

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y TEXTIL**



**TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL**

**“IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA DE RELAVES  
MINEROS MEDIANTE PROCESOS DE ULTRAFILTRACIÓN Y ÓSMOSIS INVERSA”**

**PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO QUÍMICO**

ELABORADO POR

JOEL ANGEL FLORES PALACIOS

 [0009-0002-8928-2501](https://orcid.org/0009-0002-8928-2501)

ASESOR

ING. JUAN ANGEL TURRIATE MANRIQUE

 [0009-0007-7189-7889](https://orcid.org/0009-0007-7189-7889)

TOMO I DE I

LIMA – PERÚ

2024

---

Citar/How to cite	(Flores, 2024)
Referencia/Reference	Flores, J. (2024). <i>Implementación de una planta de tratamiento de agua de relaves mineros mediante procesos de ultrafiltración y ósmosis inversa</i> . [Informe de suficiencia profesional, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

---

### ***Dedicatoria***

*A mis padres Higinio y Ambrosia por su amor, apoyo y constancia en todos estos años; A mi hermano Alvaro, su esposa Soledad y a mis sobrinos Sebastián y Flavia por su constante apoyo y a mi Hermano Nilton que siempre estará presente en nuestros corazones.*

## **Agradecimientos**

A Dios y a mis padres.

A la empresa Accuaproduct S.A.C. por la oportunidad de desarrollo profesional a lo largo de estos años de mi vida laboral.

A mi asesor, el Ing. Juan Turriate por su orientación.

## Resumen

En mi experiencia profesional como líder de ejecución de proyecto en el rubro de tratamiento de aguas y efluentes he gestionado la ejecución de proyectos.

Así mismo he supervisado el desarrollo en la ingeniería, organizado el plan de trabajo, supervisado la fabricación de equipos, montaje e instalación mecánico y eléctrico, supervisado la puesta en marcha de sistemas de tratamiento en aguas / efluentes industriales. Uno de los principales objetivos buscados en la gestión de proyectos ha sido realizar la ejecución de manera eficiente en costos, tiempo y alcance, para lo cual ha sido importante realizar un control permanente y aplicar las medidas correctivas, con el fin de evitar desviaciones que hubiesen perjudicado el normal desarrollo del proyecto. En el presente informe se muestra la implementación de una planta de tratamiento de agua de relaves (en adelante PTA relaves). El cual se realizó mediante procesos de ultrafiltración y ósmosis inversa que implicó el seguimiento permanente de las distintas fases desde el desarrollo del diseño, la ingeniería de detalle, la procura de equipamiento hasta la instalación y puesta en marcha considerando las pruebas y ajustes necesarios que permitieron poner en funcionamiento los sistemas y realizar una transferencia adecuada al usuario final.

Se logró la implementación de PTA relaves con una capacidad de 150 m<sup>3</sup>/h y los resultados obtenidos demuestran que es viable lograr una calidad de agua de categoría ECA 3 conforme a la legislación vigente apta para su disposición al medioambiente.

Palabras clave — osmosis inversa, ultrafiltración, tratamiento de agua y efluentes, agua de relave.

## **Abstract**

In my professional experience as a project execution leader in the field of water and effluent treatment, I managed the execution of projects, supervised the development of engineering, organized the work plan, supervised the manufacturing of equipment, assembly and mechanical installation and electrical, supervised the start-up of water treatment plants and industrial effluents. One of the main objectives sought in project management has been to carry out the execution in an efficient manner in terms of costs, time and scope, for which it has been important to carry out permanent control and apply corrective measures, in order to avoid deviations that would have harmed the normal development of the project. This report shows the execution of the implementation project of a tailings water treatment plant through the use of ultrafiltration and reverse osmosis processes that involved permanent monitoring of the different phases from the development of the design, the detailed engineering, the procurement of equipment until installation and commissioning, considering the necessary tests and adjustments that allowed the systems to operate and carry out an adequate transfer to the end user.

The implementation of a tailings dam water treatment plant with a capacity of 150 m<sup>3</sup>/h was achieved and the results obtained demonstrate that it is feasible to achieve ECA category 3 water quality in accordance with current legislation suitable for disposal to the environment.

**Keywords** — reverse osmosis, ultrafiltration, water and effluent treatment, tailings water.

## Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen .....	v
Abstract .....	vi
Introducción.....	xiii
<b>CAPITULO I. DATOS GENERALES DE LA EMPRESA DONDE LABORÓ COMO BACHILLER REALIZANDO TRABAJOS DE SU ESPECIALIDAD .....</b>	<b>1</b>
1.1 Actividad Principal.....	1
1.2 Sector industrial al que pertenece.....	1
1.3 Líneas de productos.....	1
1.3.1 Tratamiento de agua de proceso.....	1
1.3.2 Tratamiento de efluentes.....	2
1.4 Filosofía Administrativa .....	2
1.5 Cultura organizacional.....	5
1.6 Estructura Funcional (Organigrama) .....	5
1.7 Normativa empresarial .....	6
1.8 Principios de Calidad .....	7
1.9 Sistema de Seguridad Industrial.....	7
1.10 Gestión de impactos ambientales .....	8
<b>CAPITULO II. CARGOS Y FUNCIONES DESARROLLADAS COMO BACHILLER.....</b>	<b>9</b>
2.1 Contexto Laboral.....	9
2.2 Descripción de Cargos y Funciones.....	9
2.3 Responsabilidades señaladas en el Manual de Organización y funciones, ROF, TUPA, u otros documentos Normativos de la Empresa .....	9
2.4 Personal a cargo y sus responsabilidades .....	10
2.5 Funciones ejecutivas y/o administrativas .....	10

2.6	Cronograma de actividades realizadas como bachiller.....	13
CAPITULO III.	DESARROLLO DE LA ACTIVIDAD TÉCNICA Y APLICACIÓN PROFESIONAL .....	14
3.1	Contexto Laboral en el Área de trabajo .....	14
3.1.1	Labores y tareas en la implementación de una planta de tratamiento de agua de relaves mineros mediante procesos de ultrafiltración y ósmosis inversa con una capacidad de 150 m <sup>3</sup> /h.....	14
3.1.2	Conocimientos técnicos para el cumplimiento de las tareas, labores y funciones . .....	16
3.1.3	Participación en actividades complementarias .....	19
3.2	Hechos relevantes de la Actividad Técnica .....	20
3.2.1	Descripción de la realidad problemática .....	20
3.2.2	Definición del problema general y secundarios .....	22
3.2.3	Justificación e importancia .....	22
3.2.4	Antecedentes nacionales e internacionales.....	23
3.2.5	Objetivo de la actividad y específicos.....	25
3.3	Marco Conceptual y Teórico de los conocimientos técnicos requeridos .....	25
3.3.1	Conceptos fundamentales.....	25
3.3.2	Características generales del agua .....	25
3.3.3	Importancia del agua en la extracción y procesamiento de minerales.....	34
3.3.4	Principales características del procesamiento de minerales.....	35

3.3.5	Procesos físicos para el tratamiento del agua .....	42
3.3.6	Procesos Químicos para el tratamiento de aguas .....	45
3.3.7	Procesos Biológicos para el tratamiento de aguas .....	46
3.3.8	Tratamientos físicos mediante el empleo de membranas .....	54
3.3.9	Procesos de Microfiltración (MF) y Ultrafiltración (UF) .....	61
3.3.10	Procesos de Nanofiltración (NF) y Ósmosis inversa (RO) .....	81
3.4	Propuesta y Contribuciones de su Formación Profesional .....	101
3.4.1	Objetivo y justificación del uso de las técnicas propuestas.....	101
3.4.2	Cálculos y determinaciones de indicadores de gestión para evaluar y monitorear la propuesta.....	102
3.4.3	Análisis e interpretación de resultados y aportes técnicos de la propuesta de solución .....	109
3.4.4	Evaluación y decisiones tomadas .....	121
3.4.5	Informes presentados como resultado de las actividades realizadas .....	122
CAPITULO IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS E IMPLICANCIAS .....		129
4.1	Contribuciones al desarrollo de la empresa.....	129
4.2	Impacto de la propuesta (Económico, tecnológico, ambiental).....	130
Conclusiones .....		132
Recomendaciones .....		133
Referencias Bibliográficas .....		134
Anexos .....		139

## Lista de Tablas

Tabla 1 Cronograma de trabajos como bachiller .....	13
Tabla 2 Conocimientos técnicos de la especialidad empleados en el desempeño de funciones para cumplimiento de tareas y funciones.....	18
Tabla 3 Componentes químicos típicos que pueden encontrarse en el agua residual y sus efectos .....	33
Tabla 4 Principales procesos biológicos utilizados en el tratamiento de aguas residuales . .....	47
Tabla 5 Eliminación de constituyentes por medio de operaciones y procesos de tratamientos avanzados.....	53
Tabla 6 Proceso de membrana y contaminantes objetivo .....	58
Tabla 7 Características principales de procesos de membranas.....	58
Tabla 8 Pretratamientos necesarios para los sistemas de MF y UF.....	66
Tabla 9 Ventajas y desventajas de la fibra hueca .....	73
Tabla 10_Vventajas y desventajas de las configuraciones tubulares para MF.....	73
Tabla 11_Características de sección de material de membranas MF/UF.....	75
Tabla 12_Factores que influyen en el rendimiento de RO y NF .....	95
Tabla 13_Condiciones de sitio (referenciales) .....	103
Tabla 14_Condiciones de agua a tratar (referenciales).....	103
Tabla 15_Características de sección de material de membranas MF/UF.....	107
Tabla 16_Tabla comparativa de agua tratada (referencial) .....	110

## Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 <i>6_Estructura organizacional de la empresa Accuaproduct S.A.C.</i> .....	6
Figura 2 <i>Diagrama de procedimiento de producción de relaves</i> .....	39
Figura 3 <i>Rangos de tamaños de contaminantes para remoción con membranas</i> .....	55
Figura 4 <i>Nivel de retención de procesos de membranas</i> .....	57
Figura 5 <i>Proceso general referencial de selección de membranas</i> .....	60
Figura 6 <i>Operación de flujo cruzado</i> .....	75
Figura 7 <i>Operación de flujo directo</i> .....	76
Figura 8 <i>Operación de flujo directo con membranas sumergibles</i> .....	76
Figura 9 <i>Diagrama típico de sistema de osmosis inversa</i> .....	83
Figura 10 <i>Sistema típico de sistema de osmosis inversa con nanofiltración</i> .....	88
Figura 11 <i>Esquema de procesos de ósmosis natural (izq.), equilibrio osmótico (centro) y ósmosis inversa (der.)</i> .....	91
Figura 12 <i>Esquema de un elemento de membrana de osmosis inversa</i> .....	92
Figura 13 <i>Esquema de un elemento de membrana de osmosis inversa</i> .....	97
Figura 14 <i>Operación en flujo cruzado</i> .....	98
Figura 15 <i>Configuración de operación en etapas</i> .....	98
Figura 16 <i>Configuración de operación en pasos</i> .....	99
Figura 17 <i>Etapas del proceso de tratamiento seleccionado</i> .....	115
Figura 18 <i>Imágenes referenciales de membranas de ultrafiltración</i> .....	117
Figura 19 <i>Imágenes referenciales de filtros anillas para pre-tratamiento</i> .....	118
Figura 20 <i>Imágenes referenciales de porta-membranas de osmosis inversa</i> .....	119
Figura 21 <i>Imágenes referenciales de membranas de osmosis inversa</i> .....	120
Figura 22 <i>Imágenes referenciales de bombas de alta presión para osmosis inversa</i> ....	121
Figura 23 <i>Cuadro comparativo de valores obtenidos de aceites y grasas</i> .....	111
Figura 24 <i>Cuadro comparativo de valores obtenidos de conductividad</i> .....	112

Figura 25 Cuadro comparativo de valores obtenidos de DBO .....	112
Figura 26 Cuadro comparativo de valores obtenidos de DQO .....	113
Figura 27 Cuadro comparativo de valores obtenidos de sulfatos .....	113
Figura 28 Cuadro comparativo de valores obtenidos de potencial de hidrogeno .....	114
Figura 29 Cuadro comparativo de valores obtenidos de mercurio total .....	114

## Introducción

Una de las principales problemáticas relacionadas a los residuos líquidos obtenidos como parte de la actividad minera, es el adecuado tratamiento de efluentes, esto se debe a la gran dificultad de su tratamiento y al elevado costo que suponen, sin embargo como parte del compromiso ambiental adoptado por las distintas empresas mineras es importante y necesario que puedan realizar los máximos esfuerzos al momento de realizar el tratamiento de dichos residuos para no afectar de forma negativa el medioambiente.

Los residuos líquidos subproductos de la actividad minera, comúnmente llamados “relaves líquidos” se tratan de formas ya determinadas e investigadas por medio de muchos casos de estudios alrededor del mundo por lo que se cuenta con mucha información al respecto, no obstante, las características particulares de cada mina generan un tipo único de composición de sus relaves líquidos lo cual implica que no siempre una tecnología que haya sido ejecutada de forma exitosa en un lugar sea compatible con las características de otro punto. Por ello es importante realizar investigaciones y pruebas piloto antes de definir una adecuada solución para cada caso en particular.

El presente informe se enfoca en resolver la problemática principal de un tipo de relave líquido minero con características particulares y que son aptas para el tratamiento por membranas físicas; es decir que el enfoque principal será realizado en base a un tratamiento terciario por medio de membranas de Ultrafiltración/Osmosis Inversa con el objetivo de obtener un agua producto apta para su descarga en un cuerpo receptor en cumplimiento de la normativa vigente.

Se expone los puntos considerados para implementar una sistema de tratamiento de agua de relaves. El cual se realizará mediante membranas de Ultrafiltración y Osmosis Inversa, así mismo se realiza una descripción general de los principales equipamientos y procesos involucrados, finalmente como resultados obtenidos se comprueba la viabilidad técnica para tratar el agua de relave y se evalúan los principales parámetros que determinan su confiabilidad para disponer el agua tratada en un cuerpo receptor.

# **CAPITULO I. DATOS GENERALES DE LA EMPRESA DONDE LABORÓ COMO BACHILLER REALIZANDO TRABAJOS DE SU ESPECIALIDAD**

## **1.1 Actividad Principal**

La Empresa Accuaproduct S.A.C. (RUC: 20505830319) con dirección: Calle Los Talabarteros N° 161, Urb. El Artesano, Ate – Lima y Central telefónica: 01 436-1400, es una empresa peruana. Que se especializada en el manejo del agua y agua residual a nivel industrial, comercial y residencial (Accuaproduct, 2024).

## **1.2 Sector industrial al que pertenece.**

Industrial - tratamiento de agua y efluentes.

## **1.3 Líneas de productos**

Cuenta con la tecnología, equipamiento y un gran equipo humano capacitado, que les permite desarrollar desde pequeños hasta grandes proyectos para dar soluciones en tratamiento de agua y efluentes a sus clientes (Accuaproduct, 2024).

Realizando todas las etapas requeridas para los proyectos, desde su concepción, ingeniería, construcción, automatización, puesta en marcha, operación y mantenimiento de las plantas de tratamiento de agua (Accuaproduct, 2024).

En general la empresa cuenta con dos grandes grupos de productos:

### **1.3.1 *Tratamiento de agua de proceso***

Productos relacionados con el tratamiento de agua a nivel doméstico, comercial e industrial, así como también en la provisión de equipos para la línea farmacéutica y afines, por ejemplo:

- Filtros multimedia y Materiales filtrantes.
- Filtros de carbón activado tradicionales o esterilizables con vapor.
- Ablandadores, deionizadores y productos afines.
- Filtros pulidores tipo cartucho o bolsa.
- Equipos de ultrafiltración y Filtros lamelares.

- Equipos de ósmosis inversa simple paso o doble, industriales o sanitarios, para agua de mar o salobre.
- Generación e inyección de ozono.
- Sistema de inyección de cloro gas o hipoclorito de sodio líquido.
- Instrumentación y automatismo.
- Bombas dosificadoras.

### **1.3.2 Tratamiento de efluentes**

Productos relacionados con el tratamiento de agua de efluentes domésticos e industriales, por ejemplo:

- Plantas de tratamiento de efluentes domésticos por aireación extendida.
- Plantas de tratamiento de efluentes con otras tecnologías (MBR, SBR, MBBR).
- Plantas de tratamiento de efluentes industriales (oxidación avanzada, etc.).
- Sopladores, mezcladores superficiales y afines.
- Instrumentación y automatismo.
- Filtros prensa, telas para filtro prensa y marco para filtro prensa.
- Filtros tipo tornillo y tamices rotativos.
- Tanques industriales empernados para ecualización.
- Sistemas de flotación por aire disuelto.
- Sistema de rotación para percolador.
- Bombas sumergibles.
- Clarificadores.
- Sistemas de lechada de cal.

## **1.4 Filosofía Administrativa**

- Visión:
  - Ser socios tecnológicos de los clientes en sus soluciones de tratamiento de agua (Accuaproduct, 2024).

- Ser líderes en nuestro mercado demostrando día a día la calidad de nuestros productos cumpliendo los más altos estándares de calidad comparables solo a productos europeos y norteamericanos (Accuaproduct, 2024).
- Ser una empresa en continuo crecimiento de mercado, abarcando todo el Perú y traspasando sus fronteras. Y Ser creadores de valor agregado en nuestro entorno, lo que incluye clientes, empleados, proveedores, socios y nuestra comunidad (Accuaproduct, 2024).
- La visión de Accuaproduct S.A.C. en 5 años, es ser líder a nivel nacional en sistemas de tratamiento de agua y efluentes ofreciendo una solución integral que se identifique con las necesidades del cliente, a través del uso de la más moderna tecnología, desarrollada y aplicada por el capital humano de la empresa y con el objetivo de generar un aporte a la sostenibilidad y mejoramiento de la calidad de vida de las personas y el medio ambiente. Este subcapítulo se le identifica como encabezado de segundo nivel (Accuaproduct, 2024).
- Misión:
  - Ser socios tecnológicos de los clientes en sus soluciones de tratamiento de agua (Accuaproduct, 2024).
  - Ser líderes en nuestro mercado demostrando día a día la calidad de nuestros productos cumpliendo los más altos estándares de calidad comparables solo a productos europeos y norteamericanos (Accuaproduct, 2024).
  - Ser una empresa en continuo crecimiento de mercado, abarcando todo el Perú y traspasando sus fronteras. Y Ser creadores de valor agregado en nuestro entorno, lo que incluye clientes, empleados, proveedores, socios y nuestra comunidad (Accuaproduct, 2024).

- La visión de Accuaproduct S.A.C. en 5 años, es ser líder a nivel nacional en sistemas de tratamiento de agua y efluentes ofreciendo una solución integral que se identifique con las necesidades del cliente, a través del uso de la más moderna tecnología, desarrollada y aplicada por el capital humano de la empresa y con el objetivo de generar un aporte a la sostenibilidad y mejoramiento de la calidad de vida de las personas y el medio ambiente (Accuaproduct, 2024).
- Garantizar soluciones tecnológicas integrales en tratamiento de agua, suministrando equipos con componentes de primera calidad y prestigio internacional (Accuaproduct, 2024).
- Dar soporte a nuestros clientes, brindándoles la mejor solución y un servicio responsable, honesto, rápido, continuo y efectivo (Accuaproduct, 2024).
- Encontrar en conjunto con el cliente la mejor alternativa considerando tecnología y economía (Accuaproduct, 2024).
- La misión de Accuaproduct es ofrecer las mejores alternativas para el tratamiento de agua y efluentes, identificándose con las necesidades específicas del cliente, ofreciendo productos y servicios de alta calidad, con enfoque en la ecoeficiencia y con un desarrollo y soporte técnico de alto nivel, a través de la ingeniería y la aplicación de tecnología de punta, que aseguren la satisfacción del cliente” (Accuaproduct, 2024).
- Valores
  - Liderazgo, Pasión, Compromiso y Orgullo (Accuaproduct, 2024).
- Políticas
  - Accuaproduct cuenta con una Política de gestión integrada (calidad, seguridad, salud en el trabajo y medio ambiente) (Accuaproduct, 2024).
  - Proteger a todos los miembros de la organización en seguridad y salud mediante la prevención de las lesiones, enfermedades e incidentes relacionados con el trabajo (Accuaproduct, 2024).

- Cumplir con la legislación aplicable, normas y otros requisitos en materia de calidad, medio ambiente, seguridad y salud en el trabajo, asumidos por la empresa para establecer medidas necesarias de prevención (Accuaproduct, 2024).
- Garantizar que los trabajadores y sus representantes son consultados y participan activamente del sistema de gestión ambiental, seguridad y salud en el trabajo (Accuaproduct, 2024).
- Implementar y mantener un sistema de mejora continua en los servicios, procesos y procedimiento establecidos en nuestro sistema de gestión de calidad, medio ambiente, seguridad y salud en el trabajo (Accuaproduct, 2024).
- Identificar, evaluar y controlar de forma continua los aspectos e impactos ambientales para prevenir la posible contaminación ambiental ocasionada por las emisiones, residuos y consumo de recursos naturales que generan nuestros procesos (Accuaproduct, 2024).

### **1.5 Cultura organizacional**

Accuaproduct S.A.C. brinda soluciones integrales de ingeniería al sector industrial, comercial y doméstico en sistemas de tratamiento de agua y productos afines (Accuaproduct, 2024).

Para lograrlo, se compromete a Satisfacer los requerimientos de nuestros clientes, entregando equipos de calidad, mediante la optimización en cuanto a la aplicación de tecnología a través de la experiencia acumulada de nuestros profesionales y la experiencia del cliente respecto a la calidad de agua requerida (Accuaproduct, 2024).

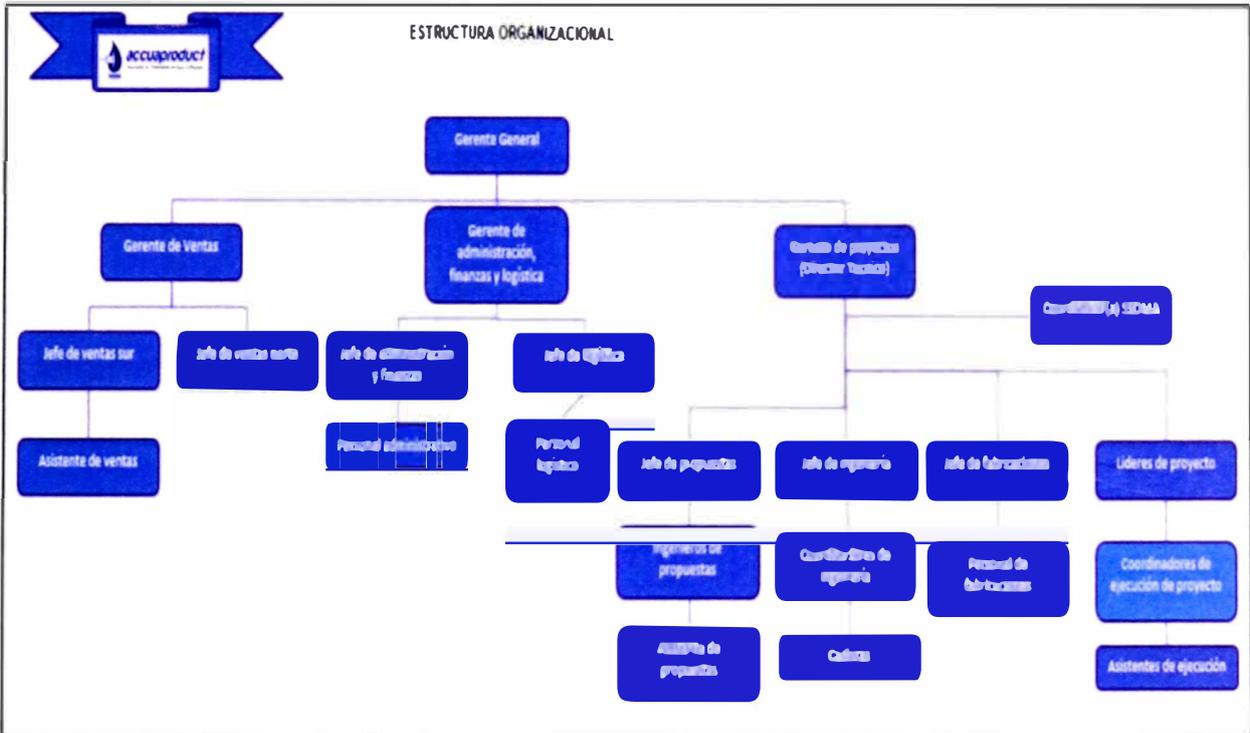
### **1.6 Estructura Funcional (Organigrama)**

En la figura 1. se muestra la estructura organizaciones de la empresa Accuaproduct S.A.C., compuesta por la gerencia de ventas, gerencia de administración y gerencia de proyectos (Accuaproduct, 2024).

En mis funciones como líder y coordinador de ejecución de proyectos mi jefatura se encuentra bajo la dirección de la gerencia de proyectos según lo estipulado en el reglamento interno de trabajo de accuaproduct (RITA).

**Figura 1**

*Estructura organizacional de la empresa Accuaproduct S.A.C.*



*Nota:* fuente "Reglamento Interno de Trabajo de Accuaproduct (RITA)" por Accuaproduct S.A.C.

### 1.7 Normativa empresarial

La normatividad empresarial de Accuaproduct S.A.C. se encuentra descrita en el reglamento interno de trabajo (RITA), establece las normas de comportamiento laboral obligatorio para todos los trabajadores de Accuaproduct, desde el día de su ingreso, independientemente de la ubicación, cargo, categoría o grado jerárquico (Accuaproduct, 2024).

Las normas que contiene el RITA no implican restricciones a la facultad administrativa de Accuaproduct de organizar sus actividades, de fiscalizar el cumplimiento del trabajo y de aplicar las sanciones que correspondan según el principio direccionado (Accuaproduct, 2024).

Sus normas tampoco reemplazan las obligaciones específicas de cada trabajador, por razón del cargo que desempeñe, ni implican variación de las disposiciones legales vigentes (Accuaproduct, 2024).

El propósito esencial de Accuaproduct es lograr la más alta productividad laboral, alentando el desarrollo personal, promoción por méritos, reconocimiento del esfuerzo personal, el perfeccionamiento profesional y técnico, procurando el fortalecimiento de los vínculos entre los trabajadores y Accuaproduct, bajo la mayor armonía laboral, sobre la base de la buena fe y el respeto recíproco en el desarrollo de las relaciones laborales (Accuaproduct, 2024).

Estando comprendidos los trabajadores de Accuaproduct dentro de las normas del ordenamiento legal que regula el régimen de la actividad privada, las modificaciones del reglamento interno de trabajo serán de conocimiento de los trabajadores y de la autoridad administrativa de trabajo (Accuaproduct, 2024).

## **1.8 Principios de Calidad**

La Dirección se asegura de planificar el SGC (Sistema de Gestión de Calidad), cumpliendo los requisitos generales de la Norma ISO 9001:2008 (ISO Standard No. 9001:2008).

Mediante la elaboración del "Manual del sistema de gestión de calidad (ACC-MAN-0001)" y al planificar o implementar cambios, se asegura de mantener su integridad cumpliendo lo descrito en un manual. La planificación de los objetivos de la empresa se describe en "objetivos específicos", en el que se detalla las actividades y las áreas responsables para llevar a cabo los objetivos propuestos.

## **1.9 Sistema de Seguridad Industrial**

Uno de los objetivos principales de Accuaproduct, consiste en promover dentro de sus grupos ocupacionales una cultura de prevención en riesgos laborales que atentan en contra de la integridad física de sus trabajadores. Propiciar el mejoramiento de las condiciones de seguridad y salud en el trabajo mediante el desarrollo de módulos de

capacitación específica en torno a sus propios riesgos ocupacionales (Ley de Seguridad y salud en el trabajo, 2016).

Promover una cultura de seguridad proactiva a fin de evitar o prevenir daños a la salud de los trabajadores como consecuencia de la actividad laboral. Para lo cual ha impartido a todos los trabajadores un reglamento interno de seguridad y salud en el trabajo (RISSTA) cuya aplicación abarcará todas las áreas de la empresa inclusive a toda empresa que preste servicios especiales: contratistas y sub-contratistas que realicen trabajos temporales dentro de Accuaproduct (Accuaproduct, 2024).

#### **1.10 Gestión de impactos ambientales**

La empresa Accuaproduct S.A.C. tiene establecido los procedimientos de seguridad, salud ocupacional y medio ambiente apropiados para la adecuada gestión de los productos químicos; desde el proceso de adquisición, hasta su disposición final (y/o temporal); garantizando su correcta manipulación, almacenamiento y transporte (Accuaproduct, 2024).

El alcance comprende que todos los trabajadores involucrados en la adquisición, manipulación, transporte, almacenamiento y disposición de productos químicos (Accuaproduct, 2024).

En el caso de empresas clientes, si éstas lo requieren, la manipulación de productos químicos se efectuará de acuerdo con sus normas y procedimientos (Accuaproduct, 2024).

También tiene establecido un procedimiento para lograr una gestión adecuada de los residuos tanto peligrosos como no peligrosos, con el fin de prevenir la contaminación del ambiente por efecto de estos y cualquier riesgo en la salud de los trabajadores de la empresa y de las personas en general (Ley de manejo de residuos sólidos, 2000).

## **CAPITULO II. CARGOS Y FUNCIONES DESARROLLADAS COMO BACHILLER**

### **2.1 Contexto Laboral**

El puesto laboral que me ocupo en la empresa Accuaproduct S.A.C. es la de "Líder de Proyectos", organizacionalmente está dentro de la Gerencia Proyectos, bajo la jefatura Ejecución de proyectos, conformando la parte técnica operativa de la empresa, encargando de realizar el nexo entre las áreas internas de la empresa y los diferentes clientes con el fin de canalizar las interacciones necesarias para la ejecución exitosa de un proyecto.

### **2.2 Descripción de Cargos y Funciones**

El cargo desempeñado dentro de la organización es de Líder de proyectos, el cual comprende principalmente la gestión y control de nuevos proyectos. Y cuya principal función es llevar a cabo desarrollo del proyecto cumpliendo con el alcance, tiempo y costo determinados.

### **2.3 Responsabilidades señaladas en el Manual de Organización y funciones, ROF, TUPA, u otros documentos Normativos de la Empresa**

- Seguimiento a todos los requerimientos que se derive de otras áreas.
- Organización de información y manejo de control documentario.
- Dar soporte a personal de ventas y propuestas de proyectos.
- Desarrollo de pilotajes de nuevas tecnologías.
- Realizar la gestión de los proyectos asignados y Realizar la gestión de compras.
- Participar en las reuniones de traspaso de información al inicio de un proyecto con la finalidad de que se cumplan los objetivos y fechas establecidas.
- Coordinar y realizar seguimiento del avance de las diferentes áreas durante el desarrollo y ejecución de los proyectos.
- Liderar proyectos de implementación de planta de tratamiento de agua.

## **2.4 Personal a cargo y sus responsabilidades**

Asistente y/o practicante del área de ejecución de proyectos y coordinación con personal técnico para programación de actividades, durante la instalación y puesta en marcha se coordina la ejecución del proyecto con personal en obra de contratistas que pueden comprender ingenieros, supervisores, técnicos, etc.

## **2.5 Funciones ejecutivas y/o administrativas**

Dirigir reuniones de inicio de proyectos y traspaso de información de nuevos proyectos de PTA (agua industrial) o PTAR (agua residual). En esta actividad se realiza la convocatoria a las distintas áreas involucradas en la ejecución de un nuevo proyecto y se solicita al área de ventas una explicación resumida del alcance general del nuevo suministro y/o servicio. La reunión puede realizarse en forma presencial o por videoconferencia, donde se establecen los acuerdos para el traspaso de información, tiempo de entrega, presupuesto general, acuerdos generales realizados con el cliente final y designación del líder de proyecto y/o coordinador de proyecto. Se establece el acta de traspaso de información.

- Participación en la reunión de inicio de proyecto (KOM) llevada a cabo muchas veces en instalaciones del cliente o por videoconferencia, los principales temas tratados están referidos al alcance general del proyecto, tiempo de entrega, presentación del equipo de trabajo y líderes de proyecto por ambas partes, establecer las pautas principales para el control documentario, actividades de seguimiento de proyecto, acuerdos generales sobre hitos de pago y acta de reunión KOM.
- Elaboración de cronograma de proyecto. Luego de realizadas la reunión de inicio de proyecto con el cliente y reunión de traspaso de información se elabora el cronograma del proyecto teniendo en cuenta los principales tiempos de entrega tanto del diseño de la ingeniería, procura de equipamiento, fabricación, instalación y puesta en marcha de ser requerido. Se estiman los hitos de avance para el control

de la ejecución del proyecto, así como los hitos de pago. El cronograma es revisado y actualizado semanalmente.

- Elaboración del acta de constitución, reuniones KOM, acta de traspaso de información, acta de alcance del proyecto, etc. También incluye la elaboración de la estructura del desglose del trabajo (EDT) que es la base para la elaboración del cronograma del proyecto y revisión de la información transferida.
- Luego de recibido el traspaso de información del área de ventas y diseño de proyectos, se revisa los aspectos principales considerando si es un proyecto de tratamiento de agua o planta de tratamiento de efluentes.
- Revisión del diseño, tecnología a usar, alcance de suministro, procura, aspectos generales a tener en cuenta para la instalación y puesta en marcha, etc.
- Gestión de compras: comprende la elaboración del cronograma de compra de equipamientos y suministros de los principales equipos de la ruta crítica considerando los costos, presupuesto, tiempo de entrega, penalidades y contingencias propias de cada producto.
- Gestión de recursos: el cronograma del proyecto es elaborado en coordinación con las áreas de ingeniería, fabricaciones, ejecución de proyectos y la alta gerencia por lo que la asignación de recursos también es evaluado y definido al inicio del proyecto, teniendo en cuenta disponibilidad de personal y/o necesidad de nuevos elementos
- Organizar y/o participar en reuniones de seguimiento de proyectos para revisar avances con clientes, áreas internas involucradas y alta gerencia.
- Gestión de costos: durante la ejecución del proyecto se realiza la evaluación de los costos y el presupuesto del proyecto para verificar el desempeño del proyecto.
- Elaboración de informes semanales, quincenales y mensuales: según sea lo acordado con el cliente se elaboran los informes de avance del proyecto con el fin de informar a los interesados y evaluar la necesidad de ajustes.

- Revisión de planos de instalación, revisión de ingeniería de detalle, verificación de compra de materiales de instalación y despacho.
- Coordinaciones con área de seguridad industrial para evaluación de requisitos y permisos de personal en campo como exámenes médicos, charlas de seguridad, procedimientos escritos de trabajo, AST, entre otros.
- Visitas técnicas, visitas de seguimiento y supervisión de instalación y puesta en marcha en instalaciones del cliente.
- Cotización de equipamientos, servicios e ingeniería. Se realiza la elaboración de la propuesta técnica - económica en base a los requerimientos del cliente.
- Evaluación de sistemas de tratamiento de agua teniendo en cuenta tipo de agua a tratar y tecnología más apropiada, así como tiempos de entrega y posición geográfica final donde se ubicará el equipo.
- Elaboración de información técnica de procesos, diagramas de flujo, verificación de .tajeo en diagramas PID, manuales de operación y mantenimiento y dossier.
- Supervisión de trabajos de comisionamiento, puesta en marcha y operación de PTA (agua industrial) o PTAR (agua residual).

## 2.6 Cronograma de actividades realizadas como bachiller

En la tabla 1 se indican cronológicamente las actividades realizadas durante la etapa de bachiller.

**Tabla 1**

### *Cronograma de trabajos como bachiller*

Empresa	Actividad Desarrollada	Periodo	
		Desde	Hasta
ACCUAPRODUCT S.A.C.	Asistente de ventas/proyectos	16 junio 2014	01 enero 2016
	Coordinador de proyecto PTARI Antamina 30 m3/h y PTAR Minsur 72 m3/d	01 enero 2016	15 marzo 2017
	Gestión de proyecto PTARI Taris-Repsol 40 m3/h y PTARI Pepsico 12 m3/h	16 marzo 2017	10 mayo 2018
	Gestión de proyecto PTARI UF/RO para Antapaccay 1280 m3/h	11 mayo 2018	01 enero 2020
	Gestión de ejecución PTAP 80 m3/h Veolia	01 enero 2020	15 marzo 2020
	Gestión de Ejecución PTA 34 m3/h Enel	01 enero 2021	30 junio 2021
	Gestión de Ejecución PTA 30 m3/h para Bebidas bolivianas S.A.	01 Julio 2021	01 enero 2022
	Pilotaje PTA 2.5 m3/h U.O. Inmaculada – Minera Ares	01 enero 2022	30 abril 2022
	Gestión de Ejecución PTA 35 m3/h para Buenaventura - San Gabriel	01 mayo 2022	01 enero 2023
	Planta de tratamiento de efluentes PTARI UF/RO Ptl Andina S.A. de Bolivia	01 enero 2023	31 octubre 2023
	Sistema cuaternario 60 m3/h Arca Continental Lindley S.A.	01 agost 2023	Actualidad

Nota: Tabla adaptada de "La Orden de Compra N° M643400001" por Accuaproduct S. A. C.

## **CAPITULO III. DESARROLLO DE LA ACTIVIDAD TÉCNICA Y ACTIVIDAD PROFESIONAL**

### **3.1 Contexto Laboral en el Área de trabajo**

#### **3.1.1 *Labores y tareas en la implementación de una planta de tratamiento de agua de relaves mineros mediante procesos de ultrafiltración y ósmosis inversa con una capacidad de 150 m<sup>3</sup>/h***

La actividad comprendió el desarrollo de la ingeniería de detalle, adquisición de equipamiento, ejecución de la fabricación, monitores y control, instalación y puesta en marcha de una PTA de relaves mediante sistemas de ultrafiltración y ósmosis inversa para tratar una capacidad total de 150 m<sup>3</sup>/h para una empresa minera.

El principal objetivo de la actividad comprendió el suministro e implementación de una PTA de relaves con una capacidad de 150 m<sup>3</sup>/h, incluyendo la instalación y puesta en marcha para su adecuado funcionamiento.

La gestión del proyecto abarcó el desarrollo de ingeniería de detalle de las disciplinas de procesos, mecánica, eléctrica, estructural, piping y civil.

La Procura de equipos de ultrafiltración y ósmosis inversa, supervisión de montaje, supervisión de comisionamiento, supervisión de puesta en marcha e inicio de operación. El periodo donde se realizó la actividad fue desde marzo de 2018 a diciembre de 2019. Durante el proyecto fue implementado un sistema de tratamiento de agua de relaves mineros con el objetivo de obtener un agua producto acondicionado para emplearlo nuevamente en el proceso, riego de áreas verdes, riego de carreteras y/o vertimiento a un cuerpo receptor cumpliendo la legislación vigente para dichos casos. Para la ejecución del proyecto se empleó un sistema de ósmosis inversa en base a diversos estudios y experiencia de Accuaproduct, que respaldan su efectividad al momento de separar los sólidos disueltos en el agua sin embargo por las características propias del agua de relave fue considerado la implementación de un sistema de filtración y ultrafiltración previo al ingreso de los equipos de ósmosis como pre-tratamiento para garantizar que la mayor

cantidad de partículas grandes y suspendidas sean retirados y no afecten el desempeño de la ósmosis inversa. La empresa minera es una empresa social y ambientalmente responsable por lo que ha optado por tratar el agua de la relavera para su adecuada disposición mediante la tecnología descrita anteriormente.

La etapa de ingeniería implicó realizar el control documentario mediante la transferencia de información entre las distintas áreas de la compañía y el departamento de ingeniería del cliente, así mismo la actividad contemplaba la correcta canalización de las observaciones de los documentos de ingeniería a los responsables de las distintas disciplinas, otro aspecto a desarrollar comprendía la revisión final de los documentos y planos emitidos durante la ingeniería de detalle antes de su envío al cliente y la participación en la elaboración de documentos de la disciplina de procesos como fichas técnicas, memoria descriptiva, diagrama de flujo, listas de válvulas, lista de líneas, hojas de datos, manual de operación y diagrama PID.

Luego de finalizada la etapa de ingeniería, el área de ejecución de proyectos procedió con la adquisición del equipamiento, el área de fabricaciones inició la fabricación de los sistemas de ultrafiltración y ósmosis inversa, durante la segunda etapa se encargaron del envío las solicitudes de compras locales e importaciones, tomando contacto y coordinando con los principales proveedores locales e internacionales para que el área de logística pueda obtener los productos con un adecuado tiempo de entrega mediante la colocación de la Orden de compra respectiva. La etapa de monitoreo y control contempló el seguimiento al estatus de compras locales e importaciones con el objetivo de evitar retrasos en los tiempos de entrega o en su defecto la búsqueda de alternativas para contrarrestar algunas desviaciones.

Con la llegada de los componentes, el área de fabricaciones inició el proceso de ensamble en los talleres de la empresa, durante esta etapa en primer lugar realizaron las verificaciones técnicas de los equipos como parte de la inspección de calidad, en segundo lugar, el área de gestión de proyectos realizó visitas periódicas al taller de fabricaciones para verificar que el ensamble cumpla con lo indicado en los planos de ingeniería. Las

inconformidades fueron reportadas a la gerencia y jefatura correspondiente para la corrección de estas. Como último paso de esta etapa realizaron la inspección final y aceptación de las pruebas hidráulicas antes del despacho del equipo hacia instalaciones del cliente.

