistema de tratamiento externo de efluentes en Papelera Nacional S.A.* Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)
- MercadoLibre. (2025). *Válvula mariposa 8 pulgadas disco inoxidable*. https://articulo.mercadolibre.com.ar/MLA-1280825616-valvula-mariposa-8-pulgadas-cvolante-disco-inoxidable-_JM
- Metcalf & Eddy. (1995). **Wastewater engineering: Treatment, disposal, and reuse** (4th ed.). McGraw-Hill.
- Ministerio de Obras Públicas de Argentina. (2023). *Diagnóstico y prospectiva del tratamiento de aguas residuales en Argentina*. Dirección Nacional de Agua Potable y Saneamiento. <https://www.argentina.gob.ar/obras-publicas/agua-potable-y-saneamiento/diagnostico-y-prospectiva-del-tratamiento-de-aguas>
- Naciones Unidas. (2025, junio 5). *Agua y saneamiento: Desarrollo Sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>
- Orellana, J. (2005). **Características de los líquidos residuales**. Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario. https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/civil/ing_sanitaria/Ingenieria_Sanitaria_A4_Capitulo_08_Caracteristicas_de_Liquidos_Residuales.pdf
- Organización de las Naciones Unidas. (s.f.). **Objetivo de Desarrollo Sostenible 6: Agua limpia y saneamiento**. Agenda 2030 para América Latina y el Caribe. Recuperado el 19 de agosto de 2025, de <https://agenda2030lac.org/es/ods/6-agua-limpia-y-saneamiento>
- Química Cygnus. (2025, junio 15). *Reducción de DBO y DQO en aguas residuales: Técnicas y beneficios*. <https://quimicacygnus.com/reduccion-de-dbo-y-dqo-en-aguas-residuales-tecnicas-y-beneficios/>
- Ramallo, R. S. (1996). **Introducción a la ingeniería sanitaria: Tratamiento de aguas residuales**. McGraw-Hill.
- Rojas, J. (2004). **Manual de tratamiento de aguas residuales**. Alfaomega.

Scribd. (2025, junio 10). *Influencia del pH en coagulación y floculación*. <https://es.scribd.com/document/668136470/influencia-del-ph-en-coagulacion-y-floculacion>

Taersa S.A. (2025). *Soluciones integrales para el tratamiento y reuso de efluentes*. <https://www.taersa.com/>

Testo. (s.f.). *Manual de instrucciones del instrumento de medición de pH/temperatura Testo 206*. ManualsLib.

Tubos Connect. (2025). *Caño SCH-40 8" N ASTM-A53 E=8.18*. <https://www.tubosconnect.com.ar/tienda-on-line/83-cano-sch-40-8-n-astm-a53-e-8-18>

UNESCO & Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos (WWAP). (2019). *Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2019: No dejar a nadie atrás*. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000367276_spa

Universidad Nacional Autónoma de México. (2025, junio 28). *Unidad 3: Tratamiento de aguas residuales – Diplomado en tratamiento de efluentes*. Campus Virtual UNAM. <https://www.campus-virtual.mineria.unam.mx/Mineria/Diplomados/Tratamiento/Modulo1/Unidad3/index.html#6>

Universidad Nacional del Sur. (s.f.). *Desarenadores – Cuarta sesión técnica*. Departamento de Ingeniería Civil. Recuperado de http://biblioteca.uns.edu.pe/saladocentes/archivoz/publicacionez/cuarta_sesion_desarenadores.pdf 12/07/2025.

Vassmetal S.R.L. (2025). *Canales Parshall: características y materiales*. Recuperado el 19 de agosto de 2025, de <https://vassmetal.com.ar/parshall/>

Vassmetal S.R.L. (2025). *Canales Parshall a medida – Catálogo técnico*. <https://vassmetal.com.ar/parshall/>

Vitaqua. (2025, junio 10). *¿Qué es la conductividad en el agua y cómo afecta al tratamiento de aguas residuales?*. <https://vitaqua.es/que-es-la-conductividad-en-el-agua-y-como-afecta-al-tratamiento-de-aguas-residuales/>