La siguiente etapa del proyecto contempló la instalación de los equipos suministrados para lo cual realizaron coordinaciones con empresas subcontratistas dentro de mina para la realización de los trabajos; posteriormente se inició el comisionamiento y puesta en marcha donde se realizó la dirección del equipo técnico para la puesta en operación de los sistemas de ultrafiltración y ósmosis inversa, también fueron realizadas coordinaciones con operadores de la empresa minera para iniciar las pruebas así como el seguimiento posterior de la operación para verificación del adecuado funcionamiento de los equipos. Durante la etapa de comisionamiento fueron verificadas las señales eléctricas de cada equipo antes de su encendido, luego se realizan las pruebas sin carga y con carga para obtener el punto de operación óptimo.

### **3.1.2 Conocimientos técnicos para el cumplimiento de las tareas, labores y funciones**

Para la realización del cumplimiento óptimo de las funciones como coordinador de ejecución de proyectos, se requirieron de los conocimientos adquiridos en la facultad de ingeniería química, empleando principalmente los conocimientos de cursos como tratamiento de aguas y efluentes, transferencia de masa, Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOU), instrumentación y control, economía de las empresas, balance de masa, entre otros. Otras capacitaciones en cursos como gestión de proyectos, tratamiento de agua y efluentes, seguridad y salud ocupacional, elaboración de expedientes técnicos, cursos sobre precomisionamiento, comisionamiento y puesta en marcha de proyectos industriales y participando en charlas de proveedores especializados.

Estos conocimientos permiten elaborar los procedimientos de trabajos para las diversas disciplinas que permitan prevenir y/o eliminar problemas de diseño y construcción identificándolos de manera oportuna.

Entre los principales conocimientos adquiridos durante la etapa de pregrado y en cursos de especialización llevados posteriormente. que han sido empleados para realizar la actividad profesional, tenemos los siguientes conceptos:

- **Conocimientos en tratamiento de agua y efluentes:** Comprende el conjunto de operaciones unitarias de tipo fisicoquímico y/o biológico que tiene por propósito la reducción o eliminación de contaminantes o de características no deseables de las aguas, ya sean naturales, de proceso o residuales (DISEPROSA, 2010).
- **Principios de transferencia de masa:** Comprende el grupo de operaciones para la separación de componentes de mezclas está basado en la transferencia de materia desde una fase homogénea a otra (McCabe, 1991).
- **Principios en balance de materia:** Aplicación práctica de la "ley de conservación de la materia", lo cual indica que toda masa que entra a un sistema sale y/o acumula, conceptos comúnmente aplicados en la ingeniería de procesos (McCabe, 1991).
- **Diseño de plantas:** Consecución de las habilidades y conocimientos necesarios para realizar la ingeniería de detalle de partes de un proceso químico.
- **Instrumentación de control y automatización de procesos:** Conjunto de factores que permiten asegurar, mejorar y monitorear los procesos industriales. Comprende la tecnología del uso de instrumentos para medición para medir y controlar las propiedades físicas y químicas de los materiales (Enríquez, 2000)
- **Economía de procesos químicos:** Nos permite evaluar económicamente cualquier alternativa de inversión que se pueda presentar en los procesos químicos (Happel & Jordan, 1981).
- **Seguridad e Higiene industrial:** Disciplina que trata de prevenir las lesiones y las enfermedades causadas por las condiciones de trabajo, además de la protección y promoción de la salud de los empleados (González Acedo & Pérez Aroca, 2021).

- **Conocimientos en precomisionamiento, comisionamiento y puesta en marcha de proyectos industriales:** Como parte de un adecuado procedimiento de buenas prácticas, durante la puesta en operación de sistemas industriales se consideran procedimientos que permitan evaluar su funcionalidad e idoneidad antes de realizar las pruebas con carga, en ese sentido los conocimientos de precomisionamiento y comisionamiento tomar gran relevancia para prevenir fallas y/o disconformidades entre la información plasmada en la ingeniería y el producto terminado recibido.
- **Gestión de proyectos:** La evolución de la complejidad de los proyectos ha derivado en la implementación de nuevas metodologías que en base a buenas prácticas y lecciones aprendidas otorgan lineamientos generales para lograr el éxito de un proyecto, metodologías como el enfoque del PMI mediante su guía PMBOK ha permitido estandarizar procedimiento en la ejecución de proyectos que ha permitido mejorar la eficiencia y probabilidad al momento de realizar un proyecto, entendiéndose proyecto como “un esfuerzo temporal que se lleva a cabo para crear un producto, servicio o resultado único” (Guía PMBOK 6ta ed, 2017, p. 4).

Como se puede observar en la tabla 2 se indican los principales cursos empleados en la actividad profesional que fueron cursados en la facultad de ingeniería química.

**Tabla 2**

*Conocimientos técnicos de la especialidad empleados en el desempeño de funciones para cumplimiento de tareas y funciones*

Cita parentética	Cita narrativa
Tratamiento de agua Industrial	PI355
Tratamiento de efluentes	PI826
Transferencia de Masa	PI144
Balance de materia y energía	PI111
Diseño de Plantas	PI525
Instrumentación y control	PI415
Operaciones en Ing. Química	PI146
Economía Procesos Químicos	P510
Higiene y Seguridad industrial	SA633

*Nota:* Elaboración propia

### **3.1.3 Participación en actividades complementarias**

- **Actividades de investigación o innovación realizada como bachiller**
  - Participé como apoyo en equipos piloto y en nuevas tecnologías.
  - Participé en la elaboración de formatos de protocolos para puesta en marcha.
  - Participé en la elaboración de manuales estandarizados para sistemas de ultrafiltración y ósmosis inversa.
  - Participé en el desarrollo de la ingeniería de prefactibilidad, ingeniería de factibilidad, ingeniería básica e ingeniería de detalle.
  
- **Participación en grupos de seguridad industrial y medioambiente**
  - Participé como integrante de la brigada contra incendios de la empresa Accuaproduct.
  - En esta actividad me he desempeñado como parte de la brigada contra incendios siendo participe de capacitaciones en uso de extintores, primeros auxiliar y trabajos en caliente
  - Participé en charlas de seguridad industrial (SSOMA) en trabajos de alto riesgo
  - Participé en charla de seguridad en trabajos de alto riesgo impartidas dentro de las instalaciones del cliente, así como por empresas externas acreditadas; entre las principales charlas recibidas he participado en trabajos de espacio confinado, riesgo eléctrico, bloqueo LOTO, trabajos en altura y rescate. Así mismo he realizado la programación de charlas de seguridad y habilitación del personal operativo para realizar trabajos de instalación y PEM.
  - Como parte de mis funciones también me ha correspondido la elaboración de documentos de seguridad y salud ocupacional como IPER, matriz de riesgos, PET procedimientos escritos de trabajos y ATS. Para lo cual he

requerido explicar el detalle de las actividades a realizar durante la instalación y sustentar ante el área SSOMA del cliente. También he requerido conocer la normativa vigente de trabajo, así como la gestión de residuos. Como parte de mis funciones también me correspondía gestionar la habilitación de nuestro personal operativo para la realización de los trabajos de ejecución en las diferentes instalaciones de nuestros clientes, lo cual implicaba cumplir con la presentación solicitada por cada cliente que comúnmente comprenden requisitos laborales, requisitos médicos y requisitos de seguridad industrial.

- **Actividades de representación de la empresa**
  - Participé como expositor en ferias de agua.
  - Participé como expositor de la empresa ante los distintos clientes.
- **Otras actividades complementarias**
  - Participé en actividades de carácter social realizados por la empresa.

## **3.2 Hechos relevantes de la Actividad Técnica**

### **3.2.1 Descripción de la realidad problemática**

El manejo de los relaves mineros a nivel mundial es un tema de mucha importancia y de gran repercusión en la vida de la población, flora y fauna que interactúan con el medioambiente, se conocen muchos casos que debido a la precariedad del diseño de retención de los relaves o por falta de mantenimiento han colapsado y afectado de manera irremediable al medioambiente y a los seres vivos que habitan la zona de impacto (Rodríguez & García-Cortés, 2006).

El relave minero como tal es único debido a que cada mina es diferente y genera un efluente particular que es producto de su proceso y tiene propiedades únicas.

Existen iniciativas importantes a nivel mundial como el "estándar de tratamiento de relaves" que desarrollan a detalles los principales requisitos y criterios necesarios para un adecuado tratamiento de relaves mineros.

El Perú es un país que tiene a la minería como uno de sus principales motores de crecimiento; abarcando tanto la pequeña, mediana y gran minería, y siendo esta última además un factor muy importante en el crecimiento económico del país (Adrianzen, 2023). Sin embargo, es conocido el efecto negativo que han producido la minería a lo largo de los años en nuestro ecosistema debido a la contaminación ambiental producto de los desechos generados propios de la actividad minera siendo uno de ellos los relaves mineros que se producen constantemente y que han venido regulándose principalmente en la gran minería formando para tales casos reservorios o lagunas artificiales específicamente para albergar los relaves productos del proceso minero; pero al transcurrir los años las relaveras van alcanzando su capacidad máxima y es necesario evaluar alternativas que permitan ir reduciendo el nivel superficial e ir buscando alternativas para aprovechar las aguas de los relaves (teniendo en cuenta que un alto porcentaje de los relaves mineros es agua), ya sea para su reutilización como agua de proceso, agua de riego de carretera, para riego de vegetales o bebida de animales.

Para que esto sea posible es necesario realizar un adecuado tratamiento de las aguas y alcanzar los requisitos necesarios establecidos por la ley cuyo cumplimiento es exigible legalmente por el ministerio del ambiente, y los organismos que conforman el sistema de gestión ambiental como es indicado en el decreto supremo DS 010-2010-MINAM en el caso de Perú; donde se establecen los límites máximos permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero metalúrgicas y que al ser excedida causa o puede causar daños a la salud, al bienestar humano y al ambiente (Ministerio del Ambiente, Decreto Supremo 010-2010, Artículo 1).

Por tales motivos las mineras en el Perú se encuentran en la necesidad de invertir en la implementación de sistemas de tratamiento de agua de relave para reducir los niveles de efluentes alcanzados actualmente o a futura en sus relaveras y así evitar que estas se vean sobrepasadas en su capacidad y la mina se encuentre en la necesidad de paralizar sus actividades (Metcalf & Eddy, Inc., 1995).

Así mismo es importante conocer y evaluar alternativas de tratamientos para estos relaves tanto de la parte sólida como de la parte líquida, sin embargo, es propósito del presente informe específicamente explicar el tipo de proceso utilizado en mi experiencia profesional para el tratamiento de la parte líquida del tipo de relave proveniente de una minera que procesa principalmente Cobre.

### **3.2.2 Definición del problema general y secundarios**

Problema general del presente caso de estudio contempla la necesidad de realizar el tratamiento de agua de relaves de la minera Antapaccay ubicada en el distrito de Espinar en Cuzco, donde la actividad minera forma parte del desarrollo del pueblo de Espinar y por sus características inherentes la afecta de manera positiva mediante el desarrollo económico sin embargo no deja de ser un peligro latente dependiendo del buen mantenimiento de la relavera de la mina que ante una eventual catástrofe podría contaminar de manera irremediable tanto el suelo de la zona, como el agua del Río Salado por estar en la zona de influencia. Es debido a este motivo que como parte de los compromisos asumidos en el EIA de la minera busca reducir de manera progresiva el nivel del agua de relave minero empleando las tecnologías adecuadas para lograr un tratamiento que permita devolver el agua tratada hacia el medio ambiente (SENACE, 2019, p. 172).

Como principales problemas secundarios se identifican la necesidad de verificar la viabilidad del proyecto de implementación de PTA de relaves mineros mediante las tecnologías de Ultrafiltración/Ósmosis Inversa y establecer los lineamientos necesarios para la ejecución, control y seguimiento adecuado del desarrollo del proyecto.

### **3.2.3 Justificación e importancia**

Teniendo como premisa que los relaves mineros se generan desde los inicios de la extracción de minerales en sus diferentes tipos de procesos, se determina que con el pasar del tiempo y evidenciando los grandes efectos negativos que estos desechos producen en el medioambiente, las exigencias para el tratamiento de estos relaves han venido incrementándose por lo que actualmente son almacenados de manera obligatoria en

relaveras y deben ser tratadas antes de su disposición de la parte sólida o de la descarga de la parte líquida a algún cuerpo receptor, reúso en el proceso, riego de áreas verdes y/o riego de carreteras en el caso de dicha parte acuosa, regulados por las normativas de cada país. Así mismo, la evolución de las tecnologías de tratamiento de agua y efluentes ha permitido implementar diferentes casos de éxito alrededor del Perú y del mundo, lo cual ha permitido analizar diferentes alternativas disponibles en el mercado que puedan implementarse a más casos y que sean viablemente económicos.

La implementación de una solución en el tratamiento de agua de relave no solo permite cumplir con la normativa legal establecida en el país para evitar algún tipo de multa, sino que permite retornar un agua de características adecuadas a un cuerpo receptor, previniendo un posible desastre ambiental y ayudando con el equilibrio del ecosistema.

#### **3.2.4 Antecedentes nacionales e internacionales**

En el mundo se conocen caso como Córrego do Feijões (Brasil, enero 2019) donde se produjo una rotura de presa de relaves que inundó zonas aledañas y causó un gran daño ambiental por los componentes tóxicos que contienen dichos relaves, estos eventos denotan la gran importancia que deben tener las mineras para el adecuado tratamiento de los relaves.

“El tratamiento de los relaves mineros en el Perú es motivo de grandes controversias y es generadora de una imagen negativa por los impactos ambientales que conllevan a una contaminación sistemática del agua o del subsuelo” (Villena-Chávez, 2018).

Respecto a la minería, es evidente que esta actividad se vincula directamente con el agua. La minería subterránea genera flujos de agua superficial por bocamina y cuadros de acceso y extracción mineral. Las operaciones mineras a cielo abierto remueven grandes cantidades de tierra generando lagunas de agua de diferentes características, según la metalogénesis y las condiciones hidrogeológicas. En el caso del procesamiento de minerales en la denominada “minería chica” la cantidad de agua utilizada es proporcional a la cantidad de mineral tratado por gravimetría, flotación o lixiviación. Actualmente existen

métodos de recuperación de aguas, pero son poco aplicados en la pequeña minería pues hay un manejo deficiente de los residuos sólidos" (Velasco, M. 2008).

Debido a los métodos más empleados en la industria minera en el mundo comúnmente se generan residuos líquidos de bajo PH y con componentes tóxicos para el medioambiente como el cobre (Cu), hierro (Fe), sulfatos (SO<sub>4</sub>) entre otros, estos residuos líquidos son denominados aguas ácidas debido al PH bajo que poseen y según Talaverano (2014) estos residuos son tratados generalmente mediante la neutralización, existen diversos estudios relacionados al uso de compuestos básicos como la cal y la soda caustica.

A nivel mundial existen distintos estudios referidos al tratamiento de relaves mineros como por ejemplo en 2016 Stephen Chesters, en su trabajo de investigación "Membranas y agua de mina: residuos o flujo de ingresos" explica que: las tecnologías de membranas son capaces de tratar las aguas residuales de mina y hacen hincapié sobre las minas que pueden ser potencialmente tratadas mediante tecnologías de nanofiltración (NF) y osmosis inversa (RO), muchas de estas corresponden a minas de oro y cobre. En este mismo estudio se identifican unas 363 minas a nivel mundial con potencial para utilizar tecnologías de tratamiento de agua basadas en membranas.

En el Perú se han presentado casos diversos que buscan tratar el agua de relaves y ha habido esfuerzos de usar tecnologías de membranas como en el caso de Yanacocha norte donde se emplearon en conjunto sistemas de ultrafiltración y osmosis inversa. En 2015 Rocio Gamarra, en su tesis de maestría "Eficacia de la tecnología de membranas para convertir efluentes mineros, en agua para riego" nos explica el caso exitoso de uso de tecnologías de membranas en un efluente del proceso de extracción de una minera de oro como lo es Yanacocha, obteniendo resultados sobresalientes en la remoción de contaminantes y obtención de agua para riego.

### **3.2.5 *Objetivo de la actividad y específicos***

El principal objetivo de la actividad fue gestionar el proyecto correspondiente a la fabricación, instalación y PEM de una PTA de relaves con una capacidad aproximada de 150 m<sup>3</sup>/h.

### **3.3 *Marco Conceptual y Teórico de los conocimientos técnicos requeridos***

A continuación, se indican los principales conocimientos técnicos y fundamentos aplicados en la actividad realizada.

#### **3.3.1 *Conceptos fundamentales***

- Límite máximo permisible (LMP): es la medida de la concentración o del grado del elemento, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, que caracterizan al efluente líquido de actividades minero-metalúrgico (Ministerio del Ambiente, Decreto Supremo 010-2010, Artículo 3).
- Flux: representa el flujo volumétrico por unidad de área en sistemas de filtración convencionales y de membranas.
- Flujo: cantidad de fluido que circula a través de una sección de tubería (Zacarias, 2020).

#### **3.3.2 *Características generales del agua***

##### **Principales propiedades físicas**

- Sólidos totales: se define como la materia que se obtiene como residuo después de someter al agua a un proceso de evaporación de entre 103 a 105°C (Elías, 2012). El término de sólidos totales engloba la materia en suspensión, la materia sedimentable, la materia coloidal y la materia disuelta (Elías, 2012).
- Color: El material orgánico disuelto de la vegetación en descomposición y ciertas materias inorgánicas causan color en el agua (Rigola, 1990). Ocasionalmente, las floraciones excesivas de algas o el crecimiento de microorganismos acuáticos también pueden impartir color (Rigola, 1990). A menudo, el color en el agua no es el color verdadero sino el color aparente que resulta de la suspensión coloidal. El

té es un ejemplo de color aparente. Si bien el color en sí no suele ser objetable desde el punto de vista de la salud, su presencia es estéticamente objetable y sugiere que el agua necesita un tratamiento adecuado (Organización Mundial de la Salud, 1988).

- Sabor y Olor: El sabor y el olor en el agua pueden ser causados por materias extrañas como compuestos orgánicos, sal inorgánica o gases disueltos que pueden provenir de fuentes domésticas, agrícolas, naturales o de algún ciclo productivo industrial (Rigola, 1990). Las algas son con frecuencia la fuente de sabor y olor en los suministros de agua superficial. El sabor y olor también puede resultar como un subproducto de la desinfección con cloro. En nuestro caso la característica del sabor y olor proviene del agua de relaves mineros, por lo que la característica del sabor no será objeto de medición (OMS, 1988).
- Turbiedad: La presencia de material suspendido como arcilla, hendidura, material orgánico finamente dividido, microalgas, plancton y otras partículas en el agua se conoce como turbidez; la unidad de medida es una unidad de turbidez nefelometría (NTU) (Rigola, 1990). Se determina por referencia a una mezcla química que produce una refracción o luz reproducible. Las turbiedades superiores a 5 NTU son fácilmente detectables en un vaso de agua y generalmente son objetables por razones estéticas (OMS, 1988). La arcilla u otras partículas inertes suspendidas en sí mismas pueden no afectar negativamente a la salud, pero el agua que contiene tales partículas puede requerir tratamiento para que sea adecuada para la desinfección; debido a que, en general, la turbidez reduce la eficiencia de desinfección al consumir el desinfectante y proteger los microorganismos (Rigola, 1990). Después de una lluvia, se pueden considerar variaciones en la turbidez del agua subterránea, agua superficial, acuífero o reservorio y da una indicación de la contaminación que ingresa (OMS, 1988).

- Temperatura: Es deseable que las aguas a tratar no tengan fluctuaciones de temperatura de más de unos pocos grados. Bajo el escenario actual el rango de variación puede ir desde los 5°C hasta los 20°C (Russell, 2012).

### **Características químicas:**

A continuación, se indican las principales características químicas presentes en los relaves mineros, sin embargo, el análisis necesario para la evaluación de la tecnología a usar y los parámetros a considerar deben abarcar la mayor cantidad posible.

- Materia Orgánica: Son sólidos que provienen del reino animal y vegetal, así como de las actividades humanas relacionadas con la síntesis de compuestos orgánicos y los compuestos orgánicos están formados por combinaciones de carbono, hidrógeno y oxígeno con la presencia, en determinados casos, de nitrógeno (Ramalho, 1996). Los principales grupos de sustancias orgánicas presentes en el agua residual pueden ser las proteínas, hidratos de carbono, grasas y aceites, también puede haber presencia de urea y agentes tensoactivos (Velasco, M. 2008).
  - Proteínas: son los principales componentes del organismo animal, todas las proteínas contienen carbono, oxígeno e hidrógeno. La presencia de grandes cantidades de proteínas en un agua residual puede dar origen de olores fuertemente desagradables debido a los procesos de descomposición (Metcalf, 1995).
  - Hidratos de carbono: incluyen azúcares, almidones, celulosas y fibra de madera (Ramalho, 1996). Algunos son solubles en agua como los azúcares, mientras que otros son insolubles como los almidones (Metcalf, 1995).
  - Grasas y aceites: son compuestos de alcohol (ésteres) o glicerol (glicerina) y ácidos grasos (Ramalho, 1996). Los glicéridos de ácidos grasos que se presentan en estado líquido a temperaturas normales se denominan

aceites, mientras que los que se presentan en estado sólido reciben el nombre de grasas (Metcalf, 1995).

- Agentes tensoactivos: formados por moléculas de gran tamaño, ligeramente solubles en agua, son responsables de la aparición de espumas en las plantas de tratamiento (Ramalho, 1996).
  - Contaminantes prioritarios: engloba aproximadamente 129 contaminantes cuyos límites han sido establecidos por la EPA en función de sus relación o potencial con procesos carcinógenos, mutaciones o alta toxicidad y muchos de los contaminantes prioritarios de origen orgánico corresponden a compuestos orgánicos volátiles (COV) (Metcalf, 1995).
  - Compuestos orgánicos volátiles (COV): normalmente comprenden aquellos compuestos orgánicos que tienen su punto de ebullición por debajo de los 100 °C y/o presión de vapor mayor a 1 mmHg a 25°C (Metcalf, 1995).
  - Pesticidas: comprende a los pesticidas, herbicidas y otros productos químicos de uso agrícola, son tóxicos para la mayor parte de las formas de vida y, por lo tanto, pueden constituir peligrosos contaminantes de aguas superficiales (Metcalf, 1995).
- Medición de contenido orgánico: Debido a la importancia de los métodos desarrollados para la medición de contenido orgánico en la gestión de la calidad de agua y en el diseño de las instalaciones de tratamiento de agua se trata como un punto adicional (AWWA, 2005).

En general los diferentes métodos pueden clasificarse en dos grupos: los empleados para determinar las concentraciones de contenido orgánico mayores de 1 mg/L (incluye demanda bioquímica de oxígeno DBO, demanda química de oxígeno DQO y carbón orgánico total COT) y los de concentraciones de trazas en intervalos de 0.001 a 1 mg/L (cromatografía de gases y espectroscopia de masa) (AWWA, 2005).

- Demanda bioquímica de oxígeno (DBO): es el método más ampliamente usado, aplicable tanto a aguas residuales como a aguas superficiales, la determinación de este está relacionada con la medición del oxígeno disuelto que consumen los microorganismos en el proceso de oxidación bioquímica de la materia orgánica (AWWA, 2005).
- Demanda química de oxígeno (DQO): el ensayo de la DQO se emplea para medir el contenido de materia orgánica tanto de las aguas naturales como las residuales, se emplea un agente químico fuertemente oxidante en medio ácido para la determinación del equivalente de oxígeno de la materia orgánica que puede oxidarse, la DQO de un agua residual suele ser mayor que su correspondiente DBO, siendo esto debido al mayor número de compuestos cuya oxidación tiene lugar vía química frente a los que se oxidan por vía biológica (AWWA, 2005).
- Carbono orgánico Total (COT): es otro método para medir la materia orgánica presente en el agua; especialmente indicado para pequeñas concentraciones de materia orgánica, donde el carbón orgánico de las muestras se oxida a anhídrido carbónico y se mide con un analizador infrarrojo (AWWA, 2005).
- Materia Inorgánica: Son varios los componentes inorgánicos de las aguas residuales que tienen importancia para la caracterización y control de la calidad del agua, las concentraciones de las sustancias inorgánicas en el agua se incrementan tanto por contacto del agua con diferentes formaciones geológicas como por las aguas residuales tratadas o sin tratar que son descargadas en ella (AWWA, 2005).
  - pH: la concentración de ión hidrógeno es un parámetro de calidad de gran importancia tanto para el caso de aguas naturales como residuales, el intervalo de concentraciones adecuado para una mejor proliferación y desarrollo de la mayor parte de la vida biológica es bastante estrecho y crítico (AWWA, 2005).

- Alcalinidad: es provocada por la presencia de hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos de elementos como el calcio, el magnesio, el sodio, el potasio o el amoníaco, además la alcalinidad ayuda a regular los cambios de pH producidos por la adición de ácidos (Rusell, 2012).
- Cloruros: La mayoría de las aguas contienen algunos cloruros, pueden ser productos de salmueras, contaminantes o residuos industriales o domésticos entre otros. Niveles mayores a 250 mg/L de cloruros pueden producir hasta un notable sabor en el agua (Rusell, 2012).
- Fluoruros: en muchas áreas la presencia de fluoruros en el agua se da de forma natural (Rusell, 2012).
- Nitrógeno: Junto al fósforo son esenciales para el crecimiento de protistas y plantas, por lo cual son conocidos como nutrientes, adicionalmente el contenido total en nitrógeno está compuesto por nitrógeno orgánico, amoníaco, nitrito y nitrato (Rusell, 2012).
- Fósforo: son esenciales para el crecimiento de algas y otros organismos biológicos, debido a que en aguas superficiales tienen lugar nocivas proliferaciones incontroladas de algas, además, las formas más comunes de fósforo en soluciones incluyen el ortofosfato, la polifosfato y los fosfatos orgánicos (Rusell, 2012).
- Azufre: El ion sulfato se encuentra en la mayoría de las aguas de abastecimiento como en las aguas residuales y cabe mencionar que los sulfatos se reducen químicamente a sulfuros y a sulfuros de hidrógeno bajo la acción bacteriana en condiciones anaeróbicas (Rusell, 2012).
- Compuestos tóxicos inorgánicos: algunos cationes son de gran importancia durante el tratamiento de aguas residuales debido a que muchos están clasificados como contaminantes prioritarios como el cobre, el plomo, la plata, el cromo, el arsénico y el boro que son tóxicos en mayor o menor grado para los microorganismos, también se debe considerar la presencia

de aniones tóxicos como los cianuros y los cromatos que están muy presentes en vertidos industriales (AWWA, 2005).

- Arsénico: El arsénico se produce naturalmente en algunas formaciones geológicas y es ampliamente usado en muchos rubros, además el arsénico en el agua para consumo ha sido relacionado con el cáncer de pulmón y vejiga (AWWA, 2005).
- Plomo: la presencia de plomo en el agua puede darse de forma natural o por la corrosión de la alguna tubería de plomo presente. El plomo está relacionado a una larga lista de patologías producidas en las personas.
- Metales pesados: como constituyentes importantes de muchas aguas, también se encuentran cantidades a nivel de trazas de muchos metales como el níquel (Ni), el manganeso (Mn), el cromo (Cr), el cinc (Zn), el plomo (Pb), el cobre (Cu), el hierro (Fe) y el mercurio (Hg), además, debido a la toxicidad de varios de estos metales, la presencia excesiva interferirá con gran número de los usos del agua (Rusell, 2012).
- Hierro: pequeñas cantidades de hierro se presentan en el agua debido a la gran cantidad de material geológico y la presencia de hierro en el agua es detectable debido a que imparte un color rojizo al agua (Rusell, 2012).
- Gases: Los gases que se encuentran con mayor frecuencia en aguas residuales son el nitrógeno (N<sub>2</sub>), el oxígeno (O<sub>2</sub>), el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S), el amoníaco (NH<sub>3</sub>) y el metano (CH<sub>4</sub>) (Rusell, 2012).
  - Oxígeno disuelto: es necesario para la respiración de microorganismos aeróbicos, así como para otras formas de vida y solo es ligeramente soluble en agua, además, evita la formación de olores desagradables en las aguas residuales (AWWA, 2005).
  - Sulfuro de hidrogeno: se forma durante los procesos de descomposición de la materia orgánica que contiene azufre o en la reducción de sulfitos y

sulfatos minerales y es un gas incoloro, inflamable, con un olor característico que recuerda a huevos podridos (Rusell, 2012).

- Metano: es el principal subproducto de la descomposición anaeróbica de la materia orgánica del agua residual y es un hidrocarburo combustible de alto valor energético, incoloro e inodoro (AWWA, 2005).

### **Características biológicas**

El agua tratada debe cumplir con la normativa vigente respecto a la presencia de contaminantes microbiológicos como virus, bacterias, protozoos y huevos de helmintos.

- Microorganismos: Principalmente se clasifican en organismos eucariotas, eubacterias y arqueobacterias (AWWA, 2005).
  - Bacterias: en función de su forma se pueden clasificar en cuatro grandes grupos: esferoidales, bastón, bastón curvado y filamentosas, además, el papel que desempeñan las bacterias en los procesos de descomposición y estabilización de la materia orgánica es de gran importancia y los coliformes también se emplean como indicadores de la contaminación por desechos humanos (AWWA, 2005).
  - Hongos: muchos de los hongos basan su alimentación en materia orgánica muerta y son uno de los principales responsables de la descomposición del carbono en la biosfera (AWWA, 2005).
  - Algas: pueden generar serios inconvenientes en las aguas superficiales debido a su reproducción rápido en condiciones favorables, la determinación de la concentración de algas se realiza tomando muestras y haciendo un recuento microscópico, además, es importante encontrar el procedo de tratamiento adecuado que no favorezca el crecimiento de algas, a veces la solución puede implicar la eliminación del carbono, nitrógeno, fosforo y algunos elementos como hierro y el cobalto (AWWA, 2005).

- Protozoos: por lo general son aeróbicos, entre los más importantes en el tratamiento de aguas son las amebas, los flagelados y los ciliados, los cuales tienen gran importancia debido a que son capaces de mantener el equilibrio natural entre los diferentes tipos de microorganismos y se debe controlar la presencia de protozoos como la Gargia Lamblia y del cryptosporidium, como causante de infecciones potencialmente mortales (AWWA, 2005).
  - Virus: son partículas parasitarias formadas por un cordón de material genético (ADN o ARN) con una capa de recubrimiento proteínico, los cuales actúan invadiendo células de un cuerpo vivo y reconduce la actividad celular hacia la producción de nuevas partículas virales (AWWA, 2005).

Como complemento en la tabla 3 se indican la relación de componentes típicos usualmente presentes en las aguas residuales y los efectos que dichos componentes pueden generar en el organismo de los seres vivos (Metcalf, 1995).

**Tabla 3**

*Componentes químicos típicos que pueden encontrarse en el agua residual y sus efectos <sup>a</sup>*

<b>Componentes químicos típicos</b>	<b>Efectos comunes</b>	<b>Valores Típicos</b>
Sólidos Suspendidos	Deposiciones de sólidos	Variables
Materia orgánica biodegradable <sup>a</sup>	Puede agotar las reservas de oxígeno disponible	Variables
Contaminantes prioritarios <sup>a</sup>	Tóxicos, carcinógenos	Varía en función a constituyente <sup>a</sup>
Compuestos orgánicos volátiles <sup>a</sup>	Tóxicos, carcinógenos	Varía en función a constituyente <sup>a</sup>
Nutrientes: Amoníaco	Crece demanda de cloro	Cualquier cantidad
Nutrientes Nitrato	Estimula el crecimiento de algas	0.3
Nutrientes: Fósforo	Estimula el crecimiento de algas	0.015
Otros compuestos inorgánicos: Calcio y magnesio <sup>a</sup>	Aumentan la dureza y sólidos totales disueltos	250.0
Otros compuestos inorgánicos: Cloruro <sup>a</sup>	Imparte sabor salado	75.0 – 200.0
Otros compuestos inorgánicos: Sulfato <sup>a</sup>	Acción catártica	600.0 – 1000.0
Otros compuestos orgánicos: Agentes tensoactivos <sup>a</sup>	Provocan espumas y pueden interferir con la coagulación	1.0 – 3.0

Nota: <sup>a</sup> Tomada de (Metcalf, 1995).

### **3.3.3 Importancia del agua en la extracción y procesamiento de minerales**

La actividad minera requiere como parte fundamental de sus procesos el uso de grandes cantidades de agua ya sea para la concentración de mineral, así como para el personal operativo e incluso el riego de carreteras o áreas verdes, por lo cual genera una gran cantidad de efluentes líquidos, siendo uno de los más importantes la generación de relaves que contienen material rocoso suspendido en abundante agua.

Las fuentes potenciales de descargas de contaminantes relacionadas a las operaciones mineras y de beneficio incluyen (Villas, 2001):

- Drenaje de la mina: El agua resultante de las operaciones de drenaje en el tajo, del proceso de desbroce y de las minas subterráneas es descargada generalmente en aguas superficiales, pero puede contener alta concentración de metales y, por lo tanto, contaminar las aguas superficiales, además, el drenaje ácido de mina (DAM) generado en las labores mineras y en los tajos puede ser bombeado y descargado también a las aguas superficiales (Villas, 2001).
- Operaciones durante el proceso de beneficio: Las corrientes de efluentes residuales pueden originarse del procesamiento metalúrgico y el efluente del proceso puede contener constituyentes orgánicos e inorgánicos, incluyendo reactivos utilizados en procesos tales como el cianuro, y puede ser altamente ácido, además, el efluente del proceso puede ser depositado en canchas de relaves donde los contaminantes se pueden lixiviar y contaminar las aguas superficiales o subterráneas o ser transportado a corrientes y áreas adyacentes (Martinez, 2000).

A pesar de que la calidad de algunos efluentes puede ser relativamente buena y éstos pueden ser reciclados o eliminados con mínimo o sin tratamiento, frecuentemente, estos efluentes se combinan con otros de menor calidad y son eliminados, además, las presas de agua de proceso son fuentes potenciales adicionales de contaminación asociadas con el proceso de beneficio, así mismo, en las operaciones de lixiviación en pilas, las pozas de proceso se utilizan para

almacenar soluciones cargadas para la extracción de metales o soluciones gastadas para el reciclaje y las pozas de proceso pueden ser una fuente de contaminación de agua a través de la filtración de soluciones en las aguas superficiales y subterráneas y flujos que se derraman (Martinez, 2000).

- Unidades de desechos y pilas de mineral: Pilas de desechos (por ejemplo, desmonte y material de desbroce, pilas de material residual de lixiviación) canchas de relaves, y pozas de agua residual Las pilas de mineral pueden contribuir a la contaminación de aguas superficiales por medio de la descarga de sedimentos a través de la erosión y transporte en las escorrentías superficiales (Instituto Tecnológico Geominero de España, 1991).
- Actividad humana: Las fuentes de contaminación del agua provenientes del incremento de la actividad humana en un emplazamiento minero incluyen las aguas servidas y la basura. Además, las aguas servidas domésticas descargadas en aguas superficiales contribuirán a la presencia de microorganismos patógenos en el agua que pueden causar enfermedades, dar sabor y olor al agua y, posiblemente, interferir con los procesos de tratamiento del agua. (Ministerio de energía y minas, 1995)

#### **3.3.4 Principales características del procesamiento de minerales**

En la mayoría de los casos, las minas de los metales no famosos son sometidas a diversos procesos con el fin de eliminar la mayor parte posible los minerales no valiosos o ganga, estos procesos se llevan a cabo en plantas concentradoras que es una unidad de producción situada cerca de la mina, los minerales como el Pb, Zn y Cu, entre otros se llevan a un proceso de concentración hasta que su contenido metálico alcance valores comerciales, además, las etapas de este proceso son el chancado y la molienda seguido por el proceso de concentración donde se separa la parte valiosa (concentrado) de la ganga (parte no valiosa) (Martinez, 2000).

La concentración de minerales es el conjunto de operaciones y procesos que permiten separar a partir de una mezcla de minerales dos tipos de productos (ITGE, 1991):

- Concentrado: parte que contiene los materiales valiosos
- Residuos que contiene materiales estériles

En esencia la concentración de minerales es la operación de separación de sólido-sólido. Existen diversos tipos de concentración como la concentración gravimétrica, concentración magnética, concentración por flotación, entre otros; siendo uno de los métodos más usados la concentración por flotación.

### **Concentración gravimétrica**

Los métodos de concentración gravimétrica separan minerales de diferente densidad relativa, el fundamento de la concentración gravimétrica es la diferencia de densidades entre los minerales a separar y en general mientras mayor es la diferencia de densidad entre dos minerales, más efectiva es su separación; por ello el oro con elevada densidad, es fácilmente separable del cuarzo de baja densidad y si parte de la ganga está aún ligada a las partículas de oro, disminuye su densidad específica, y por lo tanto pierde eficiencia la concentración (Martinez. 2000).

### **Concentración magnética**

Con relación a los separadores magnéticos empleados en procesos de concentración y purificación magnética, generalmente, la concentración magnética involucra la separación de una gran cantidad de producto magnético desde la alimentación de características magnéticas, mientras que la purificación considera la eliminación de pequeñas cantidades de partículas magnéticas desde una gran cantidad de material de alimentación no magnético (Martinez. 2000).

### **Concentración por flotación**

Es el método más usado para la separación de sólidos en la industria minera, consiste básicamente en que una vez que las especies minerales contenidas en una mena mineral están liberadas, son suspendidas en una solución acuosa y mantenidas en

suspensión mediante una agitación apropiada, el objetivo del proceso consiste en separar selectivamente uno de los componentes (Martinez. 2000).

Para este fin se inyectan burbujas de gas dispersas a través de la pulpa para que el componente valioso se adhiera selectivamente a las burbujas de gas formando agregados de baja densidad los cuales tienden a flotar hacia la superficie de la pulpa para dar lugar a una capa de espuma que puede ser retirada de la superficie por medios mecánicos (Martinez. 2000).

### **Efluentes líquidos del proceso de concentración por flotación**

La calidad de los efluentes líquidos, producidos como subproductos del procesamiento de minerales, se basa en el contenido de sólidos muy finos en suspensión que es usualmente medido como sólidos totales en suspensión (TSS) o menos frecuentemente como unidades de turbidez, estos contenidos son más fáciles de reducir si se incrementa el tiempo de retención en los depósitos mencionados para este propósito y se recircula el agua de proceso hacia la concentradora, eliminando del todo la descarga de agua de este depósito (Martinez. 2000).

Los floculantes (polímeros sintéticos), coagulantes (Fe, Al) y reactivo químico para ajustar el pH (cal) puede ayudar a la reducción de las partículas suspendidas, los residuos de reactivos utilizado en flotación acompañan tanto a los relaves sólidos como a los líquidos descargados con los relaves y los reactivos de flotación pueden ser cal, ditiofosfatos, xantatos, cromatos, sulfatos, alcoholes, aceites, cianuros, etc., con la excepción del cianuro la mayoría de los demás reactivos de flotación existen en formas no tóxicas para los humanos y la vida acuática (Martinez. 2000).

Generalmente se aplican en pequeñas concentraciones, los reactivos orgánicos de flotación se descomponen rápidamente y rara vez son responsables de algún impacto ambiental serio, además, cabe resaltar que el procedimiento de tratamiento de agua de relave abordado en el presente informe no corresponde a una operación de oro y plata por lo que no se espera tener presencia significativa de compuestos cianurados en el agua a

tratar, lo cual debe ser avalado mediante un análisis de agua realizado por un laboratorio certificado (Martinez. 2000).

### **Relaves mineros producidos por el proceso de concentración por flotación**

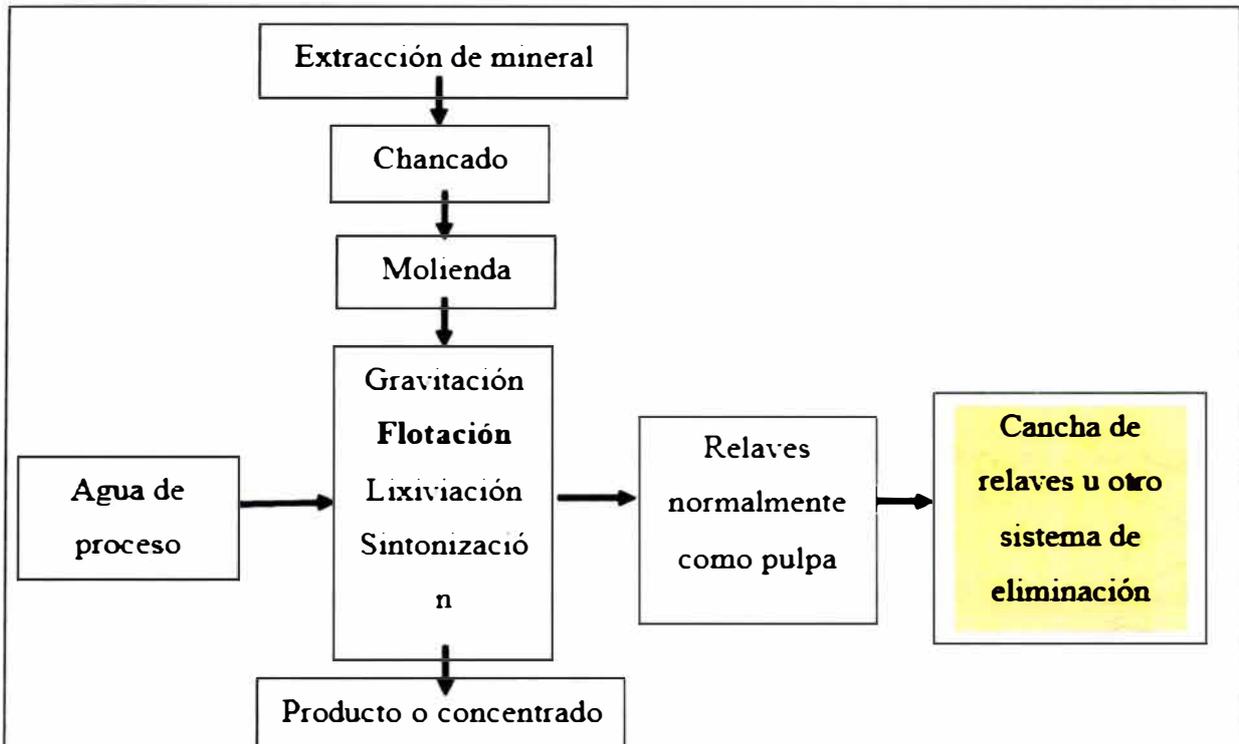
Los relaves mineros se definen como desechos de mineral sólido fino con una granulometría conocida entre arena y limo provenientes del proceso de concentración que son producidos, transportados o depositados en forma de lodo y que corresponden a una "suspensión fina de sólidos en líquido", y como se observa en la figura 2 los relaves son desechos producto del subproceso minero, que usualmente son una mezcla de minerales, arena y agua (Martinez. 2000).

Los relaves están constituidos fundamentalmente por el mismo material presente en el yacimiento, al cual se le ha extraído mineral valioso, conformando una pulpa, que se generan en las plantas concentradora de minerales, y que ha experimentado una o varias etapas de circuitos de molienda fina, esta pulpa o lodo de relaves fluctúa en la práctica una dilución aproximada de agua/sólidos= 2.5 /1 (Martinez. 2000).

La figura 2 nos muestra un diagrama de los procedimientos involucrados en la extracción de minerales que dan como subproducto la generación de relaves mineros, los procesos de flotación son los principales aportantes de líquidos en los relaves mineros, siendo almacenados en grandes extensiones de terrenos y que con la acumulación continua forman las presas de relaves.

**Figura 2**

*Diagrama de procedimiento de producción de relaves*



Nota: Adaptado de Informe de ingeniería, Olga Martínez Melo, 2000, G-17715. UNI.

El material obtenido de los tajos de explotación sufre un proceso de reducción de tamaños mediante el uso de zarandas, molienda y remolienda que luego ingresan a plantas concentradoras donde se da origen al producto a comercializar y los relaves que son transportados a presas (Martínez. 2000).

### **Descripción de los relaves mineros**

Los relaves son una suspensión acuosa de sólidos de tamaño entre arena y limo (lodos o pulpas), que se generan como residuo del proceso de minerales, por concentración o lixiviación en tanques, una vez que es extraído el producto de interés, los relaves contienen concentraciones de material fino (arena, lama, etc.) que son almacenados en presas de relave, para luego de un tiempo, por efecto de la gravedad los finos decantan en el fondo y el agua es recuperada, evaporada y/o tratada (Martínez, 2000).

## **Disposición de relaves mineros**

El proceso de concentración genera un volumen de relaves mayor al volumen original del mineral extraído de la mina, por lo que generalmente se dispone de un área lo suficientemente grande para su embalsamiento, los relaves no son otra cosa que los sólidos finos con escaso contenido de mineral valioso, que se desecha mezclados con agua pero el problema de los relaves es su almacenamiento, se debe tener en cuenta que casi todas las operaciones mineras se llevan a cabo en zonas con geografía escarpada, de difícil acceso, y que por lo tanto no es fácil encontrar áreas apropiadas para almacenar grandes volúmenes de material desechable y Debido a que los relaves son líquidos o semilíquidos se deben construir canchas o presas de relaves que puedan retenerlos por tiempo prolongado (Martinez. 2000).

La mezcla de arenas y limos provenientes de la obtención del concentrado representan casi el 50% del peso del relave, el objetivo de la presa es la de almacenamiento de los relaves utilizando una alternativa tecnológica universalmente aceptada, económicamente viable y que asegure niveles aceptables de riesgos e impactos ambientales y existen tipos de presa para contener relaves, siendo el más común el de un muro de contención hecho con materiales de préstamo o con el mismo relave (Martinez, 2000).

Cuando se descargan los relaves en el área de la presa o laguna, gran parte de las partículas gruesas de relave tienden a sedimentar relativamente cerca del punto de descarga. El resto de las partículas gruesas, las partículas más finas y las partículas coloidales son transportados, más lejos, hasta la zona del agua empozada o estanque de decantación, donde los mismos eventualmente sedimentan dentro de aguas quietas. Siempre que sea posible, el agua se decanta y se retorna a la planta para usarse nuevamente.

## **Tipos de presas de relaves mineros**

Debido a la importancia económica para la operación minera de distribuir los costos del manejo de relaves a través de la vida del proyecto, las presas de relaves son

usualmente levantadas progresivamente de acuerdo con el incremento en altura de los relaves en el embalse. Las presas de relaves elevadas son de los tres tipos básicos mostradas (Martinez. 2000):

- Presas de relaves tipo "aguas arriba"
- Presas de relaves tipo "aguas abajo"
- Presas de relaves tipo "línea central"

Todos ellos comienzan con un dique de arranque construido de tierra o de relleno rocoso y luego son llenados con los relaves descargados, solo tienen en común dicho punto.

En el caso de las presas del «tipo aguas arriba», la presa es levantada por la construcción progresiva de «diques perimétricos» sobre la superficie de la acumulación de relaves precedente, de tal manera que cada dique avance sucesivamente hacia el interior conforme la presa es levantada, además, la característica de este método es que la integridad estructural de la presa está gobernada por las propiedades y comportamiento de los relaves descargados hidráulicamente los cuales forman la base del talud de la presa (Martinez. 2000).

Las presas de relaves del «tipo aguas abajo», son levantadas colocando material adicional de relleno en el talud «aguas abajo», o exterior del levantamiento previo y el relleno de la presa, que puede consistir en material de varios tipos no tiene como basamento relaves depositados hidráulicamente por lo que al final el método «aguas abajo» alcanza una configuración muy similar a la de una presa convencional de retención de agua, con similares características estructurales en la mayor parte (Martinez. 2000).

La presa del tipo «línea central» se levanta colocando el relleno de la represa en el talud «aguas abajo» y sobre la cresta de la elevación previa, por lo que el método de «línea central» comparte muchas de las características estructurales de las presas tipo «aguas abajo», pero usa menos material de relleno para alcanzar la misma altura (Martinez. 2000).

### **3.3.5 Procesos físicos para el tratamiento del agua**

A continuación, se indican los principales procesos empleados en el tratamiento de aguas y efluentes, que permiten la separación de sólidos en suspensión y sólidos disueltos.

#### **Filtración en medio granular**

El principal objetivo de la filtración es la retención de la materia particulada mediante la circulación del flujo de agua a través de un lecho granular, con o sin adición de algún reactivo químico y el diseño de los filtros, así como la valoración de su eficacia debe basarse principalmente en comprender como afectan variables del proceso y como es el mecanismo de funcionamiento del filtro (AWWA, 2005).

Los tipos de filtros más comunes son los filtros de arena o multimedios (filtros de tipo granular) que utiliza arena y medios filtrantes de diferentes densidades y tamaños para conseguir la filtración, normalmente la densidad promedio es de 2.65 kg/m<sup>3</sup> para arenas y 4 – 4.5 kg/m<sup>3</sup> para arenas de granate (AWWA, 2005).

Existen tres clasificaciones generales para los filtros de arena: filtros rápidos de arena, filtros lentos de arena y filtros a presión de arena, pero, la diferencia principal entre los tres es el caudal y la caída de presión a través del filtro, debido a que, el filtro lento de arena a veces se utiliza en los suministros municipales de agua y tiene un caudal menor a 2 gal. / (min. pie<sup>2</sup>) (velocidad del frente de 4.89 m/h); el filtro de arena convencional tiene un caudal entre 2 y 6 gal. / (min. pie<sup>2</sup>) (4.89 – 29.5 m/h) y el filtro a presión de arena tiene caudal mayor a 8 gal. / (min. pie<sup>2</sup>) (AWWA, 2005).

Los diferentes caudales y caídas de presión afectan a la eliminación de los sólidos y a la configuración física del filtro, mientras que la operación completa de filtración consta principalmente de dos fases: filtración y lavado (llamado retrolavado o contralavado) (AWWA, 2005).

- Fase de filtración: Durante la circulación del agua dentro del estrato granular la retención de sólidos se lleva a cabo mediante un complejo sistema donde intervienen simultáneamente procesos como el tamizado, interceptación, impacto,

sedimentación y adsorción, el final del ciclo de filtrado (fase de filtración) se alcanza cuando empieza a incrementarse el contenido sólido en suspensión hasta alcanzar un nivel máximo aceptable, o cuando se produce una pérdida de carga prefijada y una vez alcanzada cualquiera de estas condiciones se pasa la fase de lavado a contracorriente (AWWA, 2005).

- Lavado a contracorriente (retrolavado o contralavado): Para filtros en medios granulados, el lecho del filtro se redistribuye mediante el lavado a contracorriente (llamado también "retrolavado" o "backwash"). El caudal del volumen ascendente a través del lecho y la velocidad de sedimentación de las partículas determinan que partículas se fluidizarán y su cantidad. Generalmente, los lechos de arena se expanden entre 75% y un 100% durante el retrolavado, por lo que se deben frotar o agitar violentamente durante el retrolavado para romper los grumos de barro y las masas aglomeradas acumuladas (AWWA, 2005).

### **Flotación**

La flotación es una operación unitaria que se emplea para la separación de partículas sólidas o líquidas de una fase líquida, la separación se consigue introduciendo finas burbujas de gas, normalmente aire, en la fase líquida, originando que las burbujas se adhieren a las partículas y la fuerza ascensional que experimenta el conjunto partícula-burbuja de aire hace que suban hasta la superficie del líquido, de esta forma, es posible hacer ascender a la superficie partículas cuya densidad es mayor que la del líquido, además de favorecer la ascensión de las partículas cuya densidad es inferior, como el caso del aceite en el agua, finalmente, una vez las partículas se hallan en la superficie pueden recogerse mediante un rascado superficial (Martinez, 2000).

La aplicación práctica de la flotación en las instalaciones de tratamiento tiene principalmente al uso del aire como agente responsable del fenómeno. Las burbujas se añaden mediante uno de los siguientes métodos:

- Inyección de aire en el líquido sometido a presión y posterior liberación de la presión a que está sometido el líquido (flotación por aire disuelto).
- Aireación a presión atmosférica (flotación por aireación).
- Saturación con aire a la presión atmosférica, seguido de la aplicación del vacío al líquido (flotación por vacío).

### **Sedimentación**

Consiste en la separación por gravedad de las partículas suspendidas cuyo peso específico es mayor que el del agua, esta operación unitaria se emplea para la eliminación de arenas y de la materia en suspensión cuyo principal objetivo es la obtención de un efluente clarificado (AWWA, 2005).

Los principales tipos de sedimentación son:

- Sedimentación de partículas discretas: Se refiere a la sedimentación de partículas en una suspensión con baja concentración de sólidos donde las partículas sedimentan como entidades individuales y no existe interacción sustancial con las partículas vecinas (AWWA, 2005).
- Floculenta: Se refiere a una suspensión bastante diluida de partículas que se agregan, o floculan, durante el proceso de sedimentación que al unirse aumentan de masa y sedimentan a mayor velocidad (AWWA, 2005).
- Retardada: Se refiere a suspensiones de concentración intermedia, en las que las fuerzas entre partículas son suficientes para entorpecer la sedimentación de las partículas vecinas, las cuales, tienden a permanecer en posiciones relativas fijas, y la masa de partículas sedimenta como una unidad por lo que se desarrolla una interfase sólido-líquido en la parte superior de la masa que sedimenta (AWWA, 2005).
- Por compresión: Se refiere a la sedimentación en la que las partículas están concentradas de tal manera que se forma una estructura y la sedimentación sólo puede tener lugar como consecuencia de la compresión de esta estructura, por lo

que la compresión se produce por el peso de las partículas, que se van añadiendo constantemente a la estructura por sedimentación desde el líquido sobrenadante (AWWA, 2005).

### **3.3.6 Procesos Químicos para el tratamiento de aguas**

Los procesos empleados en el tratamiento de las aguas residuales en los que las transformaciones se producen mediante reacciones químicas reciben el nombre de procesos químicos unitarios (Ramalho, 1996).

#### **Precipitación**

La precipitación química en el tratamiento de aguas conlleva la adición de productos químicos con la finalidad de alterar el estado físico de los sólidos disueltos y en suspensión, y facilita su eliminación por sedimentación. Los agentes más comunes usados en la precipitación son el sulfato de alúmina, el cloruro férrico, sulfato férrico, cal entre otros. El grado de clarificación resultante depende tanto de la cantidad de productos químicos que se adiciona como del nivel de control de los procesos (AWWA, 2005).

Mediante precipitación química, es posible conseguir efluentes clarificados básicamente libres de materia en suspensión o en estado coloidal y se puede llegar a eliminar del 80 - 90% de la materia total suspendida, entre 40 – 70% de la DB05, del 30 – 90% de la DQO y entre el 80 90% de las bacterias (AWWA, 2005).

#### **Adsorción**

Consiste en la captación de sustancias solubles presentes en la interfase de una solución que puede hallarse entre un líquido y un gas, un sólido, o entre dos líquidos diferentes, así mismo, el tratamiento del agua residual con carbón activado suele estar considerado como un proceso de refinado de aguas que ya han recibido un tratamiento biológico normal por lo que el carbón se emplea para eliminar parte de la materia orgánica disuelta (AWWA, 2005).

El proceso de adsorción tiene lugar en tres etapas: macro-transporte, micro transporte y sorción, el macro-transporte engloba el movimiento por advección y difusión de la materia orgánica a través del líquido hasta alcanzar la interfase líquido-sólido, por su

parte, el micro-transporte hace referencia a la difusión del material orgánico a través del sistema de macroporos del carbón activado granular hasta alcanzar las zonas de adsorción que se hallan en los microporos y submicroporos de los gránulos de carbón activado (AWWA, 2005).

El uso del término sorción se debe a la dificultad de diferenciar la adsorción física de la adsorción química, y se emplea para describir el mecanismo por el cual la materia orgánica se adhiere al CAG (AWWA, 2005).

### **Desinfección**

La desinfección consiste en la destrucción selectiva de los organismos que causan enfermedades, pero no todos los organismos se destruyen durante el proceso, punto en el que radica la principal diferencia entre la desinfección y la esterilización, proceso que conduce a la destrucción de la totalidad de los organismos (Russell, 2012).

#### **3.3.7 Procesos Biológicos para el tratamiento de aguas**

Los objetivos del tratamiento biológico del agua residual son la coagulación y eliminación de los sólidos coloidales no sedimentables y la estabilización de la materia orgánica y se consiguen gracias a una variedad de microorganismos, principalmente bacterias, dichos microorganismos se utilizan para convertir la materia orgánica carbonosa coloidal y disuelta en diferentes gases y tejido celular, y dado que el tejido celular tiene un peso específico ligeramente superior al del agua, se puede eliminar por decantación (Russell, 2012).

Las principales aplicaciones de estos procesos son:

- La eliminación de la materia orgánica carbonosa del agua residual, normalmente medida como DBO (Russell, 2012),
- La eliminación del carbono orgánico total (COT),
- La eliminación de la demanda química de oxígeno (DQO);
- La nitrificación y La desnitrificación;
- La eliminación de fósforo, y la estabilización de lodos (Russell, 2012).

En el caso de aguas residuales industriales, el principal objetivo es la reducción de la concentración de compuestos tanto orgánicos como inorgánicos, por lo que a menudo, puede ser necesario llevar a cabo un pretratamiento, debido a la potencial toxicidad de algunos compuestos (Ramalho, 1996).

Los principales tipos de procesos de tratamiento biológicos que se han desarrollado para el tratamiento de las aguas residuales son los procesos aerobios, procesos anaerobios, procesos anóxicos, procesos combinados, y los procesos de lagunaje (Ramalho, 1996).

De entre estos destacan los procesos aerobios que son los procesos de tratamiento biológico que se dan en presencia de oxígeno y los procesos anaerobios que son los procesos de tratamiento biológico que se dan en ausencia de oxígeno (Ramalho, 1996).

La Tabla 4 nos muestra los principales procesos biológicos utilizados en el tratamiento de aguas residuales divididos en Pprocesos Aeróbicos y Procesos Anaeróbicos (Metcalf, 1995).

**Tabla 4**

*Principales procesos biológicos utilizados en el tratamiento de aguas residuales<sup>b</sup>*

Tipos	Descripción	Aplicación
<b>Procesos Anaeróbicos</b>		
Cultivos en suspensión	Procesos de lodos activados	Eliminación de DBO <sup>b</sup>
	Nitrificación de cultivos suspendidos	Nitrificación <sup>b</sup>
	Lagunas Aireadas	Eliminación de DBO
		Eliminación de DBO
Cultivo Fijo	Filtros percoladores	Eliminación de DBO <sup>b</sup>
	Filtros de desbaste	Eliminación de DBO <sup>b</sup>
	Sistemas RBC	Eliminación de DBO <sup>b</sup>
	Reactores de lecho compacto <sup>b</sup>	Eliminación de DBO <sup>b</sup>
<b>Procesos Anaeróbicos</b>		
Cultivos en suspensión	Digestión anaeróbica	Estabilización eliminación DBO
	Procesos anaeróbicos de contacto	Estabilización eliminación DBO
Cultivo Fijo	Filtro anaeróbico	Estabilización eliminación DBO
	Lecho expandido	Estabilización eliminación DBO

Nota: <sup>b</sup> Tomada de (Metcalf, 1995).

## Procesos Aerobios

Los principales procesos de tratamiento biológico aeróbicos de cultivo en suspensión empleados para la eliminación de la materia orgánica son:

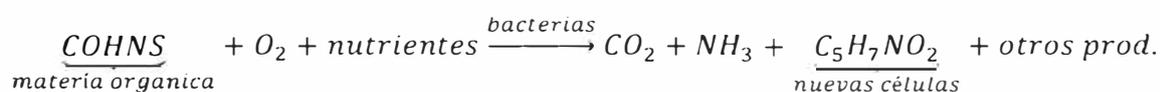
### Proceso de lodos activados:

En este proceso el residuo orgánico se introduce en un reactor en donde se mantiene un cultivo bacteriano aerobio en suspensión y se denomina "líquido mezcla", el cultivo bacteriano en el reactor lleva a cabo la conversión a productos finales relativamente sencillos como el CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub> y nuevas células bacterianas (Metcalf, 1995).

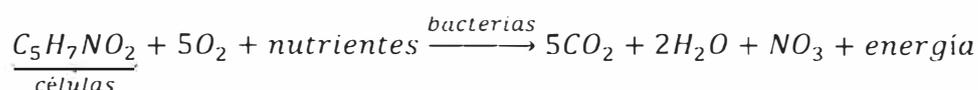
El ambiente aerobio en el reactor se consigue mediante el uso de difusores o de aireadores mecánicos, que también sirven para mantener el "líquido mezcla" en estado de mezcla completa, al cabo de un periodo determinado de tiempo, la mezcla de las nuevas células con las viejas se conduce hasta un tanque de sedimentación para su separación del agua residual tratada y una parte de las células sedimentadas se recircula para mantener en el reactor la concentración de células deseada, mientras que la otra parte se purga del sistema (Metcalf, 1995).

Las principales ecuaciones llevadas a cabo son:

### Oxidación y síntesis:



### Respiración endógena:



## **Lagunas aireadas**

El proceso es esencialmente el mismo que el de lodos activados de aireación prolongada convencional, excepto que se usa como reactor un depósito excavado en el terreno y el oxígeno necesario en el proceso se suministra mediante difusores o aireadores superficiales (Metcalf, 1995).

## **Reactor de flujo discontinuo secuencial (SBR)**

Un reactor discontinuo secuencial (SBR) es un sistema de tratamiento de lodos activados cuyo funcionamiento se basa en la secuencia de ciclos de llenado y vaciado, los procesos unitarios que intervienen son idénticos a los de un proceso convencional de lodos activados ya que en ambos sistemas intervienen la aireación y la sedimentación-clarificación, la principal diferencia es que en los SBR los procesos tienen lugar secuencialmente (Metcalf, 1995).

Los sistemas SBR tienen en común las siguientes etapas:

- Etapa 1. Llenado: adición de sustrato orgánico al reactor
- Etapa 2. Reacción: reacción de aireación.
- Etapa 3. Sedimentación: permite la separación de sólidos.
- Etapa 4. Clarificación
- Etapa 6. Extracción: vaciado por decantación
- Etapa 7. Fase inactiva

## **Proceso de digestión aerobia**

La digestión aerobia es un método alternativo de tratar los lodos orgánicos producidos en el curso de las diversas operaciones de tratamiento, así mismo, los digestores aerobios se pueden emplear para el tratamiento de lodos activados o de filtros percoladores, de mezclas de lodos activados o de filtros percoladores con lodos primarios o de lodo biológico en exceso de plantas de tratamiento de lodos activados sin sedimentación primaria (Metcalf, 1995).

En la digestión aerobia convencional, el lodo se airea durante un largo periodo de tiempo en un tanque abierto, sin calefacción, empleando difusores convencionales o aireadores superficiales y el proceso se puede llevar a cabo de manera continua o discontinua (Metcalf, 1995).

### **Procesos de tratamiento aerobios de cultivo fijo**

Se emplean para eliminar la materia orgánica que se encuentra en el agua residual, también, se pueden emplear para llevar a cabo el proceso de nitrificación (conversión del nitrógeno amoniacal en nitrato) y los procesos de cultivo fijo incluyen los filtros percoladores, los filtros de desbaste, los reactores biológicos rotativos de contacto (bio-discos) y los reactores de nitrificación de lecho fijo (Metcalf, 1995).

- Filtros percoladores: el filtro percolador consiste en un lecho formado por un medio sumamente permeable al que se adhieren los microorganismos y a través del cual percola el agua residual, los filtros percoladores que emplean lechos de material plástico pueden tener diversas formas (circulares, cuadradas, etc.) con profundidades entre 4 a 12 metros que suelen emplear tres tipos de medios filtrantes plásticos que son de relleno de flujo vertical, de relleno de flujo transversal y otras distribuciones de rellenos a granel (Metcalf, 1995).

Los filtros percoladores se complementan con un sistema de drenaje que permite el recojo de los líquidos tratados y los cuales pasan a un tanque de sedimentación para la separación de sólidos y la materia orgánica presente en el agua residual se degrada por la acción de los microorganismos aerobios adherida al medio (Metcalf, 1995).

- Filtros de desbaste: Los filtros de desbaste son filtros percoladores especialmente diseñados para trabajar con cargas hidráulicas elevadas por lo que necesitan altas tasas de recirculación. (Metcalf, 1995).
- Sistemas biológicos rotativos de contacto (biodiscos): Un reactor biológico rotativo de contacto consiste en una serie de discos circulares de poliestireno, o cloruro de

polivinilo, situados sobre un eje, los crecimientos biológicos se adhieren a las superficies de los discos, hasta formar una película biológica sobre la superficie mojada de los mismos y la rotación de los discos pone la biomasa en contacto para la adsorción de oxígeno, además, los biodiscos se pueden utilizar como tratamiento secundario y se pueden emplear para la nitrificación y desnitrificación estacionales o permanentes (Metcalf, 1995).

### **Anaerobios**

Los principales procesos de tratamiento anaeróbico de cultivo en suspensión empleados para la eliminación de la materia orgánica son:

#### **Digestión anaerobia**

En este proceso se produce la descomposición de la materia orgánica e inorgánica en ausencia de oxígeno molecular, sus principales aplicaciones son la estabilización de lodos concentrados producidos en el tratamiento del agua residual y de determinados residuos industriales, así mismo, el proceso se lleva a cabo en un reactor completamente cerrado y los lodos se introducen en el reactor de forma continua o intermitente, permanecen en su interior durante periodos de tiempo variable y el lodo estabilizado, que se extrae del proceso continuo o intermitentemente, tiene un bajo contenido en materia orgánica y patógena, y no es putrescible (Metcalf, 1995).

#### **Proceso anaerobio de contacto**

Algunos residuos industriales con alto contenido en DBO se pueden estabilizar por medio del tratamiento anaerobio de forma muy efectiva, en el proceso anaerobio de los residuos que se quiere tratar se mezclan con los sólidos del lodo recirculado y se digieren a continuación en un reactor cerrado para evitar la entrada de aire (Metcalf, 1995).

El contenido del reactor se mezcla completamente y, tras la digestión, la mezcla se separa en un clarificador o una unidad de flotación al vacío, el lodo anaerobio sedimentado se recircula para servir de siembra al agua residual entrante y debido a la baja tasa de síntesis de los microorganismos anaerobios el exceso de lodo a evacuar es mínimo (Metcalf, 1995).

### **Proceso anaerobio de manto de lodo de flujo ascendente (UASB)**

En este proceso el agua residual a tratar se introduce por la parte inferior del reactor donde el agua residual fluye en sentido ascendente a través de un manto de lodo constituido por gránulos o partículas formadas biológicamente por lo que el tratamiento se produce al entrar en contacto el agua residual y las partículas, mientras que los gases producidos en condiciones anaerobias (principalmente metano y dióxido de carbono) provocan una circulación interior, que colabora en la formación y mantenimiento de los gránulos y parte del gas generado dentro del manto de lodo se adhiere a las partículas biológicas generando que el gas adherido a las partículas se libera al llegar a la parte superior del reactor (Metcalf, 1995).

Las partículas desgasificadas suelen volver a caer hasta la superficie del manto de lodo por lo que el gas libre y el gas liberado de las partículas se capturan en una bóveda de recogida de gases instalada en la parte superior del reactor mientras que el líquido, que contiene algunos sólidos residuales y algunos de los gránulos biológicos, se conduce a una cámara de sedimentación, donde se separan los sólidos residuales (Metcalf, 1995).

### **Eliminación biológica de nutrientes**

La eliminación de los nutrientes del agua residual se hace necesaria cada vez con mayor frecuencia, ya que puede ser necesario controlar el vertido de nitrógeno o de fósforo debido a su potencial impacto sobre la calidad de las aguas receptoras (Metcalf, 1995).

Las opciones de eliminación de nutrientes que cabe considerar son las siguientes:

- Eliminación de nitrógeno sin eliminar el fósforo
- Eliminación conjunta del nitrógeno y del fósforo
- Eliminación del fósforo con o sin eliminación de nitrógeno
- Eliminación del fósforo todo el año con eliminación estacional del nitrógeno (Metcalf, 1995).

Principalmente la eliminación del nitrógeno y/o fósforo se obtienen de la siguiente forma:

**Tabla 5**

*Eliminación de constituyentes por medio de operaciones y procesos de tratamientos avanzados <sup>c</sup>*

Principal función de eliminación	Descripción de la operación o del proceso <sup>c</sup>	Tipo de agua residual tratada (*)
Eliminación de Sólidos Suspendidos <sup>c</sup>	Filtración	ETP, ETS <sup>c</sup>
	Microtamices	ETP
Eliminación de nitrógeno <sup>c</sup>	Nitrificación / Desnitrificación	ETS <sup>c</sup>
Eliminación de fósforo <sup>c</sup>	Eliminación de fósforo en línea	ETS
Eliminación de compuestos <sup>c</sup> tóxicos y materia orgánica refractaria <sup>c</sup>	Adsorción sobre carbón <sup>c</sup>	ETS
	Lodos activados + carbón activado <sup>c</sup>	ETP ETS + filtración
	Oxidación química	
Eliminación de sólidos inorgánicos disueltos <sup>c</sup>	Precipitación química <sup>c</sup>	ETP, ETB, ETS
	Intercambio iónico <sup>c</sup>	ETS + Filtración
	Ultrafiltración <sup>c</sup>	ETS + Filtración
	Ósmosis Inversa <sup>c</sup>	ETS + Filtración
Compuestos orgánicos volátiles <sup>c</sup>	Volatilización y arrastre con gas <sup>c</sup>	ARC, ETP <sup>c</sup>

Nota: <sup>c</sup> Tomada de (Metcalf, 1995).

ETP: Efluente de tratamiento primario; ETB: Efluente de tratamiento biológico (sin decantación) (Metcalf, 1995).

ETS: Efluente de tratamiento secundario (con decantación); ARC: Agua residual cruda (Metcalf, 1995).

- Eliminación del fósforo: El consumo de fósforo por parte de los microorganismos tiene lugar en reactores dispuestos en etapas en serie y mediante el adecuado control de las condiciones ambientales es posible hacer que los microorganismos consuman un exceso sobre sus necesidades normales, por otro lado la eliminación del fósforo se consigue por purga o arrastre de los microbios (Metcalf, 1995).
- Eliminación del nitrógeno: Debido a que el nitrógeno es un nutriente, los microbios presentes en los procesos de tratamiento tenderán a asimilar el nitrógeno amoniacal e incorporarlo a su masa celular, además en el proceso de nitrificación-desnitrificación la eliminación del nitrógeno se consigue en dos etapas de conversión, donde en la nitrificación se reduce la demanda de oxígeno del

amoníaco mediante su conversión a nitrato pero el nitrógeno apenas ha cambiado de forma y no se ha eliminado y en el segundo paso, la desnitrificación, el nitrato se convierte en un producto gaseoso que es eliminado (Metcalf, 1995).

### **3.3.8 Tratamientos físicos mediante el empleo de membranas**

Las membranas son barreras que permiten el paso del agua, pero impiden el paso de sustancias no deseadas, un proceso de membrana es cualquier método que se basa en una barrera de membrana para filtrar o eliminar partículas del agua y el fluido pasa a través de la membrana debido a la diferencia de presión entre un lado de la membrana y el otro mientras que los contaminantes permanecen en un solo lado (Russell, 2012).

#### **Tipos de tratamiento por membranas**

Como procesos de membranas en el tratamiento de agua comúnmente son utilizadas algunas de las siguientes tecnologías (AWWA, 2005):

- Microfiltración (MF)
- Ultrafiltración (UF)
- Nanofiltración (NF)
- Ósmosis inversa (RO)

Aunque estos procesos están clasificados como procesos de membrana, las tecnologías y aplicaciones son muy diferentes en algunos casos.

Por ejemplo, los procesos de microfiltración (MF) y ultrafiltración (UF) son procesos de membrana impulsados por presión que utilizan membranas micro porosas para eliminar partículas (incluyendo turbidez y microorganismos) sin embargo estos dos procesos no eliminan iones u otros constituyentes disueltos. Las membranas de MF/UF se pueden fabricar a partir de varios materiales como acetato de celulosa y polímeros sintéticos tales como polipropileno, polisulfona, entre otros. En la actualidad se configuran comúnmente en fibras huecas, aunque pueden estar disponibles otras configuraciones dependiendo de la aplicación.

Por otro lado, los procesos de ósmosis inversa (RO) y nanofiltración (NF) también son procesos impulsados por la presión; sin embargo, estas tecnologías utilizan membranas semipermeables para eliminar contaminantes disueltos mediante un proceso de separación controlado por difusión (Russell, 2012).

Las membranas de RO/NF son semipermeables no porosas que pueden ensuciarse rápidamente cuando se someten a una carga significativa de partículas, ocurre cuando se aplica alta presión mayor al gradiente osmótico natural del sistema por el lado de alimentación de la membrana, por lo que el agua es forzada a través de la estructura molecular de la superficie de la membrana y los sólidos disueltos se rechazan en gran medida (Russell, 2012).

Aunque los solutos también pueden difundirse a través de las membranas semipermeables, la velocidad de transferencia de masa de estos constituyentes es mucho más lenta que la del agua, en consecuencia, el agua que pasa a través de la membrana (es decir, el permeado) contiene menos sólidos disueltos que el agua que ingresa al sistema (Metcalf, 1995).

Principales contaminantes objetivos del tratamiento por membranas

A continuación, se muestra la Figura 3 que ilustra las capacidades de eliminación de los diversos tipos de tecnología de membrana para sus respectivos contaminantes objetivos, en función del tamaño de los compuestos eliminados.

### **Figura 3**

*Rangos de tamaños de contaminantes para remoción con membranas*

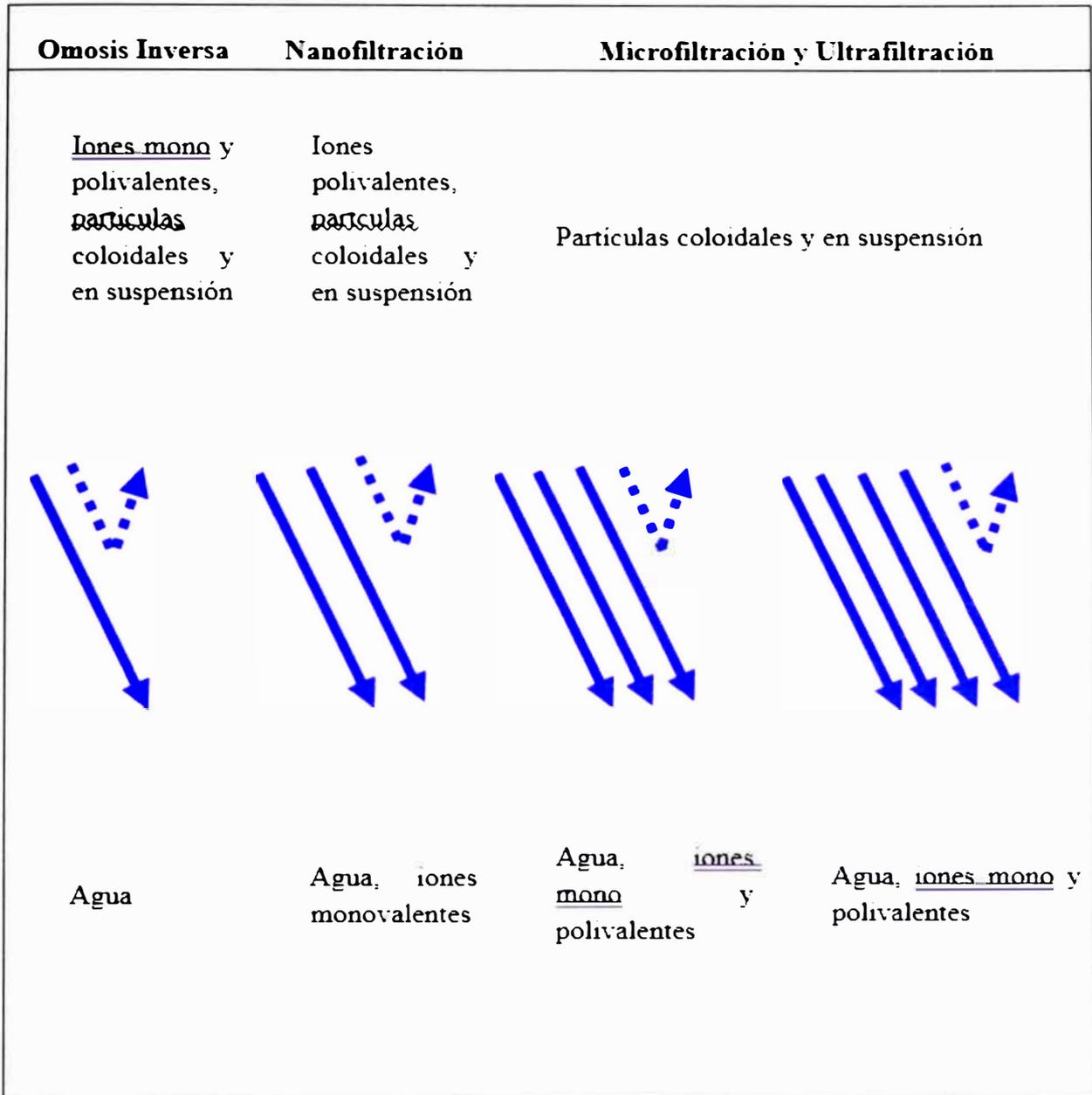
Tamaño	Iónico	Moléculas	Macromoléculas	Macropartículas	Macropartículas		
	0.001	0.01	0.1	1.0	10		
Peso	100	200	1000	10000	20000	100000	500000
Tamaño relativo							
Proceso de separación							

Nota: Adaptación tomada de Dupont 2021 Filmtec Reverse Osmosis Membranes Technical Manual

Las tecnologías de filtración se diferencian, por el nivel de retención y por los compuestos que dejan pasar y aparecen en la corriente de producto, tal y como puede verse en la siguiente figura 4, los principales tipos de tecnologías empleados a nivel industrial son la microfiltración/ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa (Dupont, 2021).

**Figura 4**

*Nivel de retención de procesos de membranas*



Nota: Elaboración propia.

La Tabla 6 nos muestra un resumen de los principales contaminantes removidos por las tecnologías de tratamiento de agua por membranas, siendo los procesos de microfiltración y ultrafiltración las tecnologías que remueven partículas de mayor tamaño y las tecnologías de Nanofiltración y Osmosis Inversa los procesos que pueden remover las partículas más finas.

**Tabla 6***Proceso de membrana y contaminantes objetivo*

	<b>Microfiltración (MF)</b>	<b>Ultrafiltración (UF)</b>	<b>Nanofiltración (NF)</b>	<b>Ósmosis Inversa (RO)</b>
Contaminante	Giardia	Contaminantes	Iones divalentes /	Contaminantes No
objeto de remoción	Cryptosporidium	removidos por MF	Dureza.	removidos por NF
	Bacteria	Virus	Iones	Iones
	Turbidez		monovalentes	monovalentes.
	Materia coagulante		limitados	
	orgánico		Carbón orgánico	
	Materia coagulante		disuelto	
	orgánico		Color	

Nota: Adaptación de referencia *Anual of Water Supply Practices—M46*.

Tener en cuenta que tanto la figura 4 como la tabla 6 se centran en los contaminantes objetivo, no en todos los contaminantes que las diversas tecnologías de membrana son capaces de eliminar, por ejemplo, si bien los procesos de Ósmosis inversa y Nanofiltración eliminarán las partículas de mayores tamaños, estas tecnologías generalmente no se aplican dichos tamaños porque las membranas se ensuciarán rápidamente y en muchos casos de manera irreversible (AWWA, 2005).

**Tabla 7***Características principales de procesos de membranas<sup>d</sup>*

	<b>Microfiltración (MF)</b>	<b>Ultrafiltración (UF)</b>	<b>Nanofiltración (NF)</b>	<b>Ósmosis Inversa (RO)</b>
Tamaño poro (micras)	5 – 0.1	0.1 – 0.01	0.01 – 0.001	0.001 – 0.0001
Material de membrana <sup>d</sup>	PVDF, PP, PSO cerámica <sup>d</sup>	PVDF, PP, PSO cerámica <sup>d</sup>	A.C. polímeros laminares	A.C. polímeros laminares
Forma de membrana <sup>d</sup>	Tubular fibra hueca	Tubular fibra hueca enrollar espiral disco <sup>d</sup>	Tubular fibra hueca enrollar espiral disco <sup>d</sup>	Tubular fibra hueca enrollar espiral disco <sup>d</sup>
Presión de trabajo	< 2 bar	1 – 10 bar	5 – 35 bar	8 – 100 bar

Nota: <sup>d</sup> Tomada de (AWWA, 2005).

El elemento básico de estas tecnologías son las membranas, que se caracterizan por el tamaño de poro, material, forma y presión de trabajo, y en la tabla 7 se muestran las principales características de las diferentes tecnologías de membranas (AWWA, 2005).