WAMGROUP. (s.f.). *Sistemas SAVECO™ para tratamiento de efluentes líquidos*. Recuperado el 19 de agosto de 2025, de <https://wamgroup.com.ar/es-ES/WAMAR/home>

White, F. M. (2008). *Mecánica de Fluidos* (6ª ed.). McGraw-Hill

WPG SRL. (2025). *Reja automática a cadenas – Catálogo técnico*. <https://wpgsrl.com.ar/soluciones/reja-automatica-a-cadenas/>

ANEXOS

Anexo A

Valores permitidos para el vuelco de efluentes líquidos a cuerpos de agua según Resolución N° 030-SEMA/2009

A continuación, se transcribe el extracto del Anexo I de la Resolución N° 030-SEMA/2009, emitida por la Secretaría de Estado de Medio Ambiente de Tucumán, que establece los parámetros máximos permitidos para el vuelco de efluentes líquidos a cursos de agua:

ANEXO I

NIVELES DE CALIDAD DE LOS EFLUENTES INDUSTRIALES Y CLOACALES.

A) Parámetros generales (Parámetros que deben cumplir todo tipo de efluentes)

Parámetros	Unidad	Límites Para Descargar a :		Consideraciones
		Cuerpo de agua superficial (natural o artificial)	Absorción por suelo ⁽¹⁾	
Temperatura	°C	≤45	≤45	
pH		≥6 y ≤ 9,5	≥6 y ≤ 9,5	En algunas industrias se exigirá control continuo, debiendo indicar tipo de tratamiento
Sólidos Sedimentables 10'	mL/L	≤0,1	≤0,1	
Sólidos Sedimentables 2hs	mL/L	≤1,0	≤5,0	
Sulfuros	mg/L	≤1,0	≤5,0	
Sustancias Solubles en Frío en Éter	mg/L	≤100	≤100	
Oxígeno Disuelto	mg/L	≥2	NE ⁽²⁾	
Demanda Bioquímica de Oxígeno a	mg/L	≤50	≤200	En algunos desagües y drenajes se permitirá expresamente un valor

20°C en 5 días				mayor por tiempo limitado, siempre que no se causen problemas a terceros o cuerpos receptores. Dicho parámetro podrá ser más estricto si pudiera haber influencia en toma de agua potable.
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	≤250	≤500	Idem al anterior
Fenoles	mg/L	≤0,1	≤0,1	

(1) En absorción en suelos debe comprenderse pozos absorbentes, lagunas, riego, etc.

(2) NE, no establecido.

Parámetros	Unidad	Límites para descargar a :		Consideraciones
		Cuerpo de agua superficial (natural o artificial)	Absorción por suelo ⁽¹⁾	
Conductividad a 25°C	μS/cm	≤1000	NE ⁽²⁾	En algunos cuerpos receptores se permitirá valor mayor por tiempo limitado, siempre que no cause daños a terceros. Podrá exigirse control continuo
Sulfato	mg/L	≤ 400	≤1000	Dicho parámetro podrá ser más estricto en aquellos casos de posibilidad de corrosión
Parámetros	Unidad	Límites para descargar a :		Consideraciones
		Cuerpo de agua superficial (natural o artificial)	Absorción por suelo ⁽¹⁾	
S.A.A.M.(Sust. Act. Azul de Metileno)	mg/L	≤ 2	≤ 2	Cerca de toma de agua para bebida, el máximo no podrá ser mayor a 1,0 mg/l
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	≤25	≤75	
Cianuro	mg/L	≤0,1	Ausente	Este parámetro podrá ser