## **Generalidades para la selección de membranas**

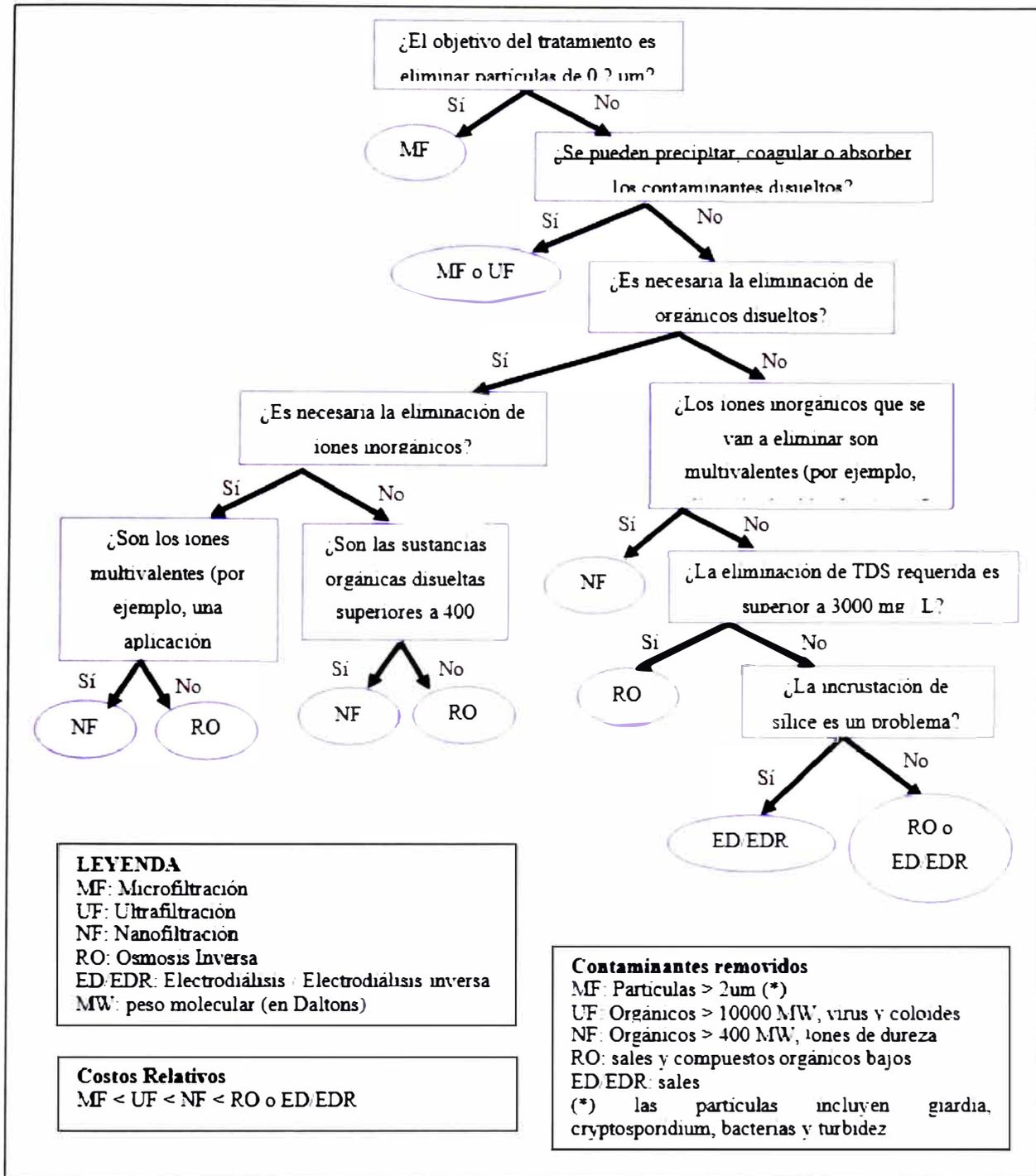
Para realizar una adecuada selección de tecnología a emplear en una determinada aplicación se deben de tener en cuenta varios factores como las características del agua a tratar, los costos, el sitio o las consideraciones específicas de la aplicación, entre otros.

En la Figura 5 se muestra de forma muy general y didáctica un diagrama de flujo para seleccionar un proceso de membrana apropiado (incluidos MF, UF, NF y RO). Dicha figura solo sirve como una herramienta ilustrativa para distinguir los diversos tipos de procesos de membrana en función de la aplicación del tratamiento.

Con el fin de presentar las principales características de las tecnologías de membranas de forma ordenada y resumida se agrupará la descripción de dichas tecnologías considerando la afinidad en un primer grupo entre microfiltración con ultrafiltración y la de nanofiltración con ósmosis inversa en un segundo grupo. Para realizar esta agrupación de tecnologías se pueden realizar considerando factores primarios como tipo de membrana, mecanismo de eliminación, fuerza impulsora del proceso y la aplicación primaria.

**Figura 5**

Proceso general referencial de selección de membranas



Nota: Adaptación tomada del Anual of Water Supply Practices—M46

### **3.3.9 Procesos de Microfiltración (MF) y Ultrafiltración (UF)**

#### **Aspectos generales de procesos de Microfiltración (MF)/ Ultrafiltración (UF)**

Los procesos de microfiltración (MF) y ultrafiltración (UF) son procesos de membrana impulsados por presión que utilizan membranas microporosas para eliminar partículas (incluyendo turbidez y microorganismos), a través de un mecanismo de tamizado, basado en la exclusión de tamaño.

Las membranas MF y UF se pueden fabricar a partir de varios materiales diferentes, que incluyen acetato de celulosa y polímeros sintéticos tales como fluoruro de polivinilideno, polipropileno, polisulfona, polietersulfona y poliacrilonitrilo, para aplicaciones modernas de tratamiento de agua, estos materiales de membrana MF / UF se configuran comúnmente en fibras huecas, aunque pueden estar disponibles otras configuraciones (AWWA, 2005).

Las membranas pueden estar hechas de cerámicas, láminas de metal, polímeros, compuestos naturales y sintéticos. Los materiales más usados para su elaboración incluyen dióxido de titanio o circonio (cerámicas), acetato de celulosa, poliamida, polipropileno, entre otros. Cada uno tiene sus propiedades y resistencias específicas al calor, al ataque de las bacterias, a la corrosión y a la abrasión.

Además, no siempre las membranas son homogéneas. Algunas membranas son diseñadas con un gradiente de densidad y poros diferentes de un lado a otro, y otras se componen de capas de materiales diferentes para una limpieza más fina, a menudo las membranas requieren una limpieza cuidadosa o prefiltración para prevenir su obstrucción. Cuanto más fina sea la membrana y más alta la presión es más probable que la membrana requiera una prefiltración y acondicionamiento para alargar su tiempo de vida útil.

La clave para que la membrana tenga una vida larga es una limpieza en flujo cruzado junto con un frecuente retrolavado o limpieza química, dependiendo del tipo de membrana. Si el líquido a tratar fluye a través de la membrana y no en dirección normal a ella, el funcionamiento de la filtración por la membrana mejora, debido a que el flujo cruzado elimina acumulaciones de sólidos que podrían obturar los poros.

En la recuperación de aguas residuales, la microfiltración y la ultrafiltración (MF/UF) han ganado una rápida aceptación como procesos que proporcionan un nivel confiable y muy alto de eliminación de partículas, turbidez y microorganismos; en los últimos años han venido reemplazado principalmente la filtración de medios (filtros multimedios, filtros de arena, filtros zeolita, etc.) como el método preferido de pretratamiento antes de un proceso de nanofiltración o de ósmosis inversa para proyectos de recuperación avanzados.

Estos métodos de filtración (MF/UF) eliminan partículas y microorganismos de manera muy efectiva. En comparación con sus homólogos convencionales, se distinguen principalmente porque los procesos MF/UF logran la eliminación esencialmente mediante la exclusión de tamaño y a diferencia de los procesos convencionales de coagulación/sedimentación/filtración, no requieren un pretratamiento fisicoquímico para aglomerar partículas o manipular la carga superficial de las partículas para lograr el nivel deseado de eliminación. Sin embargo, hay aplicaciones en las que el acondicionamiento mejora la operación del sistema de membrana de microfiltración y/o ultrafiltración.

Otro de los aspectos a considerar de la filtración por membrana (MF/UF) es que el tamaño de poro es muy uniforme y, por lo tanto, capaz de conseguir una eliminación muy alta o absoluta de un tamaño de partícula o microorganismo objetivo.

Así mismo una característica común de la mayoría de los equipos de membranas MF y UF disponibles actualmente es que se utilizan fibras huecas para realizar la separación. La fibra hueca es particularmente adecuada para su uso como medio de separación porque tiene una alta relación superficie/volumen y la fibra hueca exhibe resistencia bidireccional radial. Esta propiedad permite el lavado a contracorriente con agua, aire o una combinación de ambos. Las fibras huecas son flexibles en su configuración y pueden ser operadas en forma de flujo de afuera hacia adentro o de adentro hacia afuera y pueden usar presión o vacío como la fuerza impulsora a través de la membrana. Las variaciones en los materiales de la membrana y la variedad en las formas en que la membrana se puede configurar y operar facilitan el uso de diseños patentados (AWWA, 2005).

## **Calidad de agua producto de los procesos de microfiltración / ultrafiltración**

Las membranas de microfiltración (MF) y ultrafiltración (UF) están diseñadas para eliminar partículas del agua mediante un mecanismo de tamizado, cada membrana tiene una distribución de tamaños de poro que define qué tipo de barrera se espera bajo operación normal, por otro lado, las especies orgánicas e inorgánicas disueltas no se eliminan mediante membranas MF/UF sin un tratamiento previo avanzado, la especie disuelta debe transformarse en forma de partículas por ejemplo con la adición de carbón activado en polvo para adsorber sustancias químicas de sabor y color, coagulantes u oxidantes para precipitar hierro o manganeso para que luego las partículas cargadas de contaminantes sean rechazadas por la membrana (AWWA, 2005).

A continuación, se indican los principales objetivos del tratamiento por MF/UF.

- Reducción de turbiedad: Las membranas MF y UF tienen mucho éxito en la eliminación de la turbidez con valores de filtrado típicos menores a 0.1 NTU. Debido a estos valores bajos, la calidad del filtrado está determinada por el límite de detección del turbidímetro. La característica principal y la función de los sistemas MF/UF es la capacidad de proporcionar consistentemente un filtrado de baja turbidez que no depende de la calidad del agua de alimentación (AWWA, 2005).
- Eliminación de partículas: El recuento de partículas tiene mayor sensibilidad que la turbidez para medir la efectividad de la eliminación de partículas por membranas MF / UF, debido a que en general, estos métodos proporcionan una alta remoción de partículas; sin embargo, al igual que con la turbidez, las burbujas de aire introducidas durante el lavado a contracorriente y otros artefactos en el filtrado reducen artificialmente las eliminaciones y esto indica que la eliminación de microbios patógenos debe evaluarse directamente o deben desarrollarse sustitutos conservadores (AWWA, 2005).

- Control microbiano: Las membranas MF y UF tamizan las partículas del agua en función del tamaño de poro asociado con el material de membrana específico. Para los sistemas de membranas disponibles en el mercado, los tamaños de poro son generalmente inferiores a 0,3 micras. Por lo tanto, la remoción de turbidez y la eliminación microbiana pueden ser esencialmente completas.
  - Giardia y cryptosporidium: Los métodos de MF/UF han demostrado ser efectivo en la remoción de agentes microbiológicos como los quiste de Giardia y de Cryptosporidium con valores de remoción incluso mayores a 99.99%, estos microorganismos son potencialmente peligrosos en caso de que el agua tratada del efluente se vierta en algún cuerpo receptor como ríos, lagos e incluso en agua de riego. Para otros tipos de agentes microbiológicos las membranas de MF/UF también presentan altos valores de remoción.
  - Virus: La distinción general entre las membranas MF y UF es que las membranas UF pueden rechazar virus, mientras que las membranas MF no pueden. En general, las membranas de UF eliminan un mayor porcentaje de virus incluso más del 99.9% mientras que para las membranas de MF llegan a un porcentaje aproximado de 99%.
- Control orgánico: Las membranas MF y UF están diseñadas para eliminar partículas, no especies orgánicas disueltas, aunque se ha observado cierta reducción en instalaciones piloto y en gran escala. Para eliminar los orgánicos disueltos con membranas MF y UF debe integrarse otros procesos como coagulación y adsorbentes para buscar que se asocien con partículas que pueden ser rechazadas por la membrana MF o UF. Por ejemplo, en la coagulación la cantidad de eliminación está en función de la dosis de coagulante, el tipo de coagulante, el pH, la temperatura, el tiempo de mezclado y la velocidad de mezclado y se llegan a obtener altos valores de remoción, de igual manera se

pueden emplear algunos tipos de adsorbentes como carbón activo en polvo u óxido de hierro para la remoción de otros componentes orgánicos.

- Control inorgánico: Al igual que la eliminación de compuestos orgánicos por membranas MF y UF, la eliminación de compuestos inorgánicos está relacionada con qué porcentaje de la especie se encuentra en estado de partículas. Esto se puede mejorar mediante el uso de una resina coagulante, oxidante o de intercambio iónico. Por ejemplo, la eliminación de hierro y manganeso depende de la oxidación de estas especies para que precipiten. El precipitado puede ser rechazado por membranas MF o UF. El hierro y el manganeso pueden oxidarse por aireación o por oxidantes químicos, como el permanganato, el cloro o el ozono. La aireación suele ser más efectiva para el control del hierro que para el control del manganeso. En el caso de otros contaminantes inorgánicos como el Arsénico, se puede eliminar con membranas MF o UF, pero solo si se usa un adsorbente o coagulante como el cloruro o sulfato férricos. Normalmente la eliminación del As (V) es mucho mayor que el As (III) por lo que se busca la forma de oxidar el arsénico (III) a (V) y lograr una mejor remoción de este contaminante, uno de los oxidantes comúnmente usados en este caso es el hipoclorito de sodio.

### **Pretratamiento para sistemas de microfiltración y ultrafiltración**

- Prefiltración: Son necesarios para eliminar partículas grandes, que pueden tapar la entrada a las fibras en un módulo de microfiltración y ultrafiltración. Los tamaños nominales de prefiltros varían entre 50 y 500  $\mu\text{m}$ . Hay varios tipos de prefiltros disponibles, como discos, filtros de tambor, filtros de anillas o filtros de bolsa para plantas pequeñas (Russell, 2012).
- Ajuste de pH: Puede ser necesario ajustar el pH del agua de alimentación mediante dosificación química antes de la filtración por membrana para mantener el pH dentro del rango operativo recomendado para el material de membrana empleado. Cabe

señalar que el ajuste del pH no es necesario para el control de incrustaciones, porque las membranas MF y UF no eliminan iones disueltos (AWWA, 2005).

- **Coagulación y floculación:** son componentes esenciales en los sistemas convencionales de tratamiento de aguas y efluentes, y son diseñados para remover agentes infecciosos, componentes tóxicos que han sido absorbidos en la superficie de las partículas y precursores de la formación de subproductos de desinfección.
- **Pre-oxidación:** Dependiendo de los constituyentes encontrados en el agua cruda, puede ser necesaria la pre-oxidación para oxidar los iones disueltos para precipitar estos iones antes de la filtración por membrana, el uso de un pre-oxidante evitará la precipitación de los iones disueltos, como el hierro y el manganeso, en la membrana o el permeado, la pre-oxidación se puede realizar por aireación, ajustando el pH a más de 8 o agregando oxidantes químicos, como cloro, dióxido de cloro, ozono o permanganato de potasio, además, si se utiliza un oxidante químico se debe verificar la compatibilidad de la membrana con un oxidante químico y si la membrana tiene una baja resistencia a un oxidante químico, el residuo oxidante debe eliminarse en el agua de alimentación antes de las membranas.

La Tabla 8 presenta una descripción general de los pretratamientos necesarios para eliminar contaminantes específicos en los sistemas de MF y UF.

**Tabla 8**

*Pretratamientos necesarios para los sistemas de MF y UF*

Parámetros	Microfiltración (MF)	Ultrafiltración (UF)
Partículas / Microorganismo	Ninguno	Ninguno
Turbidez	Ninguno	Ninguno
Protozoos	Ninguno	Ninguno
Bacteria	Coagulación	Ninguno
Virus		
Orgánicos	Coagulación / PAC	Coagulación / PAC
TOC	Coagulación / PAC	Coagulación / PAC
DBP precursor	Coagulación / PAC	Coagulación / PAC
Color	Coagulación / PAC	Coagulación / PAC
T&O	PAC	PAC
Pesticidas		

Inorgánicos	Oxidación	Oxidación
Hierro y Manganeseo	Coagulación	Coagulación
Arsénico	Oxidación	Oxidación
Sulfuro de hidrógeno		

*Nota: Adaptación tomada del Anual of Water Supply Practices—M46*

### **Teoría de los procesos de Microfiltración (MF) / Ultrafiltración (UF)**

La aplicación de procesos de membrana, en particular la microfiltración (MF) y la ultrafiltración (UF) en el tratamiento del agua es cada vez más frecuente. Las nuevas regulaciones han provocado un mayor interés en las membranas de baja presión para la eliminación de partículas y la desinfección de membranas, debido a que conllevan a una reducción en el uso de desinfectantes con una posterior reducción en los subproductos de desinfección, además, a medida que aumenta el uso de estos procesos de membrana los costos de los sistemas, tanto iniciales como a largo plazo, han disminuido drásticamente, provocando que uso de membranas también aumente porque generalmente proporcionan una mejor eliminación de partículas que una planta de tratamiento de aguas superficiales convencional (AWWA, 2005).

A continuación, se da una breve explicación de los fundamentos teóricos de las principales características de los procesos con membranas de microfiltración y ultrafiltración.

- Permeación de agua a través de membranas limpias Microfiltración (MF) / Ultrafiltración (UF)

El transporte de agua "pura" (solvente) a través de membranas limpias porosas es directamente proporcional a la presión transmembrana ( $\Delta P$ ) e inversamente proporcional a la viscosidad absoluta ( $\mu$ ), por lo tanto, el Flux volumétrico de agua pura ( $J$ ) se ha modelado utilizando una forma ligeramente modificada de la ley de Darcy (Cheryan, 1998).

La cual se presenta a continuación:

$$J = \frac{Q_{total}}{A} = \frac{\Delta P}{\mu R_m} \dots \text{(Ecuación 3.1)}$$

Donde  $R_m$  representa la resistencia hidráulica de la membrana limpia a la permeabilidad al agua, se ve afectado por el tamaño de los poros de las membranas y tiene dimensiones de longitud inversa, de acuerdo con la ecuación 3.1 se espera que el caudal volumétrico de agua "pura" ( $Q_{total}$ ) a través de un área de superficie dada de membrana limpia ( $A$ ) aumente linealmente al aumentar la presión transmembrana y disminuya al aumentar la viscosidad absoluta ( $\mu$ ) y cabe señalar que con el objeto de simplificar ciertos parámetros en la ecuación 3.1, el Flux de agua se escribe en función del valor absoluto del diferencial de presión transmembrana en lugar del gradiente de presión (Cheryan, 1998).

Aunque todavía hay un debate considerable sobre la comparación de la productividad de las configuraciones de membrana de fuera-adentro (Out-In) y adentro-afuera (In-Out), además, existe un consenso general de que el Flux específico debe calcularse utilizando el área de la superficie de la membrana a la que se aplica el agua de alimentación (AWWA, 2005).

La presión transmembrana se puede calcular en función de la presión de entrada ( $P_i$ ), la presión de salida ( $P_o$ ) y la presión de permeado ( $P_p$ ) (AWWA, 2005):

$$\Delta P = \frac{P_i + P_o}{2} - P_p \dots (\text{Ecuación 3.2})$$

En los diseños más simples, los procesos de MF y UF implican realizar un cribado previo del agua cruda y bombearla bajo presión sobre una membrana en modo directo o de flujo cruzado. Para el modo de filtración directa, la presión transmembrana se puede calcular de acuerdo con (AWWA, 2005):

$$P_{tm} = P_i - P_p \dots (\text{Ecuación 3.3})$$

Donde:

$P_{tm}$  = presión transmembrana, en bares

$P_i$  = presión en la entrada al módulo de MF o UF, en bares

$P_p$  = presión de permeado o filtrado, en bares

Cuando el sistema de MF o UF se opera en el modo de flujo cruzado, la presión transmembrana promedio se determina mediante la siguiente ecuación (AWWA, 2005):

$$P_{tm} = \frac{P_i + P_o}{2} - P_p \dots (\text{Ecuación 3.4})$$

Donde:

$P_{tm}$  = presión transmembrana, en bares

$P_i$  = presión en la entrada al modulo de MF o UF, en bares

$P_o$  = presión en la salida del modulo de MF o UF, en bares

$P_p$  = presión de permeado o filtrado, en bares

Cuando las membranas se operan en un modo de flujo cruzado, hay una caída de presión a lo largo del módulo, que se define por (AWWA, 2005):

$$P = P_i - P_o \dots (\text{Ecuación 3.5})$$

Donde:

$P$  = caída de presión a través del modulo, en bares

$P_i$  = presión en la entrada al modulo de MF o UF, en bares

$P_o$  = presión en la salida del modulo de MF o UF, en bares

Las presiones transmembrana para los sistemas MF y UF generalmente varían de 0.15 a 1 bar y las presiones aplicadas de 0.7 a 2 bar y la aplicación de presión transmembrana produce un filtrado o permeado, además, el flujo de producción total de un sistema de membrana se puede calcular mediante (AWWA, 2005):

$$Q_p = J_{tm} \times S \dots (\text{Ecuación 3.6})$$

Donde:

$Q_p$  = caudal de permeado del sistema, en  $\frac{L}{h}$

$J_{tm}$  = flujo transmembrana, en  $\frac{L}{h \cdot m^2}$

$S$  = superficie efectiva total de la membrana en  $m^2$

## Efectos de la temperatura en el permeado del agua de las membranas

### Microfiltración (MF) / Ultrafiltración (UF)

El efecto primario de la temperatura sobre la permeabilidad del agua a través de las membranas MF / UF se debe a su influencia en la viscosidad. Como se puede observar en la siguiente ecuación 3.7 la viscosidad absoluta del agua ( $\mu$ ) en centipoise depende de la temperatura del fluido, la ecuación se considera aplicable en rango de temperatura (T) 0 ° -35 ° C a presión atmosférica (AWWA, 2005):

$$\mu = 1.777 - 0.052 \times T + 6.25 \times 10^{-4} \times T^2 \dots (\text{Ecuación 3.7})$$

En general se tiene que un aumento de la viscosidad aumentará la presión requerida para mantener un flujo predeterminado como se puede observar en la ecuación 3.7. Por lo tanto, la disminución de la temperatura del agua de alimentación se manifestará ya sea como un flujo reducido de permeado (Flux) o una mayor fuerza impulsora (presión) en las instalaciones de membrana. Por lo tanto, si no se corrige la viscosidad, los efectos de la caída de temperatura pueden interpretarse incorrectamente como ensuciamiento de la membrana. Por ejemplo, 5° C de cambio desde 20°C a 15°C daría como resultado un aumento del 13% en la viscosidad correspondiente a una disminución del flujo del 11,7% a presión constante. Por lo tanto, los datos de los estudios en los que la temperatura puede haber variado deberían normalizarse a una temperatura de referencia, preferiblemente 20 °C usando la ecuación 3.8 (AWWA, 2005).

$$\text{Flux corregido a } 20^{\circ}\text{C} = \text{Flux a temperatura ambiente} \times \frac{\text{viscosidad a temperatura ambiente}}{\text{viscosidad a } 20^{\circ}\text{C}}$$

... (Ecuación 3.8)

Considerando las ecuaciones 3.1 y 3.8 se requerirán presiones transmembrana más altas en el invierno que en el verano para mantener el mismo flujo. El aumento de las presiones transmembrana asociadas con la operación con agua fría también puede desencadenar en una mayor frecuencia de operaciones de limpieza química a menos que el flujo del sistema de membrana disminuya proporcionalmente. Por lo tanto, para una capacidad dada (y presión transmembrana), es posible que sea necesario poner en línea

módulos de membrana adicionales a medida que la temperatura disminuye para disminuir el flujo y mantener una presión transmembrana constante.

## **Especificaciones técnicas de Membranas de Microfiltración (MF) / Ultrafiltración (UF)**

### **Materiales de Membranas**

Los materiales de membrana más comunes son polímeros orgánicos, como el polipropileno (PP) o el fluoruro de polivinilideno (PVDF), o materiales cerámicos. Cada uno tiene sus ventajas y desventajas para la operación y el mantenimiento, y ambos deben considerarse en la búsqueda de la membrana adecuada para la aplicación de microfiltración o ultrafiltración.

- **Membranas poliméricas:** Las membranas poliméricas están formadas por Acetato de celulosa o polímeros sintéticos, como acrilatos o Polisulfona (PS), son membranas livianas, delgadas y requieren poco espacio y se encuentran en muchas configuraciones, desde fibra fina hueca hasta bobinado en espiral y unidades de membrana de placa y marco de lámina plana (AWWA, 2005).

Las membranas de CA son hidrofílicas y, por lo tanto, son resistentes a la incrustación por materia orgánica en el agua de alimentación y son capaces de soportar variaciones de pH en el rango de hasta 8, aunque la vida útil de la membrana se maximiza mediante el funcionamiento entre 5.5 y 6, y temperaturas de hasta 50 °C. Los materiales celulósicos son tolerantes al cloro solo en bajas concentraciones, generalmente menos de 1 mg / L. Las membranas PS son uno de los materiales de membrana más ampliamente utilizados en las membranas MF y UF debido a su tolerancia relativamente alta al pH y la resistencia a los oxidantes. Tienen un rango de pH de aproximadamente 2 a 13 y pueden soportar altas temperaturas de aproximadamente 75 ° C. Son bastante resistentes a la oxidación por cloro u otros oxidantes utilizados en el tratamiento del agua potable. Además

de PS, los dos materiales principales utilizados como base para la formulación de membranas son PVDF (Fluoruro de Polivinilideno) y PES (Polieter sulfona).

- Membranas cerámicas. Las membranas cerámicas se fabrican sinterizando materiales inorgánicos en una forma cerámica quebradiza, similar a la arcilla. Los materiales de construcción pueden ser óxido de aluminio, dióxido de titanio, dióxido de circonio o un compuesto de carbono, estas membranas son más gruesas que las membranas orgánicas y generalmente se forman en un monolito de membranas tubulares, así mismo, las membranas de cerámica pueden tener una mayor resistencia al transporte de agua y, por lo tanto, pueden requerir una alta presión transmembrana para mantener el flujo deseado, sin embargo, a menudo son más fáciles de mantener y limpiar que las membranas poliméricas orgánicas, lo que puede traducirse en un menor costo operativo (AWWA, 2005).

Las membranas cerámicas tienen una resistencia a un rango muy amplio de pH, generalmente de 0 a 14. Son capaces de soportar altas temperaturas (a veces superiores a 100 ° C) y presiones muy altas, hasta 2 kPa. Las membranas cerámicas pueden mantener altos flujos de agua del producto durante la operación si se emplean procedimientos de limpieza adecuados.

### **Geometrías de membranas**

Las fibras capilares en espiral, tubulares y huecas son las más utilizadas. Para MF y UF, las configuraciones en espiral no se han empleado tradicionalmente debido a la naturaleza de lámina plana de la membrana, que presenta dificultades para mantener limpia la superficie de la membrana, además, las configuraciones de fibra hueca y tubular son las más comunes para los sistemas de microfiltración y ultrafiltración; permiten que la membrana se lave a contracorriente, lo que controla el ensuciamiento causado por partículas y materiales orgánicos (AWWA, 2005).

Las ventajas y desventajas de cada geometría de membrana se describen en las tablas 9 y tabla 10.

**Tabla 9**

*Ventajas y desventajas de la fibra hueca*

**Ventajas y desventajas de la fibra hueca**

**Ventajas:**

Flujo cruzado lineal las velocidades son bajas, desde 0 hasta 2.5 m / seg.

Con patrón de flujo de adentro hacia afuera, las velocidades de corte son altas debido a los pequeños lúmenes internos de la fibra.

Superficie alta área a volumen o "densidad de empaque" de la membrana.

Fibras se puede lavar a contracorriente y Bajo presiones transmembrana, generalmente de 0.2 a 1.0 bar, pero puede ser operado a 3 bar en algunos casos.

Baja caída de presión a través del módulo, que varía de 0.1 a 1 bar.

**Desventajas:**

Pequeña Las membranas de diámetro de tubo son susceptibles de taponarse a menos que se aplique un cribado previo (AWWA, 2005).

Grande El número de fibras en el módulo puede presentar dificultades para detectar la pérdida de integridad de la membrana en plantas grandes.

*Nota: Adaptación tomada del Anual of Water Supply Practices—M46*

**Tabla 10**

*Ventajas y desventajas de las configuraciones tubulares para MF*

**Ventajas y desventajas de las configuraciones tubulares para MF**

**Ventajas**

Gran diámetro de los canales (1 a 2.5 cm) permite el tratamiento de aguas con alto contenido de sólidos y partículas grandes.

Fibra de alto flujo cruzado Se pueden utilizar velocidades (hasta 5 m / seg) para controlar el ensuciamiento. Gran diámetro de canales permite una fácil limpieza; La limpieza mecánica puede emplearse en algunos casos.

Exhibición de membranas tubulares cerámicas.

Buena resistencia mecánica.

**Desventajas**

Bajo relación de área superficial a volumen o "densidad de empaque" de la membrana.

Membranas cerámicas tubulares de mayor costo por cuadrado metro de área de filtración en comparación con otras configuraciones de membrana (AWWA, 2005).

*Nota: Adaptación tomada del Anual of Water Supply Practices—M46*

Entre las más comunes geometrías de membranas para tratamiento de agua/efluentes:

- **Fibra hueca:** Las membranas de fibra hueca MF y UF generalmente consisten en varios cientos a miles de fibras encerradas en un módulo, las fibras se unen en cada extremo con una resina epoxi o de uretano. Los diámetros internos de la fibra, que son pequeños para evitar el colapso de la fibra cuando se colocan bajo presión, varían de 0,4 a 1,5 mm. La fuerza física de estas fibras de membrana les permite ser retrolavadas. Hay dos regímenes de flujo diferentes en fibra hueca MF y UF: de adentro hacia afuera (In/Out) y de afuera hacia adentro (Out/In). Debido a que el agua fluye a través de un canal concéntrico, la membrana que opera In/Out permite un buen control sobre la hidrodinámica del módulo, por el contrario, es más difícil controlar el flujo de un módulo que opera Out/In (AWWA, 2005).
- **Tubular:** Las membranas tubulares tienen diámetros internos relativamente grandes, que varían de 1.0 a 2.5 cm aproximadamente. Las membranas, que pueden estar compuestas de materiales poliméricos o cerámicos, generalmente se colocan dentro de tubos de acero inoxidable o plástico reforzado con fibra de vidrio que se sellan con una junta y abrazaderas de anillo exterior. Pueden ser canales de flujos únicos o múltiples. El agua de alimentación, que está bajo presión, fluye a través de la luz interna del tubo, y el permeado se recoge en la cubierta externa del módulo (AWWA, 2005).

### **Criterios generales para la selección de membranas de Microfiltración (MF) / Ultrafiltración (UF)**

Las características de selección de estas membranas se muestran en la Tabla 11 (AWWA, 2005).

**Tabla 11**

*Características de sección de material de membranas MF/UF*

Material de membrana	Tipo	Hidrofobicidad	Tolerancia a Oxidantes	Rango de PH	Resistencia al ensuciamiento/ facilidad de limpieza
PVDF	MF/UF	Hidrofílico modificado	Muy alta	2 - 11	Excelente
PP	MF	Levemente hidrofóbico	Baja	2 - 13	Aceptable
Polietersulfona (PES)	UF	Muy hidrofílico	Alta	2 - 13	Muy bueno
Polisulfona (PS)	UF	hidrofílico modificado	Moderado	2 - 13	Bueno
Acetato de Celulosa (CA)	UF	naturalmente hidrofílico	Moderado	5 - 8	Bueno

*Nota: Adaptación de referencia Anual of Water Supply Practices—M46*

**Características de operación de procesos con membranas de Microfiltración**

**(MF) / Ultrafiltración (UF)**

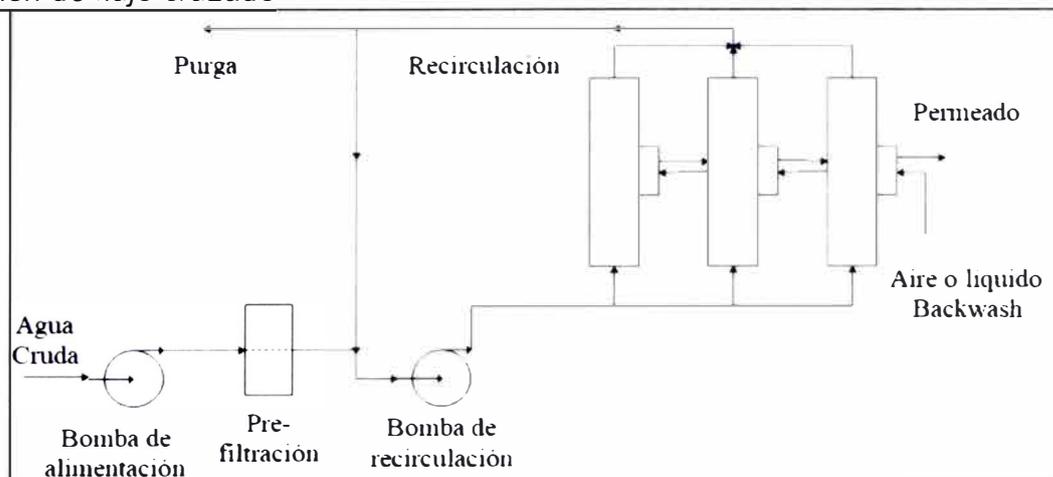
**Configuración de proceso**

Los sistemas de MF y UF operan utilizando tres configuraciones de proceso diferentes, dichas configuraciones se muestran en la figura 6, figura 7 y figura 8.

- Operación en Flujo Cruzado

**Figura 6**

*Operación de flujo cruzado*

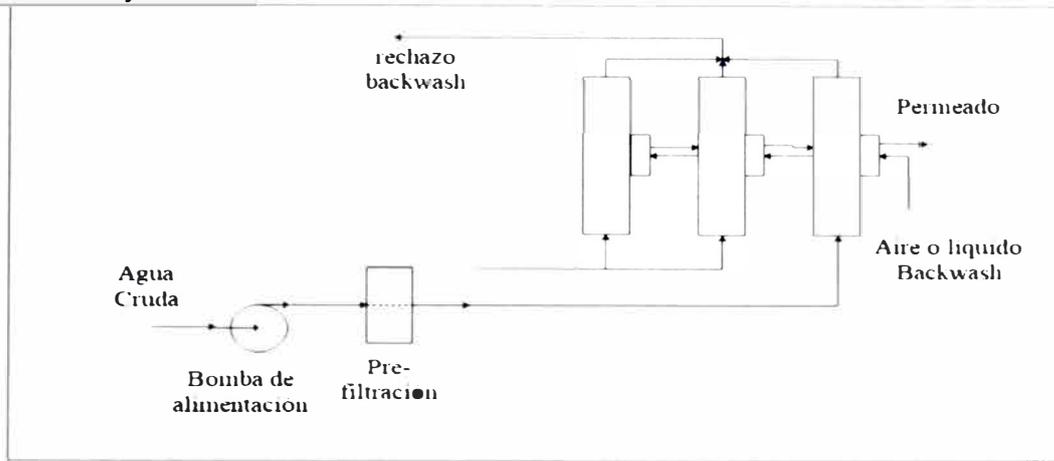


Nota: Adaptación tomada de Dupont 2021 Filmtec Reverse Osmosis Membranes Technical Manual

- Operación en Flujo Directo

**Figura 7**

*Operación de flujo directo*

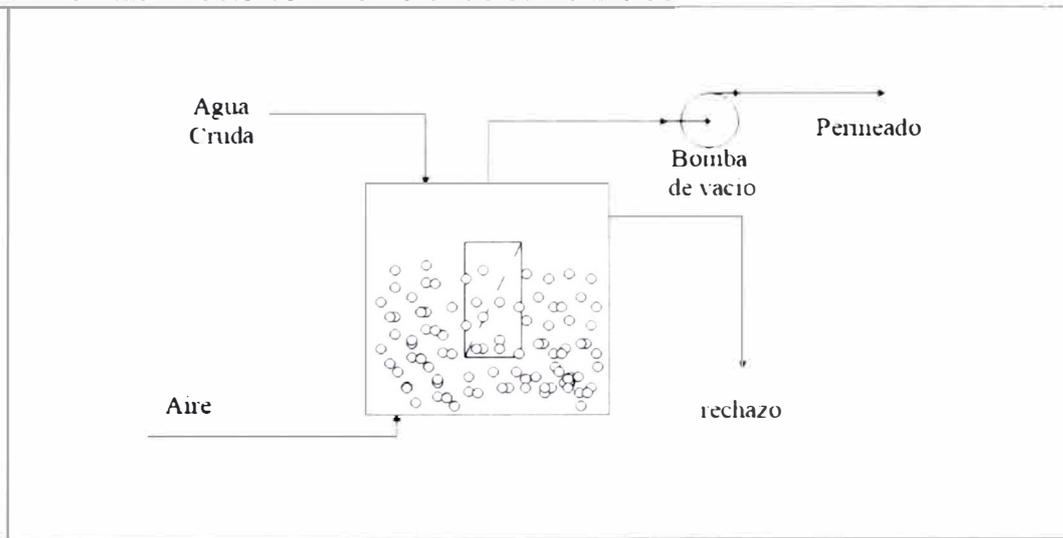


Nota: Adaptación tomada de Dupont 2021 Filmtec Reverse Osmosis Membranes Technical Manual

- Operación en Flujo Directo con membranas sumergibles

**Figura 8**

*Operación de flujo directo con membranas sumergibles*



Nota: Adaptación tomada de Dupont 2021 Filmtec Reverse Osmosis Membranes Technical Manual

**Etapas durante la operación de los sistemas de Microfiltración (MF) / Ultrafiltración (UF)**

- Etapa de filtración: Cuando se considera el funcionamiento del sistema de membranas de MF y UF, hay dos conceptos operativos principales: presión y flujo constantes.
  - Presión Constante: significa que la presión de alimentación se mantiene a una presión de punto de ajuste independientemente del cambio en la velocidad de flujo del sistema. Con este concepto, el flujo de permeado disminuirá con el tiempo a medida que aumenta la presión transmembrana debido al taponamiento de la membrana antes de cada lavado a contracorriente. La ventaja del concepto de presión constante es que las bombas de alimentación pueden dimensionarse para mantener la presión constante, y los requisitos de energía son constantes. Desafortunadamente, el flujo de permeado disminuye con el tiempo, lo que significa que se reduce la producción de la planta.
  - Flujo Constante: para el concepto operativo de flujo constante, la presión de alimentación aumenta con el tiempo para mantener un flujo constante de permeado a través de las membranas. Debido al ensuciamiento de la membrana, la presión transmembrana aumenta, por lo que la presión de alimentación debe aumentar directamente para mantener el flujo constante entre los lavados. La ventaja del concepto de flujo constante es que no se necesita sobredimensionar el sistema para cumplir con la capacidad de diseño de la instalación. Las bombas de alimentación deben dimensionarse para acomodar los requisitos de presión más altos, lo que significa que la eficiencia energética disminuirá y los requisitos de energía aumentarán a medida que aumenta la presión transmembrana.
- Etapas de limpieza durante la operación de sistemas de microfiltración y ultrafiltración:
  - Lavado a contraflujo (retrolavado o backwash): Para controlar la deposición de la acumulación de sólidos en la superficie de la membrana, se realiza un

retrolavado de la membrana empleando una bomba o sistema de bombeo para el lavado a contracorriente, que puede realizarse utilizando un medio líquido o gaseoso, en el caso de contar con varios trenes de membranas se realizaría el retrolavado de manera secuencial y no en paralelo, para la mayoría de los sistemas, el retrolavado es completamente automático; iniciado cuando la presión transmembrana alcanza un cierto punto de ajuste, también puede iniciarse después de un período de operación preprogramado o después de que se produzca un volumen predeterminado de permeado y para la mayoría de los sistemas de baja presión, el lavado a contracorriente se realiza cada 30 a 120 minutos de operación durante 1 a 5 minutos (AWWA, 2005).

- Lavado a contraflujo mejorado químicamente - CEB (chemical enhanced backwashing): La tendencia actual es hacia la fusión de la limpieza química y el lavado a contracorriente, en lugar de simplemente usar una corriente líquida para lavar las membranas, se emplean productos químicos en el agua de lavado para mejorar la eficacia del lavado y el cloro se emplea a menudo en concentraciones de varios cientos de miligramos por litro para limpiar la superficie de la membrana, ayudar a la oxidación de los materiales orgánicos adsorbidos y controlar el crecimiento biológico en la piel de la membrana o el material de soporte, además, los períodos de remojo de membrana de varias horas con cloro, base, ácido u otros agentes de limpieza a menudo se incorporan en la estrategia de retrolavado de membrana, comúnmente este proceso adicional se le denomina "retrolavado mejorado químicamente" o CEB por sus siglas en inglés (AWWA, 2005).
- Limpieza Química en sitio de Membranas – CIP (Cleaning in place) A medida que la concentración de materiales contaminantes se acumula en la superficie de la membrana, la pérdida de Flux continuará aumentando; el

lavado a contracorriente de la membrana es el método de rutina para eliminar estos materiales, sin embargo, cuando los incrustantes ya no se pueden eliminar de la superficie de la membrana mediante lavado a contracorriente, se requiere una limpieza química, después de la limpieza química, se logra la restauración parcial o total del Flux (o presión) transmembrana; las consideraciones en la limpieza química incluyen la frecuencia, la duración, los productos químicos y sus concentraciones, los volúmenes de limpieza y enjuague, la temperatura, la recuperación y la reutilización de los productos químicos de limpieza, y la neutralización y eliminación de dichos productos químicos, así mismo, se puede emplear una variedad de agentes para la limpieza química de membranas de baja presión, incluidos detergentes, ácidos, bases, agentes oxidantes, agentes secuestrantes y enzimas, por ejemplo, el cloro puede emplearse para controlar bioincrustaciones en dosis que varían de 2 a 2,000 mg / L dependiendo del tipo de material de la membrana y la limpieza generalmente se inicia después de que la presión transmembrana excede de 0.7 a 2 bar, dependiendo de la membrana particular, a veces se opta por elevar la temperatura de la solución de limpieza entre 35 ° - 40 ° C para mejorar la eficacia de la limpieza (AWWA, 2005).

### **Reducciones en la productividad de membranas**

- Mecanismos de disminución de Flux
  - Polarización por concentración: Es la acumulación de partículas rechazadas cerca de la superficie de la membrana que hace que la concentración en dicho punto sea mayor que la de la solución de ingreso y afectan negativamente disminuyendo el flujo de permeado obtenido.
  - Ensuciamiento: En los procesos de membrana MF / UF a menudo se define como la reducción gradual en el caudal de agua filtrada a presión constante

(o similar, un aumento en la presión transmembrana a flujo constante), causada por la adsorción o deposición de materia suspendida dentro de los poros de la membrana o en la superficie de la membrana, los mecanismos de incrustación se clasifican en adsorción de poros, bloqueo de poros y formación de torta. además, la adsorción y el bloqueo de los poros son mecanismos internos de ensuciamiento de la membrana, mientras que la formación de torta se produce en la superficie de la membrana y se define como un ensuciamiento externo, así mismo, se puede predecir la disminución del flujo de permeado para estos tres mecanismos (AWWA, 2005).

El modelo de adsorción de poros supone que la disminución del flujo de permeado se atribuye a la disminución del diámetro de poro de la membrana que resulta de la deposición de partículas dentro de los poros de la membrana, mientras que el modelo de bloqueo de poros describe la disminución en el flujo de permeado como la reducción del número total de poros causados por el bloqueo completo de los poros por partículas, ambos procesos causan una reducción en la permeabilidad de la membrana y el modelo de formación de torta, en contraste con los dos anteriores, describe la disminución del flujo de permeado (o aumento de la presión transmembrana) mediante la formación de una capa en la membrana (AWWA, 2005).

- Resistencia y compresibilidad de la torta durante el flujo directo o perpendicular (dead-end): durante la filtración convencional o de flujo directo, cuando las partículas son más grandes que los poros, se eliminan en la superficie como una torta, las cuales incluso pueden reducir la permeabilidad y la porosidad, por lo que dependiendo del caso debe analizarse la compresibilidad de la torta formada por los contaminantes sobre la superficie de las membranas (AWWA, 2005).

- Suspensión de partículas durante flujo cruzado: En algunos casos, se implementa la filtración de flujo cruzado (en contraste con la filtración dead-end). Normalmente la resistencia de la torta formada en este tipo de flujo disminuye con el aumento de la velocidad del flujo.
- Incrustaciones Orgánicas: La presencia de componentes orgánicos en el agua de origen puede causar una pérdida significativa de productividad al tapar los poros de la membrana, adsorberse en la matriz interna de la membrana y formar un gel cohesivo en la capa de la torta (AWWA, 2005).
- Ensuciamiento Biológico: la bioincrustación ocurre como un proceso de dos pasos: (1) fijación de microorganismos a la superficie de la membrana y (2) formación de biopelícula a través de la multiplicación celular. La adhesión microbiana a la superficie de la membrana es un proceso muy complejo y se rige por diversos factores bióticos y abióticos, las propiedades de la superficie de la membrana, la química de la solución del agua de alimentación y las condiciones de funcionamiento hidrodinámico pero que una vez producido disminuye la productividad de las membranas (AWWA, 2005).

### **3.3.10 Procesos de Nanofiltración (NF) y Ósmosis inversa (RO)**

#### **Aspectos generales de los procesos de NF/RO**

La ósmosis inversa (RO) y la nanofiltración (NF) también son procesos impulsados por la presión; sin embargo, estas tecnologías utilizan membranas semipermeables para apuntar principalmente a la eliminación de contaminantes disueltos mediante un proceso de separación controlado por difusión, cuando se aplica alta presión por encima del gradiente osmótico natural del sistema al lado de alimentación de la membrana, el agua es forzada a través de la estructura molecular de la superficie de la membrana mientras que los sólidos disueltos (es decir, los solutos) son rechazados casi en su totalidad y para un sistema de membrana dado y sus condiciones de operación, la presión de alimentación

requerida depende principalmente de la concentración de sólidos disueltos totales (TDS) y la temperatura del agua de alimentación, por ejemplo, las membranas de RO utilizadas para desalinizar el agua de mar requieren alrededor de 800 a 1,200 psi, mientras que las aplicaciones de agua salobre pueden requerir una presión de alimentación que varía de 100 a 600 psi, así mismo las membranas de NF para aplicaciones como reducción de dureza del agua pueden requerir solo de 70 a 120 psi (AWWA, 2005).

Los dos materiales primarios utilizados para fabricar membranas de RO y NF son el acetato de celulosa (y sus derivados) y varias poliamidas utilizadas en la construcción de membranas compuestas de película delgada. aunque las membranas de RO y NF se fabrican en varias configuraciones físicas, la configuración en espiral es la única que se usa ampliamente en aplicaciones de tratamiento industrial (AWWA, 2005).

Una de las tecnologías más importantes y de amplia aplicación en los tratamientos de agua y efluentes es la Ósmosis Inversa (RO por sus siglas en inglés) debido a su capacidad para separar la mayor cantidad de contaminantes y su alto grado de eficiencia, puede eliminar del agua más del 99% de todos los minerales disueltos y compuestos orgánicos, así como la materia biológica y coloidal en suspensión (AWWA, 2005).

Para comprender el proceso de Ósmosis Inversa, primero debemos conocer algunos conceptos que facilitaran su entendimiento:

- Ósmosis: es definida como el transporte espontaneo de un solvente (en este caso el agua) desde una solución diluida hacia una solución concentrada a través de una membrana semipermeable ideal que impide el pase del soluto (iones en solución) pero permite que el solvente (agua) fluya (AWWA, 2005).
- Presión osmótica: Es la presión sobre la membrana creada por el proceso natural del agua que fluye desde una solución diluida (es decir, una concentración más baja de sólidos disueltos) a través de una membrana semipermeable a una solución más concentrada (es decir, una concentración más alta de sólidos disueltos) (AWWA, 2005).

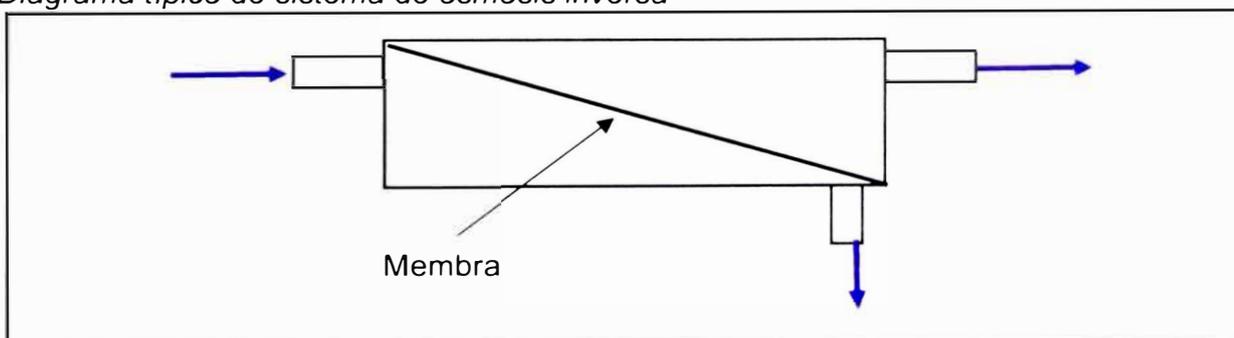
Por lo tanto, de lo anteriormente indicado se define la ósmosis inversa como el proceso por el cual se aplica energía en forma de presión hidráulica con el objetivo de superar tanto la resistencia física de la membrana como la presión osmótica del sistema, debido a que esta presión se aplica para “forzar” el agua contra el gradiente osmótico natural produciendo mayor cantidad de agua diluida a partir de agua más concentrada, es decir el disolvente fluirá a través de la membrana para formar una disolución diluida en el lado opuesto y una disolución más concentrada en el lado donde se aplica la presión (AWWA, 2005).

Este proceso de ósmosis inversa emplea membranas semipermeables, esto significa que es permeable a algunos componentes que son arrastrados por la corriente de alimentación e impermeables a otros. La temperatura de la disolución, las propiedades de la membrana y las diferencias en las presiones aplicadas y osmóticas influyen en el flujo (AWWA, 2005).

El agua que alimenta un sistema de ósmosis está presurizada y parte de ella atraviesa la membrana, la cual se denomina permeado. A medida que el agua atraviesa la membrana, los solutos son rechazados y aumenta la concentración en la corriente de alimentación. El permeado está relativamente libre de los solutos objetivos disueltos y sale a una presión casi atmosférica; en tanto que el agua restante, llamada concentrado, escapa por el extremo del depósito presurizado a una presión casi igual a la del caudal de alimentación, ver figura 9.

### Figura 9

*Diagrama típico de sistema de osmosis inversa*



Nota: Elaboración propia

La ósmosis inversa es un proceso continuo de separación, es decir, no cuenta con un ciclo periódico de retrolavado, sin embargo, es recomendable que el equipo realice un enjuague rápido con agua osmotizada cada vez que es apagado por un periodo corto para evitar incrustaciones por el agua en reposo.

La principal desventaja de la Ósmosis Inversa es su alto costo de implementación y mantenimiento, así como la necesidad de un adecuado pretratamiento que evite su ensuciamiento prematuro.

Para un sistema de membrana dado y las condiciones de operación, la presión de alimentación requerida depende principalmente de la concentración de sólidos disueltos totales (TDS) y la temperatura del agua de alimentación; los niveles de TDS más bajos y las aguas más cálidas requieren una presión de alimentación más baja para producir una calidad y cantidad similar de permeado (AWWA, 2005).

Por otro lado, las membranas de nanofiltración (NF) se desarrollaron a fines de los años setenta como una variante de membranas de ósmosis inversa (RO) con características de rechazo reducidas para iones más pequeños y menos cargados, como el sodio y el cloruro. Dado que estas membranas también requerían una presión de alimentación de operación más baja la nanofiltración (NF) era un proceso muy adecuado para aplicaciones como el ablandamiento y la eliminación de precursores de subproductos de desinfección en los cuales el TDS no era una preocupación principal, porque los objetivos del tratamiento podrían ser logrado a menores costos de energía que con una ósmosis inversa (AWWA, 2005).

### **Calidad de agua producto de los procesos de nanofiltración y ósmosis inversa**

Las membranas de nanofiltración (NF) y ósmosis inversa (RO) están diseñadas para la desalación, eliminación / reducción de precursores de DBP, dureza (es decir, ablandamiento), color, contaminantes inorgánicos (p. Ej., Nitrato, fluoruro, arsénico, metales pesados, radionúclidos, etc.), compuestos orgánicos sintéticos y volátiles, patógenos y reutilización potable indirecta. Por otro lado, si bien los procesos RO y NF

pueden reducir los niveles de partículas (es decir, turbidez, recuento de partículas, etc.), la tecnología no se aplica específicamente para este propósito debido a que las membranas semipermeables no son porosas (y por ende, no pueden ser retrolavadas), cualquier carga de partículas significativa puede ensuciar la membrana de manera rápida y, a veces, irreversible. A continuación, se indican los principales objetivos del tratamiento por NF/RO.

- Remoción de Sales (desalación / reducción de TDS): La aplicación principal de las membranas RO es la es la remoción de sales (es decir, la reducción de TDS) del agua subterránea salobre, agua de mar, agua residual tratada terciaria o agua de proceso industrial. Las capacidades de rechazo de diferentes productos disponibles comercialmente pueden variar significativamente, y en muchos casos se seleccionan membranas particulares específicamente para un rango objetivo de TDS. Debido a que a mayor reducción de TDS aumenta la presión requerida, lo que se traduce en mayores costos de energía, en algunos casos puede ser significativo garantizar que el TDS solo se reduzca en la medida en que se cumpla el objetivo de tratamiento deseado (AWWA, 2005).
- Eliminación de contaminantes inorgánicos: La ósmosis inversa es una de las mejores tecnologías disponible para eliminar la mayoría de los compuestos inorgánicos (COI) regulados por la Ley de Agua Potable Segura (SDWA) (Clark y Parrotta 1991), incluidos los radionúclidos y el arsénico, entre muchos otros. Esta clasificación refleja la capacidad de eliminación de amplio espectro del proceso de RO. La capacidad del NF para eliminar los compuestos orgánicos e inorgánicos está determinada en gran medida por el carácter específico de los sólidos disueltos del agua. El rechazo de NF de cationes multivalentes específicos es una función del pH de la solución y la especiación de otros componentes iónicos presentes en mayor grado que para el proceso de RO.
- Una de las aplicaciones más comunes de RO para tratar un contaminante inorgánico específico es la eliminación de nitrato. El RO se considera un proceso

eficaz de eliminación de nitrato para los suministros de agua subterránea contaminados por el uso agrícola de fertilizantes que contienen nitrato o descargas de fosas sépticas. El rechazo del nitrato por algunas membranas de RO es significativo; Las membranas de agua salobre de baja presión de poliamida compuesta típicamente exhiben rechazo de nitrato de sodio en el rango de 93 a 97 por ciento (FilmTec 1988; Toray 1989).

- En general, para los componentes de la calidad del agua o contaminantes inorgánicos específicos que son relativamente comunes, los fabricantes de membranas RO / NF tienen un software de modelado que puede predecir la calidad del permeado con bastante precisión. Sin embargo, para la eliminación de contaminantes inorgánicos menos comunes para los cuales RO y NF no se han utilizado con tanta frecuencia, los rechazos generalmente se basan en el fabricante, la utilidad o la experiencia e investigación independiente de terceros. Aunque cada vez es menos común para muchos contaminantes inorgánicos conocidos, se pueden realizar pruebas piloto para cuantificar o verificar los niveles de rechazo, si se desea.
- Remoción de Patógenos: Debido a que las membranas semipermeables de RO no son porosas, tienen la capacidad de cribar microorganismos y partículas en el agua de alimentación (AWWA, 2005). Debido a diversos estudios la RO figura como una tecnología de filtración que es efectiva para eliminación de Giardia y virus, por lo que comúnmente no se necesita realizar pruebas piloto ni otros estudios para demostrar que el proceso de RO puede lograr la eliminación de virus de 99.9% en Giardia y 99.99% cuando se combina con la desinfección. Sin embargo, se debe tener en cuenta que las membranas de RO no son necesariamente barreras absolutas, dichas membranas están diseñadas principalmente para la eliminación de TDS en lugar de partículas, por lo tanto, los elementos enrollados en espiral RO no están destinados a ser membranas esterilizantes y puede ocurrir algún paso de

material particulado, incluidos los patógenos, a pesar de la ausencia de poros en la membrana.

- Uso de membranas para reúso de agua: En algunos de los tratamientos de los efluentes las membranas de Ósmosis Inversa eliminan muchos contaminantes, incluidos nitrógeno, metales pesados, TOC y agentes patógenos, y posteriormente el permeado de alta calidad puede ser inyectado en algún acuífero subterráneos para su recarga o vertidos a un cuerpo de agua previo acondicionamiento, lo cual amplía las posibilidades de aplicaciones para esta tecnología.

### **Pretratamiento y Postratamiento para sistemas de nanofiltración y ósmosis inversa**

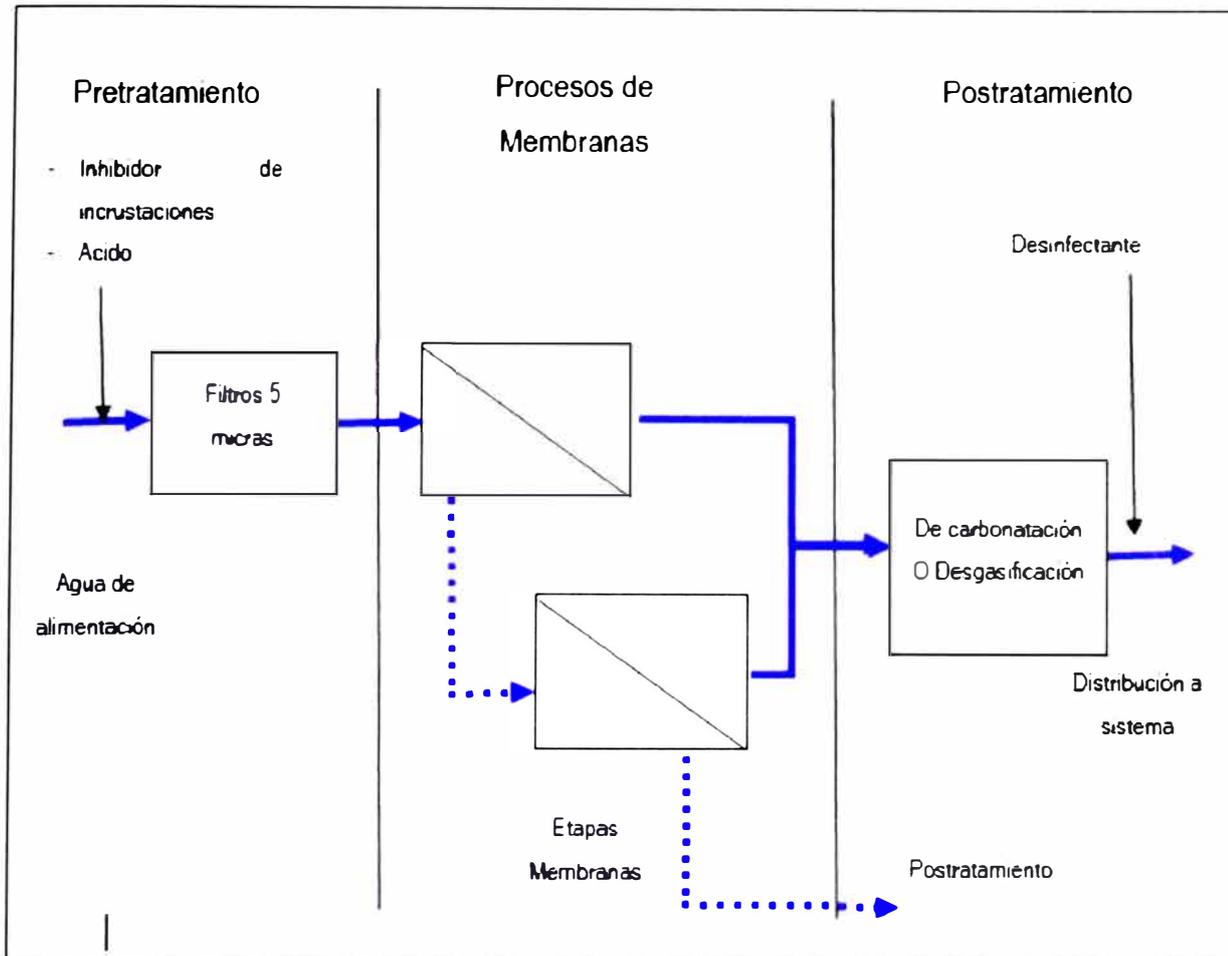
Esencialmente, todas las fuentes de agua a las que se aplican los sistemas de membrana de ósmosis inversa o nanofiltración deben someterse a ciertos niveles de pretratamiento. Los procesos de pretratamiento en un sistema de NF/RO generalmente implican agregar ácido, inhibidor de incrustaciones o ambos para evitar la precipitación de sales escasamente solubles a medida que los iones rechazados se vuelven más concentrados, seguidos de una filtración de cartucho de 5 a 20  $\mu\text{m}$  para proteger las membranas de la formación de partículas. E la figura 10 se observa un diagrama de la secuencia típica de tratamiento de agua por sistemas de ultrafiltración y osmosis inversa.

El postratamiento puede incluir muchas operaciones unitarias comunes al tratamiento convencional de agua potable, como aireación, desgasificación, ajuste de pH, adición de productos químicos para el control de la corrosión, fluoración y desinfección (AWWA, 2005).

Una comprensión profunda de las características de la fuente de agua y los objetivos de calidad del agua del producto es esencial para el diseño y operación exitosa de una planta de tratamiento de NF/RO, porque los contaminantes encontrados en la fuente de agua determinan qué combinación de métodos de pretratamiento y postratamiento serán necesarios (AWWA, 2005).

**Figura 10**

*Sistema típico de sistema de osmosis inversa con nanofiltración*



Nota: Elaboración propia

A continuación, se indican los principales pretratamientos para sistemas NF/RO.

- Prevención de daño de membranas por oxidación: Los ataques químicos a las membranas generalmente ocurren a través de la oxidación o la hidrólisis. Aunque las membranas de poliamida no son particularmente sensibles al pH, todas las variedades de estas membranas son intolerantes al cloro y ciertos otros agentes oxidantes fuertes hasta cierto punto. La dechloración mediante la adición de metabisulfito de sodio en exceso debería proteger la poliamida por lo cual es ampliamente usado en la industria.
- Eliminación de partículas: El pretratamiento de sólidos en suspensión generalmente es un filtro de cartucho de 5  $\mu\text{m}$  ubicado inmediatamente aguas arriba de la bomba

de alta presión. Para aquellos casos en los que el tamaño de partícula contaminante es tan pequeño que la filtración por sí sola no es suficiente o la carga de sólidos suspendidos excede la capacidad de filtración para operar de manera efectiva, es necesario agregar productos químicos para coagular las partículas coloidales. Las técnicas de pretratamiento pueden involucrar sistemas relativamente complejos, tales como coagulación / floculación / sedimentación / filtración, para aplicaciones donde ocurren altas concentraciones de sólidos en suspensión en el agua (AWWA, 2005).

- Control de escalantes: A medida que el agua del producto que es relativamente baja en solutos pasa a través de la membrana, el agua de alimentación restante se concentra cada vez más en sólidos disueltos; a ciertos grados de concentración, se puede exceder la solubilidad de varias sales, lo que hace que las sales precipiten sobre la superficie de la membrana, este proceso se llama escalamiento y las incrustaciones pueden reducir severamente el flujo de permeado y pueden dañar irreversiblemente la membrana; por ejemplo, el sulfato de calcio es particularmente conocido por su capacidad de dañar las membranas, los inhibidores de incrustaciones pueden agregarse a niveles muy bajos, generalmente menos de 5 mg / L, en el agua de la fuente de membrana para evitar que se formen incrustaciones en múltiples niveles de sobresaturación (AWWA, 2005).

Dos tipos de inhibidores de incrustaciones químicas que han logrado un uso generalizado en la producción de agua potable son las polifosfatos y los inhibidores de incrustaciones poliméricas de alto rendimiento, generalmente los poliacrilatos.

- Control de incrustaciones biológicas: Controlar del ensuciamiento biológico es esencial para que un sistema de membrana funcione a niveles de diseño de manera consistente. El interior de un elemento de membrana es un lugar ideal para el crecimiento de microorganismos debido a que es húmedo y posee una gran superficie. Una vez establecidos en la membrana, los microbios pueden adherirse al polímero tenazmente. Más dañino que los organismos mismos es el polisacárido

que secretan en la biopelícula. Esta biopelícula cubre uniformemente la membrana, causando un deterioro en el flujo y el rechazo de sal. La población de microorganismos en la mayoría de las fuentes de agua subterránea salobre es lo suficientemente pequeña como para que no se requiera un tratamiento previo para el ensuciamiento biológico, siempre que el sistema de membrana se use de forma bastante continua. Para aguas superficiales, se debe considerar el control de incrustaciones microbianas en el diseño y la operación. Uno de los mejores pasos para eliminar las incrustaciones biológicas es dimensionar la capacidad del sistema de membrana para satisfacer la necesidad de agua. Cualquier membrana que se deje fuera de servicio durante más de un día o dos debe enjuagarse con agua pretratada o permearse diariamente para evitar que una población de bacterias tolerablemente pequeña crezca a un nivel intolerable. Si el sistema va a estar fuera de servicio por largos períodos de tiempo (como una semana o más), es necesario enjuagar las membranas con permeado y agregar un desinfectante o conservante de membrana recomendado por el fabricante. Las soluciones bisulfito de sodio son efectivas para evitar que los microbios proliferen en los elementos de la membrana durante el almacenamiento (AWWA, 2005).

### **Teoría de los procesos de NF/RO**

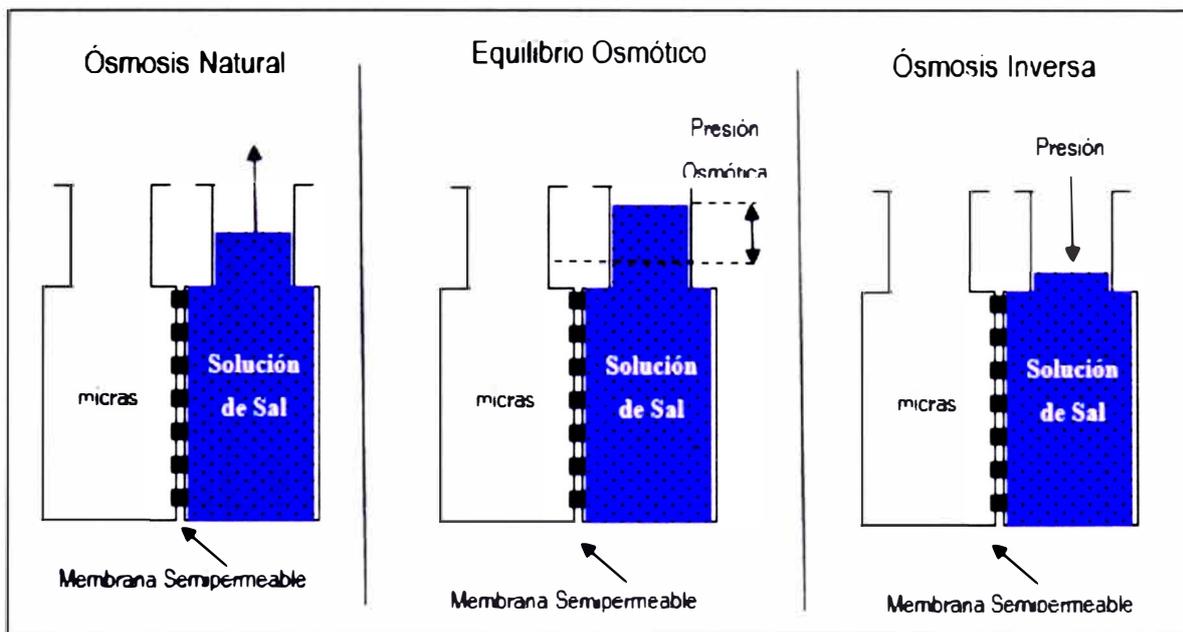
El proceso de RO puede eliminar del agua más del 99 por ciento de todos los minerales disueltos y más del 95 por ciento de los compuestos orgánicos, así como la materia suspendida biológica y coloidal, incluida la turbidez; el proceso NF se usa principalmente para la eliminación orgánica y el ablandamiento del agua, y puede eliminar del 5 al 95 por ciento de TDS (AWWA, 2005).

En ósmosis natural, una membrana semipermeable separa agua pura (solvente) de una solución de sal (soluto), como se muestra en la Figura 11, el agua pura pasa naturalmente a través de la membrana para diluir la solución salina; la fuerza impulsora del flujo es la diferencia en el potencial químico entre las dos soluciones y el potencial químico

es directamente proporcional a los cambios de temperatura y presión e inversamente proporcional a los cambios en la concentración de solutos, además, el flujo de agua continúa hasta que la presión creada por la cabeza hidráulica es igual a la presión osmótica de la solución salina y en este punto, se dice que los dos líquidos están en equilibrio osmótico (Figura 11) (AWWA, 2005).

**Figura 11**

*Esquema de procesos de ósmosis natural (izq.), equilibrio osmótico (centro) y ósmosis inversa (der.)*



Nota: Adaptación tomada de Dupont 2021 Filmtec Reverse Osmosis Membranes Technical Manual

En RO, la aplicación de presión externa sobre la solución salina permite revertir el flujo natural neto de agua (Figura 11), de ahí el término ósmosis inversa. NF es un proceso similar al RO, pero las membranas "más flojas" de NF requieren una fuerza impulsora menor para mover el agua a través de la membrana (AWWA, 2005).

En los procesos de ósmosis inversa y nanofiltración el agua es forzada a través de la membrana por un diferencial de presión (un tipo de movimiento llamado convección) y las sales disueltas pasan a través de la membrana debido a un diferencial de concentración (un tipo de movimiento llamado difusión), debido a que la membrana es semipermeable, tanto las sales disueltas como el agua se transportan en diferentes grados a través de la estructura molecular de la capa superficial activa de la membrana, por otro lado, la presión

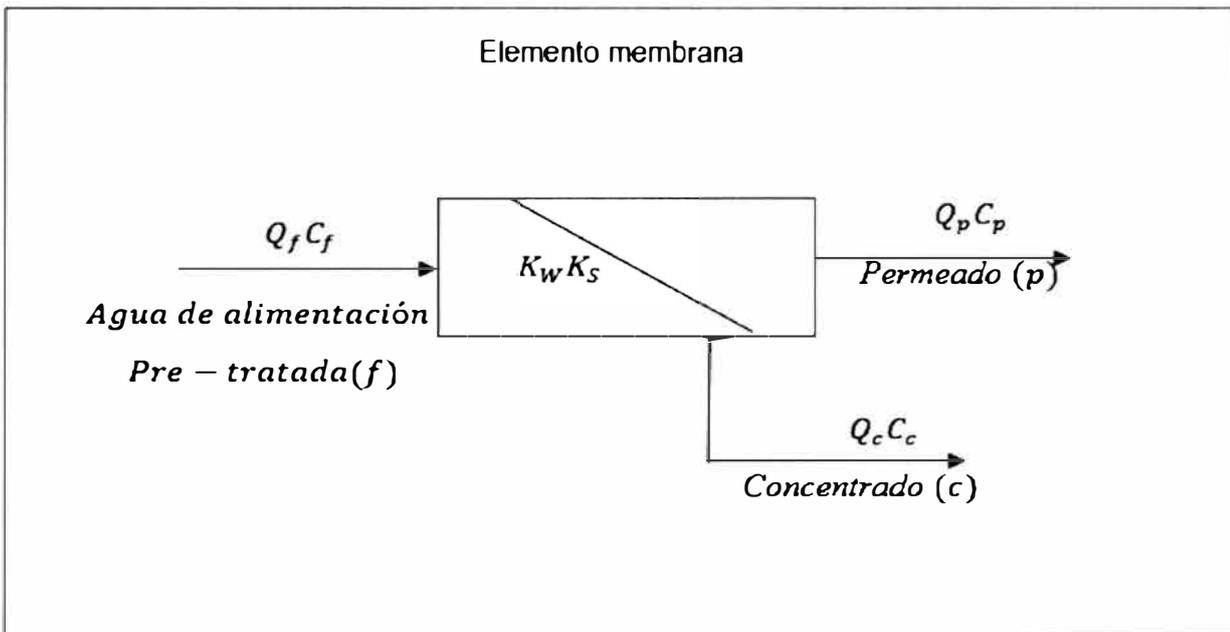
osmótica para una solución salina se puede estimar en 1 psi por 100 mg / L TDS para aguas dulces y salobres.

El modelo estándar para describir los procesos de RO y NF es el modelo de difusión de solución homogénea (HSD), que ilustra los efectos de la concentración de alimento, las características de la membrana, la recuperación y la presión sobre la concentración de permeado (AWWA, 2005).

A continuación, se muestra la figura 12 la cual muestra un único elemento de membrana, así como la terminología utilizada para describir el flujo, la concentración y la presión.

**Figura 12**

*Esquema de un elemento de membrana de osmosis inversa*



Nota: Adaptación tomada de Dupont 2021 Filmtec Reverse Osmosis Membranes Technical Manual

Donde:

$Q =$  Flujo o Caudal

$C =$  Concentración

$K_w =$  coeficiente de transferencia de masa del agua

$K_s =$  coeficiente de transferencia de masa del soluto

Las siguientes ecuaciones se utilizan para los procesos de membrana RO y NF para determinar la eficiencia del sistema.

- Ecuación de balance de masa:

$$Q_f = Q_p + Q_c \dots (\text{Ecuación 3.9})$$

Donde:

$Q_f$  = caudal de agua de alimentación, unidades de volumen por tiempo

$Q_p$  = caudal de permeado, unidades de volumen por tiempo

$Q_c$  = caudal de concentrado, unidades de volumen por tiempo

- Ecuación de balance de Flux del soluto:

$$Q_f C_f = Q_p C_p + Q_c C_c \dots (\text{Ecuación 3.10})$$

Donde:

$C_f$  = concentración de soluto en alimentación, unid. de masa por volumen

$C_p$  = concentración de soluto en permeado, unid. de masa por volumen

$C_c$  = concentración de soluto en concentrado, unid. de masa por volumen

- Ecuación de tasa de recuperación de permeado (% recovery):

$$R = \frac{Q_p}{Q_f} \dots (\text{Ecuación 3.11})$$

Donde:

$R$  = Porcentaje de agua producto recuperado de la alimentación

- Ecuación de Flux del agua:

$$F_w = K_w (\Delta P - \Delta \pi) = \frac{Q_p}{A} \dots (\text{Ecuación 3.12})$$

Donde:

$F_w$  = flux de agua, unidades de flujo por unidad de área

$K_w$  = coeficiente de transferencia de masa agua, unid. de flux por presión

$\Delta P$  = diferencial de presión transmembrana, unidades de presión

$\Delta \pi$  = diferencial de presión osmótica transmembrana, unidades de presión

$A$  = área efectiva de membrana

nota:  $\Delta P - \Delta \pi =$  presión neta aplicada (NAP)

- Flux de soluto disuelto:

$$F_s = K_s(C_m - C_p) = K_s \left[ \frac{C_f + C_c}{2} - C_p \right] = \frac{Q_p C_p}{A} \dots (\text{Ecuación 3.13})$$

Donde:

$F_s$  = flux de soluto, unidades de masa por tiempo por área

$K_s$  = coefic. de transferencia de masa soluto, unid. de longitud por tiempo

$C_m$  = concentración de la superficie de la membrana

- Coeficiente de transferencia de masa del agua:

$$K_w = \frac{Q_p}{A(\Delta P - \Delta \pi)} = \frac{Q_p}{A(\text{NAP})} \dots (\text{Ecuación 3.14})$$

- Coeficiente de transferencia de masa del soluto:

$$K_s = \frac{Q_p C_p}{A \Delta C} \dots (\text{Ecuación 3.15})$$

Donde:

$\Delta C$  = diferencial de concentración

$$\Delta C = (C_m - C_p) = \left( \frac{C_f + C_c}{2} \right) - C_p \dots (\text{Ecuación 3.16})$$

La ecuación 3.17 describe los efectos de cada una de las cinco variables independientes ( $K_s$ ,  $C_f$ ,  $K_w$ ,  $P$  y  $R$ ) sobre la concentración de permeado:

- Concentración del permeado:

$$C_p = \frac{K_s C_f}{K_w \Delta P + \Delta \pi \left( \frac{2 - 2R}{2R} \right) + K_s} \dots (\text{Ecuación 3.17})$$

De esta ecuación 3.17 se puede analizar que cada una de estas variables (Ks, Cf, Kw, P y R) pueden cambiarse independientemente mientras las otras cuatro permanecen constantes, también se pueden observar las relaciones directa e inversamente proporcionales de las distintas variables, en la siguiente tabla 12 se indica un resumen de los efectos del aumento de la presión, la temperatura, la recuperación y la concentración de sal.

**Tabla 12**

*Factores que influyen en el rendimiento de RO y NF*

Factor	Flujo de Permeado	Paso de sales
Incremento de la presión efectiva	Aumenta	Disminuye
Incremento de la temperatura	Aumenta	Aumenta
Incremento de la recuperación	Disminuye	Aumenta
Incremento de la concentración sal	Disminuye	Aumenta

*Nota: Adaptación de referencia Annual of Water Supply Practices—M46*

**Especificaciones técnicas de Membranas de NF/RO**

**Materiales de la membrana:**

Los materiales más usados en membranas de ósmosis y nanofiltración son derivados celulósicos y derivados de poliamidas.

- Membranas de Acetato de celulosa (CA) no es tolerante a temperaturas por encima de los 30° y tiende a hidrolizarse cuando el PH es menor a 3 o mayor a 8 y es susceptible a degradación biológica y degradación con cloro libre en concentraciones por encima de 1 ppm (AWWA, 2005).
- Membranas de Poliamida (PA) son generalmente resistentes a degradación biológica, son estables en rango de PH de 3 – 11, y no hidrolizan con el agua. bajo similares condiciones de presiones y temperaturas las membranas de poliamida PA pueden producir un mayor flujo de agua y mayor rechazo de sales que las membranas de acetato de celulosa CA, sin embargo, las membranas de Poliamida

son más susceptibles al ensuciamiento y no pueden tolerar el cloro libre en ninguna concentración (AWWA, 2005).

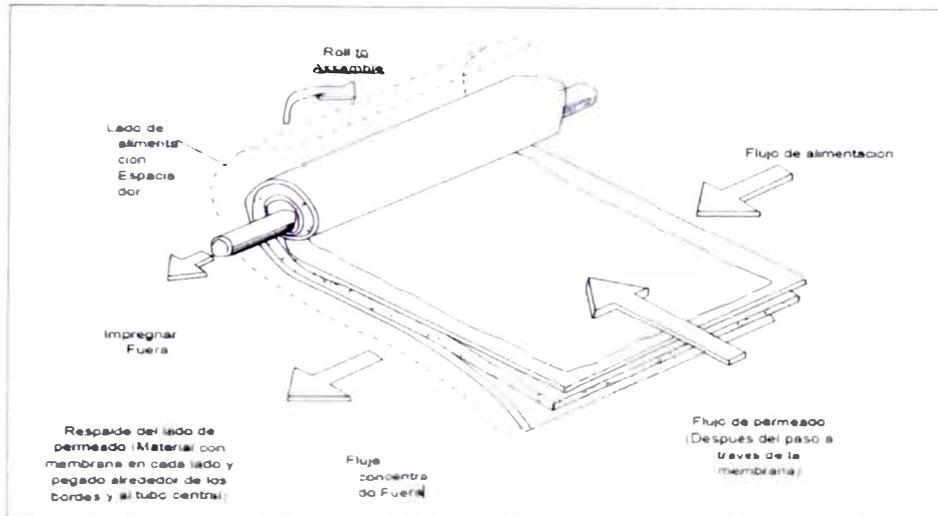
- La membrana ideal tiene las siguientes características
  - Velocidades de flujo de aguas elevadas.
  - Elevado rechazo de sales.
  - Elevada resistencia o tolerancia al cloro y a los oxidantes.
  - Resistencia elevada a los ataques biológicos y Bajo precio.
  - Resistencia elevada a su recubrimiento por materiales coloidales y en suspensión (AWWA, 2005).
  - Facilidad para formar dentro películas o fibras en el hueco.
  - Elevada resistencia química y física (resistencia a presiones elevadas).
  - Elevada estabilidad química (capacidad para conservar sus propiedades químicas bajo varias condiciones).
  - Elevada estabilidad térmica (capacidad para soportar temperaturas elevadas sin deformarse o perder forma).

### **Geometría de membranas**

La configuración en espiral se muestra en la figura 13 dos láminas de membrana de lámina plana se unen en tres lados con la capa de membrana activa hacia afuera. Se coloca un separador entre las láminas de membrana para evitar que se toquen. El extremo abierto del sobre formado por las dos hojas está unido a un tubo central perforado que recoge el permeado. Los elementos enrollados en espiral son típicamente de 1 m de largo y 0.3 m de diámetro. El área para un elemento de 1 m de largo sería de unos 30 m<sup>2</sup>. Los elementos individuales tienen una recuperación de permeado de 5 a 15 por ciento. Para lograr mayores recuperaciones, los elementos se colocan en serie.

**Figura 13**

*Esquema de un elemento de membrana de osmosis inversa*



Nota: Adaptación tomada de Dupont 2021 Filmtec Reverse Osmosis Membranes Technical Manual

### **Criterios generales para la selección de la membrana de NF/RO**

En la mayoría de los casos el proceso de selección de membranas se le deja al fabricante, y al consultor se le pide que valore y confirme la selección del fabricante, debido a que el equipo viene como un paquete o como un sistema completo, en lugar de componentes individuales al diseñador se le pedirá que recomiende el tipo de membrana y, por tanto, el tipo de equipo correspondiente al mismo fabricante (AWWA, 2005).