				más estricto, según la afectación a la vida acuática.
Hidrocarburos totales	mg/L	≤5,0	Ausente	
Cloro residual libre	mg/L	≤0,5	≤0,5	
RAS	---	≤ 6	≤ 6	
Fe soluble	mg/L	≤2	≤0,1	
Manganeso	mg/L	≤0,5	≤0,1	Cerca de tomas de agua para bebida el máximo permitido será ≤0,1 mg/L
Cromo VI	mg/L	≤0,05	ausente	Cerca de tomas de agua para bebida el máximo permitido será ≤0,05 mg/L. Este parámetro podrá ser más estricto según la afectación a la vida acuática
Cadmio	mg/L	≤0,1	Ausente	Cerca de tomas de agua para bebida el máximo permitido será ≤0,003
Mercurio	mg/L	≤0,002	Ausente	Podrá ser más estricto según afectación
Aluminio	mg/L	≤5	≤1	
Arsénico total	mg/L	≤0,5	≤0,1	Si hay afectación a aguas subterráneas ≤0,05 mg/L. Cerca de tomas de agua para bebida el máximo permitido es de ≤0,01mg/L
Cinc	mg/L	≤1	≤1	
Níquel	mg/L	≤0,5	≤0,5	
Cobre	mg/L	≤0,3	Ausente	
Bario	mg/L	≤2,0	≤1	
Boro	mg/L	≤2,0	≤1	Cerca de tomas de agua para bebida el máximo permitido será ≤0,03mg/L. Este parámetro podrá ser más estricto según los cultivos irrigados.
Cobalto	mg/L	≤2,0	≤1,0	
Selenio	mg/L	≤0,03	Ausente	
Plomo	mg/L	≤0,5	Ausente	
Plaguicidas org. clorados	mg/L	≤0,05	Ausente	
Plaguicidas órgano fosforados	mg/L	≤0,1	Ausente	
Nitrógeno Total	mg/L	≤10	≤30	(3)
Fósforo Total	mg/L	≤1	≤10	(4)

Estaño	mg/L	≤2	≤0,5	
--------	------	----	------	--

- (1) En absorción en suelos debe comprenderse pozos absorbentes, lagunas, riego, etc.
 (2) NE, no establecido.
 (3), (4) Serán exigidos en las descargas a lagos, lagunas o ambientes favorables a procesos de eutrofización. De ser necesario se fijará la carga total diaria permisible en kg/día de fósforo total y nitrógeno total

C) Parámetros a considerar según uso del cuerpo receptor:

c-1) Cuando las aguas sean destinadas para el riego de hortalizas, vegetales que se ingieren crudos, incluyendo vegetales para ensaladas y raíces se deberá cumplir además de lo especificado en a) con:

Coliformes Fecales	NMP ≤ 10/100mL
Salmonellas	ausentes
Conductividad	≤ 300 μS/cm

c-2) Cuando las aguas del cuerpo receptor sean destinadas para riego, con excepción de hortalizas, se deberá cumplir además de lo especificado en a) con:

Coliformes fecales	≤ NMP 100/100 mL
Salmonellas	ausentes
Conductividad	≤ 1000 μS/cm

c-3) Cuando las aguas del cuerpo receptor sean destinadas para balnearios, deportes acuáticos y en general para contacto humano directo, sólo podrán descargar en él aguas residuales que sean tratadas y que alcancen además de lo especificado en a) con los niveles físicos, químicos y bacteriológicos que se detallan a continuación:

O.D.	≥ 5 mg/L
D.B.O. ₅	≤ 20 mg/L
Compuestos fenólicos	ausentes
Sustancias solubles en éter	ausentes
Coliformes fecales	NMP ≤ 100/100 mL
Salmonella	ausentes

c-4) Cuando las aguas del cuerpo receptor sean destinadas para consumo industrial, además de cumplir con lo especificado en a) se deberá cumplir con:

Dureza	No será superior a la del curso receptor
Conductividad	≤ 1000 μS/cm

Anexo B

Resultados de parámetros fisicoquímicos en planta diarios
(abril 2024)