Existen tres propiedades de las membranas que son importantes para lograr una aplicación económicamente exitosa:

- Selectividad de la membrana y Estabilidad química de la membrana (AWWA, 2005).
- Permeabilidad de la membrana o velocidad de flujo

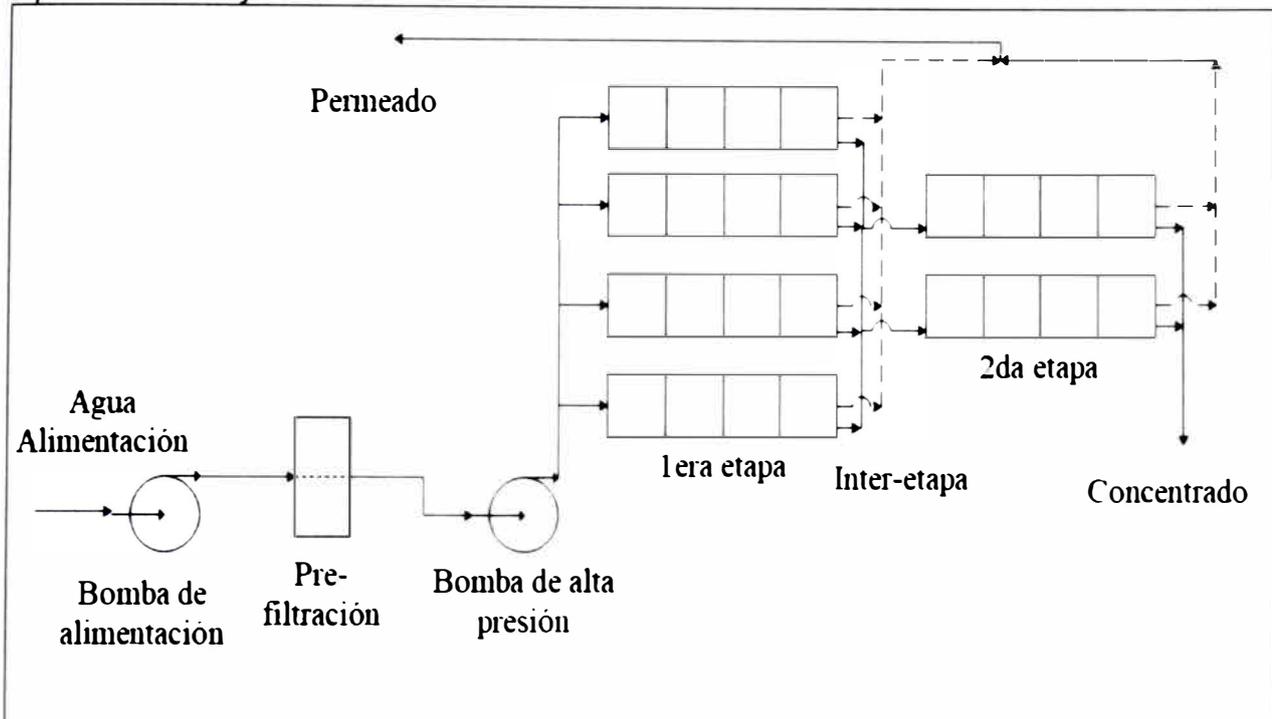
### **Características de operación de membranas NF/RO**

#### **Configuración de proceso**

Los sistemas de NF y RO se operan con mucha mayor frecuencia utilizando Flujo Cruzado, ver figura 14.

**Figura 14**

*Operación en flujo cruzado*



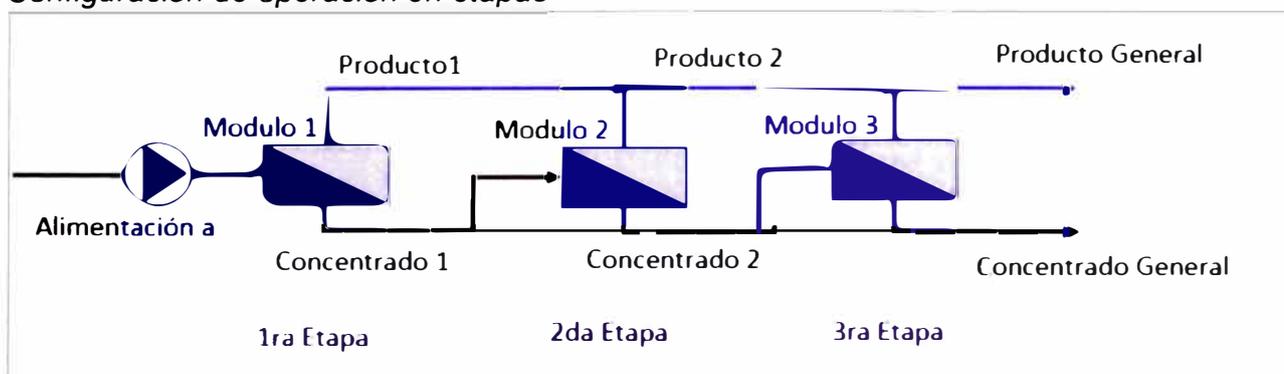
Nota: Adaptación tomada de Dupont 2021 Filmtec Reverse Osmosis Membranes Technical Manual

### **Modos de operación de los sistemas de NF y RO**

- Operación por etapas: La configuración estándar para la agrupación de etapas en un sistema de membranas es la del rechazo en serie, es decir el rechazo de la primera etapa alimentará a la segunda y el rechazo de esta a la tercera, como se muestra en la figura 15 (AWWA, 2005).

**Figura 15**

*Configuración de operación en etapas*

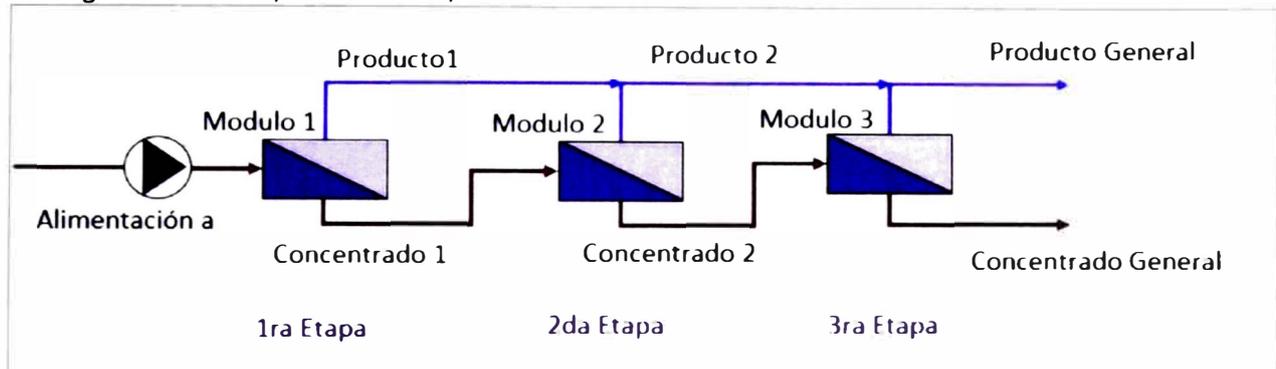


Nota: Elaboración propia

- Operación por pasos: Un sistema de permeado de dos es la combinación de dos sistemas de ósmosis inversa convencionales, donde el permeado del primer paso se convierte en el agua alimentación del segundo paso, utilizando para ello una segunda bomba, ver figura 16 (AWWA, 2005).

**Figura 16**

*Configuración de operación en pasos*



Nota: Elaboración propia

- Limpieza química: Consiste en realizar una recirculación de soluciones ácida (pH: 2-3) y alcalina (pH: 11-12) por las membranas, Se recomienda realizar estos lavados químicos cada 4 meses de operación como mantenimiento preventivo. En forma real este servicio se realiza cuando el TDS del agua producto se ve incrementado o cuando el caudal de producción de agua producto ha descendido (4-5%). Dependiendo del grado de ensuciamiento de las membranas, este servicio puede durar un día completo de 24 h. Usualmente es 8 h. En algunas situaciones se debe dejar remojando por varias horas la solución de limpieza para disolver la incrustación. Normalmente luego de la limpieza química se logra recuperar la producción de agua tratada y disminuir las presiones de operación, pero la calidad del agua tratada retorna a su valor normal luego de 48 h de operación. Esto se debe a que el efecto de la limpieza es abrir los poros de las membranas por lo que deja pasar sales en el producto. El éxito de una buena limpieza de membranas es usar un producto químico recomendado por el fabricante de membranas y tener las variables de operación controladas durante la limpieza química: flujo, presión,

temperatura, pH, conductividad. Se debe tomar en cuenta que las limpiezas químicas disminuyen la vida útil de sus membranas y aumentan sus costos operativos de mantenimiento (AWWA, 2005).

### **Reducciones en la productividad de membranas**

- Síntomas de ensuciamiento y/o incrustación:
  - Disminución del flujo normalizado de permeado, cambio en la presión de alimentación requerida para mantener el flujo de permeado deseado (AWWA, 2005).
  - Aumento del diferencial de presión, por etapas y general.
  - Cambios en el rechazo normalizado de sales (AWWA, 2005).
- Ensuciamiento biológico
  - Problema común en aguas superficiales o de desecho.
  - Inicialmente se observa en las primeras membranas y en los filtros de cartucho, aunque luego se extiende a todo el sistema (AWWA, 2005).
  - Consiste en un biogel que incluye bacterias, algas y hongos.
  - Más de 10000 colonias por ml de Bacterias Totales en el agua de alimentación es un indicio del problema que se presentará (AWWA, 2005).
  - Se puede y debe considerar el problema en el pre-tratamiento (desinfección con cloro, ozono, bisulfito, kathon, UV) (AWWA, 2005).
  - En casos críticos, se puede considerar membranas de acetato de celulosa o poliamida de carga neutra (Russel, 2012).

### 3.4 Propuesta y Contribuciones de su Formación Profesional

#### 3.4.1 *Objetivo y justificación del uso de las técnicas propuestas*

- **Objetivo principal:**

- Gestionar la implementación de una PTA de agua de relaves mineros mediante los procesos de ultrafiltración y osmosis inversa para obtener un producto que cumpla con los LMP apta para descarga a un cuerpo receptor, reúso en el proceso, riego de áreas verdes y/o riego de carreteras.

- **Objetivos secundarios:**

- Analizar que implementar una planta de tratamiento de agua de relaves mineros mediante las tecnologías de Ultrafiltración y Ósmosis Inversa sea viable.
- Detallar las tareas a realizar y los recursos necesarios para la implementación de una PTA de relaves mineros.
- Ejecutar proyecto de implementación de PTA de relaves mineros mediante los procesos de ultrafiltración y osmosis inversa.
- Controlar y responder ante dificultades que surjan durante la implementación de una planta de tratamiento de agua de relaves mineros mediante los procesos de ultrafiltración y osmosis inversa.
- Evaluar y verificar el proyecto de PTA de relaves mineros mediante los procesos de ultrafiltración y osmosis inversa.
- Analizar el desempeño de tecnologías de Ultrafiltración y Ósmosis Inversa en el tratamiento de relaves mineros.

- **Justificación del uso de la técnica propuesta**

- Teniendo en cuenta el análisis del efluente a tratar, así como el resultado de las pruebas piloto se determinó que la opción más viable técnica y económicamente era la implementación en conjunto de sistemas de tratamiento de agua mediante las tecnologías de ultrafiltración y ósmosis inversa por sobre tecnologías similares como los filtros arena o multimedia previo al ósmosis inversa, debido a que el uso previo de las unidades de ultrafiltración permitieron garantizar un adecuado pretratamiento que impedía el rápido ensuciamiento de las membranas de ósmosis inversa así mismo debido a la alta calidad de agua tratada que brindaban los sistemas de ósmosis inversa solo era necesario tratar una fracción del total de efluente para que posteriormente fuese mezclada y cumpliera con la normativa requerida, esto último fue respaldado debido a la alta inversión que implicaba la implementación de sistemas de ultrafiltración con ósmosis inversa.

### **3.4.2 Cálculos y determinaciones de indicadores de gestión para evaluar y monitorear la propuesta**

- **Descripción del caso de estudio**

El tratamiento terciario o comúnmente llamado de "pulimiento", debido a que ha sido dirigido principalmente a la remoción de componentes disueltos en el agua como partículas muy finas o iones, ha sido ampliamente conocida en la industria y se han utilizado por lo general sistemas de ósmosis inversa precedidos por diversos pretratamientos como filtros convencionales o clarificadores; sin embargo debido a que cada agua o efluente a tratar es único, se evaluó cada caso con el fin de determinar los procesos más adecuados que permitieron tratarlos satisfactoriamente alcanzando la cantidad y calidad requerida.

Para nuestro caso en particular donde se buscaba tratar el efluente proveniente del espejo de agua de una relavera mediante el análisis de agua tomado durante distintas épocas del año se pudo verificar que las condiciones y calidad del efluente a tratar eran las

óptimas para realizar su tratamiento mediante un sistema de ultrafiltración y ósmosis inversa al 70% del flujo total que permitió mediante una mezcla con el 30% no tratado llegar a los valores deseados de límites máximos permisibles.

En la tabla 13 se muestran los datos de condiciones de sitio que se tuvieron en cuenta para la selección del equipamiento y de las especificaciones a tener en cuenta (AWWA, 2005).

- **Condiciones de sitio**

**Tabla 13**

*Condiciones de sitio (referenciales)*

Descripción	Unidades	Valor
Departamento	-	Cuzco
Elevación	msnm	4250
Área sísmica	-	3
Tipo de clima		
Clima seco	Mes	Mayo a diciembre
Clima lluvioso	Mes	Diciembre a abril
Heladas	mes	Junio a Julio
Temp. Amb. Min/Máx	°C	-7 / 14.6
Temperatura del agua		
Mínimo / Máximo	°C	--- / 30.0
Humedad relativa	%	72.8
Precipitación pluvial		
Mínimo (Estación seca)	mm/año	---
Máximo (Estación húmeda)	mm/año	1083

*Nota: Elaboración Propia*

- **Características del agua a tratar**

La tabla 14 nos muestra las principales características fisicoquímicas del agua a tratar mediante las tecnologías de Ultrafiltración y Nanofiltración (AWWA, 2005).

**Tabla 14**

*Condiciones de agua a tratar (referenciales)*

Parámetros	Unidades	Espejo de relavera
<b>Parámetros fisicoquímicos</b>		
Aceites y Grasas	mg/L	<0.50
Bicarbonatos	mg HCO <sub>3</sub> /L	20

Conductividad	μS/cm	5030.00
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	< 2.00
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	25.0
pH	Unidades pH	8.70 – 9.12
Turbidez	NTU	6.00
Cloruros, Cl-	mg/L	650
Fluoruros, F-	mg/L	0.5
Nitritos, NO <sub>2</sub> -	mg/L	10
Sulfatos, SO <sub>4</sub> -2	mg/L	1900
Metales totales		
Aluminio Total (Al)	mg/L	0.005
Arsénico Total (As)	mg/L	0.005
Bario Total (Ba)	mg/L	0.01
Boro Total (B)	mg/L	0.25
Cadmio Total (Cd)	mg/L	0.00011
Cobalto Total (Co)	mg/L	0.0002
Cobre Total (Cu)	mg/L	0.003
Cromo Total (Cr)	mg/L	<0.0003
Hierro Total (Fe)	mg/L	0.1
Litio Total (Li)	mg/L	0.5
Magnesio Total (Mg)	mg/L	50.0
Manganeso Total (Mn)	mg/L	0.02
Mercurio Total (Hg)	mg/L	0.0001
Níquel Total (Ni)	mg/L	0.0002
Plomo Total (Pb)	mg/L	0.0005
Selenio Total (Se)	mg/L	0.006
Zinc Total (Zn)	mg/L	0.004

*Nota: Elaboración Propia*

- **Bases de diseño**

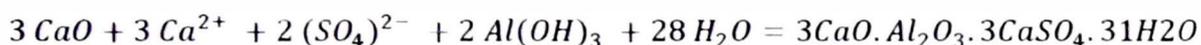
- Los cálculos nominales fueron realizados considerando el balance de masa.
- Se consideró el diseño de planta con un tiempo de vida de 20 años.
- La planta fue diseñada para un servicio en continuo de 24 h/día, 7 d/semana, 30 días/mes y 12 meses/año. Se consideró que la operación sería todo el año con excepción de los días de mantenimiento general, disponibilidad del 97%.
- El factor de seguridad de diseño fue de 1.15

- **Evaluación general de alternativas**

Se tomó como punto de partida el agua proveniente del espejo de agua de la relavera y se consideró el análisis de la calidad de agua en este punto, se pudieron analizar algunas tecnologías basadas principalmente en la reducción de los sulfatos y conductividad:

**Alternativa 1: Precipitación química**

Este método permite conseguir nivel bajo de sulfatos empleando un clarificador final, el método consistía en generar el precipitado de una sal combinada de calcio y aluminio con el sulfato y obtener un sobrenadante con una concentración en sulfato muy bajo (Sans, 1989).



Al efluente se le hubiese añadido lechada de cal hasta un valor que correspondía a la necesidad estequiométrica de Calcio (más un margen de eficiencia/seguridad); esto hubiese traído consigo el incremento del pH y hubiese sido necesario añadir hidróxido de sodio hasta alcanzar el valor de pH de 12. Como alternativa se hubiese podido añadir Cloruro de calcio y soda caustica hasta lograr los dos condicionales: Necesidad de calcio y pH. En sistemas donde haya altas concentraciones de alcalinidad se hubiese podido evaluar la precipitación preliminar del carbonato de calcio.

Con las condiciones logradas, se hubiese añadido la lechada de hidróxido de aluminio (se hubiese podido evaluar otros aportantes de aluminio, pero hubiese ocasionado caídas en el pH o producir mucho lodo) en base a su necesidad estequiométrica (más un margen de eficiencia/seguridad). Los tiempos y formas de agitación hubiesen sido importantes en esta fase (Sans, 1989).

Finalmente, la separación física se hubiese podido realizar mediante dos alternativas:

- Clarificadores tipo lamelares, cuya ventaja más importante versus a los clarificadores convencionales ha sido la reducción mínima de un 25% del requerimiento de área.
- Membranas tubulares de microfiltración, cuyas ventajas más importantes han sido relacionadas a la calidad del filtrado (una turbidez menor a 0.5 NTU y un nivel de sólidos suspendidos menor a 0.5 ppm).

### **Alternativa 2: Resinas de intercambio iónico**

Resina de intercambio catiónico (han sido capaces de remover especialmente calcio y magnesio) y resinas de intercambio aniónico (han sido capaces de remover especialmente sulfato) se podrían haber regenerado con ácido sulfúrico e hidróxido de calcio. La ventaja de dicho tipo de tecnología ha sido que las soluciones regenerantes agotadas hubiesen podido ser enviadas a un sistema de post-tratamiento y obtener sulfato de calcio con lo que se hubiese obtenido descartes de agua muy bajo, llegando a valores que fluctúan entre el 1 y 5% (Rigola, 1990).

### **Alternativa 3: Separación por membranas**

Separación por membranas: mediante la tecnología de membranas de ultrafiltración fue posible reducir la alta concentración de turbidez y acondicionar el efluente para su tratamiento mediante ósmosis inversa, El rendimiento de una membrana de Ósmosis inversa ha sido definido por varios parámetros, los cuales definimos a continuación (Dupont, 2021):

- Caudal y Flux
- Rechazo de iones, Recovery o recuperación
- Presión diferencial y Presión transmembrana

Las membranas más comunes de ósmosis inversa fueron las del tipo enrollado en espiral. El módulo enrollado en espiral ha utilizado hojas planas enrolladas alrededor de un tubo central

El material más frecuente de las membranas de ósmosis inversa ha sido la poliamida.

La capacidad de las membranas fue dada por cuanto volumen de agua puede tratar. La permeabilidad de la membrana fue tan pequeña, que todas las impurezas, moléculas de sal, bacterias y virus fueron retenidas (AWWA, 2005).

En base a la información recopilada se elaboró un comparativo entre distintas alternativas consideradas para el tratamiento del agua de relave, los principales criterios de comparación se muestran en la tabla 15.

**Tabla 15**

*Características de sección de material de membranas MF/UF (AWWA, 2005)*

Concepto	Alternativas		
	Precipitación Química	Resinas de intercambio iónico	Separación por membranas UF/RO
Conocimiento de los operadores del proceso	No necesario	No necesario	Preferible
Requerimiento de espacio	Similar en todas las alternativas		
Exigencias en seguridad	Similar en todas las alternativas		
Uso de químicos fiscalizados	Sí, varios	Sí, algunos	Sí, algunos
Eficiencia	Mínima del 50%	Mínima del 75%	Mínima del 85%
Remoción de otros cationes o aniones	No	No	Sí
Remoción de Sulfato	Sí	Sí	Sí
Trabajo en condiciones muy alcalinas, pH > 11	Sí	No	No
Generación de lodo (kg/día)	Sí	Sí	No
Descarga de efluente líquido (rechazo)	No	No	Sí
CAPEX	Bajo	Medio	Alto
OPEX	Bajo	Alto	Alto

*Nota: Adaptación de referencia Anual of Water Supply Practices—M46*

Debido al alto grado de remoción obtenido en las pruebas piloto y su buen performance frente a una carga elevada de turbidez se optó por la alternativa de “separación de membranas” (uso de tecnologías de UF/RO).

- **Evaluación de cálculos de separación por membranas**

**Balance de masa del sistema de ultrafiltración:**

Para poder analizar los datos de la alternativa que fue elegida, se inició realizando los cálculos necesarios para tratar el efluente con un sistema de ultrafiltración teniendo en cuenta el elevado grado de turbidez, para lo cual se empleó el software proporcionado por alguno de los principales fabricantes de membranas del mundo, como han sido DOW, INGE, Toray, Pentair, etc. Para el caso que fue estudiado se presentó los cálculos realizados con el software de la empresa BASF en su línea Inge de membranas de ultrafiltración: Ver Anexo 1.

Se usó el software de diseño de membrana de ultrafiltración (UF) y se establecieron los flujos de descarte por retrolavados (BW) y retrolavados mejorado químicamente (CEB), bajo el siguiente detalle:

- Flujo de diseño = 150 m<sup>3</sup>/h
- Porcentaje de descarte por BWs = 9%
- Flujo de salida de las unidades de UF = 135 m<sup>3</sup>/h
- Flujo de descarte por retrolavados = 15 m<sup>3</sup>/h

Con estos valores se calculó que el flujo de retrolavados fue de 15 m<sup>3</sup>/h con una concentración de sólidos menor al 100mg/l

### **Balance de masa de sistema de ósmosis inversa**

El agua producto del sistema de ultrafiltración fue tratada por un sistema de ósmosis inversa, para lo cual se realizaron los cálculos requeridos con un software de un proveedor reconocido a nivel mundial como lo han sido Toray, Dow, Hydranautics, etc.: Ver Anexo 2

- Se usaron las herramientas de diseño de membrana de ósmosis (RO) y de antiincrustante y se estableció el flujo de descarte por rechazo (o concentrado) que se tuvo durante la operación del equipo, bajo el siguiente detalle:

- Flujo de diseño = 135 m<sup>3</sup>/h
- Porcentaje de descarte por rechazo = 70%
- Flujo de permeado de las unidades de RO = 95 m<sup>3</sup>/h
- Flujo de descarte por rechazos = 40 m<sup>3</sup>/h

Con estos valores se calculó que el flujo de rechazo era de 40 m<sup>3</sup>/hr con una concentración de sólidos disueltos mayor a 6000 mg/l.

### **Indicadores de gestión para evaluar la propuesta**

Como principales indicadores de gestión se determinaron en base a los siguientes puntos, los cuales formaron parte del seguimiento de la ejecución del proyecto para

- Aumento de la capacidad del caudal de agua de relave a tratar, se estima el aumento en un 90 % respecto a la capacidad anterior del sistema del cliente.
- Cumplimiento del costo proyectado, uso de indicadores SPI y CPI para el control de costos y tiempo, así mismo el seguimiento continuo mediante un cronograma y curva S.
- Reducción en el cambio de membranas, se estima al menos una reducción de 80% anual respecto a la condición anterior de la planta.

### **3.4.3 *Análisis e interpretación de resultados y aportes técnicos de la propuesta de solución***

Con el fin de evaluar que la implementación de una PTA de agua de relaves mineros sea viable mediante las tecnologías de ultrafiltración y osmosis inversas se analizan los valores de los principales parámetros fisicoquímicos del agua a tratar y del agua producto para tener conformidad de que el proceso seleccionado es el adecuado y cumple con la regulación vigente que certifica el éxito del proyecto.

En el presente apartado se muestran cuadros comparativos entre los valores obtenidos para tener una mejor visualización de que se han cumplido los objetivos propuestos y esta conformidad se da mediante la obtención de valores dentro de los límites establecidos en la regulación vigente. Como se observa para los distintos parámetros se han obtenidos valores adecuados y aceptables que permiten determinar de manera contundente el éxito del proyecto.

▪ **Características del agua tratada**

Se tuvo como propósito que el agua tratada cumpla con los ECA Agua Categoría 3-Riego de Vegetales (D1), D.S. 004-2017-MINAM (MINAM, 2017).

A continuación, se muestra un comparativo realizado de los parámetros obtenidos, en la tabla 16 se puede observar la comparación de los valores de los principales parámetros del agua tratada y los valores requeridos por la autoridad (MINAM, 2017).

**Tabla 16**

*Tabla comparativa de agua tratada (referencial)*

Parámetro	Unid.	Efluente por tratar (Espejo Relavera)	Agua tratada Osmotizada	Agua tratada mezclada	ECA 3 (D.S. N° 004-2017-MINAM)
<b>Parámetros fisicoquímicos</b>					
Aceites y Grasas.	mg/L	<0.50	<<0.50	<0.50	5.0
Bicarbonatos	ppm	20	< 20.0	<20.0	518
Conductividad	μS/cm	5030.00	< 100	2430	2500
DBO	mg/L	< 2.00	< 2.00	< 2.00	15.0
DQO	mg/L	25.0	< 20.0	<20.0	40.0
Cianuro WAD	ppm	0.005	<< 0.1	<< 0.1	0.1
pH	U. pH	8.70 – 9.12	7.18	6.75	6.5 – 8.5
Turbidez	NTU	6.00	< 0.1	< 1.0	-
<b>Aniones</b>					
Cloruros, Cl-	mg/L	650	< 10.0	-	-
Fluoruros, F-	mg/L	0.5	0.02	<0.5	1
Nitritos, NO <sub>2</sub> -	mg/L	10	< 10.0	< 10.0	100
Sulfatos, SO <sub>4</sub> -2	mg/L	1900	5.00	<1000	1000
<b>Metales totales</b>					
Aluminio T. (Al)	mg/L	0.005	<< 0.005	< 0.005	5
Arsénico T. (As)	mg/L	0.005	<< 0.005	< 0.005	0.1
Bario Total (Ba)	mg/L	0.01	<< 0.01	< 0.01	0.7
Boro Total (B)	mg/L	0.25	< 1	< 1	1
Cadmio Total (Cd)	mg/L	0.00011	<< 0.00011	< 0.00011	0.01
Cobalto Total (Co)	mg/L	0.0002	<< 0.0001	< 0.0001	0.05
Cobre Total (Cu)	mg/L	0.003	<< 0.003	< 0.003	0.2
Cromo Total (Cr)	mg/L	<0.0003	<0.0003	<0.0003	0.1
Hierro Total (Fe)	mg/L	0.1	<< 0.1	< 0.1	5
Litio Total (Li)	mg/L	0.5	<< 0.5	< 0.5	2.5
Magnesio T. (Mg)	mg/L	50.0	<< 0.11	< 50.0	-

Manganeso T.(Mn)	mg/L	0.02	<< 0.02	< 0.02	0.2
Mercurio T. (Hg)	mg/L	0.0001	<< 0.0001	< 0.0001	0.001
Plomo Total (Pb)	mg/L	0.0005	<< 0.0005	< 0.0005	0.05
Zinc Total (Zn)	mg/L	0.004	<< 0.004	< 0.004	2

Nota: Elaboración propia

### ▪ Cuadros comparativos de resultados

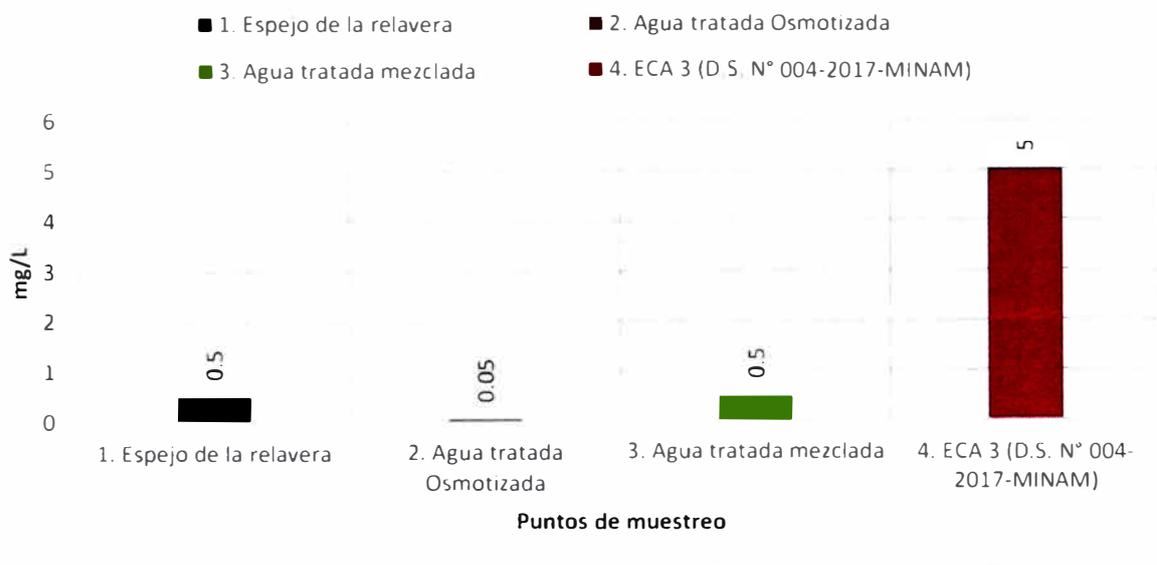
A continuación, se muestran de manera gráfica la comparación de valores de los principales parámetros obtenidos en un sistema de tratamiento de agua de relaves mediante los procesos de ultrafiltración / ósmosis inversa y su relación con los valores requeridos por el estándar de calidad ambiental (ECA) categoría 3.

En la figura 23 es un gráfico comparativo de los valores de A&G obtenidos, la figura 24 es un gráfico comparativo de los valores de conductividad, la figura 25 es un gráfico comparativo de los valores de DBO, en la figura 26 se observa un gráfico comparativo de los valores de DQO, la figura 27 es un gráfico comparativo de sulfatos, la figura 28 muestra un gráfico comparativo de los valores de pH y en la figura 29 se observa un gráfico comparativo de los valores de mercurio total.

### Figura 23

Cuadro comparativo de valores obtenidos de aceites y grasas (AWWA, 2005)

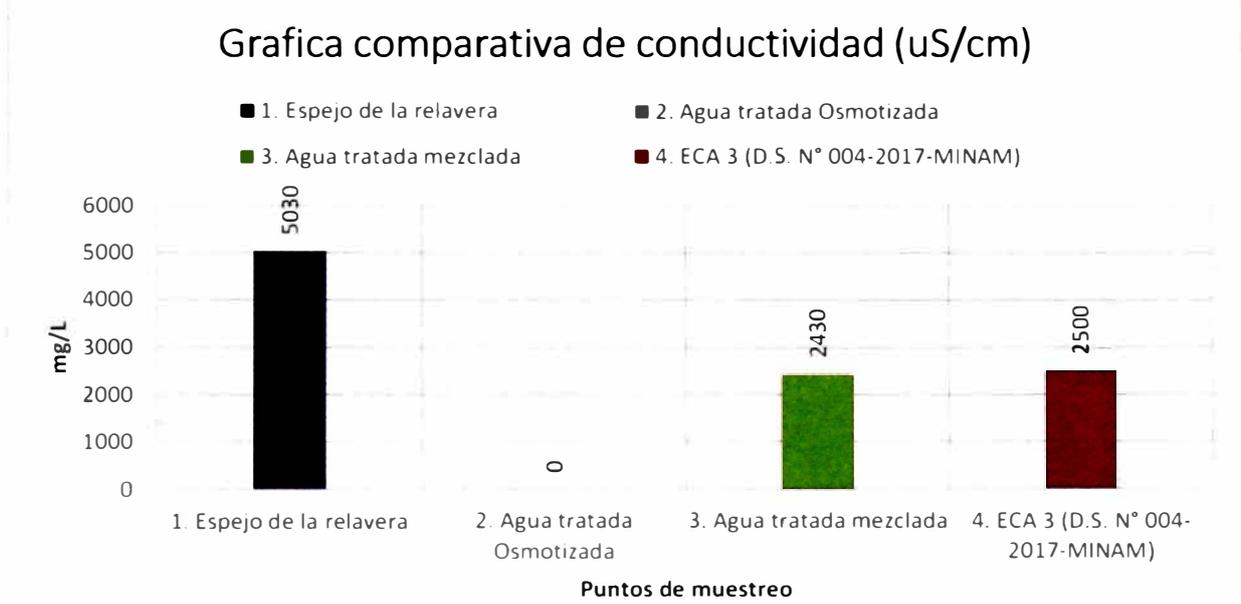
#### Grafica comparativa de aceites y grasas (mg/L)



Nota: Elaboración propia

**Figura 24**

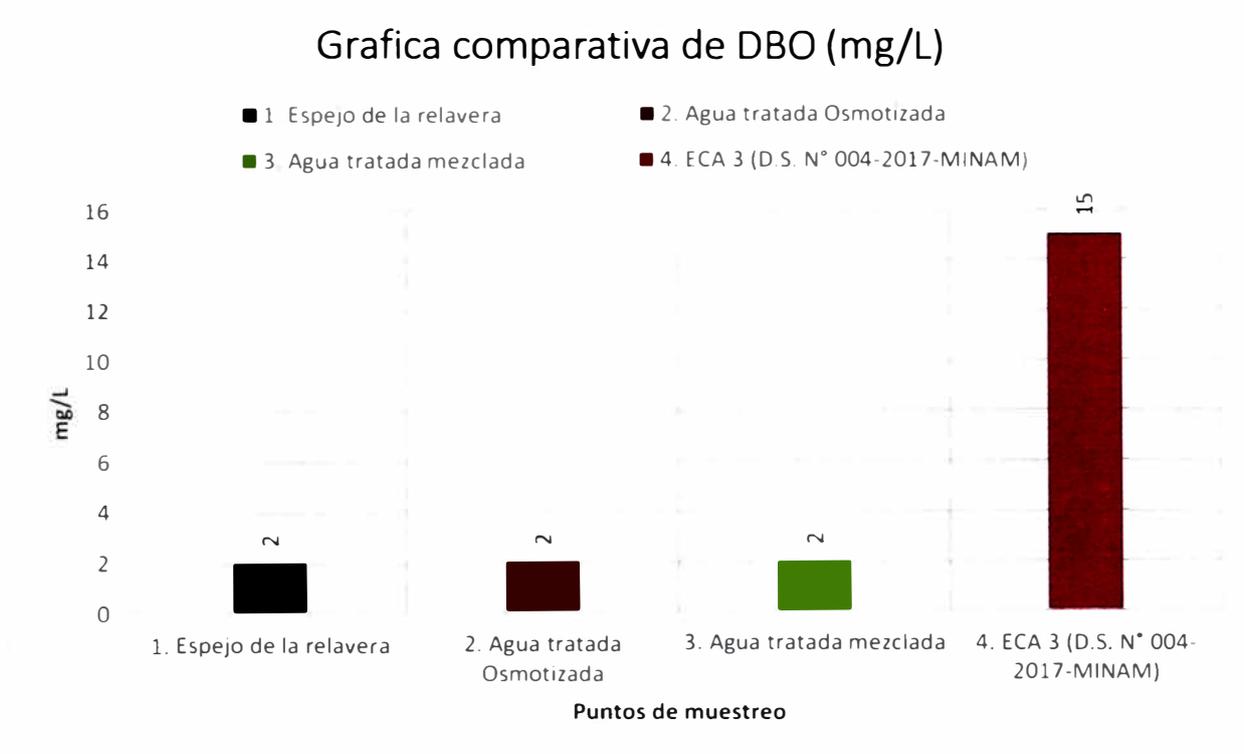
Cuadro comparativo de valores obtenidos de conductividad



Nota: Elaboración propia

**Figura 25**

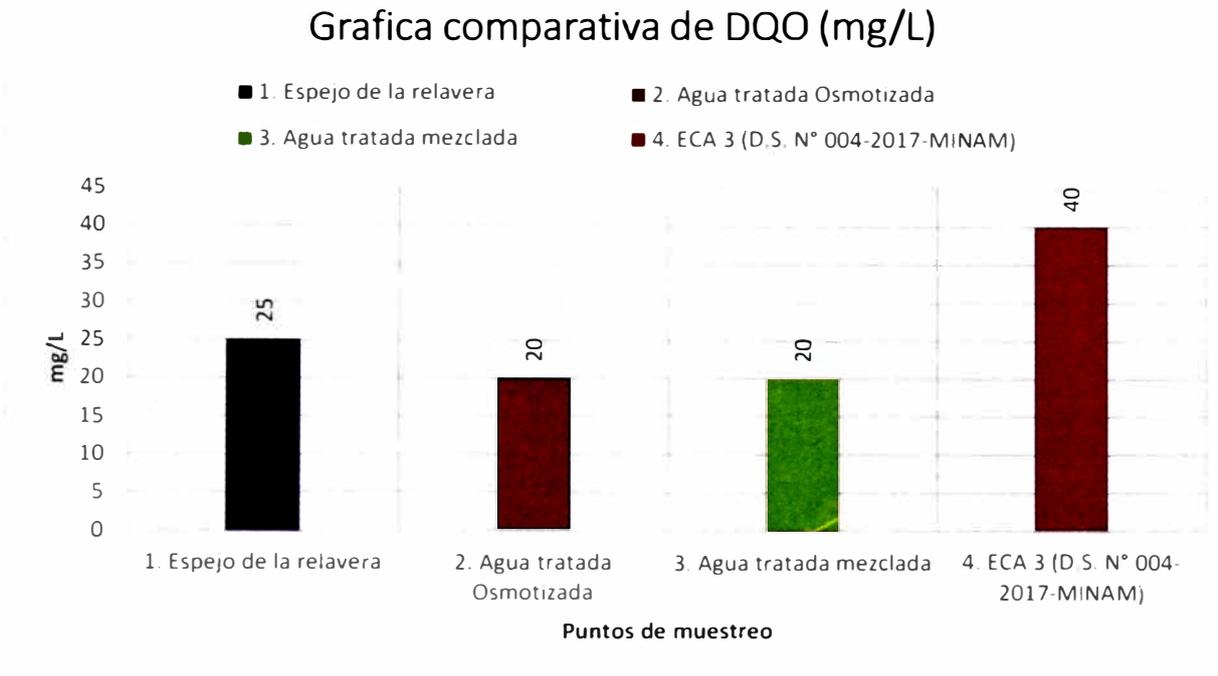
Cuadro comparativo de valores obtenidos de DBO



Nota: Elaboración propia

**Figura 26**

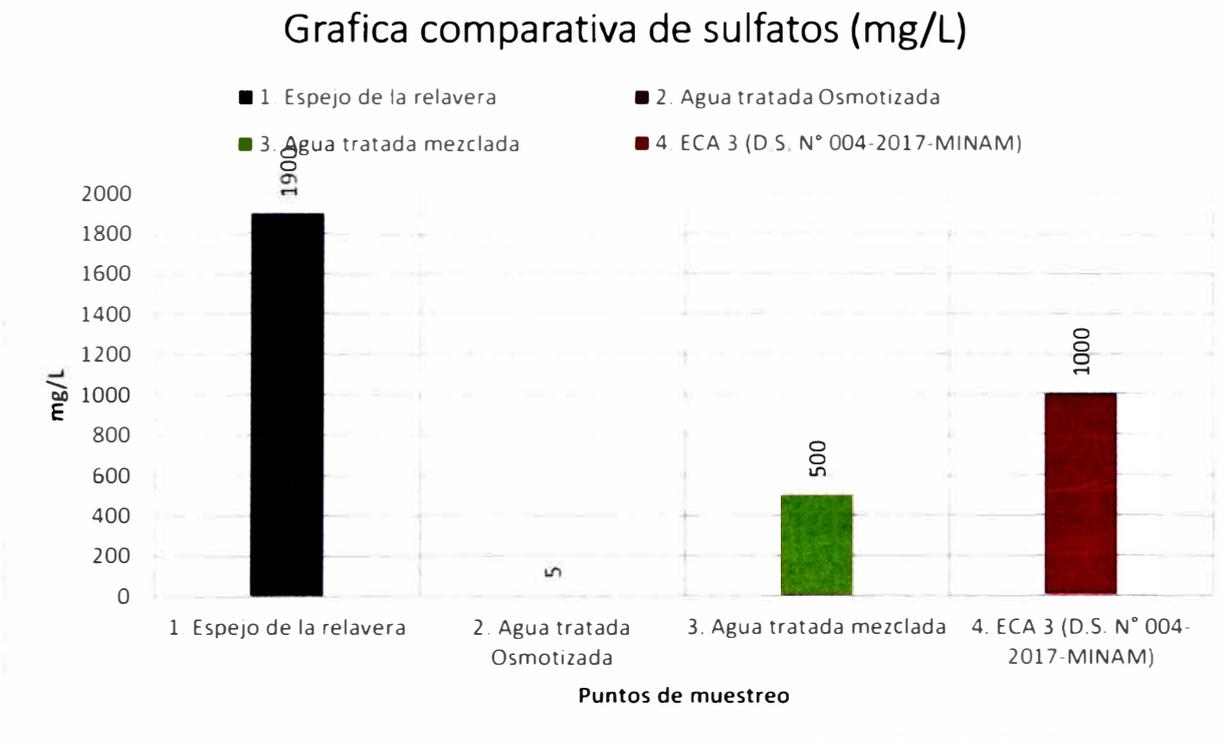
*Cuadro comparativo de valores obtenidos de DQO*



Nota: Elaboración propia

**Figura 27**

*Cuadro comparativo de valores obtenidos de sulfatos*

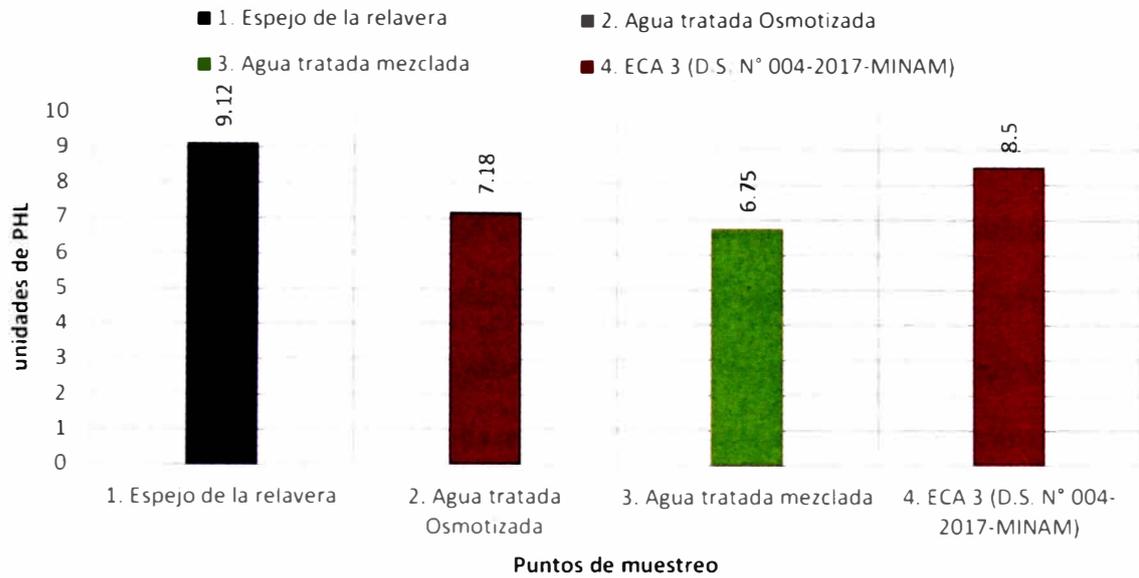


Nota: Elaboración propia

**Figura 28**

*Cuadro comparativo de valores obtenidos de potencial de hidrogeno*

### Grafica comparativa de PH

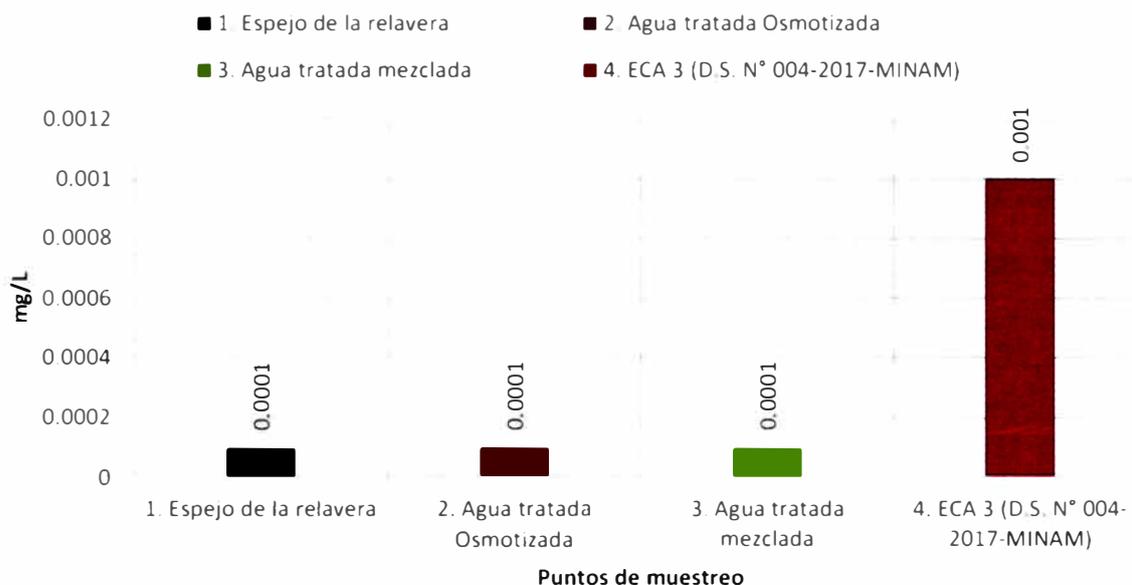


Nota: Elaboración propia

**Figura 29**

*Cuadro comparativo de valores obtenidos de mercurio total*

### Grafica comparativa de Hg total (mg/L)



Nota: Elaboración propia

- **Aportes técnicos de la propuesta de solución**

**Descripción del proceso de separación por membranas (sistemas UF/RO)**

Bajo la premisa de que debido a las condiciones del efluente tratado se había determinado que no era necesario realizar un proceso previo de precipitación química, pero si era necesaria la remoción de particular en suspensión mediante un sistema de filtración y ultrafiltración que precedía a una etapa de pulimiento con ósmosis inversa para la reducción de la conductividad eléctrica, la cual era el principal parámetro por tratar en dicha etapa. Como la tecnología seleccionada fue la de ósmosis inversa y su eficiencia en remoción de la conductividad y de todos los iones que los componen era mayor del 99% (dependiendo del modelo específico de membrana que se hubiese usado) no era necesario pulir todo el flujo de diseño de la planta. Para fines de la ingeniería se estableció un flujo de alimentación aproximado de 150 m<sup>3</sup>/h que fueron tratados por las tecnologías de Ultrafiltración y Ósmosis Inversa (Dupont, 2021).