Dia	Solidos Sedimentables (SS) [mL/L]			pH [unidad de pH]		Conductividad [uS/cm]	
	Entrada a planta	Entrada a Clarificador	Salida de Clarificador	pH Entrada a planta	Descarga a Calimayo	Entrada a planta	Descarga a Calimayo
1-Apr	300	300	0.1	6.3	6.1	881	810
2-Apr	300	300	0.1	6.0	6	984	787
3-Apr	450	350	0.1	7.0	6.6	955	781
4-Apr	400	300	0.1	6.4	6.3	895	679
5-Apr	350	400	0.1	6.2	6.4	803	673
6-Apr	400	400	0.1	5.2	6.5	843	740
7-Apr	400	400	0.1	5.8	6.4	915	684
8-Apr	350	350	0.1	5.8	6.2	1018	790
9-Apr	400	250	0.1	5.2	6.6	1057	900
10-Apr	450	300	0.1	5.4	5.9	1187	782
11-Apr	450	300	0.1	4.7	6.9	1161	627
12-Apr	600	500	0.1	6.7	6.3	1285	506
13-Apr	500	400	0.1	5.6	6.9	1217	711
14-Apr	350	350	0.1	5.1	6.8	1350	672
15-Apr	600	350	0.1	5.2	6.6	1235	305
16-Apr	300	300	0.1	5.9	6.3	1168	716
17-Apr	700	450	0.1	5.9	6.7	1183	719
18-Apr	600	400	0.1	5.7	6.7	1192	858
19-Apr	800	800	50	7.8	6.8	1162	768
20-Apr	600	500	0.1	5.3	6.8	1203	775
21-Apr	650	650	0.1	5.4	6.6	1185	838
22-Apr	650	500	0.1	6.4	6.7	1205	871
23-Apr	600	500	0.1	6.3	6.6	1164	672
24-Apr	900	850	50	8.1	6.8	1152	639
25-Apr	500	500	0.1	5.7	6.3	1028	742
26-Apr	150	150	0.1	6.2	6.6	983	697
27-Apr	100	100	0.1	6.4	6.7	847	659
28-Apr	150	150	0.1	6.6	6.6	813	635
29-Apr	80	80	0.1	6.8	6.9	509	584
30-Apr	60	60	0.1	6.9	6.9	485	572

Tabla B.1: Resultados de ensayos de Solidos sedimentables, pH y Conductividad de abril 2024

Dia	Oxigeno Disuelto (OD) [mg/L]		DQO [mg/L]				DBO [mg/L]	
	OD Entrada a planta	Descarga a Calimayo	Entrada a planta	Entrada a Clarificador	Salida de Clarificador	Descarga a Calimayo	Entrada a planta	Descarga a Calimayo
1-Apr	2.1	4.20						
2-Apr	1.9	3.50						
3-Apr	1.4	5.00	1280	1180	348	118	704	94
4-Apr	1.1	3.70	1104	987	265	139	673	76
5-Apr	2.2	4.20	1490	1401	361	125	849	88
6-Apr	1.9	3.70						
7-Apr	2.0	3.90						
8-Apr	2.1	5.00						
9-Apr	2.3	5.00	1002	822	267	139	561	103
10-Apr	1.8	4.10	1214	987	243	79	704	60
11-Apr	1.5	3.90	1194	795	221	112	919	83
12-Apr	1.4	6.70	1678	1456	352	97	1351	55
13-Apr	1.1	4.40	1499	1348	398	128	1109	91
14-Apr	1.8	4.20						
15-Apr	1.0	4.30	1374	1287	299	67	1072	42
16-Apr	1.7	4.40						
17-Apr	0.9	4.30	1590	1420	408	102	875	77
18-Apr	1.0	4.10	1278	1198	359	117	728	78
19-Apr	0.5	4.30	3017	2879	734	104	1365	66
20-Apr	0.9	5.00	1798	1598	389	99	1350	56
21-Apr	1.2	4.90						
22-Apr	1.1	5.10	1897	1694	587	129	1309	67
23-Apr	1.4	4.60	1587	1621	432	99	1079	72
24-Apr	0.2	4.20	3528	3415	809	118	1759	86
25-Apr	1.6	4.10						
26-Apr	2.4	4.50	459	420	154	131	243	73
27-Apr	2.5	4.20	354	302	90	101	241	81
28-Apr	2.6	4.30						
29-Apr	3.0	5.20						
30-Apr	3.1	5.30						

Tabla B.2: Resultados de ensayos de Oxígeno disuelto, DQO y DBO₅ de abril 2024

Anexo C

Fichas técnicas y especificaciones de equipos utilizados

En el presente anexo se detallan las características técnicas de los equipos mencionados en el capítulo 2, utilizados en el proceso de tratamiento de efluentes industriales.