Cabe precisar que, el esquema de manejo de los rechazos contemplaba realizar el envío de estos nuevamente a la relavera lo cual propiciaría la precipitación de los componentes más pesados, mientras que la parte líquida pasaría nuevamente al ciclo de tratamiento, aunque debido a las cantidades de efluentes y tamaño de la relavera, el tiempo en que el espejo de agua de la relavera se vería afectado por la cantidad acumulada de rechazos se consideraba relativamente largo.

Finalmente, la tecnología de ósmosis requirió acondicionar fisicoquímicamente el efluente antes de su ingreso a las membranas por lo cual fue necesario seguir las siguientes etapas, ver figura 17:

**Figura 17**

*Etapas del proceso de tratamiento seleccionado*



Nota: Elaboración propia

Cabe recalcar que los equipos diseñados, consideraron que su implementación sería compacta, modular (podría haberse instalado uno, dos o más trenes en paralelo según la demanda de agua tratada) y pudieron haberse dado de forma progresiva en respuesta a la calidad del efluente clarificado.

Adicionalmente, todos los módulos de ultrafiltración compartieron la estación de retrolavado (BW) y retrolavado mejorado químicamente (CEB). El mismo criterio se empleó para la unidad de limpieza química (CIP), todas las unidades de ósmosis inversa se diseñaron para usar una única estación de limpieza (CIP).

- **Sistema de ultrafiltración**

- **Principales datos de diseño**

- Porcentaje (%) de Recuperación UF
      - Se obtuvo hasta 90 % de recuperación en la UF
    - Principales parámetros:
      - Turbidez < 20 NTU
      - TSS < 20 ppm
      - DOC < 1 ppm
    - Tiempo entre retrolavados estimado: 40 min
  - Se consideró la implementación de un sistema de filtros de macropartículas de alto flujo como filtros tipo malla o anillas de 130 micras para el pretratamiento.

- **Capacidad de equipos de ultrafiltración**

- Se diseñó para una producción total por línea de 150 m<sup>3</sup>/h (flujo que fue requerido para alimentar a la etapa siguiente de Ósmosis Inversa).

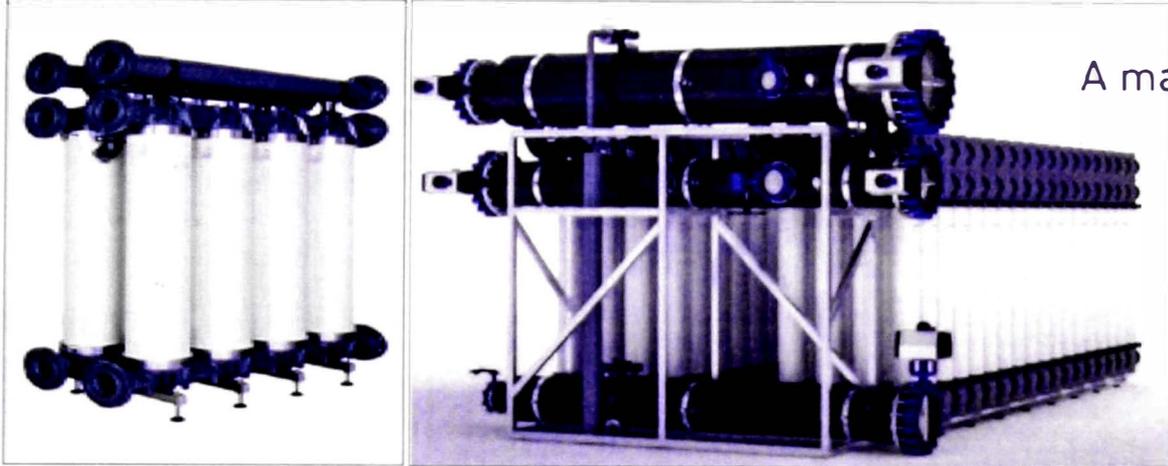
- **Configuración de equipos ultrafiltración (UF)**

- Para los flujos considerados se empleó un skid con 30 membranas de 80 m<sup>2</sup> de área cada uno. De esta forma se ahorra espacio. Con dicha configuración cada skid tuvo su propio PLC local. Se tendrá un skid con un equipo UF en stand by para cada etapa.

En la figura 18 se muestra sistemas referenciales de ultrafiltración típicas donde se observa una instalación en rack.

**Figura 18**

*Imágenes referenciales de membranas de ultrafiltración*



Nota: Adaptación tomada membranas INGE y Pentair

### **Proceso de retrolavado (BW) y limpieza mejorada (CEB)**

Se está considerando que con las líneas trabajando se podrá realizar al mismo tiempo máximo dos BW a la vez (o CEB). Para lo cual se consideró bomba para CEB/BW con las siguientes características.

- Flujo de BW: 280 m<sup>3</sup>/h
- Flujo de CEB: 280 m<sup>3</sup>/h

Se diseñaron para realizar BW cada 40 minutos y con una duración de 50 segundos.

De acuerdo con los resultados del pilotaje se podían subir a BW cada 45 minutos y con una duración de 50 segundos

### **Pretratamiento con filtros anillas 130 micras**

Se consideró Prefiltros de Discos tanto para la alimentación de las UF como para la línea de BW, de acuerdo con lo que solicitó el fabricante de las membranas y el pilotaje realizado, en la figura 19 se muestran sistemas de filtros anillas típicos.

- Para línea de Alimentación UF

- Flujo de Alimentación total: 150 m<sup>3</sup>/h
- Cantidad de Equipos: 1
- Flujo por Equipo: 150 m<sup>3</sup>/h
- Nivel de filtración: 130 micras
- Tipo elemento Filtrante: Disco Doble de 3": 6 unidades
- Material: Completamente plástico
- Configuración: Horizontal

**Figura 19**

*Imágenes referenciales de filtros anillas para pre-tratamiento*



Nota: Adaptación tomada de Jimtem, Azud y Amiad

- Para línea de Backwash:
  - Flujo de BW: 288 m<sup>3</sup>/h
  - Cantidad de Equipos: 1
  - Nivel de filtración: 200 micras
  - Tipo elemento Filtrante: Disco Doble de 3": 8 unidades
  - Material: Completamente plástico
  - Configuración: Horizontal

- **Sistema de ósmosis inversa**

**Principales datos de diseño**

- Porcentaje (%) de Recuperación RO: De acuerdo con la información disponible, el factor limitante para una mayor recuperación de la RO es el Ba (Sulfato de bario).

Con un valor de 0.09 ppm se tiene una recuperación máxima de 70% para una operación sin riesgos. Se monitoreó dicho parámetro. Trabajando con valores superiores a este valor, como se comentó anteriormente, ya que la cinética de la precipitación de Ba era lenta, el diseño de la Ósmosis debía considerar:

- La segunda etapa del equipo debía diseñarse con alta velocidad para no dar tiempo para la precipitación del Bario.
- Se debía realizar enjuagues (flushes) periódicos con agua permeada (al apagar el equipo), de forma que las membranas no se quedaran con agua concentrada en su interior y se produjera la precipitación.
- Flux de diseño de los Equipos RO: Debido al tipo de agua el diseño consideró un Flux de 14.2 GDF (24 l/h), valor razonable considerando que el agua fuente era Ultrafiltrada. Se revisó el flux con el cual trabajaban los equipos.
- Tipo de Porta Membrana: Se utilizaron tubos de FRP con conexión lateral para 6 membranas y una presión máxima de operación de 450 psi, ver figura 20 de modelos referenciales.

Figura 20

Imagen referencial de porta-membranas para membranas de ósmosis inversa

**Figura 20**

*Imágenes referenciales de porta-membranas de osmosis inversa*



Nota: Adaptación tomada de protec, winder y Codeline

- Tipo de membrana: Por la experiencia que en casos similares se optó por utilizar una membrana tipo Low Fouling de 400 pies<sup>2</sup> de área y espaciador de 34 mil. Se pudo usar la membrana BW30 XFR-400/34 o equivalentes en otras marcas de

membranas de primer nivel de similares características, ver figura 21 de modelos típicos de membranas.

- Se utilizó el siguiente modelo de membranas:
- Marca tipo modelo área espaciador
- Dow-filmtec low fouling
- BW30 XFR-400/34 ó BW30 XFR-400/34i 400 FT2 34 mil Alto

Nota: Ya que el agua a tratar fue ultrafiltrada se trabajó a alta velocidad de agua la salida de concentrado, se redujo fuertemente el ensuciamiento de las membranas.

### Figura 21

*Imágenes referenciales de membranas de osmosis inversa*



Nota: Adaptación tomada de filmtec, toray y Nitto

#### ▪ Capacidad de equipos de ósmosis inversa

Para una producción total por línea de 135 m<sup>3</sup>/h de acuerdo con lo solicitado se trabajó del siguiente modo.

- Se mantuvo el espacio para un equipo en stand by.
  - Para el flujo producto de 95 m<sup>3</sup>/h la configuración escogida fue 16:8x6
  - Con esta configuración se trabajó con un Flux de 13.9 GDF, lo que equivalió a: 23.65LMH
- #### ▪ Bomba de alta presión
- Para una producción de 95 m<sup>3</sup>/h y 70% de recuperación se requirió un flujo de alimentación de 135 m<sup>3</sup>/h.
  - La presión estimada de trabajo con 20% extra fue de 23 bar. (Con P entrada: 2 bares;  $\Delta P$ : 21 bares)

- Se prefirió la utilización de bombas verticales, en caso de no existir en el mercado por las características de Flujo y presión se pudo considerar Horizontales, la figura 22 muestra los principales tipos de bombas centrífugas.
- Evaluación de uso de recuperadores de energía.

**Figura 22**

*Imágenes referenciales de bombas de alta presión para osmosis inversa*



Nota: Adaptación tomada de Fedco, Tonkaflo y Grundfos

#### **3.4.4 Evaluación y decisiones tomadas**

- Se realizó la evaluación de tecnologías alternativas considerando la analítica de efluente a tratar.
- Se realizó la evaluación de equipamiento modular y capacidad por unidad
- Se realizó la evaluación de instalación y puesta en marcha progresiva de los sistemas de UF y RO.
- Las decisiones tomadas fueron: uso de tecnología UF/RO, instalación de sistemas de Ultrafiltración en una primera etapa e instalación de los sistemas de ósmosis inversa en una segunda etapa.

- La verificación de la viabilidad del proyecto se determinó mediante la comparación de los resultados de los valores fisicoquímicos del agua trata por PTA de relaves por tecnologías de ultrafiltración y osmosis inversa.

### **3.4.5 Informes presentados como resultado de las actividades realizadas**

Los resultados que se obtuvieron durante los primeros días de operación del sistema de ultrafiltración y ósmosis inversa se muestran en el anexo 4 de Informe de operación de sistemas de ultrafiltración (UF) y osmosis inversa (RO)

A continuación, se muestra las principales fases de implementación de la PTA de relave mediante tecnologías de ultrafiltración y osmosis inversa.

#### **Comisionamiento de sistemas de ultrafiltración**

- El proceso de comisionamiento se inició mediante las siguientes actividades:
- Se verificó la energía eléctrica en 480 VAC, 120 VAC.
- Se verificó línea de aire a presión de 6 bares para activar válvulas neumáticas.
- Se verificó contar con Efluente disponible para probar línea hacia sistemas de ultrafiltración.
- Se verificó contar con bombas hacia UF, filtros de anillas, bomba de retrolavado, dosificadores e instrumentación instaladas y operativas.
- Se verificó contar con Red de datos disponible y operativa entre PLC, Panel view de ultrafiltración.

Los principales pasos realizados para el comisionamiento de equipos de ultrafiltración (UF) fueron:

- Se configuró PLC y panel view de skids UF.
- Se cargó programa de PLC y Panel View de Tablero de Control de UF para activar señales digitales y monitoreo de señales análogas.
- Se probó apertura y cierre de válvulas actuadas neumáticamente
  - Se verificó la presión de aire en la línea neumática.

- Se verificó conexionado de mangueras en las electroválvulas y se ajustaron reguladores de aire.
- Se activaron de forma forzada desde el programa del PLC cada válvula actuada y se verificó la energía de 24 VDC en la bobina de electroválvula 3/2, y se visualizó la posición del final de carrera para verificar señal de confirmación de apertura y cierre en módulo de ingresos digitales de PLC.
- Se probaron señales de instrumentos (transmisores de presión y medidores de flujo)
  - Se verificó el correcto cableado de los transmisores de presión y su cableado al módulo de ingresos analógicos del PLC, se respetó el orden del polo positivo y negativo para una correcta lectura.
  - Se energizaron los transmisores.
  - Se verificó el encendido del display del transmisor y se visualizó su lectura y alarmas.
- Se probó programa de control del PLC
  - Se verificó que el programa del PLC activara las entradas y salidas digitales de los módulos del PLC.
  - Se verificó que el programa del PLC activara las entradas y salidas analógicas de los módulos del PLC.
- Se activaron en modo manual los componentes del sistema desde panel view
  - Se activaron válvulas actuadas, y se confirmó la posición de válvula (abierto/cerrado).
  - Se visualizaron las lecturas de señales análogas de transmisor de presión y flujo.
  - Se activaron un juego de válvulas para verificación de estado de ciclo de trabajo de UF (filtración, retrolavado, CEBs).
- Se activó en modo automático el sistema desde el panel view.

- Se asignaron valores de tiempo para apertura de válvulas y duración de secuencia de trabajo del proceso de ultrafiltración.
- Se activó la secuencia automática en vacío (sin presencia de flujo) para verificar ciclo de trabajo (filtración, retrolavado, CEBs) y optimizar los retardos al encendido/apagado de bombas y dosificadoras, apertura/cierre de válvulas, activaciones de alarmas y fijar rangos de trabajo.

### **Puesta en marcha de sistemas de ultrafiltración**

- Se realizó el ingreso el efluente a tratar: se revisó la calidad del efluente de ingreso, se analizó la muestra con instrumentos de campo para obtener parámetros como:
  - Turbidez
  - pH
  - Conductividad
  - Fierro
  - Manganeso
- En función a los parámetros de ingreso se ajustaron y regularon los valores de diseño para la inyección de los siguientes químicos:
  - Cloro
  - Coagulante
  - Acido
- Se limpiaron las tuberías de Línea de Alimentación, línea retrolavado y línea de producto de los sistemas de ultrafiltración
  - Se realizó limpieza de las tuberías que llegan hasta la línea de ingreso, retrolavado/CEB y producto de los equipos de ultrafiltración, esto con el fin de propiciar un arrastre de todo lo acumulado en el montaje de las tuberías HDPE (como residuos, virutas, pernos, etc.) y evitar cualquier objeto extraño que ingrese a las membranas.

- Se encendió la bomba de alimentación con el motor a baja frecuencia, aproximadamente a 35 Hz.
- Se purgó el aire de las líneas de ingreso al UF, para la purga de aire de las líneas de tuberías se requirió:
  - Se abrieron las válvulas de aislamiento de las válvulas de venteo de los skids UF.
  - Se abrieron de forma manual las válvulas de ingreso y salida de los equipos UF en cada skid.
  - Se encendieron las bombas que alimentan al UF en modo manual a 40 Hz.
  - Se realizó el flush de las líneas hasta que no salga aire por la válvula de venteo.
  - Se finalizó apagando las bombas de alimentación al UF.
  - Y se cerraron de forma manual las válvulas de ingreso y salida de los equipos UF.
- Se arrancó en modo Automático los equipos UF: Para realizar el arranque de forma automática de los equipos se realizó lo siguiente:
  - Se activó el modo automático en las pantallas de operador de los equipos de UF y desde la sala de control encender arranque automático.
  - Se anotaron presiones y flujos de la operación del sistema.

### **Comisionamiento de sistemas de ósmosis inversa**

Para el inicio del proceso de comisionamiento fue requisito indispensable realizar las siguientes actividades:

- Se verificó la energía eléctrica en 480 VAC, 120 VAC.
- Se verificó línea de aire a presión de 6 bares para activar válvulas neumáticas.
- Se verificó contar con agua ultrafiltrada disponible para probar línea hacia sistemas de ósmosis inversa.

- Se verificó contar Bombas de envío de agua ultrafiltrada, filtros de sedimentos, bomba de Flush de agua osmotizada, dosificadores e instrumentación instaladas y operativas que se activaron de forma automática.
- Se revisó Red de datos disponible y operativa entre PLC, Panel view de ósmosis inversa.
- Los Principales pasos realizados para el comisionamiento de equipos de ósmosis inversa (RO) fueron:
  - Se configuró PLC y panel view de skids RO.
  - Se cargó programa de PLC y Panel View de Tablero de Control de RO para activar señales digitales y monitorear señales análogas.
  - Se probó apertura y cierre de válvulas actuadas neumáticamente
    - Se verificó la presión de aire en la línea neumática
    - Se verificó conexionado de mangueras en las electroválvulas y ajuste de reguladores de aire.
    - Se activaron de forma forzada desde el programa del PLC cada válvula actuada para verificar energía de 24 VDC en la bobina de electroválvula 3/2, y se visualizó la posición del final de carrera para verificar señal de confirmación de apertura y cierre en módulo de ingresos digitales de PLC.
- Se probaron las señales de instrumentos (transmisores de presión, medidores de flujo, PH, ORP y conductividad)
  - Se verificó el correcto cableado de los instrumentos y su cableado al módulo de ingresos analógicos del PLC, se respetó el orden del polo positivo y negativo para una correcta lectura.
  - Mediante un generador de señales se inyectó corriente al circuito en el rango de 4-20 mA y se verificaron los valores analógicos configurados en el escalamiento de la señal.
  - Se energizaron los transmisores.

- Se verificó el encendido del display del transmisor y se visualizó su lectura y alarmas en caso aplicaba.
- Se realizaron los ajustes en la configuración del sensor.
- Se contrastaron las lecturas de los parámetros con solución buffer en caso aplicaban.
- Se probó el programa de control del PLC
  - Se verificó que el programa del PLC active las entradas y salidas digitales de los módulos del PLC.
  - Se verificó que el programa del PLC active las entradas y salidas analógicas de los módulos del PLC
- Se activaron en modo manual los componentes del sistema desde panel view
  - Se verificó la activación de válvulas actuadas, y confirmación de posición de válvula (abierto/cerrado).
  - Se visualizaron lecturas de señales análogas de transmisor de presión y flujo.
  - Se asignaron rangos de trabajo y escalamiento a los valores de proceso.
  - Se realizó el Arranque manual del equipo, con secuencia de encendido paso a paso, para encontrar los valores de seteo de parámetros de proceso, frecuencias, tiempos de retardo de apertura de válvulas y accionamiento de bombas.
- Se realizó la activación automática del sistema desde el panel view.

Se asignaron valores de tiempo para:

- Retardo en la apertura de válvulas y señales de confirmación
- Retardos al encendido/apagado de bombas de alimentación, de alta presión y dosificadoras.
- Secuencia de flush de agua de alimentación
- Secuencia de flush de agua osmotizada

- Se verificó activación de Alarmas y mensajes de advertencia
- Se verificó activación de la secuencia automática en vacío (sin presencia de flujo):
- Se verificó la secuencia de arranque /parada equipo ósmosis
- Se verificó la secuencia de estación de limpieza CIP
- Se verificó secuencia Flush de agua osmotizada (Por apagado o por tiempo de operación)

### **PEM de sistemas de ósmosis inversa**

- Se revisó calidad de agua ultrafiltrada al ingreso, con analizadores de campo como:
  - Turbidez
  - pH
  - Conductividad
  - Fierro
  - Manganeso
- Se realizaron los ajustes de parámetros de ingreso. - En función a los parámetros de ingreso se ajustan y regulan los valores de diseño del efluente con la inyección de los siguientes químicos:
  - Metabisulfito
  - Antiincrustante
- Se realizó la limpieza de tuberías de línea de alimentación RO, línea rechazo y línea de producto de los sistemas de ósmosis inversa
  - Se requirió realizar una limpieza de las tuberías que llegan hasta la línea de ingreso, rechazo y producto de los equipos de ósmosis inversa, esto con el fin de realizar un arrastre de todo lo acumulado en el montaje de las tuberías HDPE (como residuos, virutas, pernos, etc.) y evitar cualquier objeto extraño que ingrese a las membranas.

- Se realizó el encendido de la bomba de alimentación con el motor a baja frecuencia, aproximadamente a 35 Hz.
- Se purgó el aire de las líneas de ingreso al RO, para la purga de aire de las líneas de tuberías se realizaron las siguientes actividades:
  - Se abrió de forma manual las válvulas de purga en los portafiltros de cartucho de cada ósmosis.
  - Se abrió de forma manual las válvulas de ingreso y las válvulas de flush de concentrado de los equipos de ósmosis.
  - Se abrió la válvula de ingreso al CIP y se abrió la válvula de drenaje del tanque CIP.
  - Se encendieron las bombas que alimentan al RO en modo manual a 40 Hz.
  - Se realizó el flush de las líneas hasta que no salga aire por la válvula de venteo y purga.
  - Se apagaron las bombas de alimentación a los equipos de ósmosis.
- Se realizó el arranque Automático de los equipos RO, para realizar el arranque de forma automática de los equipos se realizaron las siguientes actividades:
  - Se activó el modo automático en las pantallas de operador de los equipos de RO y desde la sala de control encender arranque automático.

Se anotaron las presiones, flujos y parámetros de la operación del sistema.

## **CAPITULO IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS E IMPLICANCIAS**

### **4.1 Contribuciones al desarrollo de la empresa**

- Búsqueda de nuevos proveedores, reposiciones automáticas de stock, organización administrativa del área de ejecución de proyectos, inventario de equipos, instrumentos y herramientas del área, cuadro de seguimiento de proyectos y adiestramiento de nuevo personal.

## 4.2 Impacto de la propuesta (Económico, tecnológico, ambiental)

Se confirma la viabilidad del proyecto de implementación de una planta de tratamiento de agua de relaves mineros mediante las tecnologías de Ultrafiltración y Ósmosis Inversa.

Durante el desarrollo del proyecto se han realizado las tareas necesarias para la elaboración de la ingeniería y se han conseguido los recursos necesarios para el proyecto de implementación de una PTA de relaves mineros.

Como parte de la ingeniería de detalle se desarrolló la siguiente documentación:

- Diagrama de Flujo general (Ver Anexo 3)
- Diagrama de tuberías e instrumentación
- Plano Layout
- Vista de equipamiento

Como parte de la ejecución, monitoreo, control y evaluación de la implementación de una PTA de relaves mineros mediante los procesos de ultrafiltración y osmosis inversa se verifica mediante los procesos de comisionamiento y puesta en marcha.

El principal impacto económico se puede determinar en base al costo invertido en otras tecnologías que no han dado una solución adecuada al tratamiento del agua de relave, impidiendo que se pueda disponer adecuadamente del agua tratada hacia un cuerpo receptor, la propuesta de solución ejecutada ha permitido reducir gastos de mantenimiento y renovación de equipos a pesar su alto costo de inversión garantiza un mejor desempeño de la PTA, reduce significativamente los gastos operativos de aquellos sistemas que no aportan un adecuado tratamiento, reemplazándolos en su totalidad.

El impacto tecnológico es sustancial, ya que pone a la empresa a la vanguardia en la implementación de plantas de tratamiento de efluentes de agua de relaves, superando tecnologías tradicionales como la filtración o precipitación química y otorgando un nuevo impulso a las tecnologías de tratamiento por membranas; garantizando su fiabilidad mediante los resultados de calidad de agua obtenidos.

Respecto al impacto ambiental la inversión en una planta de tratamiento de aguas residuales ha mejorado la imagen corporativa ante la población dando un claro mensaje de parte de la empresa en su compromiso para por un manejo adecuado de recursos hídricos y creando una conciencia ambiental.

## Conclusiones

- Las condiciones particulares del agua de relave tratado en el presente informe permiten su tratamiento directo mediante un sistema combinado de ultrafiltración y ósmosis inversa sin embargo el método puede ser extendido bajo otras condiciones considerando un pretratamiento adecuado.
- Se concluye que el método combinado de ultrafiltración/ósmosis inversa es un método adecuado y viable para el tratamiento de efluentes provenientes del agua de relave minero cumpliendo la normativa vigente según D.S. N° 004-2017-MINAM.
- Según el nivel de inversión disponible es posible tratar por completo un efluente de agua de relave a tal nivel que permita su reúso completo en el proceso e incluso la descarga a cuerpos receptores mediante el tratamiento.
- Se concluye que si es viable la implementación de una PTA de relaves mineros mediante las tecnologías de Ultrafiltración y Ósmosis Inversa.
- Se ha logrado la ejecución, monitoreo, control, respuesta ante dificultades para la implementación de una PTA de agua de relaves mineros mediante los procesos de ultrafiltración y osmosis inversa
- Mediante el análisis del desempeño de tecnologías como Ultrafiltración y Ósmosis Inversa en el tratamiento de agua de relaves mineros se concluye que la evaluación y verificación del proyecto de implementación de una PTA de relaves mineros mediante los procesos de ultrafiltración y osmosis inversa ha cumplido con la regulación vigente por lo que se determina como exitoso.

## Recomendaciones

- Si bien el nivel de inversión para el tipo de tecnología de ultrafiltración / ósmosis inversa es elevado y muchas veces solo implementado por la gran minería, en el caso de la mediana y pequeña minería se recomienda su implementación progresiva teniendo en cuenta que puede ser instalada de forma modular ampliando cada año según sea requerido y según se pueda cumplir con el gasto de inversión presupuestado.
- Se recomienda siempre seguir la normativa de SST durante la ejecución de los trabajos de fabricación, instalación, puesta en marcha y operación de los sistemas de ultrafiltración / ósmosis inversa considerando que se trabajan con agua a altas presiones y equipos energizados.
- Se recomienda realizar siempre el análisis orgánico del agua de relave (espejo de agua) debido a que según la estación del año en que se encuentre puede variar considerablemente la presencia de compuestos orgánicos como las algas que puede repercutir en una menor eficiencia del tratamiento.
- En base a los resultados obtenidos se puede determinar que el uso de las tecnologías de ultrafiltración y osmosis inversa para el tratamiento de agua de relaves mineros es un método recomendable.
- Tomando como referencia el proyecto de implementación de una PTA de relaves mediante ultrafiltración y osmosis inversa se recomienda realizar un análisis continuo de los valores de parámetros fisicoquímicos del agua producto para su adecuada evaluación a lo largo del tiempo de operación.
- Finalmente se espera que lo aportado en el presente informe futuros proyectos de tratamiento de relaves en las distintas mineras del país.

## Referencias Bibliográficas

- Accuaproduct (2024). *Especialistas en Tratamiento de Agua y Efluentes Industriales*. Recuperado de <https://accuaproduct.com/nosotros/>.
- Andamayo, A. (2019). *Tratamiento de aguas ácidas para la obtención de agua tipo III en la Sociedad Minera el Brocal S.A.A.* [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional Daniel Acides Carrion, Pasco, Perú.
- American Water Works Association (AWWA). (2005). *M53 Microfiltration and Ultrafiltration Membranes Manual (2a ed.)*. Recuperado de <https://www.awwa.org/>.
- American Water Works Association (AWWA). (2005). *M46 Reverse Ósmosis and Nanofiltration Manual (2a ed.)*. Recuperado de <https://www.awwa.org/>.
- Cardenas, J. (2001). *Plan de abandono de depósitos de relaves de la mina Casapalca*. [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Cheyen, M. (1998). *Ultrafiltration and microfiltration handbook (2a ed.)*. (pp. 85). Washington DC, United States: CRC Press.
- Davis, M. (2011). *Water and Wastewater Engineering: Design Principles and Practice (2a ed.)*. New York, United States: McGraw-Hill Education.
- Decreto Supremo N.º 004-2017-MINAM, *Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen Disposiciones Complementarias*. (07 de Junio de 2017). Recuperado de <https://www.minam.gob.pe/disposiciones/decreto-supremo-n-004-2017-minam/>
- Decreto Supremo N.º 010-2010-MINAM, *Aprueban límites máximos permisibles para la descarga de efluentes líquidos de Actividades Minero – Metalúrgicas*. (21 de Agosto de 2010). Recuperado de <https://www.minam.gob.pe/disposiciones/decreto-supremo-n-010-2010-minam/>

- Dupont (2021). *Filmtec Reverse Osmosis Membranes Technical Manual* (10a ed.).  
[www.dupont.com/water/contact-us](http://www.dupont.com/water/contact-us)
- Dupont (2020). *Membranas de ultrafiltración INGE, directrices de proceso y diseño* (5a ed.).  
<https://www.dupont.com/brands/integrattec-ultrafiltration.html>
- Elías, X. (2012). *Reciclaje de residuos industriales, residuos sólidos urbanos y fangos de depuradora* (2a ed.). (pp. 175). Madrid, España: Ediciones Diaz de Santos.
- Enriquez, G. (2000). *El ABC de la instrumentación en el control de procesos industriales* (1a ed.). México DF, México: Editorial Limusa.
- Estay, H., & Santoro, S. (2021). *Membrane technology for a sustainable copper mining industry: The Chilean paradigm. Cleaner Engineering and Technology 2 Journal Elsevier*, 8-19 <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100091>
- Gamarra, R. (2015). *Eficacia de la tecnología de membranas para convertir efluentes mineros, en aguas para riego* [Tesis de Maestría en Gestión y Auditorías Ambientales]. Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Piura, Perú.
- Howe, K., Hand, D., Crittenden, J., Trussell, R. & Tchobanoglous, G. (2016). *Principios de Tratamiento del agua*. Toluca, México: Cengage Learning Editores.
- Instituto Tecnológico Geominero de España. (1991). *Minería Química*. Madrid: ITGE.  
Recuperado de [https://www.google.com.pe/books/edition/Miner%C3%ADa\\_qu%C3%ADmica/29xW6aOhcXgC?hl=es-419&qbpv=1](https://www.google.com.pe/books/edition/Miner%C3%ADa_qu%C3%ADmica/29xW6aOhcXgC?hl=es-419&qbpv=1)
- Martinez, O. (2000). *Informe de ingeniería diseño de presa de relaves mineros*. [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima Perú.
- McCabe, W., Smith, J., & Harriott, P. (1991). *Operaciones unitarias en ingeniería química* (4a ed.). New York, United States: McGraw-Hill Education.
- Metcalf & Eddy INC. (1995). *Ingeniería de aguas residuales – tratamiento, vertido y reutilización*. (3a ed.). New York, United States: McGraw-Hill Education.

Ministerio de energía y minas, Perú (1995). *Guía ambiental manejo de agua en operaciones minero-metalúrgicas*. Recuperado de

<http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAM/quias/manejoagua.pdf>

Ministerio de Energía y Minas, Perú. (1995). *Guía ambiental para el manejo de relaves mineros*. Recuperado de

<http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAM/quias/relaveminero.pdf>

Organización Panamericana de la Salud (1988). *Control de calidad el agua potable en sistemas de abastecimiento para pequeñas comunidades [Publicación científica]. Guías para la calidad del agua potable, Washington DC, Estados Unidos de América*.

<https://books.google.com.pe/books?id=X9QqncMbnsYC&pg=PA5&dq=Turbiedad&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwjy2MXI6739AhUkHbkGHUy0AqwQ6AF6BAqCEAI#v=onepage&q=Turbiedad&f=false>

Ramalho R. (1996). *Tratamiento de aguas residuales (1a ed)*. Quebec, Canada: Editorial Reverté.

Rigola, M. (1990). *Tratamiento de aguas industriales: Aguas de proceso y residuales (1a ed.)*. Barcelona, España: Marcombo S.A.

[https://books.google.com.pe/books?id=fQcXUq9WFC8C&pg=PA73&dq=resinas+de+intercambio+i%C3%B3nico&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwib\\_7PMzr\\_9AhWtH7kGHY2XCzAQ6AF6BAqMEAI#v=onepage&q=resinas%20intercambio%20i%C3%B3nico&f=false](https://books.google.com.pe/books?id=fQcXUq9WFC8C&pg=PA73&dq=resinas+de+intercambio+i%C3%B3nico&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwib_7PMzr_9AhWtH7kGHY2XCzAQ6AF6BAqMEAI#v=onepage&q=resinas%20intercambio%20i%C3%B3nico&f=false)

Rodriguez, F. (2003). *Procesos de potabilización de agua e influencia del tratamiento de ozonización (1a ed.)*. Madrid, España: Ediciones Díaz de Santos S.A.

[https://books.google.com.pe/books?id=xAvNbixfFpcC&pg=PA65&dq=materia+organica+del+agua&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwi8ul\\_D8b39AhWsLrkGHSA-CWqQ6AF6BAqHEAI#v=onepage&q=materia%20organica%20del%20agua&f=false](https://books.google.com.pe/books?id=xAvNbixfFpcC&pg=PA65&dq=materia+organica+del+agua&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwi8ul_D8b39AhWsLrkGHSA-CWqQ6AF6BAqHEAI#v=onepage&q=materia%20organica%20del%20agua&f=false)

- Rusell, D. (2012). *Tratamiento de aguas residuales: un enfoque practico*. Barcelona, España: Editorial Reverté.
- Sans Fonfria, R., & Pablo Ribas, J. (1989). *Ingeniería ambiental: Contaminación y tratamientos (1a ed.)*. Barcelona, España: Marcombo S.A.  
[https://books.google.com.pe/books?id=kumplOJs6T0C&pg=PA101&dq=precipitaci%C3%B3n+qu%C3%ADmica&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwjI9bHzzb\\_9AhURHrkGHWwjD40Q6AF6BAgEEAI#v=onepage&q=precipitaci%C3%B3n%20qu%C3%ADmica&f=false](https://books.google.com.pe/books?id=kumplOJs6T0C&pg=PA101&dq=precipitaci%C3%B3n+qu%C3%ADmica&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwjI9bHzzb_9AhURHrkGHWwjD40Q6AF6BAgEEAI#v=onepage&q=precipitaci%C3%B3n%20qu%C3%ADmica&f=false)
- Servicio Nacional de Certificación Ambiental para las Inversiones Sostenibles (2019). *Informe Técnico Final de la "Modificación del Estudio de Impacto Ambiental detallado del Proyecto Antapaccay Expansión Tintaya – Integración Coroccohuayco"*. Recuperado de [https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1222324/Informe\\_01017\\_2019\\_SE\\_NACE\\_PE\\_DEAR-comp-1.pdf?v=1596923598](https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1222324/Informe_01017_2019_SE_NACE_PE_DEAR-comp-1.pdf?v=1596923598)
- Talaverano, L. (2014). *Optimización del desempeño del PH en la precipitación de metales para incrementar la eficiencia del tratamiento de aguas ácidas con producción más limpia en la planta de procesos AWTP Pampa Larga*. [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Treybal, R. (1980). *Operaciones de transferencia de Masa (2a ed.)*. (pp. 378 -510). New York, United States: McGraw-Hill Education.
- Velasco, M. (21 noviembre 2008). *La relación de la minería y el recurso agua* [Seminario Nacional]. Agua y minería en Comunidades Locales, La Paz, Bolivia.  
[https://books.google.com.pe/books?id=Dk9fH\\_9v0tqC&lpg=PP1&dq=tratamiento%20de%20relaves%20mineros%20investigaci%C3%B3n&pg=PP1#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.pe/books?id=Dk9fH_9v0tqC&lpg=PP1&dq=tratamiento%20de%20relaves%20mineros%20investigaci%C3%B3n&pg=PP1#v=onepage&q&f=false)
- Villas, R., & Page, R. (2001). *La minería en el contexto de la ordenación del territorio (1a ed.)*. (pp. 166). Ciudad de Rio de Janeiro, Brasil: CYTED.  
[https://www.google.com.pe/books/edition/La\\_Mineria\\_em\\_el\\_Contexto\\_de\\_la\\_Ord](https://www.google.com.pe/books/edition/La_Mineria_em_el_Contexto_de_la_Ord)

[enaci/lqDaPP2yovoC?hl=es-](#)

[419&gbpv=1&dq=DRENAJE+DE+MINA&pg=PA166&printsec=frontcover](#)

Zacarias, A. (2020). *Mecánica de Fluidos. Teoría con aplicaciones y modelado (1a ed.)*.