1) pH Metro Tiesto 206

8. Datos técnicos

Tipo	testo 206-pH1	testo 206-pH2	testo 206-pH3
Parámetros	pH / °C		
Sensor	electrodo de pH / NTC		
Rango de medición	0 a 14 pH / ± 0 a $+60$ °C (brevemente hasta $+80$ °C, máx. 5min)		
Resolución	0.01 pH / 0.1 °C		
Exactitud	± 0.02 pH / ± 0.4 °C		
Compensación de temperatura	Automática	Automática	Según sonda externa
Sonda	Módulo sonda con sonda inmersión	Módulo sonda con sonda penetración	Módulo BNC con entrada conector
Ciclo de medición	2 por segundo		
Temperatura funcionamiento	± 0 a $+60$ °C		
Temperatura almacenamiento	-20 a $+70$ °C		
Alimentación	1 pila botón, tipo CR2032, 3V		
Autonomía	Aprox. 80h		
Carcasa	Instrumento: ABS; TopSafe: PU		
Clase de protección	Con TopSafe: IP 68		
Directriz CE	2004/108/EEC		
Medidas (L x B x H)	110 x 33 x 20 (sin módulo sonda ni TopSafe)		

Fuente: Testo SE & Co. KGaA. (s.f.). *Manual técnico del medidor de pH Testo 206*. Recuperado de <https://www.testo.com/>

2) Hach HQ 440d multi

Especificación	Detalles
Dimensiones	17,48 x 8,59 x 23,5 cm (6,88 x 3,38 x 9,25 pulg.)
Peso	750 g (1,65 lb) sin baterías
Carcasa del medidor	IP54 con tapa de las pilas colocada (hermética al polvo y la pulverización de agua)
Requisitos de alimentación (interna)	Pilas alcalinas AA o pilas de hidruro metálico de níquel recargables (NiMH) (4); duración de las pilas: hasta 200 horas
Requisitos de alimentación (externa)	Adaptador de corriente externa de clase II: 100–240 V CA, entrada de 50/60 Hz; salida de 4,5 a 7,5 V CC (7 VA)
Clase de protección del medidor	Clase I
Temperatura de almacenamiento	-20 a $+60$ °C (-4 a $+140$ °F)
Temperatura de funcionamiento	5 a 45 °C (41 a 113 °F)
Humedad de funcionamiento	90% (sin condensación)
Conector de entrada de 5 pines	Conector M12 para sondas IntelliCAL™
Memoria de datos (interna)	500 resultados
Almacenamiento de datos	Automático en modo Pulsar para analizar y modo Intervalo. Manual en el modo Lectura continua
Exportación de datos	Conexión USB al PC o al dispositivo de almacenamiento USB (limitado a la capacidad del dispositivo de almacenamiento). Transferencia de todo el registro de datos o conforme se toman las lecturas.
Conexiones	USB de tipo A integrado (para dispositivo de memoria flash USB 2.0, impresora y teclado) y USB de tipo B integrado (para PC)
Corrección de temperatura	Apagado, automático y manual (dependiendo del parámetro)
Bloqueo de pantalla de medida	Modo de medición Continua, Intervalo o Pulsar para analizar. Función de promediado para sondas LDO.
Teclado	Conector de teclado de PC externo con adaptador USB/CC

Fuente: Hach Company. (s.f.). *Manual de operación HQ Series: HQ 440d Multi*. Recuperado de <https://www.hach.com/>

3) Espectrofotómetro Hach DR6000

Especificaciones de funcionamiento	
Modo operativo	Transmitancia (%), absorbancia y concentración
Fuente de luz	Lámpara de deuterio (UV) y lámpara halógena (rango visual)
Rango de longitud de onda	190 a 1100 nm
Exactitud de longitud de onda	± 1 nm (rango de longitud de onda 200–900 nm)
Reproducibilidad de longitud de onda	$< 0,1$ nm
Resolución de longitud de onda	$0,1$ nm
Calibración de longitud de onda	Automática
Selección de longitud de onda	Automática, mediante selección de un método
Velocidad de barrido	900 nm/min (en pasos 1-nm)
Ancho de banda espectral	2 nm (1,5–2,9 nm a 656 nm, 1 nm para línea D2)
Rango de medida fotométrico	± 3 Abs (rango de longitud de onda 200–900nm)
Exactitud fotométrica	5 mAbs a 0,0–0,5 Abs < 1 % a 0,50–2,0 Abs a 546 nm
Linealidad fotométrica	$< 0,5$ % a 2 Abs ≤ 1 % a > 2 Abs con vidrio neutro a 546nm
Luz difusa	Solución KI solution a 220 nm $< 3,3$ Abs / $< 0,05$ %
Deriva fotométrica en comparación con mediciones en blanco (30-min de línea de base estable)	190–199 nm $\pm 0,0100$ Abs 200–349 nm $\pm 0,0054$ Abs 350–899 nm $\pm 0,0034$ Abs 900–1100 nm $\pm 0,0100$ Abs
Estabilidad a largo plazo	Punto cero a 546 nm por 10 horas $\leq 0,0034$ Abs
Registro de datos	5000 valores de medida (resultado, fecha, hora, ID de muestra, ID de usuario) 50 barridos, 50 barridos de hora