(pp. 123). Ciudad de México, México: Grupo Editorial Patria.

## **Anexos**

Anexo 1. Proyección UF de tratamiento de agua de relaves

Anexo 2. Proyección RO de tratamiento de agua de relaves

Anexo 3. Diagrama de flujo planta de tratamiento de agua de relaves mineros

Anexo 4. Informe de operación UF y RO

## Anexo 1. Proyección UF de tratamiento de agua de relaves

<b>Cliente:</b>	AP	<b>Diseñador:</b>	JFACC	<b>Comentarios:</b>
<b>Nombre proyecto:</b>	T. de agua de relave	<b>Empresa:</b>	Accuaproduct	
<b>Número proyecto:</b>	001	<b>No revisión:</b>	2.3.222	

**Proceso de datos**
**Agua alimentación**

Origen del agua:	Turbidez: [NTU]	SST: [ppm]	COD: [ppm]	DOC:	KMnO4 [ppm]	Temperatura: [°C]	Alcalinidad: [mmol/l]	Conductividad: [µS/cm]	Valor pH: [-]
WWTP effluent	20	20.0	1.0	-	-	15.0	1.00	7,500	7.8

**Parámetros adicionales:**

Pretratamiento: Prefilter &lt; 300 µm

**Set up coagulación**

Coagulante	Concentración Me3+: [%]	Densidad Coagulante: [g/cm³]	Ratio de diseño Me3+: [ppm]	Ratio medio dosificación Me3+: [ppm]	Opc pH [-]	Tiempo de contacto: [s]
PACI	5.3	1.20	2.5	1.3	6.5 - 7.3	30-60

**Configuración del sistema**

Modulos:	Sistema UF:	Configuración sistema:	Nº rack (min. en filtr. / diseño):	Nº de líneas Contralavado (BW):	Nº total de trenes (n+x):	Módulos por tren:	Nº total de módulos:	Total área de membranas: [m²]
dizzer XL 0.9 MB 80 WT	T-Rack 3.0	Constant flux	1	1	(n)	30	30	2.400

**Sistema operativo principal**

Flux bruto: [l/m²/h]	Flux neto filtración: [l/m²/h]	Conversión [%]	Tiempo filtración [min]	Tiempo BW [s]	Flux BW [l/m²/h]	Tiempo FWF [s]	Flux FWF [l/m²/h]
67.1	56.3	89.8	35	50	230.0	0	0.0

**Caudal del proceso, total**

Q. alim. de diseño: [m³/h]	Caudal medio alimentación: [m³/h]	Caudal medio filtrado: [m³/h]	Q. medio agua de rechazo BW: [m³/h]	Q medio agua de rechazo CEB: [m³/h]	Q medio total agua de rechazo: [m³/h]
161	150	135	13.7	1.7	15.4

**Parámetros CEB**

	Químicos	Punto de pH/ppm	Frecuencia [h]	Tiempo inyección [s]	Flux inyección [l/m²/h]	tiempo de permanencia [min]	Tiempo vaciado [s]	Flux vaciado [l/m²/h]
<b>CEB 1.1 A (Alcalinidad)</b>	NaOH	12.0	24	90	120.0	15	60	230.0
<b>CEB 1.1 B (Alcalino+Oxidante)</b>	+NaOCl optional	+ 20 ppm						
<b>CEB 1.2/2 (Acida)</b>	H2SO4	2.3	24	90	120.0	15	60	230.0
<b>CEB 3 (Desinfección)</b>	NaOCl	10 ppm	72	90	120.0	7	60	230.0

**Exoneración:**

Cualquier resultado obtenido por el Inge System Design Software (iSD) de Inge que incluye, pero no se limite a funcionamiento de la filtración, conversión, consumo de reactivos, consumo de energía, diseño de bombas, presión transmembrana, tamaño, tipo y cantidad de módulos de UF de Inge desplegados en el sistema esta basado en comportamientos medios de los módulos de UF de Inge y basado en condiciones ambientales normales. Inge no garantiza que los resultados producidos por el iSD y en ningún sistema desarrollado a partir de sus resultados vaya a satisfacer el funcionamiento deseado de las membranas o del funcionamiento requerido con relación a un emplazamiento concreto o a un proyecto ya sea conocido o no por Inge o el cliente. En particular, Inge no garantiza que el iSD o cualquier sistema desarrollado a partir de sus resultados sean válidos para ningún propósito concreto. Por consiguiente, Inge rechaza cualquier responsabilidad por pérdidas o daños resultantes del uso del iSD.

<b>Ciente:</b>	AP	<b>Diseñador:</b>	JFACC	<b>Comentarios:</b>
<b>Nombre proyecto:</b>	T. de agua de relave	<b>Empresa:</b>	Accuaproduct	
<b>Número proyecto:</b>	001	<b>No revisión:</b>	2.3.222	

**Varios**

Tiempo pausa antes de BW:	Tiempo respuesta válvulas: [s]	Tiempo subida bombas BW:	Añadir margen de seguridad al tiempo de BW	Parada diaria mantenimiento (i.e. test integridad, CIP, etc):
5 *	7 *	7 *	30	0

\* Tiempo considerado antes y después del BW

**Equipos principales**
**Bombas**

	Caudal	No de bombas en funcionamiento	TMP diseño [bar]	Pérdida Presión sistema [bar]	Presión diseño [bar]
Bomba alimentación	161.1 m <sup>3</sup> /h	1	1.5	0.1	1.6
Bomba BW	552.0 m <sup>3</sup> /h	1	2.5	0.3	2.8
			<b>Design pH/conc</b>		
Bomba dosif. cáustica	750 l/h		12.3		
Bomba dosif. ácida	574 l/h		2.0		
Bomba dosif. cloro	390 l/h		200.0 ppm		
Bombas coagulación:	6 l/h		2.5 ppm		

**Depósito de BW**

Basado en secuencia CEB. BW/CEB empieza cuando tanque está lleno

Agua necesaria para CEB [m <sup>3</sup> ]	Márgen [%]	Min caudal diseño [m <sup>3</sup> ]	
15.8	25	19.8	Llenado durante empapamiento
25.7	25	32.1	No llenado durante empapamiento

**Sistema CIP**

Volumen minimo tanque CIP: [m <sup>3</sup> ]	Tuberías entrada CIP: [m <sup>3</sup> ]	UF-módulos +tubería interna: [m <sup>3</sup> ]	Tubería reenvío CIP: [m <sup>3</sup> ]	Tubería reenvío filtrado CIP: [m <sup>3</sup> ]	Volumen total CIP: [m <sup>3</sup> ]	Diseño tanque CIP: no vaciado / vaciado	Capacidad bomba CIP @ 1bar: [m <sup>3</sup> /h]
0.5	1.0	2.5	1.0	1.0	6.0	3.5 / 6.0	60.0

**Exoneración:**

Cualquier resultado obtenido por el Inge System Design Software (iSD) de Inge que incluye, pero no se limite a funcionamiento de la filtración, conversión, consumo de reactivos, consumo de energía, diseño de bombas, presión transmembrana, tamaño, tipo y cantidad de módulos de UF de Inge desplegados en el sistema esta basado en comportamientos medios de los módulos de UF de Inge y basado en condiciones ambientales normales Inge no garantiza que los resultados producidos por el iSD y en ningún sistema desarrollado a partir de sus resultados vaya a satisfacer el funcionamiento deseado de las membranas o del funcionamiento requerido con relación a un emplazamiento concreto o a un proyecto ya sea conocido o no por Inge o el cliente. En particular, Inge no garantiza que el iSD o cualquier sistema desarrollado a partir de sus resultados sean válidos para ningún propósito concreto. Por consiguiente, Inge rechaza cualquier responsabilidad por pérdidas o daños resultantes del uso del iSD.

<b>Cliente:</b>	AP	<b>Diseñador:</b>	JFACC	<b>Comentarios:</b>
<b>Nombre proyecto:</b>	T. de agua de relave	<b>Empresa:</b>	Accuaproduct	
<b>Número proyecto:</b>	001	<b>No revisión:</b>	2.3.222	

### Consumibles y agua rechazo

Agua de rechazo				
Basado en	1 Racks	Volumen por etapa limpieza por rack [m³]	Número de ciclos por día	Volumen total por día [m³]
BW		8.3	39.5	328.2
Cáustica		17.4	1.0	17.4
Acida		17.4	1.0	17.4
Hipoclorito		17.4	0.3	5.8

Consumo químico CEB							
Basado en	1 Racks	Temperatura:	15.0°C	Alkalinity:	1.00 mmol/l	Conductividad:	7,500 µS/cm
	Químicos	Concentración [%]	pH objetivo/concentración en CEB	Densidad [g/cm³]	Total consumo diario: [l]	Total consumo diario: [kg]	
Caustico	NaOH	32.0	12.0	1.34	9.66	12.9	
Acido	H2SO4	37.0	2.3	1.31	5.53	7.3	
Oxidante	NaOCl	12.0	20 ppm 10 ppm	1.23	0.16	0.2	

Consumo químico coagulantes					
	Químicos	Concentración Me3+ [%]	Ratio medio dosificación Me3+:	Total consumo diario: [l]	Total consumo diario: [kg]
Coagulante:	PACl	5.3	1.3	70.93	85.1

Consumo químico CIP						
Basado en	1 Racks	T=20°C	Calidad del agua: Permeado RO			
	Químicos	Concentración [%]	Frecuencia (1/año)	Concentración	Consumo total por CIP [kg]	Consumo total por año [kg]
CIP 1	Oxalic	100.0	2	4,000 ppm	24.0	48.1
	H2SO4	37.0		pH 2.0	15.9	31.9
CIP 2	NaOCl	12.0		200 ppm	10.0	20.0
	NaOH	32.0	2	pH 12.5	16.5	33.0
CIP 3	Oxalic	100.0	2	4,000 ppm	24.0	48.1
	H2SO4	37.0		pH 2.0	15.9	31.9

Consumo energía						
Basado en	Caudal medio	150 m³/h	Caudal de BW:	552 m³/h	Caudal CEB:	288 m³/h
	Presión del sistema [mbar]	TMP [mbar]	Bomba / eficiencia motor [%]	Consumo energía diario [kWh]	Consumo específico de energía	
Filtración	50	450	70.0	71.60	0.022	
BW	250	1,592	70.0	23.70	0.007	
Inyección CEB	104	662		0.23	0.0001	
<b>Total</b>				<b>95.53</b>	<b>0.029</b>	

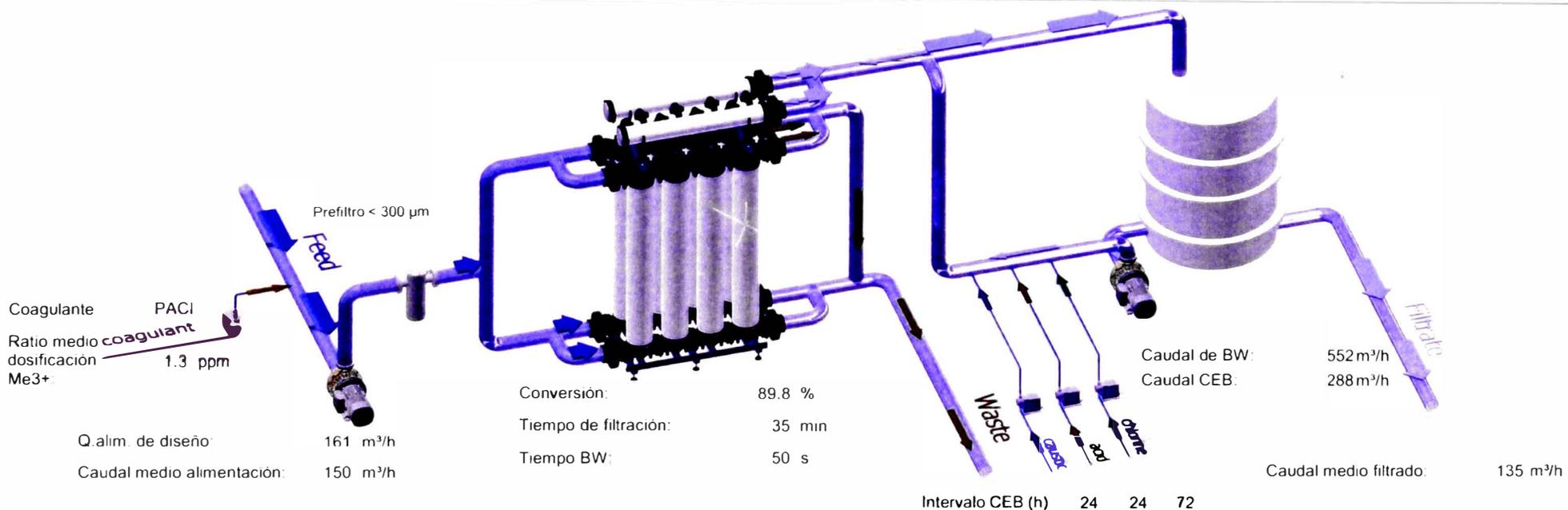
#### Exoneración:

Cualquier resultado obtenido por el Inge System Design Software (iSD) de Inge que incluye, pero no se limite a funcionamiento de la filtración, conversión, consumo de reactivos, consumo de energía, diseño de bombas, presión transmembrana, tamaño, tipo y cantidad de módulos de UF de Inge desplegados en el sistema esta basado en comportamientos medios de los módulos de UF de Inge y basado en condiciones ambientales normales Inge no garantiza que los resultados producidos por el iSD y en ningún sistema desarrollado a partir de sus resultados vaya a satisfacer el funcionamiento deseado de las membranas o del funcionamiento requerido con relación a un emplazamiento concreto o a un proyecto ya sea conocido o no por Inge o el cliente. En particular, Inge no garantiza que el iSD o cualquier sistema desarrollado a partir de sus resultados sean válidos para ningún propósito concreto. Por consiguiente, Inge rechaza cualquier responsabilidad por pérdidas o daños resultantes del uso del iSD.



a DuPont brand

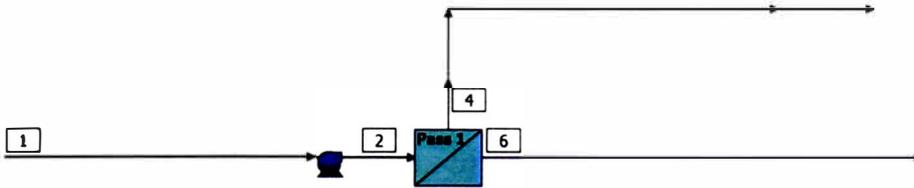
Fecha:	8/12/2021	Pretratamiento:	Prefilter < 300 µm	Q.alim. de diseño:	161 m³/h
Nombre proyecto:	T. de agua de relave mine	Módulos:	dizzer XL 0.9 MB 80 WT	Caudal medio alimentación:	150 m³/h
Número proyecto:	001	Sistema UF:	T-Rack 3.0	Caudal medio filtrado:	135 m³/h
Cliente:	AP	Configuración sistema:	Constant flux	Conversión:	89.8 %
Diseñador:	JFACC	Trains (min in filtration mode/design):	1	Flux bruto:	67.1 l/m²/h
Empresa:	Accuapduct	Nº total de trenes (n+x):	(n) 1	Caudal:	67.1 l/m²/h
Origen del agua:	WWTP effluent	Lines/BW systems:	1	Caudal (promedio):	67.1 l/m²/h
Turbidez:	20 NTU	Módulos por tren:	30	Q. medio agua de rechazo BW:	13.7 m³/h
SST:	20.0 ppm	Nº total de módulos:	30	Q medio agua de rechazo CEB:	1.7 m³/h
COD:	1.0 ppm	Comentarios:		Q medio total agua de rechazo:	15.4 m³/h
DOC:	- ppm				
Consumo KMnO4:	- ppm				



**Exoneración:**

Cualquier resultado obtenido por el Inge System Design Software (ISD) de Inge que incluye, pero no se limita a funcionamiento de la filtración, conversión, consumo de coagulante, consumo de energía, diseño de bombas, presión transmembrana, tamaño, tipo y cantidad de módulo de UF, satisfacer el funcionamiento deseado de las membranas o del funcionamiento requerido con relación a un emplazamiento concreto o a un proyecto ya sea conocido o no por Inge o el cliente. En particular, Inge no garantiza que el ISD o cualquier sistema desarrollado a partir de sus resultados sean válidos para ningún propósito concreto. Por consiguiente, Inge rechaza cualquier responsabilidad por pérdidas o daños resultantes del uso del ISD.

## Anexo 2. Proyección ósmosis inversa (RO) de tratamiento de agua de relaves

**RO Summary Report**  
**RO System Flow Diagram**


#	Description	Flow (m <sup>3</sup> /h)	TDS (mg/L)	Pressure (bar)
1	Raw Feed to RO System	135.0	4,891	0.0
2	Net Feed to Pass 1	134.9	4,893	14.6
4	Total Concentrate from Pass 1	40.5	16,253	12.8
6	Net Product from RO System	94.5	22.82	0.0

**RO System Overview**

Total # of Trains	1	Online =	1	Standby =	0	RO Recovery	70.0 %
System Flow Rate	(m <sup>3</sup> /h)	Net Feed =	135.0	Net Product =	94.5		

Pass	Pass 1
Stream Name	Stream 1
Water Type	Waste Water (With DuPont UF, SDI < 2.5)
Number of Elements	132
Total Active Area (m <sup>2</sup> )	4905
Feed Flow per Pass (m <sup>3</sup> /h)	134.9
Feed TDS* (mg/L)	4,893
Feed Pressure (bar)	14.6
Flow Factor Per Stage	0.85, 0.85
Permeate Flow per Pass (m <sup>3</sup> /h)	94.5
Pass Average flux (LMH)	19.3
Permeate TDS* (mg/L)	22.82
Pass Recovery	70.1 %
Average NDP (bar)	9.5
Specific Energy (kWh/m <sup>3</sup> )	0.72
Temperature (°C)	15.0
pH	8.8
Chemical Dose	-
RO System Recovery	70.0 %
Net RO System Recovery	70.0%

## Footnotes:

 \*Total Dissolved Solids includes ions, SiO<sub>2</sub>, and B(OH)<sub>3</sub>. It does not include NH<sub>3</sub> and CO<sub>2</sub>



**RO Flow Table (Stage Level) - Pass 1**

Stage	Elements	#PV	#Els per PV	Feed				Concentrate			Permeate			
				Feed Flow	Recirc Flow	Feed Press	Boost Press	Conc Flow	Conc Press	Press Drop	Perm Flow	Avg Flux	Perm Press	Perm TDS
				(m <sup>3</sup> /h)	(m <sup>3</sup> /h)	(bar)	(bar)	(m <sup>3</sup> /h)	(bar)	(bar)	(m <sup>3</sup> /h)	(LMH)	(bar)	(mg/L)
1	BW30XFR-400/34i	14	6	134.9	0.00	14.3	0.0	66.8	13.6	0.7	68.1	21.8	0.0	15.38
2	BW30XFR-400/34i	8	6	66.8	0.0	13.4	0.0	40.5	12.8	0.6	26.4	14.8	0.0	42.04

**RO Solute Concentrations - Pass 1**

Concentrations (mg/L as ion)						
	Feed	Concentrate		Permeate		
		Stage1	Stage2	Stage1	Stage2	Total
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K <sup>+</sup>	199.9	402.6	662.6	1.16	3.21	1.73
Na <sup>+</sup>	707.9	1,426	2,348	3.51	9.63	5.22
Mg <sup>+2</sup>	49.98	100.9	166.4	0.08	0.20	0.11
Ca <sup>+2</sup>	699.8	1,412	2,330	1.02	2.75	1.50
Sr <sup>+2</sup>	10.00	20.18	33.29	0.01	0.04	0.02
Ba <sup>+2</sup>	1.15	2.32	3.83	0.00	0.00	0.00
CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	5.70	12.38	21.49	0.00	0.00	0.00
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	50.35	100.1	163.0	0.54	1.45	0.79
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	10.00	20.03	32.79	0.16	0.44	0.24
F <sup>-</sup>	1.80	3.62	5.95	0.02	0.04	0.02
Cl <sup>-</sup>	1,143	2,303	3,792	5.81	16.01	8.65
Br <sup>-1</sup>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	2,000	4,036	6,658	3.06	8.21	4.50
PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SiO <sub>2</sub>	10.00	20.18	33.29	0.02	0.04	0.02
Boron	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO <sub>2</sub>	0.09	0.21	0.43	0.07	0.14	0.09
TDS*	4,891	9,861	16,253	15.38	42.04	22.82
Cond. μS/cm	7,646	14,167	21,766	31	84	46
pH	8.8	8.6	8.5	7.2	7.3	7.2

Footnotes:

\*Total Dissolved Solids includes ions, SiO<sub>2</sub> and B(OH)<sub>3</sub>. It does not include NH<sub>3</sub> and CO<sub>2</sub>.

**RO Design Warnings**

None

**Special Comments**

None

**RO Flow Table (Element Level) - Pass 1**



Stage	Element	Element Name	Recovery (%)	Feed Flow (m <sup>3</sup> /h)	Feed Press (bar)	Feed TDS (mg/L)	Conc Flow (m <sup>3</sup> /h)	Perm Flow (m <sup>3</sup> /h)	Perm Flux (LMH)	Perm TDS (mg/L)
1	1	BW30XFR-400/34i	9.4	9.64	14.3	4,893	8.73	0.90	24.3	9.89
1	2	BW30XFR-400/34i	10.0	8.73	14.1	5,398	7.86	0.87	23.5	11.46
1	3	BW30XFR-400/34i	10.6	7.86	14.0	5,995	7.03	0.84	22.5	13.46
1	4	BW30XFR-400/34i	11.3	7.03	13.9	6,706	6.23	0.80	21.4	16.03
1	5	BW30XFR-400/34i	12.1	6.23	13.8	7,561	5.48	0.75	20.3	19.43
1	6	BW30XFR-400/34i	12.9	5.48	13.7	8,598	4.77	0.70	18.9	24.04
2	1	BW30XFR-400/34i	7.9	8.36	13.4	9,862	7.70	0.66	17.7	27.62
2	2	BW30XFR-400/34i	8.0	7.70	13.3	10,701	7.08	0.62	16.6	32.21
2	3	BW30XFR-400/34i	8.1	7.08	13.2	11,629	6.51	0.57	15.4	37.88
2	4	BW30XFR-400/34i	8.1	6.51	13.1	12,650	5.98	0.53	14.2	44.95
2	5	BW30XFR-400/34i	8.1	5.98	13.0	13,764	5.50	0.48	13.0	53.84
2	6	BW30XFR-400/34i	7.9	5.50	12.9	14,968	5.06	0.44	11.7	65.11

**Footnotes:**

\*Total Dissolved Solids includes ions, SiO<sub>2</sub> and B(OH)<sub>3</sub>. It does not include NH<sub>3</sub> and CO<sub>2</sub>.

**RO Solubility Warnings**

Warning	Pass No
Stiff & Davis Stability Index > 0	1
CaSO <sub>4</sub> (% saturation) > 100	1
BaSO <sub>4</sub> (% saturation) > 100	1
SrSO <sub>4</sub> (% saturation) > 100	1
CaF <sub>2</sub> (% saturation) > 100	1
Anti-scalants may be required. Consult your anti-scalant manufacturer for dosing and maximum allowable system recovery.	1

**RO Chemical Adjustments**

	Pass 1 Feed	RO 1" Pass Conc
pH	8.8	8.5
Langelier Saturation Index	1.5	2.12
Stiff & Davis Stability Index	1.2	1.40
TDS* (mg/l)	4,891	16,253
Ionic Strength (molal)	0.12	0.39
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	50.35	163.0
CO <sub>2</sub> (mg/l)	0.08	0.42
CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup> (mg/L)	5.70	21.49
CaSO <sub>4</sub> (% saturation)	114.3	494.9
BaSO <sub>4</sub> (% saturation)	15,835	59,505
SrSO <sub>4</sub> (% saturation)	67.5	251.8
CaF <sub>2</sub> (% saturation)	98.1	2,300
SiO <sub>2</sub> (% saturation)	5.6	22.8
Mg(OH) <sub>2</sub> (% saturation)	0.36	0.31

**Footnotes:**

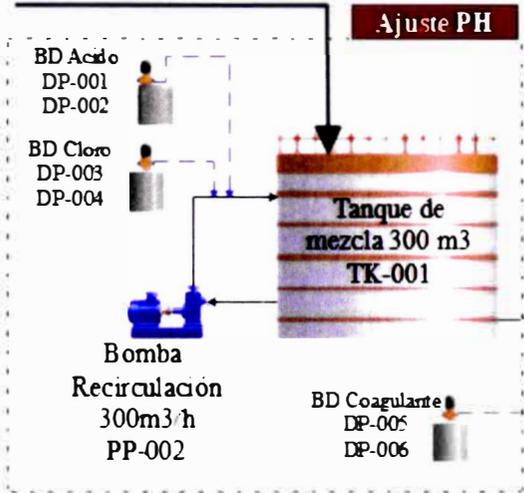
\*Total Dissolved Solids includes ions, SiO<sub>2</sub> and B(OH)<sub>3</sub>. It does not include NH<sub>3</sub> and CO<sub>2</sub>.

*Information provided is offered in good faith, but without guarantees. Users of such information assume all risk and liability and expressly release DuPont de Nemours Inc. and its subsidiaries, officers and agents from any and all liability. Because use conditions and applicable laws may differ from one location to another and may change with time, users of information set forth herein or generated during use of WAVE are responsible for determining suitability of the information. Neither DuPont nor its subsidiaries assume any liability for results obtained or damages incurred from the use of information provided and TO THE FULLEST EXTENT PERMITTED BY LAW, EXPRESSLY DISCLAIM ALL WARRANTIES, EXPRESSED OR IMPLIED, INCLUDING WARRANTIES OF MERCHANTABILITY AND FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. Users will not export or re-export any information or technology received from DuPont or its subsidiaries, or the direct products or designs based upon such information or technology in violation of the export-control or customs laws or regulations of any country, including those of the United States of America. DuPont™, DuPont Oval Logo, and all products denoted with ® or ™ are trademarks or registered trademarks of DuPont or its affiliates. Copyright © 2020 DuPont. DOWEX™, DOWEX MONOSPHERE™, DOWEX MARATHON™, DOWEX UPCORE™ are a trademark of The Dow Chemical Company used under license by DuPont.*

### Ancexo 3. Diagrama de flujo planta de tratamiento de agua de relaves mineros

# DIAGRAMA TRATAMIENTO DE AGUA DE RELAVES MINEROS

Efluente pre-tratado  
165 m<sup>3</sup>/h



## Pre-filtración

Filtros Anilla 130 um  
FL-001-002

## Ultrafiltración



Unidades de Ultrafiltración  
UF-001

Hacia poza de agua tratada

Tanque de agua osmotizada 200 m<sup>3</sup>  
TK-004

Tanque de agua ultrafiltrada 200 m<sup>3</sup>  
TK-002

## Osmosis Inversa

Filtros de Sedimentos 5um  
FL-002

Bomba Alimentación a Osmosis 135 m<sup>3</sup>/h  
PP-003

Unidades de Osmosis Inversa  
RO-001

## Antiincrustante

BD Metab sulfato  
DP-010-011

BD Antincrustante  
DP-008-009

Bombas de Alta Presión  
PU-004

Tanque de rechazos  
200 m<sup>3</sup>  
TK-003

## Anexo 4. Informe de operación de sistemas de ultrafiltración (UF) y osmosis inversa (RO)

Responsable: \_\_\_\_\_  
 Supervisor: \_\_\_\_\_

Fecha: 22/11/2019

Operador: \_\_\_\_\_

Agua de Alimentación:	línea 1	línea 2
Turbidez (NTU):	3.85	4.26
pH:	7.40	7.20
Cond. (µS/cm):	5155	5250

Agua Ultrafiltrada:	L1	L2
Turbidez (NTU):	0.06	0.06
pH:	7.42	7.42
Cond. (µS/cm):	5150	5244
SDI:	0	0

**Planta de Ultrafiltración:**

Equipo	Flujos (m3/h):	Turbidez salida (NTU)	Antes de BW			Despues BW			Equipo	Flujos (m3/h):	Turbidez salida (NTU)	Antes de BW			Despues BW		
			P(in)	P(sal)	ΔP	P(in)	P(sal)	ΔP				P(in)	P(sal)	ΔP	P(in)	P(sal)	ΔP
UF1	163.5	0.06	15.0	11.0	4			0	UF10	178.4	0.06	13.0	8.5	4.5	14.0	9.5	4.5
UF2	154.2	0.06	15.0	10.0	5			0	UF11	152.2	0.06	13.5	9.0	4.5	14.5	10.0	4.5
UF3	141.6	0.06	15.0	11.0	4			0	UF12	169.2	0.06	13.0	9.0	4	13.5	10.0	3.5
UF4	153.7	0.07	14.5	10.0	4.5			0	UF13	150.4	0.07	15.0	10.5	4.5	15.5	11.5	4
UF5	141.7	0.06	14.5	10.0	4.5			0	UF14	166.8	0.05	13.0	9.0	4	14.0	10.0	4
UF6	161.2	0.06	15.0	10.5	4.5			0	UF15	155.2	0.07	15.5	10.5	5	16.0	11.0	5
UF7	149.7	0.07	15.0	10.0	5			0	UF16	169.6	0.07	13.5	9.0	4.5	14.0	9.5	4.5
UF8	144.1	0.06	14.0	10.0	4			0	UF17	156.2	0.07	13.5	10.0	3.5	13.0	9.5	3.5
UF9	152.6	0.06	14.5	10.0	4.5			0	UF18	161.1	0.06	13.5	9.5	4	12.5	9.0	3.5

**CEB1: AUTOMATICO**

Tipo: Ácido	tren: 4,17,18
<b>Tiempos</b>	
Bot Inject: 85 seg	Top Inject: 20 seg
Exposicion: 15 min	
Bot Rinse 420 seg	Top Rinse: 60 seg

**CEB: AUTOMATICO**

Tipo:	tren:
<b>Tiempos</b>	
Bot Inject:	Top Inject:
Exposicion:	
Bot Rinse	Top Rinse:

**CEB2: AUTOMATICO**

Tipo: Alcalino	tren:
<b>Tiempos</b>	
Bot Inject: 85 seg	Top Inject: 20 seg
Exposicion: 15 min	
Bot Rinse 420 seg	Top Rinse: 60 seg

**CEB: AUTOMATICO**

Tipo:	tren:
<b>Tiempos</b>	
Bot Inject:	Top Inject:
Exposicion:	
Bot Rinse	Top Rinse:

**Filtración:**

Tiempo de filtración: 40 minutos
Tiempo de BW: 130 seg
Velocidad: 5

**CEB: AUTOMATICO**

Tipo:	tren:
<b>Tiempos</b>	
Bot Inject:	Top Inject:
Exposicion:	
Bot Rinse	Top Rinse:

1. Trabajaron por la mañana con 7 trenes, intercalando entre los 9 Ufs línea 2 en el modo automático. Por la tarde 8 de los 9 Ufs de la línea 1.
2. Se realizó medición de SDI del agua ultrafiltrada. El resultado es SDI: 0.0 tanto para la línea 1 y 2
3. Se realizó CEB1 al tren 4 en el modo automático ciclo 1505
4. Se realizó CEB1 al tren 17 en el modo automático ciclo 316
3. Se realizó CEB1 al tren 18 en el modo automático ciclo 307
4. Diferencia de presión en los filtros anillas:

Posición	Diferencia de presión (atm)	Diferencia de presión (atm)
	F. Anillas L1	F. Anillas L2
1	0.4	0.2
2	0.3	0.3
3	0.3	0.4
4	0.3	0.4
5	0.0	0.3

Responsable: \_\_\_\_\_  
Supervisor: \_\_\_\_\_

Fecha: 25/11/2019

Operador: \_\_\_\_\_

Agua de Alimentación:	línea 1	línea 2
Turbidez (NTU):		3.67
pH:		7.11
Cond.(µS/cm):		5242

Agua Ultrafiltrada:	L1	L2
Turbidez (NTU):	0.06	0.06
pH:	7.10	7.12
Cond. (µS/cm):	5190	5220
SDI:	0	0

Planta de Ultrafiltración:

Equipo	Flujos (m3/h):	Turbidez salida (NTU)	Antes de BW			Despues BW			Equipo	Flujos (m3/h)	Turbidez salida (NTU)	Antes de BW			Despues BW		
			P(in)	P(sal)	ΔP	P(in)	P(sal)	ΔP				P(in)	P(sal)	ΔP	P(in)	P(sal)	ΔP
UF1	158.1	0.06	16.0	11.0	5	16.0	11.5	4.5	UF10	176.0	0.06	15.5	10.0	5.5	14.5	9.5	5
UF2	150.7	0.06	15.0	9.5	5.5	14.5	9.5	5	UF11	148.9	0.06	15.5	10.5	5	14.5	9.5	5
UF3	150.0	0.06	16.0	11.0	5	16.0	11.0	5	UF12	158.8	0.06	15.0	10.5	4.5	13.5	10.5	3
UF4	158.4	0.06	16.0	10.0	6	16.0	10.5	5.5	UF13	151.1	0.06	17.5	12.5	5	15.0	11.5	3.5
UF5	150.8	0.06	16.5	10.5	6	16.0	10.5	5.5	UF14	163.8	0.06	15.0	10.0	5	14.0	10.0	4
UF6	167.0	0.06	16.0	10.5	5.5	16.0	10.5	5.5	UF15	170.7	0.06	17.0	11.5	5.5	15.5	11.5	4
UF7	154.8	0.06	18.0	11.0	7	17.5	11.0	6.5	UF16	164.0	0.06	15.0	10.5	4.5	14.5	10.5	4
UF8	148.8	0.06	15.5	8.5	7	16.0	9.0	7	UF17	156	0.06	15.5	11.5	4	15.5	11.5	4
UF9	156.4	0.06	15.5	9.5	6	15.5	9.5	6	UF18	161.8	0.06	14.0	11.0	3	14.5	10.5	4

CEB1: AUTOMATICO

Tipo: Ácido	tren: 12
<u>Tiempos</u>	
Bot Inyect: 85 seg	Top Inyect: 20 seg
Exposicion: 15 min	
Bot Rinse 420 seg	Top Rinse: 60 seg

CEB AUTOMATICO

Tipo:	tren:
<u>Tiempos</u>	
Bot Inyect:	Top Inyect:
Exposicion:	
Bot Rinse	Top Rinse:

CEB2: AUTOMATICO

Tipo: Alcalino	tren: 17
<u>Tiempos</u>	
Bot Inyect: 85 seg	Top Inyect: 20 seg
Exposicion: 15 min	
Bot Rinse 420 seg	Top Rinse: 60 seg

CEB AUTOMATICO

Tipo:	tren:
<u>Tiempos</u>	
Bot Inyect:	Top Inyect:
Exposicion:	
Bot Rinse	Top Rinse:

Filtración:

Tiempo de filtración: 40 minutos
Tiempo de BW: 130 seg
Velocidad: 5

CEB AUTOMATICO

Tipo:	tren:
<u>Tiempos</u>	
Bot Inyect:	Top Inyect:
Exposicion:	
Bot Rinse	Top Rinse:

- Trabajaron por la mañana con 8 trenes, intercalando entre los 9 Ufs línea 2 en el modo automático. Y 8 de los 9 Ufs línea 1.
- Se realizó medición de SDI del agua ultrafiltrada. El resultado es SDI: 0.0 tanto para la línea 1 y 2
- Se realizó CEB1 al tren 12 en el modo automático ciclo 333
- Se realizó CEB2 al tren 17 en el modo automático ciclo 338
- Diferencia de presión en los filtros anillas:

Posición	Diferencia de presión (atm) F. Anillas L1	Diferencia de presión (atm) F. Anillas L2
1	0.4	0.4
2	0.3	0.3
3	0.2	0.3
4	0.3	0.2
5	0.0	0.2

**REPORTE DE OPERACIÓN DE LAS UNIDADES DE OSMOSIS INVERSA - LÍNEA 2**

FECHA:		27/11/2019		RESPONSABLE:		SUPERVISOR:		OPERADOR:						
RO Nº	PRESION INGRESO FILTRO SEDIMENTOS psig	PRESION SALIDA FILTRO SEDIMENTOS psig	PRESION DESCARGA BOMBA ALTA psig	PRESION SALIDA DE TURBINA DE RECUPERACION psig	PRESION DE CONCENTRADO psig	PRESION DE PERMEADO psig	PRESION INTER ARRAY psig	CAUDAL DEL PERMEADO m³/h	CAUDAL DEL RECHAZO m³/h	POTENCIAL OXIDO-REDUCCION ORP mv	CONDUCTIVIDAD PRODUCTO 1ra ETAPA uS/cm	CONDUCTIVIDAD PRODUCTO 2da ETAPA uS/cm	CONDUCTIVIDAD PRODUCTO FINAL uS/cm	CONDUCTIVIDAD CONCENTRADO FINAL uS/cm
7	36	33	226	243	210	15,31	215,96	125,92	52,52	245,2	26	60	36	15920
8	36	33	211	226	200	14,1	200,06	126,19	49,13	81,3	31	80	37	16290
9	37	34	215	231	200	13,29	202,2	128,23	49,71	26,5	31	89	43	15530
10	37	33	206	228	192	12,23	197,18	126,35	48,49	227,0	26	58	31	15840
11	37	33	200	218	186	12,34	198,53	125,96	49,5	296,8	21	48	40	15240
12	36	33	223	235	198	14,57	203,36	126,32	48,84	202,9	34	94	46	15600
13	37	34	218	236	205	14,55	208,09	127,07	50,52	206,9	30	78	40	16470
RO Nº	FLUJO MBS LPH	FLUJO CAS LPH	NIVEL MBS GAL	NIVEL CAS GAL	PH ALIMENT.	CONDUCT. ALIMENT. uS/cm	TURBIDEZ ALIMENT. NTU	TEMPER. ALIMENT. ° C	SDI ALIMENT.	PORCENTAJE DE RECUPERACION %				
7	2,28	1,27	39	38	7,80	5156	0,08	16,5	0,0	70,6				
8	2,28	1,27	38	40	7,69	5110	0,06	16,5		72,0				
9	2,30	1,24	38,5	37	7,64	5211	0,06	16,5		72,1				
10	2,34	1,24	37,5	36,5	7,63	557	0,07	16,6		72,3				
11	2,30	1,27	40	39,5	7,68	5892	0,06	16,6		71,8				
12	2,30	1,24	43	48,5	7,64	5220	0,07	16,2		72,1	Se realizó limpieza del sensor de ORP del RO12, queda operativa la unidad.			
13	2,30	1,24	39	40,5	7,62	5178	0,06	16,7		71,6				



## REPORTE DE OPERACIÓN DE LAS UNIDADES DE OSMOSIS INVERSA - LÍNEA

2

FECHA:	25/11/19		RESPONSABLE:				SUPERVISOR:				OPERADOR:			
RO N°	PRESION INGRESO FILTRO SEDIMENTOS psig	PRESION SALIDA FILTRO SEDIMENTOS psig	PRESION DESCARGA BOMBA ALTA PRESION psig	PRESION SALIDA DE TURBINA DE RECUPERACION psig	PRESION DE CONCENTRADO psig	PRESION DE PERMEADO psig	PRESION INTER ARRAY psig	CAUDAL DEL PERMEADO m³/h	CAUDAL DEL RECHAZO m³/h	POTENCIAL OXIDO-REDUCCION ORP mv	CONDUCTIVIDAD PRODUCTO 1ra ETAPA uS/cm	CONDUCTIVIDAD PRODUCTO 2da ETAPA uS/cm	CONDUCTIVIDAD FINAL uS/cm	CONDUCTIVIDAD CONCENTRADA FINAL uS/cm
7	36	33	230	195	208	15.58	215.03	126.32	52.48	167.2	27	58	37	23252
8														
9	36	34	205	222	190	13.55	196.76	126.14	48.72	218.9	33	97	49	19080
10	37	34	200	220	185	12.85	190.20	128.41	47.70	199.8	29	65	35	16810
11	36	34	205	221	190	12.45	194.96	125.66	49.35	272.5	23	59	45	18030
12														
13	36	34	213	230	197	14.34	203.96	126.67	50.19	190.2	31	78	42	19900
RO N°	FLUJO MBS LPH	FLUJO CAS LPH	NIVEL MBS GAL	NIVEL CAS GAL	PH ALIMENT.	CONDUCT. ALIMENT. uS/cm	TURBIDIDAD ALIMENT. NTU	SDI ALIMENT.	PORCENTAJE DE RECUPERACION %	OBSERVACIONES				
7	2.30	1.24	32	37.0	7.02	5170	0.06	0.0	70.7%					
8														
9	2.30	1.24	38	26.0	7.1	5170	0.06		72.1%					
10	2.30	1.24	42	42	7.05	5127	0.06		72.9%					
11	2.30	1.24	45.0	35.0	7.02	5184	0.06		71.8%					
12														
13	2.30	1.24	37	27.5	7.10	5183	0.06		71.6%					