Programas del usuario	200
Especificaciones físicas y ambientales	
Anchura	500 mm (19,69pulg)
Altura	215 mm (8,46pulg)
Profundidad	460 mm (18,11pulg)
Peso	11 kg (24,25 lb)
Condiciones ambientales	Uso en interiores
Requisitos ambientales de funcionamiento	10–40 °C (50–104 °F), humedad relativa máxima de 80 % (sin formaciones de condensación)
Requisitos ambientales de almacenamiento	–25–60 °C (13–140 °F), humedad relativa máxima de 80 % (sin formaciones de condensación)
Datos técnicos adicionales	
Conexión eléctrica	100–240 V ± 10 %, 50–60 Hz
Consumo eléctrico	150 VA

Especificaciones de funcionamiento	
Fusible	T 2A H; 250 V (2 unidades)
Interfaces	Utilice únicamente un cable blindado con una longitud máxima de 3 m: 2× USB tipo A 1× USB tipo B Use únicamente cables con cubierta (por ejemplo, STP, FTP, S/FTP) con una longitud máxima de 20 m: 1× Ethernet
Clasificación del alojamiento	IP20 con cubierta de compartimiento de cubeta cerrada
Clase de protección	Clase I

*Fuente: Hach Company. (2024). *DR6000 User Manual*. Recuperado de <https://support.hach.com/myhach/s/article/DR6000-User-Manual>*

4) Reactor Hach DRB 200

Especificación	Detalles
Dimensiones	25 x 14,5 x 31 cm (9,8 x 5,7 x 12,2 pulg.)
Peso	Bloque calefactor individual: 2 kg (4,4 lb) Bloque calefactor dual: 2,8 kg (6,17 lb)
Requisitos de alimentación	100 – 240 V, +5%/–15%, 50/60 Hz, Clase de protección I
Entrada de alimentación	Bloque calefactor individual: 115 V: 300 VA; 230 V: 450 VA Bloque calefactor dual: 115 V: 600 VA; 230 V: 900 VA
Temperatura de almacenamiento	–40 a +60 °C (–40 a +140 °F)
Temperatura de funcionamiento	10 a 45 °C (50 a 113 °F)
Humedad de funcionamiento	90% (sin condensación)

Especificación	Detalles
Rango de temperatura	LT 200: de 37 a 150 °C (de 98,6 a 302 °F) DRB 200: de 37 a 165 °C (de 98,6 a 329 °F)
	Temporizador: 0 a 480 minutos
Estabilidad de la temperatura	LT 200: ± 1 °C (± 2 °F) DRB 200: ± 2 °C ($\pm 3,5$ °F)
Tasa de calentamiento	LT 200: de 20 a 148 °C (de 68 a 298 °F) en 10 minutos (a DIN 38409-44) DRB 200: de 20 a 150 °C (de 68 a 302 °F) en 10 minutos
Certificación	CE y cTUVus
Altitud	2000 m
Condiciones ambientales	Uso en interiores
Grado de contaminación	2
Categoría de sobretensión	II
Grado de protección	IP20

Fuente: Hach Company. (2021). *DRB 200 Reactor – Manual del usuario* (Edición 4).
Recuperado de [Manualslib – Hach DRB 200](<https://www.manualslib.com/manual/2039956/Hach-Drb-200.html>)